

فصل دوم

لایه‌ی فیزیکی

در این فصل پایین‌ترین لایه در مدل پروتکل‌مان را مورد بررسی قرار خواهیم داد، یعنی لایه‌ی فیزیکی. این لایه رابط‌های الکتریکی، رابط‌های زمان‌بندی و سایر رابط‌ها را، بر حسب آن‌که سیگنال‌های کدام یک از آن‌ها در کانال ارسال شده باشند، تعریف می‌کند. لایه‌ی فیزیکی پایه و اساسی است که شبکه بر روی آن ساخته می‌شود. ویژگی‌های انواع گوناگون کانال‌های فیزیکی (مانند گذردهی^۱، دیرکرد، و نرخ خطا) تعیین‌کننده‌ی کارایی می‌باشند، لذا خوب است که سفر خود به سرزمین شبکه را از همین نقطه آغاز کنیم.

بحث را با یک تحلیل نظری در مورد انتقال داده شروع می‌کنیم. طبیعت همواره محدودیت‌هایی را بر روی آن‌چه که قابل ارسال از طریق یک کانال می‌باشد، اعمال می‌کند. پس از آن، سه نوع رسانه‌ی انتقال را پوشش می‌دهیم: هدایت‌شده (سیم مسی و فیبر نوری)، بی‌سیم (امواج رادیویی زمینی^۲)، و ماهواره. هر کدام از این فناوری‌ها دارای ویژگی‌های متفاوتی هستند که بر روی طراحی و کارایی شبکه‌هایی که از آن‌ها استفاده می‌کنند، تأثیر می‌گذارند. این مطلب، اطلاعات پیش‌زمینه در مورد فناوری‌های کلیدی انتقال که در شبکه‌های نوین به کار می‌روند را تأمین می‌نماید.

سپس نوبت به تلفیق‌سازی دیجیتال می‌رسد، که تماماً درباره‌ی چگونگی تبدیل سیگنال‌های آنالوگ به بیت‌های دیجیتال و بازگشت مجدد آن‌ها به حالت اولیه است. پس از آن به نظام‌های تسهیم خواهیم پرداخت، با بررسی دقیق این امر که چگونه ارتباط‌های متعدد می‌توانند بر روی یک رسانه‌ی انتقال واحد، به طور همزمان قرار بگیرند، بدون آن‌که با یکدیگر دچار تداخل شوند.

و سرانجام، سه سیستم ارتباطی نمونه که در عمل برای شبکه‌های کامپیوتری پهن‌بند به کار می‌روند را ملاحظه خواهیم نمود: سیستم تلفن (ثابت)، سیستم تلفن موبایل، و سیستم تلویزیون کابلی. هر یک از این موارد در عمل، مهم هستند، لذا حجم فضای مناسبی را برای هر کدام اختصاص خواهیم داد.

۱-۲ مبنای نظری در ارتباطات داده

با تغییر دادن بعضی ویژگی‌های فیزیکی مانند ولتاژ و جریان، انتقال اطلاعات در سیم‌ها می‌تواند انجام شود. با نمایش مقدار این ولتاژ یا جریان به صورت یک تابع تک - مقداری بر حسب زمان، یعنی $f(t)$ ، می‌توانیم رفتار سیگنال را مدل کرده و به لحاظ ریاضی آن را تحلیل نماییم. این چنین تحلیلی، موضوع بخش‌های بعد می‌باشد.

۱-۱-۲ تحلیل فوریه

در اوایل قرن نوزدهم، ریاضیدانی فرانسوی به نام ژان باتیست فوریه^۱، ثابت کرد که هر تابع تناوبی با عملکرد منطقی مانند $g(t)$ ، با دوره‌ی تناوب T ، می‌تواند به صورت مجموعی (احتمالاً نامتناهی) از تعدادی توابع سینوسی و کسینوسی ساخته شود:

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft) \quad (۱-۲)$$

به طوری که در این عبارت، $f = 1/T$ بوده و عبارت‌است از فرکانس پایه، a_n و b_n دامنه‌ی^۲ سینوس و کسینوس مربوط به n امین هارمونیک (جمله)، و c یک مقدار ثابت است. چنین تجزیه‌ای، یک سری فوریه نامیده می‌شود. با استفاده از سری‌های فوریه می‌توان تابع را بازسازی نمود. به این صورت که اگر دوره‌ی تناوب T را بدانیم و دامنه هم داده شده باشد، با انجام مجموع‌های معادله‌ی (۱-۲)، تابع اولیه بر حسب زمان را می‌توان یافت.

یک سیگنال داده که یک بازه‌ی زمانی متناهی داشته باشد، که البته همه‌ی سیگنال‌های داده چنین هستند، فقط با این تصور قابل اداره است که کل الگو بارها و بارها، برای همیشه، تکرار شوند (به عبارت دیگر، فاصله‌ی از T تا $2T$ درست مشابه با فاصله‌ی از 0 تا T است، و همین طور تا آخر). امکان محاسبه‌ی دامنه‌های a_n برای هر $g(t)$ وجود دارد به این ترتیب که هر دو طرف معادله‌ی (۱-۲) را در $\sin(2\pi kft)$ ضرب کرده و سپس انتگرال از 0 تا T را حساب می‌کنیم. بنابراین

$$\int_0^T \sin(2\pi kft) \sin(2\pi nft) dt = \begin{cases} 0 & \text{for } k \neq n \\ T/2 & \text{for } k = n \end{cases}$$

و تنها یک جمله از حاصل جمع، باقی می‌ماند: a_n . حاصل جمع b_n کاملاً ناپدید می‌گردد. به همین ترتیب با ضرب کردن معادله‌ی (۱-۲) در $\cos(2\pi kft)$ و انتگرال‌گیری از 0 تا T ، می‌توانیم b_n را استخراج کنیم. با انتگرال‌گیری از دو طرف معادله، می‌توانیم c را پیدا کنیم. نتایج حاصل از انجام این عملیات به شکل زیر هستند:

1. Jean-Baptiste Fourier

2. Amplitude

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt \quad c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

۲-۱-۲ سیگنال‌های با پهنای باند محدود

ارتباط میان تمام این مسائل با ارتباطات داده آن است که کانال‌های حقیقی بر سیگنال‌های با فرکانس‌های متفاوت، به طرز متفاوت تأثیر می‌گذارند. بگذارید یک مثال مشخص را مد نظر قرار دهیم: انتقال کاراکتر ASCII "b" که در یک بایت ۸-بیتی کد شده است. الگوی بیتی که انتقال می‌یابد، 01100010 است. سمت چپ شکل ۲-۱(الف)، ولتاژ خروجی کامپیوتر انتقال‌دهنده را نشان می‌دهد. تحلیل فوریه‌ی این سیگنال منتهی به ضرایب زیر می‌شود:

$$a_n = \frac{1}{\pi n} [\cos(\pi n/4) - \cos(3\pi n/4) + \cos(6\pi n/4) - \cos(7\pi n/4)]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n} [\sin(3\pi n/4) - \sin(\pi n/4) + \sin(7\pi n/4) - \sin(6\pi n/4)]$$

$$c = 3/4$$

دامنه‌های ریشه‌ی میانگین مجذور^۱، یعنی $\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ ، برای چند جمله‌ی اول در سمت راست شکل ۲-۱(الف) نشان داده شده. این مقادیر قابل توجه هستند زیرا مجذور آن‌ها متناسب است با انرژی انتقال یافته در فرکانس متناظر.

هیچ‌کدام از امکانات انتقال نمی‌توانند سیگنال‌ها را بدون از دست دادن مقداری توان در فرآیند انتقال، انتقال دهند. اگر تمام مؤلفه‌های فوریه به یک اندازه کاهش یابند، دامنه‌ی سیگنال حاصل کاهش می‌یابد اما دچار اعوجاج نمی‌شود [به عبارت دیگر، همان شکل زیبای مربعی مشابه شکل ۲-۱(الف) را حفظ می‌کند]. متأسفانه همه‌ی بسترهای انتقال، مؤلفه‌های مختلف فوریه را به میزان‌های متفاوتی کاهش می‌دهند، بنابراین سبب اعوجاج می‌شوند. معمولاً برای یک سیم، اغلب دامنه‌ها به صورت بدون اعوجاج، از 0 تا فرکانسی مانند f_c ، انتقال می‌یابند [اندازه‌گیری بر حسب سیکل (چرخه) بر ثانیه یا هرتز (Hz) می‌باشد]، به طوری که همه‌ی فرکانس‌های بالای این فرکانس قطع^۲، ضعیف می‌شوند. پهنای محدوده‌ی فرکانسی که بدون تضعیف شدید منتقل شده باشد، **پهنای باند**^۳ نامیده می‌شود. در عمل، محل قطع شدن واقعاً تیز^۴ نیست، لذا غالباً پهنای باند ارائه شده از 0 است تا فرکانسی که در آن فرکانس، توان رسیده به نصف تقلیل یافته است.

پهنای باند یک ویژگی فیزیکی از رسانه‌ی انتقال است که به عنوان مثال به نحوه‌ی ساخت، ضخامت، و طول یک سیم یا فیبر بستگی دارد. اغلب اوقات از فیلترها استفاده می‌شود تا پهنای باند یک سیگنال، محدودتر شود. به عنوان مثال، کانال‌های بی‌سیم 802.11 اجازه دارند تقریباً تا 20 MHz را

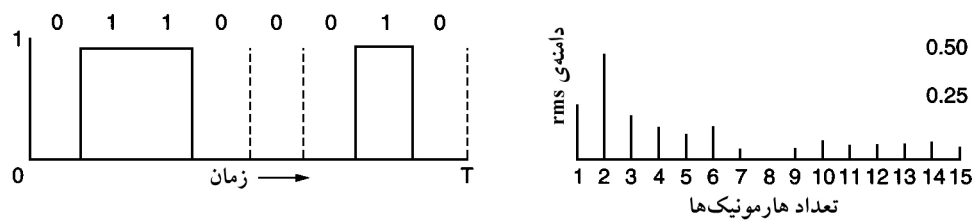
1. Root-mean-square (rms)

2. Cutoff

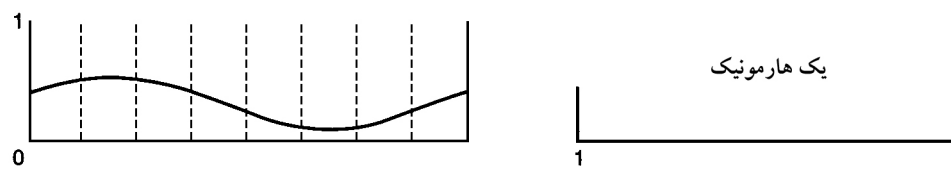
3. Bandwidth

4. Sharp

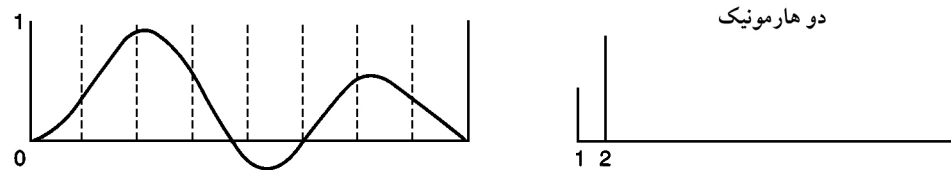
۴ فصل دوم



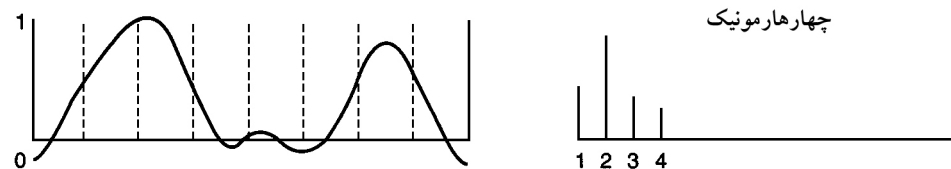
(الف)



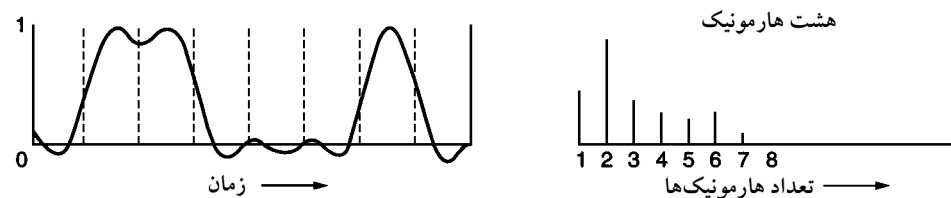
(ب)



(پ)



(ت)



(ث)

شکل ۱-۲ (الف) یک سیگنال دودویی و دامنه‌های فوریه برای ریشه‌ی میانگین مجذور آن، (ب) تا (ث) تقریب‌های بعدی برای سیگنال اولیه.

مورد استفاده قرار دهند، لذا رادیوهای 802.11، پهنای باند سیگنال را برای این اندازه، فیلتر می‌کنند. به عنوان مثالی دیگر، هر یک از کانال‌های سستی (آنالوگ) تلویزیون، ۶ مگاهرتز را بر روی یک سیم یا در هوا اشغال می‌کنند. این فیلترسازی امکان می‌دهد تا سیگنال‌های بیشتری، یک ناحیه از طیف را مورد اشتراک قرار دهند. این امر راندمان کلی سیستم را بهبود می‌دهد. به این معنا که محدوده‌ی فرکانس برای بعضی سیگنال‌ها، از صفر شروع نخواهد شد، اما این مطلب مهم نیست. پهنای باند هنوز هم عبارت‌است از پهنای باند فرکانس‌هایی که عبور می‌کنند، و اطلاعاتی که می‌توانند حمل گردند فقط به این پهنای بستگی دارند و به فرکانس‌های آغازی و پایانی بستگی ندارند. سیگنال‌هایی که از فرکانس 0 تا یک فرکانس بیشینه کار می‌کنند، سیگنال‌های **باندپایه**^۱ نامیده می‌شوند. سیگنال‌هایی که جابجا می‌شوند (یعنی شیفت پیدا می‌کنند) تا حوزه‌ی بالاتری از فرکانس‌ها را اشغال نمایند (یعنی حالتی که برای تمام انتقال‌های بی‌سیم وجود دارد)، سیگنال‌های **باند عبوری**^۲ نامیده می‌شوند.

اکنون بگذارید ببینیم اگر پهنای باند آن‌قدر کم گردد که فقط پایین‌ترین فرکانس‌ها منتقل شوند، سیگنال شکل ۲-۱ (الف) چگونه به نظر خواهد رسید [به عبارت دیگر، اگر تابع با چند جمله‌ی اول از معادله‌ی (۲-۱) تقریب گردد]. شکل ۲-۱ (ب) سیگنال حاصل از یک کانال را نشان می‌دهد که فقط به اولین هارمونیک (یعنی f که هارمونیک اصلی است) اجازه‌ی عبور می‌دهد. به همین ترتیب شکل‌های ۲-۱ (پ) تا (ث) طیف‌ها و توابع بازسازی شده برای کانال‌های با پهنای باند بالاتر را نشان می‌دهند. هدف اصلی در انتقال دیجیتال، رسیدن یک سیگنال است به‌طوری‌که به قدر کافی پای‌بندی در بازسازی دنباله‌ی بیت‌ها، به همان صورتی که ارسال شده‌اند، وجود داشته باشد. هم‌اکنون این کار به آسانی در شکل ۲-۱ (الف) انجام می‌شود، لذا استفاده از هارمونیک‌های بیشتر برای دستیابی به نسخه‌های تکراری^۳ دقیق‌تر، بی‌فایده است.

با فرض آن‌که نرخ بیت b بیت بر ثانیه باشد، زمان لازم برای ارسال ۸ بیت، در مثال ما (که ۱ بیت در هر زمان ارسال می‌شود) $8/b$ ثانیه است. بنابراین فرکانس اولین هارمونیک این سیگنال، $b/8$ هرتز است. یک خط تلفن معمولی، که غالباً **خط از درجه‌ی صوتی**^۴ نامیده می‌شود، دارای یک فرکانس قطع، از ۳۰۰۰ هرتز به بالا است که به طور مصنوعی ایجاد شده. وجود چنین محدودیتی به این معناست که تعداد بالاترین هارمونیک‌هایی که عبور می‌کنند، دقیقاً $3000/(b/8)$ یا $000/b, 24$ می‌باشد (ناحیه‌ی قطع، تیز نیست).

به ازای بعضی نرخ‌های داده، اعداد همان‌طور هستند که در شکل ۲-۲ نشان داده شده. از این اعداد معلوم می‌شود که تلاش برای ارسال 9600 bps از طریق یک خط تلفن صوتی، شکل ۲-۱ (الف) را به شکلی مشابه ۲-۱ (پ) می‌برد که باعث می‌شود پذیرش جریان بیت دودویی اولیه، کاری دقیق و دشوار گردد. واضح است که در نرخ‌های داده‌ی بسیار بالاتر از 38.4 kbps، کلاً هیچ امیدی برای

1. Baseband 2. Passband 3. Replica 4. Voice-grade line

تعداد هارمونیک‌های ارسال شده	اولین هارمونیک (Hz)	زمان (msec)	بیت در ثانیه (Bps)
80	37.5	26.67	300
40	75	13.33	600
20	150	6.67	1200
10	300	3.33	2400
5	600	1.67	4800
2	1200	0.83	9600
1	2400	0.42	19200
0	4800	0.21	38400

شکل ۲-۲ رابطه‌ی میان نرخ داده و هارمونیک‌ها برای مثالمان.

سیگنال‌های دودویی وجود ندارد، حتی اگر امکان انتقال، به صورت کاملاً بدون نویز وجود داشته باشد. به عبارت دیگر محدود کردن پهنای باند، نرخ داده را محدود می‌سازد، حتی در مورد کانال‌های کامل و بی‌عیب. اما نظام‌های کدگذاری‌ای که از چندین سطوح ولتاژ استفاده می‌کنند همچنان وجود دارند و می‌توانند به نرخ‌های داده‌ی بالاتری برسند. بعداً در همین فصل به این مورد خواهیم پرداخت. سردرگمی زیادی در مورد پهنای باند وجود دارد زیرا این واژه از دید مهندسان برق و دانشمندان کامپیوتر دارای معانی متفاوتی می‌باشد. از نظر مهندسان برق، پهنای باند (از نوع آنالوگ) یک کمیت است که با Hz اندازه‌گیری می‌شود (همان‌طوری که قبلاً گفتیم). از دید دانشمندان کامپیوتر، پهنای باند (دیجیتال) عبارت است از نرخ داده‌ی بیشینه‌ی یک کانال، یعنی کمیتی که بر اساس بیت بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. چنین نرخ داده‌ای، نتیجه‌ی نهایی استفاده از پهنای باند آنالوگ یک کانال فیزیکی، برای انتقال دیجیتال است. این دو کمیت چنانکه بعداً خواهیم گفت، با هم مرتبط هستند. در این کتاب، از محتوای متن روشن خواهد بود که منظورمان پهنای باند آنالوگ (بر حسب هرتز) است یا پهنای باند دیجیتال (بر حسب بیت بر ثانیه).

۲-۱-۳ حداکثر نرخ داده‌ی یک کانال

در اوایل سال ۱۹۲۴، یک مهندس AT&T به نام هنری نایکوئیست^۱، متوجه شد که حتی یک کانال سالم و بی‌عیب نیز دارای ظرفیت انتقال محدودی می‌باشد. او معادله‌ای استخراج نمود که بیانگر نرخ داده‌ی بیشینه برای یک کانال فاقد نویز با یک پهنای باند متناهی بود. در سال ۱۹۴۸، کلود شانون^۲ کار نایکوئیست را گسترش بیشتری داد، یعنی آن را از وضعیت یک کانال، به حالت نویز تصادفی (یعنی حالت ترمودینامیکی) رساند (Shannon, ۱۹۴۸). این مقاله مهم‌ترین مقاله در کل نظریه‌ی اطلاعات است. در اینجا فقط به اختصار، نتایج کلاسیک آن را جمع‌بندی می‌کنیم.

1. Henry Nyquist

2. Claude Shannon

نایکوئیست ثابت کرد که اگر یک سیگنال دلخواه از یک فیلتر کم - عبور با پهنای باند B ، جریان داشته باشد، سیگنال فیلتر شده می‌تواند به وسیله‌ی ساختن فقط (و دقیقاً) $2B$ نمونه در ثانیه، بازسازی شود. نمونه‌سازی خط با سرعتی بیشتر از $2B$ برابر در هر ثانیه، کار بی‌فایده‌ای است زیرا مؤلفه‌هایی با فرکانس بالاتر که چنین نمونه‌سازی‌ای قادر به بازیافت آن‌هاست، تا زمان انجام این نمونه‌سازی، فیلتر شده‌اند (یعنی با فیلتر کردن، جدا شده‌اند). اگر سیگنال از V عدد سطح مجزا تشکیل شده باشد، نظریه‌ی نایکوئیست دلالت دارد بر اینکه:

$$(۲-۲) \quad 2B \log_2 V \text{ bits/sec} = \text{نرخ داده‌ی بیشینه}$$

به عنوان مثال، یک کانال 3-kHz ای فاقد نویز قادر به انتقال سیگنال‌های دودویی (یعنی دو-سطحی) با نرخ بیشتر از 6000 bps نمی‌باشد.

تا اینجا فقط کانال‌های فاقد نویز را مورد نظر قرار داده‌ایم. در صورت وجود نویز تصادفی، شرایط به سرعت خراب می‌شود. و البته همواره به واسطه‌ی حرکت مولکول‌ها در سیستم، نویز تصادفی (حرارتی) وجود دارد. مقدار نویز حرارتی موجود، از طریق نسبت توان سیگنال به توان نویز، اندازه‌گیری شده و SNR نامیده می‌شود (نسبت سیگنال - به - نویز^۱). اگر توان سیگنال را با S و توان نویز را با N نشان دهیم، نسبت سیگنال - به - نویز عبارت‌است از S/N . معمولاً این نسبت با مقیاس لگاریتمی و به صورت کمیت $10 \log_{10} S/N$ بیان می‌شود زیرا می‌تواند تغییراتی در یک محدوده‌ی بسیار وسیع داشته باشد. واحدهای این مقیاس لگاریتمی، دسی‌بل^۲ (dB) نامیده می‌شوند، که "decibel" یعنی 10 و "bel" نیز به افتخار الکساندر گراهام بل^۳ که تلفن را ابداع نمود، انتخاب شده است. یک نسبت S/N از 10 عبارت‌است از 10 dB، یک نسبت 100 عبارت‌است از 20 dB، یک نسبت 1000 عبارت‌است از 30 dB، و به همین ترتیب تا آخر. اغلب اوقات، سازندگان تقویت کننده‌های استریو، پهنای باند (یا به عبارتی محدوده‌ی فرکانسی‌ای) که محصولات آن‌ها در این محدوده، شکل خطی دارند را با دادن فرکانس 3 dB به هر طرف، مشخص می‌نمایند. این‌ها نقاطی هستند که فاکتور تقویت‌کننده در این نقاط تقریباً نصف می‌شود (چون $10 \log_{10} 0.5 \approx -3$).

نتیجه‌ی اصلی از قانون شانون آن است که نرخ داده‌ی بیشینه یا ظرفیت^۴ یک کانال دارای نویز که پهنای باند آن B هرتز است، و نسبت سیگنال - به - نویز در آن S/N می‌باشد، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$(۳-۲) \quad B \log_2 (1 + S/N) = \text{حداکثر تعداد بیت بر ثانیه (bits/sec)}$$

این رابطه بهترین ظرفیت‌هایی که کانال‌های واقعی می‌توانند داشته باشند را به ما می‌گوید. به عنوان مثال، ADSL (خط دیجیتالی نامتقارن یک مشترک^۵) که دسترسی به اینترنت از طریق خطوط تلفن را

1. Signal-to-Noise Ratio 2. Decibel 3. Alexander Graham Bell 4. Capacity
5. Asymmetric Digital Subscriber Line

تأمین می‌کند، از پهنای باندی در حدود 1 MHz استفاده می‌کند. میزان SNR به شدت وابسته است به فاصله‌ی منزل از خطوط تلفن، و SNR در حدود 40 dB برای خطوط کوتاه از ۱ تا ۲ کیلومتر، بسیار خوب است. با چنین ویژگی‌هایی، کانال هرگز نمی‌تواند بیشتر از 13 Mbps انتقال دهد، و هیچ فرقی هم نمی‌کند که سطوح سیگنال مورد استفاده چقدر کم یا زیاد باشند، و یا آن‌که فرکانس نمونه‌برداری، مرتب و یا به ندرت باشد. در عمل، ADSL تا 12 Mbps مشخص می‌گردد، هر چند که کاربران غالباً نرخ‌های کمتری را مشاهده می‌کنند. چنین نرخ داده‌ای در واقع خیلی خوب است، به طوری که با گذشت بیش از ۶۰ سال از روش‌های ارتباطی، فاصله‌ی میان ظرفیت شانون و ظرفیت سیستم‌های واقعی بسیار کاهش یافته است.

نتیجه‌ی حاصل از نظریه‌ی شانون، از مباحث نظریه‌ی اطلاعات به دست آمده و به هر کانالی که نویز حرارتی دارد، اعمال می‌شود. با مثال‌های نقیض بایستی همانند رده‌ی ماشین‌های با حرکت دائمی رفتار شود.^۱ برای آن‌که ADSL از 13 Mbps فراتر رود، بایستی یا SNR بهبود یابد (مثلاً با گذاشتن تکرار کننده‌های^۲ دیجیتال در خطوطی که به مصرف‌کنندگان، نزدیک‌تر هستند) یا از پهنای باند بیشتری استفاده شود، یعنی همان کاری که در جهت تکامل به سمت ADSL2+ انجام شده است.

۲-۲ رسانه‌ی انتقال هدایت‌یافته

هدف از لایه‌ی فیزیکی عبارت است از حمل بیت‌ها از یک ماشین به ماشین دیگر. به منظور انجام انتقال واقعی می‌توان از انواع رسانه‌ی فیزیکی استفاده نمود. هر کدام از این رسانه‌ها به لحاظ پهنای باند، تأخیر، هزینه، و سهولت در نصب و نگهداری، جایگاه ویژه‌ی خود را یافته‌اند. رسانه کابله به دو گروه رسانه‌ی هدایت شده^۳ مانند سیم مسی و فیبر نوری، و رسانه‌ی هدایت نشده^۴ مانند بی‌سیم زمینی، ماهواره، و لیزرهای گذرنده از هوا^۵، تقسیم می‌شوند. در این بخش رسانه‌ی هدایت شده، و در بخش بعد رسانه‌ی هدایت نشده را مورد ملاحظه قرار خواهیم داد.

۱-۲-۲ رسانه‌ی مغناطیسی

یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای حمل داده‌ها از یک کامپیوتر به کامپیوتر دیگر، نوشتن آن‌ها بر روی یک نوار مغناطیسی یا رسانه‌ی قابل حمل دیگر می‌باشد (از قبیل DVD هایی که می‌توان بر روی آن‌ها ضبط نمود). به این ترتیب می‌توان نوار یا دیسک‌ها را به صورت فیزیکی به ماشین مقصد، حمل نموده

۱. ماشین‌های با حرکت دائمی (perpetual motion machines). ماشین‌هایی فرضی هستند که کار مفید خود را به طور نامحدود ادامه می‌دهند. تعبیر کلی‌تر آن است که ماشین‌هایی فرضی هستند که کار یا انرژی‌ای که تولید می‌کنند، بیشتر از مصرف‌شان است، چه عملکرد نامحدود داشته باشند و چه نداشته باشند. این ماشین‌ها، در یک سیستم بسته، قانون اول ترمودینامیک یا قانون دوم و یا هر دو را نقض می‌کنند (مترجم).

2. Repeater 3. Guided media 4. Unguided media 5. Lasers through the air

و داده‌ها را مجدداً خواند. گرچه این روش به اندازه‌ی استفاده از ماهواره‌ی ارتباطی همگام با زمین^۱، پیشرفته نمی‌باشد ولی غالباً به لحاظ هزینه موثرتر است به‌خصوص برای کاربردهایی که پهنای باند بالا یا هزینه‌ی حمل به ازای هر بیت، عامل کلیدی در آن‌هاست.

یک محاسبه‌ی ساده، این نکته را روشن می‌سازد. یک نوار اولتریوم^۲ با استانداردهای صنعت، توانایی نگهداری ۸۰۰ گیگابایت را دارد. یک جعبه‌ی ۶۰ × ۶۰ × ۶۰ سانتی‌متر، می‌تواند تقریباً ۱۰۰۰ عدد از این نوارها را در خود جای دهد، که ظرفیت کلی آن بالغ بر ۸۰۰ ترابایت، یا ۶۴۰۰ ترابیت (6.4 پتابیت) می‌شود. یک جعبه‌ی نوار را می‌توان ظرف ۲۴ ساعت، به وسیله‌ی پُست سریع‌السیر فدرال و شرکت‌های دیگر، به هر نقطه‌ای در ایالات متحده تحویل داد. پهنای باند موثر این انتقال عبارت‌است از ۶۴۰۰ ترابیت در ۸۶،۴۰۰ ثانیه، یا کمی بیشتر از 70 Gbps. اگر از طریق جاده فاصله تا مقصد تنها یک ساعت باشد، پهنای باند تا 1700 Gbps افزایش می‌یابد. هیچ کامپیوتری به این عدد، حتی نزدیک هم نمی‌تواند بشود. البته شبکه‌ها سریع‌ترند، اما از طرف دیگر، تراکم نوارها نیز در حال افزایش می‌باشد. اکنون اگر به هزینه نظر کنیم، به تصویر مشابهی می‌رسیم. هزینه‌ی یک نوار اولتریوم، هنگامی که به صورت عمده خریداری شود، در حدود ۴۰ دلار است. یک نوار حداکثر ۱۰ بار می‌تواند مورد استفاده‌ی مجدد قرار بگیرد، بنابراین هزینه‌ی نوار تقریباً ۴۰۰۰ دلار در هر جعبه، به ازای هر بار استفاده خواهد بود. به این عدد، ۱۰۰۰ دلار دیگر بابت هزینه‌ی حمل کالا اضافه کنید (احتمالاً خیلی کمتر از این مقدار می‌شود) تا به عدد ۵۰۰۰ دلار بابت حمل 800 TB برسید. این مقدار به معنای حمل یک گیگابایت به ازای کمی بیش از نیم سنت است. هیچ شبکه‌ای قادر به غلبه بر این عدد نیست. نتیجه‌ای که از این داستان عایدمان می‌شود آن است که:

هرگز پهنای باند یک واگن باری پُر از نوار که در حال پیمودن یک بزرگراه است را دست کم نگیرید.

۲-۲-۲ زوج سیم‌های به هم تابیده

هرچند که مشخصه‌های پهنای باند در نوار مغناطیسی، جالب است ولی مشخصه‌های تأخیری ضعیفی دارد. زمان انتقال بر حسب دقیقه یا ساعت اندازه‌گیری می‌شود، نه میلی‌ثانیه. در بسیاری از کاربردها نیاز به اتصال برخط وجود دارد. یکی از قدیم‌ترین و همچنین رایج‌ترین رسانه‌های انتقال، زوج سیم به هم تابیده^۳ است. یک زوج سیم تشکیل شده از دو سیم مسی عایق‌دار و معمولاً با ضخامتی در حدود ۱ میلی‌متر. سیم‌ها به شکل مارپیچ به هم تابیده شده‌اند، درست مانند یک مولکول DNA. عمل به هم تابیدن به این دلیل انجام می‌شود که دو سیم موازی، تشکیل یک آنتن خوب را می‌دهند. وقتی سیم‌ها به هم تابیده می‌شوند، امواج ناشی از زوج‌های مختلف، تأثیر یکدیگر را از بین می‌برند و به این ترتیب سیم پرتو کم‌اثرتری را ایجاد می‌کند. در یک زوج سیم به هم تابیده معمولاً یک سیگنال به

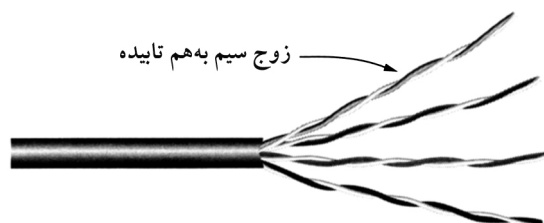
1. Geosynchronous 2. Ultrium 3. Twisted pair

صورت تفاوت ولتاژ میان دو سیم، حمل می‌شود. این امر ایمنی بهتری در برابر نویز بیرونی فراهم می‌کند، زیرا نویز می‌خواهد هر دو سیم را به طور یکسان تحت تأثیر قرار دهد، بنابراین تفاضل آن‌ها بدون تغییر می‌ماند.

متداول‌ترین کاربرد برای زوج سیم به‌هم تابیده، سیستم تلفن است. تقریباً همه‌ی تلفن‌ها، با زوج سیم به‌هم تابیده به شرکت تلفن (telco) متصلند. هم تماس‌های تلفنی و هم دسترسی ADSL به اینترنت با این خطوط انجام می‌شود. زوج سیم می‌تواند تا چندین کیلومتر بدون نیاز به تقویت کننده، کار کند اما برای مسافت‌های طولانی‌تر، سیگنال بیش از اندازه ضعیف شده و احتیاج به تکرارکننده است. هنگامی که زوج سیم‌های متعددی به صورت موازی در مسافت‌های زیاد کار می‌کنند، مثل زمانی که همه‌ی سیم‌ها از یک ساختمان آپارتمانی به دفتر شرکت تلفن می‌رسند، به همدیگر کلاف می‌شوند و درون یک غلاف محافظ، محصور می‌گردند. زوج سیم‌های داخل این کلاف‌ها اگر به هم تابیده نباشند، در یکدیگر تداخل می‌کنند. در قسمت‌هایی از دنیا که خطوط تلفن بر روی تیرک‌هایی در بالای سطح زمین قرار دارند، مشاهده‌ی کلاف‌هایی با قطر چند سانتی‌متر، امری عادی است.

از زوج سیم‌های به‌هم تابیده می‌توان برای انتقال اطلاعات آنالوگ یا دیجیتال استفاده نمود. پهنای باند بستگی دارد به ضخامت سیم و مسافت پیموده شده، اما در بسیاری از موارد می‌توان به چند مگابیت بر ثانیه، به ازای چند کیلومتر، دست یافت. زوج سیم‌های مسی به دلیل کارایی مناسب و هزینه‌ی کم، در ابعاد گسترده‌ای استفاده می‌شوند و به نظر می‌رسد که تا سال‌ها بعد هم همین روال ادامه یابد. چندین نوع کابل‌بندی در زوج سیم‌ها وجود دارند. نوع معمولی که در بسیاری از ساختمان‌های دفتری اجرا می‌شود، کابل‌بندی رده‌ی ۵، یا "Cat 5" نام دارد. یک زوج سیم به‌هم تابیده‌ی رده‌ی ۵، از دو سیم عایق‌دار تشکیل شده که به نرمی به هم تابیده شده‌اند. معمولاً چهار تا از چنین زوج سیم‌هایی درون یک غلاف پلاستیکی قرار گرفته‌اند تا از سیم‌ها محافظت شده و آن‌ها را در کنار یکدیگر نگه دارند. این آرایش در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

انواع استانداردهای LAN ممکن است به طرق مختلف از زوج سیم‌های به هم تابیده استفاده کنند. به عنوان مثال، اینترنت 100-Mbps از دو زوج (از بین آن چهار زوج) استفاده می‌کند، یک زوج به



شکل ۲-۳ کابل UTP رده‌ی ۵ با چهار زوج سیم به‌هم تابیده.

ازای هر جهت. به منظور دستیابی به سرعت‌های بالاتر، اینترنت 1-Gbps از چهار زوج، به طور همزمان در هر دو جهت استفاده می‌کند؛ این کار نیازمند آن است که گیرنده، سیگنالی که به طور محلی انتقال می‌یابد را از دور خارج کند.

اکنون بعضی واژگان رایج معرفی می‌شوند. پیوندهایی که همانند یک جاده‌ی دو-طرفه، می‌توانند در آن واحد در هر دو جهت استفاده شوند، پیوندهای کاملاً^۱ - دوسویه^۱ نامیده می‌شوند. برعکس، پیوندهایی که می‌توانند در هر یک از دو جهت به کار روند، ولی در هر زمان تنها در یک مسیر، مانند یک جاده‌ی راه‌آهن تک - ریلی، پیوندهای نیمه - دوسویه^۲ نام دارند. سومین رده شامل پیوندهایی است که امکان عبور ترافیک را تنها در یک جهت می‌دهند، مانند یک خیابان یک - طرفه. این پیوندها، یک‌سویه^۳ نامیده می‌شوند.

برگردیم به زوج سیم. رده‌ی ۵ جایگزین کابل‌های رده‌ی ۳ اولیه گردید، با یک کابل مشابه که از همان اتصالات استفاده می‌کند، اما تاب‌های بیشتری در هر متر دارد. تاب‌های بیشتر، سبب کاهش تداخل شده و سیگنالی با کیفیت بهتر، در مسافت‌های طولانی‌تر می‌دهد. این امر باعث می‌گردد تا این کابل‌ها برای ارتباطات کامپیوتری پُرسرعت، مناسب‌تر باشند به‌خصوص در LAN های اترنت 100-Mbps و 1-Gbps.

سیم‌بندی جدید به نظر می‌رسد از رده‌ی ۶ یا حتی رده‌ی ۷ باشد. این رده‌ها، مشخصه‌های سخت‌گیرانه‌تری برای اداره‌ی سیگنال‌های با پهنای باند بزرگ‌تر دارند. بعضی کابل‌های رده‌ی ۶ و بالاتر از آن، در زمره‌ی سیگنال‌های ۵۰۰ مگاهرتزی محسوب شده و قادر به حمایت از پیوندهای 10-Gbps که به زودی خواهند آمد، می‌باشند.

تا رده‌ی ۶، از این نوع سیم‌بندی‌ها با عنوان UTP (زوج سیم به‌هم تابیده‌ی بدون محافظ^۴) یاد می‌شود زیرا تنها از سیم‌ها و عایق‌ها تشکیل شده‌اند. برعکس این‌ها، کابل‌های رده‌ی ۷، هم بر روی زوج سیم‌های به‌هم تابیده‌ی مجزا، و هم در اطراف کل کابل (ولی درون غلاف محافظت شده‌ی پلاستیکی)، دارای محافظ می‌باشند. قرار دادن محافظ، خاصیت مغناطیس‌پذیری نسبت به پارازیت‌های خارجی و نیز امکان تداخل با سایر کابل‌های مجاور را کاهش می‌دهد. به این ترتیب مشخصه‌های مورد نیاز برای کارایی، برآورده می‌شوند. این کابل‌ها یادآور کابل‌های زوج سیم به‌هم تابیده‌ی محافظ‌داری هستند که کیفیت بالا ولی اندازه‌ی بزرگی داشتند و IBM آن‌ها را در اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ معرفی نمود. نصب این کابل‌ها در خارج از IBM متداول نشد. از قرار معلوم، اکنون زمان آن فرا رسیده تا مجدداً تلاشی در این زمینه صورت گیرد.

۳-۲-۲ کابل کواکسیال

رسانه‌ی انتقال دیگری که متداول است، کابل کواکسیال^۵ می‌باشد (بسیاری از دستداران آن، فقط از نام "کواکس" با تلفظ "co-ax" استفاده می‌کنند). این کابل نسبت به زوج سیم به‌هم تابیده‌ی بدون محافظ، هم محافظت بهتر و هم پهنای باند بزرگ‌تری دارد، لذا می‌تواند مسافت‌های طولانی‌تری را با

1. Full-duplex 2. Half-duplex 3. Simplex 4. Unshielded Twisted Pair 5. Coaxial cable

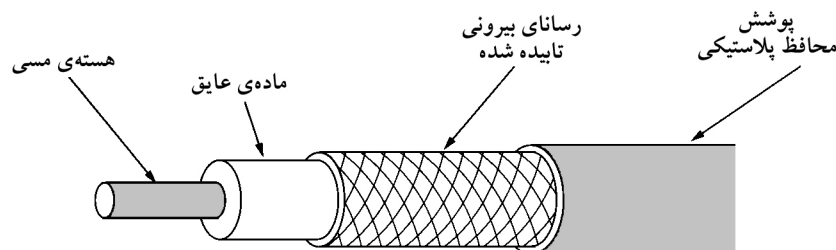
سرعت‌های بالاتر، پوشش دهد. دو نوع کابل کواکسیال خیلی مورد استفاده هستند. یک نوع، کابل ۵۰- اهمی است که کاربردش بیشتر هنگامی متداول است که از ابتدای کار، برای انتقال دیجیتال در نظر گرفته شود. نوع دیگر، کابل ۷۵- اهمی است که معمولاً برای انتقال آنالوگ و تلویزیون کابلی استفاده می‌شود. تمایز این دو، به جای آن‌که فنی باشد، مبتنی بر فاکتورهای تاریخی است (به عنوان نمونه، آنتن‌های دوقطبی اولیه دارای آمپدانس معادل ۳۰۰ اهم بودند، و ساده‌تر آن بود که از همان ترانسفورماتورهای تطبیق امپدانس 4:1 موجود استفاده شود). با شروع از اواسط دهه‌ی ۱۹۹۰، اپراتورهای تلویزیون کابلی شروع به فراهم نمودن دسترسی به اینترنت از طریق کابل کردند. این کار باعث شد تا کابل ۷۵- اهمی در ارتباطات داده، از اهمیت بیشتری برخوردار گردد.

یک کابل کواکسیال تشکیل شده است از یک سیم مسی سخت و خشک به عنوان هسته، که با یک ماده‌ی عایق احاطه شده. عایق توسط یک رسانای استوانه‌ای شکل محصور شده، که غالباً به صورت یک توری بافته شده‌ی با شبکه‌های ریز است. این رسانای بیرونی با یک غلاف پلاستیکی محافظ، پوشانده می‌شود. یک نمای مقطعی از کابل کواکسیال در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.

نحوه‌ی ساخت و حفاظت در کابل کواکسیال، آن را به صورت ترکیب مناسبی برای پهنای باند بالا و نیز با ایمنی عالی در برابر نویز، درآورده است. پهنای باند ممکن، بستگی به کیفیت و طول کابل دارد. پهنای باند کابل‌های جدید تا چند گیگاهرتز هم می‌رسد. استفاده از کابل‌های کواکسیال در سیستم تلفن و برای خطوط راه دور^۱، کاربرد وسیعی یافته است ولی در حال حاضر در مسیرهای دور- بُرد^۲، تا حدود زیادی در حال جایگزینی با فیبرهای نوری می‌باشد. با این وجود، همچنان از کواکس به صورتی گسترده برای تلویزیون کابلی و شبکه‌های کلان‌شهری استفاده می‌شود.

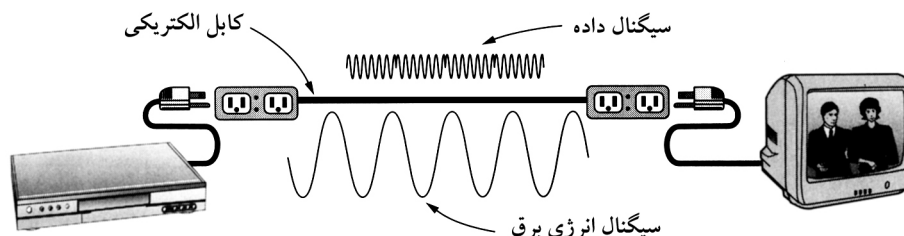
۲-۲-۴ خطوط فشار قوی

شبکه‌های تلفن و تلویزیون کابلی، تنها منابع سیم‌بندی قابل استفاده‌ی مجدد برای ارتباطات داده نیستند. هنوز یک نوع سیم‌بندی رایج‌تر هم وجود دارد: خطوط برق فشار قوی. خطوط فشار قوی، انرژی برق را به منازل تحویل می‌دهند، و سیم‌بندی برق داخل منازل، این انرژی را به وسایل برقی توزیع می‌کند.



شکل ۲-۴ یک کابل کواکسیال.

1. Long-distance lines
2. Long-haul routes



شکل ۲-۵ یک شبکه که از سیم‌کشی برق خانگی استفاده می‌کند.

استفاده از خطوط فشار قوی برای ارتباطات داده، ایده‌ای قدیمی است. سال‌هاست که خطوط فشار قوی توسط شرکت‌های نیروی برق، به منظور ارتباطات با نرخ پایین، از قبیل اندازه‌گیری جریان برق از راه دور، و نیز به منظور کنترل وسایل در منازل (مانند استاندارد X10) مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سال‌های اخیر، تمایل به ارتباطات با نرخ بالا از طریق این خطوط، هم داخل منزل به عنوان یک LAN و هم خارج از منزل و به منظور دسترسی باند عریض به اینترنت، مجدداً احیا شده است. تمرکز ما بر سناریویی خواهد بود که رایج‌تر است: استفاده از سیم‌های برق، داخل منزل.

سهولت استفاده از خطوط فشار قوی برای شبکه‌بندی بایستی واضح باشد. خیلی ساده، یک تلویزیون و یک گیرنده را به پریز وصل کنید، یعنی کاری که به هر حال باید انجام دهید چون این دستگاه‌ها به نیروی برق احتیاج دارند. پس از این کار، آن‌ها قادر به ارسال و دریافت فیلم از طریق سیم‌کشی برق خواهند بود. این پیکربندی در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. هیچ پریز یا موج رادیویی دیگری در بین نیست. از آن‌جا که هر دو سیگنال (سیگنال برق و سیگنال داده) در آن واحد از یک سیم‌کشی استفاده می‌کنند، سیگنال داده بر روی سیگنال برق با فرکانس پایین سوار می‌شود (بر روی سیم فعال یا "داغ").

دشواری استفاده از سیم‌کشی برق خانگی برای شبکه، آن است که این سیم‌کشی برای توزیع سیگنال‌های برق طراحی شده است. این وظیفه کاملاً با توزیع سیگنال‌های داده تفاوت دارد. در این مورد، وظیفه‌ی دشواری بر عهده‌ی سیم‌کشی خانگی قرار می‌گیرد. سیگنال‌های الکتریکی در ۵۰ تا ۶۰ هرتز ارسال می‌شوند، و سیم‌کشی، سیگنال‌های با فرکانس بسیار بالاتر (در حد مگاهرتز) که برای ارتباطات داده‌ی با نرخ بالا مورد نیاز هستند را تضعیف می‌کند. ویژگی‌های الکتریکی سیم‌کشی، از منزلی به منزل بعد، با روشن یا خاموش کردن وسایل برقی، تغییر می‌کنند. این امر باعث می‌شود که سیگنال‌های داده، حول سیم‌کشی در حرکت باشند. جریان‌های کوتاه و ناپایدار که هنگام روشن و خاموش کردن وسایل برقی ایجاد می‌شوند، تولید نویز الکتریکی در محدوده‌ی فرکانسی گسترده‌ای می‌نمایند. ضمناً بدون تابیدن دقیق زوج سیم‌های به هم تابیده، سیم‌کشی الکتریکی همانند یک آنتن خوب، عمل می‌کند. یعنی سیگنال‌های خارجی را برداشته و سیگنال‌های خودش را به اطراف می‌پراکند. معنای این رفتار آن است که جهت برآورده کردن نیازمندی‌های تنظیمی، سیگنال داده بایستی فرکانس‌های دارای مجوز، از قبیل باندهای رادیویی آماتوری را حذف نماید.

علی‌رغم این دشواری‌ها، ارسال دست کم 100 Mbps از طریق سیم‌کشی خانگی عادی، با استفاده از نظام‌های ارتباطی‌ای که در برابر فرکانس‌های معیوب و خطاهای انفجاری پایداری می‌کنند، عملی می‌باشد. محصولات متعددی وجود دارند که از انواع استانداردهای اختصاصی برای شبکه‌بندی خطوط برق استفاده می‌کنند لذا استانداردهای بین‌المللی به صورتی فعال در حال پیشرفت هستند.

۵-۲-۲ فیبرهای نوری

افراد زیادی در صنعت کامپیوتر، از بابت سرعت پیشرفت در فناوری کامپیوتر دچار غرور و مباهات هستند. بر طبق قانون مور^۱، پیش‌بینی می‌شود که تعداد ترانزیستورها در هر تراشه، تقریباً هر دو سال یک بار، دو برابر شود (Schaller, ۱۹۹۷). سرعت کلاک اولین کامپیوتر شخصی IBM در سال ۱۹۸۱، برابر با 4.77 MHz بود. بیست و پنج سال بعد، PC ها می‌توانستند یک CPU با چهار هسته را در 3 GHz اجرا کنند. چنین افزایشی به معنای فاکتور بهره‌وری معادل ۲۵۰۰ است، یعنی فاکتور ۱۶ به ازای هر دهه. تحسین برانگیز است.

طی همین مدت، پیوندهای ارتباطات پهنای^۲، از 45 Mbps (که مربوط به یک سیستم تلفن خط T3 می‌باشد) به 100 Gbps (در یک خط راه دور امروزی) رسیده است. این بهره‌وری نیز به نظر تحسین برانگیز می‌رسد، بیش از ۲۰۰۰ برابر و نزدیک به فاکتوری معادل ۱۶ به ازای هر دهه، درحالی که در همین مدت نرخ خطا از 10^{-5} در هر بیت، تقریباً به صفر رسیده. علاوه بر این، CPU های منفرد در حال نزدیک شدن به محدوده‌های فیزیکی هستند، به همین دلیل است که در حال حاضر تعداد CPU ها در هر تراشه، در حال افزایش است. از سوی دیگر، پهنای باند قابل دستیابی با فناوری فیبری، بیش از 50,000 Gbps است (یعنی ۵۰ ترابیت بر ثانیه) و ما حتی نزدیک به رسیدن به این محدوده‌ها هم نیستیم. محدوده‌ی عمل فعلی، که در حدود 100 Gbps است، ناشی از ناتوانی ما در افزایش سرعت تبدیل میان سیگنال‌های الکتریکی و نوری می‌باشد. به منظور ساختن پیوندهایی با ظرفیت بیشتر، کافی است کانال‌های متعدد به صورت موازی، از یک فیبر واحد عبور کنند.

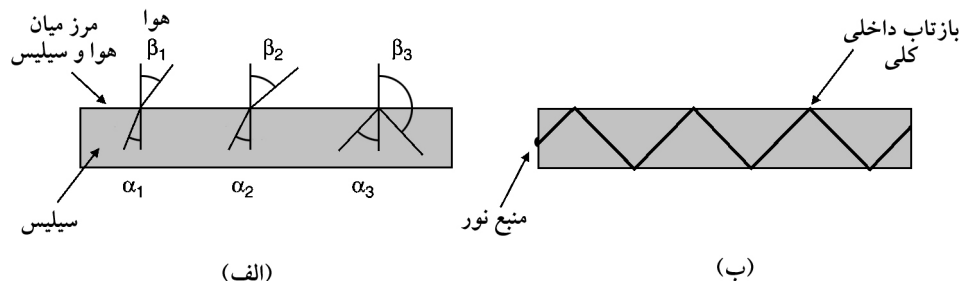
در این بخش، فیبرهای نوری را مطالعه خواهیم کرد تا نحوه‌ی کارکرد این فناوری انتقال را بیاموزیم. در مسابقه‌ای که میان محاسبات و ارتباطات در جریان است، به دلیل وجود شبکه‌های فیبر نوری، احتمال دارد که ارتباطات برنده شود. با این استدلال که: پهنای باند اساساً نامتناهی است و عقل حکم می‌کند که چون کامپیوترها به طرز نومیدکننده‌ای گند هستند، بنابراین شبکه‌ها بایستی تلاش کنند تا هر اندازه هم که اتلاف پهنای باند داشته باشند، به هر قیمتی که شده، از محاسبات اجتناب کنند. مدتی طول می‌کشد تا چنین تغییری در آموزه‌های یک نسل از دانشمندان و مهندسان کامپیوتر نهادینه شود، آن‌ها یاد گرفته‌اند تا متناسب با محدودیت‌های قانون شانون که توسط مس تحمیل شده و مقادیر کوچکی را نشان می‌دهند، بیندیشند.

1. Moore's law 2. Wide area communication link

البته این سناریو تمام داستان را بیان نمی‌کند زیرا هزینه در آن نیامده است. هزینه‌ی نصب فیبر در مایل آخر، تا رسیدن به مصرف‌کنندگان، و کنار آمدن با پهنای باند کم سیم‌ها، و دسترس‌پذیری محدود به طیف، فوق‌العاده زیاد است. همچنین انرژی صرف شده برای حرکت دادن بیت‌ها، بیشتر از انرژی صرف شده برای انجام محاسبه است. همواره ممکن است بخش‌های غیرعادلانه‌ای داشته باشیم که محاسبات و یا ارتباطات در آن‌ها اساساً رایگان باشند. به عنوان مثال، در لبه‌ی اینترنت ما محاسبات و ذخیره‌سازی را رها کرده و درگیر مسئله‌ی فشرده‌سازی و ذخیره‌سازی پنهان محتوا هستیم، همه‌ی این‌ها برای استفاده‌ی بهتر از پیوندهای دسترسی به اینترنت است. داخل اینترنت، ممکن است عکس این کار را انجام دهیم. مثلاً شرکت‌هایی مانند گوگل، حجم عظیمی از داده را در اینترنت جابجا می‌کنند تا آن را به محلی ببرند که ذخیره‌سازی یا محاسبه در آن‌جا ارزان‌تر است.

از فیبرهای نوری برای انتقال دور-برد در بدنه‌های اصلی^۱ شبکه، LAN های پرسرعت (هرچند که تاکنون همیشه نهایتاً مس، شرایط را مدیریت کرده است)، و دسترسی پرسرعت به اینترنت از قبیل FttH (فیبر تا منزل)^۲ استفاده می‌شود. یک سیستم انتقال نوری دارای سه مؤلفه‌ی کلیدی است: منبع نور، رسانه‌ی انتقال، و آشکارساز^۳. طبق قرارداد، یک پالس نور نشان دهنده‌ی یک بیت 1، و عدم وجود نور نشان دهنده‌ی یک بیت 0 است. رسانه‌ی انتقال عبارت‌است از یک فیبر شیشه‌ای فوق باریک. آشکارساز، هنگامی که نور آن را در برمی‌گیرد، یک پالس الکتریکی تولید می‌کند. با وصل کردن یک منبع نور به یک انتهای فیبر نوری، و وصل کردن آشکارساز به انتهای دیگر آن، یک سیستم انتقال داده‌ی یک‌طرفه خواهیم داشت. چنین سیستمی، سیگنال الکتریکی را می‌گیرد، آن را تبدیل نموده و توسط پالس‌های نوری انتقالش می‌دهد، و سپس خروجی را در طرف گیرنده، دوباره به یک سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند.

این سیستم انتقال، دارای اتلاف نور بوده و در عمل بی‌استفاده است. علت این امر، یک پدیده‌ی جالب فیزیکی می‌باشد. هنگامی که یک پرتو نور، از یک رسانه به رسانه‌ی دیگر عبور می‌کند — به عنوان مثال، از سیلیس مذاب^۴ به هوا — همان‌طور که شکل ۲-۶ (الف) نشان می‌دهد، دچار انکسار (خمیدگی) در مرز سیلیس/ هوا می‌گردد. در این شکل، یک پرتو نور را می‌بینیم که با یک زاویه‌ی α_1 با لبه برخورد کرده و زاویه‌ی β_1 را پدید آورده است. میزان انکسار بستگی به ویژگی‌های دو رسانه دارد (در واقع به ضریب انکسار آن‌ها). به ازای زاویه‌های برخوردی که بیشتر از یک مقدار بحرانی خاص باشند، نور به درون سیلیس بازتاب می‌کند؛ یعنی هیچ یک از پرتوها وارد هوا نمی‌شوند. بنابراین پرتوی نوری که زاویه‌ی برخوردش مساوی زاویه‌ی بحرانی یا بیشتر از آن باشد، همان‌طور که در شکل ۲-۶ (ب) نشان داده شده، درون فیبر به تله افتاده و می‌تواند تا کیلومترها، و به لحاظ مجازی با هیچ‌گونه آفتی، انتشار یابد.



شکل ۲-۶ (الف) سه مثال از یک پرتو نور، از درون یک فیبر سیلیس که با سه زاویه‌ی مختلف به مرز هوا/سیلیس برخورد می‌کند. (ب) نوری که با یک بازتاب داخلی کامل، به دام افتاده است.

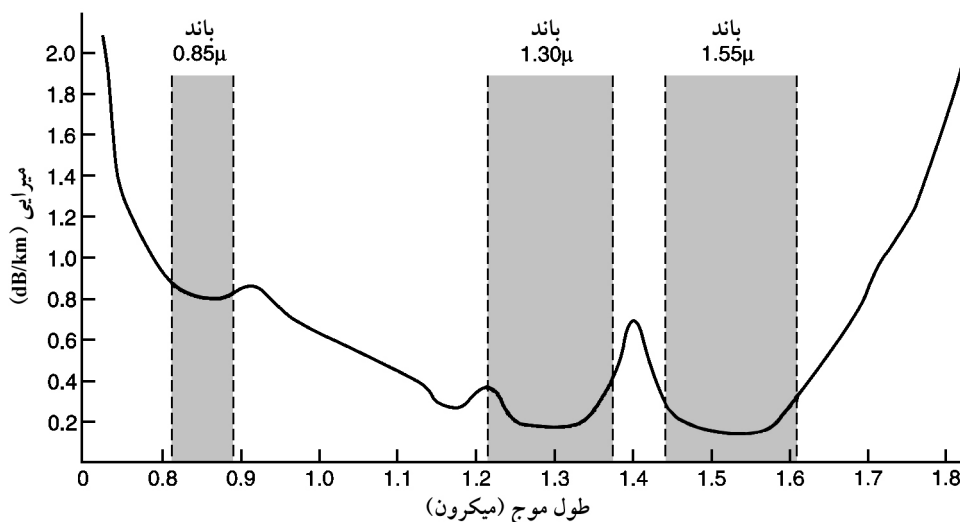
طرح کلی که در شکل ۲-۶(ب) آمده، تنها یک پرتو به دام افتاده را نشان می‌دهد. اما از آنجا که هر پرتو نوری که با زاویه‌ای بیشتر از زاویه‌ی بحرانی به مرز برخورد کند، بازتاب داخلی خواهد نمود، پس تعداد زیادی پرتوهای مختلف، با زاویه‌های متفاوت و در همین حول و حوش، برگشت خواهند نمود. می‌گوییم هر پرتو دارای حالت (مود) متفاوتی می‌باشد، لذا فیبری که چنین ویژگی‌ای دارد، فیبر چند - حالت^۱ نامیده می‌شود.

اما در صورتی که قطر فیبر به چند طول موج نوری محدود کاهش یابد، فیبر در حکم یک هدایت‌کننده‌ی موج عمل کرده، و نور تنها در یک خط مستقیم و بدون برگشت نور، می‌تواند انتشار یابد. نتیجه‌ی آن، یک فیبر تک - حالت^۲ است. فیبرهای تک - حالت گران‌تر هستند اما برای مسافت‌های طولانی، خیلی از آن‌ها استفاده می‌شود. فیبرهای تک - حالت‌ای که فعلاً در دسترسند، قادر به گذر دادن داده با سرعت 100 Gbps می‌باشند به‌طوری‌که برای ۱۰۰ کیلومتر، نیازی به تقویت‌کننده وجود ندارد. حتی نرخ‌های داده‌ی بالاتری در آزمایشگاه و برای فواصل کوتاه‌تر، به دست آمده است.

انتقال نور از طریق فیبر

فیبرهای نوری از شیشه ساخته می‌شوند، که آن هم به نوبه‌ی خود از شن ساخته شده، یعنی یک ماده‌ی اولیه‌ی ارزان که به مقدار نامحدود در دسترس است. مصریان باستان ساختن شیشه را می‌دانستند اما ضخامت شیشه‌های آن‌ها بایستی بیشتر از ۱ میلی‌متر نباشد، وگرنه نور نمی‌توانست از طریق این شیشه‌ها تابانده شود. شیشه‌ای که به میزان کافی شفاف باشد تا به درِ پنجره بخورد، در دوره‌ی رنسانس پدید آمد. شیشه‌ای که برای فیبرهای نوری جدید به کار می‌رود به قدری شفاف است که اگر اقیانوس‌ها به جای آب از این فیبرها پُر شوند، بستر اقیانوس از سطح آن قابل مشاهده خواهد بود، همان طور که در یک روز روشن و صاف، زمین از هواپیما قابل رویت است.

میرایی نور در شیشه، به طول موج نور (و همچنین به بعضی ویژگی‌های شیشه) بستگی دارد. این فاکتور به صورت نسبت ورودی به خروجی توان سیگنال تعریف می‌شود. برای نوعی از شیشه که



شکل ۷-۲ میرایی نور در فیبر، در منطقه‌ی فرو-قرمز.

در فیبرها مصرف می‌شود، میرایی را با واحد دسی‌بل در هر کیلومتر از فیبر (کیلومتر خطی) در شکل ۷-۲ نشان داده‌ایم. به عنوان مثال، یک ضریب ۲ در اتلاف توان سیگنال، باعث میرایی‌ای معادل $10 \log_{10} 2 = 3 \text{ dB}$ می‌گردد. شکل، بخش نزدیک به فرو-قرمز از طیف را نشان می‌دهد، که همان چیزی است که در عمل استفاده می‌شود. طول موج نور مرئی کمی کوتاه‌تر است: از ۰.۴ تا ۰.۷ میکرون (۱ میکرون برابر 10^{-6} است). شکل صحیح کاربرد متریک، به این طول موج‌ها تحت عنوان ۴۰۰ نانومتر تا ۷۰۰ نانومتر اشاره می‌کند، ولی ما کاربرد متعارف را ملاک قرار داده‌ایم.

در حال حاضر استفاده از سه باند طول موج در ارتباطات نوری، رواج بیشتری دارد. این باندها به ترتیب در ۰.۸۵، ۱.۳۰، و ۱.۵۵ میکرون متمرکز هستند. هر سه باند دارای پهنای ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ گیگاهرتز می‌باشند. باند ۰.۸۵ میکرون اولین باندی بود که مورد استفاده قرار گرفت. این باند، میرایی بیشتری دارد و لذا برای مسافت‌های کوتاه‌تر به کار می‌رود، اما در این طول موج، لیزرها و تجهیزات الکترونیکی، می‌توانند از مواد مشابهی ساخته شوند (آرسنید گالیوم^۱). دو باند آخر، ویژگی‌های میرایی خوبی دارند (کمتر از ۵٪ اتلاف در هر کیلومتر). امروزه از باند ۱.۵۵ میکرون همراه با تقویت‌کننده‌های آغشته به اربیم^۲ که مستقیماً در دامنه‌ی نوری کار می‌کنند، به طور وسیعی استفاده می‌شود.

پالس‌های نور که در طول یک فیبر ارسال می‌شوند، در حین انتشار، به لحاظ طولی پخش می‌شوند. این پخش‌شدگی **تفرق نور**^۳ نامیده می‌شود. مقدار این تفرق به طول موج بستگی دارد. یک راه برای محافظت این پالس‌ها از هم‌پوشانی، آن است که فاصله‌ی میان آن‌ها را افزایش دهیم. اما این

۱. Gallium arsenide ۲. Erbium-doped (می‌باشد مترجم).
۳. Chromatic dispersion

کار تنها با کاهش نرخ سیگنالینگ امکان پذیر است. خوشبختانه پی برده ایم که اگر پالس ها به شکل خاصی ساخته شوند که مرتبط با کسینوس هذلولوی^۱ دوسویه (متقابل) ساخته شوند، باعث می شود که تقریباً همه ی اثرات تفرق از بین بروند. به این ترتیب امکان ارسال پالس ها به هزاران کیلومتر دورتر، بدون اعوجاج قابل ملاحظه، به وجود می آید. این پالس ها سولیتون^۲ نامیده می شوند. تحقیقات قابل توجهی برای خارج کردن سولیتون ها از آزمایشگاه و بردن آن ها به حیطه ی عمل، در جریان است.

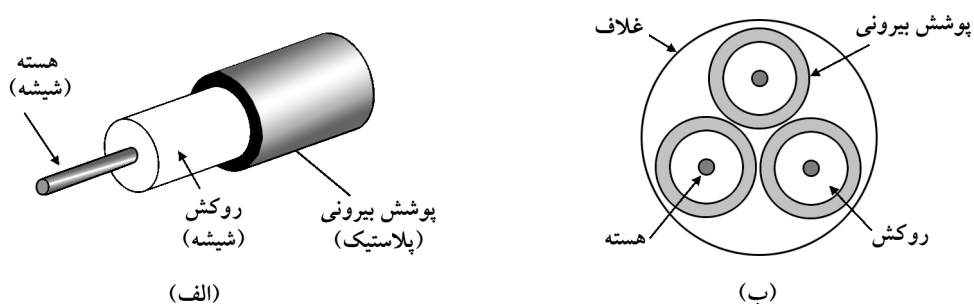
کابل های فیبری

کابل های فیبر نوری، مشابه کواکس هستند، به جز آن که قسمت تابیده شده ی^۳ آن را ندارند. شکل ۲-۸ (الف)، نمای یک فیبر را از پهلوی نشان می دهد. در مرکز، یک هسته از جنس شیشه قرار دارد که نور از طریق آن انتشار می یابد. در فیبرهای چند - حالته، معمولاً قطر هسته ۵۰ میکرون است، یعنی تقریباً مساوی ضخامت موی انسان. در فیبرهای تک - حالته، قطر هسته ۸ تا ۱۰ میکرون است.

هسته توسط یک روکش^۴ شیشه ای احاطه شده که شاخص بازتاب آن نسبت به هسته کمتر است، تا بتواند تمام نور را در هسته نگه دارد. پس از آن یک پوشش بیرونی^۵ نازک از جنس پلاستیک قرار دارد که از روکش محافظت می کند. فیبرها معمولاً درون دسته هایی، گروه بندی می شوند که توسط یک غلاف بیرونی محافظت می شوند. شکل ۲-۸ (ب)، یک غلاف با سه فیبر را نشان می دهد.

غلاف های فیبر زمینی معمولاً داخل زمین و در عمق یک متری از سطح آن، نهاده می شوند، یعنی جایی که گاهی اوقات مورد حمله ی بیل های مکانیکی یا جوندگان قرار می گیرند. نزدیک مناطق ساحلی، غلاف های فیبر ماورای اقیانوس، توسط یک نوع دستگاه شیارکشی دریایی، درون شیارهایی دفن می شوند. در عمق آب، غلاف ها فقط در بستر آب خوابانده می شوند، به طوری که ممکن است توسط کشتی های ماهیگیری دچار پارگی شده و یا مورد حمله ی ماهیان مرکب غول آسا قرار گیرند.

فیبرها به سه روش مختلف می توانند اتصال یابند. اول آن که، می توانند به اتصالات رابط ختم شوند و با دوشاخه به سوکت های فیبر وصل شوند. اتصالات رابط بین ۱۰ تا ۲۰٪ از نور را از دست می دهند، اما پیکربندی مجدد در سیستم ها را آسان می سازند.



شکل ۲-۸ (الف) نمای یک فیبر از پهلوی. (ب) نمای انتهایی یک غلاف با سه فیبر.

- | | | | | |
|----------------------|------------|----------|-------------|-----------|
| 1. Hyperbolic cosine | 2. Soliton | 3. Braid | 4. Cladding | 5. Jacket |
|----------------------|------------|----------|-------------|-----------|

موضوع	LED	لیزر نیمه‌هادی
نرخ داده	کم	زیاد
نوع فیبر	چند - حالتی	چند - حالتی یا تک - حالتی
مسافت	کوتاه	طولانی
طول عمر	عمر طولانی	عمر کوتاه
حساسیت به دما	جزئی	کلان (بسیار زیاد)
هزینه	هزینه‌ی کم	گران

شکل ۲-۹ مقایسه‌ی دیودهای نیمه‌هادی و LED ها به عنوان منبع نور.

دوم آن‌که، می‌توانند به صورت مکانیکی به هم بسته (تاییده) شوند. بست‌های مکانیکی فقط دو انتهای بریده شده را به دقت در یک لوله‌ی مخصوص، در مجاورت یکدیگر قرار داده و آن‌ها را محکم در جای خود نگه می‌دارند. با عبور دادن نور از محل اتصال، و سپس میزان‌سازی‌های کوچکی در جهت پیشینه نمودن سیگنال، می‌توان عمل تنظیم را انجام داد. نصب بست‌های مکانیکی برای افراد آموزش دیده حدود ۵ دقیقه وقت گرفته و ۱۰٪ اتلاف نور را سبب می‌شوند.

سوم آن‌که، دو تکه‌ی فیبر می‌توانند به هم جوش داده شوند (به روش ذوب با هم مخلوط شوند)^۱ تا تشکیل یک اتصال جامد و سخت^۲ را بدهند. یک بست جوش تقریباً به همان خوبی یک فیبر واحد است، اما حتی در این مورد نیز مقدار کوچکی میرایی روی می‌دهد. در تمام این سه نوع بست، امکان وقوع بازتاب در نقطه‌ی بست وجود دارد، و انرژی بازتاب شده ممکن است با سیگنال تداخل نماید.

معمولاً از دو نوع منبع نور برای سیگنالینگ استفاده می‌شود. این منابع عبارتند از LEDها (دیودهای پخش نور)^۳ و لیزرهای نیمه‌هادی. همان‌طور که شکل ۲-۹ نشان می‌دهد، این دو نوع دارای ویژگی‌های متفاوتی هستند. آن‌ها را می‌توان از نظر طول موج، با نصب دستگاه‌های سنجش طول موج Fabry-Perot یا Mach-Zehnder مابین منبع و فیبر، تنظیم نمود. دستگاه‌های سنجش طول موج Fabry-Perot، محفظه‌های تشدید کننده‌ی ساده‌ای هستند که از دو آئینه‌ی موازی تشکیل شده‌اند. نور به طور مستقیم و عمود به آئینه‌ها برخورد می‌کند. طول محفظه، طول موج‌هایی را برای بیرون رفتن انتخاب می‌کند که با مضرب‌های صحیح، تناسب داشته باشند. دستگاه‌های سنجش طول موج Mach-Zehnder، نور را به دو پرتو باریک^۴ تفکیک می‌کنند. مسافت‌هایی که این دو پرتو حرکت می‌کنند، کمی با هم تفاوت دارد. آن‌ها در انتهای کار مجدداً ترکیب شده و تنها برای طول موج‌های خاصی، فازبندی می‌شوند. طرف گیرنده در یک فیبر نوری، از یک دیود نوری تشکیل شده که با برخورد نور به آن، پالس الکتریکی بیرون می‌دهد. دیودهای نوری، سیگنال را از قلمرو نور به الکتریکی تبدیل می‌کنند. زمان پاسخ این دیودها، نرخ‌های داده را به حدود 100 Gbps محدود می‌سازد. نویز حرارتی نیز مطرح است،

1. Melt 2. Solid connection 3. Light Emitting Diode 4. Beam

به این ترتیب که یک پالس نوری بایستی انرژی کافی با خود حمل نماید تا تشخیص داده شود. وقتی پالس‌ها را به اندازه‌ی کافی قدرتمند نماییم، نرخ خطا می‌تواند تا میزان دلخواهی کوچک گردد.

مقایسه‌ی فیبرهای نوری و سیم مسی

مقایسه میان فیبر و مس، آموزنده است. فیبر مزایای زیادی دارد. برای شروع، فیبر نسبت به مس می‌تواند پهنای باندهای بزرگ‌تری را اداره نماید. همین مورد به تنهایی، حُکم می‌کند که در شبکه‌های قوی و پُرسرعت از فیبر استفاده شود. به سبب میرایی کم، در خطوط طولانی تنها به ازای هر ۵۰ کیلومتر به تکرارکننده نیاز داریم. این عدد برای مس، یک تکرار کننده در هر ۵ کیلومتر است، بنابراین صرفه‌جویی زیادی در هزینه حاصل می‌شود. همچنین فیبر دارای این مزیت نیز هست که تحت تأثیر افزایش ناگهانی برق، تداخل الکترومغناطیس، یا قطع برق قرار نمی‌گیرد. همچنین تحت تأثیر فرساینده‌های شیمیایی در هوا قرار نمی‌گیرد که این امر برای محیط‌های کارخانه‌ای با شرایط سخت و نامالایم، مهم می‌باشد.

عجیب است که شرکت‌های تلفن، به دلیل دیگری به فیبر علاقمند هستند: فیبر نازک و کم‌وزن است. بسیاری از مجراهای کابل موجود کاملاً پُر هستند، لذا جایی برای افزودن ظرفیت وجود ندارد. برداشتن همه‌ی سیم‌های مسی و جایگزین نمودن آن‌ها با فیبر، مجراها را خالی می‌کند، ضمن آن‌که مس ارزش بازرخریدی ویژه‌ای برای پالایش‌کننده‌های مس دارد، یعنی همان کسانی که مس را به چشم یک کانی معدنی مرغوب نگاه می‌کنند. ضمناً فیبر بسیار سبک‌تر از مس است. یک هزار زوج سیم مسی به طول ۱ کیلومتر، ۸۰۰۰ کیلوگرم وزن دارد. دو فیبر دارای ظرفیت بیشتری هستند و فقط ۱۰۰ کیلو وزن دارند، که نیاز به سیستم‌های پشتیبانی مکانیکی که بایستی نگهداری شوند را کاهش می‌دهد. در مورد مسیرپای‌های جدید، فیبر به دلیل آن‌که هزینه‌ی نصبش بسیار کمتر است، در حال کسب پیروزی‌های پی‌درپی است. سرانجام آن‌که، فیبرها نشی ندارند و بهره‌برداری مخفیانه از آن‌ها دشوار است. این ویژگی‌ها، در برابر جاسوسان بالقوه، به فیبرها ایمنی خوبی می‌بخشند.

از سوی دیگر با این مسئله مواجهیم که فیبر یک فناوری کمتر شناخته شده است که همه‌ی مهندسان، مهارت‌های لازم برای آن را ندارند. ضمناً فیبرها در صورتی که بیش از حد خم شوند، خراب می‌گردند. از آن‌جا که انتقال نوری ذاتاً یک - جهت است، برای ارتباطات دو- طرفه لازم است که یا دو فیبر داشته باشیم یا دو باند فرکانسی بر روی یک فیبر. در نهایت، هزینه‌ی رابط‌های فیبر بیشتر از رابط‌های الکتریکی است. معهداً واضح است که آینده‌ی تمام ارتباطات داده‌ی ثابت، در مسافت‌های بیشتر از فواصل کوتاه، با فیبر است. در ارتباط با بحث در مورد تمام جنبه‌های فیبرهای نوری و شبکه‌های آن‌ها، به Hecht (۲۰۰۵) مراجعه نمایید.

۳-۲ انتقال بی‌سیم

نسل ما با عادت دسترسی دائمی به اطلاعات، پرورش یافته است: مردمی که نیاز دارند همواره برخط باشند. برای این کاربران در حال حرکت، زوج سیم به هم تابیده، کواکس، و فیبرهای نوری فایده‌ای ندارند.

آن‌ها نیازمند آن هستند که داده‌ها دائماً به کامپیوترهای لپ‌تاپ، کامپیوترهای نوت‌بوک، کامپیوترهای جیبی، کامپیوترهای دستی، یا کامپیوترهای ساعت مچی‌شان، "صابت" کند، بدون آن‌که در بند زیرساخت ارتباطات زمینی باشند. برای این دسته از کاربران، جواب مسئله در ارتباطات بی‌سیم است. در بخش‌های بعد، کلیات ارتباطات بی‌سیم را بررسی می‌کنیم. ارتباطات بی‌سیم، علاوه بر فراهم کردن اتصال برای کاربران، کاربردهای مهم و متعدد دیگری نیز دارد که مورد نظر کاربران است که مایلند از ساحل، بر امواج وب سوار شوند. حتی در برخی موقعیت‌ها، بی‌سیم مزایایی برای دستگاه‌های ثابت نیز دارد. به عنوان مثال، در صورتی که رساندن فیبر به یک ساختمان به دلایل زمین‌شناسی (مثلاً وجود کوه‌ها، جنگل‌ها، مرداب‌ها و امثال این‌ها) دشوار باشد، ممکن است بی‌سیم بهتر باشد. جالب است که ارتباطات دیجیتالی بی‌سیم امروزی در جزایر هاوایی^۱ آغاز شد، یعنی جایی که بخش عمده‌ای از اقیانوس آرام^۲، کاربران را از مراکز کامپیوتری‌شان جدا ساخته و سرویس سیستم تلفن نیز نامناسب است.

۲-۳-۱ طیف الکترومغناطیس

وقتی الکترون‌ها حرکت می‌کنند، امواج الکترومغناطیس تولید می‌کنند که می‌توانند در فضا انتشار یابند (حتی در خلاء). این امواج توسط فیزیکدان بریتانیایی بنام جیمز کلرک ماکسول^۳ در سال ۱۸۶۵ تشخیص داده شدند و برای اولین بار فیزیکدان آلمانی بنام هاینریش هرتز^۴ در سال ۱۸۸۷ آن‌ها را مشاهده نمود. تعداد نوسان‌های یک موج در هر ثانیه **فرکانس** نام دارد که با علامت f نشان داده شده و بر حسب **هرتز (Hz)** اندازه‌گیری می‌شود (به افتخار هاینریش هرتز). فاصله‌ی میان دو بیشینه‌ی (یا دو کمینه‌ی) متوالی **طول موج** نامیده می‌شود که در تمام دنیا با حرف یونانی λ (لامبدا)^۵ نشان داده می‌شود. هنگامی که یک آنتن با اندازه‌ی مناسب، به یک مدار الکتریکی وصل شود، امواج الکترومغناطیس می‌توانند به شکلی کارآمد پخش شده و توسط گیرنده‌ای که از آن فاصله دارد، دریافت گردند. تمامی ارتباطات بی‌سیم بر پایه‌ی همین اصل هستند.

در خلاء، همه‌ی امواج الکترومغناطیس، فارغ از این‌که فرکانس‌شان چقدر باشد، با سرعت یکسانی حرکت می‌کنند. این سرعت که معمولاً **سرعت نور**، یا c ، نامیده می‌شود تقریباً معادل $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ، یا در حدود ۱ فوت (۳۰ سانتیمتر) در هر نانوثانیه، می‌باشد. (به جای آن‌که مبنای فوت را اندازه‌ی کفش پادشاهی قرار دهیم که مدتی طولانی از مرگش گذشته است، می‌توان فوت را باز-تعریف نمود، به این صورت که عبارت است از مسافتی که نور در خلاء در ۱ نانوثانیه طی می‌کند). سرعت نور در مس یا فیبر به حدود $2/3$ این مقدار کاهش یافته و تا حدودی وابسته به فرکانس می‌شود. سرعت نور، حدّ نهایی سرعت است. هیچ شیء یا سیگنالی هرگز نمی‌تواند سریع‌تر از آن تغییر مکان دهد.

1. Hawaiian Islands
5. Lambda

2. Pacific Ocean

3. James Clerk Maxwell

4. Heinrich Hertz

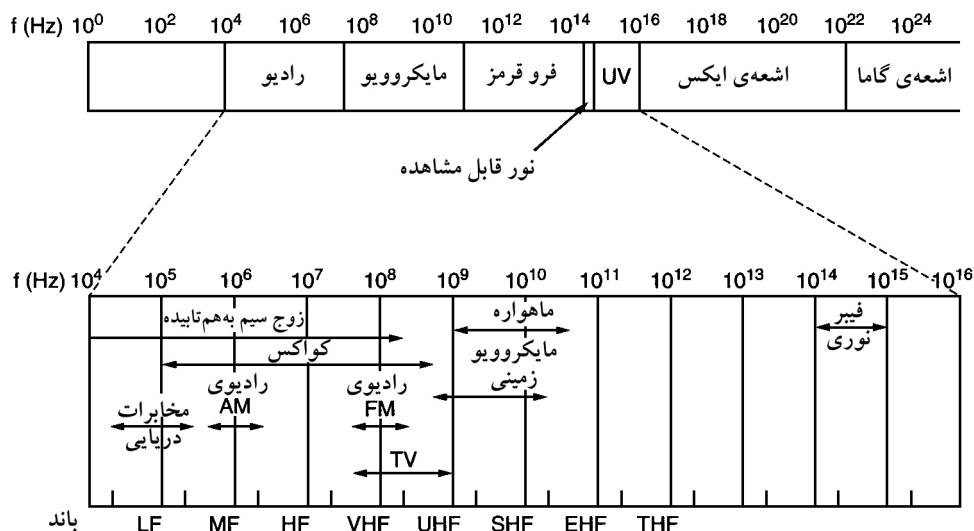
رابطه‌ی بنیادین میان f ، λ ، و c (در خلاء) عبارت است از:

$$\lambda f \equiv c \quad (۴-۲)$$

چون c مقداری ثابت است، اگر f را بدانیم، می‌توانیم λ را بیابیم، و همین‌طور بالعکس. به عنوان یک قانون سرانگشتی، وقتی λ بر حسب متر و f بر حسب مگاهرتز باشد، $\lambda f \approx 300$. به عنوان مثال، امواج 100-MHz ای تقریباً ۳ متر طول دارند، امواج 1000-MHz ای به طول 0.3 متر بوده، و امواج 0.1 متری دارای فرکانس ۳۰۰۰ مگاهرتز می‌باشند.

طیف الکترومغناطیس در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است. همه‌ی قسمت‌های رادیویی، مایکروویو، فروسرخ، و نور قابل مشاهده می‌توانند برای انتقال اطلاعات به وسیله‌ی تلفیق‌سازی دامنه، فرکانس، یا فاز امواج، مورد استفاده قرار گیرند. نور فرابنفش، اشعه‌ی X، و اشعه‌ی گاما به سبب فرکانس بیشتری که دارند، حتی می‌توانند بهتر باشند. اما تولید و تلفیق آن‌ها دشوار است، به خوبی از ساختمان‌ها انتشار نمی‌یابند، و برای موجودات زنده خطرآفرین هستند. باندهایی که در پایین شکل ۱۰-۲ فهرست شده‌اند، نام‌هایی هستند که رسماً از طرف ITU (مجمع بین‌المللی مخابرات) اعلام شده و بر اساس طول موج‌ها می‌باشند. بنابراین باند LF از ۱ کیلومتر تا ۱۰ کیلومتر را در بر می‌گیرد (تقریباً 30 kHz تا 300 kHz). اصطلاحات LF، MF، و HF به ترتیب به فرکانس کم، متوسط، و بالا اشاره دارند. روشن است که در زمان انتساب نام‌ها، هیچ کسی انتظار باند بیشتر از 10 MHz را نداشت به همین دلیل باندهای بالاتر، بعداً به صورت باندهای فرکانسی خیلی (Very)، فوق (Ultra)، مافوق (Super)، به شدت (Extremely)، و فوق‌العاده (Tremendously) بالا نامیده شدند. فراتر از این‌ها اسمی نیست، اما فرکانس به غایت زیاد (Incredibly)، فرکانس حیرت‌انگیز (Astonishingly)، و فرکانس شگفت‌انگیز (Prodigiously) (به ترتیب با حروف اختصاری IHF، AHF، و PHF) به لحاظ آوایی، خوشایند هستند.

از رابطه‌ی شانون [رابطه‌ی (۳-۲)]، می‌دانیم که مقدار اطلاعاتی که یک سیگنال، مثلاً یک موج الکترومغناطیس، می‌تواند حمل کند، بستگی به توان دریافتی دارد و متناسب با پهنای باند آن است. اکنون از شکل ۱۰-۲ بایستی واضح باشد که چرا اهالی شبکه‌بندی، تا این اندازه به فیبرهای نوری علاقه دارند. بخش عمده‌ای از پهنای باند (بر حسب GHz) به منظور بهره‌برداری برای انتقال داده در باند مایکروویو، قابل دسترسی است. این مقدار در فیبر حتی بیشتر هم می‌شود زیرا بیشتر در سمت راست مقیاس لگاریتمی ما قرار دارد. به عنوان یک مثال، باند 1.30 میکرون در شکل ۲-۷ را در نظر بگیرید. پهنای این باند 0.17 میکرون است. اگر رابطه‌ی (۴-۲) را برای یافتن فرکانس‌های آغاز و انتها، با استفاده از طول موج‌های آغاز و انتها، به کار ببریم، به محدوده‌ی فرکانسی تقریباً 30,000 GHz می‌رسیم. با یک نرخ سیگنال - به - نویز قابل قبول، یعنی 10dB، به 300 Tbps دست می‌یابیم.



شکل ۲-۱۰ طیف الکترومغناطیس و مصارف آن در ارتباطات.

اغلب انتقال‌ها از یک باند فرکانسی نسبتاً باریک استفاده می‌کنند (به عبارت دیگر $\Delta f/f \ll 1$). آن‌ها سیگنال‌هایشان را در این باند باریک متمرکز می‌کنند تا از طیف، استفاده‌ی کارآمدی بنمایند و با انجام انتقال با توان کافی، به نرخ داده‌ی قابل قبولی دست یابند. اما در برخی موارد از باند پهن‌تری با سه گونه‌ی مختلف، استفاده می‌شود. در **طیف گسترده‌ی با فرکانس پرشی**^۱، فرستنده صدها بار در هر ثانیه از فرکانسی به فرکانس دیگر پرش دارد. این امر در ارتباطات نظامی، عادی است زیرا باعث می‌شود تشخیص انتقال‌ها دشوار گردد، و در مرحله‌ی بعد، ارسال پارازیت^۲ بر روی آن غیرممکن شود. همچنین مقاومت خوبی در برابر محوشدگی چند-مسیره^۳ و تداخل باند باریک از خود نشان می‌دهد، زیرا گیرنده آن‌قدر که برای قطع ارتباط کافی باشد، در فرکانس معیوب گیر نمی‌افتد. چنین توانایی‌ای می‌تواند برای مسیرهای پُرازدحام طیف، مفید باشد مثل باندهای ISM که بعداً آن را به اختصار توضیح خواهیم داد. این روش در تجارت مورد استفاده است، به عنوان مثال در بلوتوث و نگارش‌های قدیمی‌تر^۴ 802.11.

به عنوان یک حاشیه‌ی جالب، بد نیست بدانیم که سرّ این روش توسط یک بازیگر زن به نام هدی لامار^۴ گشوده شد. همسر اول او یک سازنده‌ی تسلیحات جنگی بود. این شخص به او گفته بود چقدر آسان می‌توان سیگنال‌های رادیویی را مسدود کرد و با استفاده از این روش می‌توان اژدرها را کنترل نمود. وقتی این خانم مطلع شد که همسرش به هیتلر^۵ جنگ‌افزار می‌فروشد، به شدت دچار وحشت گردید. ظاهر خود را به شکل یک دختر جوان تغییر داد و از همسرش گریخت. سپس خود را

1. Frequency hopping spread spectrum
5. Hitler

2. Jam

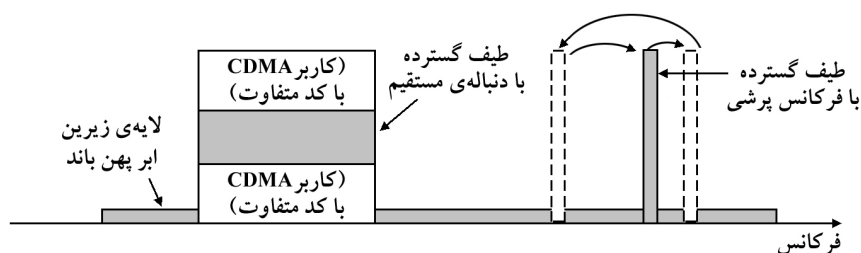
3. Multipath fading

4. Hedy Lamarr

به هالیوود^۱ رساند تا مسیر حرفه‌ای خود را به عنوان یک بازیگر فیلم ادامه دهد. او در اوقات فراغتش روش پرش فرکانس را ابداع نمود تا به تلاش‌های متفکین در جنگ کمک نماید. در نظامی که او استفاده کرده بود، ۸۸ فرکانس به کار رفته بود، یعنی به تعداد کلیدهای (و فرکانس‌های) پیانو. اختراع او و دوستش که آهنگ‌سازی بنام جورج آنتیل^۲ بود، شماری ثبت اختراعات 2,292,387 را در ایالات متحده دریافت کرده است. اما آن‌ها نتوانستند نیروی دریایی ایالات متحده را متقاعد کنند که اختراع آن‌ها کاربرد عملی دارد، و هرگز هیچ حق امتیازی دریافت نکردند. تنها سال‌ها بعد که دوره‌ی انقضای آن ثبت اختراع سپری گردید، این نظریه عمومیت پیدا کرد.

نوع دوم از طیف گسترده، یعنی **طیف گسترده‌ی با دنباله‌ی مستقیم**^۳، از یک دنباله‌ی کد استفاده می‌کند تا سیگنال داده را در یک باند فرکانس پهن‌تر گسترش دهد. این روش به عنوان یک روش کارآمد در استفاده از طیف، کاربرد تجاری زیادی دارد. در این روش چندین سیگنال می‌توانند از یک باند فرکانسی یکسان به طور مشترک استفاده کنند. به این سیگنال‌ها می‌توان کدهای متفاوت داد. این روش **CDMA (تقسیم کد با دسترسی چندگانه)**^۴ نام دارد و بعداً در همین فصل به آن معطوف می‌شویم. این روش در شکل ۲-۱۱، در مقابل روش فرکانس پرشی نشان داده شده است. این روش مبنای شبکه‌های تلفن موبایل 3G را تشکیل می‌دهد و در GPS (سیستم موقعیت‌یابی جهانی)^۵ نیز به کار می‌رود. طیف گسترده با دنباله‌ی مستقیم، همانند طیف گسترده با فرکانس پرشی (حتی بدون کدهای متفاوت نیز) قادر به تحمل کردن تداخل در باند باریک و پدیده‌ی محوشدگی چند - مسیره می‌باشد چون فقط کسری از سیگنال موردنظر، از بین می‌رود. به همین لحاظ از آن در LAN های بی سیم 802.11 قدیمی‌تر استفاده می‌شده. به عنوان یک تاریخچه‌ی جذاب و با جزئیات از ارتباطات طیف گسترده، به Scholtz (۱۹۸۲) مراجعه نمایید.

روش سوم در ارتباطات با باند پهن‌تر، عبارت‌است از ارتباطات **UWB (آبر-پهن‌بند)**^۶. ارتباطات UWB یک سری پالس سریع ارسال می‌کنند، به‌طوری‌که محل آن‌ها بر حسب اطلاعات ارتباطی، تغییر می‌کند. این گذارهای سریع منجر به سیگنالی می‌شوند که در یک باند فرکانسی بسیار پهن‌تر،



شکل ۲-۱۱ ارتباطات طیف گسترده، و ارتباطات آبر-پهن‌بند (UWB).

- | | | |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 1. Hollywood | 2. George Antheil | 3. Direct sequence spread spectrum |
| 4. Code Division Multiple Access | 5. Global Positioning System | 6. Ultra-WideBand |

به صورت جدا از هم و بافاصله، گسترده شده است. ارتباطات UWB به عنوان سیگنال‌هایی تعریف می‌شوند که دارای یک پهنای باند حداقل 500 MHz بوده و حداقل ۲۰٪ از فرکانس مرکزی باند فرکانسی آن‌ها را دارا باشد. در شکل ۲-۱۱، UWB نیز نشان داده شده است. با این پهنای باند بیشتر، UWB پتانسیل برقراری ارتباط با نرخ‌های بالاتری را هم دارد. چون این پهنای باند در سراسر یک باند فرکانسی پهن‌تر، گسترده می‌شود، می‌تواند مقدار زیادی تداخل نسبتاً قوی از سیگنال‌های باند کم‌عرض^۱ را تحمل نماید. مورد دیگری که درست به همان میزان اهمیت دارد آن است که چون UWB هنگام استفاده برای انتقال‌های بُرد کوتاه^۲، انرژی خیلی کمی در هر فرکانس دارد لذا سبب تداخل آسیب‌رسان به سایر سیگنال‌های رادیویی باند کم‌عرض نمی‌شود. چنین گفته می‌شود که سیگنال‌های دیگر را از لایه‌ی زیرین^۳ عبور می‌دهد. چنین هم‌نشینی مسالمت‌آمیزی باعث می‌شود که کاربردهای آن در PAN های بی‌سیم، تا 1 Gbps اجرا شوند، هرچند که توفیق تجاری آن تا حدودی مبهم است. از UWB می‌توان برای تصویربرداری از وِرای اشیای جامد (زمین، دیوارها، و بدن) یا به عنوان بخشی از سیستم‌های مکان‌یابی دقیق نیز استفاده نمود.

اکنون نحوه‌ی استفاده از بخش‌های مختلف طیف الکترومغناطیس در شکل ۲-۱۱ را، با شروع از رادیو، بررسی خواهیم کرد. فرض خواهیم نمود که تمام انتقال‌ها از یک باند فرکانس باریک استفاده می‌کنند، مگر آن‌که خلاف آن ذکر شود.

۲-۳-۲ انتقال رادیویی

تولید امواج فرکانس رادیویی (RF) آسان است. این امواج می‌توانند مسافت‌های طولانی را طی کنند، و به راحتی می‌توانند به ساختمان‌ها نفوذ کنند، لذا استفاده‌ی گسترده‌ای در ارتباطات دارند، هم در فضا‌های سرپوشیده و هم در فضا‌های باز. امواج رادیویی، چندسویه نیز هستند یعنی از منبع در تمام جهات حرکت می‌کنند، بنابراین فرستنده و گیرنده مجبور نیستند به لحاظ فیزیکی، کاملاً هم‌راستا باشند.

رادیویی که چندسویه باشد گاهی اوقات خوب است، ولی بعضی مواقع هم بد است. در دهه‌ی ۱۹۷۰ شرکت جنرال موتورز تصمیم گرفت همه‌ی کادیلاک‌هایش را مجهز به ترمز ضد قفل نماید که با کامپیوتر کنترل می‌شد. هنگامی که راننده پدال ترمز را فشار می‌داد، کامپیوتر به جای آن‌که ترمزها را محکم قفل کند، به آن‌ها پالس روشن و خاموش می‌داد. در یک روز زیبا، در ایالت اوهایو^۴، یک مأمور گشت‌زنی بزرگراه شروع کرد به استفاده از رادیوی موبایل جدیدش تا با مرکز فرماندهی تماس برقرار کند. ناگهان کادیلاکی که پهلوی او بود شروع کرد به رفتاری شبیه به یک اسب وحشی. وقتی مأمور اتومبیل را به کنار جاده کشاند، راننده ادعا کرد که او هیچ کاری نکرده و این ماشین بوده که دیوانه شده.

1. Narrowband 2. Short-range 3. Underlay 4. Ohio

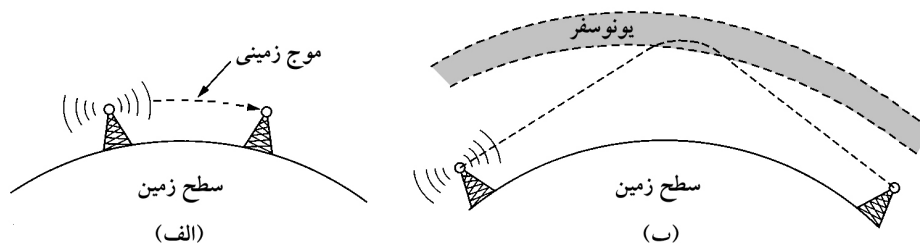
عاقبت، عقیده‌ای شکل گرفت: کادیلاک‌ها بعضی مواقع از خود بیخود و دیوانه می‌شوند، اما فقط در بزرگراه‌های اصلی در اوهایو، و وقتی که مأموران گشت بزرگراه آن‌ها را می‌دیدند. برای زمانی بسیار طولانی، جنرال موتورز نمی‌توانست بفهمد که چرا کادیلاک‌ها در همه‌ی ایالت‌های دیگر، و همین‌طور در جاده‌های فرعی اوهایو خوب کار می‌کردند. تنها بعد از جستجوی زیاد بود که فهمیدند سیم‌بندی کادیلاک، یک آنتن خوب برای فرکانس مورد استفاده توسط سیستم رادیویی جدید گشت بزرگراه در اوهایو، ایجاد می‌کند.

ویژگی‌های امواج رادیویی، مستقل از فرکانس هستند. در فرکانس‌های پایین، امواج رادیویی به خوبی از موانع عبور می‌کنند، اما با افزایش فاصله از منبع، و همین‌طور که انرژی سیگنال در سطح وسیع‌تری پخش می‌شود، توان به شدت دچار افت می‌شود — دست کم با ضریب $1/r^2$ در هوا. این میرایی، اتلاف مسیر^۱ نامیده می‌شود. امواج رادیویی در فرکانس‌های بالا تمایل به حرکت در خط مستقیم دارند و از روی موانع جست می‌زنند. هنوز هم اتلاف مسیر سبب کاهش توان می‌شود، هرچند که سیگنال رسیده می‌تواند به شدت به بازتاب‌ها نیز وابسته باشد. امواج رادیویی با فرکانس بالا، نسبت به امواج با فرکانس پایین‌تر، به میزان بیشتری جذب باران و سایر موانع می‌شوند. در همه‌ی فرکانس‌ها، امواج رادیویی موضوع تداخل موتورها و سایر تجهیزات الکتریکی می‌باشند.

مقایسه‌ی میرایی در امواج رادیویی با میرایی سیگنال‌ها در رسانه‌ی هدایت‌شده، موضوع جالبی است. با فیبر، کواکس، و زوج سیم به هم تابیده، میزان افت سیگنال در هر واحد از مسافت، کسر یکسانی است، مثلاً 20 dB به ازای هر ۱۰۰ متر برای زوج سیم. در مورد رادیو، با دو برابر کردن مسافت، افت سیگنال با همین کسر روی می‌دهد، مثلاً 6 dB به ازای هر بار که مسافت در فضای آزاد، دو برابر گردد. این رفتار به آن معناست که امواج رادیویی می‌توانند مسافت‌های دوری را طی کنند، و تداخل میان کاربران، یک معضل است. به همین دلیل همه‌ی دولت‌ها با شدت و تأکید، استفاده از فرستنده‌های رادیویی را، همراه با تعداد کمی استثنای قابل توجه، تنظیم کرده و سامان می‌دهند. بعداً در همین فصل در این باره بحث می‌کنیم.

همان‌طور که در شکل ۲-۱۲ (الف) نشان داده می‌شود، در باندهای VLF، LF، و MF، امواج رادیویی در امتداد زمین هستند. این امواج در فرکانس‌های کوتاه‌تر، احتمالاً تا ۱۰۰۰ کیلومتری قابل تشخیص هستند. برای فرکانس‌های بالاتر، این مقدار کمتر از ۱۰۰۰ کیلومتر است. پخش رادیویی AM از باند MF استفاده می‌کند. به همین دلیل است که امواج زمینی از ایستگاه‌های رادیوی AM بوستون، به راحتی در نیویورک قابل شنیدن نیستند. امواج رادیویی این باند به آسانی از ساختمان‌ها عبور می‌کنند، به همین دلیل است که رادیوهای قابل حمل دستی در داخل ساختمان‌ها کار می‌کنند. مشکل اصلی در استفاده از این باندها برای ارتباطات داده، پهنای باند کم آن‌هاست [به رابطه‌ی (۲-۴) مراجعه نمایید].

1. Path loss



شکل ۲-۱۲ (الف) در باندهای VLF، LF، و MF، امواج رادیویی در امتداد انحنا‌ی زمین حرکت می‌کنند. (ب) در باند HF، این امواج به خارج از جو زمین جهش می‌کنند.

در باندهای HF و VHF، امواج زمینی آماده‌ی جذب شدن توسط زمین هستند. اما امواجی که به یونوسفر می‌رسند، یعنی لایه‌ای از ذرات باردار که در ارتفاع ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلومتری، گرداگرد زمین را احاطه کرده است، توسط این لایه دچار انکسار شده و همانطور که شکل ۲-۱۲ (ب) نشان می‌دهد، به زمین بازمی‌گردند. تحت شرایط خاص جوی، سیگنال‌ها می‌توانند به دفعات جهش کنند. اپراتورهای رادیوی آماتوری (ham ها^۱) از این باندها برای مخابره‌ی مطلب به فواصل دور استفاده می‌کنند. ارتش نیز در باندهای HF و VHF به برقراری ارتباط می‌پردازد.

۳-۳-۲ انتقال مایکروویو

امواج در بالاتر از 100 MHz، تقریباً به صورت خطوط مستقیم حرکت کرده و به همین دلیل با دقت زیادی متمرکز می‌شوند. متمرکز کردن تمام انرژی در یک پرتو باریک و کوچک به وسیله‌ی یک آنتن سهموی (شبیه به آنتن تلویزیون ماهواره‌ای) سبب دستیابی به یک نرخ سیگنال - به - نویز خیلی بالاتری می‌شود، اما فرستنده و گیرنده بایستی به دقت با یکدیگر هم‌راستا شوند. به‌علاوه این نحوه‌ی هم‌راستا کردن امکان می‌دهد که چندین فرستنده در یک ردیف، با چندین گیرنده در یک ردیف، بدون هیچ تداخلی با هم ارتباط برقرار کنند، که نتیجه‌اش رعایت قوانین حداقلی در فضاسازی می‌باشد. تا پیش از فیبرهای نوری، به مدت چند دهه، این امواج مایکروویو قلب سیستم فرستنده‌ی تلفنی در مسافت‌های دور را تشکیل می‌داد. در حقیقت MCI، یعنی یکی از اولین رقبای AT&T بعد از سامان‌دهی مجدد آن، کل سیستم خود را با ارتباطات مایکروویو ساخت. این امواج مابین برج‌هایی که ده‌ها کیلومتر از هم فاصله داشتند، منتقل می‌شدند. حتی نام شرکت نیز انعکاس دهنده‌ی همین امر است (MCI اختصاری عبارت "Microwave Communications, Inc." به معنای "شرکت ارتباطات مایکروویو" می‌باشد). از آن زمان به بعد، MCI به سمت فیبر رفته و از طریق یک سری ادغام‌های شرکتی و ورشکستگی‌های ناشی از تغییرات مخابراتی، به صورت بخشی از Verizon درآمد.

۱. فرستنده‌ی خصوصی موج کوتاه که دارای گواهینامه است (مترجم).

امواج مایکروویو در یک خط مستقیم حرکت می‌کنند، لذا اگر برج‌ها بیش از حد از هم دور باشند، انحنای زمین مانع می‌شود که آن‌ها بتوانند یکدیگر را ببینند (به پیوند سیاتل - به - آمستردام فکر کنید). بنابراین به تناوب، وجود تکرارکننده لازم است. هر چه برج‌ها بلندتر باشند، فاصله‌شان از یکدیگر می‌تواند بیشتر باشد. فاصله‌ی میان تکرارکننده‌ها تقریباً به نسبت ریشه‌ی دوم ارتفاع برج، افزایش می‌یابد. برای برج‌هایی که ارتفاعشان ۱۰۰ متر است، فاصله‌ی تکرارکننده‌ها می‌تواند ۸۰ کیلومتر باشد.

امواج مایکروویو، برخلاف امواج رادیویی، در فرکانس‌های پایین‌تر به خوبی از ساختمان‌ها عبور نمی‌کنند. به‌علاوه اگرچه پرتو باریک ممکن است به خوبی در فرستنده متمرکز گردد، هنوز هم اشکالاتی در فضا وجود دارند. بعضی از امواج ممکن است از لایه‌های پایین‌تر جو دچار انکسار شده و رسیدن آن‌ها کمی بیشتر از امواج مستقیم، طول بکشد. امکان دارد امواج تأخیری، خارج از زمان‌بندی امواج مستقیم برسند و به این ترتیب، سیگنال را از اعتبار بیندازند. این اثر، **محوشدگی چند - مسیره**^۱ نامیده شده و غالباً مسئله‌ای جدی است. این پدیده به آب‌وهوا و فرکانس وابسته است. بعضی اپراتورها ۱۰٪ از کانال‌هایشان را به عنوان یدکی، بلااستفاده می‌گذارند تا هر زمان که محوشدگی چند - مسیره موقتاً مقداری از باند فرکانسی آن‌ها را از بین ببرد، به این قسمت سویچ کنند.

نیازمندی برای طیف بیشتر و بیشتر، اپراتورها را به سوی فرکانس‌های باز هم بالاتری پیش می‌راند. استفاده از باندهای تا 10 GHz، هم‌اکنون به صورت رویه‌ای عادی درآمده است. اما با رسیدن به حدود 4 GHz، مشکل جدیدی شروع می‌شود: جذب توسط آب. طول این امواج تنها چند سانتیمتر است و توسط باران جذب می‌شوند. این اثر در صورتی خوب است که فردی بخواهد یک مایکروویو در فضای باز برای کباب کردن پرندگان بسازد، اما برای ارتباطات، مشکلی جدی ایجاد می‌کند. همانند محوشدگی چند - مسیره، تنها راه حل عبارت‌است از قطع کردن پیوندی که بارش در آن رخ داده و دور زدن آن.

خلاصه آن‌که، ارتباطات مایکروویو آن‌قدر در ارتباطات تلفنی راه دور، تلفن‌های موبایل، پخش تلویزیونی، و موارد دیگر مورد استفاده است که کمبود طیف به شدت در حال افزایش است. مایکروویو مزایای کلیدی متعددی نسبت به فیبر دارد. اصلی‌ترین آن‌ها آن است که نیازی به یک مسیر مستقیم برای قرار دادن کابل‌ها وجود ندارد. با خرید یک تکه زمین کوچک به ازای هر ۵۰ کیلومتر، و قرار دادن یک برج مایکروویو در آن، می‌توان سیستم تلفن را به طور کامل به کناری نهاد. به این ترتیب بود که MCI موفق شد فوراً کارش را به عنوان یک شرکت تلفن راه دور جدید، آغاز کند. (Sprint که رقیب دیرینه‌ی دیگری برای AT&T با ساماندهی مجدد می‌باشد، مسیری کاملاً متفاوت را طی کرد: این شرکت توسط راه‌آهن پاسیفیک جنوبی^۲ تشکیل شد که هم‌اکنون مالکیت بخش زیادی از مسیر را دارا می‌باشد و تنها کاری که کرده این است که فیبرها را در مجاورت خطوط، درون خاک قرار داده).

1. Multipath fading

2. Southern Pacific Railroad

مایکروویو نسبتاً ارزان هم هست. استقرارِ دو برج ساده (که می‌توانند فقط تیرک‌های بزرگی با چهار سیم نگه‌دارنده باشند) و نهادن آنتن‌ها بر روی هر کدامشان، احتمالاً ارزان‌تر از درون خاک نهادن ۵۰ کیلومتر فیبر در یک منطقه‌ی پُر ازدحام شهری یا بر فراز یک رشته کوه است. ممکن است حتی از اجاره کردن فیبر شرکت تلفن هم ارزان‌تر باشد. به‌خصوص در شرایطی که شرکت تلفن هنوز حتی همه‌ی پرداخت‌های مربوط به مسی که هنگام استقرار فیبر، خارج ساخته و إسقاط کرده را انجام نداده است.

سیاست‌های طیف الکترومغناطیس

به منظور اجتناب از بی‌نظمی کلی، توافق‌های ملی و بین‌المللی در این باره که چه کسانی می‌خواهند از چه فرکانس‌هایی استفاده کنند، وجود دارند. از آن‌جا که همه خواهان نرخ داده‌ی بالاتری هستند، بنابراین طیف بیشتری هم می‌خواهد. دولت‌ها جهت رادیوی AM و FM، تلویزیون، و تلفن‌های موبایل، طیف اختصاص می‌دهند، همچنین برای شرکت‌های تلفن، پلیس، دریانوردی، ناوربری (هدایت کشتی‌ها و هواپیماها)، ارتش، امور دولتی، و بسیاری کاربران رقیب، تخصیص طیف را انجام می‌دهند. آژانسی از ITU-R (یعنی WRC) جهت ایجاد هماهنگی در تخصیص طیف در سراسر جهان تلاش می‌کند، به این ترتیب دستگاه‌هایی می‌توانند ساخته شوند که در کشورهای متعددی کار کنند. اما کشورهای که مقید به توصیه‌نامه‌های ITU-R نیستند، و نیز FCC (کمیسیون ارتباطات فدرال) که مسئول تخصیص طیف برای ایالات متحده است، گاهی اوقات توصیه‌نامه‌های ITU-R را نمی‌پذیرند (معمولاً علت این امر آن است که آن‌ها نیاز دارند تا بعضی گروه‌هایی که به لحاظ سیاسی قدرتمند هستند، قسمت‌هایی از طیف را رها سازند).

حتی زمانی که قسمتی از طیف به کاری اختصاص یافته است، مثلاً تلفن موبایل، هنوز یک موردِ دیگر وجود دارد: کدام حامل مُجاز به استفاده از کدام فرکانس‌ها می‌باشد. در گذشته سه الگوریتم بیشتر از همه به کار می‌رفتند. قدیمی‌ترین الگوریتم که اغلب **مسابقه‌ی زیبایی**^۱ نامیده می‌شد، نیاز دارد که هر حامل توضیح دهد چرا طرح او بهترین خدمت را به عموم ارائه می‌دهد. سپس مقامات دولت تصمیم می‌گیرند از کدام یک از این داستان‌های زیبا، بیش از همه خوششان می‌آید. پرداخت‌های میلیاردی که بعضی مقامات دولتی به شرکت‌های مورد نظر خود دارند، غالباً منجر به رشوه، فساد، تبعیض به سود اطرافیان خود، و مواردِ بدتر از این‌ها می‌گردد. علاوه بر این، حتی یک مقام دولتی صدیق و درستکار که عقیده دارد یک شرکت خارجی می‌تواند کاری را بهتر از هر یک از شرکت‌های ملی انجام دهد، توجیهات زیادی باید ارائه دهد.

نتیجه‌ی مشاهده‌ی این مسائل، منجر به الگوریتم شماره‌ی ۲ گردید، یعنی برگزاری یک **قرعه‌کشی**^۲ میان شرکت‌های علاقمند. مشکل این ایده آن است که شرکت‌هایی که هیچ‌گونه علاقه‌ای به استفاده از طیف ندارند نیز می‌توانند وارد قرعه‌کشی شوند. اگر مثلاً یک رستوران غذاهای آماده یا

1. Beauty contest 2. Lottery

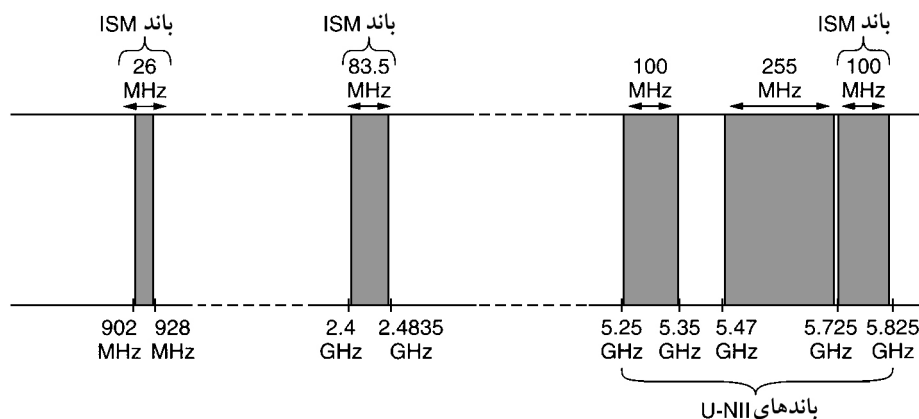
یک فروشگاه زنجیره‌ای کفش برنده شوند، می‌توانند مجدداً طیف را به یک شرکت فراهم کننده‌ی حامل بفروشند، بدون آن‌که مخاطره‌ای در این معامله باشد و در عین حال منفعت کلانی هم نصیبشان شده است.

این هدیه‌ی بادآورده برای شرکت‌هایی که فقط حواسشان جمع است اما از سایر جهات، شرکت‌هایی تصادفی محسوب می‌شوند، از سوی عده‌ی زیادی مورد انتقاد قرار گرفت به طوری که به الگوریتم شماره‌ی ۳ انجامید: مزایده^۱، یعنی فروش پهنای باند به بالاترین قیمت پیشنهادی. هنگامی که در سال ۲۰۰۰ دولت بریتانیا فرکانس‌های لازم برای نسل سوم از سیستم‌های موبایل را به مزایده گذاشت، انتظار داشت در حدود ۴ بیلیون دلار بدست آورد ولی در عمل به حدود ۴۰ بیلیون دلار رسید، زیرا فراهم کنندگان حامل درگیر رقابتی جنون‌آمیز شدند، با ترس از دست دادن کشتی موبایل. این رویداد طمع دولت‌های دیگر را تحریک نمود و موجب گردید که آن‌ها هم مزایده‌های خودشان را برگزار کنند. این راه موثر بود، اما بدهی بزرگی برای بعضی از فراهم کنندگان حامل به وجود آورد که آن‌ها را به ورشکستگی سوق داد. حتی در بهترین حالت، سال‌های زیادی طول خواهد کشید تا مبلغی که بابت صدور مجوز بوده است، تأدیه شود.

رویکردی کاملاً متفاوت نسبت به تخصیص فرکانس‌ها، عبارت‌است از آن‌که کلاً فرکانس‌ها تخصیص داده نشوند. به جای آن اجازه داده شود تا هر که مطابق میلش انتقال را انجام دهد، ولی توان مصرفی را تحت نظارت بگیریم تا ایستگاه‌ها چنان محدوده‌ی کوتاهی داشته باشند که با هم تداخل نکنند. طبیعتاً بیشتر دولت‌ها تعدادی باندهای فرکانسی را کنار گذاشته‌اند، این باندها که ISM^۲ نامیده می‌شوند جهت مصارف فاقد مجوز می‌باشند. بازکننده‌های در پارکینگ، تلفن‌های بدون سیم، اسباب‌بازی‌هایی که با رادیو کنترل می‌شوند، موش‌واره‌های بی‌سیم، و سایر دستگاه‌های متعدد خانگی از باندهای ISM استفاده می‌کنند. برای آن‌که تداخل را میان این دستگاه‌های فاقد هماهنگی، به حداقل برسانیم، FCC^۳ حکمی کتبی داده که تمام دستگاه‌هایی که در باندهای ISM هستند، توان انتقالشان را محدود نگه دارند (مثلاً تا ۱ وات) و برای پخش سیگنال‌هایشان در محدوده‌ی فرکانس‌ها، از شیوه‌های دیگری استفاده کنند. ضمناً احتمال دارد که لازم باشد دستگاه‌ها، در خصوص اجتناب از تداخل با تأسیسات رادار نیز محافظت شوند.

محل این باندها از کشوری به کشور دیگر، متغیر است. به عنوان مثال شکل ۲-۱۳، باندهایی را در ایالات متحده نشان می‌دهد که وسایل شبکه‌بندی در عمل از آن‌ها استفاده می‌کنند، بدون آن‌که نیاز به مجوز FCC داشته باشند. باند 900-MHz برای نگارش‌های اولیه‌ی 802.11 به کار می‌رفت اما این باند شلوغ شده است. باند 2.4-GHz در اغلب کشورها در دسترس است و به طور گسترده‌ای در 802.11b/g و بلوتوث استفاده می‌شود، لذا موردی برای بروز تداخل وجود دارد که از فرهای مایکروویو

1. Auction 2. Industrial (صنعتی), Scientific (علمی), Medical (پزشکی)



شکل ۲-۱۳ باندهای ISM و U-NII که توسط وسایل بی‌سیم در ایالات متحده به کار می‌روند.

تا تأسیسات رادار را در بر می‌گیرد. بخش 5-GHz ای از طیف، شامل باندهای U-NII است (زیرساخت اطلاعات ملی فاقد مجوز^۱). باندهای 5-GHz نسبتاً توسعه نیافته هستند، اما از آن‌جا که بیشترین پهنای باند را دارند و توسط 802.11a مورد استفاده قرار می‌گیرند، به سرعت از محبوبیت برخوردار شدند.

باندهای فاقد مجوز طی دهه‌ی گذشته، موفقیتی توفانی داشته‌اند. توانایی استفاده‌ی آزادانه از طیف، باعث حجم عظیمی از ابداعات در LAN ها و PAN های بی‌سیم گردید. گواهِ این مدعا، گسترش فراگیر فناوری‌هایی نظیر 802.11 و بلوتوث می‌باشد. برای آن‌که این ابداعات ادامه‌دار باشند، نیاز به طیف بیشتری وجود دارد. یکی از توسعه‌های موجود در ایالات متحده عبارت‌است از تصمیم FCC در سال ۲۰۰۹ مبنی بر آن‌که امکان استفاده‌ی بدون مجوز نزدیک به 700 MHz از فضاهای خالی^۲، داده شود. فضاهای خالی، باندهایی از فرکانس هستند که تخصیص داده شده‌اند ولی به صورت محلی استفاده نمی‌شوند. در سال ۲۰۱۰، تغییر از آنالوگ به پخش تلویزیونی تمام - دیجیتالی در ایالات متحده، فضاهای خالی‌ای در حدود 700 MHz را آزاد نمود. تنها مشکلی که وجود دارد این است که برای استفاده از فضاهای خالی، دستگاه‌های بدون مجوز بایستی بتوانند هر فرستنده‌ی دارای مجوزی که در نزدیکی آن‌ها قرار دارد را تشخیص دهند. این موضوع دربرگیرنده‌ی میکروفون‌های بی‌سیم هم می‌باشد. میکروفون‌های بی‌سیم اولین موردی بودند که حق استفاده از باند فرکانسی را یافتند.

هیاهوی بعدی در اطراف باند 60-GHz در حال برپا شدن است. در سال ۲۰۰۱، FCC باند 57 GHz تا 64 GHz را برای عملیات فاقد مجوز، باز نمود. این محدوده، بخش عظیمی از طیف است، بیشتر از مجموع همه‌ی باندهای ISM، لذا توانایی حمایت از شبکه‌های از نوع پرسرعت را دارد. این شبکه‌ها برای جریان تلویزیونی با وضوح بالا، از طریق هوا و در سراسر اتاق نشیمن شما، مورد نیاز

1. Unlicensed National Information Infrastructure

2. White space

هستند. در 60 GHz، امواج رادیویی توسط اکسیژن جذب می‌شوند. معنای این جمله آن است که سیگنال‌ها تا فواصل دور انتشار نمی‌یابند. این موضوع آن‌ها را برای شبکه‌های مسافت - کوتاه، مناسب ساخته است. فرکانس‌های بالا (60 GHz) در باند فرکانس بینهایت بالا یا "میلیمتری" واقع است، یعنی درست پایین پرتو فروسرخ (چالشی مقدماتی را در برابر سازندگان تجهیزات قرار داده‌اند، اما محصولات از هم‌اکنون در بازارند).

۲-۳-۴ انتقال فروسرخ

در ارتباطات بُرد کوتاه، استفاده‌ی زیادی از امواج فروسرخ هدایت نشده می‌شود. کنترل‌های راه دور که در تلویزیون‌ها به کار می‌روند، VCR ها، و دستگاه‌های استریو همگی از ارتباطات فروسرخ استفاده می‌کنند. آن‌ها تا اندازه‌ای تک‌راستی^۱ و ارزان هستند و ساختن‌شان آسان است ولی یک ایراد اساسی دارند، از اشیای سخت عبور نمی‌کنند. (سعی کنید مابین دستگاه کنترل از راه دورتان و تلویزیون بایستید و ببینید آیا باز هم کار خواهد کرد؟) به طور کلی، هرچه از امواج رادیویی با طول موج بلند به سمت نور قابل مشاهده می‌رویم، امواج هر چه بیشتر شبیه به نور و هرچه کمتر شبیه به امواج رادیویی رفتار می‌کنند. از طرف دیگر، این حقیقت که امواج فروسرخ از دیوارهای سخت به خوبی عبور نمی‌کنند، چندان هم بد نیست. مفهوم این موضوع آن است که یک سیستم فروسرخ در یک اتاق از ساختمان، با سیستم مشابهی که در اتاق‌های مجاور یا ساختمان‌های مجاور قرار دارند، تداخل نمی‌کند: شما قادر به کنترل تلویزیون همسایه‌تان با دستگاه کنترل راه دور خود نمی‌باشید. به‌علاوه دقیقاً به همین دلیل، امنیت سیستم‌های فروسرخ در برابر استراق سمع نیز بهتر از سیستم‌های رادیویی می‌باشد. بنابراین هیچ مجوز دولتی‌ای برای عملکرد یک سیستم فروسرخ نیاز نمی‌باشد، درست بر خلاف سیستم‌های رادیویی. سیستم‌های رادیویی در فضای خارج از باندهای ISM بایستی مجوز داشته باشند. استفاده از ارتباطات فروسرخ بر روی میز، دارای محدودیت است. به‌عنوان مثال، این محدودیت در اتصال کامپیوترهای نوت‌بوک و چاپگرها با استاندارد IrDA (انجمن داده‌ی فروسرخ^۲) دیده می‌شود. ولی این‌گونه محدودیت‌ها نقش اصلی در بازی ارتباطات ندارند.

۲-۳-۵ انتقال نور

سیگنالینگ نوری هدایت نشده یا نورشناسی فضای آزاد^۳، قرن‌هاست که مورد استفاده قرار گرفته است. پُل ریور^۴، درست قبل از اسب‌سواری معروفش، از سیگنالینگ نور دودویی از محل کلیسای باستانی شمالی^۵، استفاده نمود (هنگامی که در سال ۱۷۷۵ برای ارتش ایالات متحده پیغام‌رسانی می‌کرد. مترجم). یک کاربرد جدیدتر عبارت‌است از اتصال LAN های دو ساختمان به وسیله‌ی لیزرهای

1. Directional

2. Infrared Data Association

3. Free-space optics

4. Paul Revere

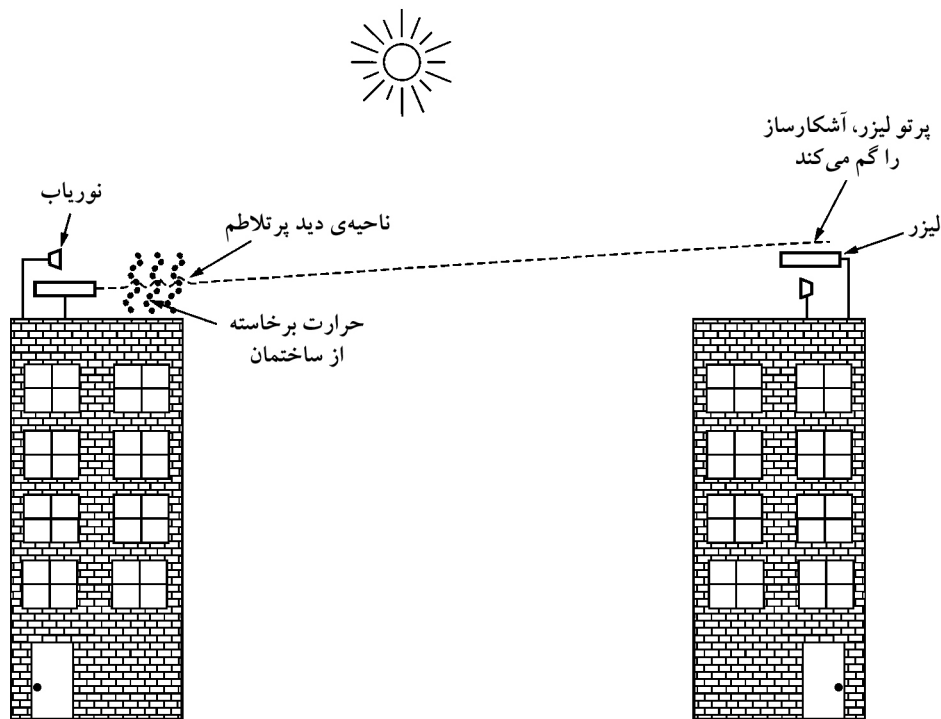
5. Old North Church

نصب شده بر بام آن‌ها. سیگنالینگ نوری که از لیزرها استفاده می‌کند، ذاتاً تک‌سویه^۱ است، لذا هر یک از دو طرف به لیزر مربوط به خود و به نوریاب^۲ مربوط به خود احتیاج دارد. چنین نظامی پهنای باند خیلی زیادی را ارائه می‌دهد که هزینه‌ی آن بسیار کم و نسبتاً ایمن است، زیرا به تله انداختن یک پرتو لیزر باریک، کار دشواری است. نصب آن هم نسبتاً آسان است، و برخلاف انتقال مایکروویو نیازی به مجوز FCC ندارد.

قدرتمندی لیزر، یعنی یک پرتو خیلی باریک، ضعف آن نیز می‌باشد. هدف‌گیری یک پرتو لیزر به باریکی ۱ میلی‌متر، به سمت هدفی به اندازه‌ی سر یک پین و به فاصله‌ی ۵۰۰ متری، نیازمند توانایی تیراندازی ویژه‌ای است. معمولاً عدسی‌هایی که در سیستم نهاده می‌شوند، پرتو را کمی از تمرکز درمی‌آورند. باد و تغییرات دمایی هم می‌توانند پرتو را منحرف سازند که سبب بیشتر شدن دشواری‌های کار می‌شود. همچنین پرتوهای لیزر توانایی رسوخ در آب یا در مه غلیظ را ندارند، هرچند که در روزهای آفتابی به خوبی کار می‌کنند. اما بسیاری از این فاکتورها هنگام استفاده از لیزر برای برقراری اتصال میان دو فضاییما، موضوع قابل اعتنایی نیستند.

یکی از نویسندگان این کتاب (یعنی AST) یک بار در کنفرانسی در یک هتل امروزی در اروپا حضور داشت. ترتیب‌دهندگان کنفرانس، با ملاحظه‌کاری، اتاقی مملو از پایانه تدارک دیده بودند تا این امکان را به حاضران در کنفرانس بدهند که در طول ارائه‌های کسل‌کننده، بتوانند نامه‌های الکترونیک‌شان را مطالعه کنند. از آنجا که PTT محلی تمایل نداشت تا تعداد زیادی خطوط تلفن را فقط برای سه روز نصب کند، برگزارکنندگان، لیزری را بر روی بام قرار دادند و آن را به طرف ساختمان علوم کامپیوتر دانشگاه که چند کیلومتر آن طرف‌تر بود، نشانه رفتند. آن‌ها لیزر را شب قبل از کنفرانس آزمایش کردند و بسیار خوب و کامل کار کرد. در ساعت ۹ صبح در یک روز آفتابی و پرنور، پیوند کاملاً دچار خرابی شد و تمام روز در همین حالت باقی ماند. این الگو دو روز بعد هم تکرار گردید. تازه بعد از کنفرانس بود که برگزارکنندگان، مشکل را پیدا کردند: همان‌طور که شکل ۲-۱۴ نشان می‌دهد، گرمای خورشید باعث برخاستن جریان همرفتی از بام ساختمان می‌شد. این هوای متلاطم، پرتو را منحرف کرده و آن را در اطراف آشکارساز به بالا و پایین می‌برد، خیلی شبیه به یک سراب جاده در یک روز داغ. درسی که در این جا گرفتیم آن است که برای آن‌که در شرایط دشوار هم همانند شرایط خوب، عملکرد خوبی داشته باشیم، لازم است که پیوندهای نور هدایت نشده، با به‌کارگیری روش‌های مهندسی و با حاشیه‌ی مناسبی از خطا، طراحی شوند.

ارتباطات نوری هدایت نشده، امروزه ممکن است مثل یک فناوری شبکه‌بندی خارق‌العاده به نظر برسند، اما احتمالاً به زودی بسیار رایج خواهند شد. ما در محاصره‌ی دوربین‌ها (که به نور حساسند) و نمایشگرها (که با استفاده از LED ها و سایر فناوری‌ها، نور ساطع می‌کنند) هستیم. ارتباطات



شکل ۲-۱۴ جریان‌های همرفتی قادرند با سیستم‌های ارتباطات لیزری تداخل کنند. در اینجا یک سیستم دوسویه با دو لیزر، تصویر شده‌اند.

داده می‌تواند در بالای این نمایشگرها لایه‌بندی شود. به این صورت که ارتباطات داده، اطلاعات را در قالب الگویی کدگذاری می‌کند که در آن الگو، LED هایی که روشن و خاموش می‌شوند، پایین‌تر از آستانه‌ی ادراک انسان هستند. به این ترتیب، ارتباطات با نور قابل مشاهده ذاتاً امن است و یک شبکه‌ی کم‌سرعت را در همسایگی بلافصل نمایشگر ایجاد می‌کند. این امر می‌تواند امکان تمام اقسام سناریوهای محاسباتی فراگیر و شگفت‌انگیز را بدهد. چراغ‌های فلاش-زن در وسایل نقلیه‌ی اورژانس ممکن است به چراغ‌های ترافیکی نزدیکشان، و به وسایل نقلیه‌ی دیگر آماده‌باش بدهند تا در باز کردن مسیر کمک کنند. تابلوهای اطلاعاتی می‌توانند این نگاشت‌ها را همه‌پخشی کنند. حتی چراغ‌های جشن نیز می‌توانند آواهایی پخش کنند که با نمایش آن‌ها همگام باشد.

۴-۲ ماهواره‌های ارتباطی

در دهه‌ی ۱۹۵۰ و اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰، در تلاش برای برپاسازی سیستم‌های ارتباطی، سیگنال‌ها را به بالون‌های هواشناسی فلزکاری شده، برخورد و سپس بازتاب می‌دادند. متأسفانه سیگنال‌های رسیده، برای استفاده در مصارف عملی، بیش از حد ضعیف بودند. سپس نیروی دریایی ایالات متحده، یک

نوع بالون هواشناسی دائمی در آسمان را مورد توجه قرار داد - ماه - و یک سیستم عملیاتی برای ارتباطات کشتی - به - ساحل^۱، با استفاده از برخورد و بازتاب سیگنال‌ها از آن ساخت.

پیشرفت بیشتر در زمینه‌ی ارتباطات کیهانی بایستی تا پرتاب اولین ماهواره‌ی ارتباطی منتظر می‌ماند. تفاوت کلیدی میان یک ماهواره‌ی مصنوعی و یک ماهواره‌ی واقعی آن است که نوع مصنوعی می‌تواند سیگنال‌ها را قبل از بازپس فرستادن، تقویت نماید، یعنی تبدیل نمودن یک کنجکاو^۲ عجیب، به یک سیستم ارتباطی قدرتمند.

ماهواره‌های ارتباطی ویژگی‌های جالبی دارند که آن‌ها را برای بسیاری از کاربردها، جذاب می‌سازد. به یک ماهواره‌ی ارتباطی در ساده‌ترین شکلش می‌توان به عنوان یک تکرار کننده‌ی مایکروویو بزرگ در آسمان، اندیشید. ماهواره شامل چندین فرستنده - گیرنده‌ی ماهواره‌ای^۳ می‌باشد که هر کدام به بخشی از طیف گوش می‌دهند، سیگنال رسیده را تقویت می‌کنند، و سپس آن را در یک فرکانس دیگر پخش مجدد^۴ می‌کنند تا از تداخل آن با سیگنال ورودی اجتناب گردد. این مود از عملیات با عنوان لوله - خمیده^۵ شناخته می‌شود. پردازش دیجیتالی هم می‌تواند به وظایف ماهواره اضافه شود تا یا به صورت مجزا به آن پرداخته شود و یا آن‌که جریان‌های داده را در طول باند، هدایت مجدد نماید. ماهواره حتی می‌تواند اطلاعات دیجیتالی را دریافت کرده و پخش مجدد نماید. بازتولید سیگنال‌ها با این روش، در مقایسه با لوله - خمیده، سبب افزایش کارایی می‌شود زیرا ماهواره، نویز را به سیگنال بالادستی تقویت نمی‌کند. پرتوهای پایین‌دستی می‌تواند عریض باشند که در این صورت بخش عمده‌ای از سطح زمین را پوشش می‌دهند، یا آن‌که باریک باشند و فقط نواحی با قطر چند صد کیلومتر را پوشش دهند.

بر طبق نظریه‌ی کپلر^۶، دوره‌ی تناوب مدار یک ماهواره، متناسب با شعاع مدار، که به توان $3/2$ رسیده است، تغییر می‌کند. هرچه ماهواره بالاتر باشد، دوره‌ی تناوب طولانی‌تر خواهد شد. نزدیک سطح زمین، دوره‌ی تناوب تقریباً ۹۰ دقیقه است. در نتیجه، ماهواره‌های مدار - پایین^۷ تقریباً به سرعت از جلوی دید عبور می‌کنند. به این ترتیب، بسیاری از آن‌ها نیازمند تأمین پوشش مداوم هستند و آنتن‌های زمینی بایستی آن‌ها را دنبال نمایند. در ارتفاع تقریباً ۳۵,۸۰۰ کیلومتری، دوره‌ی تناوب ۲۴ ساعت است. در ارتفاع ۳۸۴,۰۰۰ کیلومتری، دوره‌ی تناوب یک ماه است، که البته هر فردی که ماه را به طور منظم دیده باشد، می‌تواند شاهدش باشد.

دوره‌ی تناوب یک ماهواره، از اهمیت برخوردار است اما این تنها عاملی نیست که محل استقرار ماهواره را مشخص می‌سازد. عامل دیگر، وجود کمربندهای ون آلن^۸ است، لایه‌هایی از ذرات به شدت باردار که توسط میدان مغناطیسی زمین به دام افتاده‌اند. هر ماهواره‌ای که درون آن‌ها پرواز نماید، با سرعتی نسبتاً زیاد توسط ذرات، تخریب می‌شود. این عوامل منجر به سه ناحیه می‌شوند که

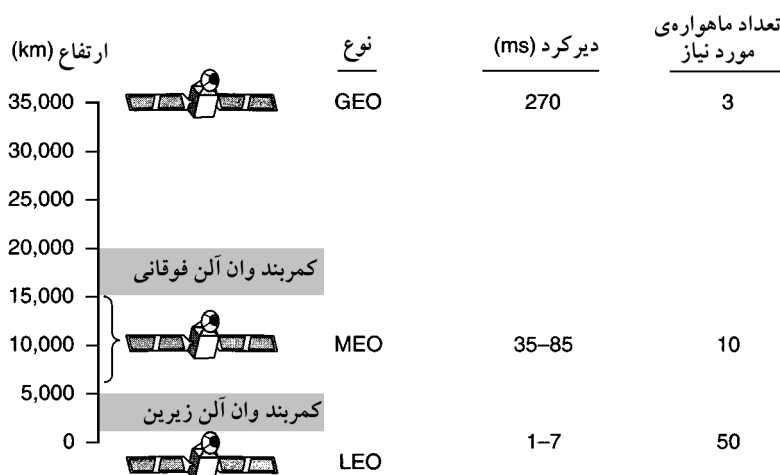
1. Ship-to-shore communication	2. Transponder	3. Rebroadcast	4. Bent pipe
5. Kepler	6. Low-orbit	7. Van Allen belts	

ماهواره‌ها در این سه ناحیه می‌توانند با امنیت مستقر گردند. این نواحی و برخی از ویژگی‌های آن‌ها در شکل ۲-۱۵ به تصویر درآمده‌اند. در ادامه به اختصار، ماهواره‌هایی که در هر یک از این نواحی ساکن هستند را توضیح می‌دهیم.

۲-۴-۱ ماهواره‌های همگرد با زمین

در سال ۱۹۴۵، نویسنده‌ی علمی - تخیلی، آرثور سی. کلارک^۱، چنین محاسبه کرد که یک ماهواره در ارتفاع ۳۵,۸۰۰ کیلومتری در یک مدار استوایی دایره‌ای، به نظر می‌رسد که در آسمان، بدون حرکت است لذا نیازی به دنبال کردن ندارد (Clarke, ۱۹۴۵). او کارش را تا توصیف یک سیستم ارتباطی کامل، ادامه داد. این سیستم از ماهواره‌های همگرد با زمین^۲ (که توسط انسان کنترل می‌شوند) استفاده می‌کرد که دربردارنده‌ی مدارها، صفحات خورشیدی، فرکانس‌های رادیویی، و رویه‌هایی برای پرتاب ماهواره بودند. متأسفانه او نتیجه‌گیری کرد که ماهواره‌ها غیرعملی هستند چون قرار دادن تقویت‌کننده‌ها در مدار، به دلیل نیازمندی به توان و نیز ظرافت و شکنندگی لامپ خلاء، امکان‌پذیر نمی‌باشد. به همین دلیل بعداً هرگز این ایده را دنبال نکرد، هرچند که تعدادی داستان علمی - تخیلی درباره‌اش نوشت.

اختراع ترانزیستور همه چیز را عوض کرد و اولین ماهواره‌ی ارتباطی ساخته‌ی دست بشر، تل‌استار^۳، در جولای ۱۹۶۲ به فضا پرتاب شد. از آن پس، ماهواره‌های ارتباطی به یک کسب و کار چندین میلیارد دلاری تبدیل شده‌اند و تنها جنبه‌ای از فضای خارج از اتمسفر هستند که بسیار سودآورند. این ماهواره‌های بلند - پرواز اغلب ماهواره‌های GEO (مدار زمینی همگرد با زمین^۴) نامیده می‌شوند.



شکل ۲-۱۵ ماهواره‌های ارتباطی و بعضی ویژگی‌های آن‌ها، شامل ارتفاع از زمین، زمان تأخیر رفت و برگشت، و تعداد ماهواره‌های لازم برای پوشش جهانی.

1. Arthur C. Clarke 2. Geostationary 3. Telstar 4. Geostationary Earth Orbit

با فناوری فعلی، برای آنکه از تداخل اجتناب شود، داشتن ماهواره‌های همگرد با زمین که فاصله‌شان از هم خیلی کمتر از دو درجه باشد، در سطح استوای 360° - درجه‌ای، کاری نابخردانه است. با فاصله‌گذاری دو درجه، در هر زمان فقط ۱۸۰ عدد ($360/2 = 180$) از این ماهواره‌ها می‌توانند در آسمان باشند. اما هر فرستنده - گیرنده‌ی ماهواره‌ای قادر است برای افزایش پهنای باند قابل دسترسی، از چندین فرکانس و قطبی‌سازی^۱ (پولاریزه‌سازی) استفاده کند.

برای آن‌که از هرج و مرج محض در آسمان جلوگیری کنیم، تخصیص بُرشی از مدار توسط ITU انجام می‌شود. این فرآیند بسیار سیاسی است، از این نظر که بعضی کشورهایی که هنوز در عصر حجر هستند، بُرشمدر "خودشان" را می‌خواهند (تا آن را به بالاترین پیشنهاد، اجاره دهند). اما بقیه‌ی کشورها معتقدند که حقوق مالکیت ملی تا ماه گسترش نمی‌یابد، و این‌که هیچ کشوری دارای حق قانونی نسبت به بُرش‌هایی از مدارها در خارج از قلمرو خود نمی‌باشد. برای این‌که به حرارت این جنگ بیفزاییم، باید متذکر شویم که تنها کاربرد مورد نظر، مخابرات تجاری و بازرگانی نیست. فرستنده‌های مخابراتی، دولت‌ها، و ارتش هم خواهان قطعه‌ای از این شیرینی خوشمزه (یعنی مدار ماهواره‌ای) هستند.

ماهواره‌های امروزی می‌توانند کاملاً بزرگ، به وزن بیش از ۵۰۰۰ کیلوگرم و با مصرف برق چندین کیلووات باشند (برق مورد نیاز، توسط صفحات خورشیدی تولید می‌شود). تأثیرات جاذبه‌ی خورشید، ماه، و زمین، می‌خواهد آن‌ها را از بُرش‌های مداری‌ای که به آن انتساب داده شده‌اند و همین‌طور از جهت‌گیری‌ای که برایشان تنظیم شده، دورشان کند. این پدیده توسط موتورهای موشکی که روی ماهواره قرار دارند، خنثی می‌شود. این عمل که به دقت تنظیم شده است، حفظ موضع^۲ نامیده می‌شود. اما هنگامی که سوخت موتورهای تمام شده باشد (معمولاً بعد از حدود ۱۰ سال)، ماهواره به تدریج از مدار خارج شده و به ناچار سرنگون می‌گردد، به همین دلیل بایستی خاموش شود. نهایتاً مدار از بین می‌رود و ماهواره مجدداً وارد اتمسفر شده و آتش می‌گیرد (یا خیلی به ندرت خرده‌هایش به زمین می‌رسند).

بُرش‌های مداری تنها موردی نیستند که در موردشان رقابت برقرار است. فرکانس‌ها هم یکی از این مواردند، زیرا انتقال‌های از طریق پیوند پایین‌دستی با کاربران مایکروویو موجود، تداخل می‌کنند. در نتیجه، ITU باندهای فرکانسی خاصی را به کاربران ماهواره اختصاص داده است. اصلی‌ترین آن‌ها در شکل ۲-۱۶ فهرست شده‌اند. باند C اولین مورد بود، که برای ترافیک تجارت ماهواره‌ای انتساب داده شد. دو محدوده‌ی فرکانسی در آن انتساب داده شده‌اند، باند کمتر برای ترافیک پیوند پایین‌دستی (از ماهواره) و باند بالاتر برای ترافیک پیوند بالادستی (به ماهواره). برای آن‌که به ترافیک اجازه دهیم تا همزمان در هر دو مسیر حرکت کند، دو کانال لازم است. این کانال‌ها هم‌اکنون نیز ازدحام دارند زیرا

باند	پیوند پایین دستی	پیوند بالادستی	پهنای باند	مشکلات
L	1.5 GHz	1.6 GHz	15 MHz	پهنای باند کم؛ پرازدحام
S	1.9 GHz	2.2 GHz	70 MHz	پهنای باند کم؛ پرازدحام
C	4.0 GHz	6.0 GHz	500 MHz	تداخل زمینی
Ku	11 GHz	14 GHz	500 MHz	باران
Ka	20 GHz	30 GHz	3500 MHz	باران؛ هزینهی تجهیزات

شکل ۲-۱۶ باندهای اصلی ماهواره.

حامل‌های عمومی از این کانال‌ها به منظور پیوندهای میکروویو زمینی، استفاده می‌کنند. دو باند L و S در سال ۲۰۰۰ به توافقنامه‌ی بین‌المللی اضافه شدند. اما این باندها باریک بوده و در عین حال، پُر ازدحام می‌باشند.

بزرگ‌ترین باند بعدی که در دسترس فراهم‌کنندگان حامل‌های مخابرات تجاری قرار دارد، باند Ku (باند زیر K^۱) است. این باند (هنوز) پرازدحام نیست، و در فرکانس‌های بالاتر آن می‌توان ماهواره‌ها ماهواره‌ها را به فاصله‌ی ۱ درجه از یکدیگر قرار داد. اما مسئله‌ی دیگری در این‌جا وجود دارد: باران. آب به خوبی این امواج میکروویو کوتاه را جذب می‌کند. خوشبختانه توفان‌های سهمگین معمولاً محلی هستند، لذا استفاده از ایستگاه‌های زمینی متعدد که در سطحی گسترده از هم جدا شده باشند، به جای استفاده از یک ایستگاه، سبب احتراز از این مشکل می‌شود. این راه حل با افزایش هزینه بابت آنتن‌های اضافی، کابل‌های اضافی، و تجهیزات الکترونیکی اضافی همراه است تا سوئیچینگ سریع میان ایستگاه‌ها امکان‌پذیر گردد. مقداری از باند Ka (باند بالای K^۲) نیز برای ترافیک ماهواره‌های تجاری، تخصیص داده شده است، اما تجهیزات لازم برای استفاده از آن گران است. علاوه بر این باندهای تجاری، تعداد زیادی باندهای دولتی و ارتشی نیز وجود دارند.

یک ماهواره‌ی امروزی در حدود ۴۰ فرستنده - گیرنده‌ی ماهواره‌ای دارد که خیلی از آن‌ها پهنای باندشان 36-MHz است. معمولاً هر فرستنده - گیرنده‌ی ماهواره‌ای در حُکم یک لوله - خمیده عمل می‌کند، اما ماهواره‌های اخیر دارای مقداری ظرفیت پردازش هم می‌باشند که بر روی بُردشان تعبیه شده و امکان عملکرد پیچیده‌تر را به آن‌ها می‌دهد. در اولین ماهواره‌ها، تقسیم فرستنده - گیرنده‌های ماهواره‌ای به کانال‌ها، به صورت ایستا انجام می‌شد: پهنای باند به طرزی کاملاً ساده به باندهای فرکانسی ثابتی تفکیک می‌شد. امروزه هر یک از پرتوهای فرستنده - گیرنده‌ی ماهواره‌ای به تعدادی بازه‌های زمانی تقسیم می‌شود، با انواع کاربرانی که به ترتیب از آن‌ها استفاده می‌کنند. جزئیات این دو روش (تسهیم به روش تقسیم فرکانس و تسهیم به روش تقسیم زمان) را بعداً در همین فصل مطالعه خواهیم کرد.

1. K under band 2. K above band

اولین ماهواره‌های همگرد با زمین، یک پرتو مکانی^۱ واحد به نام رد پای^۲ ماهواره داشتند که 1/3 از سطح زمین را فرا می‌گرفت. با کاهش شدید قیمت، اندازه، و تجهیزات نیروی برق در ریزالکترونیک، وجود یک راهبرد همه‌پخشی پیچیده‌تر امکان‌پذیر گردید. هر ماهواره با چندین آنتن و چندین فرستنده - گیرنده‌ی ماهواره‌ای تجهیز شد. هر یک از پرتوهای پایین‌دستی می‌توانند بر روی یک ناحیه‌ی جغرافیایی کوچک متمرکز شوند، بنابراین انتقال‌های بالادستی و پایین‌دستی متعدد می‌توانند همزمان انجام شوند. معمولاً این به اصطلاح پرتوهای موضعی^۳، بیضوی شکل هستند و می‌توانند تا قطر چند کیلومتر، کوچک شوند. یک ماهواره‌ی ارتباطی برای ایالات متحده معمولاً یک پرتو عریض برای ۴۸ ایالت همجوار دارد، به علاوه‌ی پرتوهای موضعی برای آلاسکا^۴ و هاوایی^۵.

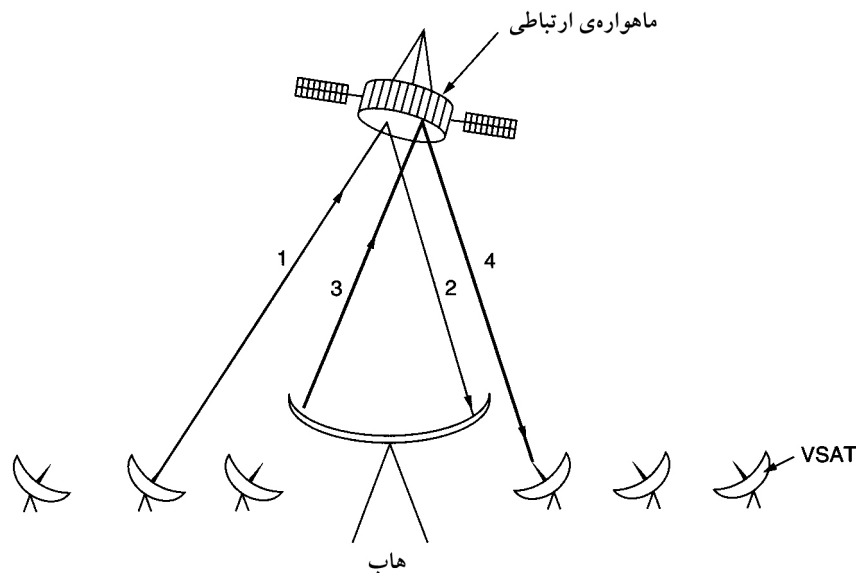
توسعه‌ی اخیر در دنیای ماهواره‌ی ارتباطی عبارتست از توسعه‌ی ریز - ایستگاه‌های^۶ کم - هزینه، که گاهی VSAT (پایانه با دهانه‌ی خیلی کوچک^۷) نامیده می‌شوند (Abramson, ۲۰۰۰). این ترمینال‌های ریز دارای آنتن ۱ متری یا کوچک‌تر هستند (در مقابل ۱۰ متر که مربوط به آنتن GEO استاندارد است) و قادر به انتشار توان ۱ وات می‌باشند. پیوند بالادستی عمدتاً برای تا 1 Mbps مناسب است، اما پیوند پایین‌دستی غالباً تا چندین مگابیت بر ثانیه است. تلویزیون ماهواره‌ای از این فناوری برای انتقال یک - طرفه، در پخش مستقیم، استفاده می‌کند.

در بسیاری از سیستم‌های VSAT، ریز - ایستگاه‌ها دارای توان کافی برای ارتباط مستقیم با یکدیگر نمی‌باشند (البته از طریق ماهواره). به جای این کار، همانطور که شکل ۲-۱۷ نشان می‌دهد، یک ایستگاه مخصوص زمینی، یعنی هاب^۸، با یک آنتن بزرگ با بهره‌وری بالا لازم است تا ترافیک را میان VSAT ها بازپخشی^۹ نماید. در این مود از عملیات، چه ارسال‌کننده و چه گیرنده دارای یک آنتن بزرگ و یک تقویت‌کننده‌ی قدرتمند هستند. مصالحه‌ای میان تأخیر بیشتر، در مقابل داشتن ایستگاه‌های کاربری ارزان‌تر وجود دارد.

ماهواره‌های VSAT پتانسیل زیادی در نواحی روستایی دارند. بیش از نیمی از مردم دنیا در جایی زندگی می‌کنند که بیش از یک ساعت پیاده تا نزدیک‌ترین تلفن فاصله دارند، هر چند که قدر این موهبت را نمی‌دانند. کشیدن خطوط تلفن به هزاران دهکده‌ی کوچک بسیار فراتر از بودجه‌ی تقریباً یک سوم از دولت‌های جهان است، اما نصب دیش‌های ۱ متری ماهواره‌ی VSAT که انرژی الکتریکی‌شان را از سلول‌های خورشیدی می‌گیرند، غالباً امکان‌پذیر است. ماهواره‌های VSAT فناوری‌ای را تأمین می‌کنند که دنیا را سیم‌کشی خواهد کرد.

ماهواره‌های ارتباطی ویژگی‌های متعددی دارند که بسیار متفاوت از پیوندهای نقطه - به - نقطه می‌باشند. برای شروع، اگرچه سیگنال‌ها با سرعت نور (یعنی نزدیک به ۳۰۰,۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه) به‌از

1. Spatial	2. Footprint	3. Spot beam	4. Alaska	5. Hawaii	6. Microstation
7. Very Small Aperture Terminal		8. Hub	9. Relay		



شکل ۲-۱۷ ماهواره‌های VSAT در حال استفاده از یک هاب.

ماهواره حرکت می‌کند، ولی فاصله‌ی طولانی رفت و برگشت، تأخیر قابل توجهی را برای ماهواره‌های GEO به بار می‌آورد. بسته به فاصله‌ی میان کاربر و ایستگاه زمینی و ارتفاع ماهواره از سطح افق، زمان گذار آنها - به - انتها، بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌ثانیه است. مقدار معمول عبارت‌است از ۲۷۰ میلی‌ثانیه (۵۴۰ میلی‌ثانیه برای یک سیستم VSAT، همراه با یک هاب).

به منظور مقایسه، پیوندهای میکروویو زمینی دارای تأخیر انتشاری در حدود ۳ میکروثانیه در کیلومتر هستند. تأخیر در پیوندهای کابل کواکسیال یا فیبر نوری تقریباً ۵ میکروثانیه در کیلومتر است. مورد اخیر کندتر از مورد اول است زیرا سیگنال‌های الکترومغناطیس، در هوا سریع‌تر عبور می‌کنند تا در مواد جامد.

ویژگی مهم دیگر در ماهواره‌ها آن است که ماهواره‌ها ذاتاً رسانه‌ی همه‌پخشی هستند. ارسال یک پیغام به هزاران ایستگاه در محدوده‌ی ردپای یک فرستنده - گیرنده‌ی ماهواره‌ای، نسبت به ارسال به یک ایستگاه، هزینه‌ی بیشتری ندارد. برای بعضی کاربردها، این ویژگی بسیار مفید است. به عنوان مثال، می‌توان تصور نمود که یک ماهواره، صفحات وب عمومی را به حافظه‌ی پنهان تعداد زیادی کامپیوتر که در منطقه‌ی وسیعی پراکنده‌اند، همه‌پخشی کند. حتی زمانی که همه‌پخشی می‌تواند با خطوط نقطه - به - نقطه شبیه‌سازی شود، همه‌پخشی با ماهواره ممکن است بسیار ارزان‌تر تمام شود. از طرف دیگر، ماهواره‌ها از نقطه نظر محرمانگی و حفظ حریم خصوصی، یک فاجعه‌ی تمام عیار هستند: هر فردی می‌تواند هر چیزی را شنود کند. در مواقعی که امنیت لازم است، رمزگذاری ضرورت دارد.

همچنین ماهواره‌ها دارای این ویژگی هستند که هزینه‌ی انتقال یک پیغام، مستقل از مسافتی است که طی می‌شود. یک تماس با آن طرف اقیانوس مبلغ سرویسش بیشتر از یک تماس با آن طرف خیابان نیست. ماهواره‌ها از نرخ خطای عالی‌ای نیز برخوردارند و تقریباً بلافاصله مستقر می‌شوند، این امر برای واکنش‌های اضطراری و برای ارتباطات نظامی بسیار قابل ملاحظه است.

۲-۴-۲ ماهواره‌های مدار متوسط

در ارتفاع خیلی پایین‌تر، مابین دو کمربند و ن‌آلن، به ماهواره‌های MEO (مدار متوسط)^۱ برمی‌خوریم. آن طور که از زمین به نظر می‌رسد، این ماهواره‌ها به آهستگی در امتداد طول جغرافیایی حرکت می‌کنند، به طوری که چیزی در حدود ۶ ساعت برای گردش به دور زمین طول می‌کشد. از این رو بایستی در حین حرکت در آسمان، ردیابی شوند. چون در ارتفاع پایین‌تر از GEOها هستند، ردیابی کوچک‌تری بر روی زمین دارند و نیازمند فرستنده - گیرنده‌هایی با قدرت کمتر می‌باشند. در حال حاضر از آن‌ها به جای استفاده در مخابرات، برای سیستم‌های ناوبری استفاده می‌شود، بنابراین بیشتر از این در این‌جا به آن‌ها نمی‌پردازیم. مجموعه‌ای از تقریباً ۳۰ عدد ماهواره‌ی GPS (سیستم موقعیت‌یابی جهانی)^۲ که تقریباً در مدار ۲۰,۲۰۰ کیلومتری حرکت می‌کنند، نمونه‌هایی از ماهواره‌های MEO هستند.

۳-۴-۲ ماهواره‌های مدار پایین

با کاهش ارتفاع، به ماهواره‌های LEO (مدار پایین)^۳ می‌رسیم. به واسطه‌ی حرکت سریع آن‌ها، برای یک سیستم کامل، به تعداد زیادی از این ماهواره‌ها نیاز است. از سوی دیگر، چون این ماهواره‌ها خیلی به زمین نزدیکند، ایستگاه‌های زمینی به توان زیادی احتیاج ندارند، و تأخیر رفت و برگشت هم تنها چند میلی‌ثانیه است. هزینه‌ی پرتاب آن‌ها هم خیلی کمتر است. در این بخش دو مثال از مجموعه‌های ماهواره‌ای برای سرویس صوتی، یعنی ایریدیوم^۴ و گلوبال‌استار^۵ را بررسی می‌کنیم.

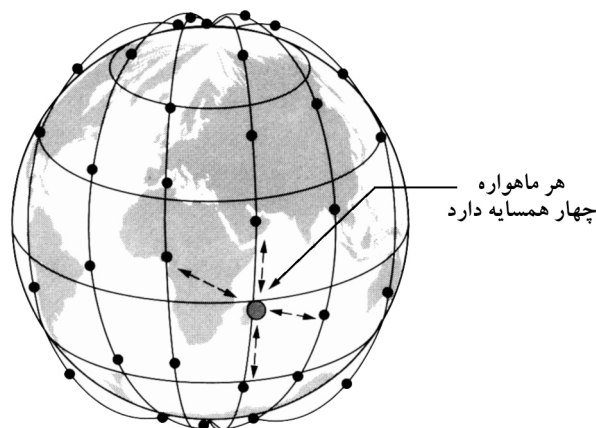
در ۳۰ سال اول از عصر ماهواره، از ماهواره‌های مدار - پایین به ندرت استفاده می‌شد زیرا آن‌ها به سرعت به حوزه‌ی دید وارد و از آن خارج می‌شدند. در ۱۹۹۰، موتورولا با طرح تقاضانامه‌ای به FCC برای درخواست پرتاب ۷۷ ماهواره‌ی مدار - پایین در ارتباط با پروژه‌ی ایریدیوم (ایریدیوم عنصری با عدد اتمی ۷۷ است)، زمینه‌ی تازه‌ای را مطرح نمود. این طرح بعداً برای استفاده از تنها ۶۶ ماهواره، بازنویسی گردید، بنابراین پروژه بایستی به دیسپوزیوم (عنصر ۶۶) نام‌گذاری مجدد می‌شد ولی احتمالاً این کار به نظر ناجور بود. ایده آن بود که به محض آن‌که یک ماهواره از دید خارج شود، دیگری جای آن را بگیرد. این طرح حالتی جنون‌آمیز میان سایر شرکت‌های ارتباطی ایجاد کرد. یک باره همه خواهان پرتاب زنجیره‌ای از ماهواره‌های مدار - پایین شدند.

1. Medium-Earth Orbit
2. Globalstar

2. Global Positioning System

3. Low-Earth Orbit

4. Iridium

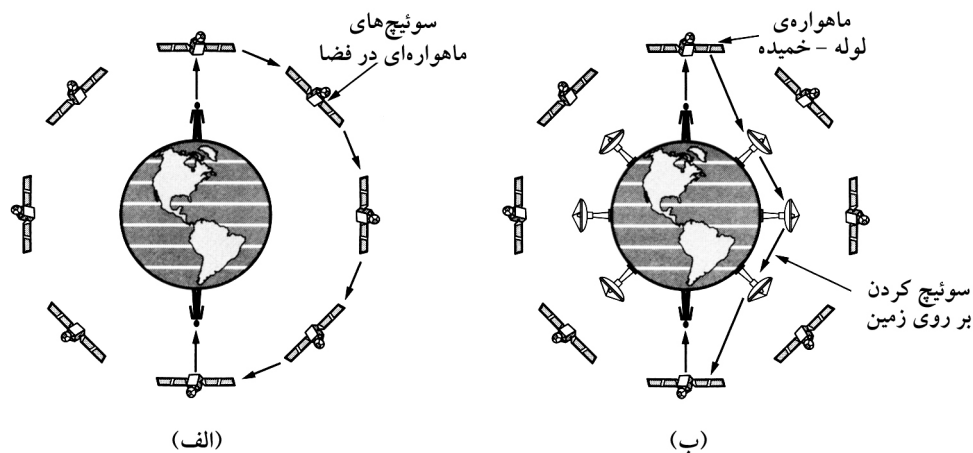


شکل ۲-۱۸ ماهواره‌های ایریدیوم، ۶ گلوبند در اطراف زمین تشکیل می‌دهند.

پس از چند سال جور کردن شرکا و سرمایه‌گذاری، در نوامبر ۱۹۹۸، سرویس ارتباطات آغاز به کار کرد. متأسفانه نیاز تجاری برای تلفن‌های ماهواره‌ای بزرگ و سنگین، ناچیز شده بود زیرا از سال ۱۹۹۰ شبکه‌ی تلفن موبایل به طرز خارق‌العاده‌ای رشد کرده بود. در نتیجه ایریدیوم سودآور نشد و در آگوست ۱۹۹۹ در یکی از چشمگیرترین ناکامی‌های شرکتی تاریخ، ناچار به اعلام ورشکستگی گردید. ماهواره‌ها و سایر دارایی‌ها (به ارزش ۵ میلیارد دلار) بعداً در یک حراجی با قیمت‌های کهنکشان، توسط یک سرمایه‌دار به مبلغ ۲۵ میلیون دلار خریداری شد. بقیه‌ی معاملات ریسکی در کسب‌وکار ماهواره، بلافاصله همین شیوه را دنبال کردند.

سرویس ایریدیوم در مارچ ۲۰۰۱ مجدداً آغاز گردید و از آن زمان تاکنون پیشرفت کرده است. ایریدیوم سرویس‌های صوت، داده، پیغام‌رسانی^۱، فاکس، و ناوبری را برای تمام نقاط روی زمین، هوا، و دریا از طریق وسایل دستی که مستقیماً با ماهواره‌های ایریدیوم در ارتباط هستند، فراهم می‌کند. مصرف‌کنندگان عبارتند از دریانوردان، هوانوردان، و صنایع اکتشاف نفت، همین‌طور مردمی که در بخش‌هایی از دنیا که فاقد زیرساخت مخابراتی است، در حرکتند (مانند بیابان‌ها، کوه‌ها، قطب جنوب، و بعضی کشورهای توسعه‌نیافته).

ماهواره‌های ایریدیوم در ارتفاع ۷۵۰ کیلومتری و در مدارهای دایره‌وار قطبی مستقر شده‌اند. آن‌ها به صورت گلوبندهایی برای قطب شمال آرایش یافته‌اند، به طوری که همانند شکل ۲-۱۸، در هر ۳۲ درجه‌ی عرض جغرافیایی یک ماهواره قرار دارد. هر ماهواره حداکثر دارای ۴۸ سلول (پرتوی نقطه‌ای) و ظرفیت ۳۸۴۰ کانال می‌باشد، که بعضی از آن‌ها برای پیغام‌رسانی و ناوبری استفاده می‌شوند در حالی که بقیه برای داده و صوت به کار می‌روند.



شکل ۲-۱۹ (الف) بازپخش‌ی در فضا. (ب) بازپخش‌ی در زمین.

همانطور که در شکل ۲-۱۸ نمایانده شده، با ۶ گلوبندِ ماهواره‌ای، کل زمین پوشش داده می‌شود. یک ویژگی جالب ایریدیوم آن است که همان‌طور که شکل ۲-۱۹ (الف) نشان می‌دهد، ارتباط میان مصرف‌کنندگانی که از دور هستند، در فضا اتفاق می‌افتد. در این شکل یک تماس گیرنده^۱ را در قطب شمال می‌بینیم که مستقیماً با ماهواره‌ی بالای سرش تماس گرفته. هر ماهواره دارای چهار همسایه است که می‌تواند با آن‌ها ارتباط برقرار کند، دو تا در همان گلوبند (نشان داده شده) و دو تا در گلوبند مجاور (نشان داده نشده). ماهواره‌ها، تماس را از طریق این گرید^۲ بازپخش می‌کنند تا آن‌که بالاخره آن را به پذیرنده‌ی تماس^۳ در قطب جنوب برسانند.

گلوبال‌استار گزینه‌ی طراحی دیگری نسبت به ایریدیوم است. گلوبال‌استار مبتنی است بر ۴۸ ماهواره‌ی LEO، اما از یک نظام سوئیچینگ متفاوت نسبت به ایریدیوم استفاده می‌کند. ایریدیوم تماس‌ها را از ماهواره‌ای به ماهواره‌ی دیگر بازپخش می‌کند، این کار نیازمند تجهیزات پیشرفته‌ی سوئیچینگ در ماهواره‌هاست، ولی گلوبال‌استار از طراحی لوله - خمیده‌ی قراردادی استفاده می‌کند. در شکل ۲-۱۹ (ب)، تماسی که در قطب شمال شروع شده است، به زمین ارسال می‌شود و توسط یک ایستگاه زمینی بزرگ در کارگاه بابا نوئل^۴ گرفته می‌شود. پس از آن، تماس از طریق یک شبکه‌ی زمینی به سمت نزدیکترین ایستگاه زمینی به پذیرنده‌ی تماس، مسیریابی شده و به وسیله‌ی یک اتصال لوله - خمیده، همان‌طور که نشان داده شده، تحویل می‌شود. مزیت این نظام آن است که بیشتر پیچیدگی در زمین قرار دارد، یعنی جایی که مدیریت آن آسان‌تر است. همچنین استفاده از آنتن‌های ایستگاه‌های

1. Caller 2. Grid 3. Callee

۴. در اینجا در بیان مطلب، به مزاح به کارگاه عروسک‌سازی بابانوئل (Santa's Workshop) در قطب شمال، اشاره شده است (مترجم).

زمینی بزرگ که می‌توانند سیگنال ضعیفی را دریافت، و سیگنال قدرتمندی را صادر کنند، به معنای آن است که می‌توان از تلفن‌هایی با توان کمتر هم استفاده نمود. به هر حال، تلفن فقط چند میلی‌وات توان را منتشر می‌کند، بنابراین سیگنالی که به ایستگاه زمینی بازمی‌گردد تا اندازه‌ای ضعیف است، حتی وقتی که توسط ماهواره تقویت شده باشد.

پرتاب ماهواره‌ها با نرخ در حدود ۲۰ عدد در هر سال، همچنان ادامه دارد. این تعداد بردارنده‌ی ماهواره‌های بزرگ‌تر با وزن بیش از ۵۰۰۰ کیلوگرم نیز می‌باشد. اما ماهواره‌های خیلی کوچکی نیز وجود دارند که مناسب سازمان‌های با بودجه‌ی محدود هستند. برای آن‌که تحقیقات فضایی دسترس‌پذیرتر شوند، دانشگاهیان کال پولی^۱ و استنفورد^۲، در سال ۱۹۹۹ با یکدیگر ارتباط برقرار کردند تا استانداردی برای ماهواره‌های مینیاتوری و یک پرتابگر مرتبط با آن را تعریف نمایند و هزینه‌ی پرتاب را به میزان زیادی کاهش دهند (Nugent و همکاران، ۲۰۰۸). ماهواره‌های مکعبی با نام CubeSats، ماهواره‌هایی با ابعاد یک مکعب $10 \times 10 \times 10$ سانتیمتر هستند که وزن هر یک بیشتر از ۱ کیلوگرم نمی‌باشد و می‌توانند با هزینه‌ی مثلاً ۴۰,۰۰۰ دلار به ازای هر ماهواره‌ی کوچک، پرتاب شوند. پرتاب کننده به عنوان محموله‌ی ثانویه در مأموریت‌های فضایی تجاری، به هوا فرستاده می‌شود. پرتاب کننده اساساً یک استوانه‌ی مشتمل بر سه دستگاه ماهواره‌ی مکعبی (cubesat) می‌باشد که از فزهایی برای رها کردن آن‌ها به مدار استفاده می‌کند. تا به حال تقریباً ۲۰ عدد ماهواره‌ی مکعبی پرتاب شده‌اند و تعداد بسیار بیشتری هم در دست ساخت هستند. بیشتر آن‌ها با ایستگاه‌های زمینی، بر روی باندهای UHF و VHF، ارتباط برقرار می‌کنند.

۴-۴-۲ ماهواره‌ها در مقابل فیبر

مقایسه‌ی میان ارتباط ماهواره‌ای و ارتباط زمینی، آموزنده است. تا ۲۵ سال قبل چنین تصور می‌شد که بنیان آینده‌ی ارتباطات با ارتباطات ماهواره‌ای عجین است. یادآوری می‌شود که سیستم تلفن در ۱۰۰ سال اخیر، تغییر مختصری کرده بود و هیچ علامتی از تغییرات در ۱۰۰ سال آینده دیده نمی‌شد. این حرکت آهسته (که مانند رودخانه‌ای از یخ بود) هیچ انگیزه‌ای را در گردانندگان آن ایجاد نمی‌کرد. در فضای موجود، از شرکت‌های تلفن انتظار می‌رفت که سرویس صوتی خوبی را با بهای معقول ارائه دهند (یعنی همان کاری که شرکت‌های تلفن انجام می‌دادند) و در مقابل، بازگشت سود سرمایه‌گذاری آن‌ها، ضمانت شود. برای مردمی که داده‌ای برای انتقال داشتند، مودم‌های ۱۲۰۰-bps قابل دسترسی بود. این تقریباً تمام آن چیزی بود که وجود داشت.

آغاز رقابت در ۱۹۸۴ در ایالات متحده و کمی بعد در اروپا، همه چیز را از اساس تغییر داد. شرکت‌های تلفن شروع به جایگزین‌سازی شبکه‌های دور - بُردشان، با فیبر کردند و سرویس‌هایی با

1. Cal Poly 2. Stanford

پهنای باند بالا از قبیل ADSL (خط دیجیتالی نامتقارن یک مشترک^۱) را معرفی نمودند. آن‌ها همچنین کاری که مدت‌ها بود انجام می‌دادند را متوقف نمودند: دریافت هزینه‌های بالا به صورت مصنوعی از کاربران مسافت‌های دور، به منظور دادنِ یارانه به سرویس محلی. به یک‌باره، اتصالات فیبر زمینی به نظر برنده‌ی ماجرا شدند.

با این وجود، ماهواره‌های ارتباطی بازارهای عمده‌ای با موقعیت عالی دارند که فیبر فاقد آن است (و گاهی اوقات اصلاً توان رسیدن به این موقعیت را ندارد). اول آن‌که، وقتی آرایش سریع، حیاتی باشد، ماهواره‌ها به آسانی برنده می‌شوند. واکنش سریع در زمان جنگ، و واکنش در هنگام بروز بلایا در زمان صلح، برای سیستم‌های ارتباطات نظامی سودمند است. به عنوان مثال، به دنبال زمین‌لرزه‌ی شدید سوماترا^۲ در دسامبر ۲۰۰۴ و سونامی‌ای که متعاقب آن رخ داد، ماهواره‌های ارتباطی توانستند ظرف ۲۴ ساعت ارتباطات را به وضع اولیه‌ی خود، یعنی پاسخگویی‌های اولیه‌ی ماهواره‌ای، برگردانند. دلیل امکان‌پذیر بودن چنین واکنش سریعی آن بود که یک بازار فراهم‌کننده‌ی سرویس ماهواره‌ای نظام‌یافته وجود دارد که در این بازار، دست‌اندرکارانی مثل ایتل‌ست^۳ با بیش از ۵۰ ماهواره، می‌توانند ظرفیت را تقریباً به هر جایی که نیاز باشد اجاره دهند. برای مصرف‌کنندگانی که توسط شبکه‌های ماهواره‌ای موجود سرویس می‌گیرند، یک VSAT می‌تواند به آسانی و به سهولت برپا گردد تا یک پیوند یک مگابیت بر ثانیه را به مقصد هر جایی در دنیا، فراهم نماید.

موقعیت خوب دوم، برای ارتباطات در محل‌هایی است که توسعه‌ی زیرساخت زمینی، ضعیف می‌باشد. امروزه بسیاری از مردم می‌خواهند هر جا می‌روند، برقراری ارتباطات را داشته باشند. شبکه‌های تلفن موبایل موقعیت‌هایی که تراکم جمعیتی خوبی دارند را پوشش می‌دهند، اما در سایر جاها این کار را به طرز قابل قبولی انجام نمی‌دهند (مثلاً در دریا یا بیابان). برعکس، ایریدیوم سرویس صوتی را در هر نقطه‌ای از زمین، حتی در قطب جنوب تأمین می‌کند. بسته به نوع زمین و حق مالکیت اجباری، نصب زیرساخت زمینی نیز می‌تواند گران باشد. مثلاً اندونزی، ماهواره‌ی متعلق به خود را برای ترافیک تلفنی داخل مرزهای خود، دارا می‌باشد. پرتاب یک ماهواره ارزان‌تر بوده است تا ردیف کردن هزاران کابل در زیر دریا و در میان ۱۳,۶۷۷ جزیره‌ی این مجمع‌الجزایر.

موقعیت خوب سوم، مربوط است به هنگامی که ضرورت بر همه‌پخشی می‌باشد. پیغامی که توسط ماهواره ارسال شده، می‌تواند در آن واحد توسط هزاران ایستگاه زمینی دریافت گردد. به همین دلیل از ماهواره‌ها در توزیع بسیاری از برنامه‌های شبکه‌های تلویزیونی به ایستگاه‌های محلی استفاده می‌شود. هم‌اکنون بازار بزرگی وجود دارد تا با استفاده از گیرنده‌های ماهواره‌ای در منازل و اتومبیل‌ها، برنامه‌های تلویزیون دیجیتالی و رادیو مستقیماً برای کاربران نهایی پخش شوند. همه‌ی انواع محتواهای دیگر هم می‌توانند همه‌پخشی شوند. به عنوان مثال، برای یک شرکت، انتقال جریانی از نام و مشخصات

1. Asymmetric Digital Subscriber Line

2. Sumatra

3. Intelsat

محصولات، تعهدات، یا قیمت محصولات به هزاران شرکتی که به عنوان عامل فروش (یا واسطه) با آنها در ارتباط است، از طریق یک سیستم ماهواره‌ای، ممکن است ارزان‌تر باشد تا شبیه‌سازی همه-پخشی از طریق زمین.

خلاصه آن‌که، به نظر می‌رسد جریان اصلی ارتباطات در آینده، ترکیب فیبر نوری زمینی با رادیوی سلولی خواهد بود ولی برای بعضی کاربردهای خاص، ماهواره‌ها بهترند. اما هشدار وجود دارد که بر تمام این موارد موثر است: اقتصاد. گرچه فیبر پهنای باند بیشتری ارائه می‌دهد، اما این امکان هم وجود دارد که ارتباطات زمینی و ماهواره‌ای بتوانند به لحاظ قیمت، رقابتی فعال داشته باشند. اگر تازه‌های فناوری به طور اساسی هزینه‌ی پرتاب ماهواره را کاهش دهند (مثلاً اگر در آینده وسایل نقلیه‌ی فضایی بتوانند چند دوجین ماهواره را با یک پرتاب، با خود ببرند) یا ماهواره‌های مدار - پایین خیلی محبوب شوند، این‌که فیبر همه‌ی بازارها را خواهد بُرد، دیگر امری قطعی نخواهد بود.

۵-۲ تلفیق‌سازی دیجیتالی و تسهیم

اینک که ویژگی‌های کانال‌های باسیم و بی‌سیم را مطالعه نموده‌ایم، توجه خود را به مسئله‌ی ارسال اطلاعات دیجیتال معطوف می‌کنیم. کانال‌های باسیم و بی‌سیم، سیگنال‌های آنالوگ از جمله تغییر پیوسته‌ی ولتاژ، شدت نور، یا شدت صوت را حمل می‌کنند. به منظور ارسال اطلاعات دیجیتال، بایستی سیگنال‌های آنالوگ را به نحوی طراحی کنیم که تجسم‌کننده‌ی بیت‌ها باشند. فرآیند تبدیل میان بیت‌ها و سیگنال‌هایی که آن بیت‌ها را نشان می‌دهند، **تلفیق‌سازی دیجیتالی**^۱ نامیده می‌شود.

با نظام‌هایی آغاز خواهیم کرد که مستقیماً بیت‌ها را به یک سیگنال تبدیل می‌کنند. این نظام‌ها نتیجه‌شان **ارسال باندپایه**^۲ است. در این شیوه، سیگنال، فرکانس‌های از صفر تا یک مقدار بیشینه را اشغال می‌کند. این مقدار بیشینه به نرخ سیگنالینگ بستگی دارد. این شیوه برای فناوری باسیم متداول است. سپس نظام‌هایی را بررسی خواهیم کرد که دامنه، فاز، یا فرکانس یک سیگنال حامل را تنظیم می‌کنند تا بیت‌ها را انتقال دهند. حاصل این نظام‌ها، **ارسال باند عبوری**^۳ است. در این شیوه، سیگنال، یک باند فرکانسی در محدوده‌ی فرکانس سیگنال حامل را اشغال می‌نماید. این شیوه برای کانال‌های بی‌سیم و کانال‌های نوری متداول است. برای این کانال‌ها، سیگنال‌ها بایستی در یک باند فرکانسی مفروض باقی بمانند.

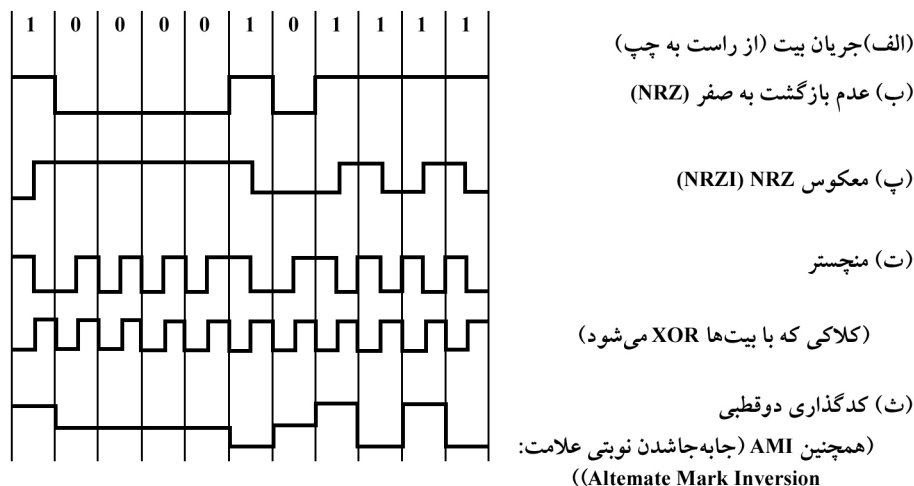
کانال‌ها غالباً مورد اشتراک چندین سیگنال قرار می‌گیرند. استفاده از یک سیم سیگنال برای حمل چندین سیگنال متداول‌تر است تا آن‌که برای هر سیگنال یک سیم نصب کنیم. این نوع اشتراک، **تسهیم**^۴ نام دارد. این کار به چندین شیوه‌ی مختلف انجام می‌شود. در این جا روش‌هایی برای تسهیم به روش تقسیم زمان، فرکانس، و کد ارائه خواهیم داد.

1. Digital modulation

2. Baseband transmission

3. Passband transmission

4. Multiplexing



شکل ۲-۲۰ کدهای خط: (الف) بیت‌ها، (ب) NRZ، (پ) NRZI، (ت) منچستر، (ث) دوقطبی یا AMI.

شیوه‌های تلفیق‌سازی و تسهیمی که در این بخش شرح خواهیم داد، همگی به صورتی گسترده برای کانال‌های باسیم، فیبر، بی‌سیم زمینی، و ماهواره‌ای به کار می‌روند. در بخش‌های بعد مثال‌هایی از شبکه‌ها را بررسی خواهیم کرد تا آن‌ها را در حال کار، مشاهده نماییم.

۲-۵-۱ ارسال باند پایه

سراسرترین شکل تلفیق‌سازی دیجیتال عبارت‌است از استفاده از یک ولتاژ مثبت برای نمایش 1 و یک ولتاژ منفی برای نمایش 0. در فیبر نوری، ممکن است وجود نور، نشان‌دهنده‌ی 1 و عدم وجود نور، نشان‌دهنده‌ی 0 باشد. این نظام را NRZ (عدم بازگشت به صفر^۱) می‌نامند. این نامگذاری به دلایل تاریخی است و صرفاً به معنای آن است که سیگنال، داده را دنبال می‌کند. در شکل ۲-۲۰(ب) یک مثال نشان داده شده است.

پس از ارسال، سیگنال NRZ در طول سیم انتشار می‌یابد. از طرف دیگر گیرنده با نمونه‌سازی سیگنال در فواصل منظم زمانی، آن را تبدیل به بیت‌ها می‌کند. به نظر نمی‌رسد که این سیگنال دقیقاً عین سیگنال ارسالی باشد. سیگنال به وسیله‌ی کانال و نویز در گیرنده، ضعیف و کج و معوج می‌شود. گیرنده به منظور کدبرداری^۲ بیت‌ها، نمونه‌های^۳ سیگنال را به نزدیکترین نمادها تبدیل می‌کند. برای NRZ، از یک ولتاژ مثبت برای تشخیص ارسال 1، و از یک ولتاژ منفی برای تشخیص ارسال 0 استفاده می‌شود. از آنجا که NRZ ساده است، لذا یک نقطه‌ی شروع خوب برای مطالعات ماست اما در عمل به ندرت از آن به تنهایی استفاده می‌شود. نظام‌های پیچیده‌تر می‌توانند تبدیل بیت‌ها به سیگنال‌ها را به

1. Non-Return-to-Zero 2. Decode 3. Sample

نحوی انجام دهند که ملاحظات مهندسی را بهتر فراهم کنند. این نظام‌ها، کدهای خط^۱ نام دارند. در زیر، کدهای خط را توضیح می‌دهیم. این کدها همراه با راندمان پهنای باند، بازیافت کلاک^۲، و ایجاد توازن در DC، به ما کمک می‌کنند.

راندمان پهنای باند

با NRZ، امکان دارد که سیگنال مابین سطوح مثبت و منفی، به ازای هر دو بیت (در حالتی که 1 ها و 0 ها حالت تناوبی دارند)، دچار چرخه شود. این بدان معناست که وقتی نرخ بیت، B بیت بر ثانیه باشد، پهنای باند مورد نیاز، دست کم $B/2$ Hz است. این رابطه از نرخ نایکوئیست^۳ [معادله‌ی (۲-۲)] به دست می‌آید. این مقدار، یک حدّ بنیادی است بنابراین بدون استفاده از پهنای باند بیشتر نمی‌توانیم NRZ را سریع‌تر اجرا نماییم. پهنای باند غالباً یک منبع محدود است، حتی برای کانال‌های باسیم. تضعیف سیگنال، در سیگنال‌های با فرکانس بالاتر، افزایش بیشتری دارد که همین امر سودمندی این سیگنال‌ها را کمتر می‌کند. همچنین، سیگنال‌های با فرکانس بالاتر، تجهیزات الکترونیکی سریع‌تری نیاز دارند. یک راه‌برد برای استفاده‌ی کارآمدتر از پهنای باند محدود عبارت‌است از استفاده از بیش از دو سطح برای سیگنالینگ. مثلاً با استفاده از ۴ ولتاژ می‌توانیم همزمان دو بیت را به عنوان یک نماد^۴ سیگنال، ارسال کنیم. این طرح مادام که سیگنال در گیرنده به اندازه‌ی کافی قدرتمند باشد که بتوان چهار سطح را از هم تمیز داد، کار خواهد کرد. نرخ‌ی که در آن نرخ، سیگنال تغییر می‌کند برابر با نصف نرخ بیت می‌شود، بنابراین پهنای باند مورد نیاز کاهش یافته است.

نرخ‌ی که در آن، سیگنال تغییر می‌کند را نرخ نماد^۵ می‌نامیم تا آن را از نرخ بیت متمایز کرده باشیم. نرخ بیت عبارت‌است از نرخ نماد ضربدر تعداد بیت‌های نماد. نام قدیمی‌تر برای نرخ نماد، نرخ باود^۶ است به‌خصوص در رابطه با وسایلی به نام مودم‌های تلفنی که داده‌ی دیجیتال را از طریق خطوط تلفن حمل می‌کنند. در متون، "نرخ بیت" و "نرخ باود" غالباً به صورت ناصحیح به کار می‌روند. توجه کنید که تعداد سطوح سیگنال لازم نیست توانی از ۲ باشند. اغلب هم این چنین نیست، در عین حال سطوحی برای حفاظت در برابر خطاها و برای سهولت طراحی گیرنده، به کار گرفته شده‌اند.

بازیافت کلاک

در تمام نظام‌هایی که بیت‌ها را به نمادها کد می‌کنند، گیرنده بایستی بدانند چه موقع یک نماد تمام شده و نماد بعدی شروع می‌شود تا کدبرداری بیت‌ها را درست انجام دهد. در مورد NRZ، نمادها همان سطوح ولتاژ هستند و یک جریان طولانی از 0 ها و 1 ها، باعث می‌شوند که سیگنال بدون تغییر بماند. بعد از مدتی، دشوار است که بیت‌ها از هم تشخیص داده شوند و به طور مثال، ۱۵ تا صفر خیلی شبیه به ۱۶ تا صفر به نظر می‌رسند، مگر آن‌که یک کلاک خیلی دقیق داشته باشیم.

1. Line code 2. Clock recovery 3. Nyquist 4. Symbol 5. Symbol rate

۶. Baud rate: باود با علامت (bd)، در این جا عبارت‌است از تعداد بیت در ثانیه (مترجم).

کلاک‌های دقیق در این مورد کمک می‌کنند ولی برای تجهیزات تجاری^۱، راه‌حل گرانی محسوب می‌شوند. به خاطر داشته باشید بیت‌های زمان‌بندی که بر روی پیوندها داریم، با سرعت چندین مگابیت بر ثانیه اجرا می‌شوند، بنابراین کلاک باید تغییری کمتر از کسری از میکروثانیه، در طولانی‌ترین مدت ارسال، داشته باشد. چنین کاری ممکن است برای پیوندهای کُند یا پیغام‌های کوتاه، قابل قبول باشد ولی یک راه‌حل عمومی نیست.

یک راه‌برد عبارت‌است از ارسال یک سیگنال کلاک جداگانه به گیرنده. در نظر گرفتن یک خطِ دیگر برای کلاک، در گذرگاه‌های کامپیوتری یا کابل‌های کوتاهی که خطوط متعدد موازی در آن‌ها وجود دارند، کار چندان دشواری نیست، اما همین کار در اغلب پیوندهای شبکه باعث اتلاف می‌شود زیرا اگر خط دیگری برای ارسال یک سیگنال می‌داشتیم، می‌توانستیم از آن برای ارسال داده استفاده کنیم. یک ترفند هوشمندانه عبارت‌است از درهم‌آمیختن^۲ سیگنال کلاک با سیگنال داده، توسط XOR کردن آن‌ها با یکدیگر، تا نیازی به خط اضافی نباشد. حاصل این کار در شکل ۲-۲۰ (ت) نشان داده شده است. کلاک باعث می‌شود به ازای هر زمان بیت^۳، یک گذار (تغییر سطح) در کلاک^۴ اتفاق بیفتد. به این ترتیب سرعت اجرای کلاک دو برابر نرخ بیت خواهد بود. هنگام XOR شدن با سطح 0، یک گذار پایین - به بالا ایجاد می‌شود که همان کلاک است. این گذار، یک 0 منطقی است. هنگام XOR شدن با سطح 1، معکوس می‌شود و یک گذار بالا - به پایین ساخته می‌شود. این گذار، یک 1 منطقی است. این نظام، کدگذاری منچستر^۵ نامیده شده و در اترنت کلاسیک به کار می‌رود.

روی دیگر سکه در کدگذاری منچستر آن است که این کدگذاری (به خاطر کلاک) نسبت به NRZ به دو برابر پهنای باند نیاز دارد، و ما آموخته‌ایم که پهنای باند غالباً مهم است. یک راه‌برد متفاوت، مبتنی بر این ایده است که داده را بایستی کد کنیم تا مطمئن شویم گذارهای کافی در سیگنال وجود دارند. ملاحظه نمایید که NRZ تنها به ازای جریان‌های طولانی از 0 ها و 1 ها، دچار مسائل مربوط به بازیافت کلاک می‌شود. اگر گذارهای متناوبی وجود داشته باشند، همگام ماندن با جریان رسیده از نمادها، برای گیرنده آسان می‌شود.

برای برداشتن گامی در جهت درست، می‌توانیم شرایط را با کد کردن 1 به عنوان وجود گذار، و 0 به عنوان عدم وجود گذار و یا برعکس، آسان سازیم. این کدگذاری، NRZI (معکوس NRZ)^۶ نامیده می‌شود یعنی یک دستکاری روی NRZ. در شکل ۲-۲۰ (پ) یک مثال نشان داده شده است. استاندارد USB رایج (گذرگاه سریال جهانی)^۷ برای اتصال تجهیزات جانبی کامپیوتر، از NRZI استفاده می‌کند. با استفاده از NRZI، جریان‌های طولانی از 1 ها مشکلی ایجاد نمی‌کند.

1. Commodity equipment

2. Mix

۳. Bit time : "زمان بیت" مفهومی در شبکه‌بندی کامپیوتری است به معنای مدت زمانی که طول می‌کشد تا یک بیت از کارت رابط شبکه (NIC) به خارج هدایت شود. هر کارت NIC سرعت استاندارد دارد که از قبل تعریف شده است. برای محاسبه‌ی "زمان بیت" بایستی معکوس سرعت کارت را بر حسب بیت به دست آوریم (مترجم).

4. Clock transition

5. Manchester encoding

6. Non-Return-to-Zero Inverted

7. Universal Serial Bus

داده (4B)	کلمه‌ی کد (5B)	داده (4B)	کلمه‌ی کد (5B)
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

شکل ۲-۲۱ نگاشت 4B/5B.

البته همچنان جریان‌های طولانی از 0 ها مسئله‌دار هستند که باید آن را سامان دهیم. اگر ما یک شرکت تلفن بودیم، احتمالاً فقط لازم بود که ارسال کننده، تعداد بیش از حد 0 انتقال ندهد. خطوط تلفن دیجیتالی قدیمی‌تر در ایالات متحده، به نام خطوط T1، در حقیقت برای آن که درست کار کنند، نیازمند آن هستند که بیشتر از ۱۵ عدد 0 متوالی ارسال نشود. برای آن که حقیقتاً مسئله را سامان دهیم، می‌توانیم جریان‌های 0 را بشکنیم، به این صورت که گروه‌های کوچکی از بیت‌ها را نگاشت می‌کنیم تا این گروه‌ها انتقال یابند. در این فرآیند، گروه‌هایی که دارای 0 های متوالی هستند به الگوهایی با طول کمی بیشتر نگاشت می‌شوند که تعداد خیلی زیادی 0 متوالی ندارند.

یک کد مشهور که به این روش عمل می‌کند، 4B/5B نامیده می‌شود. هر ۴ بیت به یک الگوی ۵ بیتی نگاشت می‌شود، همراه با یک جدول ثابت برای ترجمه. الگوهای ۵ بیتی چنان انتخاب می‌شوند که هرگز جریانی با بیش از سه 0 متوالی نداشته باشند. این نگاشت در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده. این نظام دارای ۲۵٪ سربار است، که بهتر از سربار ۱۰۰٪ ای کدگذاری منچستر می‌باشد. از آن جا که ۱۶ ترکیب ورودی و ۳۲ ترکیب خروجی وجود دارند، بعضی از ترکیبات خروجی استفاده نمی‌شوند. با کنار گذاشتن ترکیباتی که بیش از حد 0 متوالی دارند، هنوز هم تعدادی کد باقی می‌مانند. به عنوان پاداش، می‌توانیم از این کدهای غیرداده‌ای جهت نمایش سیگنال‌های کنترلی لایه فیزیکی استفاده کنیم. به عنوان مثال، در بعضی موارد، "11111" نمایش دهنده‌ی یک خط بلااستفاده و "11000" نمایش دهنده‌ی آغاز یک قاب است.

یک رویکرد دیگر که با عنوان درهم‌گذاری شناخته می‌شود، عبارت‌است از آن که به داده نگاو تصادفی داشته باشیم. در این حالت، خیلی محتمل است که گذارهای پی‌درپی وجود داشته باشند. یک درهم‌گذار^۱ به این ترتیب عمل می‌کند که قبل از انتقال داده، آن را با یک دنباله‌ی شبه - تصادفی، XOR می‌کند. این درهم‌آمیختگی باعث می‌شود که داده به همان اندازه‌ی دنباله‌ی شبه - تصادفی، تصادفی گردد (با این فرض که داده از دنباله‌ی شبه - تصادفی، مستقل باشد). سپس گیرنده بیت‌های

1. Scrambler

رسیده را با همان دنباله‌ی شبه - تصادفی XOR می‌کند تا داده‌ی حقیقی بازیافت^۱ شود. برای عملی بودن این کار، بایستی تولید دنباله‌ی شبه - تصادفی آسان باشد. این دنباله معمولاً به عنوان یک دانه‌ی بذری^۲ به یک تولید کننده‌ی اعداد تصادفی ساده داده می‌شود.

درهم‌گذاری، جالب توجه است زیرا هیچ‌گونه سرباری به پهنای باند یا زمان اضافه نمی‌کند. در حقیقت، این کار به آماده‌سازی سیگنال کمک می‌کند، تا سیگنال انرژی‌اش را در مولفه‌های فرکانسی اصلی، یعنی مؤلفه‌هایی که ممکن است پارازیت‌های الکترومغناطیس ساطع کنند (به سبب الگوهای داده‌ای تکراری) مصرف نکند. درهم‌گذاری از این جهت کمک می‌کند که سیگنال‌های تصادفی تمایل به "سفید بودن" دارند، یعنی انرژی را از طریق مؤلفه‌های فرکانسی، پراکنده می‌نمایند.

با این وصف درهم‌گذاری ضمانتی بر عدم وجود جریان‌های طولانی ندارد. گاهی اوقات امکان بدشانسی وجود دارد. اگر داده با دنباله‌ی شبه - تصادفی یکسان باشد، نتیجه‌ی XOR آن‌ها تمام - صفر می‌شود. با یک دنباله‌ی شبه - تصادفی طولانی که پیش‌بینی آن مشکل باشد، چنین نتیجه‌ای عموماً رخ نمی‌دهد. اما با یک دنباله‌ی کوتاه یا قابل پیش‌بینی، ممکن است کاربرانی که سوءنیت دارند، الگوهای بیتی‌ای ارسال کنند که بعد از درهم‌گذاری باعث ایجاد جریان‌های طولانی از صفر، و از کار افتادن پیوندها شوند. نگارش‌های اولیه از استانداردهای مربوط به ارسال بسته‌های IP از طریق پیوندهای SONET در سیستم تلفن، همین نقیصه را داشتند (Malis و Simpson، ۱۹۹۹). کاربران این امکان را داشتند که "بسته‌های نابودگر"^۳ ویژه‌ای ارسال کنند که به طور حتم ایجاد مشکل می‌کردند.

سیگنال‌های متوازن

سیگنال‌های متوازن^۴، سیگنال‌هایی هستند که حتی در دوره‌های کوتاه زمانی، به همان اندازه‌ای که ولتاژ منفی دارند، ولتاژ مثبت هم داشته باشند. میانگین این سیگنال‌ها صفر است، به این معنا که هیچ مؤلفه‌ی الکتریکی DC ندارند. فقدان مؤلفه‌ی DC یک مزیت است زیرا بعضی کانال‌ها، از قبیل کابل کواکسیال یا خطوطی که دارای ترانسفورماتور هستند، یک مؤلفه‌ی DC را، به واسطه‌ی ویژگی‌های فیزیکی‌شان، به شدت دچار میرایی می‌کنند. همچنین یک روش اتصال گیرنده به کانال، به نام **کوپلینگ خازنی**^۵، فقط بخش AC از سیگنال را عبور می‌دهد. در هر صورت اگر سیگنالی را ارسال کنیم که میانگین آن صفر نمی‌باشد، به علت فیلتر شدن مؤلفه‌ی DC، اتلاف انرژی خواهیم داشت.

از آن‌جا که آمیزه‌ای از ولتاژهای مثبت و منفی وجود دارند، متوازن کردن کمک می‌کند تا گذارهایی را برای بازیافت کلاک فراهم کنیم. همچنین روش آسانی است برای تنظیم گیرنده‌ها، زیرا میانگین سیگنال می‌تواند اندازه‌گیری شود و به عنوان یک آستانه‌ی تصمیم به منظور کدبرداری نمادها استفاده گردد. با سیگنال‌های غیرمتوازن، ممکن است میانگین از سطح تصمیم درست، به سمت انبوهی از مثلاً 1 ها، دور گردد که باعث خواهد شد تا کدبرداری تعداد بیشتری از نمادها، با خطا انجام شود.

یک راه سرراست برای ساختن یک کد متوازن عبارت‌است از استفاده از دو سطح ولتاژ برای نمایش 1 منطقی (مثلاً 1+ ولت و 1- ولت)، همراه با 0 ولت برای نمایش 0 منطقی. برای ارسال یک 1، فرستنده مابین سطوح 1+ ولت و 1- ولت تغییر می‌کند به طوری که همیشه میانگین این سطوح حاصل می‌شود. این نظام، **کدگذاری دوقطبی**^۱ نامیده می‌شود. در شبکه‌های تلفن، بر اساس واژه‌شناسی قدیمی که 1 را "علامت" و 0 را "فاصله‌ی خالی"^۳ می‌نامیدیم، این نظام AMI (جابجایی علامت به صورت نوبتی)^۴ نامیده می‌شود. مثالی از آن در شکل ۲-۲۰(ث) نشان داده شده است.

کدگذاری دوقطبی، برای رسیدن به توازن، یک سطح ولتاژ اضافه می‌کند. می‌توانیم از یک نگاشت هم برای دستیابی به توازن استفاده کنیم، مثلاً 4B/5B (یا همچنین از گذارهای مربوط به بازیافت کلاک). مثالی از این نوع کد متوازن عبارت‌است از کد خط 8B/10B. این کد، ۸ بیت ورودی را به بیت خروجی نگاشت می‌کند، لذا تا ۸۰٪ راندمان دارد، درست مانند کد خط 4B/5B. هر ۸ بیت به دو گروه ۵ و ۳ بیتی قسمت می‌شود، که گروه ۵ بیتی به ۶ بیت، و گروه ۳ بیتی هم به ۴ بیت نگاشت می‌شود. سپس نمادهای ۶ - بیتی و ۴ - بیتی به هم الحاق می‌شوند. در هر گروه، الگوهای ورودی می‌توانند به الگوهای متوازن خروجی نگاشت شوند که تعداد 0ها و 1هایشان مساوی است. برای مثال، "001" به "1001" نگاشت می‌شود که متوازن است. برای چنین مواردی، هر الگوی ورودی به دو الگوی خروجی نگاشت می‌شود. یکی از آن‌ها یک 1 اضافی دارد و دیگری یک 0 اضافی. به عنوان مثال، "000" هم به "1011" و هم به مکمل آن، یعنی "0100" نگاشت می‌شود. در حینی که بیت‌های ورودی در حال نگاشت به بیت‌های خروجی هستند، کدگذار، **عدم توازن**^۵ نسبت به نماد قبلی را به خاطر می‌سپرد. این عدم توازن عبارت‌است از مجموع تعداد 0ها یا 1هایی که به واسطه‌ی آن‌ها، سیگنال از توازن خارج می‌شود. سپس کدگذار یا الگوی خروجی را برمی‌گزیند و یا الگوی دیگر را، تا تفاوت را کاهش دهد. با 8B/10B، تفاوت حداکثر دو بیت است. لذا سیگنال هرگز از حالت توازن خارج نخواهد شد. همچنین برای آن‌که به بازیافت کلاک کمک کند، هرگز بیشتر از پنج 1 یا 0 متوالی نخواهد داشت.

۲-۵-۲ انتقال در باند عبوری

ما غالباً مایل به استفاده از محدوده‌ای از فرکانس‌ها هستیم که برای ارسال اطلاعات از طریق یک کانال، از صفر شروع نمی‌شوند. برای کانال‌های بی‌سیم، ارسال سیگنال‌هایی با فرکانس خیلی پایین، عملی نیست زیرا اندازه‌ی آنتن بایستی کسری از طول موج سیگنال باشد، که آن هم عدد بزرگی می‌شود. در هر حال، ضوابط لازم برای تنظیم و نیز ضرورت اجتناب از تداخل، معمولاً انتخاب فرکانس‌ها را دیکته می‌کنند. حتی برای کانال‌های باسیم، قرار دادن یک سیگنال در یک باند فرکانسی مفروض، کمک می‌کند

1. Bipolar encoding 2. Mark 3. Space 4. Alternate Mark Inversion 5. Disparity

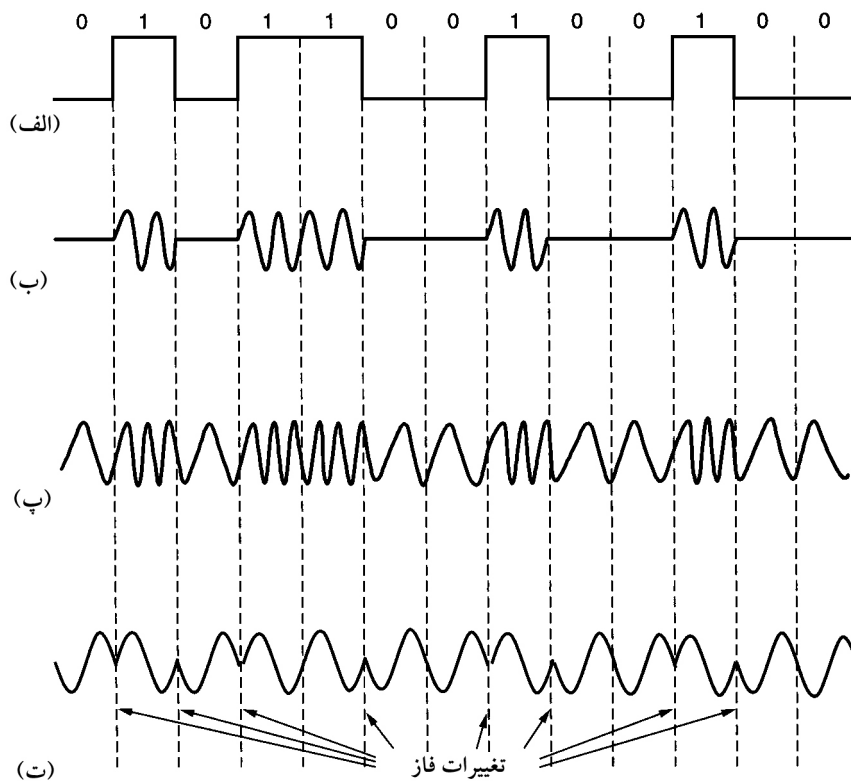
تا انواع مختلف سیگنال‌ها به طور همزمان در کانال حضور داشته باشند. این نوع انتقال، انتقال در باند عبوری نامیده می‌شود زیرا یک باند دلخواه از فرکانس‌ها برای عبور سیگنال به کار می‌رود.

خوشبختانه، نتایج بنیادینی که قبلاً در این فصل به دست آوردیم تماماً یا بر اساس پهنای باند هستند و یا بر اساس عرض باند فرکانس. مقادیر فرکانس محض، برای ظرفیت، مطرح نمی‌باشند. معنای این جمله آن است که می‌توانیم یک سیگنال باند پایه داشته باشیم که از 0 تا B هرتز را اشغال می‌نماید، و بدون آن‌که تغییری در مقدار اطلاعاتی که حمل می‌کند به وجود آید، آن را شیفت دهیم (جابجا کنیم) تا باند عبوری از S تا $S+B$ هرتز را اشغال کند، هرچند که سیگنال به نظر متفاوت خواهد رسید. به منظور پردازش یک سیگنال در گیرنده، می‌توانیم آن را با شیفت دادن، به باند پایه بازگردانیم، یعنی جایی که تشخیص نمادها آسان‌تر است.

تلفیق‌سازی دیجیتال با انتقال در باند عبوری انجام می‌شود، آن هم به وسیله‌ی تنظیم یا تلفیق‌سازی یک سیگنال حامل که به اندازه‌ی باند عبوری است. می‌توانیم تلفیق‌سازی را برای دامنه، فرکانس، یا فاز سیگنال حامل انجام دهیم. هر یک از این روش‌ها، یک نام متناظر دارند. در ASK (کلیدگذاری با شیفت دادن دامنه^۱) از دو دامنه‌ی مختلف برای نمایش 0 و 1 استفاده می‌شود. در شکل ۲-۲۲(ب)، یک مثال با یک سطح غیرصفر و یک سطح صفر نشان داده می‌شود. برای نمایش نمادهای بیشتر می‌توان از بیش از دو سطح استفاده کرد. به طور مشابه، با FSK (کلیدگذاری با شیفت دادن فرکانس^۲)، دو یا چند طنین^۳ متفاوت استفاده می‌شوند. مثال شکل ۲-۲۲(پ) فقط از دو فرکانس استفاده می‌کند. در ساده‌ترین شکل از PSK (کلیدگذاری با شیفت دادن فاز^۴)، موج حامل به طور مرتب و باقاعده، در هر دوره‌ی تناوب نماد، به اندازه‌ی ۰ درجه یا ۱۸۰ درجه شیفت می‌یابد. چون دو تا فاز وجود دارند، آن را BPSK (کلیدگذاری دوتایی با شیفت دادن فاز^۵) می‌نامیم. واژه‌ی "باینری" (یا "دوتایی") در اینجا، به دو تا بودن نماد اشاره دارد، نه آن‌که نمادها دو بیت را نشان دهند. یک مثال از این مورد در شکل ۲-۲۲(پ) نشان داده شده. یک نظام بهتر که با راندمان بیشتری از پهنای باند کانال استفاده می‌کند، عبارت‌است از به کار بردن چهار شیفت برای انتقال دو بیت از اطلاعات در هر نماد، مثلاً ۴۵، ۱۳۵، ۲۲۵، و ۳۱۵ درجه. نام این مورد QPSK است (کلیدگذاری با شیفت دادن فاز به صورت چهارگانه^۶).

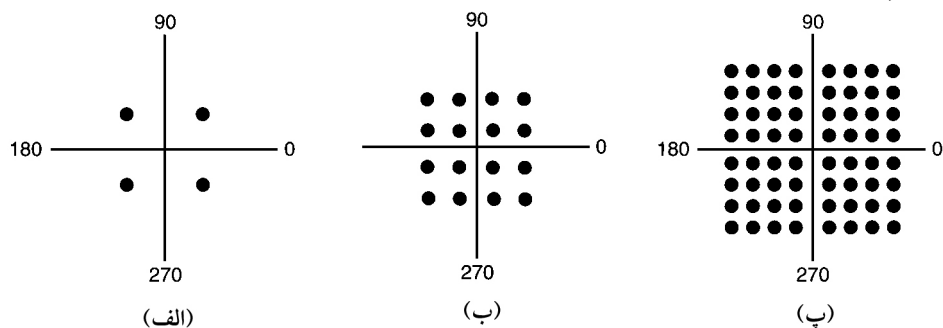
می‌توانیم این نظام‌ها را ترکیب کرده و از سطوح بیشتری برای انتقال بیت‌های بیشتر در هر نماد، استفاده کنیم. در هر زمان فقط فرکانس یا فاز می‌توانند تلفیق شوند زیرا آن‌ها به هم مرتبط هستند، به طوری که فرکانس عبارت‌است از نرخ تغییر فاز در زمان. معمولاً دامنه و فاز به صورت ترکیبی، تلفیق می‌شوند. سه مثال در شکل ۲-۲۳ نشان داده شده‌اند. در هر مثال نقاط، نشان دهنده‌ی

1. Amplitude Shift Keying 2. Frequency Shift Keying 3. Tone 4. Phase Shift Keying
5. Binary Phase Shift Keying 6. Quadrature Phase Shift Keying



شکل ۲-۲۲ (الف) یک سیگنال دودویی. (ب) کلیدگذاری با شیفِت دادنِ دامنه. (پ) کلیدگذاری با شیفِت دادنِ فرکانس. (ت) کلیدگذاری با شیفِت دادنِ فاز.

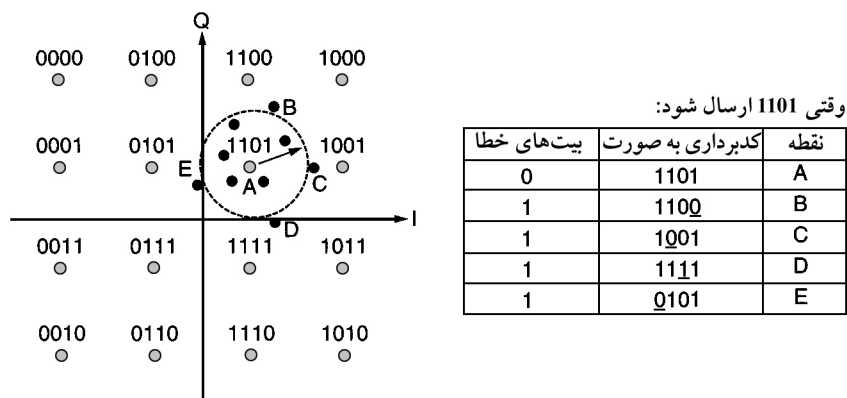
ترکیبات مُجاز دامنه و فاز از هر نماد هستند. در شکل ۲-۲۳(الف)، نقاطِ کوچکِ هم‌فاصله‌ای را در ۴۵، ۱۳۵، ۲۲۵ و ۳۱۵ درجه می‌بینیم. فازِ یک نقطه به وسیله‌ی زاویه‌ی میان خطی که از آن نقطه به مبدأ می‌گذرد، با محور x ها، تعیین می‌شود. دامنه‌ی یک نقطه عبارت‌است از فاصله از مبدأ. این شکل، بازنمایی QPSK است.



شکل ۲-۲۳ (الف) QPSK. (ب) QAM-16. (پ) QAM-64.

این نوع نمودار، نمودار منظومه‌ای^۱ نام دارد. در شکل ۲-۲۳(ب) شاهد یک نظام تلفیق‌سازی همراه با یک تراکم‌ساز منظومه‌ای^۲ هستیم. شانزده ترکیب دامنه و فاز به کار رفته‌اند، بنابراین نظام تلفیق‌سازی می‌تواند برای انتقال ۴ بیت به ازای هر نماد، استفاده شود. به آن QAM-16 گفته می‌شود، که QAM به معنای تلفیق‌سازی دامنه به صورت چهارگانه^۳ است. شکل ۲-۲۳(پ) هم یک نظام تلفیق‌سازی متراکم کننده با ۶۴ ترکیب متفاوت است، به طوری که به ازای هر نماد، ۶ بیت می‌تواند منتقل شوند. آن را QAM-64 می‌نامیم. حتی از QAM‌هایی با رتبه‌ی بالاتر نیز استفاده می‌شود. از آنجا که ممکن است نسبت به این منظومه‌ها بی‌اعتماد باشید، راحت‌تر است که ابزاری الکترونیکی بسازید تا نمادها را به جای ترکیب مقادیر دامنه و فاز، به صورت ترکیبی از مقادیر روی محورهای مختصات بسازند. به همین علت است که الگوها به جای دوایر هم‌مرکز، به شکل چهارگوش هستند.

منظومه‌هایی که تا به حال دیده‌ایم، چگونگی انتساب بیت‌ها به نمادها را نشان نمی‌دهند. هنگام ساختن انتساب، مهم‌ترین موردی که بایستی ملاحظه گردد آن است که یک انفجار کوچک نویز در گیرنده، منجر به تعداد زیادی بیت خطا نشود. این امر هنگامی رخ می‌دهد که مقادیر بیت‌های متوالی را به نمادهای مجاور انتساب دهیم. به عنوان مثال، با QAM-16، اگر یک نماد به عنوان 0111 و نماد دیگر برای 1000 معرفی شده باشد، اگر گیرنده، اشتباهی نماد مجاور را بردارد، باعث می‌شود که همه‌ی بیت‌ها غلط شوند. راه‌حل بهتر آن است که نگاشت بیت‌ها به نمادها به نحوی باشد که نمادهای مجاور فقط در یک موضع با هم تفاوت داشته باشند. این نگاشت، کد گری^۴ نام دارد. شکل ۲-۲۴ یک منظومه‌ی QAM-16 را نشان می‌دهد که با کد گری، کدبندی شده است. اکنون اگر گیرنده نمادی را با خطا کدبرداری کند، تنها یک خطای بیت واحد ایجاد می‌شود. به این ترتیب، نماد کدبرداری شده، به نماد انتقال یافته، نزدیک می‌باشد.



شکل ۲-۲۴ QAM-16 که با کد گری، کدبندی شده.

۲-۵-۳ تسهیم به روش تقسیم فرکانس

نظام‌های تلفیق‌سازی‌ای که دیده‌ایم به ما امکان ارسال یک سیگنال برای رساندن بیت‌ها در طول یک پیوند باسیم یا بی‌سیم را می‌دهند. اما در این‌که ما چطور از شبکه‌ها استفاده می‌کنیم، عوامل اقتصادی مقیاس، نقش مهمی را ایفا می‌کنند. در اصل، مقدار پولی که برای نصب و نگهداری یک خط انتقال با پهنای باند بالا مابین دو دفتر کار هزینه می‌شود، همان اندازه‌ای است که برای یک خط با پهنای باند پایین هزینه می‌شود (به عبارت دیگر، هزینه‌ها ناشی از اجبار در حفر شیارها هستند و ارتباطی با نوع کابل یا فیبری که از آن شیار رد می‌شود، ندارند). در نتیجه نظام‌های تلفیق‌سازی برای به اشتراک‌گذاری خطوط بین تعداد زیادی سیگنال، ایجاد شده‌اند.

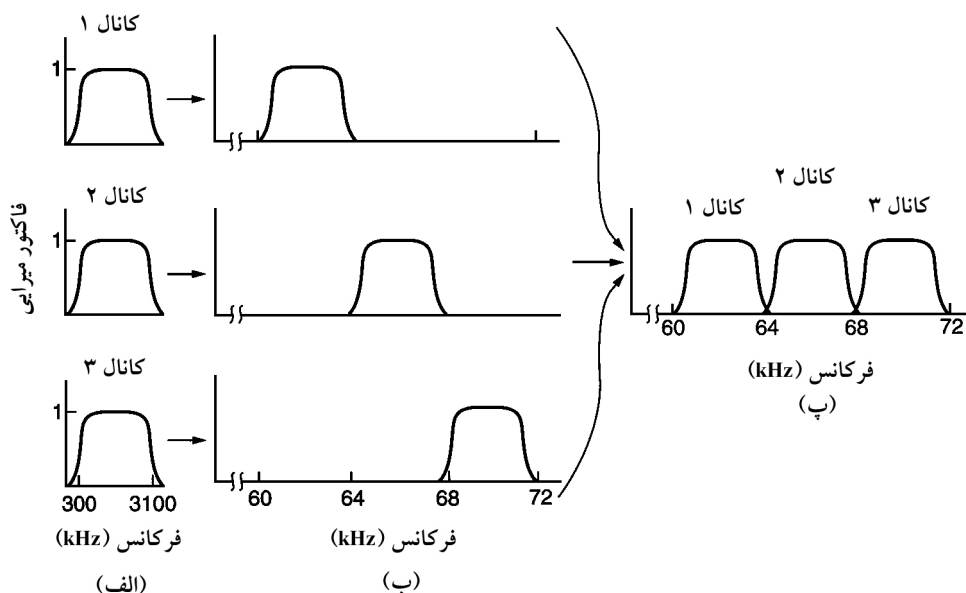
روش FDM (تسهیم به روش تقسیم فرکانس)^۱ از مزیت انتقال باند عبوری، جهت به اشتراک‌گذاری کانال استفاده می‌کند. این روش، طیف را به باندهای فرکانسی تقسیم می‌کند به طوری که هر کاربر برای ارسال سیگنال‌هایش، مالکیت انحصاری نسبت به چند تا از باندهای فرکانسی داشته باشد. پخش رادیویی AM، نمایانگر FDM است. طیف تخصیص‌یافته در حدود 1 MHz، تقریباً از ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوهرتز می‌باشد. فرکانس‌های مختلف به کانال‌های منطقی متفاوت (ایستگاه‌های متفاوت) تخصیص داده می‌شوند که هر کدام در بخشی از طیف عمل می‌کنند. جهت جلوگیری از تداخل، جدا کننده‌های درون - کانالی به اندازه‌ی کافی بزرگ هستند.

برای آنکه مثالی با جزئیات بیشتر داشته باشیم، در شکل ۲-۲۵، سه کانال تلفن صوتی با استفاده از FDM تسهیم شده‌اند. فیلترها، پهنای باند قابل استفاده را به حدود ۳۱۰۰ هرتز در هر کانال صوتی، محدود می‌کنند. هنگامی که تعداد زیادی کانال با هم تسهیم می‌شوند، ۴۰۰۰ هرتز در هر کانال تخصیص داده می‌شود. بخش مازاد، باند محافظ^۲ نامیده می‌شود. باند محافظ کانال‌ها را به خوبی از هم متمایز نگه می‌دارد. ابتدا کانال‌های صوتی به لحاظ فرکانس ارتقا می‌یابند، به طوری که مقدار ارتقای هر کدام از دیگری متفاوت است. سپس می‌توان آن‌ها را ترکیب نمود چون اکنون هیچ دو کانالی، بخش یکسانی از طیف را اشغال نمی‌کنند. توجه داشته باشید که هرچند به واسطه‌ی باندهای محافظ، فواصل خالی میان کانال‌ها وجود دارد، ولی میان کانال‌های مجاور با هم‌پوشانی مواجه هستیم. دلیل وجود هم‌پوشانی آن است که فیلترهای واقعی، دارای لبه‌های دقیق و تیزی نیستند. معنایش آن است که اگر یک تیغه‌ی قوی در لبه‌ی یک کانال وجود داشته باشد، تیغه‌ی مجاورش را به عنوان یک نویز غیرحرارتی خواهد دید.

این نظام تا سال‌ها برای تسهیم تماس‌ها در سیستم تلفن استفاده شده است، اما اکنون به جای آن، تسهیم زمانی ارجحیت یافته. با این وجود، همچنان از FDM در شبکه‌های تلفن استفاده می‌شود، همچنان که در شبکه‌های سلولی، بی‌سیم زمینی، و ماهواره‌ای که در سطح بالاتری به لحاظ دانه‌بندی هستند نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

1. Frequency Division Multiplexing

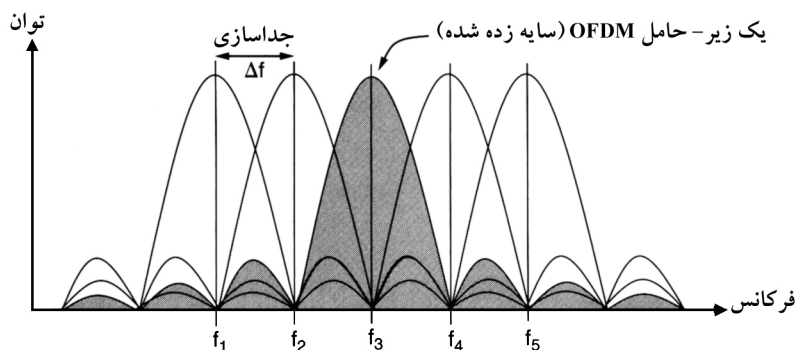
2. Guard band



شکل ۲-۲۵ تسهیم به روش تقسیم فرکانس. (الف) پهنای باندهای اولیه. (ب) پهنای باندهای ارتقا یافته در فرکانس. (پ) کانال تسهیم شده.

هنگام ارسال داده‌ی دیجیتال، این امکان وجود دارد که طیف را به شکلی کارآمد و بدون استفاده از باندهای محافظ، تقسیم نماییم. در روش **OFDM** (تسهیم به روش تقسیم فرکانس به صورت متعامد^۱)، پهنای باند کانال به تعداد زیادی زیر-حامل^۲ تقسیم می‌شود که به صورت مستقل، داده ارسال می‌کنند (مثلاً با QAM). زیر-حامل‌های واقع در دامنه‌ی فرکانس، کاملاً با یکدیگر بسته‌بندی شده‌اند. بنابراین سیگنال‌های هر زیر-حامل به طرف زیر-حامل‌های مجاورش گسترش می‌یابند. با این وجود همانطور که در شکل ۲-۲۶ دیده می‌شود، پاسخ فرکانسی هر زیر-حامل به نحوی طراحی شده که در مرکز زیر-حامل‌های مجاور، صفر است. لذا زیر-حامل‌ها می‌توانند در فرکانس‌های مرکزشان نمونه‌برداری شوند بدون آن‌که از طرف همسایگانشان مورد تداخل قرار گیرند. برای انجام این کار، نیاز به یک زمان محافظ داریم تا به موقع، بخشی از سیگنال‌های نماد را که پاسخ فرکانس مورد نظر را دارند، تکرار کند. اما چنین سرباری خیلی کمتر از آن چیزی است که برای بسیاری از باندهای محافظ، لازم می‌باشد.

ایده‌ی OFDM برای مدتی طولانی حضور داشته اما تنها در دهه‌ی اخیر مورد پذیرش گسترده قرار گرفته است، یعنی به دنبال پی بردن به این موضوع که بر اساس تبدیل فوریه، امکان پیاده‌سازی کارآمد OFDM در مورد داده‌ی دیجیتالی برای تمامی زیر-حامل‌ها وجود دارد (به جای آن‌که تلفیق‌سازی برای هر زیر-حامل به صورت جداگانه انجام شود). از OFDM در 802.11، شبکه‌های کابلی، و شبکه‌بندی

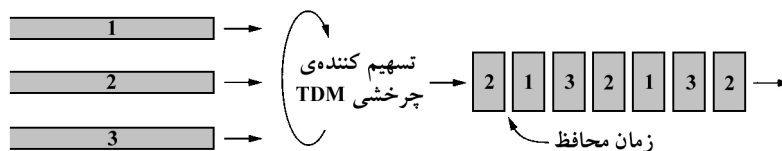


شکل ۲-۲۶ تسهیم به روش تقسیم فرکانس به صورت متعامد (OFDM).

و شبکه‌بندی خطوط نیرو استفاده می‌شود و برای سیستم‌های سلولی نسل چهارم نیز روی آن برنامه‌ریزی شده است. معمولاً یک جریان با نرخ بالا از اطلاعات دیجیتالی، به تعداد زیادی جریان‌های با نرخ پایین منشعب می‌شود که این جریان‌ها به صورت موازی بر روی زیر-حامل، انتقال می‌یابند. چنین تقسیمی ارزشمند است زیرا در آفت کیفیت کانال، مواجهه با زیر-حامل راحت‌تر است؛ در مقابل زیر-حامل‌هایی که به درستی دریافت می‌شوند، بعضی زیر-حامل‌ها هم ممکن است دچار آفت کیفی زیادی شده و کنار گذاشته شوند.

۴-۵-۲ تسهیم به روش تقسیم زمان

گزینه‌ی دیگر نسبت به FDM، TDM است (تسهیم به روش تقسیم زمان^۱). در این جا، کاربران به ترتیب، نوبت عوض می‌کنند (بر اساس شیوه‌ی چرخشی^۲ یا همان راند - روبین). هر کاربر به صورت تناوبی کل پهنای باند را برای یک انفجار زمانی کوچک، در اختیار می‌گیرد. مثالی از سه جریان که با روش TDM تسهیم شده‌اند در شکل ۲-۲۷ نشان داده شده است. بیت‌های مربوط به هر جریان ورودی، به ازای یک بازه‌ی زمانی^۳ ثابت، برداشته شده و در جریان خروجی جمع شده، نهاده می‌شوند. سرعت این جریان به اندازه‌ی مجموع جریان‌های مجزا است. برای آن‌که این روش عمل کند، جریان‌ها بایستی بر اساس زمان، همگام شوند. امکان دارد فواصل خالی کوچکی به عنوان زمان محافظ^۴، متناظر با باند محافظ فرکانس، جهت تعدیل تغییرات کوچک در زمان‌بندی، اضافه گردند.



شکل ۲-۲۷ تسهیم به روش تقسیم زمان (TDM).

- | | | | |
|-------------------------------|----------------|--------------|---------------|
| 1. Time Division Multiplexing | 2. Round-robin | 3. Time slot | 4. Guard time |
|-------------------------------|----------------|--------------|---------------|

روش TDM به صورت گسترده‌ای، به عنوان بخشی از شبکه‌های تلفن و سلولی استفاده می‌شود. جهت پرهیز از نکات ابهام‌برانگیز، اجازه دهید روشن کنیم که این روش کاملاً از گزینه‌ی دیگر، یعنی STDM متفاوت است (تسهیم به روش تقسیم زمان به صورت آماری^۱). پیشوند "آماري" به این منظور اضافه شده تا بر این مطلب دلالت داشته باشد که جریان‌های مجزا بر اساس یک نوبت‌بندی ثابت به جریان تسهیم شده، داده نمی‌شوند، بلکه این عمل بر اساس آمارهای نیازمندی آنان انجام می‌شود. به عبارت دیگر، روش STDM، نوعی سوئیچینگ بسته است.

۵-۵-۲ تسهیم به روش تقسیم کد

نوع سومی از تسهیم وجود دارد که به روشی کاملاً متفاوت از FDM و TDM کار می‌کند. روش CDM (تسهیم به روش تقسیم کد^۲) نوعی ارتباط طیف گسترده است به طوری که یک سیگنال باند باریک، در کل یک باند فرکانسی پهن‌تر گسترده می‌شود. این کار می‌تواند سبب تحمل‌پذیرتر شدن این روش نسبت به تداخل شود، همچنین به سیگنال‌های متعدد مربوط به کاربران مختلف اجازه می‌دهد تا یک باند فرکانسی را به اشتراک بگذارند. چون بیشترین کاربرد تسهیم به روش تقسیم کد، به همین منظور اخیر است، عموماً CDMA نامیده می‌شود (تقسیم کد با دسترسی چندگانه).

روش CDMA این امکان را فراهم می‌کند تا هر ایستگاه همواره در کل طیف فرکانسی، عمل انتقال را انجام دهد. انتقال‌های متعدد همزمان، با استفاده از نظریه‌ی کدگذاری از هم متمایز می‌شوند. پیش از آن‌که سراغ الگوریتم برویم، اجازه دهید یک مقایسه را بررسی کنیم: یک سالن استراحت فرودگاه با تعداد زیادی از افرادی که دوبه‌دو مشغول صحبت هستند. روش TDM قابل مقایسه است با اشخاصی که دوبه‌دو در اتاق، صحبت می‌کنند ولی به ترتیب و یکی-یکی. روش FDM قابل مقایسه است با اشخاصی که دوبه‌دو صحبت می‌کنند ولی آهنگ صدای آن‌ها با یکدیگر تفاوت دارد، بعضی‌ها بلندتر و بعضی آهسته‌تر، به طوری که هر یک از گروه‌های دوتایی می‌توانند گفتگوی خود را همزمان با بقیه ولی مستقل از آن‌ها ادامه دهند. روش CDMA قابل قیاس است با این‌که هر زوج از افراد همزمان گفتگو می‌کنند، ولی به زبانی متفاوت. زوجی که به زبان فرانسه صحبت می‌کنند، فقط با زبان فرانسه کار دارند و هر زبان دیگری غیر از آن را به عنوان نویز کنار می‌زنند. لذا کلید CDMA عبارت است از توانایی در استخراج سیگنال مورد نظر و کنار زدن بقیه‌ی موارد، تحت عنوان نویز تصادفی. در ادامه، مواردی قرار دارند که مبحث CDMA را آسان می‌سازند.

در CDMA هر زمان بیت به m عدد فاصله به نام ذره^۳ تقسیم‌بندی فرعی (subdivide) می‌شود. معمولاً ۶۴ یا ۱۲۸ ذره در هر بیت وجود دارند، اما در مثال این‌جا، برای سادگی از ۸ ذره در هر بیت استفاده خواهیم کرد. به هر ایستگاه یک کد یکتای m بیتی، به نام دنباله‌ی ذره‌ای^۴، انتساب

داده می‌شود. بر طبق قرارداد، در متون آموزشی از روش نوشتاری دوقطبی به صورت دنباله‌هایی از 1- و 1+ برای نوشتن این کدها استفاده می‌شود. دنباله‌های ذره‌ای را داخل پرانتز نشان خواهیم داد. برای آن‌که یک بیت 1 انتقال یابد، یک ایستگاه، دنباله‌ی ذره‌ای آن را ارسال می‌کند. برای انتقال یک بیت 0، آن ایستگاه نقیض دنباله‌ی ذره‌ای را ارسال می‌کند. هیچ الگوی دیگری مجاز نمی‌باشد. به این ترتیب، برای $m=8$ ، اگر به ایستگاه A، یک دنباله‌ی ذره‌ای به شکل (1+ 1+ 1- 1- 1+ 1- 1- 1-) انتساب داده شود، آن ایستگاه می‌تواند یک بیت 1 را با انتقال این دنباله‌ی ذره‌ای، و یک بیت 0 را با انتقال دنباله‌ی ذره‌ای به شکل (1- 1- 1+ 1- 1- 1+ 1+ 1-) ارسال کند. آنچه ارسال می‌شود، سیگنال‌های واقعی دارای این ولتاژها می‌باشند، اما بهتر است که آن‌ها را به صورت دنباله متصور شویم.

افزایش مقدار اطلاعات ارسالی هر ایستگاه، از (ثانیه / بیت) b به (ثانیه / ذره) mb ، به معنای آن است که پهنای باند مورد نیاز برای CDMA به اندازه‌ی یک فاکتور m بزرگ‌تر از پهنای باند مورد نیاز برای ایستگاهی است که از CDMA استفاده نمی‌کند (با این فرض که هیچ تغییری در روش‌های تلفیق‌سازی و کدگذاری نداشته باشیم). در صورتی که یک باند ۱ مگاهرتزی به ازای ۱۰۰ ایستگاه در دسترس داشته باشیم، با FDM، هر ایستگاه ۱۰ کیلوهرتز خواهد داشت و با نرخ 10 kbps ارسال خواهد کرد (با فرض ۱ بیت در هر هرتز). با CDMA، هر ایستگاه تمام ۱ مگاهرتز را استفاده می‌کند، لذا نرخ ذره برابر با ۱۰۰ ذره در بیت خواهد بود تا نرخ بیت ایستگاه در کانال، 10 kbps باشد.

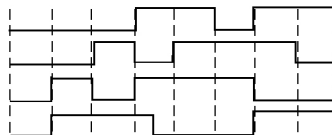
شکل ۲-۲۸ (الف) و (ب)، دنباله‌های ذره‌ای انتساب داده شده به چهار ایستگاه نمونه و سیگنال‌هایی که آن‌ها نمایش می‌دهند را نشان می‌دهد. از نماد S به عنوان بردار ذره‌ای m برای ایستگاه k و از \bar{S} برای نقیض آن استفاده می‌کنیم. همه‌ی دنباله‌های ذره‌ای دوبه‌دو متعامد^۱ هستند، به این معنی که حاصل ضرب داخلی نرمال شده‌ی هر دو دنباله‌ی ذره‌ای متمایز، مانند S و T (که به صورت $S \cdot T$ نوشته می‌شود)، صفر است. نحوه‌ی تولید چنین دنباله‌های متعامدی با استفاده از روشی به نام کدهای والش^۲، روشی شناخته شده است. به زبان ریاضی، متعامد بودن دنباله‌های ذره‌ای را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$S \cdot T \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0 \quad (5-2)$$

به زبان ساده یعنی به هر تعدادی که زوج مشابه وجود دارد، به همان تعداد هم زوج متفاوت وجود دارد. این ویژگی تعامد، بعداً مورد بسیار مهمی را اثبات خواهد نمود. توجه کنید که اگر $S \cdot T = 0$ باشد، آنگاه $S \cdot \bar{T}$ نیز مساوی صفر خواهد بود. حاصل ضرب داخلی نرمال شده‌ی یک دنباله‌ی ذره‌ای در خودش، 1 است:

$$S \cdot S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1$$

(الف)



(c)

(b)

(ت)

(ب) شش نمونه انتقال. (ت) بازیافت سیگنال مربوط به ایستگاه C.

m می شود. همچنین توجه کند که $S \cdot \bar{S} = -1$.

مجموع دنباله‌های ذره‌ای دوقطبی آن‌ها را به دست می‌آوریم. به این صورت که:

$$(-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1) + (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1) = (-2 \ 0 \ 0 \ 0 +2 +2 \ 0 -2)$$

ذره‌های آن C است، فقط کافی است حاصل ضرب داخلی نرمال شده‌ی S.C را محاسبه کند.

برای آن که بدانیم چرا این روش عمل می‌کند، مجسم کنید که دو ایستگاه A و C ، هر دو درست در همان زمانی که B در حال انتقال یک بیت 0 است، یک بیت 1 را انتقال می‌دهند، یعنی همان حالتی که در مثال سوم برقرار است. گیرنده مجموع $S = A + \bar{B} + C$ را می‌بیند و محاسبه‌ی زیر را انجام می‌دهد

$$S \cdot C = (A + \bar{B} + C) \cdot C = A \cdot C + \bar{B} \cdot C + C \cdot C = 0 + 0 + 1 = 1$$

دو جمله‌ی اول، از میان می‌روند زیرا همان‌طور که در رابطه‌ی (۲-۵) نشان داده شده، تمام زوج - دنباله‌های ذره‌ای به دقت انتخاب شده‌اند تا متعام باشند. اکنون باید روشن شده باشد که چرا این ویژگی بایستی در دنباله‌های ذره‌ای نهاده شده باشد.

برای آن که این فرآیند، ملموس‌تر شود، شش مثال در شکل ۲-۲۸ (ت) نشان داده‌ایم. فرض کنید که گیرنده علاقمند به استخراج بیت ارسالی توسط ایستگاه C ، از هر کدام از شش سیگنال S_1 تا S_6 باشد. او بیت را این طور محاسبه می‌کند که حاصل ضرب‌های دوبه‌دوی دریافتی از S و بردار C از شکل ۲-۲۸ (الف) را جمع می‌زند و سپس یک هشتم حاصل را برمی‌دارد (چون در این جا $m = 8$ است). مثال‌ها دربردارنده‌ی مواردی هستند که C خاموش و غیرفعال است، یک بیت 1 ارسال می‌کند، و یک بیت 0 ارسال می‌کند، آن هم به صورت مستقل و در ترکیب با بقیه‌ی انتقال‌ها. همان‌طور که نشان داده شده، بیت صحیح، هر بار کدبرداری می‌شود. این کار کاملاً مشابه صحبت کردن به زبان فرانسه است.

در اصل، با دادن ظرفیت کافی برای محاسبه، دریافت کننده می‌تواند به تمام ارسال کننده‌هایی که با هم عمل می‌کنند، گوش کند. او این کار را با اجرای موازی الگوریتم کدبرداری برای هر یک از آن‌ها، انجام می‌دهد. در شرایط واقعی، باید بگوییم که این کار، گفتنش راحت‌تر از انجام دادنش است. اگر بدانیم کدام ارسال کننده‌ها احتمال دارد عمل انتقال را انجام دهند، مفید خواهد بود.

در حالت ایده‌آلی که در این جا مورد مطالعه قرار داده‌ایم، یعنی سیستم CDMA بدون نویز، تعداد ایستگاه‌هایی که همزمان ارسال می‌کنند می‌تواند به میزان دلخواهی بزرگ باشد. برای این کار از دنباله‌های ذره‌ای بزرگ‌تر استفاده می‌کنیم. برای 2^n ایستگاه، کدهای والش می‌توانند 2^n دنباله‌ی ذره‌ای متعام به طول 2^n را فراهم کنند. با این وجود، یک محدودیت بزرگ آن است که فرض کرده‌ایم همه‌ی ذره‌ها بر اساس زمان، در گیرنده همگام شده‌اند. این همگام‌سازی در بعضی کاربردها، حتی به صورت تقریبی نیز صحت ندارد. از جمله در کاربردهایی مانند شبکه‌های سلولی (که با آغاز کارشان در ۱۹۹۰، CDMA به صورتی فراگیر در آن‌ها جای گرفته است). این امر منجر به طراحی‌های متفاوتی می‌شود. بعداً در همین فصل به این موضوع خواهیم گشت و توضیح خواهیم داد که CDMA ناهمگام، چگونه از CDMA همگام، متفاوت می‌باشد.

همان‌طور که در شبکه‌های سلولی دیدیم، از CDMA به وسیله‌ی شبکه‌های ماهواره‌ای و کابلی هم استفاده می‌شود. در این مقدمه‌ی اجمالی، از بسیاری از فاکتورهایی که سبب پیچیدگی می‌شوند، چشم‌پوشی کرده‌ایم. مهندسانی که مایلند درک عمیقی از CDMA به دست آورند، بایستی Viterbi (۱۹۹۵) و Lee و Miller (۱۹۹۸) را بخوانند. این مراجع، فقط نیاز به زمینه‌ی قبلی مختصری در مهندسی ارتباطات دارند.

۶-۲ شبکه‌ی تلفن سوئیچی عمومی

هنگامی که دو کامپیوتر که متعلق به یک شرکت یا سازمان هستند و نزدیک به یکدیگر قرار دارند، نیاز به ارتباط داشته باشند، اغلب اوقات راحت‌ترین راه آن است که فقط یک کابل بین آن‌ها بکشیم. شبکه‌های LAN به همین شیوه کار می‌کنند. اما وقتی فاصله‌ها زیاد باشد، یا کامپیوترهای متعددی داشته باشیم، یا کابل‌ها مجبور به عبور از یک جاده‌ی عمومی یا یک محوطه‌ی عمومی دیگر باشند، هزینه‌های مربوط به کشیدن کابل‌های خصوصی، معمولاً یک عامل بازدارنده‌اند. به علاوه، در قریب به اتفاق کشورهای جهان، کشیدن خطوط انتقال خصوصی از میان (یا از زیر) املاک عمومی، غیرقانونی است. در نتیجه طراحان شبکه بایستی به امکانات مخابراتی موجود، تکیه داشته باشند.

این امکانات، به ویژه PSTN (شبکه‌ی تلفن سوئیچی عمومی^۱)، معمولاً سال‌ها قبل طراحی شده‌اند، در حالی که هدف کاملاً متفاوتی از آن‌ها متصور بوده است: انتقال صدای انسان به شکلی کم و بیش قابل تشخیص. تناسب آن‌ها برای استفاده در ارتباطات کامپیوتر - کامپیوتر، غالباً ناچیز و حداقلی است. برای آن‌که ابعاد مسئله را متوجه شویم، یک کابل ارزان قیمت را در نظر بگیرید که میان دو کامپیوتر کشیده شده و می‌تواند 1 Gbps یا بیشتر، داده انتقال دهد. از سوی دیگر، ADSL معمولی که به طرز چشمگیری گزینه‌ای سریع نسبت به مودم تلفنی است، در حدود 1 Mbps سرعت دارد. تفاوت میان این دو، تفاوت میان گردش با یک هواپیما و راه رفتن به صورت قدم زدن با تانی و آهستگی، می‌باشد.

با این وجود، سیستم تلفن و شبکه‌های کامپیوتری (شبکه‌های پهناور) چنان پیوند تنگاتنگی با هم دارند که ارزش دارد برای مطالعه‌ی جزئیات آن، وقت صرف شود. عامل محدود کننده در اهداف شبکه‌بندی، به مسیر اصلی و سوئیچ‌های درون شبکه‌ی تلفن ارتباطی ندارد بلکه مربوط است به "مایل آخر"، یعنی جایی که اتصال به خریداران برقرار می‌شود. این شرایط با تغییر تدریجی فیبر و فناوری دیجیتال در لبه‌ی شبکه، در حال تغییر است، اما این کار هم زمان و هم پول صرف می‌کند. در این انتظار طولانی، طراحان سیستم‌های کامپیوتری که عادت کرده‌اند با سیستم‌هایی کار کنند که کارایی آن‌ها دست کم هزار برابر بهتر است، حالا باید زمان و انرژی زیادی را صرف نحوه‌ی استفاده‌ی کارآمد از شبکه‌ی تلفن بنمایند.

1. Public Switched Telephone Network

در بخش‌های بعدی، سیستم تلفن را بررسی کرده و نحوه‌ی کار آن را نشان می‌دهیم. برای اطلاعات بیشتر درباره‌ی قسمت‌های داخلی سیستم تلفن به Bellamy (۲۰۰۰) مراجعه نمایید.

۲-۶-۱ ساختار سیستم تلفن

خیلی زود پس از آن‌که آلکساندر گراهام بل^۱، در سال ۱۸۷۶ اختراع تلفن را به ثبت رسانید (تنها چند ساعت قبل‌تر از رقیبش، الیشاگری^۲)، نیاز شدیدی به اختراع تازه‌ی او وجود داشت. بازار اولیه مربوط به فروش تلفن بود که جفت - جفت می‌آمد، و بر عهده‌ی مصرف‌کننده بود که یک سیم واحد میان آن‌ها بکشد. اگر دارنده‌ی یک تلفن، قصد صحبت با n تا دارنده‌ی دیگر تلفن را داشت، بایستی سیم‌های جداگانه‌ای به همه‌ی n محل کشیده می‌شد. طی یک سال، شهرها پوشیده از سیم‌هایی شدند که از تمام منازل و درخت‌ها، با آشفته‌گی لگام گسیخته‌ای، عبور کرده بودند. بلافاصله قابل مشاهده بود که مدل اتصال هر تلفن به تمام تلفن‌های دیگر، آن طور که در شکل ۲-۲۹ (الف) نشان داده شده، عملی نخواهد بود.

بل خیلی زود متوجه این مسئله شد و به واسطه‌ی اعتبارش، شرکت تلفن بل را تشکیل داد. این شرکت، اولین دفتر سوئیچینگ خود را در سال ۱۸۷۸ (در نیو هاون^۳، ایالت کانکتیکت^۴) باز نمود. این شرکت یک سیم به منزل یا دفتر کار هر یک از مصرف‌کنندگان کشید. مصرف‌کننده برای برقراری یک تماس، از اهرمی که به همین منظور در دستگاه تلفن بود استفاده می‌کرد تا باعث ایجاد صدای زنگ در دفتر شرکت تلفن شده و توجه اپراتور را به خود جلب کند. سپس اپراتور به صورت دستی و با استفاده از یک کابل اتصال دهنده‌ی کوتاه، تماس گیرنده را به پذیرنده‌ی تماس متصل می‌کرد. مدل مربوط به یک دفتر سوئیچینگ منفرد، در شکل ۲-۲۹ (ب) نشان داده شده است.

خیلی زود، دفاتر سوئیچینگ شرکت بل - سیستم، در همه جا ظاهر شده و مردم خواهان تماس‌های راه دور میان شهرها گشتند، لذا بل - سیستم شروع کرد به اتصال دادن دفاتر سوئیچینگ. مشکل اولیه خیلی زود مجدداً ظاهر شد: اتصال هر یک از دفاتر سوئیچینگ به سایر دفاتر سوئیچینگ، به وسیله‌ی سیم، به سرعت سبب غیر قابل مدیریت شدن آن‌ها می‌گردد. به همین دلیل سطح دوم از دفاتر سوئیچینگ، ابداع شدند. پس از مدتی، همان‌گونه که در شکل ۲-۲۹ (پ) نشان داده شده، وجود دفاتر متعددی در سطح - دوم ضروری شد. سرانجام، این سلسله مراتب تا پنج سطح رسید.

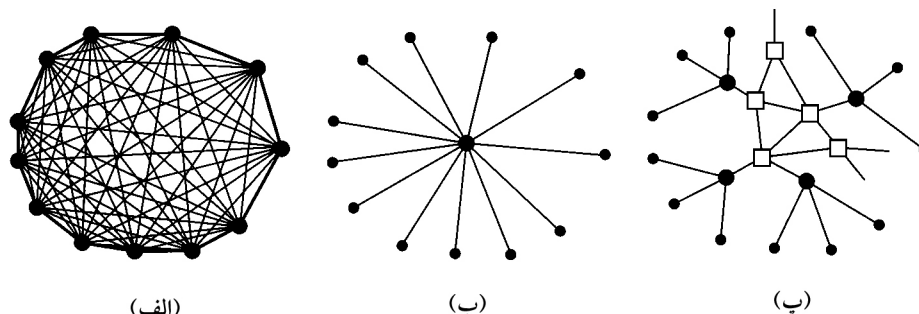
در سال ۱۸۹۰، سه بخش اصلی از سیستم تلفن مشخص شدند: دفاتر سوئیچینگ، سیم‌های مابین مصرف‌کنندگان و دفاتر سوئیچینگ (که اینک به جای سیم‌های باز به همراه یک برگشت به زمین، از زوج سیم‌های متوازن و عایق‌بندی‌شده، استفاده می‌کنند)، و اتصالات راه دور میان دفاتر سوئیچینگ. به عنوان یک تاریخچه‌ی کوتاه فنی از سیستم تلفن، Hawley (۱۹۹۱) را ملاحظه نمایید.

1. Alexander Graham Bell

2. Elisha Gray

3. New Haven

4. Connecticut



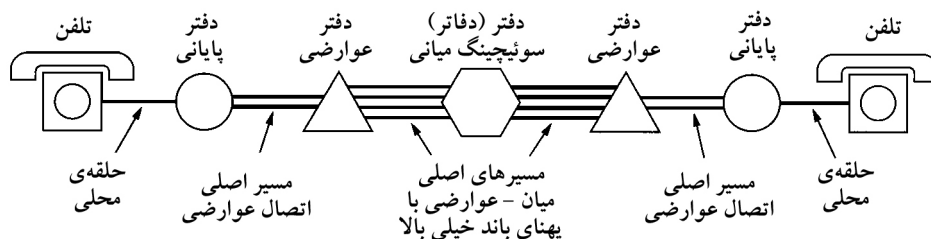
شکل ۲-۲۹ (الف) شبکه‌ی کاملاً به هم متصل شده. (ب) سوئیچ مرکزی. (پ) سلسله مراتبِ دوسطحی.

با وجود پیشرفت‌های انجام شده تا آن زمان در تمام این سه حوزه، مدل پایه‌ی بل-سیستم اساساً برای بیش از ۱۰۰ سال دست نخورده باقی ماند. شرحی که در ادامه می‌آید بسیار خلاصه شده ولی با این وجود، حال‌وهوای اصلی را ارائه می‌دهد. هر تلفن دارای دو سیم مسی است که از آن بیرون آمده‌اند و مستقیماً به نزدیک‌ترین **دفتر پایانی**^۱ که متعلق به شرکت تلفن است، می‌روند. دفتر پایانی، **دفتر مرکزی محلی**^۲ هم نامیده می‌شود. فاصله معمولاً ۱ تا ۱۰ کیلومتر است، که این فاصله در شهرها، نسبت به مناطق روستایی، کوتاه‌تر است. تنها در ایالات متحده در حدود ۳۲,۰۰۰ دفتر پایانی وجود دارد. در اصطلاح، اتصالات دو-سیمه میان تلفن هر یک از مشترکین و دفتر پایانی را به عنوان **حلقه‌ی محلی**^۳ می‌شناسند. اگر حلقه‌های محلی موجود در دنیا را در امتداد هم قرار دهند، به اندازه‌ی ۱۰۰۰ بار رفت و برگشت تا ماه خواهند بود.

یک زمانی ۸۰٪ از سرمایه‌ی اصلی AT&T، مس به کار رفته در حلقه‌های محلی بود. در آن زمان، AT&T در واقع بزرگ‌ترین معدن مس بود. خوشبختانه در آن زمان این حقیقت به خوبی در کمپته‌ی سرمایه‌گذاری شناخته نشد. اگر این شناخت به دست می‌آمد، این امکان وجود داشت که بعضی شرکت‌های رقیب، AT&T را خریداری کرده و کل سرویس تلفن در ایالات متحده، پایان می‌یافت: همه‌ی سیم‌ها را خارج کرده و آن‌ها را جهت کسب منفعت، به یک بازیافت کننده‌ی مس می‌فروختند. اگر یک مشترک تلفن که به یک دفتر پایانی وصل است، با مشترک دیگری که به همان دفتر پایانی وصل است تماس بگیرد، مکانیزم سوئیچینگ داخل دفتر، یک اتصال الکتریکی مستقیم میان دو حلقه‌ی محلی، برپا می‌سازد. این اتصال در طول تماس، برقرار می‌ماند.

در صورتی که تلفنی که با او تماس گرفته شده، به یک دفتر پایانی دیگر وصل باشد، از رویه‌ی دیگری بایستی استفاده شود. هر دفتر پایانی دارای تعدادی خط خروجی به یک یا چند مرکز سوئیچینگ مجاور دفتر، به نام **دفاتر عوارضی**^۴، می‌باشد (اگر این دفاتر داخل همان ناحیه قرار داشته باشند، **دفاتر**

1. End office 2. Local central office 3. Local loop 4. Toll office



شکل ۲-۳۰ یک مسیر مداری نمونه برای یک تماس راه دور.

یدکی^۱ نامیده می‌شوند). نام این خطوط، **مسیرهای اصلی اتصال عوارضی**^۲ است. تعداد انواع مختلف مراکز سوئیچینگ و توپولوژی آن‌ها، بسته به تراکم تلفن هر کشور، از کشوری به کشور دیگر تغییر می‌کند. در صورتی که دفاتر تلفن مربوط به تماس گیرنده و پذیرنده تماس، هر دو چنان باشند که یک مسیر اصلی اتصال عوارضی، به یک دفتر عوارضی واحد، داشته باشند (اگر این دفاتر نسبتاً به هم نزدیک باشند، چنین اتفاقی محتمل است)، امکان برقراری اتصال، درون دفتر عوارضی وجود خواهد داشت. در شکل ۲-۲۹ (پ) یک دفتر تلفن که تنها از تلفن‌ها (نقاط کوچک)، دفاتر پایانی (نقاط بزرگ)، و دفاتر عوارضی (مربع‌ها) تشکیل شده است، نشان داده شده است.

در صورتی که تماس گیرنده و پذیرنده تماس، دارای یک دفتر عوارضی مشترک نباشند، بایستی یک مسیر میان آن دو دفتر عوارضی برقرار گردد. دفاتر عوارضی از طریق **مسیرهای اصلی میان عوارضی**^۳ (که **مسیرهای اصلی میان - دفتری**^۴ هم نامیده می‌شوند) و پهنای باند بالایی دارند، با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند. تا پیش از تجزیه‌ی AT&T در سال ۱۹۸۴، سیستم تلفن ایالات متحده از مسیریابی سلسله‌مراتبی برای یافتن یک مسیر استفاده می‌کرد، یعنی به سطوح بالاتر سلسله‌مراتب می‌رفت تا به جایی برسد که یک دفتر سوئیچینگ مشترک وجود داشته باشد. این روش بعدها با یک مسیریابی انعطاف‌پذیرتر و غیرسلسله‌مراتبی، جایگزین گردید. شکل ۲-۳۰ نشان می‌دهد که چگونه یک اتصال راه دور، می‌تواند مسیریابی شود.

از انواع رسانه‌های انتقال برای مخابرات استفاده می‌شود. برخلاف ساختمان‌های اداری جدید، که سیم‌بندی معمولاً در رده‌ی ۵ انجام می‌شود، حلقه‌های محلی به منازل غالباً از زوج سیم‌های رده‌ی ۳ تشکیل شده‌اند، ظاهر شدن فیبر در این مورد، تازه آغاز شده است. مابین دفاتر سوئیچینگ، از کابل‌های کواکسیال، مایکروویو، و فیبرهای نوری مخصوص، زیاد استفاده می‌شود.

در گذشته، انتقال از طریق سیستم تلفن، آنالوگ بود یعنی سیگنال صوتی واقعی، به صورت یک ولتاژ الکتریکی، از مبدأ به مقصد انتقال می‌یافت. با پیدایش فیبرهای نوری، تجهیزات الکترونیکی دیجیتال، و کامپیوترها، اکنون همه‌ی مسیرهای اصلی و سوئیچ‌ها دیجیتالی هستند. حلقه‌های محلی

1. Tandem office

2. Toll connecting trunks

3. Intertoll trunk

4. Interoffice trunk

همچنان به عنوان آخرین تکه از فناوری آنالوگ در سیستم باقی مانده‌اند. ارجحیت با انتقال دیجیتال است زیرا دیگر نیازی نیست که یک شکل موج آنالوگ را بعد از گذشتن از تقویت کننده‌های متعدد در یک تماس طولانی، با دقت بازتولید نماییم. این که قادر باشیم یک 0 را از یک 1، به درستی تمیز دهیم، کفایت می‌کند. این ویژگی سبب شده که اتکاپذیری انتقال دیجیتال نسبت به آنالوگ بیشتر باشد. نگهداری آن نیز ارزان‌تر و آسان‌تر است.

به طور خلاصه، سیستم تلفن از سه مولفه‌ی اصلی تشکیل می‌شود:

۱. حلقه‌های محلی (زوج سیم‌های آنالوگ که به منازل و محل‌های کسب و کار می‌روند).
 ۲. مسیرهای اصلی (پیوندهای فیبر نوری دیجیتال که دفاتر سوئیچینگ را به هم اتصال می‌دهند).
 ۳. دفاتر سوئیچینگ (جایی که تماس‌ها از یک مسیر اصلی به مسیر اصلی دیگر، در حال تغییر مکان هستند).
- بعد از گریزی کوتاه که به سیاست‌های تلفنی خواهیم داشت، به این سه مؤلفه بازگشته و تا حدودی به جزئیات هر کدام خواهیم پرداخت. حلقه‌های محلی دسترسی به همه‌ی افراد را در کل سیستم تأمین می‌کنند، به همین دلیل بسیار حیاتی هستند. ولی متأسفانه ضعیف‌ترین پیوند در سیستم نیز می‌باشند. برای مسیرهای اصلی دور - بُرد^۱، بحث اصلی آن است که چگونه چندین تماس را با یکدیگر جمع کرده و آن‌ها را از طریق یک فیبر ارسال نماییم. این کار نیاز به تسهیم دارد و از اِعمال FDM و TDM برای انجام آن استفاده می‌کنیم. در آخر، دو روش برای انجام سوئیچینگ وجود دارند که اساساً با هم متفاوتند؛ هر دوی این روش‌ها را بررسی خواهیم کرد.

۲-۶-۲ سیاست‌های تلفن‌ها

به مدت چندین دهه، تا قبل از سال ۱۹۸۴، بل - سیستم هر دو سرویس محلی و راه دور را در اغلب نقاط ایالات متحده فراهم می‌کرد. طی دهه‌ی ۱۹۷۰، دولت فدرال ایالات متحده به این باور رسید که این امتیاز انحصاری، غیرقانونی است و برای شکستن آن اقامه‌ی دعوای نمود. دولت پیروز شد و در اول ژانویه ۱۹۸۴، AT&T به AT&T Long Lines، ۲۳ شرکت BOC (شرکت‌های عملیاتی بل^۲)، و چند بخش دیگر شکسته شد. آن ۲۳ شرکت BOC به هفت منطقه‌ای (RBOC^۳) گروه‌بندی گردید تا به لحاظ اقتصادی، امکان موفقیت بیابند. به یک باره کل ماهیت مخابرات در ایالات متحده، نه با قانون کنگره بلکه با حکم دادگاه، تغییر یافت.

جزئیات دقیق خلع مقام، طی یک MFJ معروف (حکم تجدید نظر شده‌ی نهایی^۴)، تشریح شد. البته اگر چنین چیزی وجود می‌داشت، یک جور نقض غرض می‌شد - اگر حکم دادگاه می‌توانسته مورد تجدید نظر قرار گیرد، پس مسلماً نهایی نبوده. این رویداد منجر به افزایش رقابت، سرویس بهتر، و نرخ‌های راه دور کمتر برای مصرف‌کنندگان و صاحبان کسب و کار گردید. اما همین‌طور که یارانه‌های

1. Long-haul trunks 2. Bell Operating Company 3. Regional BOC 4. Modified Final Judgment

متقابلِ مربوط به تماس راه دور، محدود می‌شد و سرویس محلی مجبور به خودگردانی می‌گردید، بهای مربوط به سرویس محلی، سیر صعودی پیدا کرد. اکنون بسیاری از کشورهای دیگر هم رقابت بر اساس همین تفکر را ارائه کرده‌اند.

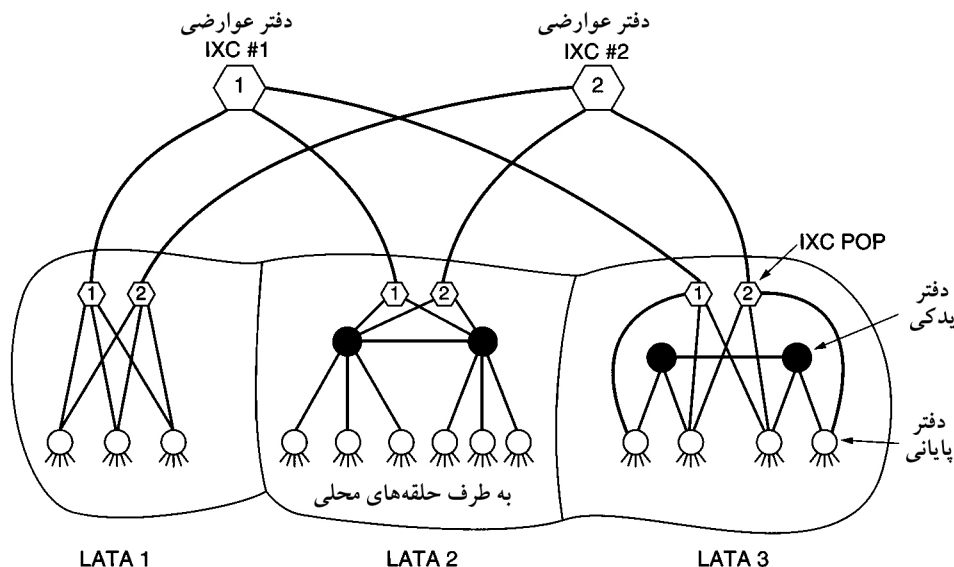
ارتباط مستقیم این موضوع با بحث ما آن است که چارچوب رقابت تازه باعث شد یک ویژگی فنی کلیدی به معماری شبکه‌ی تلفن اضافه گردد. برای آن‌که روشن شود که چه شخصی می‌تواند چه کاری انجام دهد، ایالات متحده به ۱۶۴ منطقه‌ی LATA تقسیم شد (مناطق حمل و دسترسی محلی^۱). به بیان دقیق، یک LATA تقریباً به بزرگی منطقه‌ای است که توسط یک کد منطقه، پوشش داده می‌شود. داخل هر LATA یک LEC (فراهم کننده‌ی تبادل محلی حامل^۲) همراه با یک حق انحصاری در مورد سرویس قراردادی تلفن در آن منطقه وجود دارد. مهم‌ترین LEC ها، BOC ها بودند، هر چند که بعضی LATA ها دربردارنده‌ی یک یا بیشتر از ۱۵۰۰ شرکت تلفن مستقل بودند که به عنوان LEC عمل می‌کردند.

ویژگی تازه آن بود که تمام ترافیک میان - LATA ای^۳، به وسیله‌ی یک نوع شرکت دیگر به نام IXC (فراهم کننده‌ی تبادل حامل (میان مراکز)^۴) اداره می‌شد. در ابتدا شرکت AT&T Long Lines یگانه IXC جدی بود، اما اکنون رقیبان موفقی از قبیل Verizon و Sprint در کسب و کار IXC وجود دارند. یکی از ملاحظات در این فروپاشی و تجزیه، آن بود که با تمام IXC ها از نظر کیفیت خطوط، ترافیک‌ها، و تعداد ارقامی که مصرف کنندگان‌شان هنگام استفاده از آن‌ها مجبور به شماره‌گیری بودند، یکسان رفتار شود. روش اداره‌ی این موضوع در شکل ۲-۳۱ نشان داده شده است. در این شکل سه LATA نمونه می‌بینیم که هر کدام دارای چندین دفتر پایانی هستند. در ضمن LATA های ۲ و ۳ دارای یک سلسله‌مراتب کوچک با دفاتر یدکی می‌باشند (دفاتر عوارضی درون - LATA ای^۵).

هر IXC ای که بخواهد تماس‌های آغاز شده در یک LATA را اداره کند، می‌تواند یک دفتر سوئیچینگ به نام POP (نقطه‌ی حضور^۶) در آن‌جا بسازد. به منظور اتصال هر یک از IXC ها به هر یک از دفاتر پایانی، نیاز به LEC داریم، یا مستقیم مانند LATA 1 و LATA 3، و یا غیرمستقیم مانند LATA 2. به علاوه هم اصطلاحات فنی و هم اصطلاحات مالی مربوط به اتصالات، بایستی برای تمام IXC ها یکسان باشند. این ضرورت باعث می‌شود یک مشترک تلفنی که مثلاً در LATA 1 قرار دارد، بتواند انتخاب کند که از کدام IXC برای تماس با مشترکینی که در LATA 3 هستند، استفاده شود.

به عنوان بخشی از MFJ، IXC ها از ارائه‌ی سرویس تلفن محلی منع شدند و LEC ها هم از ارائه‌ی سرویس تلفن بین LATA ای منع گردیدند (هر چند که ورود به هر نوع کسب و کار دیگری از قبیل رستوران‌های جوجه‌ی سوخاری، برای هر دوی آن‌ها آزاد بود). در سال ۱۹۸۴، این بیان یک

1. Local Access and Transport Area 2. Local Exchange Carrier 3. Inter-LATA
4. IntereXchange Carrier 5. Intra-LATA toll offices 6. Point of Presence



شکل ۲-۳۱ ارتباط میان LATA ها، LEC ها، و IXC ها. همه‌ی دایره‌ها، دفاتر سوئیچینگ LEC هستند. هر یک از شش ضلعی‌ها به IXC ای تعلق دارد که شماره‌اش داخل آن می‌باشد.

اعلام کاملاً غیرمبهم بود. متأسفانه فناوری روش جالبی برای مهجور گذاشتن قانون دارد: نه تلویزیون کابلی و نه تلفن‌های موبایل، در این موافقت‌نامه پوشش داده نشده بودند. درحالی‌که تلویزیون‌های کابلی از تک - مسیره به دو - مسیره تغییر کردند و تلفن‌های موبایل در بین مردم فراگیر شدند، هم LEC ها و هم IXC ها شروع به خریدن کل سازمان و یا ادغام با اپراتورهای موبایل نمودند. تا سال ۱۹۹۵، کنگره متوجه شد که تلاش در نگهداری تمایز میان انواع مختلف شرکت‌ها، دیگر کار قابل دفاعی نیست و پیش‌نویس لایحه‌ای را آماده کرد تا بر طبق آن، امکان رقابت را فراهم کند اما در عین حال به شرکت‌های تلویزیون کابلی، شرکت‌های تلفن محلی، فراهم کنندگان حامل‌های راه دور، و اپراتورهای تلفن موبایل اجازه دهد تا به حوزه‌های کسب و کار یکدیگر ورود داشته باشند. ایده این بود که هر شرکتی از این پس بتواند به مصرف کنندگانش یک بسته‌ی جامع و واحد ارائه کند که شامل تلویزیون کابلی، تلفن، و سرویس‌های اطلاعاتی باشد، و نیز این‌که شرکت‌های مختلف بتوانند در مورد سرویس و قیمت با هم رقابت کنند. این لایحه در فوریه‌ی ۱۹۹۶ به صورت یک قانون، و به عنوان یک بازنگری مهم در کار سامان‌دهی مخابرات، به تصویب رسید. در نتیجه بعضی BOC ها تبدیل به IXC شدند و بعضی شرکت‌های دیگر، از قبیل اپراتورهای تلویزیون کابلی، در جهت رقابت با LEC ها، شروع به ارائه‌ی سرویس تلفن محلی نمودند.

یک ویژگی جالب قانون ۱۹۹۶ عبارت‌است از ضرورت پیاده‌سازی قابلیت حمل شماره‌ی محلی^۱ در LEC ها. به این معنا که مصرف‌کننده می‌تواند بدون آن‌که مجبور باشد یک شماره‌ی تلفن جدید

1. Local number portability

بگیرد، شرکت‌های تلفن محلی‌اش را عوض کند. قابلیت حمل در شماره‌های تلفن موبایل (و میان خطوط تلفن ثابت و موبایل) نیز در ۲۰۰۳ همین رویه را دنبال کرد. این تسهیلات، مانع بزرگی را از سر راه بسیاری از مردم برطرف نمود و باعث شد آن‌ها تمایل بیشتری به تغییر به سوی LEC ها پیدا کنند. در نتیجه، دورنمای مخابرات در ایالات متحده، هر چه بیشتر جنبه‌ی رقابتی یافت و کشورهای دیگر نیز از همین امر تبعیت کردند. اغلب، کشورهای دیگر منتظر هستند ببینند یک تجربه‌ی تازه در ایالات متحده چگونه عمل می‌کند. اگر خوب عمل کند، آن‌ها هم همان کار را انجام می‌دهند؛ اگر خوب عمل نکنند، گزینه‌ی دیگری را امتحان می‌کنند.

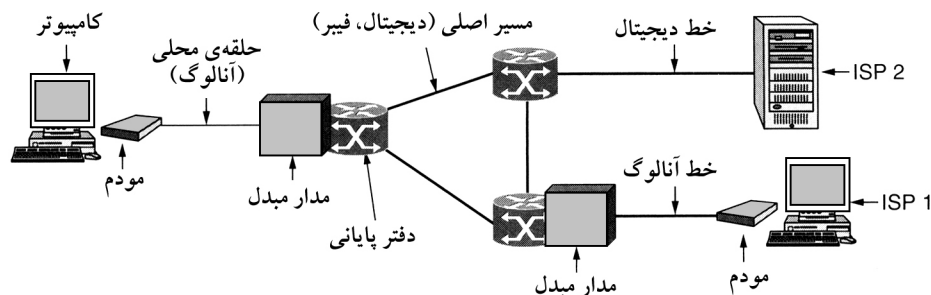
۲-۶-۳ حلقه‌ی محلی: مودم‌ها، ADSL و فیبر

اینک زمان آن فرارسیده تا مطالعه‌ی دقیق‌مان در مورد نحوه‌ی کار سیستم تلفن آغاز کنیم. بیایید با بخشی که بیشتر مردم با آن آشنا هستند، شروع کنیم: حلقه‌ی محلی دو - سیمه که از دفتر پایانی یک شرکت تلفن به منازل می‌آید. به حلقه‌ی محلی، اغلب با عنوان "مایل آخر" نیز اشاره می‌شود، اگرچه طول آن می‌تواند به چندین مایل هم برسد. حلقه‌ی محلی بیشتر از ۱۰۰ سال است که اطلاعات آنالوگ را حمل کرده است و به نظر می‌رسد که تا چند سال دیگر هم به این کار ادامه خواهد داد چون هزینه‌ی تبدیل به دیجیتال خیلی زیاد است.

برای جا دادن شبکه‌بندی داده در حلقه‌های محلی مسی که فعلاً مستقر هستند، تلاش زیادی صرف شده است. مودم‌های تلفنی، داده‌ی دیجیتال را از طریق کانال باریکی که برای تماس صوتی تهیه شده است، میان کامپیوترها ارسال می‌کنند. یک زمانی از آن‌ها خیلی استفاده می‌شد ولی بخش عمده‌ای از آن‌ها با فناوری‌های باند عریض جایگزین شده‌اند. مثال آن ADSL است که با استفاده‌ی مجدد از حلقه‌ی محلی، داده‌ی دیجیتال را از مصرف‌کننده به دفتر پایانی ارسال می‌کند، یعنی محل اتصال به اینترنت. هم مودم‌ها و هم ADSL بایستی با محدودیت‌های حلقه‌های محلی قدیمی کنار بیایند: پهنای باند نسبتاً باریک، میرایی و اعوجاج سیگنال‌ها، و قرار گرفتن در معرض نویز الکتریکی مثل خط روی خط افتادن.

حلقه‌ی محلی در بعضی مناطق با نصب فیبر نوری به منزل (یا خیلی نزدیک به منزل) شکل نوینی پیدا کرده است. فیبر شیوه‌ای برای آینده است. تأسیسات این چینی، شبکه‌های کامپیوتری را از پایه حمایت می‌کنند و سبب می‌شوند حلقه‌ی محلی از پهنای باند کافی برای سرویس‌های داده برخوردار شود. فاکتور محدود کننده عبارت است از هزینه‌ای که مردم پرداخت می‌کنند، نه عوامل فیزیکی حلقه‌ی محلی.

ما در این بخش به مطالعه‌ی حلقه‌ی محلی خواهیم پرداخت، هم شکل قدیمی و هم شکل جدید آن، و مباحث مودم‌های تلفنی، ADSL، و فیبر تا منزل را هم پوشش خواهیم داد.



شکل ۳۲-۲ استفاده از هر دو نوع انتقال آنالوگ و دیجیتال برای یک تماس کامپیوتر - به - کامپیوتر. عمل تبدیل توسط مودم‌ها و مدارهای مبدل^۱ انجام می‌گیرد.

مودم‌های تلفنی

به منظور ارسال بیت‌ها از طریق حلقه‌ی محلی، یا هر کانال فیزیکی دیگری که به همین منظور تدارک دیده شده، بیت‌ها بایستی به سیگنال‌های آنالوگ تبدیل شوند تا بتوانند از آن کانال منتقل گردند. این تبدیل با استفاده از روش‌های تلفیق‌سازی دیجیتال که در بخش قبل مطالعه کردیم، انجام می‌شود. در سوی دیگر کانال، سیگنال آنالوگ مجدداً به بیت‌ها تبدیل می‌شود.

وسیله‌ای که مابین یک جریان از بیت‌های دیجیتال و یک سیگنال آنالوگ که نمایانگر آن بیت‌ها می‌باشد، عمل تبدیل را انجام می‌دهد، مودم^۲ نام دارد. مودم، کوتاه‌نوشت "modulator demodulator" است. مودم‌ها در انواع متعددی به بازار آمده‌اند: مودم‌های تلفنی، مودم‌های DSL، مودم‌های کابلی، مودم‌های بی‌سیم، و امثالهم. مودم ممکن است داخل کامپیوتر نصب شود (که این کار برای مودم‌های تلفنی، رایج است) یا در یک جعبه‌ی جدا باشد (که در مودم‌های DSL و مودم‌های کابلی، رایج است). به لحاظ منطقی، همان‌طور که شکل ۳۲-۲ نشان می‌دهد، مودم مابین کامپیوتر (دیجیتال) و سیستم تلفن (آنالوگ) قرار می‌گیرد.

مودم‌های تلفنی برای ارسال بیت‌ها مابین دو کامپیوتر، از طریق یک خط تلفن با کاربرد صوتی که معمولاً با مکالمات پُر می‌شوند، به کار می‌روند. مشکل اصلی در انجام این کار آن است که یک خط تلفنی با کاربرد صوتی، محدود به ۳۱۰۰ هرتز است، یعنی آن مقداری که برای حمل مکالمات مناسب است. این پهنای باند بیش از ۱۰۰۰۰ برابر کمتر از پهنای باندی است که برای اینترنت یا برای 802.11 (WiFi) استفاده می‌شود. عجیب نیست که نرخ داده در مودم‌های تلفنی نیز ۱۰۰۰۰ برابر کمتر از اینترنت و 802.11 می‌باشد.

برای آن‌که علت را بدانیم، بیایید از اعداد کمک بگیریم. نظریه‌ی نایکوئیست به ما می‌گوید که حتی با یک خطِ عالی و بی‌عیب (که معمولاً خط تلفن این گونه نیست)، هیچ امکانی وجود ندارد تا

نمادها با نرخ‌ی سریع‌تر از ۶۰۰۰ باود ارسال شوند. بیشتر مودم‌ها در عمل، ارسال را با نرخ ۲۴۰۰ نماد در ثانیه، یا ۲۴۰۰ باود انجام داده و بر روی گرفتن چندین بیت به ازای هر نماد، تمرکز دارند، در حالی که به ترافیک اجازه می‌دهند تا همزمان در هر دو جهت در حرکت باشد (با استفاده از فرکانس‌های مختلف برای جهت‌های مختلف).

مودم 2400-bps بینوا از 0 ولت برای 0 منطقی و از 1 ولت برای 1 منطقی استفاده می‌کند، همراه با 1 بیت به ازای هر نماد. در یک گام بالاتر، می‌تواند از چهار نماد مختلف استفاده نماید، یعنی همانند چهار فاز QPSK. به این ترتیب، با ۲ بیت در هر نماد، می‌تواند به نرخ داده‌ی 4800 bps برسد. همراه با توسعه‌ی فناوری، پیشرفت زیادی در مورد نرخ داده‌های بالا به دست آمده است. نرخ‌های بالاتر نیاز به مجموعه‌ی بزرگ‌تری از نمادها یا منظومه‌ها^۱ دارند. وقتی تعداد نمادها زیاد باشند، حتی یک مقدار کوچک نویز در دامنه یا فاز تعیین شده هم می‌تواند باعث بروز یک خطا گردد. برای آن‌که شانس وقوع خطا کاهش یابد، استانداردها در مورد مودم‌هایی با سرعت بالاتر، از نمادهایی برای تصحیح خطا استفاده می‌کنند. نظام‌های مربوط به این موارد را با عنوان TCM (تلفیق‌سازی کدبندی شده به روش داربست)^۲ می‌شناسیم (Ungerboeck, ۱۹۸۷).

استاندارد مودم V.32 از ۳۲ نقطه‌ی منظومه‌ای استفاده می‌کند تا ۴ بیت داده و ۱ بیت کنترلی را به ازای هر نماد، و با نرخ ۲۴۰۰ باود، انتقال دهد تا به سرعت 9600 bps همراه با تصحیح خطا دست یابد. مرتبه‌ی بعدی که بالاتر از 9600 bps قرار دارد، 14,400 bps می‌باشد. نام آن V.32 bis است و ۶ بیت داده و ۱ بیت کنترلی را به ازای هر نماد، با نرخ ۲۴۰۰ باود، انتقال می‌دهد. پس از آن به V.34 می‌رسیم، که با انتقال ۱۲ بیت داده به ازای هر نماد، با نرخ ۲۴۰۰ باود، به سرعت 28,800 bps دست می‌یابد. در این مرحله، تعداد نقاط منظومه‌ای به هزاران نقطه رسیده است. آخرین مودم در این سری مودم‌ها، V.34 bis است که از ۱۴ بیت داده به ازای هر نماد، با نرخ ۲۴۰۰ باود استفاده می‌کند تا به سرعت 33,600 bps برسد.

چرا در این مرحله متوقف می‌شویم؟ علت آن‌که مودم‌های استاندارد در ۳۳,۶۰۰ توقف می‌کنند آن است که حد^۳ شانون^۳ برای سیستم تلفن در حدود 35 bps است. این عدد بر اساس متوسط طول حلقه‌های محلی و کیفیت این خطوط است. رفتن به سرعت‌هایی بیشتر از این، تخطی از قوانین فیزیک خواهد بود (در حوزه‌ی عمل ترمودینامیک).

با این وجود راهی برای تغییر این وضع وجود دارد. در دفتر پایانی شرکت تلفن، داده برای انتقال در شبکه‌ی تلفن، به شکل دیجیتال تبدیل می‌شود (هسته‌ی شبکه‌ی تلفن خیلی وقت قبل، از آنالوگ به دیجیتال تبدیل شده). محدودیت 35-kbps برای وضعیتی است که دو حلقه‌ی محلی وجود داشته باشند، یکی در هر انتها. هر یک از این حلقه‌ها، نویز به سیگنال اضافه می‌کنند. اگر بتوانیم

از یکی از این حلقه‌های محلی خلاص شویم، SNR را افزایش خواهیم داد و نرخ بیشینه دو برابر خواهد شد.

این رویکرد، نحوه‌ی عملکرد مودم‌های 56-kbps را نشان می‌دهد. یکی از دو طرف، که معمولاً یک ISP است، یک ورودی دیجیتال با کیفیت بالا از نزدیک‌ترین دفتر پایانی می‌گیرد. به این ترتیب، هنگامی که یک طرف اتصال، یک سیگنال باکیفیت باشد، که در حال حاضر غالب ISP ها چنین هستند، آنگاه نرخ داده‌ی بیشینه می‌تواند زیاد و در حدود 70 kbps باشد. مابین دو کاربر خانگی که مودم و خط آنالوگ دارند، مقدار بیشینه همچنان 33.6 kbps است.

علت آن‌که مودم‌های 56-kbps ای (به جای مودم‌های 70-kbps ای) مورد استفاده هستند، بایستی مربوط به نظریه‌ی نایکوئیست باشد. یک کانال تلفن داخل سیستم تلفن و به صورت نمونه‌های دیجیتال، حمل می‌شود. پهنای هر کانال تلفن، با احتساب باندهای محافظ، 4000 هرتز است. تعداد نمونه‌ها در هر ثانیه که برای دوباره ساختن آن مورد نیاز هستند، 8000 عدد است. در ایالات متحده، تعداد بیت‌ها در هر نمونه، 8 است که یکی از آن‌ها می‌تواند به منظور کنترل استفاده شود. بنابراین 56,000 بیت بر ثانیه برای داده‌ی کاربر باقی می‌ماند. در اروپا، همه‌ی 8 بیت در دسترس کاربران هستند، لذا مودم‌های 64,000 بیت بر ثانیه می‌توانند به کار روند، اما در کسب موافقت بین‌المللی در مورد استاندارد، مقدار 56,000 انتخاب گردیده.

نتایج نهایی عبارتند از استانداردهای V.90 و V.92. این استانداردها به ترتیب برای یک کانال پایین‌دستی (یعنی از ISP به کاربر) 56-kbps ای و یک کانال بالادستی (یعنی از کاربر به ISP) 33.6-kbps و 48-kbps ای، تهیه می‌شوند. عدم تقارن به این علت است که معمولاً داده‌ای که از ISP به کاربر می‌رود (نسبت به داده‌ای که در مسیر عکس حرکت می‌کند) بیشتر است. این معنی را هم می‌دهد که بیشتر پهنای باند محدودی که داریم، می‌تواند به کانال پایین‌دستی اختصاص داده شود تا شانس آن‌که واقعاً با نرخ 56 kbps کار کند را افزایش دهد.

خطوط مشترکین تلفن دیجیتال

وقتی بالاخره صنعت تلفن به 56 kbps رسید، خود را به خاطر کار خوبی که انجام داده بود، تشویق کرد. در همین حال، صنعت تلویزیون کابلی، در حال ارائه‌ی سرعت‌های تا 10 Mbps بر روی کابل‌های اشتراکی بود. دسترسی به اینترنت، تبدیل به بخش بسیار مهمی از کسب و کار آن‌ها شده بود، شرکت‌های تلفن (LEC ها) شروع کردند به درک این مطلب که نیاز به یک محصول رقابتی‌تر دارند. پاسخ آن‌ها عبارت بود از ارائه‌ی سرویس‌های دیجیتالی تازه از طریق حلقه‌ی محلی.

در ابتدا، پیشنهاد‌های پرسرعت متعددی وجود داشتند که با یکدیگر هم‌پوشانی داشتند و همگی تحت نام کلی xDSL (خط دیجیتالی یک مشترک^۱) با x های متنوع، مطرح می‌شدند. سرویس‌هایی با

1. Digital Subscriber Line

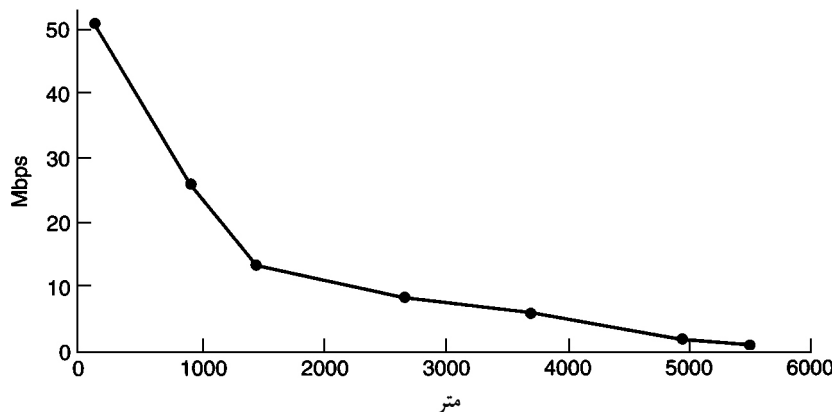
پهنای باندی بیشتر از سرویس تلفن استاندارد، گاهی اوقات باند عریض^۱ نامیده می‌شوند، هر چند که این واژه بیش از آن‌که یک مفهوم فنی خاص باشد، یک مفهوم بازاریابی است. بعداً آنچه از این سرویس‌ها که بیشتر رایج شده است را بررسی خواهیم نمود، یعنی ADSL (DSL نامتقارن^۲). همچنین از اصطلاح DSL یا xDSL به عنوان مخففی برای همه‌ی انواع، استفاده خواهیم کرد.

علت آن‌که مودم‌ها این قدر گند هستند، آن است که تلفن برای حمل صوت انسان ابداع شده، و کل سیستم هم برای همین منظور، به دقت بهینه‌سازی شده است. داده‌ها همواره در حکم فرزند خوانده‌های آن هستند. در نقطه‌ای که هر یک از حلقه‌های محلی در دفتر پایانی، خاتمه می‌یابند، سیم از میان یک فیلتر عبور می‌کند که تمام فرکانس‌های زیر ۳۰۰ هرتز و بالای ۳۴۰۰ هرتز را دچار میرایی می‌کند. منطقه‌ی قطع جریان، لبه‌ی تیزی ندارد — ۳۰۰ هرتز و ۳۴۰۰ هرتز، نقاط 3-dB هستند — لذا معمولاً پهنای باند به صورت ۴۰۰۰ هرتز عنوان می‌شود، گرچه فاصله‌ی میان نقاط 3-dB برابر با ۳۱۰۰ هرتز است. به این ترتیب داده‌ی روی سیم، محدود به این باند باریک می‌شود.

ترفندی که باعث می‌شود xDSL کار کند آن است که وقتی یک مصرف‌کننده درخواستی به آن می‌دهد، خط ورودی به یک نوع سوئیچ متفاوت متصل می‌شود یعنی سوئیچی که این فیلتر را ندارد، بنابراین سبب می‌شود که کل ظرفیت حلقه‌ی محلی، در دسترس قرار بگیرد. به این ترتیب عامل محدودکننده عبارت‌است از فیزیک حلقه‌ی محلی، که تقریباً 1 MHz را حمایت می‌کند، نه پهنای باند غیرواقعی ۳۱۰۰ هرتزی که توسط فیلتر ایجاد شده.

متأسفانه با فاصله گرفتن از دفتر پایانی و در حینی که سیگنال در طول سیم، ضعیف می‌شود، ظرفیت حلقه‌ی محلی هم به سرعت کاهش می‌یابد. این موضوع به ضخامت و کیفیت عمومی زوج سیم به هم تابیده نیز بستگی دارد. نموداری از پهنای باند بالقوه، به صورت تابعی از مسافت، در شکل ۲-۳۳ داده شده است. در این شکل فرض شده که تمام فاکتورهای دیگر، بهینه هستند (سیم‌های نو، دسته‌های کوچک سیم، و مانند این‌ها).

نتیجه‌ی ضمنی این شکل، مشکلی را برای شرکت تلفن ایجاد می‌کند. وقتی شرکت تلفن یک سرعت را برمی‌گزیند تا با آن سرعت، ارائه‌ی سرویس کند، بلافاصله محدوده‌ای از دفاتر پایانی‌اش را مشخص کرده که به خارج از آن محدوده، سرویسی نمی‌تواند ارائه شود. این سخن به آن معناست که هنگامی که مصرف‌کنندگان راه دور سعی کنند تا آن سرویس را به دست آورند، احتمالاً به آن‌ها گفته می‌شود "از ابراز تمایل‌تان خیلی متشکریم، اما شما برای آن‌که با این سرویس ارتباط برقرار نمایید، بیشتر از ۱۰۰ متر از نزدیک‌ترین دفتر پایانی، فاصله دارید. آیا می‌توانید لطفاً از محل‌تان جابجا شوید؟" هر چقدر که سرعت انتخابی کمتر باشد، شعاع این منطقه، بزرگ‌تر بوده و مصرف‌کنندگان بیشتری پوشش داده می‌شوند. اما سرعت کمتر به معنای جذابیت کمتر آن سرویس نیز می‌باشد و افراد کمتری



شکل ۲-۳ پهنای باند در برابر مسافت، بر اساس رده‌ی 3 UTP برای DSL.

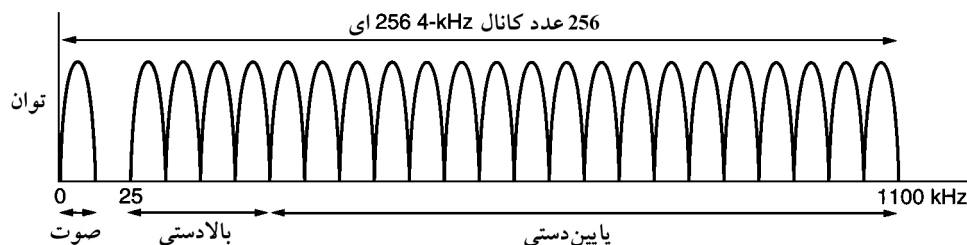
تمایل به پرداخت هزینه برای چنین سرویسی دارند. این همان جایی است که کسب و کار با فناوری تلاقی پیدا می‌کند.

سرویس‌های xDSL همگی با اهداف مشخصی طراحی شده‌اند. اول آن‌که، این سرویس‌ها بایستی در زوج سیم‌های مسی رده‌ی ۳ موجود از حلقه‌های محلی، کار کنند. دوم آن‌که، نبایستی تأثیری بر تلفن‌ها و ماشین‌های نمابر فعلی مصرف‌کنندگان داشته باشند. سوم آن‌که، بایستی خیلی سریع‌تر از 56 kbps باشند. چهارم آن‌که، همیشه بایستی روشن باشند، فقط همراه با شارژ ماهانه، نه شارژ به ازای هر دقیقه.

به منظور رسیدن به اهداف فنی، طیف 1.1 MHz قابل دستیابی بر روی حلقه‌ی محلی، به ۲۵۶ کانال مستقل و هر یک با 4312.5 Hz، تقسیم می‌شود. این آرایش در شکل ۲-۳ نشان داده شده. برای ارسال داده از طریق این کانال‌ها از نظام OFDM که آن را در بخش قبل دیدیم، استفاده می‌شود. به همین دلیل غالباً در زمینه‌ی ADSL، به این روش DMT (چندآوایی گسسته^۱) می‌گویند. از کانال 0 برای POTS (سرویس تلفن قدیمی ساده^۲) استفاده می‌شود. کانال‌های ۱ تا ۵ بلااستفاده هستند و سیگنال‌های صوت و داده را از تداخل با هم محافظت می‌کنند. از ۲۵۰ کانال باقیمانده، یکی برای کنترل بالادستی و یکی برای کنترل پایین‌دستی استفاده می‌شوند. بقیه در اختیار داده‌ی کاربر هستند.

در اصل، هر یک از مابقی کانال‌ها می‌توانند برای جریان داده‌ی کاملاً دوسویه به کار روند، ولی هارمونی‌ها، مکالمه‌های متقابل، و سایر جلوه‌های صوتی، سیستم‌های واقعی را کاملاً پایین‌تر از حد نظری محاسبه شده، نگه می‌دارند. بر عهده‌ی فراهم کننده است که تعیین کند چند کانال برای بالادستی و چند کانال برای پایین‌دستی به کار می‌روند. به لحاظ فنی، مخلوط ۵۰/۵۰ از بالادستی و پایین‌دستی، امکان‌پذیر است اما از آن‌جا که اغلب کاربران، داده را بیشتر پایین‌گذاری می‌کنند تا بالاگذاری،

1. Category 3 2. Discrete MultiTone 3. Plain Old Telephone Service



شکل ۲-۳۴ عملکرد ADSL با استفاده از DMT.

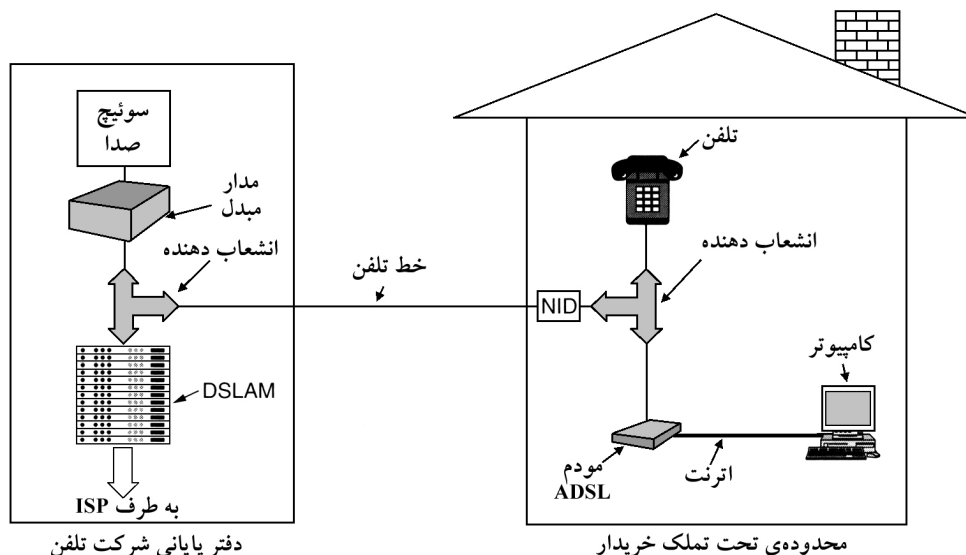
لذا اکثر فراهم‌کنندگان چیزی در حدود ۸۰٪ تا ۹۰٪ از پهنای باند را به کانال پایین‌دستی اختصاص می‌دهند. این نحوه‌ی انتخاب، دلیل وجودی حرف "A" در واژه‌ی ADSL است. یک انشعاب متداول عبارت‌است از ۳۲ کانال برای بالادستی و مابقی برای پایین‌دستی. ضمناً این امکان هم وجود دارد که به منظور افزایش پهنای باند، تعدادی از بالاترین کانال‌های بالادستی، دوطرفه باشند. هر چند که انجام چنین بهبودی، نیازمند افزودن یک مدار مخصوص برای حذف پژواک‌هاست^۱.

استاندارد بین‌المللی ADSL، که به نام **G.dmt** شناخته می‌شود، در سال ۱۹۹۹ ایجاد گردید. این استاندارد، سرعت ۸ Mbps را برای پایین‌دستی و ۱ Mbps را برای بالادستی، اجازه می‌دهد. این استاندارد به وسیله‌ی نسل دوم آن، به نام ADSL2، در سال ۲۰۰۲ از دور خارج گردید. انواع بهبودها در ADSL2، اجازه‌ی سرعت ۱۲ Mbps را برای پایین‌دستی و ۱ Mbps را برای بالادستی می‌دهند. اکنون ADSL2+ را در اختیار داریم که با دو برابر کردن پهنای باند (به طوری که ۲.۲ MHz در زوج سیم به هم تابیده استفاده می‌کند)، سرعت پایین‌دستی را به دو برابر، یعنی ۲۴ Mbps رسانده است.

اما اعدادی که در این جا آمده‌اند، سرعت‌های مربوط به بهترین حالت، برای خطوط خوب و مناسب، و نزدیک به محل تبادل (در محدوده‌ی ۱ یا ۲ کیلومتری) می‌باشند. خطوط کمی هستند که چنین نرخ‌ی را حمایت کنند، و تعداد کمی از فراهم‌کنندگان، چنین سرعت‌هایی را ارائه می‌دهند. فراهم‌کنندگان، معمولاً چیزی در حدود ۱ Mbps برای پایین‌دستی و ۲۵۶ kbps برای بالادستی ارائه می‌دهند (در سرویس استاندارد). این مقادیر در سرویس پیشرفته^۲، ۴ Mbps برای پایین‌دستی و ۱ Mbps برای بالادستی، و در سرویس ممتاز^۳، ۸ Mbps برای پایین‌دستی و ۲ Mbps برای بالادستی می‌باشند.

داخل هر کانال از تلفیق‌سازی QAM با نرخ‌ی در حدود ۴۰۰۰ نماد بر ثانیه، استفاده می‌شود. کیفیت خط در هر کانال دائماً تحت نظارت است و نرخ داده با استفاده از منظومه‌های بزرگ‌تر یا کوچک‌تر، تنظیم می‌شوند، مانند آنچه که در شکل ۲-۲۳ نشان داده شد. کانال‌های متفاوت، برحسب نوع استاندارد، ممکن است نرخ داده‌های متفاوتی داشته باشند، از حداکثر ۱۵ بیت به ازای هر نماد برای کانالی با SNR بزرگ، تا حداقل ۲ یا ۱ بیت، یا بدون بیت، به ازای هر نماد برای کانالی با SNR کم.

1. Echo 2. Improved service 3. Premium service



شکل ۲-۳۵ یک پیکربندی نمونه از تجهیزات ADSL.

در شکل ۲-۳۵، یک آرایش نمونه از ADSL نشان داده شده است. در این نظام، یک تکنیسین شرکت تلفن بایستی یک NID (دستگاه رابط شبکه^۱) در محوطه‌ی ساختمان خریدار نصب کند. این جعبه‌ی پلاستیکی کوچک، پایان محدوده‌ی تحت تملک شرکت تلفن و آغاز محدوده‌ی تحت تملک خریدار را علامت‌گذاری می‌کند. در نزدیکی NID (یا گاهی ادغام شده با آن)، یک انشعاب‌دهنده^۲ وجود دارد، یعنی یک فیلتر آنالوگ که باند 0 تا 4000 Hz مورد استفاده توسط POTS را از داده جدا می‌سازد. سیگنال POTS به تلفن یا ماشین نمابر موجود، مسیریابی می‌شود. سیگنال داده به یک مودم ADSL مسیریابی می‌شود. این مودم از پردازش سیگنال دیجیتال به منظور پیاده‌سازی OFDM استفاده می‌کند. از آن‌جا که اغلب مودم‌های ADSL بیرونی هستند، بایستی کامپیوتر با اتصالات پرسرعت به آن‌ها متصل گردد. معمولاً این کار با استفاده از اترنت، یک کابل USB، یا 802.11 انجام می‌شود.

در سر دیگر سیم، در طرف دفتر پایانی، یک انشعاب‌دهنده‌ی متناظر نصب می‌شود. در این‌جا، بخش صوت سیگنال، فیلتر شده و به سوئیچ صوتی معمولی ارسال می‌گردد. سیگنال بالای 26 kHz به یک نوع وسیله‌ی جدید به نام DSLAM (تسهیم‌کننده‌ی دسترسی به DSL^۳) مسیریابی می‌شود. این وسیله دربردارنده‌ی همان نوع پردازشگر سیگنال دیجیتال است که مودم ADSL دارد. هنگامی که بیت‌ها از سیگنال بازیافت شوند، بسته‌ها تشکیل شده و به ISP ارسال می‌شوند.

چنین تمایز کاملی مابین سیستم صوتی و ADSL، استقرار و سازماندهی ADSL را برای یک شرکت تلفن، نسبتاً آسان می‌سازد. تمام آنچه که نیاز دارد عبارت‌است از خرید یک DSLAM و

1. Network Interface Device 2. Splitter 3. Digital Subscriber Line Access Multiplexer

انشعاب‌دهنده، و وصل کردن مشترکین ADSL به انشعاب‌دهنده. سایر سرویس‌های با پهنای باند بالا (مثل ISDN) به تغییرات خیلی بیشتری در تجهیزات سوئیچینگ موجود، نیاز دارند.

یک اشکال طراحی شکل ۲-۳۵، نیاز به NID و انشعاب‌دهنده در محدوده‌ی تحت تملک خریدار می‌باشد. نصب این‌ها فقط توسط کمک مهندس شرکت تلفن می‌تواند انجام شود، که ضرورت آن انجام یک "فرآیند" پرهزینه است. به همین دلیل یک طرح دیگر بدون انشعاب‌دهنده که به صورت غیررسمی **G.lite** نامیده می‌شود نیز استاندارد شده است. این طرح همانند شکل ۲-۳۵ است ولی بدون انشعاب‌دهنده‌ی خریدار. خط تلفن فعلی به همان صورتی که هست، استفاده می‌شود. تنها تفاوت آن است که یک مایکرو-فیلتر (ریز-فیلتر) بایستی در هر یک از پریزهای تلفن، مابین تلفن یا مودم ADSL و سیم، نصب گردد. مایکرو-فیلتر تلفن، یک فیلتر پایین-گذر^۱ است که فرکانس‌های بالاتر از 3400 Hz را حذف می‌کند؛ مایکرو-فیلتر مربوط به مودم ADSL، یک فیلتر بالا-گذر^۲ است که فرکانس‌های زیر 26 kHz را حذف می‌کند. با این همه، این سیستم به اندازه‌ی زمانی که انشعاب‌دهنده داشته باشد، قابل اتکا نیست، لذا **G.lite** فقط تا 1.5 Mbps می‌تواند استفاده شود (در برابر 8 Mbps ای که برای ADSL همراه با انشعاب‌دهنده داریم). برای کسب اطلاعات بیشتر درباره‌ی ADSL به Starr و همکاران (۲۰۰۳) مراجعه نمایید.

فیبر تا منزل

حلقه‌های محلی مسی نصب شده، کارایی ADSL و مودم‌های تلفنی را محدود می‌کنند. برای آن‌که سرویس‌های شبکه‌ی سریع‌تر و بهتری فراهم شوند، شرکت‌های تلفن در حال ارتقای حلقه‌های محلی در محل‌هایی که امکان داشته باشد، هستند. به این ترتیب که تمام مسیر تا منازل و دفاتر کار را فیبر نوری نصب می‌کنند. حاصل این کار، **FttH** (فیبر تا منزل^۳) نام دارد. برای مدتی، فناوری FttP در دسترس بود ولی سازماندهی‌ها در سال ۲۰۰۵ رشد سریع خود را آغاز کردند یعنی همراه با رشد نیاز به اینترنت پرسرعت از طرف مشتریانی که از DSL و کابل استفاده می‌کردند و مایل به دریافت فیلم از اینترنت بودند. در حال حاضر قریب به ۴٪ از منازل در ایالات متحده به FttH متصل هستند و سرعت دسترسی به اینترنت در آن‌ها تا 100 Mbps می‌رسد.

انواع گوناگونی به شکل "FttX" وجود دارند (X ممکن است زیرزمین، جدول کنار خیابان، یا در همسایگی باشد). این حالت‌ها بر این امر دلالت دارند که سازماندهی فیبر، امکان رسیدن تا نزدیک منزل را دارد. در این شرایط، مس (به صورت زوج سیم به هم تابیده یا کابل کوکسیال) سرعت‌هایی را در فاصله‌ی کوتاه انتهایی فراهم می‌کند که به قدر کافی زیاد هستند. تصمیم در مورد این‌که استقرار فیبر تا چه مسافتی انجام شود، یک تصمیم اقتصادی و مبتنی بر ایجاد توازن میان هزینه و درآمد مورد

1. Low-pass 2. High-pass 3. Fiber to the Home

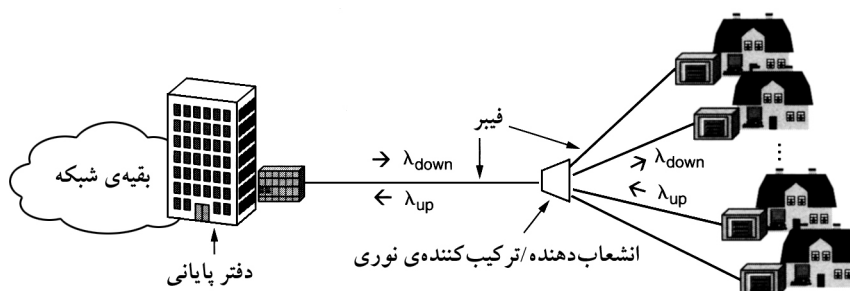
انتظار، می‌باشد. در هر حال، نکته آن است که فیبر نوری از مانع سنتی، یعنی "مایل آخر" عبور کرده است. ما در بحث‌مان بر روی FttH تمرکز خواهیم کرد.

حلقه‌ی محلی از جنس فیبر هم مانند سیم‌های مسی که قبل از آن بودند، عنصری غیرفعال است. معنای این سخن آن است که هیچ نیازی به تجهیزات انرژی الکتریکی، به منظور تقویت یا انجام پردازش دیگری بر روی سیگنال‌ها، وجود ندارد. فیبر فقط سیگنال‌ها را مابین منزل و دفتر پایانی، حمل می‌کند. این شیوه سبب کاهش هزینه و افزایش اتکاپذیری می‌شود.

معمولاً فیبرهایی که از منازل می‌آیند به یکدیگر پیوسته می‌شوند چنانکه به ازای هر گروه حداکثر ۱۰۰ منزلی، تنها یک فیبر واحد به دفتر پایانی می‌رسد. در جهت پایین‌دستی، انشعاب‌دهنده‌های نوری، سیگنالی که از دفتر پایانی می‌رسد را چنان تقسیم می‌کنند که به همه‌ی منازل برسد. اگر قرار باشد فقط یک منزل بتواند از سیگنال کدبرداری کند، لازم است به منظور تأمین امنیت، عمل رمزگذاری انجام شود. در جهت بالادستی، ترکیب‌کننده‌های نوری، سیگنال‌های مربوط به منازل را به یک سیگنال واحد ادغام می‌کنند و آن سیگنال واحد به دفتر پایانی می‌رسد.

این معماری PON (شبکه‌ی نوری غیرفعال)^۱ نام دارد و در شکل ۲-۳۶ نشان داده شده است. شیوه‌ی رایج آن است که برای انتقال پایین‌دستی^۲، از یک طول موج به صورت اشتراکی میان همه‌ی منازل، و از یک طول موج دیگر برای انتقال بالادستی^۳ استفاده می‌شود.

حتی با وجود انشعاب‌دهنده هم، پهنای باند بسیار زیاد و میرایی کم فیبر، به معنای آن است که PON ها می‌توانند نرخ‌های بالایی را برای کاربران، در مسافت‌های تا ۲۰ کیلومتر فراهم کنند. نرخ داده‌ی واقعی و برخی جزئیات دیگر بستگی به نوع PON دارد. دو نوع آن متداول هستند: GPON ها (PON های با توانمندی گیگابیت)^۴ که از دنیای مخابرات می‌آیند و به همین جهت توسط استاندارد ITU تعریف می‌شوند، و EPON ها (PON های اترنت)^۵ که به نوبه‌ی خود، بیشتر مربوط به دنیای شبکه‌بندی هستند و لذا توسط استاندارد IEEE تعریف می‌شوند. سرعت هر دو مورد در حدود گیگابیت است و



شکل ۲-۳۶ شبکه‌ی نوری غیرفعال برای فیبر تا منزل.

- | | | | |
|----------------------------|---------------|-------------|------------------------|
| 1. Passive Optical Network | 2. Downstream | 3. Upstream | 4. Gigabit-capable PON |
| 5. Ethernet PON | | | |

توانایی حمل ترافیک مربوط به سرویس‌های مختلفی از قبیل اینترنت، ویدیو، و صوت را دارند. برای مثال، GPON ها جریان پایین‌دستی 2.4 Gbps و جریان بالادستی 1.2 یا 2.4 Gbps را فراهم می‌کنند. نیاز به پروتکلی است که ظرفیت فیبر واحدی که در دفتر پایانی وجود دارد را میان منازل مختلف به اشتراک بگذارد. این کار در جهت پایین‌دستی آسان است. دفتر پایانی می‌تواند پیغام‌ها را، با هر ترتیبی که مایل باشد، به هر یک از منازل مختلف ارسال کند. اما در جهت بالادستی، پیغام‌های منازل مختلف نمی‌توانند همزمان ارسال شوند، وگرنه امکان تصادم میان سیگنال‌های متفاوت وجود دارد. همچنین منازل نمی‌توانند انتقال‌های یکدیگر را بشنوند بنابراین قبل از ارسال نمی‌توانند عمل گوش کردن را انجام دهند. راه‌حل به این صورت است که تجهیزات واقع در منازل درخواست‌هایی می‌دهند و از طرف تجهیزات واقع در دفتر پایانی، بازه‌های زمانی‌ای به آن‌ها داده می‌شود تا استفاده کنند. برای آن‌که این روش عمل کند، یک پردازشی تنظیم کننده وجود دارد که عمل تطبیق بین زمان‌های انتقال از منازل را انجام می‌دهد، به نحوی که همه‌ی سیگنال‌هایی که به دفتر پایانی می‌رسند، همگام شده باشند. برای اطلاعات بیشتر درباره‌ی آینده‌ی PON ها به Grobe و Elbert (۲۰۰۸) مراجعه نمایید.

۲-۶-۴ مسیرهای اصلی و تسهیم

مسیرهای اصلی در شبکه‌ی تلفن فقط سریع‌تر از حلقه‌های محلی نیستند، بلکه از دو جنبه‌ی دیگر هم با آن‌ها تفاوت دارند. هسته‌ی شبکه‌ی تلفن، اطلاعات دیجیتال را حمل می‌کند، نه اطلاعات آنالوگ را؛ یعنی بیت‌ها، و نه صوت. به همین دلیل برای انتقال در مسیرهای اصلی دور-بُرد، عمل تبدیل به شکل دیجیتال در دفتر پایانی، امری ضروری است. مسیرهای اصلی در آن واحد هزاران و بلکه میلیون‌ها تماس را حمل می‌کنند. این اشتراک به منظور دستیابی به مقیاس‌هایی که به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشند، اهمیت دارد زیرا اساساً میزان هزینه‌ی مالی برای نصب و نگهداری یک مسیر اصلی با پهنای باند بالا میان دو دفتر سوئیچینگ، همان قدر است که برای یک مسیر اصلی با پهنای باند پایین. این کار با انواع تسهیم TDM و FDM به انجام می‌رسد.

در زیر به اختصار نحوه‌ی دیجیتال شدن سیگنال‌ها را برای آن‌که بتوانند توسط شبکه‌ی تلفن حمل شوند، بررسی می‌کنیم. بعد از آن، خواهیم دید که چگونه از TDM برای حمل بیت‌ها در مسیرهای اصلی استفاده می‌شود. این بررسی شامل سیستم TDM مورد استفاده برای فیبرهای نوری (SONET) می‌شود. سپس چون روش FDM با نام "تسهیم به روش تقسیم طول موج" به فیبرهای نوری اعمال می‌شود، مجدداً به FDM بازمی‌گردیم.

دیجیتال کردن سیگنال‌های صوتی

در توسعه‌ی شبکه‌ی تلفن، هسته در ابتدای کار، تماس‌های صوتی را به عنوان اطلاعات آنالوگ اداره می‌کرد. تا سال‌ها از روش‌های FDM برای تسهیم کانال‌های صوتی ۴۰۰۰ هرتزی (شامل ۳۱۰۰ هرتز، به علاوه‌ی باندهای محافظ) به درون واحدهای بزرگ‌تر و بزرگ‌تر، استفاده می‌شد. به عنوان مثال، ۱۲

تماس در باند ۶۰ تا ۱۰۸ کیلوهرتز، به عنوان یک گروه^۱ شناخته می‌شود. پنج گروه (در مجموع، ۶۰ تماس) به عنوان **آبرگروه**^۲ شناخته می‌شود، و همین‌طور تا آخر. این روش‌های FDM هنوز هم در سیم‌های مسی و کانال‌های مایکروویو استفاده می‌شوند. اما FDM نیاز به مداربندی آنالوگ داشته و قابل هدایت برای کار توسط یک کامپیوتر نیست. برعکس، TDM می‌تواند کلاً توسط تجهیزات الکترونیکی اداره شود، لذا در سال‌های اخیر رواج بسیار زیادی یافته است. از آن‌جا که TDM فقط برای داده‌ی دیجیتال قابل استفاده است و حلقه‌های محلی، سیگنال‌های آنالوگ تولید می‌کنند، بنابراین در دفتر پایانی نیاز به عمل تبدیل از آنالوگ به دیجیتال وجود دارد، یعنی همان جایی که همه‌ی حلقه‌های محلی مجزا با هم جمع می‌شوند تا در مسیرهای اصلی خارج شوند، با هم ترکیب شوند. دیجیتال شدن سیگنال‌های آنالوگ در دفتر پایانی، به وسیله‌ی دستگاهی به نام **مدار مبدل**^۳ انجام می‌شود ("codec"، کوته‌نوشت "coder-decoder" است). مدار مبدل ۸۰۰۰ نمونه در هر ثانیه می‌سازد (۱۲۵ میکروثانیه به ازای هر نمونه) زیرا نظریه‌ی نایکوئیست می‌گوید به دست آوردن تمام اطلاعات از طریق پهنای باند کانال تلفن 4-kHz ای کافی می‌باشد. با یک نرخ نمونه‌برداری کندتر، ممکن است اطلاعات از بین بروند؛ با نرخ نمونه‌برداری بالاتر نیز، هیچ اطلاعات اضافه‌ای به دست نمی‌آید. هر یک از نمونه‌های واقع در دامنه‌ی سیگنال، به یک عدد ۸ بیتی، مقدارگذاری^۴ می‌شود (یا کوانتومی می‌شود).

نام این روش **PCM (تلفیق‌سازی کد پالس)**^۵ می‌باشد. این روش قلب سیستم تلفن نوین را شکل می‌دهد. در نتیجه به صورت مجازی، تمام فواصل زمانی در سیستم تلفن، ضرایبی از 125 μsec می‌باشند. بنابراین نرخ داده‌ی فشرده‌سازی نشده برای یک تماس تلفنی با کیفیت صوتی، ۸ بیت در هر 125 μsec (یا همان 64 kbps) است.

در سمت دیگر تماس، یک سیگنال آنالوگ از طریق همین نمونه‌های کوانتومی شده، بازتولید می‌شود. به این ترتیب که نمونه‌ها در طول زمان، تا آخر پخش می‌گردند (و لبه‌های تیز آن‌ها حذف می‌شود). چون نمونه‌ها را کوانتومی کرده‌ایم، سیگنال به دست آمده دقیقاً عین سیگنال آنالوگ اولیه نیست، حتی اگر آن را در نرخ نایکوئیست هم نمونه‌برداری کرده باشیم. برای آن‌که خطای ناشی از کوانتومی کردن را کاهش داده باشیم، سطوح کوانتومی کردن به طور نامتوازن^۶ انتخاب می‌شوند. برای این کار از یک مقیاس لگاریتمی استفاده می‌شود که بیت‌های نسبتاً بیشتری را به دامنه‌های سیگنال‌های کوچک‌تر، و بیت‌های نسبتاً کمتری را به دامنه‌های سیگنال‌های بزرگ‌تر می‌دهد. به این ترتیب خطا متناسب است با دامنه‌ی سیگنال.

دو نگارش از کوانتومی کردن خیلی مورد استفاده هستند: **قانون μ** ^۷ که در امریکای شمالی و ژاپن به کار می‌رود، و **قانون A**^۸ که در اروپا و سایر نقاط جهان به کار می‌رود. هر دو نگارش در استاندارد

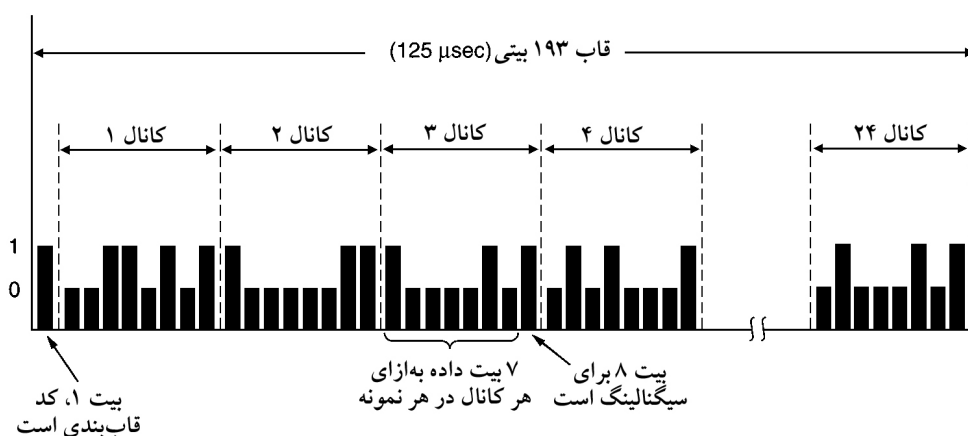
1. Group	2. Supergroup	3. Codec	4. Quantize	5. Pulse Code Modulation
6. Unevenly	7. μ -law	8. A-law		

ITU G.711 آمده‌اند. یک روش دیگر برای بررسی این فرآیند آن است که فرض کنیم محدوده‌ی پویای سیگنال (یا نسبت بین بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقادیر ممکن) قبل از آن‌که سیگنال (به صورتی یکنواخت) کوانتومی شود، فشرده‌سازی می‌گردد و سپس هنگام بازتولید سیگنال آنالوگ، مجدداً بسط می‌یابد. به همین دلیل به آن **فشرده - و - نافشرده‌سازی**^۱ می‌گویند. این امکان هم وجود دارد که نمونه‌ها پس از دیجیتالی شدن، فشرده شوند تا به نرخی به مراتب کمتر از 64 kbps نیاز داشته باشند. به هر حال این بحث را فعلاً وا می‌گذاریم تا زمانی که به بررسی کاربردهای صوتی، از قبیل صوت - روی - IP، بپردازیم.

تسهیم به روش تقسیم زمان

از روش TDM مبتنی بر PCM برای حمل چندین تماس صوتی روی مسیرهای اصلی استفاده می‌شود، به این ترتیب که از هر یک از تماس‌ها، یک نمونه در هر 125 μsec ارسال می‌شود. هنگامی که انتقال دیجیتال به عنوان یک فناوری دست‌یافتنی و مناسب مطرح گردید، ITU (که در آن زمان CCITT نامیده می‌شد) توانایی دستیابی به توافقی در مورد یک استاندارد بین‌المللی برای PCM را نداشت. در نتیجه هم‌اکنون انواع نظام‌های ناهم‌ساز در کشورهای مختلف دنیا مورد استفاده هستند.

روش مورد استفاده در امریکای شمالی و ژاپن، حامل **T1**^۲ است که در شکل ۲-۳۷ به تصویر کشیده شده. (اگر به زبان فنی صحبت کنیم، نام قالب (یا فرمت) آن DS1 و نام حامل، T1 است، اما بنا به سنت رایج در صنعت، این گونه جداسازی‌های موشکافانه را در این جا انجام نمی‌دهیم.) حامل T1 از ۲۴ کانال صوتی تشکیل شده که با یکدیگر تسهیم شده‌اند. هر کدام از این ۲۴ کانال، به نوبه‌ی خود، ۸ بیت در جریان خروجی بایستی درج کنند.



شکل ۲-۳۷ حامل T1 (1.544 Mbps).

یک قاب از $192 = 8 \times 24$ بیت، به‌علاوه‌ی یک بیت اضافی به منظور کنترل، تشکیل می‌شود، یعنی ۱۹۳ بیت به ازای هر ۱۲۵ میکروثانیه. حاصل آن، نرخ داده‌ی بزرگی برابر با 1.544 Mbps است که از آن میان، 8 kbps مربوط به سیگنالینگ می‌باشد. بیت ۱۹۳^۱م به منظور همگام‌سازی قاب و سیگنالینگ استفاده می‌شود. در یکی از انواع آن، از بیت ۱۹۳^۲م برای یک گروه با ۲۴ قاب، به نام **آبرقاب گسترش‌یافته**^۱، استفاده می‌شود. شش تا از بیت‌ها در محل‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰، و ۲۴^۲م، الگوی متفاوت 001011... را اتخاذ می‌کنند. گیرنده در شرایط عادی، کنترلی را برای این الگو انجام می‌دهد تا مطمئن شود همگام بودن از بین نرفته است. از شش بیت اضافی برای ارسال کد کنترل خطا استفاده می‌شود، این کد به گیرنده کمک می‌کند تا همگام شدنش را تأیید کند. در صورتی که گیرنده از همگامی خارج شده باشد، می‌تواند برای رسیدن به همگامی، الگو را پویش کرده و اعتبار کد کنترل خطا را بررسی کند. از ۱۲ بیت باقیمانده به منظور کنترل اطلاعات مربوط به عملیات و نگهداری شبکه استفاده می‌شود، مثلاً تهیه‌ی گزارش کارایی از طرف دیگر کانال که دور است.

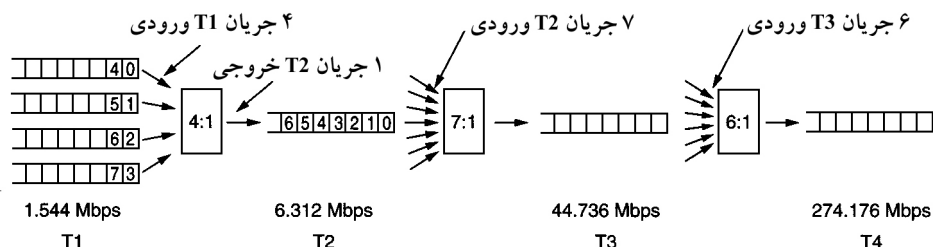
چند نوع قالب T1 وجود دارد. نگارش‌های اولیه، اطلاعات سیگنالینگ را به صورت **درون-باندی**^۲ ارسال می‌کردند، یعنی در همان کانال داده و با استفاده از بعضی از بیت‌های داده. این طرح یک نوع از **سیگنالینگ مرتبط با کانال**^۳ است، زیرا هر کانال دارای زیر-کانال سیگنالینگ خصوصی مربوط به خود است. در یکی از آرایش‌ها چنین است که هر شش قاب یک بار، بیت با کمترین ارزش، غیر از ۸ بیت نمونه‌ی هر کانال، برای این منظور استفاده می‌شود. نام این طرح جالب است: **سیگنالینگ بیت سرقتی**^۴. ایده آن است که بیت‌های ربوده شده برای تماس‌های صوتی مهم و بامعنی نیستند، پس هیچ کس تفاوت را نخواهد شنید.

اما برای داده، داستان جور دیگری است. تحویل بیت‌های نادرست، حتی با کمترین اشتباه، کمکی نمی‌کند. اگر از نگارش‌های قدیمی‌تر T1 استفاده شده باشد، در هر یک از ۲۴ کانال، تنها ۷ بیت از هر ۸ بیت، یعنی 56 kbps می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در عوض، نگارش‌های جدیدتر T1 امکان گوش دادن به کانال‌ها را فراهم می‌کنند، که در این صورت تمام بیت‌ها می‌توانند برای ارسال داده مورد استفاده قرار گیرند. کانال‌های باز همان چیزی هستند که صاحبان کسب و کارهای اجاره کننده‌ی خط T1 خواهانشان هستند. زیرا آن‌ها به جای نمونه‌های صوتی، داده را از طریق شبکه‌ی تلفن ارسال می‌کنند. در این شرایط، سیگنالینگ مربوط به هر تماس صوتی، به صورت **برون-باندی**^۵ اداره می‌شود، یعنی در یک کانال مجزا از داده. غالباً سیگنالینگ همراه با **سیگنالینگ کانال مشترک**^۶ انجام می‌شود. در این حالت، یک کانال سیگنالینگ اشتراکی وجود دارد. هر کدام از ۲۴ کانال ممکن است به این منظور استفاده شوند.

1. Extended superframe
4. Robbed-bit signaling

2. In-band
5. Out-of-band

3. Channel-associated signaling
6. Common-channel signaling



شکل ۲-۳۸ تسهیم جریان‌های T1 در حامل‌های بالاتر.

خارج از آمریکای شمالی و ژاپن، به جای T1 از حامل E1^۱ با 2.048 Mbps استفاده می‌شود. این حامل دارای ۳۸ نمونه‌ی داده‌ی ۸ بیتی است که در قالب پایه‌ی ۱۲۵ میکروثانیه‌ای، بسته‌بندی^۲ می‌شود. سی عدد از این کانال‌ها برای اطلاعات، و حداکثر دو عدد از آن‌ها برای سیگنالینگ به کار می‌روند. هر گروه چهار قابی، ۶۴ بیت سیگنالینگ تأمین می‌کنند، که نیمی از آن‌ها برای سیگنالینگ استفاده می‌شوند (یا به صورت مرتبط با کانال یا به صورت کانال عمومی) و نیمی از آن‌ها برای همگام‌سازی قاب استفاده شده و یا آن‌که رزرو می‌شوند تا هر کشوری از آن‌ها مطابق دلخواهش استفاده کند.

تسهیم به روش تقسیم زمان، این امکان را می‌دهد تا چندین حامل T1 داخل حامل‌هایی با رتبه‌ی بالاتر تسهیم شوند. شکل ۲-۳۸ نحوه‌ی انجام این کار را نشان می‌دهد. در سمت چپ چهار کانال T1 را مشاهده می‌کنیم که در حال تسهیم داخل یک کانال T2 هستند. تسهیم در T2 و بالاتر از آن، به جای بایت به بایت، به صورت بیت به بیت انجام می‌شود، با ۲۴ کانال صوتی که یک قاب T1 را به وجود می‌آورند. چهار جریان T1 با نرخ 1.544 Mbps، بایستی نرخ 6.176 Mbps را تولید کنند. اما T2 در واقع 6.312 Mbps است. از بیت‌های اضافه برای قاب‌بندی و نیز برای بازیافت (در صورت بروز خطاهای حامل) استفاده می‌شود. مصرف‌کنندگان استفاده‌ی زیادی از T1 و T3 می‌کنند، در حالی که T2 و T4 فقط در خود سیستم تلفن استفاده می‌شوند، به همین دلیل چندان شناخته شده نیستند.

در سطح بعدی، هفت جریان T2، بیت به بیت ترکیب می‌شوند تا یک جریان T3 را تشکیل دهند. سپس شش جریان T3 به هم پیوند می‌خورند تا یک جریان T4 شکل گیرد. در هر مرحله مقدار کوچکی سربار به منظور قاب‌بندی و بازیافت (در شرایطی که همگامی میان ارسال‌کننده و دریافت‌کننده از بین رفته باشد) اضافه می‌گردد.

درست همان‌گونه که توافق اندکی بر سر حامل پایه، میان ایالات متحده و باقی دنیا وجود دارد، همین‌طور نیز توافق اندکی بر سر نحوه‌ی تسهیم در حامل‌های با پهنای باند بالاتر وجود دارد. نظام مورد استفاده در ایالات متحده از ضرایب ۴، ۷، و ۶ استفاده می‌کند که مورد قبول بقیه قرار نگرفت، لذا استاندارد ITU در هر سطح تسهیم، از ضریب ۴ استفاده می‌کند. همچنین قاب‌بندی و بازیافت داده نیز

1. E1 carrier 2. Pack

در ایالات متحده و در استانداردهای ITU، با هم متفاوت هستند. سلسله مراتب ITU برای ۳۲، ۱۲۸، ۵۱۲، ۲۰۴۸ و ۸۱۹۲ کانال، با سرعت‌های 2.048، 8.848، 34.304، 139.264 و 565.148 Mbps اجرا می‌شود.

SONET / SDH

در اولین روزهای فیبر نوری، هر یک از شرکت‌های تلفن، سیستم TDM نوری اختصاصی‌ای داشت که متعلق به خودش بود. پس از انشعاب AT&T در سال ۱۹۸۴، شرکت‌های تلفن محلی مجبور بودند به فراهم‌کنندگان حامل متعدد در مسافت‌های دور متصل شوند که همگی هم سیستم‌های TDM نوری متفاوتی داشتند. بنابراین نیاز به استانداردسازی، امری بدیهی بود. در سال ۱۹۸۵، بل‌کور^۱ که بازوی تحقیقاتی RBOC بود، کار بر روی استاندارد به نام SONET (شبکه‌ی نوری همگام^۲) را آغاز نمود. بعدها، ITU نیز به این تلاش‌ها پیوست که نتیجه‌ی آن استاندارد SONET و یک سری

توصیه‌های موازی ITU (G.707، G.708، و G.709) در ۱۹۸۹ بود. توصیه‌های ITU با نام SDH خوانده می‌شوند (سلسله مراتب دیجیتال همگام^۳) اما تنها در جزئیات با SONET تفاوت دارند. اکنون به صورت مجازی، تمام ترافیک تلفنی راه دور در ایالات متحده، و بیشتر جاهای دیگر، از مسیرهای اصلی‌ای استفاده می‌کنند که در لایه‌ی فیزیکی‌شان، SONET را اجرا می‌کنند. برای اطلاعات بیشتر درباره‌ی SONET، به Bellamy (۲۰۰۰)، Goralski (۲۰۰۲)، و Shepard (۲۰۰۱) مراجعه نمایید.

طراحی SONET چهار هدف اصلی داشت. اولین و مهم‌ترین آن‌که، SONET بایستی همکاری متقابل^۴ حامل‌های مختلف را امکان‌پذیر سازد. دستیابی به این هدف نیازمند تعریف یک استاندارد سیگنالینگ عمومی، با رعایت طول موج، زمان‌بندی، ساختار قاب‌بندی، و موارد دیگر بود.

دوم آن‌که، ابزاری برای یکنواخت کردن سیستم‌های دیجیتالی ایالات متحده، اروپا، و ژاپن لازم بود. همه‌ی این سیستم‌ها بر مبنای کانال‌های PCM با نرخ 64-kbps بودند ولی روش‌های ترکیب در آن‌ها با هم تفاوت داشت (و ناسازگار بود).

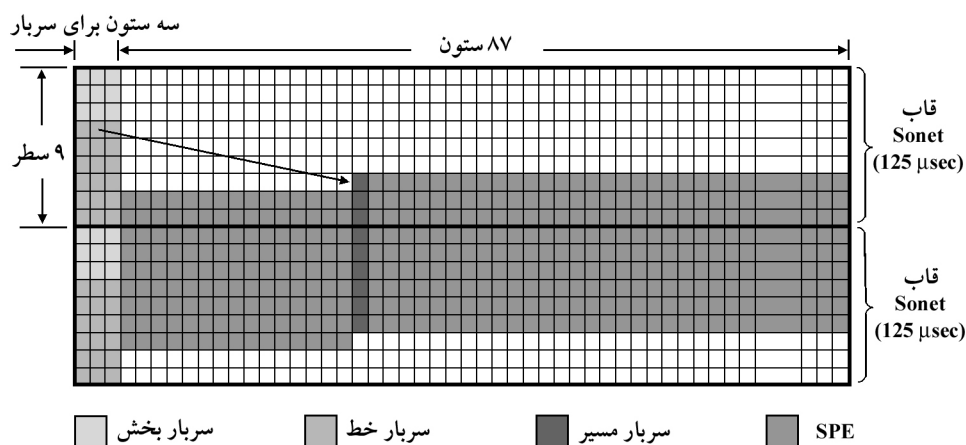
سوم آن‌که، SONET می‌بایست روشی برای تسهیم چندین کانال دیجیتال فراهم می‌کرد. در زمان ایجاد SONET، بالاترین سرعت حامل دیجیتال که به صورت عملی، بیشتر در ایالات متحده مورد استفاده بود، عبارت بود از T3 با نرخ 44.736 Mbps. سطح T4 تعریف شده بود اما زیاد از آن استفاده نمی‌شد، و سرعت بالاتر از T4 هنوز حتی تعریف هم نشده بود. بخشی از ماموریت SONET عبارت بود از ادامه‌ی این سلسله تا سطح گیگابیت بر ثانیه و بیش از آن. همچنین روشی استاندارد برای تسهیم کانال‌های گُندتر به داخل کانال SONET مورد نیاز بود.

چهارم آن‌که، SONET بایستی حمایت از عملیات، سرپرستی، و نگهداری (OAM)^۵ که برای مدیریت شبکه ضروری هستند را تأمین نماید. سیستم‌های قبلی، این موارد را خیلی خوب انجام نمی‌دادند.

1. Bellcore 2. Synchronous Optical NETwork 3. Synchronous Digital Hierarchy
4. Interwork 5. OAM: Operation, Administration, Maintenance

ابتدا تصمیم بر این بود که SONET را به صورت یک سیستم TDM سنتی بسازند، همراه با یک پهنای باند سراسر فیبر، که به یک کانال اختصاص داده شده باشد، به علاوه بازه‌هایی زمانی برای زیر-کانال‌های گوناگون. بدین لحاظ، SONET یک سیستم همگام محسوب می‌شود. هر یک از ارسال کننده‌ها و دریافت کننده‌ها، به یک کلاک عمومی همبسته می‌شوند. کلاک اصلی که سیستم را کنترل می‌کند، دقتی در حدود 10^9 در ۱ دارد. بیت‌ها بر روی یک خط SONET در فواصل بینهایت دقیق، که توسط کلاک اصلی کنترل می‌شود، ارسال می‌شوند.

قاب پایه در SONET عبارت‌است از یک بلوک ۸۱۰ - بیتی که در هر ۱۲۵ میکروثانیه یک بار منتشر می‌شود. از آنجا که SONET همگام است، قاب‌ها به هر حال فرستاده می‌شوند، چه داده‌ی مفیدی برای ارسال داشته باشند و یا نداشته باشند. داشتن ۸۰۰۰ قاب در هر ثانیه، دقیقاً با نرخ نمونه‌برداری از کانال‌های PCM که در همه‌ی سیستم‌های تلفن دیجیتال مورد استفاده است، منطبق می‌باشد. بهترین توصیف از قاب‌های ۸۱۰ - بیتی SONET، به صورت یک چهارگوش از بیت‌ها است با ۹۰ ستون و ۹ سطر. به این ترتیب، تعداد 6480 بیت ($8 \times 810 = 6480$) بار در هر ثانیه انتقال می‌یابند، یعنی نرخ داده‌ای به بزرگی 51.84 Mbps. این طرح کلی، اساس کانال SONET است و STS-1 نام دارد (حمل همگام سیگنال-۱). تمام مسیرهای اصلی SONET، مضربی از STS-1 هستند. همان‌طور که در شکل ۲-۳۹ به تصویر کشیده شده، سه ستون اول از هر قاب، برای اطلاعات مدیریت سیستم، رزرو می‌شوند. در این بلوک، سه سطر اول شامل سربار بخش هستند؛ شش تای بعدی شامل سربار خط هستند. سربار بخش، در ابتدا و انتهای هر بخش، تولید و کنترل می‌گردد. در حالی که تولید و کنترل سربار خط، در ابتدا و انتهای هر خط انجام می‌شود.



شکل ۲-۳۹ دو قاب SONET پشت سر هم.

یک فرستنده‌ی SONET، قاب‌های ۸۱۰ - بایتی را به صورت پشت سرهم و بدون فاصله‌ی خالی میان آن‌ها، ارسال می‌کند حتی وقتی هیچ داده‌ای وجود نداشته باشد (در چنین حالتی، داده‌ی بدلی ارسال می‌کند). از دید گیرنده، همه‌ی آنچه که مشاهده می‌کند، یک جریان داده‌ی پیوسته است. بنابراین چگونه ابتدای هر قاب را شناسایی کند؟ جواب این است که ۲ بایت اول از هر قاب، دربردارنده‌ی یک الگوی ثابت است که گیرنده آن را جستجو می‌کند. اگر در مواجهه با قاب‌های پشت سرهم متعدد، این الگو را در محل مشخصی بیابد، چنین فرض می‌کند که با ارسال کننده همگام است. به لحاظ نظری، کاربر می‌تواند این الگو را به شیوه‌ای قانونمند، داخل محموله درج کند اما در عمل قادر به انجام این کار نیست، هم به دلیل تسهیم چندین کاربر در یک قاب، و هم بنا به دلایل دیگر.

بقیه‌ی ۸۷ ستون هر قاب، معادل 50.112 Mbps از داده‌ی کاربر را در خود نگه می‌دارند ($50.112 = 8 \times 9 \times 87$). داده‌ی کاربر می‌تواند نمونه‌های صوتی باشد، T1 و حامل‌های دیگری باشد که همه جور داده‌ای را در خود جای می‌دهند، یا از نوع بسته باشد. اساساً SONET صرفاً یک محفظه‌ی مناسب و در دسترس برای بیت‌های حمل‌شدنی می‌باشد. باید گفت که SPE (لفاف محموله‌ی همگام)^۱ که داده‌ی کاربر را حمل می‌کند، همواره از سطر ۱ و ستون ۴ شروع نمی‌شود. بلکه SPE می‌تواند از هر جایی در داخل قاب شروع گردد. در سطر اول از سربار خط، یک اشاره‌گر به بایت اول قرار داده شده است. اولین ستون از SPE سربار مسیر است (به عبارت دیگر، سرآیند مربوط به پروتکل زیر-لایه‌ی مسیر انتها - به - انتها).

این توانایی که SPE اجازه دارد از هر جایی داخل قاب SONET شروع شود و حتی دو قاب را دربرگیرد، همان‌طور که در شکل ۲-۳۹ نشان داده شده، انعطاف‌پذیری بیشتری به سیستم می‌بخشد. به عنوان مثال، اگر در حالی که یک قاب SONET بدلی در حال ساخته شدن است، یک محموله به مبدأ برسد، به جای آن‌که تا شروع قاب بعدی نگه داشته شود، می‌تواند در قاب فعلی درج شود.

سلسله مراتب تسهیم SONET/SDH در شکل ۲-۴۰ نشان داده می‌شود. نرخ‌های از STS-1 تا STS-768، در محدوده‌ی تقریبی یک خط T3 تا 40 Gbps، تعریف شده‌اند. در طول زمان حتی نرخ‌های بالاتری هم مطمئناً تعریف خواهند شد، به طوری که هر زمان که به لحاظ فناوری، امکان‌پذیر گردد، OC-3072 در 160 Gbps سطر بعدی این جدول خواهد بود. حامل نوری متناظر با STS- n ، به نام OC- n نامیده می‌شود اما هر دوی آن‌ها بیت به بیت عیناً مشابه هستند، به جز یک بیت مخصوص تنظیم، که برای همگام‌سازی مورد نیاز است. نام‌های SDH شکل دیگری دارند، و از OC-3 شروع می‌شوند زیرا سیستم‌های مبتنی بر ITU، نرخ نزدیک به 51.84 Mbps ندارند. ما در این جا (شکل ۲-۴۰) نرخ‌های متداول را نشان داده‌ایم به طوری که از OC-3 به بعد، به صورت مضاربی از چهار ادامه می‌یابند. ستون مربوط به نرخ داده‌ی "مجموع"^۲ (یا نرخ ناخالص) دربردارنده‌ی همه‌ی سربارهاست. نرخ داده‌ی SPE، سربار خط و سربار بخش را بیرون نگه می‌دارد. نرخ داده‌ی کاربر همه‌ی سربارها را در بیرون نگه داشته و فقط ۸۷ ستون محموله را به حساب می‌آورد.

نرخ داده (Mbps)			SDH	SONET	
کاربر	SPE	مجموع	نوری	نوری	الکتریکی
49.536	50.112	51.84		OC-1	STS-1
148.608	150.336	155.52	STM-1	OC-3	STS-3
594.432	601.344	622.08	STM-4	OC-12	STS-12
2377.728	2405.376	2488.32	STM-16	OC-48	STS-48
9510.912	9621.504	9953.28	STM-64	OC-192	STS-192
38043.48	38486.016	39813.12	STM-256	OC-768	STS-768

شکل ۲-۴۰ نرخ‌های تسهیم SONET و SDH.

در حاشیه، این مطلب را عنوان می‌کنیم که وقتی یک حامل، مثلاً OC-3، تسهیم نشود ولی داده را تنها از یک منبع واحد حمل نماید، حرف c (اول کلمه‌ی "concatenated") به نام آن الحاق می‌شود، بنابراین OC-3 دلالت دارد بر یک حامل 155.52 Mbps ای که از سه حامل OC-1 مجزا تشکیل شده است. اما OC-3c دلالت بر یک جریان داده از یک منبع واحد با نرخ 155.52 Mbps دارد. سه جریان OC-1 که داخل یک جریان OC-3c هستند، به صورت ستون‌های لابلای هم قرار داده می‌شوند — ابتدا، ستون ۱ از جریان ۱، سپس ستون ۱ از جریان ۲، پس از آن، ستون ۱ از جریان ۳، و به دنبالش ستون ۲ از جریان ۱، و همین‌طور تا آخر — که منتهی می‌شود به یک قاب با پهنای ۲۷۰ ستون و عمق ۹ سطر.

تسهیم به روش تقسیم طول موج

نوعی از تسهیم به روش تقسیم فرکانس، به نام WDM (تسهیم به روش تقسیم طول موج)، وجود دارد که همانند TDM برای مهار کردن پهنای باند فوق‌العاده زیاد کانال‌های فیبر نوری، از آن استفاده می‌شود. اصول پایه‌ای WDM در فیبرها در شکل ۲-۴۱ به تصویر کشیده شده است. در این شکل چهار فیبر، در یک ترکیب کننده‌ی نوری به هم می‌رسند به طوری که انرژی هر کدام از آن‌ها در طول موج متفاوتی قرار دارد. چهار پرتو نور در یک فیبر اشتراکی واحد ترکیب می‌شوند تا به یک مقصد دوردست منتقل گردند. در پایان راه، پرتو نور به همان تعداد فیبری که در سمت ورودی وجود داشتند، منشعب می‌گردد. هر یک از فیبرهای خروجی، یک هسته‌ی کوتاه با ساختاری مخصوص دارند که به جز یک طول موج، همه‌ی طول موج‌های دیگر را فیلتر می‌کند. سیگنال‌های حاصل می‌توانند به مقصدهایشان مسیریابی شوند، یا آن‌که به منظور حمل در مسیرهای تسهیم شده‌ی دیگر، مجدداً و با روش‌های دیگری ترکیب شوند.

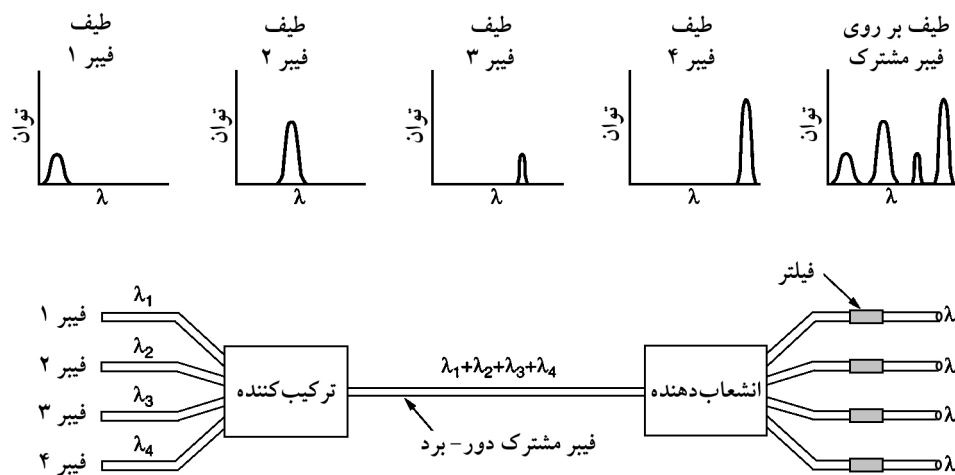
در این مبحث، حقیقتاً هیچ موضوع تازه‌ای وجود ندارد. این روش عمل، همان تسهیم به روش تقسیم فرکانس در فرکانس‌های خیلی بالا است، و منظور از واژه‌ی WDM آن است که کانال‌های فیبر

نوری، به جای فرکانس، با طول موج یا "رنگ" شان توصیف می‌شوند. از آن‌جا که هر کانال دارای محدوده‌ی فرکانس (به عبارت دیگر، طول موج) مربوط به خود است، و تمام محدوده‌ها هم متمایز می‌باشند، بنابراین می‌توانند با هم در یک فیبر دور-بُرد تسهیم شوند. تنها تفاوت با FDM الکتریکی آن است که یک سیستم نوری که از یک دیواره‌ی انکساری استفاده می‌کند، کاملاً غیرفعال است و لذا میزان اتکاپذیری در آن بسیار زیاد است.

دلیلِ رواج WDM آن است که پهنای انرژی موجود در یک کانال واحد معمولاً تنها در حدِ چند گیگاهرتز است، زیرا این مقدار، محدودیتِ فعلی‌ای است که ما در سرعتِ تبدیل بین سیگنال‌های الکتریکی و نوری داریم. با داشتن چندین کانال موازی با طول موج‌های مختلف، پهنای باندِ مجموع به صورت خطی و بر حسب تعداد کانال‌ها، افزایش می‌یابد. از آن‌جا که پهنای باندِ یک باندِ فیبر واحد در حدود ۲۵,۰۰۰ گیگاهرتز است (شکل ۲-۷ را مشاهده نمایید) به لحاظ نظری گنجایش برای ۲۵۰۰ عدد کانال 10-Gbps ای وجود دارد (نرخ بیت‌های بالاتر از این هم امکان‌پذیر می‌باشند).

رشد فناوری WDM از چنان نرخی برخوردار بوده که فناوری کامپیوتر را دچار شرمندگی کرده است. فناوری WDM در حدود ۱۹۹۰ ابداع گردید. اولین سیستم‌های تجاری، هشت کانال 2.5 Gbps به ازای هر کانال داشتند. تا سال ۱۹۹۸ سیستم‌هایی با ۴۰ کانال 2.5 Gbps ای به بازار آمده بودند. تا سال ۲۰۰۶ محصولاتی با ۱۹۲ کانال 10 Gbps و ۶۴ کانال 40 Gbps، و با قابلیت افزایش تا 2.56 Tbps وجود داشتند. چنین پهنای باندی برای انتقال ۸۰ عدد DVD فیلم کامل و خلاصه نشده، در هر ثانیه، کفایت می‌کند. کانال‌ها، در عین حال، کاملاً کنار یکدیگر بر روی فیبر قرار داده شده‌اند به طوری که فضای جدا کننده‌ی میان آن‌ها ۲۰۰، ۱۰۰ یا دست کم ۵۰ گیگاهرتز است. تبلیغاتِ فناوری که توسط شرکت‌ها انجام شده، ادعاهای اغراق‌آمیزی تا حدود ۱۰ برابر این ظرفیت را در آزمایشگاه‌ها نشان داده‌اند، اما رسیدن از آزمایشگاه به مرحله‌ی عمل، دست کم چند سال طول می‌کشد. هنگامی که تعداد کانال‌ها خیلی زیاد باشد و طول موج‌ها بسیار نزدیک به هم باشند، آن را DWDM (Dense WDM) می‌نامیم.

یکی از عوامل محرکِ فناوری WDM، توسعه‌ی مؤلفه‌های تمام - نوری است. تا پیش از این، لازم بود که در هر ۱۰۰ کیلومتر، تمام کانال‌ها از هم منشعب شوند و هر یک از آن‌ها به یک سیگنال الکتریکی تبدیل گردند تا قبل از تبدیل مجدد آن‌ها به سیگنال‌های نوری و ترکیب آن‌ها، به طور مجزا تقویت شوند. هم‌اکنون تقویت کننده‌های تمام - نوری می‌توانند کل سیگنال را در هر ۱۰۰۰ کیلومتر، به یک باره بازتولید کنند، بدون آن‌که نیازی به تبدیلات چندباره‌ی نوری - الکتریکی وجود داشته باشد. در مثال شکل ۲-۴۱، یک سیستم دارای طول موج ثابت داریم. بیت‌های مربوط به فیبر ورودی ۱ به فیبر خروجی ۳ می‌روند، بیت‌های مربوط به فیبر ورودی ۲ به فیبر خروجی ۱ می‌روند، و همین‌طور



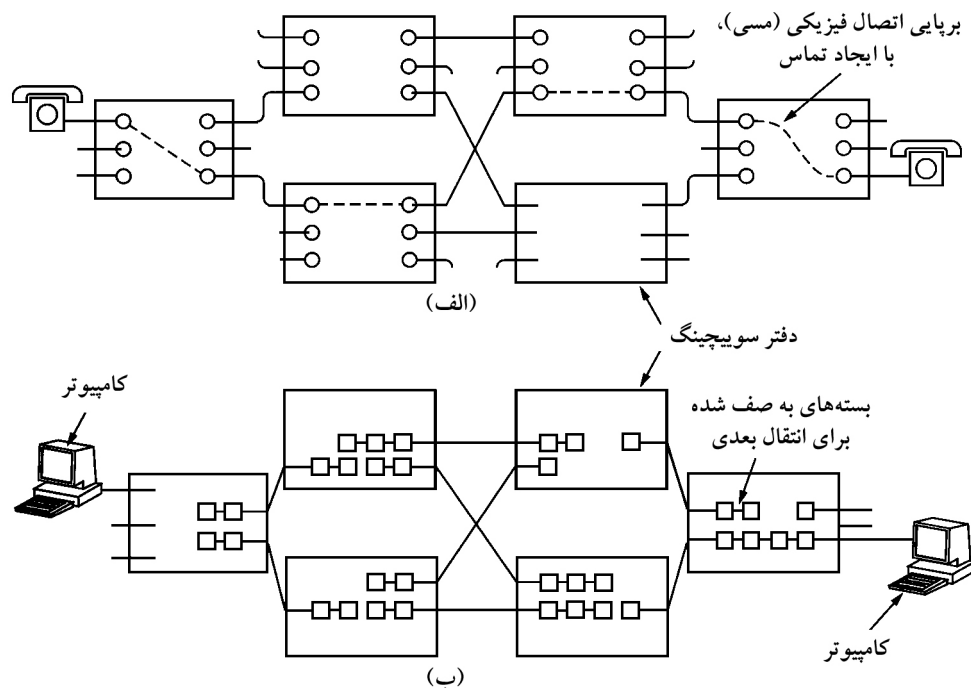
شکل ۲-۴۱ تسهیم به روش تقسیم طول موج.

تا آخر. با این وجود این امکان هم وجود دارد که سیستم‌های WDM ای هم ساخته شوند که به دامنه‌ی نوری سوئیچ شوند. در چنین دستگاهی، فیلترهای خروجی با استفاده از دستگاه‌های سنجش طول موج Fabry-Perot یا Mach-Zehnder، قابل تنظیم هستند. این دستگاه‌ها اجازه می‌دهند تا فرکانس‌های مورد نظر به صورت پویا، و توسط یک کامپیوتر کنترلی، تغییر یابند. این توانایی، انعطاف‌پذیری زیادی ایجاد می‌کند، به این ترتیب که از طریق شبکه‌ی تلفن و از یک مجموعه‌ی ثابت از فیبرها، مسیریابی با طول موج‌های متفاوت و متعدد تأمین می‌گردند. برای اطلاعات بیشتر درباره‌ی شبکه‌های نوری و WDM، به Ramaswami و همکاران (۲۰۰۹) مراجعه نمایید.

۵-۶-۲ سوئیچینگ

از دید یک مهندس تلفن عادی، سیستم تلفن به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود: تجهیزات بیرونی (حلقه‌های محلی و مسیرهای اصلی، چون به لحاظ فیزیکی در بیرون دفاتر سوئیچینگ قرار دارند) و تجهیزات داخلی (سوئیچ‌ها، که درون دفاتر سوئیچینگ قرار دارند). ما تاکنون تنها تجهیزات بیرونی را مورد ملاحظه قرار داده‌ایم. اینک زمان پرداختن به تجهیزات داخلی می‌باشد.

امروزه شبکه‌ها از دو فناوری سوئیچینگ متفاوت استفاده می‌کنند: سوئیچینگ مداری و سوئیچینگ بسته. سیستم تلفن قراردادی، مبتنی بر سوئیچینگ مداری است، اما با اوج گرفتن فناوری صوت - روی - IP، سوئیچینگ بسته در حال کنار زدن آن است. ما وارد برخی جزئیات سوئیچینگ مداری شده و آن را با سوئیچینگ بسته مقایسه می‌کنیم. هر دو نوع سوئیچینگ به اندازه‌ی کافی مهم هستند که وقتی به لایه‌ی شبکه رسیدیم، مجدداً به سراغ آن‌ها برویم.



شکل ۲-۴۲ (الف) سوئیچینگ مداری. (ب) سوئیچینگ بسته.

سوئیچینگ مداری

هنگامی که شما یا کامپیوترتان، یک تماس تلفنی برقرار می‌کنید، تجهیزات سوئیچینگ داخل سیستم تلفن، یک مسیر فیزیکی از تلفن شما به تلفن گیرنده پیدا می‌کند. این شیوه، سوئیچینگ مداری نامیده می‌شود. نمودار تصویری آن در شکل ۲-۴۲(الف) نشان داده شده است. هر یک از شش مربع، نمایانگر یک دفتر سوئیچینگ حامل هستند (دفتر پایانی، دفتر عوارضی، و مانند آن). در این مثال، هر دفتر سه خط ورودی و سه خط خروجی دارد. هنگامی که یک تماس از یک دفتر سوئیچینگ عبور می‌کند، یک اتصال فیزیکی میان خطی که تماس بر روی آن آمده، و یکی از خطوط خروجی برقرار می‌شود (به لحاظ مفهومی)، این اتصال با خطوط نقطه‌چین نشان داده شده است.

در روزهای نخست تلفن، اتصال به وسیله‌ی اپراتور برقرار می‌شد، به این ترتیب که کابلی را به سوکت‌های ورودی و خروجی وصل می‌کرد. در حقیقت، یک داستان کوتاه جالب در ارتباط با ابداع تجهیزات سوئیچینگ مداری خودکار وجود دارد. این شیوه در قرن ۱۹، و توسط یک مأمور کفن و دفن در میسوری^۱ به نام آلمون استراوگر^۲ ابداع گردید. کمی بعد از اختراع تلفن، هر زمان که شخصی فوت می‌کرد، یکی از بازماندگان به اپراتور تلفن کرده و می‌گفت "لطفاً مرا به یک مأمور کفن و دفن

1. Missouri 2. Almon B. Strowger

وصل کنید. " از بدشانسی آقای استراوگر، در آن شهر دو مأمور کفن و دفن بودند و اپراتورِ تلفن، همسر آن مأمور دیگر بود. آقای استراوگر فوراً متوجه شد که یا باید تجهیزاتی برای سوئیچینگ تلفن خودکار اختراع کند و یا آنکه مجبور است از شغلش دست بکشد. او گزینه‌ی اول را انتخاب کرد. برای مدت تقریباً ۱۰۰ سال، تجهیزات سوئیچینگ مداری‌ای که در تمام دنیا به کار می‌رفت، به نام ابزار استراوگر^۱ شناخته می‌شد. (تاریخ، این مورد را ثبت نکرده که آیا اپراتوری که مسئول سوئیچ کردن بود، و حالا بی‌کار شده، آیا شغلی به عنوان اپراتور اطلاعات به دست آورد یا خیر. همان اپراتوری که پاسخ سؤالاتی از این قبیل را می‌دهد: "شماره تلفن یک مأمور کفن و دفن چیست؟")

مدلی که در شکل ۲-۴۲(الف) نشان داده شده تا حدود زیادی ساده شده است، زیرا در واقع بخش‌هایی از مسیر فیزیکی مابین دو تلفن، ممکن است از نوع مایکروویو یا فیبر باشند که هزاران تماس روی آن تسهیم می‌شوند. معه‌ذا ایده‌ی اصلی معتبر است: وقتی تماسی برپا می‌شود، یک مسیر اختصاصی مابین دو طرف به وجود می‌آید و تا وقتی که تماس پایان یابد، این مسیر، باقی می‌ماند.

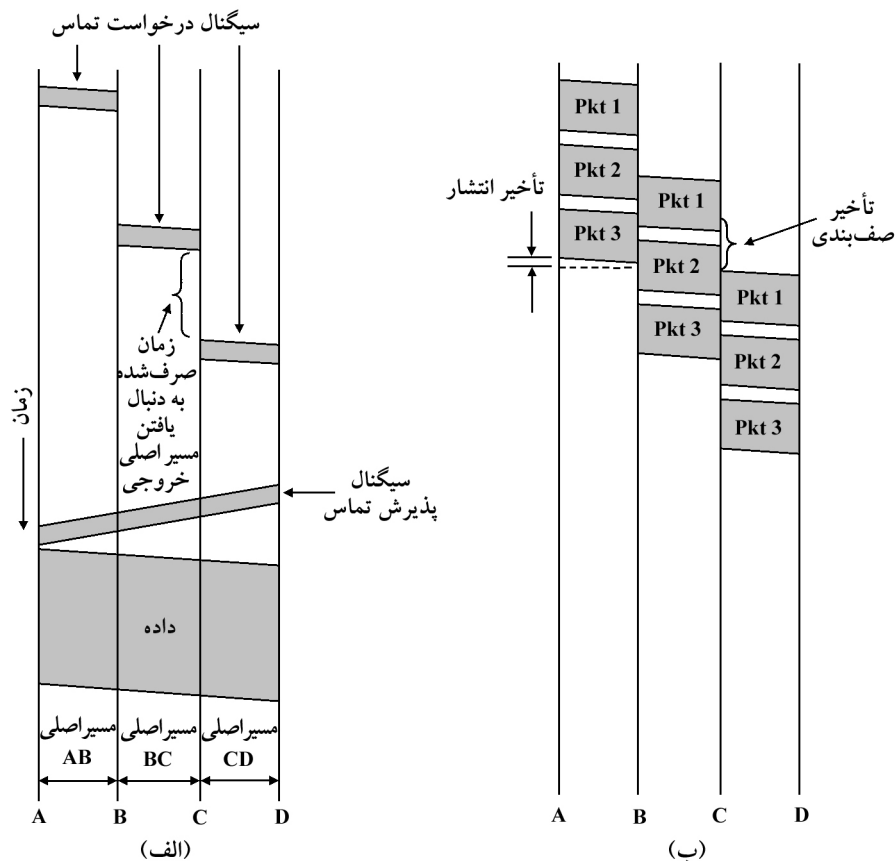
ویژگی مهم سوئیچینگ مداری عبارت‌است از نیاز به برپاسازی یک مسیر انتها - به - انتها، قبل از آن‌که داده بتواند ارسال گردد. زمانی که مابین انتهای شماره گرفتن و ابتدای زنگ خوردن سپری می‌شود، می‌تواند در حدود ۱۰ ثانیه باشد. این زمان، در مسافت‌های دور و تماس‌های بین‌الملل، بیشتر از این مقدار است. همان‌طور که در شکل ۲-۴۳(الف) نشان داده شده، در طی این فاصله‌ی زمانی، سیستم تلفن به دنبال یافتن یک مسیر است. توجه داشته باشید، قبل از آن‌که انتقال داده حتی بتواند آغاز شود، سیگنال مربوط به درخواست برقراری تماس بایستی تمام راه را به طرف مقصد، انتشار یافته و رسید دریافت (ack) بگیرد. در بسیاری از کاربردهای کامپیوتری (مثلاً راستی‌آزمایی کارت‌های اعتباری)، زمان‌های برپاسازی طولانی، غیرقابل قبول است.

چون مسیر مابین دو طرف تماس، رزرو می‌شود لذا هنگامی که برپاسازی کامل گردد، تنها تأخیری که متوجه داده می‌شود، مربوط به زمان انتشار سیگنال الکترومغناطیس است، یعنی چیزی در حدود ۵ میلی‌ثانیه به ازای هر ۱۰۰۰ کیلومتر. همچنین یکی از نتایج ناشی از ایجاد مسیر آن است که خطر ازدحام وجود ندارد - به این ترتیب که وقتی مسیری برقرار می‌شود، دیگر سیگنال اشغال دریافت نخواهید کرد. البته، قبل از آن‌که اتصال برقرار گردد، ممکن است به واسطه‌ی فقدان ظرفیت سوئیچینگ یا فقدان ظرفیت در مسیر اصلی، سیگنال اشغال دریافت کنید.

سوئیچینگ بسته

گزینه‌ی دیگر در برابر سوئیچینگ مداری، سوئیچینگ بسته است که در شکل ۲-۴۲(ب) نشان داده شده و در فصل ۱ شرح داده شد. در این فناوری، بسته‌ها به محض آن‌که آماده شوند، ارسال می‌گردند. بر خلاف سوئیچینگ مداری، هیچ نیازی به برپایی یک مسیر اختصاصی از قبل، وجود ندارد. بلکه بر

1. Strowger gear



شکل ۲-۴۳ زمان‌بندی رویدادها در (الف) سوئیچینگ مداری، (ب) سوئیچینگ بسته.

عده‌ی مسیر یاب‌هاست که با استفاده از روش انتقال ذخیره کن - و - پیش بران، هر بسته را در مسیرش به سمت مقصد مربوط به خود، ارسال کنند. این رویه بر خلاف سوئیچینگ مداری است. در آنجا حاصل برپاسازی اتصال، عبارت‌است از رزرو کردن پهنای باند در تمام مسیر از ارسال کننده به سمت دریافت کننده. کل داده‌ی این مدار، این مسیر را می‌پیمایند. از میان تمام ویژگی‌هایی که این روش دارد، اجبار کردن کل داده در پیمودن یک مسیر یکسان، به این معناست که امکان ندارد داده خارج از ترتیب برسد. ولی در روش سوئیچینگ بسته که مسیر ثابتی وجود ندارد، بسته‌های مختلف می‌توانند مسیرهای مختلفی را طی کنند. انتخاب مسیر، به شرایط شبکه در زمان ارسال داده بستگی دارد، و این امکان وجود دارد که بسته‌ها خارج از ترتیب برسند.

شبکه‌های سوئیچینگ بسته، یک حد بالای سخت‌گیرانه بر روی اندازه‌ی بسته‌ها اعمال می‌کنند. این کار ضمانت می‌کند که هیچ کاربری نتواند هیچ خط انتقالی را برای مدتی خیلی طولانی قبضه

نماید (مثلاً برای چندین میلی‌ثانیه)، به همین دلیل است که شبکه‌های سوئیچ - بسته^۱ قادر به اداره‌ی ترافیک تعاملی می‌باشند. این امر تأخیر را نیز کاهش می‌دهد زیرا اولین بسته از یک پیغام طولانی، می‌تواند قبل از آن‌که دومین بسته کاملاً برسد، پیش رانده شود. با این وجود، تأخیر ذخیره کن - و - پیش بران که ناشی از انباشته‌سازی یک بسته در حافظه‌ی مسیریاب، قبل از ارسال آن به مسیریاب بعدی است، بیشتر از روش سوئیچینگ مداری می‌باشد. در روش سوئیچینگ مداری، بیت‌ها به صورت پی‌درپی از طریق سیم، جریان می‌یابند.

سوئیچینگ مداری و سوئیچینگ بسته، تفاوت‌های دیگری نیز با هم دارند. به این دلیل که در سوئیچینگ بسته هیچ پهنای باندی رزرو نمی‌شود، ممکن است بسته‌ها برای پیش رانده شدن، مجبور به انتظار شوند. این امر منجر به تأخیر صف‌بندی^۲ می‌شود و اگر بسته‌های متعددی به طور همزمان ارسال شوند، ازدحام به وجود می‌آید. از سوی دیگر، به هیچ وجه خطر مواجهه با سیگنال اشغال و عدم توانایی در استفاده از شبکه وجود ندارد. بنابراین، ازدحام در زمان‌های متفاوتی روی می‌دهد: در سوئیچینگ مداری، در زمان برپاسازی و در سوئیچینگ بسته، هنگام ارسال بسته‌ها.

در صورتی که مدار برای یک کاربر به‌خصوص، رزرو شده باشد و هیچ ترافیکی نباشد، پهنای باند به هدر می‌رود چون از پهنای باند نمی‌توان برای ترافیک دیگری استفاده نمود. سوئیچینگ بسته سبب اتلاف پهنای باند نمی‌شود و لذا از دیدگاه سیستمی، راندمان بیشتری دارد. درک این مصالحه در فهمیدن تفاوت میان سوئیچینگ مداری و سوئیچینگ بسته بسیار مهم است. در این‌جا، مصالحه میان سرویس ضمانت شده و اتلاف منابع است، در برابر سرویس فاقد ضمانت و عدم اتلاف منابع. سوئیچینگ بسته نسبت به سوئیچینگ مداری، تحمل‌پذیری بیشتری نسبت به خرابی^۳ دارد. در حقیقت، دلیل پیدایش آن نیز همین بوده است. اگر یک سوئیچ از کار بیفتد، تمام مدارهایی که از آن استفاده می‌کنند، قطع می‌شوند و هیچ ترافیکی از هیچ کدام از آن‌ها نمی‌تواند ارسال گردد. در سوئیچینگ بسته، بسته‌ها می‌توانند از کنار سوئیچ‌هایی که از کار افتاده‌اند، مسیریابی شوند.

آخرین تفاوت میان سوئیچینگ مداری و سوئیچینگ بسته، نحوه‌ی محاسبه‌ی هزینه است. در سوئیچینگ مداری، از قدیم، محاسبه‌ی هزینه بر مبنای فاصله و زمان بوده است. در مورد تلفن‌های موبایل، معمولاً مسافت نقشی ندارد مگر در تماس‌های بین‌الملل، و زمان هم تنها یک نقش عمده دارد (به‌عنوان مثال، هزینه‌ی مکالمه‌ای با ۲۰۰۰ دقیقه‌ی رایگان، بیشتر از ۱۰۰۰ دقیقه‌ی رایگان است، و نیز برخی اوقات، شب‌ها و ایام تعطیل، هزینه‌ها ارزان‌تر هستند). در سوئیچینگ بسته، زمان اتصال مد نظر نمی‌باشد بلکه حجم ترافیک مطرح است. برای کاربران خانگی، معمولاً ISP ها یک نرخ ماهانه‌ی ثابت و یکنواخت را مطالبه می‌کنند، زیرا این شیوه زحمت کمتری برایشان دارد و مشتریان‌شان هم بهتر می‌توانند این مدل را متوجه شوند. اما فراهم‌کنندگان بدنه‌ی اصلی، هزینه‌ی مربوط به شبکه‌های منطقه‌ای را بر اساس حجم ترافیک‌شان محاسبه می‌کنند.

موضوع	سوئیچ مداری	سوئیچ بسته
برپایی تماس	ضروری	غیرضروری
مسیر فیزیکی اختصاصی	بله	خیر
بسته‌ها مسیر واحدی را دنبال می‌کنند	بله	خیر
بسته‌ها به ترتیب می‌رسند	بله	خیر
از کار افتادن سوئیچ، مخرب است؟	بله	خیر
پهنای باند قابل دسترسی	ثابت	پویا
زمان ازدحام احتمالی	در زمان برپایی	به ازای هر بسته
اتلاف بالقوه در پهنای باند	بله	خیر
انتقال ذخیره کن - و - پیش بران	خیر	بله
محاسبه‌ی هزینه	به ازای هر دقیقه	به ازای هر بسته

شکل ۲-۴ مقایسه میان شبکه‌های سوئیچی مداری و سوئیچی بسته.

این تفاوت‌ها در شکل ۲-۴ خلاصه شده‌اند. شبکه‌های تلفن به لحاظ سنتی از سوئیچینگ مداری استفاده می‌کنند تا تماس‌های تلفنی با کیفیتی را فراهم کنند، و شبکه‌های کامپیوتری نیز به دلیل سادگی و راندمان، از سوئیچینگ بسته استفاده کرده‌اند. با این وجود، استثناهای قابل توجهی هم وجود دارند. بعضی شبکه‌های کامپیوتری قدیمی‌تر، در زیر لایه‌هایشان، به صورت مدارهای سوئیچی بوده‌اند (مانند X.25) و بعضی از شبکه‌های تلفن جدید از سوئیچینگ بسته همراه با فناوری صوت - روی - IP استفاده می‌کنند. این فناوری از دید کاربران درست به مثابه‌ی یک تماس تلفنی استاندارد به نظر می‌رسد، اما داخل شبکه، بسته‌هایی از داده‌ی صوتی در حال سوئیچ شدن هستند. این رویکرد، امکان ایجاد بازار جدیدی برای تماس‌های بین‌المللی ارزان با استفاده از کارت‌های تلفن را فراهم آورده است، هرچند احتمالاً نسبت به شیوه‌ی استاندارد، کیفیت پایین‌تری دارد.

۷-۲ سیستم تلفن موبایل

سیستم تلفن قراردادی، حتی اگر یک زمانی در کل مسیر انتها - به - انتها، از فیبر چند گیگابیتی تشکیل شده باشد، هنوز هم قادر به پاسخگویی به گروهی از کاربران در حال رشد، نمی‌باشد: مردمی که در حال حرکت هستند. اکنون مردم انتظار دارند که از داخل هواپیماها، اتومبیل‌ها، استخرهای شنا، و حین گردش در پارک، تماس‌های تلفنی‌شان را انجام دهند و از تلفن‌هایشان برای کنترل نامه‌های الکترونیکی و گردش در وب، استفاده کنند. در نتیجه تمایل شدیدی به تلفن بی‌سیم وجود دارد. در بخش‌های بعدی این عنوان را مطالعه خواهیم نمود.

از سیستم تلفن موبایل به منظور ارتباطات صوت و داده در یک منطقه‌ی پهناور، استفاده می‌شود. تلفن‌های موبایل (که تلفن‌های سلولی^۱ هم نامیده می‌شوند) سه نسل متمایز را پشت سر گذاشته‌اند که عموماً 1G، 2G، و 3G نامیده می‌شوند. این نسل‌ها عبارتند از:

1. Cell phone

۱. صوتِ آنالوگ.

۲. صوتِ دیجیتال.

۳. صوت و دادهٔ دیجیتال (اینترنت، پُست الکترونیک، و امثالهم).

(نباید تلفن‌های موبایل را با تلفن‌های بی‌سیم^۱ اشتباه کرد. تلفن‌های بی‌سیم از یک ایستگاه پایه و یک تلفن دستی که در قالب یک مجموعه و برای استفاده‌ی داخلِ منزل فروخته می‌شوند، تشکیل می‌شوند. از این تلفن‌ها هرگز در شبکه‌بندی استفاده نمی‌شود، لذا بیش از این به آن‌ها نمی‌پردازیم.)

هر چند بیشتر بحث ما درباره‌ی فناوریِ این سیستم‌ها خواهد بود، توجه به این نکته هم جالب است که تصمیماتِ کوچک و مدبرانه، چگونه می‌توانند تأثیراتِ عظیمی داشته باشند. اولین سیستم موبایل، توسط AT&T در ایالات متحده تعبیه گردید و امتیاز آن برای کل کشور توسط FCC صادر شد. در نتیجه سراسر ایالات متحده یک سیستم (آنالوگ) واحد داشت و تلفن موبایلی که در کالیفرنیا^۲ خریداری می‌شد، در نیویورک^۳ هم کار می‌کرد. برعکس، وقتی تلفن‌های موبایل به اروپا رسیدند، هر کشور سیستم مربوط به خود را تعبیه نمود که حاصلش ناکامی بود.

اروپا از این اشتباه، درس آموخت و هنگامی که تغییر به حالتِ دیجیتال پیش آمد، PTT های تحتِ دولت به هم آمیختند و در یک سیستم واحد (GSM) استانداردسازی شدند. به این ترتیب، هر یک از تلفن‌های موبایلِ اروپایی در هر کجای اروپا کار خواهند کرد. تا آن زمان ایالات متحده به این تصمیم رسیده بود که دولتِ نَبایستی مشغول استانداردسازی شود، لذا بحثِ دیجیتال را به بازار و تجارت سپرد. نتیجه‌ی این تصمیم آن بود که سازندگانِ مختلف، انواع تلفن‌های موبایل را تولید کردند. به این ترتیب در ایالات متحده، دو سیستم تلفن موبایلِ دیجیتالیِ اصلی — و کاملاً ناسازگار با هم — به وجود آمدند، در موردِ سیستم‌های کوچک‌تر دیگر هم وضع به همین صورت بود.

برخلافِ آن‌که هدایت اولیه توسط ایالات متحده راه‌اندازی گردید، در حال حاضر، مالکیت و کاربردِ تلفن موبایل در اروپا بسیار بیشتر از ایالات متحده است. یکی از دلایلِ آن، داشتنِ سیستمی واحد است که در هر کجای اروپا و با هر فراهم کننده‌ای کار می‌کند، اما دلایلِ بیشتری هم وجود دارند. دومین موردِ تفاوت میان ایالات متحده و اروپا، در سادگیِ شماره‌های موبایل است. در ایالات متحده، تلفن‌های موبایل با تلفن‌های (ثابت) قاعده‌مند، مخلوط می‌شوند. بنابراین هیچ راهی وجود ندارد تا یک تماس گیرنده بداند شماره‌ی 234-5678 (212)، متعلق به یک تلفن ثابت است (که تماس با آن هزینه‌ی کمی دارد یا رایگان است) یا متعلق به یک تلفن موبایل است (یعنی یک تماس گران‌قیمت). شرکت‌های تلفن برای آن‌که مردم را در برابرِ دلوپسیِ ناشی از برقراریِ تماس‌ها محافظت کنند، صاحبِ تلفن موبایل را وادار می‌کنند که بابتِ تماس‌های رسیده، هزینه پرداخت کند. در نتیجه بسیاری از مردم از ترسِ آن‌که به خاطر تماس‌های دریافتی‌شان، قبضی با مبلغِ درشت دریافت کنند، در

1. Cordless phone

2. California

3. New York

مورد خرید موبایل دچار تردید می‌شوند. در اروپا شماره تلفن‌های موبایل دارای یک کد منطقه‌ای مخصوص هستند (که متناظر با شماره‌های ۸۰۰ یا ۹۰۰ است)، به همین دلیل فوراً قابل شناسایی می‌باشند. بنابراین در اروپا قانون معمول "پرداخت توسط تماس گیرنده"، در مورد تلفن‌های موبایل نیز اعمال می‌گردد (به جز در مورد تماس‌های بین‌الملل که هزینه‌ها بین دو طرف تقسیم می‌شوند).

سومین موردی که تأثیر زیادی در استقبال از موبایل داشته است، عبارت‌است از کاربرد گسترده‌ی تلفن‌های موبایل اعتباری در اروپا (که در برخی مناطق تا ۷۵٪ می‌رسد). این تلفن‌ها می‌توانند در خیلی از فروشگاه‌ها خریداری شوند، و نیازی به آشنایی زیادی، بیش از آنچه برای خرید دوربین‌های دیجیتالی لازم است، ندارند. پولش را می‌پردازید و می‌روید. این تلفن‌ها یک مقدار موجودی اولیه، مثلاً ۲۰ یا ۵۰ یورو دارند و وقتی موجودی به صفر رسید، می‌توانند مجدداً شارژ شوند (با استفاده از یک کد PIN رمزی). بنابراین عملاً هر نوجوان و بسیاری از کودکان در اروپا دارای تلفن‌های موبایل (معمولاً از نوع اعتباری) هستند تا والدین آن‌ها بتوانند آن‌ها را مکان‌یابی کنند، بدون آن‌که خطر تولید یک قبض با مبلغ درشت توسط کودک وجود داشته باشد. اگر تلفن موبایل تنها گاهی اوقات استفاده شود، در اصل استفاده از آن رایگان خواهد بود زیرا هیچ شارژ ماهانه و یا شارژی به ازای تماس‌های رسیده، نخواهد داشت.

۲-۷-۱ نسل اول (1G) تلفن‌های موبایل: صوت آنالوگ

بحث در مورد جنبه‌های سیاسی و بازاریابی تلفن‌های موبایل کافی است. اینک بیایید با شروع از اولین سیستم، نگاهی به فناوری داشته باشیم. در دهه‌های اول از قرن بیستم، از رادیو-تلفن‌های موبایل به صورت پراکنده در ارتباطات دریانوردی و نظامی استفاده می‌شد. در سال ۱۹۴۶، اولین سیستم برای تلفن‌های مبتنی بر اتومبیل، در سنت لوئیس^۱ برپا گردید. این سیستم از یک فرستنده‌ی بزرگ واقع بر فراز یک ساختمان مرتفع، استفاده کرده و یک کانال واحد داشت که از آن هم برای ارسال و هم برای دریافت استفاده می‌شد. کاربر برای صحبت کردن، بایستی دکمه‌ای را فشار می‌داد تا فرستنده را فعال و دریافت کننده را غیرفعال سازد. نصب این گونه سیستم‌ها که با عنوان سیستم‌های دکمه را فشار بده - تا - صحبت کنی^۲ شناخته می‌شدند، در اواخر دهه‌ی ۱۹۵۰، در چندین شهر آغاز شد. رادیو CB^۳، تاکسی‌ها، و اتومبیل‌های پلیس غالباً از این فناوری استفاده می‌کنند.

در دهه‌ی ۱۹۶۰، IMTS (سیستم تلفن موبایل بهبود یافته)^۴ نصب گردید. این سیستم از یک فرستنده‌ی پرقدرت (۲۰۰ وات) بر فراز یک تپه استفاده می‌کرد، اما دارای دو فرکانس بود: یکی برای ارسال و یکی برای دریافت و به این ترتیب دیگر نیازی به سیستم دکمه را فشار بده - تا - صحبت کنی، وجود نداشت. از آن‌جا که در تمام ارتباطات مربوط به تلفن‌های موبایل، کانال سیگنال‌های رو به

1. St. Louis 2. Push-to-talk system 3. Citizen Band radio 4. Improved Mobile Telephone System

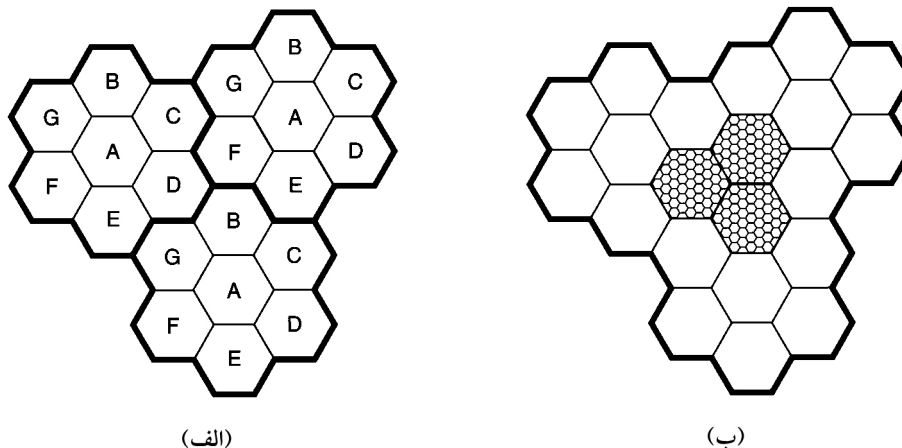
داخل با کانال سیگنال‌های رو به خارج، متفاوت هستند لذا کاربران موبایل نمی‌توانند به یکدیگر گوش دهند (برخلاف سیستم دکمه را فشار بده - تا - صحبت کنی که در تاکسی‌ها استفاده می‌شود). سیستم IMTS از ۲۳ کانال که از 159 MHz تا 450 MHz گسترده شده‌اند، حمایت می‌کرد. به دلیل کم بودن تعداد کانال‌ها، کاربران غالباً قبل از دستیابی به بوق آزاد، مجبور بودند مدت زیادی در انتظار باشند. همچنین به دلیل آن‌که فرستنده‌های بالای تپه‌ها قدرت زیادی داشتند، سیستم‌های مجاور بایستی صدها کیلومتر از هم فاصله داشته باشند تا تداخل ایجاد نشود. از همه‌ی این‌ها گذشته، محدود بودن ظرفیت، این سیستم را غیرعملی ساخت.

سیستم تلفن موبایل پیشرفته

تمام تغییراتی که منتهی به AMPS (سیستم تلفن موبایل پیشرفته^۱) گردید در آزمایشگاه‌های بل ابداع شد، و اولین بار در ۱۹۸۲ در ایالات متحده نصب گردید. این سیستم در انگلستان هم با نام TACS، و در ژاپن نیز با نام MCS-L1 نصب گردید. سیستم AMPS رسماً در سال ۲۰۰۸ مورد تجدید نظر قرار گرفت، ولی ما به این دلیل این نگارش را مورد ملاحظه قرار خواهیم داد تا با بستر توسعه‌ی سیستم‌های نسل دوم و سوم آشنا شویم.

در تمام سیستم‌های تلفن موبایل، یک منطقه‌ی جغرافیایی به تعدادی سلول تقسیم می‌شود و به همین دلیل است که بعضی اوقات، این تلفن‌ها را تلفن‌های سلولی می‌نامیم. در AMPS معمولاً پهنای سلول‌ها ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر است؛ در سیستم‌های دیجیتال، سلول‌ها کوچکترند. هر سلول از مجموعه‌ی فرکانسی استفاده می‌کند که سلول‌های مجاورش از آن فرکانس‌ها استفاده نکرده باشند. ایده‌ی کلیدی که سبب شده سیستم‌های سلولی نسبت به سیستم‌های قبلی، ظرفیت خیلی بیشتری داشته باشند، استفاده از سلول‌های نسبتاً کوچک است و این‌که از فرکانس‌های انتقال، در سلول‌هایی که در همان نزدیکی هستند (و نه سلول‌های مجاور) استفاده می‌شود. در حالی که یک سیستم IMTS با پهنای ۱۰۰ کیلومتر، می‌تواند فقط یک تماس به ازای هر فرکانس داشته باشد، یک سیستم AMPS امکان داشتن ۱۰۰ سلول ۱۰ کیلومتری را در یک منطقه خواهد داشت، و می‌تواند ۱۰ تا ۱۵ تماس به ازای هر فرکانس، در سلول‌هایی که تا حد زیادی متمایزند، داشته باشد. بنابراین طراحی سلولی، با کوچک‌تر کردن سلول‌ها، ظرفیت سیستم را حداقل به اندازه‌ی ۱۰ برابر افزایش می‌دهد. به‌علاوه، سلول‌های کوچک‌تر به معنای نیاز به توان کمتر می‌باشد، که آن هم به نوبه‌ی خود منجر به فرستنده‌ها و تلفن‌های دستی کوچک‌تر و ارزان‌تر خواهد شد.

ایده‌ی استفاده‌ی مجدد از فرکانس در شکل ۲-۴۵(الف) به تصویر درآمده است. سلول‌ها در حالت عادی تقریباً دایره‌ای شکل هستند، اما مدل کردن آن‌ها به صورت شش‌ضلعی راحت‌تر است. در شکل ۲-۴۵(الف) همه‌ی سلول‌ها هم‌اندازه هستند، و در واحدهای هفت‌تایی گروه‌بندی شده‌اند. هر



شکل ۲-۴۵ (الف) فرکانس‌ها در سلول‌های مجاور، مورد استفاده‌ی مجدد قرار نگرفته‌اند. (ب) برای افزودن کاربرانِ بیشتر، می‌توان از سلول‌های کوچک‌تر استفاده نمود.

یک از حروف الفبا نشان دهنده‌ی یک گروه از فرکانس‌هاست. توجه کنید که برای هر مجموعه‌ی فرکانس، یک بافرِ تقریباً دو سلولی وجود دارد که فرکانسِ آن استفاده‌ی مجدد نمی‌شود، این کار برای آن است که جداسازی به خوبی تأمین شده و تداخل کم باشد.

پیدا کردن محل‌هایی که در ارتفاع باشند، به منظور استقرارِ آنتن‌های ایستگاه پایه، موضوع مهمی است. این مسئله، بعضی فراهم‌کنندگانِ حاملِ مخابراتی را به این نتیجه رسانده که با کلیسای کاتولیک در این مورد به توافق برسند زیرا کلیسا به صورت بالقوه دارای تعداد قابل توجهی سایت‌های آنتنِ مرتفع در اطراف جهان است که همگی تحتِ مدیریتِ واحدی قرار دارند.

در منطقه‌ای که تعداد کاربرانِ آن قدر رشد کرده که سیستم به نقطه‌ی سرریزِ خود رسیده باشد، همان‌طور که در شکل ۲-۴۵ (ب) نشان داده شده، می‌شود توان را کاهش داده و سلول‌های سرریز شده را به میکروسلول‌های کوچک‌تر تقسیم نمود تا امکانِ بیشتری برای استفاده‌ی مجدد از فرکانس فراهم گردد. بعضی اوقات شرکت‌های تلفن، با استفاده از برج‌های قابل حمل که با ماهواره‌ها در ارتباط هستند، میکروسلول‌های موقتی ایجاد می‌کنند. این مورد، هنگام رویدادهای ورزشی، کنسرت‌ها، و هر جای دیگری که تعداد زیادی از کاربرانِ موبایل برای چند ساعتی گرد هم آمده‌اند، کاربرد دارد.

در مرکزِ هر سلول، یک ایستگاه پایه قرار دارد که تمام تلفن‌ها به مقصدِ آن سلول، به آن مرکز انتقال می‌یابند. ایستگاه پایه از یک کامپیوتر و یک فرستنده/گیرنده‌ی متصل به یک آنتن تشکیل می‌شود. در یک سیستم کوچک، همه‌ی ایستگاه‌های پایه به دستگاهِ واحدی به نام MSC (مرکز سوئیچینگ موبایل)^۱ یا MTSO (دفتر سوئیچینگ تلفن موبایل)^۲ متصل می‌شوند. در یک سیستم

1. Mobile Switching Center

2. Mobile Telephone Switching Office

بزرگ، امکان دارد به چندین MSC نیاز باشد که همگی به یک MSC سطحی دوم متصل هستند، و همین طور تا آخر. مراکز MSC اساساً دفاتر پایانی هستند، همانند آنچه در سیستم تلفن داشتیم، و در واقع حداقل به یک دفتر پایانی سیستم تلفن متصل می‌باشند. مراکز MSC با ایستگاه‌های پایه، با یکدیگر، و با PSTN، با استفاده از شبکه‌ی سوئیچینگ بسته در ارتباط هستند.

هر تلفن موبایل در هر لحظه منوطاً در یک سلول مشخص و تحت کنترل ایستگاه پایه‌ی آن سلول قرار دارد. هنگامی که یک تلفن موبایل به لحاظ فیزیکی یک سلول را ترک می‌کند، ایستگاه پایه‌ی آن سلول متوجه می‌شود که سیگنال تلفن در حال محو شدن است و از ایستگاه‌های پایه‌ی پیرامونش، میزان توانی که از آن تلفن دریافت می‌کنند را می‌پرسد. وقتی پاسخ‌ها برگشتند، ایستگاه پایه، مالکیتش را به سلولی می‌دهد که قوی‌ترین سیگنال را داشته است. در اغلب مواقع، این همان سلولی است که اینک تلفن در آن‌جا قرار دارد. در این مرحله، تلفن از مالک جدیدش مطلع می‌شود، و در صورتی که یک تماس جاری داشته باشد، از آن درخواست می‌شود تا به یک کانال جدید سوئیچ کند (زیرا کانال قبلی در هیچ کدام از سلول‌های مجاور، استفاده‌ی مجدد نمی‌شود). این فرآیند که دست - به دست کردن^۱ نام دارد، در حدود ۳۰۰ میلی‌ثانیه طول می‌کشد. انتساب کانال توسط MSC انجام می‌شود، یعنی مرکز عصبی سیستم. ایستگاه‌های پایه در واقع فقط تعدادی بازپخش‌ی رادیویی ساده هستند.

کانال‌ها

سیستم AMPS برای ایجاد تمایز میان کانال‌ها از FDM استفاده می‌کند. سیستم از ۸۳۲ کانال کاملاً - دوسویه استفاده می‌کند که هر کدام از یک جفت کانال یک‌سویه تشکیل شده‌اند. این آرایش با عنوان **FDD (تقسیم فرکانس دوسویه)**^۲ شناخته می‌شود. تعداد ۸۳۲ کانال یک‌سویه، از ۸۲۴ تا ۸۴۹ مگاهرتز، برای انتقال موبایل به ایستگاه پایه، و ۸۳۲ کانال یک‌سویه، از ۸۶۹ تا ۸۹۴ مگاهرتز، برای انتقال از ایستگاه پایه به موبایل استفاده می‌شوند. پهنای هر کدام از این کانال‌های یک‌سویه، ۳۰ کیلوهرتز است. این ۸۳۲ کانال، به چهار رده تقسیم می‌شوند. کانال‌های کترلی (پایه به موبایل) برای مدیریت سیستم به کار می‌روند. کانال‌های صفحه‌بندی (پایه به موبایل)، تماس‌های مربوط به کاربران موبایل را به ایشان اعلام می‌کند. کانال‌های دسترسی (دو طرفه) برای برپاسازی تماس و انتساب کانال، به کار می‌روند. و سرانجام، کانال‌های داده (دو طرفه) صوت، نمابر، یا داده را حمل می‌کنند. از آن‌جا که فرکانس‌های یکسان نمی‌توانند در سلول‌های مجاور مجدداً استفاده شوند، و ۲۱ کانال در هر سلول برای کنترل رزرو می‌شوند، لذا تعداد واقعی کانال‌های صوتی که در هر سلول قابل دسترسی هستند بسیار کمتر از ۸۳۲ و معمولاً در حدود ۴۵ کانال است.

مدیریت تماس

هر تلفن موبایل در AMPS دارای یک شماره سریال ۳۲ بیتی و یک شماره تلفن ۱۰ رقمی، داخل حافظه‌ی فقط - خواندنی قابل برنامه‌ریزی‌اش می‌باشد. شماره‌ی تلفن به شکل یک کد منطقه‌ی ۳ رقمی (در ۱۰ بیت) و یک شماره‌ی اشتراک ۷ رقمی (در ۲۴ بیت) نمایش داده می‌شود. وقتی یک تلفن روشن می‌شود، یک فهرست ۲۱ کانالی که قبلاً برنامه‌ریزی شده است را پویش می‌کند تا قوی‌ترین سیگنال را پیدا کند. سپس تلفن، شماره‌ی سریال ۳۲ بیتی و شماره‌ی تلفن ۳۴ بیتی‌اش را همه‌پخشی می‌کند. مثل تمام اطلاعات کنترلی در AMPS، این بسته نیز به شکل دیجیتالی، چندین بار و همراه با یک کد تصحیح خطا، ارسال می‌شود، حتی اگر کانال‌های صوتی، آنالوگ باشند.

هنگامی که ایستگاه پایه این اعلام را می‌شنود، به MSC می‌گوید که رکوردهای مربوط به مصرف‌کننده‌ی جدیدش کدام‌ها هستند، همچنین MSC خانگی مصرف‌کننده را هم از محلی فعلی‌اش آگاه می‌سازد. در حین عملیات عادی، تلفن موبایل هر ۱۵ دقیقه یک بار، مجدداً ثبت (رجیستر) می‌شود. برای برقراری یک تماس، کاربر موبایل، تلفن را روشن می‌کند، شماره‌ی مورد تماس را بر روی صفحه‌ی کلید، وارد می‌کند و دکمه‌ی SEND را فشار می‌دهد. تلفن، شماره‌ی مورد تماس و شناسه‌ی خودش را بر روی کانال دسترسی، انتقال می‌دهد. در صورت وقوع تصادم، بعداً دوباره تلاش می‌کند. هنگامی که ایستگاه پایه، درخواست را می‌گیرد، MSC را مطلع می‌سازد. اگر تماس‌گیرنده یکی از مشتریان شرکت MSC (یا مشتری یکی از شرکای آن) باشد، MSC به دنبال یک کانال بی‌کار برای تماس می‌گردد. اگر یک کانال یافت شود، شماره‌ی کانال بر روی کانال کنترلی برگردانده می‌شود. سپس تلفن موبایل به طور خودکار به کانال صوتی انتخاب شده سوئیچ می‌کند و منتظر می‌ماند تا طرف مورد تماس، گوشی را بردارد.

تماس‌های رسیده، عملکرد متفاوتی دارند. در شروع کار، همه‌ی تلفن‌های بی‌کار، به صورت پیوسته به کانال صفحه‌بندی گوش می‌کنند تا پیغام‌هایی که به سمت آن‌ها هدایت شده را تشخیص دهند. هنگامی که تماسی با یک تلفن موبایل برقرار می‌شود (از یک تلفن ثابت یا از یک تلفن موبایل دیگر)، یک بسته به MSC خانگی پذیرنده‌ی تماس ارسال می‌شود تا محلش را پیدا کنند. پس از آن، این بسته به ایستگاه پایه در سلول جاری‌اش ارسال می‌گردد. ایستگاه پایه هم یک همه‌پخشی بر روی کانال صفحه‌بندی ارسال می‌کند به این صورت که "واحد ۱۴، آیا حاضر هستی؟" تلفن مورد تماس با یک "بله" بر روی کانال دسترسی، پاسخ می‌دهد. سپس ایستگاه پایه مثلاً می‌گوید: "واحد ۱۴، یک تماس برای تو در کانال ۳ وجود دارد." در این مرحله، تلفن مورد تماس به کانال ۳ سوئیچ کرده و شروع به زنگ زدن می‌کند (یا هر آهنگ دیگری که صاحب گوشی تنظیم کرده است).

۲-۷-۲ نسل دوم (2G) تلفن‌های موبایل: صوت دیجیتال

اولین نسل تلفن‌های موبایل، آنالوگ بودند؛ نسل دوم، دیجیتال هستند. تبدیل به دیجیتال، مزایای متعددی دارد. این کار با تبدیل سیگنال‌های صوتی به دیجیتال و فشرده‌سازی آن‌ها، بهره‌وری در

ظرفیت را فراهم می‌آورد. همچنین با فراهم کردن امکان رمزگذاری صوت و سیگنال‌های کنترل، امنیت را ارتقا می‌دهد. ارتقای امنیت نیز به نوبه‌ی خود مانع تقلب و استراق سمع می‌شود، اعم از پوشش کردن عمدی یا پژواک تماس‌های دیگر به واسطه‌ی انتشار RF. سرانجام آن‌که، دیجیتال کردن، سرویس‌های جدیدی از قبیل پیغام‌رسانی متنی را نیز امکان‌پذیر می‌سازد.

درست همان‌طور که هیچ استانداردسازی جهانی‌ای در زمان نسل اول وجود نداشت، در مورد نسل دوم نیز چنین استانداردسازی‌ای وجود نداشت. چندین سیستم مختلف به وجود آمدند که سه‌تای آن‌ها به طور گسترده‌ای مستقر شدند. سیستم D-AMPS (سیستم تلفن موبایل پیشرفته‌ی دیجیتالی^۱) نگارش دیجیتالی AMPS است که با AMPS همزیستی دارد و برای آن‌که چندین تماس را در یک کانال فرکانسی قرار دهد، از TDM استفاده می‌کند. این سیستم در استاندارد بین‌المللی IS-54 و نگارش بعدی آن، یعنی IS-136، توصیف شده است. سیستم GSM (سیستم جهانی برای ارتباطات موبایل^۲)، به عنوان یک سیستم برتر به وجود آمد و با آن‌که برای جلب توجه در ایالات متحده، کند بود ولی هم‌اکنون کم‌وبیش در همه‌ی دنیا استفاده می‌شود. سیستم GSM، همانند D-AMPS، مبتنی است بر مخلوطی از TDM و FDM. سیستم CDMA (تقسیم کد با دسترسی چندگانه) که در استاندارد بین‌المللی IS-95 توصیف شده، یک نوع سیستم کاملاً متفاوت است و نه بر مبنای FDM است و نه TDM. هر چند که CDMA سیستم غالب در نسل دوم نشده، ولی فناوری آن مبنایی برای سیستم‌های نسل سوم شده است. همچنین نام PCS (سرویس‌های ارتباطات شخصی^۳) نیز بعضی اوقات، جهت مشخص نمودن یک سیستم نسل دوم (یعنی دیجیتال) در محاورات بازاریابی استفاده می‌شود. در ابتدا PCS به معنای تلفن موبایلی بود که از باند ۱۹۰۰ مگاهرتز استفاده می‌کند، اما در حال حاضر کمتر چنین جداسازی‌ای انجام می‌گردد.

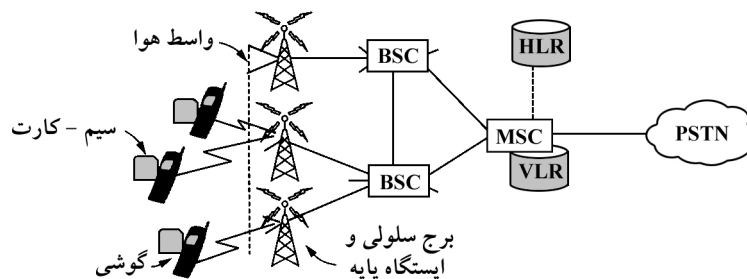
از آن‌جا که GSM، سیستم غالب در نسل دوم است، به توصیف آن خواهیم پرداخت. در بخش بعدی، هنگام توصیف سیستم‌های نسل سوم، در مورد CDMA بیشتر خواهیم گفت.

GSM — سیستم جهانی برای ارتباطات موبایل

سیستم GSM موجودیتش را در دهه‌ی ۱۹۸۰ و به عنوان تلاشی در جهت تولید یک استاندارد نسل دوم اروپایی واحد، آغاز کرد. این وظیفه به یک گروه مخابراتی که (به زبان فرانسه) "گروه ویژه‌ی موبایل" (Groupe Spécialé Mobile) نام داشت، داده شد. استقرار اولین سیستم‌های GSM از سال ۱۹۹۱ آغاز گردید و به سرعت با موفقیت روبرو شد. به زودی روشن شد که GSM در حال دستیابی به موفقیتی فراتر از منطقه‌ی اروپا است، به طوری که دامنه‌ی آن تا کشورهای به دوری استرالیا هم کشیده شد. بنابراین GSM به عنوان یک سیستم با جاذبه‌ی جهانی شناخته شد.

1. Digital Advanced Mobile Phone System
3. Personal Communications Services

2. Global System for Mobile communications



شکل ۲-۴۶ معماری شبکه‌ی موبایل GSM.

سیستم GSM و سایر سیستم‌های تلفن موبایل که مطالعه خواهیم نمود، مواردی را از سیستم‌های نسل اول، حفظ می‌کنند: طراحی مبتنی بر سلول‌ها، استفاده‌ی مجدد از فرکانس در میان سلول‌ها، و تحرک‌پذیری با استفاده از عمل دست - به - دست کردن در همان حینی که مشترکین در حال حرکت هستند. آنچه که سبب تفاوت می‌شود، جزئیات موضوع است. در این جا به اختصار، بعضی از ویژگی‌های اصلی GSM را بررسی خواهیم کرد. با این وصف، گفته می‌شود که استاندارد چاپ شده‌ی GSM بیش از ۵۰۰۰ صفحه است. بخش عمده‌ی این مطالب به جنبه‌های مهندسی سیستم مربوط می‌شود، مخصوصاً در طراحی گیرنده‌ها برای اداره کردن انتشار سیگنال چند - مسیره، و نیز برای همگام‌سازی فرستنده‌ها و گیرنده‌ها. در این جا به هیچ یک از این موارد اشاره نخواهد شد.

شکل ۲-۴۶ نشان می‌دهد که معماری GSM مشابه معماری AMPS است، هرچند که مؤلفه‌ها دارای نام‌های متفاوتی هستند. در این جا خود موبایل به دو بخش تقسیم می‌شود، یک گوشی دستی و یک تراشه‌ی قابل جابجایی به نام سیم - کارت^۱ که شامل اطلاعات مشترک مربوطه و وضعیت صورتحساب اوست. این سیم - کارت است که گوشی را فعال می‌کند، و اطلاعات محرمانه‌ای دارد که امکان می‌دهد موبایل و شبکه، همدیگر را شناسایی کرده و مکالمات را رمزگذاری کنند. یک سیم - کارت می‌تواند برداشته شده و در یک گوشی دیگر قرار داده شود. به این ترتیب تا جایی که به شبکه مربوط می‌شود، حالا آن گوشی دیگر، موبایل شما است.

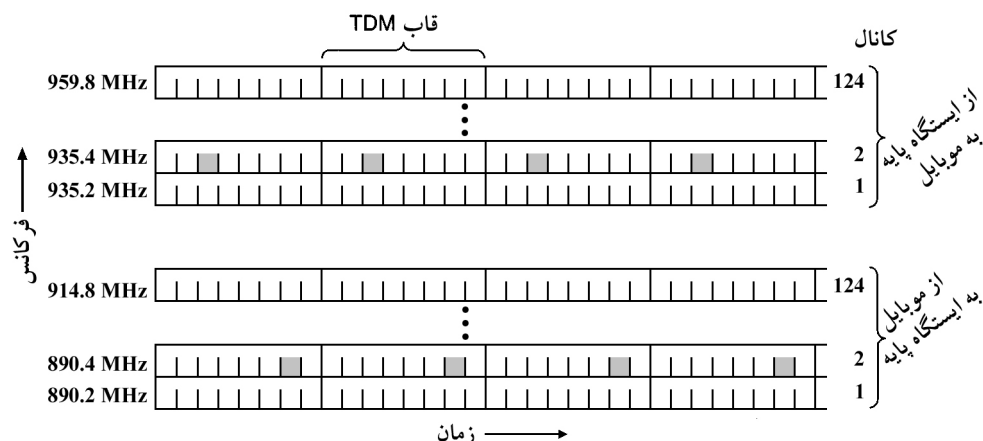
موبایل با ایستگاه‌های پایه‌ی سلولی، از طریق یک رابط هوا^۲ صحبت می‌کند که کمی بعد آن را توضیح خواهیم دارد. هر یک از ایستگاه‌های پایه‌ی سلولی به یک BSC متصلند (کنترل کننده‌ی ایستگاه پایه^۳)، که منابع رادیویی سلول‌ها را کنترل کرده و عملیات دست - به - دست کردن را اداره می‌نماید. هر BSC به نوبه‌ی خود به یک MSC متصل است (شبیه به AMPS) که تماس‌ها را مسیریابی کرده و به PSTN^۴ اتصال می‌دهد.

1. SIM card (SIM: Subscriber Identity Module مشترک شناسه یک مشترک) 2. Air interface
3. Base Station Controller 4. PSTN: Public Switched Telephone Network (شبکه‌ی تلفن سوئیچی عمومی)

برای آن که MSC بتواند سلول‌ها را مسیریابی کند، نیازمند آن است که بداند در حال حاضر کجا می‌تواند موبایل‌ها را پیدا کند. مرکز MSC یک پایگاه اطلاعاتی از موبایل‌های آن نزدیکی در خود دارد، موبایل‌هایی که با سلول‌های تحت مدیریت او در ارتباط هستند. نام این پایگاه اطلاعاتی VLR است (ثبات محل بازدید کننده^۱). همچنین یک پایگاه اطلاعاتی در شبکه‌ی موبایل وجود دارد که آخرین محل شناخته شده‌ی هر موبایل را می‌دهد. نام این پایگاه اطلاعاتی HLR است (ثبات محل منزل^۲). از این پایگاه اطلاعاتی برای مسیریابی تماس‌های رسیده، به محل‌های صحیح، استفاده می‌شود. هر دو پایگاه اطلاعاتی بایستی در حین حرکت موبایل‌ها از سلولی به سلول دیگر، به هنگام نگهداشته شوند.

اکنون بعضی جزئیات مربوط به رابط هوا را توضیح می‌دهیم. سیستم GSM در محدوده‌ای از فرکانس‌ها در اطراف جهان اجرا می‌شود، شامل ۹۰۰، ۱۸۰۰، و ۱۹۰۰ مگاهرتز. نسبت به AMPS، طیف بیشتری اختصاص داده شده تا از تعداد کاربر بیشتری حمایت گردد. سیستم GSM، همانند AMPS، یک سیستم سلولی دوسویه‌ی تقسیم فرکانس است. به این ترتیب که هر موبایلی عمل ارسال را بر روی یک فرکانسی انجام می‌دهد و عمل دریافت را بر روی فرکانس دیگری که بالاتر است، انجام می‌دهد (در GSM، ۵۵ مگاهرتز بالاتر است و در AMPS، ۸۰ مگاهرتز بالاتر است). اما بر خلاف AMPS، در GSM یک جفت فرکانس واحد، به طریق تسهیم به روش تقسیم زمان، به بازه‌های زمانی تقسیم می‌گردد. به این ترتیب چندین موبایل آن را به اشتراک می‌گذارند.

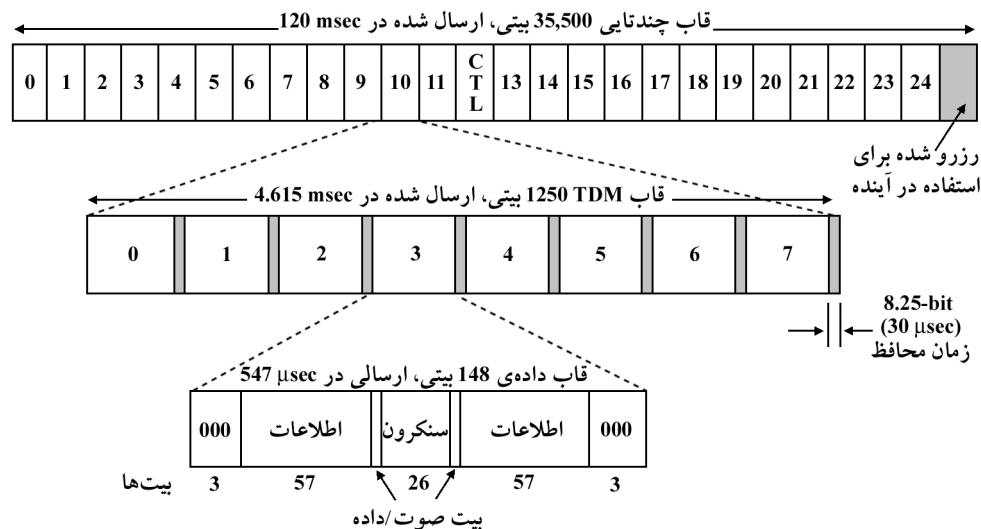
کانال‌های GSM به مراتب پهن‌تر از کانال‌های AMPS هستند (200-kHz در برابر 30-kHz) تا بتواند موبایل‌های متعدد را اداره نماید. در شکل ۲-۴۷ یک کانال 200-kHz ای نشان داده شده. یک سیستم GSM که در ناحیه‌ی 900-MHz عمل می‌کند، ۱۲۴ جفت کانال یک‌سویه دارد. پهنای هر کانال یک‌سویه، 200-kHz است و با استفاده از تسهیم به روش تقسیم زمان، هشت اتصال مجزا را حمایت می‌کند. به هر ایستگاه فعال، یک بازه‌ی زمانی بر روی یک جفت کانال، انتساب داده می‌شود. به لحاظ نظری، در هر سلول، ۹۹۲ کانال می‌تواند حمایت شوند اما برای آن‌که از تصادم مکرر با سلول‌های همسایه اجتناب گردد، بسیاری از آن‌ها قابل دسترسی نیستند. در شکل ۲-۴۷ هشت بازه‌ی زمانی که با رنگ تیره مشخص شده‌اند، همگی متعلق به یک اتصال هستند به این صورت که چهار بازه برای هر یک از جهت‌ها داریم. عمل‌های ارسال و دریافت، در یک بازه‌ی زمانی روی نمی‌دهند چون رادیوهای GSM توانایی ارسال و دریافت همزمان را ندارند و مدتی طول می‌کشد تا از یک عمل به عمل دیگر سوئیچ کنند. اگر دستگاه موبایلی که به 890.4/935.4 MHz و به بازه‌ی زمانی ۲ انتساب داده شده، بخواهد عمل ارسال به ایستگاه پایه را انجام دهد، از چهار بازه‌ی زمانی تیره - رنگ پایین‌تر استفاده می‌کند (و همین‌طور از بازه‌هایی که به دنبال آن‌ها می‌آیند)، به این ترتیب که مقداری داده در هر بازه قرار می‌دهد تا آن‌که همه‌ی داده ارسال شود.



شکل ۲-۴۷ GSM از کانال‌های ۱۲۴ فرکانسی استفاده می‌کند، هر یک از آن‌ها، یک سیستم TDM با هشت بازه‌ی زمانی را به کار می‌برند.

بازه‌های TDM که در شکل ۲-۴۷ نشان داده شده‌اند، بخشی از سلسله مراتب پیچیده‌ی قاب‌بندی هستند. هر بازه‌ی TDM دارای یک ساختار مشخص است. گروه‌هایی از بازه‌های TDM، قاب‌های چندتایی را تشکیل می‌دهند و آن‌ها نیز ساختار مشخصی دارند. در شکل ۲-۴۸، یک نگارش ساده شده از این ساختار نشان داده شده. در این شکل می‌توانیم ببینیم که هر بازه‌ی TDM از یک قاب داده‌ی ۱۴۸ بیتی تشکیل می‌شود، که کانال را برای ۵۷۷ میکروثانیه اشغال می‌کند (این قاب دربردارنده‌ی ۳۰ میکروثانیه زمان محافظ، پس از هر بازه می‌باشد). در آغاز و پایان هر قاب داده، سه بیت 0 قرار دارد که برای تعریف محدوده‌ی قاب می‌باشد. همچنین دو فیلد ۵۷ بیتی *Information* در آن هست، که هر کدام دارای یک بیت کنترلی هستند که معلوم می‌کند آیا فیلد *Information* که پس از آن قرار دارد، صوت است یا داده. مابین فیلدهای اطلاعات، یک فیلد ۲۶ بیتی *Sync* (آموزشی) وجود دارد که دریافت کننده از آن برای همگام شدن با کرانه‌های قاب ارسال کننده، استفاده می‌کند.

یک قاب داده، ظرف ۵۴۷ میکروثانیه منتقل می‌شود، اما یک انتقال دهنده تنها مجاز به ارسال یک قاب داده در هر 4.615 msec می‌باشد، زیرا کانال را با هفت ایستگاه دیگر، شریک است. نرخ مجموع برای هر کانال برابر با 270,833 bps است که میان هشت کاربر تقسیم می‌شود. با این وجود، همانند AMPS، کسر بزرگی از پهنای باند توسط سربار بلعیده می‌شود و نهایتاً قبل از تصحیح خطا، 24.7 kbps محموله‌ی مفید به ازای هر کاربر باقی می‌ماند. بعد از تصحیح خطا، 13 kbps برای گفتار می‌ماند. درحالی‌که این مقدار به میزان قابل توجهی کمتر از 74 kbps PCM ای است که مربوط به سیگنال‌های صوتی فشرده‌سازی نشده، در شبکه‌ی تلفن ثابت می‌باشد. در موبایل، عمل فشرده‌سازی می‌تواند با افت کیفی کمتری به این مقادیر برسد.



شکل ۲-۴۸ بخشی از ساختار قالب‌بندی GSM.

همان‌طور که در شکل ۲-۴۸ می‌توان دید، هشت قالب داده، یک قالب TDM را می‌سازند، و ۲۶ قالب TDM، یک قالب چندتایی ۱۲۰ میلی‌ثانیه‌ای را می‌سازند. از میان ۲۶ قالب TDM ای که درون یک قالب چندتایی است، بازه‌ی ۱۲ برای کنترل استفاده می‌شود و بازه‌ی ۲۵ برای کاربرد آتی رزرو شده است، لذا تنها ۲۴ بازه برای ترافیک کاربر، در دسترس هستند.

اما علاوه بر قالب چندتایی ۲۶ - بازه‌ای که در شکل ۲-۴۸ نشان داده شده، یک قالب چندتایی ۵۱ - بازه‌ای نیز استفاده می‌شود (که نشان داده نشده است). بعضی از این بازه‌ها برای نگهداری چند کانال کنترلی استفاده می‌شوند که این کانال‌ها برای مدیریت سیستم به کار می‌روند. **کانال کنترل همه بخشی^۱** یک جریان پیوسته از خروجی، از جانب ایستگاه پایه است که شناسه‌ی ایستگاه پایه و وضعیت کانال^۲ را در خود دارد. تمام ایستگاه‌های موبایل، قدرت سیگنال‌شان را پایش می‌کنند تا ببینند چه زمانی به یک سلول جدید نقل مکان کرده‌اند.

کانال کنترل اختصاصی^۳، برای به‌نگام‌سازی محل، ثبت کردن (رجیستر کردن)، و برپاسازی تماس بکار می‌رود. مشخصاً هر BSC یک پایگاه داده دارد (بنام VLR) که ایستگاه‌های موبایلی که در حال حاضر در قلمرو او هستند را در آن نگه می‌دارد. اطلاعات مورد نیاز برای نگهداری VLR بر روی کانال کنترل اختصاصی، ارسال می‌شود.

در آخر، یک **کانال کنترل عمومی^۴** وجود دارد که به سه زیر-کانال منطقی منشعب می‌شود. اولین زیر - کانال، **کانال صفحه‌بندی^۵** است. ایستگاه پایه از آن برای اعلام تماس‌های رسیده استفاده

1. Broadcast control channel
4. Common control channel

2. Channel status
5. Paging channel

3. Dedicated control channel

می‌کند. هر ایستگاه موبایل، به طور پیوسته بر این کانال نظارت دارد تا مراقب تماس‌هایی باشد که بایستی جواب دهد. دومین زیر-کانال، **کانال با دسترسی تصادفی**^۱ است که به کاربر امکان می‌دهد درخواست یک بازه بر روی کانال کنترل اختصاصی بکند. در صورتی که دو درخواست با هم تصادم کنند، دور ریخته می‌شوند و بایستی بعداً مجدداً تلاش انجام گیرد. با استفاده از بازه‌ی کانال کنترل اختصاصی، ایستگاه قادر به برپاسازی یک تماس می‌باشد. بازه‌ی انتساب داده شده، بر روی سومین زیر-کانال، اعلام می‌شود، یعنی **کانال اعطای دسترسی**^۲.

نهایتاً آن‌که، GSM از بابت نحوه‌ی اداره کردن عملیات دست - به - دست کردن، با AMPS تفاوت دارد. در AMPS، مرکز MSC کاملاً این کار را مدیریت می‌کند، بدون آن‌که کمکی از طرف دستگاه‌های موبایل داشته باشد. با وجود بازه‌های زمانی در GSM، در اغلب مواقع، موبایل نه ارسال می‌کند و نه دریافت. بازه‌های بلااستفاده، این فرصت را به موبایل می‌دهند تا کیفیت سیگنال به سایر ایستگاه‌های پایه‌ی همجوار را ارزیابی کند. این کار با ارسال اطلاعات به BSC انجام می‌شود. کنترل کننده‌ی BSC می‌تواند از این اطلاعات برای تعیین زمانی که یک موبایل، سلولی را ترک کرده و وارد سلول دیگر می‌شود، استفاده کند و به این ترتیب می‌تواند عمل دست - به - دست کردن را انجام دهد. نام این طراحی، MAHO (دست - به - دست کردن موبایل به روش امدادی)^۳ می‌باشد.

۲-۷-۳ نسل سوم (3G) تلفن‌های موبایل: صوت و داده‌ی دیجیتال

نسل اول تلفن‌های موبایل، صوت آنالوگ بود، و نسل دوم، صوت دیجیتال. نسل سوم تلفن‌های موبایل، یا 3G، تماماً در ارتباط با صوت و داده‌ی دیجیتال است.

عواملی وجود دارند که صنعت را به جلو می‌برند. اول آن‌که، در شبکه‌ی ثابت، هم‌اکنون ترافیک داده از ترافیک صوت پیشی گرفته و رشد نمایی دارد درحالی‌که ترافیک صوت، اساساً خط سیری هموار دارد. بسیاری از اهالی خبره‌ی صنعت، انتظار دارند که به زودی ترافیک داده بر روی دستگاه‌های موبایل، بر ترافیک صوت غلبه کند. دوم آن‌که، صنایع تلفن، تفریح و سرگرمی، و کامپیوتر همگی دیجیتال شده‌اند و به سرعت در حال تقارب و همگرایی هستند. بسیاری از مردم شوق بیش از حدی به دستگاه‌های سبک و قابل حمل دارند که عملکرد تلفن، دستگاه پخش موسیقی و ویدیو، پایانه‌ی پُست الکترونیکی، رابط وب، ماشین بازی، و خیلی کارهای دیگر را داشته باشند و همه‌ی این کارها را هم با اتصال بی‌سیم به اینترنت و با پهنای باندی بالا، در همه جای دنیا انجام دهند.

دستگاه iPhone شرکت آبل مثال خوبی از این نوع دستگاه‌های 3G است. با این دستگاه، مردم به سرویس‌های داده‌ی بی‌سیم وصل می‌شوند. به این ترتیب و با عمومیت یافتن iPhone ها، حجم داده‌ی بی‌سیم AT&T با شیب تندی افزایش می‌یابد. مشکل این است که iPhone از شبکه‌ی 2.5 G

1. Random access channel

2. Access grant channel

3. Mobile Assisted HandOff

استفاده می‌کند (یک شبکه‌ی 2G بهبودیافته که یک شبکه‌ی 3G حقیقی نیست) و ظرفیت داده‌ی کافی برای راضی نگهداشتن کاربران را ندارد. تلفن موبایل 3G تماماً در ارتباط با این موضوع است که پهنای باند بی‌سیم کافی برای راضی نگهداشتن کاربران در آینده تأمین شود.

مجمع ITU تلاش نمود تا با شروع دوباره از حدود سال ۱۹۹۲، به بینش دقیق‌تری در این مورد دست یابد. این مجمع برای رسیدن به این منظور یک طرح کلی به نام **IMT-2000** ارائه داد. واژه‌ی IMT کوتاه‌نوشت عبارت **مخابرات موبایل بین‌الملل**^۱ می‌باشد. سرویس‌های پایه‌ای که شبکه‌ی IMT-2000 قرار بود برای کاربرانش تأمین کند عبارتند از:

۱. انتقال صوت با کیفیت بالا.
 ۲. پیغام‌رسانی (جایگزینی برای پست الکترونیکی، نمابر، SMS، گپ و گفت (chat)، و امثالهم).
 ۳. چند - رسانه‌ای (پخش موسیقی، مشاهده‌ی ویدیو، فیلم، تلویزیون، و امثالهم).
 ۴. دسترسی به اینترنت (گشت و گذار در اینترنت، شامل صفحه‌هایی که صوت و ویدیو دارند).
- سرویس‌های دیگر احتمالاً ممکن بود کنفرانس ویدیویی، حضور - از - دور، بازی‌های گروهی، و تجارت در حال حرکت (تجارت موبایلی) باشند (با ارسال علامتی به تلفن شما نزد صندوق‌دار فروشگاه برای پرداخت هزینه‌ی خریدتان). علاوه بر این، انتظار می‌رود کلیه‌ی این سرویس‌ها، در همه جای دنیا (در جاهایی که هیچ شبکه‌ی زمینی‌ای پیدا نمی‌شود، با اتصال خودکار ماهواره‌ای)، به صورت فوری و بی‌درنگ (یعنی همیشه فعال)، و همراه با ضمانت کیفیت سرویس، در دسترس باشند.
- مجمع ITU یک فناوری جهان گستر واحد برای IMT-2000 تدارک دید، لذا تولیدکنندگان توانستند دستگاهی بسازند که بتواند در همه جای دنیا فروخته و مصرف شود (شبیه دستگاه‌های پخش CD و کامپیوترها، و برخلاف تلفن‌های موبایل و تلویزیون‌ها). داشتن یک فناوری واحد، کار اپراتورهای شبکه را نیز خیلی راحت‌تر می‌کند و مردم بیشتری به استفاده از سرویس‌های آن تشویق می‌شوند. جنگ بر سر طرح و قالب، مانند نبرد Betamax در مقابل VHS درباره‌ی دستگاه‌های ضبط ویدیو، برای دنیای کسب و کار خوب نیست.

همان‌طور که به نظر می‌رسید، این امر خیلی خوشبینانه بود. عدد ۲۰۰۰ سه منظور را برآورده می‌کرد: (۱) سالی که برای سرویس دادن، منظور گردیده بود، (۲) فرکانسی که برای عمل کردن در آن فرکانس در نظر گرفته شده بود (بر حسب مگاهرتز)، و (۳) پهنای باندی که سرویس می‌بایستی داشته باشد (بر حسب kbps). هیچ یک از این موارد محقق نشد. هیچ چیزی تا سال ۲۰۰۰ پیاده‌سازی نشد. مجمع ITU توصیه نمود که همه‌ی دولت‌ها طیف واقع در 2 GHz را به منظور انتقال بی‌وقفه و بی‌اشکال ارتباط از کشوری به کشور دیگر، رزرو کنند. چین پهنای باند مورد نیاز را رزرو نمود ولی هیچ کشور

دیگری این کار را نکرد. سرانجام مشخص گردید که 2 Mbps در حال حاضر برای کاربرانی که بیش از حد در حال حرکت هستند، دست یافتنی نیست (چون انجام عمل دست - به - دست کردن بین سلول‌ها، به طوری که سرعت کار کافی باشد، دشوار است). عدد 2 Mbps برای کاربران ایستگاه‌های درون - ساختمانی، واقع‌بینانه‌تر است (یعنی عددی که رقابتی شانه‌به‌شانه با ADSL خواهد داشت)، همچنین عدد 384 kbps برای افرادی که در حال راه رفتن هستند، و 144 kbps برای اتومبیل‌ها.

علی‌رغم این عقب‌نشینی‌های اولیه، کارهای فراوانی از آن زمان تاکنون به انجام رسیده‌اند. پروپوزال‌های IMT متعددی ارائه شدند که بعد از مقداری بررسی و حلاجی، دو مورد اصلی باقی ماندند. اولین مورد، WCDMA (CDMA با باند عریض^۱) از طرف اریکسون^۲ ارائه شده و جامعه‌ی اروپا آن را پشتیبانی می‌کند. جامعه‌ی اروپا این طرح را UMTS (سیستم جامع مخابرات موبایلی^۳) نامیده است. حریف دیگر، CDMA2000 بود که از طرف Qualcomm ارائه گردید.

هر دوی این سیستم‌ها بیش از آن‌که به خاطر CDMA باند عریضی که بر مبنای آن کار می‌کنند، با هم تفاوت داشته باشند، به هم شباهت دارند؛ WCDMA از کانال‌های 5-MHz ای و CDMA2000 از کانال‌های 1.25-MHz ای استفاده می‌کند. اگر مهندسان اریکسون و Qualcomm را در یک اتاق قرار می‌دادیم و به آن‌ها می‌گفتیم به طرحی مشترک برسند، احتمالاً با سرعت مناسبی می‌توانستند این کار را انجام دهند. مشکل آن است که مسئله‌ی اصلی در مهندسی نیست بلکه (طبق معمول) سیاست است. اروپا سیستمی می‌خواست که با GSM کار کند، در حالی که ایالات متحده خواهان سیستمی بود که با سیستمی که به طور گسترده‌ای در ایالات متحده مورد استفاده بود (یعنی IS-95) سازگار باشد. ضمناً هر یک از طرفین، شرکت محلی مربوط به خودش را حمایت می‌کرد (اریکسون در سوئد و Qualcomm در کالیفرنیا است). سرانجام اریکسون و Qualcomm در دعوای دادگاهی متعددی بر سر اختراعات ثبت شده‌ی CDMA مربوط به خود، درگیر شدند.

در سراسر جهان ۱۰ تا ۱۵٪ از مشترکین موبایل هم‌اکنون از فناوری‌های 3G استفاده می‌کنند. در امریکای شمالی و اروپا قریب به یک سوم از مشترکین موبایل، 3G هستند. ژاپن یکی از اولین کشورهایی بود که خود را تطبیق داد و اینک تقریباً همه‌ی تلفن‌های موبایل در ژاپن 3G هستند. این آمار دربردارنده‌ی هم UMTS و هم CDMA2000 می‌باشند، و همین‌طور که بازار درگیر این‌گونه فعل و انفعالات است، 3G هم در حال تبدیل شدن به پاتیل بزرگی از انواع فعالیت‌هاست. برای آن‌که به این آشفتگی اضافه گردد، UMTS هم در حال تبدیل به یک استاندارد 3G واحد، با گزینه‌های ناسازگار متعدد، از جمله CDMA2000 است. این تغییر، تلاشی بوده در جهت یکپارچه‌سازی جبهه‌های مختلف، اما فقط تفاوت‌های فنی را پوشاند و تمرکز بر روی تلاش‌های جاری را تحت الشعاع قرار داد. ما از نام UMTS به جای WCDMA استفاده خواهیم کرد تا آن را از CDMA2000 متمایز ساخته باشیم.

1. Wideband CDMA

2. Ericsson

3. Universal Mobile Telecommunications System

بحث خود را بر استفاده از CDMA در شبکه‌های سلولی متمرکز خواهیم نمود زیرا CDMA ویژگی متمایز هر دو سیستم است. سیستم CDMA نه FDM است و نه TDM، بلکه نوعی مخلوط است که کاربران از طریق آن، در آن واحد بر روی یک باند فرکانسی، ارسال را انجام می‌دهند. هنگامی که CDMA اولین بار برای سیستم‌های سلولی در نظر گرفته شد، دنیای صنعت تقریباً همان واکنشی را از خود بروز داد که ملکه‌ی اسپانیا نسبت به پیشنهاد کریستف کلمب نشان داد (زمانی که کلمب اعلام کرد قصد دارد با کشتی‌رانی در جهت مخالف، به هند برسد). با این وجود، با ظهور یک شرکت واحد، یعنی Qualcomm، CDMA به عنوان یک سیستم 2G (IS-95) موفق گردید و به جایی رسید که پایه‌ی فنی برای 3G بشود.

برای آن‌که CDMA در تلفن موبایل عمل نماید، احتیاج به چیزی بیشتر از CDMA پایه‌ای است که در بخش قبل توضیح دادیم. ما مشخصاً CDMA همگام را توضیح دادیم که در آن، دنباله‌ای از ذره‌ها، کاملاً متعامد هستند. این طراحی هنگامی خوب عمل می‌کند که همه‌ی کاربران در مورد زمان آغاز به کار دنباله‌های ذره‌ای خود، همگام باشند. درست مانند حالتی که ایستگاه پایه در انتقال به موبایل‌ها دارد. ایستگاه پایه می‌تواند دنباله‌های ذره‌ای را در آغاز کار، به طور همزمان انتقال دهد، به این ترتیب سیگنال‌ها متعامد خواهند شد و می‌توانند از هم متمایز باشند. اما همگام کردن انتقال‌ها در تلفن‌های موبایل جدا از هم، کار دشواری است. بدون مراقبت، انتقال‌های مربوط به این تلفن‌ها در زمان‌های متفاوت به ایستگاه پایه خواهند رسید، بدون آن‌که تضمینی در مورد تعامد آن‌ها وجود داشته باشد. برای آن‌که بگذاریم موبایل‌ها بدون همگام شدن، ارسال به ایستگاه پایه را انجام دهند، دنباله‌های کدی می‌خواهیم که در تمام انحراف‌های^۱ ممکن، با یکدیگر متعامد باشند و نه فقط در حالت ساده‌ی مربوط به آغاز کار.

مادام که یافتن دنباله‌های کاملاً متعامد برای این حالت کلی، غیرممکن باشد، دنباله‌هایی که به شکل کدهای شبه - تصادفی طولانی هستند، به نظر کافی می‌رسند. این گونه دنباله‌ها دارای این ویژگی هستند که به احتمال زیاد، در تمام انحراف‌ها، همبستگی متقابل^۲ آن‌ها با یکدیگر پایین است. معنای این سخن آن است که هنگامی که یک دنباله در دنباله‌ی دیگری ضرب شود و سپس جمع زده شود تا ضرب داخلی حساب شود، حاصل آن کوچک خواهد شد؛ اگر متعامد باشند، صفر می‌شود. (به لحاظ شهودی، دنباله‌های تصادفی بایستی همواره متفاوت از هم به نظر برسند. بنابراین، ضرب آن‌ها در یکدیگر بایستی یک سیگنال تصادفی تولید کند که با یک نتیجه‌ی کوچک جمع خواهد شد.) این امر به گیرنده امکان می‌دهد تا انتقال‌های ناخواسته را از سیگنال دریافتی، فیلتر کند. در عین حال به احتمال زیاد، خود - همبستگی^۳ در دنباله‌های شبه - تصادفی نیز کوچک است مگر در انحراف صفر. این امر بدان معناست که وقتی یک دنباله در یک کپی تأخیری خودش ضرب شود و جمع گردد،

1. Offset 2. Cross-correlation 3. Auto-correlation

حاصل کار مقدار کوچکی خواهد بود مگر آن‌که تأخیر صفر باشد. (به لحاظ شهودی، یک دنباله‌ی تصادفی که دچار تأخیر شده، مانند یک دنباله‌ی تصادفی متفاوت به نظر خواهد رسید و به حالت همبستگی متقابل برخوردیم گشت.) این امر به دریافت کننده امکان می‌دهد تا بر روی آغاز انتقال مورد نظرش، در سیگنال دریافتی، قفل کند.

استفاده از دنباله‌های شبه - تصادفی به ایستگاه پایه امکان می‌دهد تا پیغام‌های CDMA را از موبایل‌های همگام نشده، دریافت کند. با این وجود، یک فرض ضمنی در بحث ما پیرامون CDMA آن است که سطوح توان در تمام موبایل‌ها، با سطح توان گیرنده یکسان است. اگر این فرض برقرار نباشد، احتمالاً یک همبستگی متقابل کوچک همراه با یک سیگنال قدرتمند، در برابر یک خود - همبستگی بزرگ همراه با یک سیگنال ضعیف، برتری می‌یابد. بنابراین، توان انتقال در موبایل‌ها بایستی به نحوی کنترل گردد تا تداخل میان سیگنال‌های رقیب، به حداقل برسد. همین تداخل است که ظرفیت سیستم‌های CDMA را محدود می‌سازد.

سطوح توانی که به یک ایستگاه پایه می‌رسند، بستگی دارند به فاصله‌ای که از فرستنده‌ها دارند و نیز مقدار توانی که انتقال می‌دهند. ممکن است تعداد زیادی موبایل در فواصل مختلف از ایستگاه پایه وجود داشته باشند. یک روش شهودی خوب برای همتراز نمودن توان دریافتی آن است که به ازای هر ایستگاه موبایل، عمل انتقال به ایستگاه پایه انجام شود، آن هم در جهت عکس سطح توانی که از ایستگاه پایه دریافت می‌کند. به عبارت دیگر، ایستگاه موبایلی که یک سیگنال ضعیف را از ایستگاه پایه دریافت می‌کند، نسبت به ایستگاهی که یک سیگنال قوی را دریافت می‌کند، توان بیشتری صرف می‌کند. به منظور دقت بیشتر، ایستگاه پایه نیز به هر موبایل، بازخوردی می‌دهد تا توان انتقالش را افزایش دهد، کاهش دهد، یا آن را یکنواخت نگه دارد. این بازخورد، فرکانس است (۱۵۰۰ بار در هر ثانیه) زیرا کنترل توان اگر خوب انجام شود، در حداقل کردن تداخل اهمیت دارد.

بهبود دیگری که پیش از این، در نظام CDMA پایه توضیح دادیم، عبارت‌است از این که به کاربران مختلف اجازه‌ی ارسال داده با نرخ‌های متفاوت داده شود. این ترفند در CDMA، طبیعتاً با ثابت کردن نرخ انتقال ذره‌ها، و انتساب دادن دنباله‌های ذره‌ای با طول‌های مختلف به کاربران، انجام می‌شود. به عنوان مثال، در WCDMA، نرخ ذره عبارت‌است از 3.84 مگاهرتز در هر ثانیه (Mchip/sec) و گستره‌ی کدها از ۴ تا ۲۵۶ ذره، در تغییر هستند. با یک کد ۲۵۶ - ذره‌ای در حدود 12 kbps پس از تصحیح کد باقی می‌ماند، که این ظرفیت برای تماس کافی می‌باشد. با یک کد ۴ - ذره‌ای، نرخ داده‌ی کاربر نزدیک به 1 Mbps است. کدهای با طول بینابینی، نرخ‌های بینابینی هم می‌دهند؛ برای رسیدن به نرخ‌های چندین مگابیت بر ثانیه، بایستی موبایل همزمان از بیش از یک کانال 5-MHz ای استفاده کند. با توجه به این که با مشکلاتی که ناشی از به کارگیری CDMA بوده‌اند، برخورد داشته‌ایم، اکنون بیا باید مزایای آن را نیز بررسی کنیم. این روش سه مزیت اصلی دارد. اول آن که، CDMA می‌تواند ظرفیت را بهبود دهد به این ترتیب که هنگام ساکت و خاموش بودن بعضی از فرستنده‌ها، از زمان‌های

کوچک موجود استفاده می‌کند. در تماس‌های صوتی مؤدبانه، مادام که یک طرف در حال صحبت است، طرف دیگر ساکت و خاموش می‌باشد. به طور متوسط، خط تنها در ۴۰٪ از مواقع، مشغول است. اما ممکن است مکث‌ها کوچک بوده و پیش‌بینی آن‌ها دشوار باشد. در سیستم‌های TDM و FDM، امکان انتساب مجدد بازه‌های زمانی یا کانال‌های فرکانسی با سرعت کافی وجود ندارد تا بتوان از این سکوت‌ها و خاموشی‌های کوتاه، بهره‌برداری نمود. اما CDMA به سادگی و با عدم انجام انتقال‌های مربوط به یک کاربر، تداخل را برای سایر کاربران کاهش می‌دهد، و چنین به نظر می‌رسد که در هر زمان، در یک سلول مشغول، کسری از کاربران ارسال نداشته باشند. بنابراین CDMA از سکوت‌های احتمالی بهره می‌برد تا تعداد بیشتری تماس همزمان را اجازه دهد.

دوم آن‌که، در CDMA هر سلول از فرکانس‌های یکسان استفاده می‌کند. برخلاف GSM و AMPS، نیازی به FDM برای جدا کردن انتقال‌های مربوط به کاربران مختلف، وجود ندارد. این امر، وظایف پیچیده‌ی مربوط به برنامه‌ریزی برای فرکانس‌ها را از میان برمی‌دارد و ظرفیت را بهبود می‌دهد. همچنین این امر به ایستگاه پایه امکان استفاده از آنتن‌های چند - جهته، یا آنتن‌های سکتوربندی شده^۱ را به جای آنتن‌های چندسویه^۲ می‌دهد. آنتن‌های جهت‌دار اختصاص به سیگنالی دارند که در جهت مشخصی قرار دارد، و سیگنال‌ها، و در نتیجه تداخل‌ها را در سایر جهت‌ها کاهش می‌دهند. این امر به نوبه‌ی خود، ظرفیت را افزایش می‌دهد. سه طرح منطقه‌ای متداول وجود دارند. ایستگاه پایه بایستی موبایل را در حین حرکت از یک بخش به بخش دیگر، ردیابی کند. این ردیابی با CDMA آسان است زیرا از همه‌ی فرکانس‌ها در همه‌ی بخش‌ها استفاده می‌گردد.

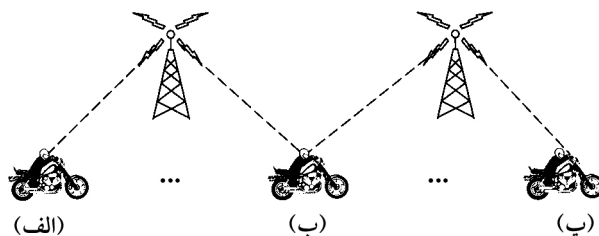
سوم آن‌که، CDMA دست - به - دست کردن نرم^۳ را تسهیل می‌کند. در این روش، قبل از آن‌که ایستگاه پایه‌ی قبلی به ارتباط با موبایل خاتمه دهد، ایستگاه پایه‌ی جدید، آن را تحویل می‌گیرد. در این روش هیچ‌گونه وقفه‌ای در پیوستگی وجود ندارد. دست - به - دست کردن نرم در شکل ۲-۴۹ نشان داده شده است. این روش با CDMA، کار آسانی است زیرا تمام فرکانس‌ها در تمام سلول‌ها استفاده می‌شوند. گزینه‌ی دیگر، دست - به - دست کردن سخت^۴ است. در این روش قبل از آن‌که ایستگاه پایه‌ی جدید، تماسی را تحویل بگیرد، ایستگاه قبلی آن را رها می‌کند. اگر ایستگاه جدید قادر به تحویل گرفتن آن نباشد (مثلاً به دلیل عدم وجود فرکانس قابل دسترسی) اتصال تماس به طور ناگهانی قطع می‌شود. کاربران مایلند که از این موضوع پیش‌آگهی داشته باشند، اما این امر در طرح فعلی، بعضی مواقع اجتناب‌ناپذیر است. دست - به - دست دادن سخت در طراحی‌های FDM روشی معمول است تا از هزینه‌ی مربوط به اجبار موبایل به ارسال یا دریافت دو فرکانس، به صورت همزمان، جلوگیری شود.

1. Sectorized antennas

2. Omnidirectional - همه‌راستایی

3. Soft handoff

4. Hard handoff



شکل ۲-۴۹ دست - به - دست کردن نرم.
(الف) قبل از انجام، (ب) در حین انجام، و (پ) بعد از انجام.

مطالب زیادی در مورد 3G نوشته شده است که اغلب آن‌ها 3G را بیش از حد مهم جلوه داده‌اند. در این ضمن، شماری از کاربران هم گام‌های محتاطانه‌ای به سمت 3G برداشته‌اند، یعنی با رفتن به سمت آنچه 2.5G نامیده می‌شود، هرچند که نام 2.1G دقیق‌تر است. یکی از این سیستم‌ها، EDGE است (نرخ‌های داده‌ی پیشرفته برای تکامل GSM^۱). این سیستم همان GSM است که به ازای هر نماد، بیت‌های بیشتری دارد. مشکل این است که وجود بیت‌های بیشتر به ازای هر نماد، به معنای خطاهای بیشتر به ازای هر نماد هم هست. بنابراین EDGE دارای نه نظام مختلف برای تلفیق‌سازی و تصحیح خطا می‌باشد، که بر اساس مقدار پهنای باندی که برای تعیین نمودن خطاهای ناشی از سرعت بالاتر، تخصیص داده شده، با هم تفاوت دارند. در مسیر تکاملی که از GSM به سوی WCDMA تعریف می‌شود، EDGA یک گام رو به جلو است. به طریق مشابه، مسیری تکاملی برای اپراتورها هم تعریف شده تا از شبکه‌های IS-95 به شبکه‌های CDMA2000 ارتقا یابند.

هر چند که شبکه‌های 3G هنوز کاملاً مستقر نشده‌اند، بعضی از پژوهشگران عقیده دارند که 3G تا حدود زیادی به انجام رسیده است. این افراد هم‌اکنون بر روی سیستم‌های 4G، تحت نام LTE (تکامل بلند مدت^۲) کار می‌کنند. بعضی از ویژگی‌هایی که برای 4G در نظر گرفته شده، عبارتند از: پهنای باند زیاد؛ فراگیری (اتصال در همه جا)؛ جامعیت یکپارچه با شبکه‌های IP، باسیم و بی‌سیم، از جمله نقاط دسترسی 802.11؛ مدیریت تطبیقی منابع و طیف؛ و کیفیت بالای سرویس برای چند - رسانه‌ای. برای اطلاعات بیشتر به Astely و همکاران (۲۰۰۹) و Larmo و همکاران (۲۰۰۹) مراجعه نمایید.

در عین حال، شبکه‌های بی‌سیم با سطوحی از کارآمدی 4G هم‌اکنون قابل دسترسی هستند. مسئله‌ی اصلی 802.16 است که با عنوان WiMAX هم شناخته می‌شود. برای مروری بر WiMAX در حال حرکت، Ahmadi (۲۰۰۹) را مطالعه نمایید. اگر بگوییم صنعت در وضعیت تغییر دائمی و ناپایدار قرار دارد، تا حدود زیادی موضوع را دست کم گرفته‌ایم. بعد از چند سال به عقب برگردید و موضوع را کنترل کنید تا آنچه را روی داده است، مشاهده نمایید.

1. Enhanced Data rates for GSM Evolution

2. Long Term Evolution

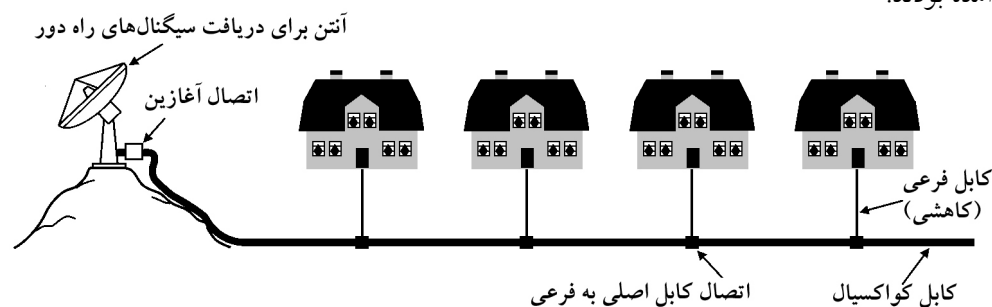
۸-۲ تلویزیون کابلی

ما تاکنون هر دو سیستم تلفن ثابت و بی سیم را با جزئیات نسبتاً خوبی مطالعه کرده ایم. بدیهی است که هر دوی آن‌ها در شبکه‌های آتی، نقش مهمی ایفا خواهند کرد. اما بازیگر اصلی دیگری هم وجود دارد که طی دهه‌ی اخیر برای دسترسی به اینترنت ظهور نموده است: شبکه‌های تلویزیون کابلی. امروزه بسیاری از مردم سرویس تلفن و اینترنت خود را از طریق کابل دریافت می‌کنند. در بخش‌های بعد، نگاه دقیق‌تری به تلویزیون کابلی به عنوان یک شبکه خواهیم داشت و آن را در مقام مقایسه در مقابل سیستم‌های تلفن که تا به حال مطالعه کرده ایم، قرار خواهیم داد. بعضی منابع مرجع که برای مطالعه و اطلاعات بیشتر معرفی می‌شوند، عبارتند از: Donaldson و Jones (۲۰۰۱)، Dutta-Roy (۲۰۰۱)، و Fellows و Jones (۲۰۰۱).

۱-۸-۲ تلویزیون آنتنی جمعی

تلویزیون کابلی در اواخر دهه‌ی ۱۹۴۰، به عنوان روشی برای دریافت بهتر صدا و تصویر برای مردم ساکن در مناطق روستایی یا کوهستانی، پدیدار شد. همان‌طور که در شکل ۲-۵۰ نشان داده شده، در ابتدا این سیستم از یک آنتن بزرگ تشکیل می‌شد که بر فراز یک تپه قرار داشت و سیگنال تلویزیونی را از هوا می‌قاپید، به علاوه‌ی یک تقویت‌کننده به نام اتصال آغازین^۲ برای تقویت سیگنال، و یک کابل کواکسیال که سیگنال را به منازل مردم تحویل دهد.

در سال‌های اول، تلویزیون کابلی، تلویزیون آنتنی جمعی^۳ نامیده می‌شد. این تلویزیون بیشتر کارکردی خانوادگی داشت؛ هر کسی که دستی در الکترونیک داشت، می‌توانست سرویس مربوط به شهر خویش را انجام دهد و کاربران همگی در پرداخت هزینه‌های آن مشارکت می‌کردند. با رشد تعداد مشترکین، کابل‌های بیشتری به کابل اولیه متصل شده و تعداد تقویت‌کننده‌ها بر حسب نیاز، افزوده گردید. انتقال، یک‌سویه بود، یعنی از اتصال آغازین به سمت کاربران. تا سال ۱۹۷۰، هزاران سیستم مستقل به وجود آمده بودند.



شکل ۲-۵۰ یک سیستم ابتدایی تلویزیون کابلی.

1. Pluck
2. Headend
3. Community Antenna Television

در سال ۱۹۷۴، شرکت Time یک کانال تازه به نام دفتر صندوق خانگی (Home Box Office) راه‌اندازی نمود. این کانال، محتوای جدیدی داشت (فیلم) که توزیع آن فقط بر روی کابل انجام می‌شد. کانال‌های دیگری که فقط کابلی بودند، این رویه را دنبال کردند و بر روی مواردی مانند اخبار، ورزش، آشپزی، و بسیاری عناوین دیگر، تمرکز نمودند. این پیشرفت، سبب دو تغییر در صنعت گردید. اول آن‌که، شرکت‌های بزرگ شروع کردند به خریداری سیستم‌های کابلی موجود و استقرار کابل‌های تازه به منظور جلب مشترکین جدید. دوم آن‌که، حالا دیگر نیازمند اتصال سیستم‌های متعدد بودند که غالباً در شهرهای دوردست قرار داشتند، تا کانال‌های کابلی جدید را توزیع کنند. شرکت‌های کابلی شروع به استقرار کابل میان شهرها نمودند تا همه‌ی آن‌ها را به یک سیستم واحد متصل کنند. این الگو با آنچه ۸۰ سال قبل برای صنعت تلفن پیش آمده بود، قابل قیاس بود. آن زمان هم دفاتر پایانی، که تا پیش از آن مجزا بودند، به هم متصل شدند تا تماس‌های راه دور امکان‌پذیر گردند.

۲-۸-۲ اینترنت از طریق کابل

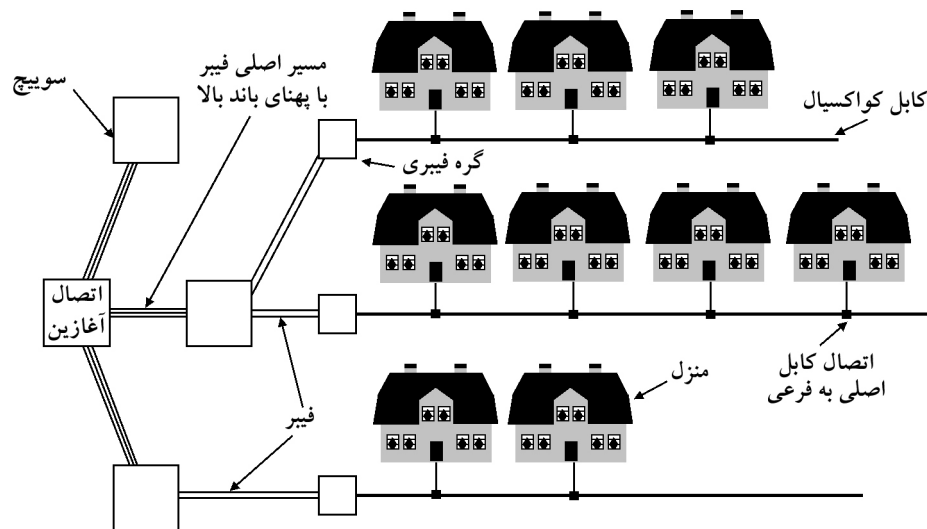
در طول سال‌ها، سیستم کابلی رشد کرده و کابل‌های میان شهرهای مختلف، با فیبرهای دارای پهنای باند بالا جایگزین شدند، مشابه آنچه در سیستم تلفن رخ داد. سیستمی که برای مسیرهای دوربرد از فیبر، و برای اتصال به منازل از کابل کوکسیال استفاده می‌کند، یک سیستم HFC (مخلوط کوکس با فیبر)^۱ نامیده می‌شود. مبدل‌های الکترو-نور که رابط میان بخش‌های نوری و بخش‌های الکتریکی سیستم هستند، گره‌های فیبری^۲ نام دارند. چون پهنای باند فیبر بسیار بیشتر از کوکس است، یک گره فیبری توانایی تغذیه‌ی چندین کابل کوکس را دارد. بخشی از یک سیستم HFC امروزی، در شکل ۲-۵۱ (الف) نشان داده شده است.

طی دهه‌ی اخیر، چند اپراتور کابلی تصمیم گرفته‌اند وارد کسب و کار دسترسی به اینترنت شده و حتی بیش از آن، یعنی وارد کسب و کار تلفن نیز بشوند. تفاوت‌های فنی میان نصب کابل و نصب تلفن، بر روی آنچه که بایستی برای رسیدن به این اهداف انجام می‌شد، تأثیرگذار بود. دلیلش این بود که همه‌ی تقویت‌کننده‌های یک-طرفه در سیستم، بایستی با تقویت‌کننده‌های دو-طرفه جایگزین می‌گشتند تا جریان بالادستی را هم همانند انتقال‌های پایین‌دستی، حمایت کنند. در حالی که این کار در حال انجام بود، سیستم‌های اینترنت کابلی اولیه، از شبکه‌ی تلویزیون کابلی برای انتقال‌های پایین‌دستی، و از یک اتصال شماره‌گیر توسط شبکه‌ی تلفن برای انتقال‌های بالادستی استفاده می‌کردند. این کار راه حلی هوشمندانه بود، اما در مقایسه با آنچه می‌توانست باشد، چندان هم شبکه‌ای نبود.

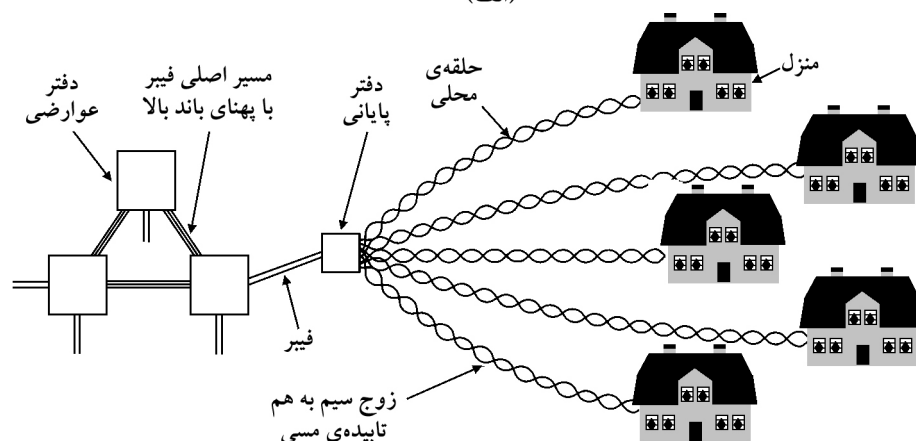
اما تفاوت دیگری هم میان سیستم HFC در شکل ۲-۵۱ (الف)، و سیستم تلفن در شکل ۲-۵۱ (ب) وجود دارد که برطرف کردنش بسیار دشوارتر است. یک کابل واحد، توسط منازل متعددی که در

1. Hybrid Fiber Coax

2. Fiber node



(الف)



(ب)

شکل ۲-۵۱ (الف) تلویزیون کابلی، (ب) سیستم تلفن ثابت.

همسایگی هم هستند، به اشتراک گذاشته شده، درحالی که در سیستم تلفن، هر خانه، حلقه‌ی محلی شخصی خودش را دارد. هنگام استفاده برای پخش تلویزیونی، این چنین اشتراکی، طبیعتاً یک انتخاب مناسب است. تمام برنامه‌ها بر روی کابل پخش می‌شوند، فارغ از این که ۱۰ تماشاگر وجود داشته باشند یا ۱۰,۰۰۰ تماشاگر. اما هنگامی که از همان کابل برای دسترسی به اینترنت استفاده شود، این که ۱۰ کاربر داریم یا ۱۰,۰۰۰ کاربر، خیلی مهم است. اگر یک کاربر تصمیم به دریافت یک فایل خیلی بزرگ بگیرد، پهنای باند به صورت بالقوه از سایر کاربران گرفته می‌شود. هر چه تعداد کاربران بیشتر باشد، رقابت بیشتری برای پهنای باند وجود دارد. سیستم تلفن این ویژگی به‌خصوص را ندارد: دریافت یک فایل بزرگ از طریق یک خط ADSL، پهنای باند همسایه‌ی شما را دچار کاهش نمی‌کند.

از طرف دیگر، پهنای باند کواکس بسیار بالاتر از زوج سیم به هم تابیده است، بنابراین خیلی خوش‌شانس خواهید بود اگر همسایه‌تان خیلی از اینترنت استفاده نکند.

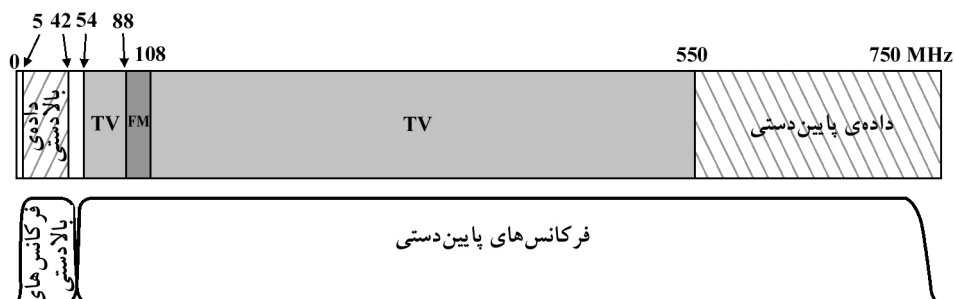
روشی که صنعت کابلی برای مهار این مسئله به کار گرفت، عبارت‌است از تقسیم کردن کابل‌های طولانی به قسمت‌های مجزا، و ایجاد اتصال مستقیم میان هر یک از آن‌ها با گره فیبری. پهنای باند از اتصال آغازین به هر یک از گره‌های فیبری، حقیقتاً نامحدود است، بنابراین مادام که تعداد مشترکین روی هر قطعه‌ی کابل، بیش از اندازه نباشد، میزان ترافیک، قابل مدیریت است. امروزه کابل‌های معمولی، ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ خانه را پوشش می‌دهند، اما همراه با افزایش تعداد افرادی که از طریق کابل به اینترنت وصل می‌شوند، بار هم ممکن است بیش از حد بزرگ شود، یعنی نیاز به تقسیم کردن‌های بیشتر و گره‌های فیبری بیشتر، وجود خواهد داشت.

۲-۸-۳ تخصیص طیف

دور ریختن همه‌ی کانال‌های تلویزیونی و استفاده از زیرساخت کابلی، به منظور دسترسی به اینترنت، احتمالاً تعداد قابل توجهی از مصرف‌کنندگان را خشمگین خواهد نمود، لذا شرکت‌های کابلی در انجام این کار تردید دارند. به علاوه، اغلب شهرها نظارت عمده‌ای بر محتوای کابل دارند، به همین دلیل اگر اپراتورهای کابلی واقعاً بخواهند چنین تغییری ایجاد کنند هم، اجازه‌ی انجام این کار را نخواهند داشت. در نتیجه آن‌ها نیازمند یافتن راهی هستند تا تلویزیون و اینترنت را به صورت مسالمت‌آمیز، همزمان بر روی یک کابل داشته باشند.

راه‌حل عبارت‌است از استفاده از مزایای تسهیم به روش تقسیم فرکانس. کانال‌های تلویزیون کابلی در امریکای شمالی، ناحیه‌ی ۵۴ تا ۵۵۰ مگاهرتز را اشغال می‌نمایند (به جز ناحیه‌ی مربوط به رادیوی FM که از ۸۸ تا ۱۰۸ مگاهرتز است). پهنای این کانال‌ها، با احتساب باندهای محافظ، 6 MHz است و توانایی حمل یک کانال تلویزیون آنالوگ سستی، یا چندین کانال تلویزیون دیجیتال را دارند. در اروپا، حد پایین معمولاً 65 MHz است و پهنای کانال‌ها برای تفکیک‌پذیری بالاتر، که برای سیستم‌های پال و سی‌کام مورد نیاز است، ۶ تا ۸ مگاهرتز است، ولی در سایر موارد دارای نظامی مشابه است. بخش پایینی باند استفاده نمی‌شود. کابل‌های امروزی، در محدوده‌ی بالای ۵۵۰ مگاهرتز و در اغلب مواقع تا ۷۵۰ مگاهرتز یا بیشتر نیز می‌توانند به خوبی عمل کنند. راه‌حلی که انتخاب شد، عبارت بود از ارائه‌ی کانال‌های بالادستی در باند ۵ تا ۴۲ مگاهرتز (در اروپا کمی بالاتر است) و استفاده از بالاترین فرکانس‌ها برای سیگنال‌های پایین‌دستی. طیف کابل در شکل ۲-۵۲ نشان داده شده است.

توجه داشته باشید، از آنجایی که سیگنال‌های تلویزیونی تماماً پایین‌دستی هستند، امکان استفاده از تقویت‌کننده‌های بالادستی وجود ندارد چون همان‌طور که در شکل نشان داده شده، این تقویت‌کننده‌ها فقط در ناحیه‌ی 42-5 MHz کار می‌کنند، همچنین استفاده از تقویت‌کننده‌های پایین‌دستی نیز ممکن نیست چون آن‌ها هم فقط در فرکانس ۵۴ مگاهرتز و بالاتر از آن کار می‌کنند. بنابراین به نوعی عدم



شکل ۲-۵۲ تخصیص فرکانس در یک سیستم تلویزیون کابلی معمولی که برای دسترسی به اینترنت مورد استفاده قرار گرفته.

تقارن در پهنای باندهای بالادستی و پایین‌دستی برمی‌خوریم، زیرا طیفی که در بالای طیف تلویزیون در دسترس است، بیشتر از طیف پایین آن است. از طرف دیگر، اغلب کاربران مایل به ترافیک پایین‌دستی بیشتری هستند، لذا اپراتورهای کابلی اعتراضی به واقعیت موجود ندارند. همان‌گونه که قبلاً مشاهده کردیم، شرکت‌های تلفن معمولاً یک سرویس DSL غیرمتقارن ارائه می‌دهند، هر چند که هیچ دلیل فنی برای این کار ندارند.

اپراتور ناچار است علاوه بر ارتقا دادن تقویت‌کننده‌ها، اتصال آغازین را نیز ارتقا دهد، یعنی آن را از یک تقویت‌کننده‌ی ساکت و خاموش، به یک سیستم کامپیوتری دیجیتال هوشمند تبدیل کند که یک رابط فیبری با پهنای باند بالا به یک ISP داشته باشد. در بیشتر مواقع، نام این اتصال نیز ارتقا می‌یابد، یعنی به جای "اتصال آغازین"، CMTS (سیستم انتهایی مودم کابلی)^۱ نامیده می‌شود. در ادامه‌ی متن، از این ارتقای نام خودداری کرده و به همان "اتصال آغازین" متعارف بسنده می‌کنیم.

۲-۸-۴ مودم‌های کابلی

برای دسترسی به اینترنت، به یک مودم کابلی نیاز داریم. مودم کابلی، دستگاهی است که دو رابط دارد: یکی به کامپیوتر و یکی به شبکه‌ی کابلی. در سال‌های اول اینترنت کابلی، هر اپراتور یک مودم کابلی مخصوص به خود داشت که توسط تکنسین شرکت نصب می‌شد. اما به زودی مشخص گردید که وجود یک استاندارد باز، یک بازار رقابتی در مودم کابلی ایجاد خواهد کرد و هزینه‌ی قطعات پایین خواهد آمد، و بنابراین سبب ایجاد دلگرمی در استفاده از سرویس می‌شود. به‌علاوه، وقتی مصرف‌کنندگان خودشان مودم‌ها را از فروشگاه‌ها خریداری کرده و نصب کنند (مانند کاری که با نقاط دسترسی بی‌سیم می‌کنند)، انجام کارها ساده‌تر خواهد شد.

1. Cable Modem Termination System

در نتیجه، اپراتورهای کابلی بزرگ‌تر، به شرکتی به نام CableLabs پیوستند تا استاندارد را برای مودم کابلی مشخص نموده و محصولاتشان را به لحاظ رعایت استاندارد، مورد آزمایش قرار دهند. این استاندارد که DOCSIS ((تعیین) مشخصه‌ی رابط سرویس (انتقال) داده از طریق کابل^۱) نام دارد، به شکلی گسترده جایگزین مودم‌های خصوصی گردیده است. نگارش 1.0 از استاندارد DOCSIS در سال ۱۹۹۷ بیرون آمد و خیلی زود در سال ۲۰۰۱ هم نگارش DOCSIS 2.0 به دنبالش پدیدار شد. این کار نرخ‌های بالادستی را افزایش داد به نحوی که سرویس‌های مقارنی مانند IP - تلفنی، بهتر حمایت شوند. آخرین نگارش این استاندارد، DOCSIS 3.0 است که در سال ۲۰۰۶ بیرون آمد. این استاندارد به منظور افزایش نرخ انتقال در هر دو جهت، از پهنای باند بالاتری استفاده می‌کند. نگارش اروپایی این استانداردها، EuroDOCSIS نام دارد. اما همه‌ی اپراتورهای کابلی ایده‌ی استانداردسازی را دوست ندارند، زیرا بسیاری از آن‌ها بابت اجاره‌ی مودم‌هایشان به مشتریان دائمی خود، پول خوبی به دست می‌آوردند. یک استاندارد باز با یک دوجین سازنده که مودم‌های کابلی را در فروشگاه‌ها می‌فروشد، به این کسب سودآور خاتمه می‌دهد.

رابط مودم - به - کامپیوتر کاملاً روشن و سراسر است. این رابط در شرایط عادی اترنت است، گاهی اوقات هم ممکن است USB باشد. طرف دیگر پیچیده‌تر است زیرا تماماً از FDM، TDM، و CDMA استفاده می‌کند تا پهنای باند کابل را میان مشترکین به اشتراک بگذارد. هنگامی که یک مودم کابلی را به پرز زده و روشن می‌کنیم، کانال‌های پایین‌دستی را پوشش می‌کند تا یک بسته‌ی مخصوص را بیابد. این بسته به تناوب توسط اتصال آغازین در کانال گذاشته می‌شود تا پارامترهای سیستم را برای مودم‌هایی که تازه برخط شده‌اند، فراهم کند. با یافتن این بسته، مودم جدید حضور خود را بر روی یکی از کانال‌های بالادستی اعلام می‌کند. اتصال آغازین به وسیله‌ی انتساب دادن آن مودم به کانال‌های بالادستی و پایین‌دستی‌اش، پاسخ می‌دهد. بعداً در صورتی که اتصال آغازین تشخیص دهد که لازم است بار را تنظیم کند، این انتساب‌ها می‌تواند تغییر کنند.

استفاده از کانال‌های 6 MHz و 8 MHz در اختیار بخش FDM است. هر مودم کابلی، داده را بر روی یک کانال بالادستی و یک کانال پایین‌دستی یا بر روی کانال‌های متعدد، تحت استاندارد DOCSIS 3.0 ارسال می‌کند. نظام معمول عبارت‌ست از برداشتن هر کانال پایین‌دستی ۶ (یا ۸) مگاهرتزی و تلفیق آن با QAM-64. در مواقع استثنایی که کیفیت کابل خوب باشد، با QAM-256 تلفیق انجام می‌شود. با یک کانال ۶ مگاهرتزی و QAM-64، در حدود 36 Mbps به دست می‌آید. اگر سربار آن کسر گردد، محموله‌ی خالص در حدود 27 Mbps می‌شود. با QAM-256، محموله‌ی خالص در حدود 39 Mbps می‌شود. مقادیر در اروپا یک سوم بزرگ‌ترند.

1. Data Over Cable Service Interface Specification

برای جریان بالادستی، نویز RF بیشتری وجود دارد زیرا سیستم از ابتدا برای داده طراحی نشده، و نویز از مشترکین متعدد به سمت اتصال آغازین هدایت می‌شود. به همین دلیل، از یک نظام محافظه‌کارانه‌تر استفاده می‌شود. این نظام از QPSK تا QAM-128 را در محدوده‌اش دارد، و نمادهایی را برای محافظت در برابر خطا، همراه با تلفیق‌سازی Trellis Coded، به کار می‌برد. با استفاده از بیت‌های کمتر به ازای هر نماد در جریان بالادستی، عدم تقارن میان نرخ‌های بالادستی و پایین‌دستی خیلی بیش از آنی است که در شکل ۲-۵۲ آمده است.

برای اشتراک در پهنای باند جریان بالادستی در بین مشترکین متعدد، از TDM استفاده می‌شود. در غیر این صورت انتقال‌های مربوط به آن‌ها، در محل اتصال آغازین با هم تصادم خواهند نمود. زمان به تعدادی بازه‌ی (زمانی) بسیار کوچک^۱ تقسیم شده و مشترکین مختلف، عمل ارسال را در بازه‌های مختلف انجام می‌دهند. به منظور عملی بودن این شیوه، مودم با ارسال یک بسته‌ی مخصوص، و پی بردن به مدت زمانی که طول می‌کشد تا پاسخ برسد، فاصله‌اش را از اتصال آغازین تعیین می‌کند. نام این فرآیند، تعیین محدوده^۲ است. برای مودم، دانستن فاصله به منظور زمان‌بندی درست، مهم است. هر بسته‌ی بالادستی که می‌رسد، بایستی در یک یا چند بازه‌ی زمانی بسیار کوچک متوالی، در اتصال آغازین، جا شود. اتصال آغازین، به تناوب، شروع یک دور (راند) تازه از بازه‌های زمانی بسیار کوچک را اعلام می‌کند، اما این شلیک شروع (!) به طور همزمان در تمام مودم‌ها شنیده نمی‌شود که علتش زمان انتشار در کابل است. هر مودم با دانستن فاصله‌اش از اتصال آغازین، می‌تواند محاسبه کند که اولین بازه‌ی زمانی بسیار کوچک، واقعاً چند وقت قبل شروع شده است. طول بازه‌ی زمانی بسیار کوچک، به شبکه بستگی دارد. یک محموله‌ی معمولی، ۸ بایت است.

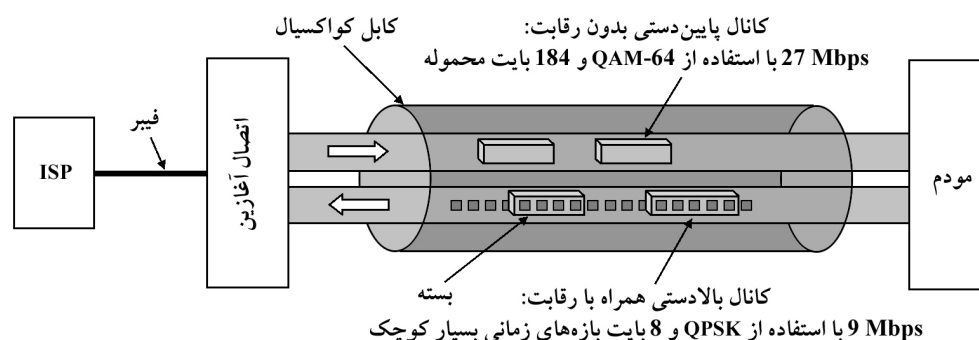
در حین راه‌اندازی، اتصال آغازین، هر مودم را به یک بازه‌ی زمانی بسیار کوچک انتساب می‌دهد تا از آن برای درخواست پهنای باند بالادستی استفاده کند. هنگامی که کامپیوتری می‌خواهد یک بسته ارسال کند، بسته را به مودم منتقل می‌کند. مودم هم تعداد بازه‌ی زمانی بسیار کوچکی که برای این کار مورد نیازش است را درخواست می‌کند. اگر درخواست پذیرفته شود، اتصال آغازین یک رسید دریافت در کانال مربوط به پایین‌دستی قرار می‌دهد. این کار به مودم می‌گوید که کدام بازه‌های زمانی بسیار کوچک، برای این بسته رزرو شده‌اند. سپس بسته، با شروع از بازه‌ی زمانی تخصیص داده شده به آن، ارسال می‌گردد. بسته‌های بیشتر می‌توانند با استفاده از فیلدی در سرآیند، درخواست شوند. قاعدتاً یک بازه‌ی زمانی بسیار کوچک به چندین مودم انتساب داده می‌شود، که منجر به رقابت^۳ خواهد شد. در این مواقع، دو احتمال مختلف وجود دارند. اولی آن است که از CDMA برای اشتراک بازه‌ی زمانی میان مشترکین استفاده می‌شود. این امر مسئله‌ی رقابت را حل می‌کند زیرا مشترکین با استفاده از دنباله‌ی کد CDMA می‌توانند در آن واحد، عمل ارسال را انجام دهند که البته با

کاهش نرخ همراه است. گزینه‌ی دوم آن است که از CDMA استفاده نشود، در این حالت به دلیل تصادم، هیچ رسیدِ دریافتی به ازای درخواست، وجود نخواهد داشت. در این شرایط، مودم به اندازه‌ی یک زمان تصادفی صبر کرده و مجدداً تلاش می‌کند. بعد از هر شکستِ پی‌درپی، زمان تصادفی‌سازی دو برابر می‌شود. (برای خوانندگانی که از هم‌اکنون تا حدودی با شبکه آشنا هستند می‌گوییم که این همان الگوریتم ALOHA است که با روش "رفع مشکل به وسیله‌ی عقبگرد با توان‌های دو"^۱ بازه‌گذاری شده است. از اترنت نمی‌توان بر روی کابل استفاده نمود زیرا ایستگاه‌ها قادر به حس کردن^۲ رسانه نیستند. در فصل ۴ مجدداً به این مباحث بازخواهیم گشت.)

کانال‌های جریان پایین‌دستی، به شیوه‌ی متفاوتی نسبت به کانال‌های جریان بالادستی مدیریت می‌شوند. تنها یک ارسال کننده (یعنی همان اتصال آغازین) وجود دارد، بنابراین رقابتی وجود نداشته و نیازی به بازه‌های زمانی بسیار کوچک نیست. یعنی واقعاً تسهیم به روش تقسیم زمان آماری برقرار است. میزان ترافیکِ پایین‌دستی معمولاً خیلی بیشتر از بالادستی است، لذا از یک اندازه‌ی ثابت ۲۰۴ - بایتی برای بسته استفاده می‌شود. بخشی از آن، کدِ مربوط به تصحیح خطا به روش رید - سالومون^۳ است و بقیه سربرار هستند به طوری که ۱۸۴ بایت برای محموله‌ی کاربر باقی می‌ماند. این اعداد به منظور سازگاری با تلویزیون دیجیتال که از MPEG-2 استفاده می‌کند، انتخاب شده‌اند لذا تلویزیون و کانال‌های داده‌ی پایین‌دستی به یک شیوه فرمت می‌شوند. به لحاظ منطقی، اتصالات به گونه‌ای هستند که در شکل ۲-۵۳ به تصویر درآمده است.

۲-۸-۵ ADSL در مقابل کابل

کدام یک بهترند، ADSL یا کابل؟ مثل این است که پرسیم کدام سیستم عامل بهتر است. یا کدام زبان بهتر است. پاسخ بستگی دارد به شخصی که از او پرسش می‌شود. بیایید ADSL و کابل را از چند جنبه



شکل ۲-۵۳ اجزای رایج کانال‌های جریان بالادستی و پایین‌دستی در امریکای شمالی.

مقایسه نماییم. هر دو در بدنه‌ی اصلی از فیبر استفاده می‌کنند اما در لبه‌ها با هم تفاوت دارند. کابل از کوآکس استفاده می‌کند؛ درحالی‌که ADSL از زوج سیم به هم تابیده. ظرفیت حمل در کوآکس به لحاظ نظری، صدها بار بیشتر از زوج سیم به هم تابیده است. با این وجود، همه‌ی ظرفیت کابل در دسترس کاربران داده نمی‌باشد، زیرا بیشتر پهنای باند در کابل بابت موضوعاتی بیهوده از قبیل برنامه‌های تلویزیونی، تلف می‌شود.

در عمل، صدور یک حُکم کلی درباره‌ی ظرفیت موثر، کاری دشوار است. فراهم‌کنندگان ADSL اظهاراتی در مورد پهنای باند ارائه می‌دهند (مثلاً 1 Mbps برای جریان پایین‌دستی، 256 kbps برای جریان بالادستی) و عموماً به یک سازگاری ۸۰٪ ای دست می‌یابند. فراهم‌کنندگان کابل ممکن است به طور مصنوعی، پهنای باند هر کاربر را محدود نمایند تا در پیش‌بینی‌های مربوط به کارایی، او را کمک کنند، اما آن‌ها در واقع نمی‌توانند تضمینی ارائه دهند زیرا ظرفیت موثر بستگی دارد به تعداد افرادی که در هر زمان بر روی قطعه کابل کاربر، فعال می‌باشند. احتمالاً بعضی مواقع کابل از ADSL بهتر است، و گاهی اوقات هم ممکن است بدتر باشد. با این حال آنچه که آزار دهنده است، غیرقابل پیش‌بینی بودن موضوع است. برخورداری از یک سرویس خوب در یک لحظه، ضمانت نمی‌کند که لحظه‌ی بعد هم سرویس عالی دریافت کنید زیرا ممکن است بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌ی پهنای باند در شهرتان، درست همان موقع کامپیوترش را روشن کند.

در حالی که کاربران بیشتری به سیستم ADSL می‌پیوندند، ولی چون هر کاربر دارای یک اتصال اختصاصی می‌باشد، لذا افزایش تعداد آن‌ها تأثیر کمی بر کاربران موجود دارد. در مورد کابل، با افزایش تعداد مشترکینی که قرارداد ثبت‌نام سرویس اینترنت را امضا می‌کنند، کارایی کاربران موجود دچار افت می‌شود. تنها راه چاره برای اپراتور کابلی آن است که کابل‌های شلوغ را جدا کرده و هر یک از آن‌ها را مستقیماً به یک گره فیبری متصل نماید. انجام این کار سبب صرف زمان و هزینه می‌شود، بنابراین تنگنمایی در کسب و کار برای عدم انجام این کار وجود دارند.

در حاشیه اشاره می‌کنیم که تاکنون سیستم دیگری را مطالعه کرده‌ایم که همانند کابل، کانال اشتراکی دارد: سیستم تلفن موبایل. در این‌جا هم گروهی از کاربران — که می‌توانیم آن‌ها را هم‌سلولی بنامیم — در مقدار ثابتی از پهنای باند، شریک هستند. در مورد ترافیک صوتی، که نسبتاً یکنواخت است، پهنای باند به شکلی سخت‌گیرانه و با استفاده از FDM و TDM به قطعات بزرگ ثابتی، در میان مشتریان فعال تقسیم می‌شود. اما برای ترافیک داده، این گونه تقسیم کردن سخت‌گیرانه بسیار ناکارآمد است زیرا کاربران داده به تناوب بی‌کار هستند و در این حالت پهنای باندی که برای آن‌ها رزرو شده، تلف می‌شود. بنابراین همان‌طور که در مورد اتصال کابلی داشتیم، در این مورد نیز از ابزار پویاتری استفاده می‌شود تا تخصیص پهنای باند به صورت اشتراکی انجام گیرد.

دسترس‌پذیری هم مبحثی است که ADSL و کابل در مورد آن تفاوت دارند. هر کسی یک تلفن دارد، اما همه‌ی کاربران به اندازه‌ی کافی به دفاتر پایانی‌شان نزدیک نیستند تا بتوانند یک ADSL

بگیرند و به‌علاوه همه کابل ندارند. اما اگر شما کابل داشته باشید و شرکت کابلی مربوطه هم دسترسی به اینترنت را فراهم کند، می‌توانید سرویس بگیرید. فاصله تا گره‌ی فیبری یا اتصال آغازین، مهم نیست. این مورد نیز شایان توجه است که چون استفاده از کابل ابتدا به عنوان یک رسانه‌ی پخش تلویزیونی آغاز شده است، لذا تعداد کمی از صاحبان کسب و کار کابل دارند.

به عنوان یک رسانه‌ی نقطه - به - نقطه، ADSL ذاتاً ایمن‌تر از کابل است. هر یک از کاربران کابلی با رفتن به سراغ کابل، به راحتی می‌تواند تمام بسته‌ها را بخواند. به همین دلیل، هر فراهم کننده‌ی کابلی پاک‌نهادی، کل ترافیک را در هر دو جهت رمزگذاری می‌کند. معه‌ذا باز هم به لحاظ رعایت امنیت، بهتر است همسایه‌تان اصلاً چیزی دریافت نکند، حتی پیغام‌های رمزگذاری شده‌ی شما را.

سیستم تلفن عمدتاً اتکاپذیری بیشتری نسبت به کابل دارد. به عنوان مثال، این سیستم دارای نیروی الکتریسیته‌ی پشتیبان است و حتی در صورت قطع برق، کارش را به صورت عادی ادامه می‌دهد. در روش کابلی در صورتی که برق ورودی به هر یک از تقویت‌کننده‌ها در زنجیره، دچار خرابی شود، همه‌ی کاربران جریان پایین‌دستی بلافاصله قطع می‌شوند.

و سرانجام آن‌که، اغلب فراهم‌کنندگان ADSL یک گزینه‌ی ISP هم ارائه می‌دهند. بعضی مواقع حتی قانوناً ناچارند این کار را انجام دهند. درحالی‌که چنین چیزی همیشه هم در اپراتورهای کابلی وجود ندارد.

نتیجه آن‌که، ADSL و کابل بیش از آن‌که متفاوت باشند، مشابهند. آن‌ها سرویس قابل مقایسه‌ای را ارائه می‌دهند و همین طور که رقابت میان آن‌ها گرم‌تر می‌شود، احتمالاً هزینه‌ی آن‌ها هم قابل مقایسه با هم خواهد شد.

۹-۲ خلاصه

لایه‌ی فیزیکی مبنای همه‌ی شبکه‌هاست. طبیعت دو محدودیت اصلی را به تمام کانال‌ها تحمیل می‌کند و همین امر، پهنای باند آن‌ها را تعیین می‌نماید. این محدودیت‌ها عبارتند از حد ناپیکوئیست که در ارتباط با کانال‌های فاقد نویز است، و حد شانون که مربوط به کانال‌های دارای نویز می‌باشد.

رسانه‌ی انتقال می‌تواند هدایت شده باشد و یا هدایت نشده. رسانه‌های اصلی در نوع هدایت شده عبارتند از زوج سیم به هم تابیده، کابل کواکسیال، و فیبرهای نوری. رسانه‌های هدایت نشده شامل امواج رادیویی زمینی، مایکروویو، فروقرمز، لیزرهای گذرنده از هوا، و ماهواره‌ها می‌باشند.

روش‌های تلفیق‌سازی دیجیتال، بیت‌ها را از طریق رسانه‌ی هدایت شده و هدایت نشده، به صورت سیگنال‌های آنالوگ ارسال می‌کنند. کدهای خطی در باند پایه عمل کرده و سیگنال‌ها می‌توانند با تلفیق کردن یک حامل با "دامنه"، "فرکانس"، و "فاز"، در باند عبوری گذاشته شوند. کانال‌ها می‌توانند از طریق تسهیم به روش تقسیم "زمان"، "فرکانس"، و "کد"، میان کاربران به اشتراک گذاشته شوند.

در اغلب شبکه‌های پهناور، عنصر کلیدی عبارت‌است از سیستم تلفن. مؤلفه‌های اصلی آن، حلقه‌های محلی، مسیرهای اصلی، و سوئیچ‌ها هستند. دستگاه ADSL به وسیله‌ی تقسیم حلقه‌ی محلی به زیر-حامل‌های متعددی که به صورت موازی کار می‌کنند، سرعت‌های تا 40 Mbps را از طریق حلقه‌ی محلی ارائه می‌دهد. این مقدار بسیار بیش از نرخ‌های مودم‌های تلفنی است. شبکه‌های PON فیبر را تا منزل می‌رسانند تا نرخ‌های دسترسی‌ای حتی بزرگ‌تر از ADSL را ارائه دهند.

مسیرهای اصلی، اطلاعات دیجیتال را حمل می‌کنند. آن‌ها با WDM تسهیم می‌شوند تا تعداد زیادی پیوند با ظرفیت بالا از طریق فیبرهای مستقل، فراهم نمایند. همچنین با TDM نیز تسهیم می‌شوند تا هر یک از پیوندهای با نرخ بالا را میان کاربران، به اشتراک بگذارند. هر دو نوع سوئیچینگ مداری و سوئیچینگ بسته از اهمیت برخوردارند.

برای کاربردهای در حال حرکت، سیستم تلفن ثابت مناسب نمی‌باشد. تلفن‌های موبایل در حال حاضر به طور گسترده‌ای برای صوت، و به صورت روزافزون برای داده، استفاده می‌شوند. این تلفن‌ها سه نسل را طی کرده‌اند. نسل اول یعنی 1G، آنالوگ و تحت سلطه‌ی AMPS بود. نسل دوم، یعنی 2G، دیجیتال بود و همراه با GSM به سرعت رایج‌ترین سیستم تلفن موبایل در دنیا گردید. نسل سوم، یا 3G، دیجیتال و مبتنی بر CDMA باند عریض می‌باشد، همراه با WCDMA و نیز CDMA2000 که هم‌اکنون نصب شده‌اند.

یک سیستم جایگزین برای دسترسی به شبکه، سیستم تلویزیون کابلی است. این سیستم به تدریج از کابل کواکسیال به اختلاط فیبر - کواکس، و همچنین از تلویزیون به تلویزیون و اینترنت، تکامل یافته است. این سیستم توانایی بالقوه برای ارائه‌ی پهنای باند خیلی بالا را دارد، اما چون پهنای باند اشتراکی است، در عمل بستگی زیادی به سایر کاربران دارد.

مسائل

۱. ضرایب فوریه را برای تابع $f(t) = t$ ($0 \leq t \leq 1$) محاسبه نمایید.
۲. یک کانال فاقد نویز 8-kbps ای، هر ۱ میلی‌ثانیه یک بار نمونه‌برداری می‌شود. نرخ داده‌ی بیشینه‌ی آن چقدر است؟
۳. اگر یک سیگنال دودویی از طریق یک کانال 3-kHz ای ارسال شود که نسبت سیگنال - به - نویز آن ۲۰ دسی‌بل است، به چه نرخ داده‌ی بیشینه‌ای می‌توان دست یافت؟
۴. چه نرخ سیگنال - به - نویز برای قرار دادن یک حامل T1 بر روی یک خط 100-kHz ای لازم است؟
۵. مزایای فیبرهای نوری نسبت به مس، به عنوان رسانه‌ی انتقال کدام‌ها هستند؟ آیا هیچ زبانی در استفاده از فیبرهای نوری به جای مس وجود دارد؟

۶. در طیف 0.1 میکرون، در طول موج 1 میکرون، چقدر پهنای باند وجود دارد؟
۷. مطلوب است ارسال دنباله‌ای از تصاویر کامپیوتری از طریق یک فیبر نوری. صفحه‌نمایش 1200×1920 پیکسل است و هر پیکسل از ۲۴ بیت تشکیل شده است. تعداد ۵۰ تصویر در هر ثانیه وجود دارند. چه مقدار پهنای باند مورد نیاز است؟
۸. آیا نظریه‌ی نایکوئیست در مورد فیبر نوری تک - حالت (Single mode) با کیفیت بالا هم صحت دارد یا فقط برای سیم مسی صحیح است؟
۹. در شکل ۲-۷، باند سمت چپ باریک‌تر از بقیه است. چرا؟
۱۰. آنتن‌های رادیویی غالباً در شرایطی که قطر آنتن مساوی با طول موج موج رادیویی باشد، بهترین عملکرد را دارند. قطر آنتن‌های قابل قبول، از ۱ سانتی‌متر تا ۵ متر است. این محدوده‌ی قطر، چه محدوده‌ی فرکانسی را پوشش می‌دهند؟
۱۱. هنگامی که دو پرتو به میزان ۱۸۰ درجه از فاز خارج شوند، محوشدگی چندمسیره به بیشترین مقدارش می‌رسد. برای بیشینه کردن محوشدگی در یک پیوند مایکروویو 1-GHz ای به طول ۵۰ کیلومتر، چه مقدار تفاوت در مسیر مورد نیاز است؟
۱۲. یک پرتو لیزر با عرض ۱ میلی‌متر به طرف یک آشکارساز با عرض ۱ میلی‌متر که ۱۰۰ متر از آن فاصله دارد، و بر بام یک ساختمان است، نشانه گرفته شده. حداکثر انحراف زاویه (بر حسب درجه) چقدر باشد تا لیزر به خطا نرود؟
۱۳. شصت و شش ماهواره‌ای که در پروژه‌ی ایریدیوم، در مدار سطح پایین قرار دارند، به شش گلوبند در پیرامون زمین تقسیم می‌شوند. در ارتفاعی که آن‌ها استفاده می‌کنند، دوره‌ی تناوب برابر با ۹۰ دقیقه است. متوسط فاصله برای انجام عمل دست - به - دست کردن، برای یک فرستنده‌ی ساکن چقدر است؟
۱۴. ماهواره‌ای را در نظر آورید که در ارتفاع ماهواره‌های همگرد با زمین قرار دارد ولی صفحه‌ی مداری آن با صفحه‌ی استوا به اندازه‌ی یک زاویه‌ی Φ ، شیب دارد. آیا برای یک کاربر ساکن در سطح زمین و در عرض جغرافیایی Φ ، این ماهواره در آسمان به نظر بی‌حرکت خواهد رسید؟ اگر نه، حرکت آن را توصیف نمایید.
۱۵. زمان گذار آنها - به - انتها را برای یک بسته در مورد ماهواره‌های GEO (ارتفاع: ۳۵,۰۰۰ کیلومتر)، MEO (ارتفاع: ۱۸,۰۰۰ کیلومتر) و LEO (ارتفاع: ۷۵۰ کیلومتر) حساب نمایید.
۱۶. دیرکرد یک تماس که از قطب شمال آغاز شده، تا رسیدن به قطب جنوب چقدر است، با این فرض که تماس با استفاده از ماهواره‌های ایریدیوم مسیریابی شود. فرض کنید زمان سوئیچینگ در ماهواره‌ها برابر با ۱۰ میکروثانیه و شعاع زمین ۶۳۷۱ کیلومتر است.

۱۷. کمترین پهنای باند مورد نیاز برای دستیابی به نرخ داده‌ی B بیت بر ثانیه چقدر است؟ با فرض آن که سیگنال با استفاده از کدگذاری NRZ، MLT-3، و منچستر انتقال یابد. توضیح دهید.

۱۸. یک سیستم تلفن ساده، از دو دفتر پایانی و یک دفتر عوارضی واحد تشکیل می‌شود، به طوری که هر یک از دو دفتر پایانی به وسیله‌ی یک مسیر اصلی کاملاً - دوسویه‌ی 1-MHz ای، به دفتر عوارضی متصل می‌شوند. میانگین تلفن مورد استفاده، عبارت‌است از ۴ تماس در ۸ ساعت، در روزهای کاری. متوسط طول تماس، ۶ دقیقه است. ده درصد از تماس‌ها، راه دورند (به عبارت دیگر، از دفتر عوارضی عبور می‌کنند). بیشترین تعداد تلفن‌هایی که یک دفتر پایانی می‌تواند حمایت نماید، چندان‌است؟ (با فرض 4 kHz در هر مدار). توضیح دهید چرا یک شرکت تلفن ممکن است نسبت به این تعداد بیشینه در دفتر پایانی، تصمیم به حمایت از تعداد کمتری تلفن بگیرد.

۱۹. آیا یک خط لوله‌ی نفتی، یک سیستم یک‌سویه است، یا یک سیستم نیمه - دوسویه، یا کاملاً - دوسویه، و یا هیچ کدام؟ در مورد یک رودخانه، یا یک ارتباط از نوع واک - تاکی (Walkie-talkie) چگونه؟

۲۰. هزینه‌ی یک ریزپردازنده‌ی سریع، آن قدر سقوط کرده که اکنون امکان قرار دادن یک ریزپردازنده در هر مودم وجود دارد. این امر چقدر در اداره‌ی خطاهای خط تلفن تأثیر دارد؟ آیا این موضوع، نیاز به کنترل / تصحیح خطا در لایه‌ی ۲ را برطرف می‌سازد؟

۲۱. یک نمودار منظومه‌ای مودم، شبیه به شکل ۲-۲۳، دارای نقاط داده در $(0, 1)$ و $(0, 2)$ است. آیا این مودم از تلفیق‌سازی فاز استفاده می‌کند یا از تلفیق‌سازی دامنه؟

۲۲. اگر نرخ باود، ۲۴۰۰ باشد و از هیچ تصحیح خطایی استفاده نشود، بیشترین نرخ بیت قابل دستیابی در مودم استاندارد V.32 چقدر است؟

۲۳. در یک نمودار منظومه‌ای، تمام نقاط بر روی دایره‌ای به مرکز مبدأ قرار گرفته‌اند. از چه نوع تلفیق‌سازی استفاده می‌شود؟

۲۴. یک سیستم ADSL که از DMT استفاده می‌کند، ۳/۴ از کانال‌های داده‌ای قابل دسترسی را برای پیوند پایین‌دستی تخصیص می‌دهد. این سیستم از تلفیق‌سازی QAM-64 بر روی هر کانال استفاده می‌کند. ظرفیت پیوند پایین‌دستی چقدر است؟

۲۵. ده سیگنال که هر یک نیاز به ۴۰۰۰ هرتز دارند، با استفاده از FDM به یک کانال واحد تسهیم می‌شوند. کمترین پهنای باند لازم برای کانال تسهیم شده چقدر است؟ پهنای باندهای محافظ را ۴۰۰ هرتز در نظر بگیرید.

۲۶. چرا زمان نمونه‌برداری PCM در ۱۲۵ میکروثانیه تنظیم شده است؟

۲۷. درصدِ سربار بر روی یک حاملِ T1 چقدر است؟ یعنی چند درصد از 1.544 Mbps به کاربرِ پایانی تحویل نمی‌شود؟ تا چه میزانی این امر به درصدِ سربار در خطوط OC-1 یا OC-768 مربوط است؟

۲۸. نرخ داده‌ی بیشینه‌ی یک کانالِ فاقد نویز 4-kHz ای را در دو حالتِ زیر مقایسه نمایید:

الف. کدگذاریِ آنالوگ (یعنی QPSK) با ۲ بیت در هر نمونه.

ب. سیستم T1 PCM.

۲۹. اگر یک سیستمِ حامل T1 مرتکب اشتباه شده و خطِ سیرش را گم کند، سعی می‌کند با پیدا کردنِ اولین بیتِ هر قاب، مجدداً همگام گردد. به طور متوسط چند تا قاب می‌بایست بازرسی شوند تا با احتمال 0.001 خطا، مجدداً همگام شود؟

۳۰. چه تفاوتی است مابین بخش جداسازِ یک مودم، و بخشِ کدکننده‌ی یک مدارِ مبدل، البته اگر تفاوتی وجود دارد؟ (در نهایت، هر دو، سیگنال‌های آنالوگ را به دیجیتال تبدیل می‌کنند.)

۳۱. چه مدتی طول می‌کشد تا با استفاده از یک هاب، همان‌طور که در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده، یک فایلِ ۱ گیگابایتی از یک VSAT به VSAT دیگر منتقل گردد؟ فرض کنید پیوندِ بالادستی 1Mbps و پیوندِ پایین‌دستی 7 Mbps است و از مدارِ سوئیچینگ استفاده می‌شود که زمانِ برپایی مدار در آن برابر با 1.2 ثانیه است.

۳۲. در صورتی‌که از سوئیچینگ بسته در مسئله‌ی قبل استفاده شود، زمان انتقال را محاسبه نمایید. اندازه‌ی بسته را 64 KB، تأخیرِ سوئیچینگ در ماهواره و هاب را ۱۰ میکروثانیه، و اندازه‌ی سرآیند بسته را ۳۲ بایت در نظر بگیرید.

۳۳. در شکل ۲-۴۰، نرخ داده‌ی کاربر برای OC-3، برابر با 148.608 Mbps تعیین شده است. نشان دهید که این عدد چگونه می‌تواند از پارامترهای OC-3 SONET به دست آید. مقدارِ مجموع، یعنی SPE، و نرخ‌های داده‌ی کاربر در یک خطِ OC-3072 چقدر است؟

۳۴. پهنای باند در دسترس برای کاربر در یک اتصال OC-12c چقدر است؟

۳۵. سه شبکه‌ی سوئیچی بسته، هر کدام n گره دارند. شبکه‌ی اول دارای توپولوژیِ ستاره با یک سوئیچ مرکزی است، دومی یک حلقه است (حلقه‌ی دوطرفه)، و سومی تمام-متصل (fully interconnected) است یعنی از هر گره به گره‌ی دیگر، سیمی کشیده شده است. مقادیر مربوط به بهترین، میانگین، و بدترین مسیرهای انتقال در پرش‌ها چقدر هستند؟

۳۶. تأخیرِ یک شبکه‌ی سوئیچیِ مداری، و یک شبکه‌ی سوئیچیِ بسته (با بار کم) را در ارسالِ یک پیغام x بیتی، در مسیری با k عدد پرش، با هم مقایسه نمایید. زمان برپاسازیِ مدار برابر با s ثانیه، تأخیر انتشار برابر با d ثانیه در هر پرش، اندازه‌ی بسته p بیت، و نرخ داده b bps هستند. شبکه‌ی

بسته تحت چه شرایطی تأخیر کمتری دارد؟ همچنین شرح دهید که تحت چه شرایطی یک شبکه‌ی سوئیچی بسته نسبت به شبکه‌ی سوئیچی مداری، ارجح است.

۳۷. فرض کنید x بیت از داده‌ی کاربر، از طریق یک مسیر k - پرشی در یک شبکه‌ی سوئیچی بسته، به صورت یک سری بسته در حال انتقال هستند. هر بسته شامل p بیت داده و h بیت سرآیند است، به طوری که $x \gg p + h$ نرخ بیت خطوط، b bps و تأخیر انتشار قابل صرف نظر است. چه مقداری برای p ، تأخیر کل را کمینه می‌کند؟

۳۸. در یک سیستم تلفن موبایل معمولی با سلول‌های شش ضلعی، استفاده‌ی مجدد از یک باند فرکانسی در مجاورت یک سلول، فراموش شده است. اگر ۸۴۰ فرکانس در دسترس باشند، چند فرکانس می‌توانند در یک سلول مفروض، مورد استفاده قرار گیرند؟

۳۹. طرح واقعی سلول‌ها، به ندرت به صورتی که در شکل ۲-۴۵ نشان داده شده، منظم است. حتی شکل سلول‌های مجزا هم معمولاً نامنظم می‌باشد. یک دلیل قابل قبول ارائه دهید که چرا چنین است. چنین شکل‌های بی‌نظمی، چقدر در انتساب فرکانس به هر سلول، تأثیر دارد؟

۴۰. بعضی مواقع وقتی یک کاربر موبایل، محدوده‌ی یک سلول را به طرف سلول دیگر قطع می‌کند، تماس جاری ناگهان قطع می‌شود، حتی اگر تمام فرستنده‌ها و گیرنده‌ها عملکرد کاملاً درستی داشته باشند. چرا؟

۴۱. فرض کنید A ، B ، و C با استفاده از یک سیستم CDMA که دنباله‌های ذره‌ای در آن همانند شکل

۲-۲۸(الف) می‌باشد، همزمان بیت‌های ۰ می‌فرستند. دنباله‌ی ذره‌ای حاصل چه خواهد بود؟

۴۲. در بحث پیرامون تعامد در دنباله‌های ذره‌ای CDMA، چنین بیان شد که اگر $\mathbf{S} \cdot \mathbf{T} = 0$ باشد، آنگاه $\mathbf{S} \cdot \bar{\mathbf{T}}$ نیز ۰ خواهد بود. آن را ثابت کنید.

۴۳. روشی متفاوت را در نگاه نسبت به ویژگی تعامد در دنباله‌ی ذره‌ای CDMA، در نظر بگیرید. به این ترتیب که هر بیت در یک زوج - دنباله، می‌تواند جور باشد (match) یا جور نباشد. ویژگی تعامد را بر حسب جور بودن‌ها و جور نبودن‌ها، بیان نمایید.

۴۴. یک دریافت کننده‌ی CDMA، این ذره‌ها را گرفته است: $(+1 +1 -3 -1 -1 -3 +1 +1)$. با فرض دنباله‌های ذره‌ای تعریف شده در شکل ۲-۲۸(الف)، چه ایستگاه‌هایی فرستنده بوده‌اند، و هر کدام چه بیت‌هایی را ارسال کرده‌اند؟

۴۵. در شکل ۲-۲۸، چهار ایستگاه وجود دارند که توانایی فرستادن دارند. فرض کنید که چهار ایستگاه دیگر هم اضافه شوند. دنباله‌های ذره‌ای این ایستگاه‌ها را به دست آورید.

۴۶. سیستم تلفن در انتهای مسیر پایین دستی، به شکل ستاره است، به طوری که همه‌ی حلقه‌های محلی که در همسایگی هستند، بر روی یک دفتر پایانی، به همگرایی رسیده‌اند. برعکس، تلویزیون کابلی از یک کابل طولانی تشکیل شده که مسیرش را با گذشتن از تمام منازل که در یک همسایگی قرار

دارند، طی می‌کند. فرض کنید که در آینده، تلویزیون کابلی به جای مس، فیبر 10-Gbps ای داشته باشد. آیا می‌تواند برای شبیه‌سازی مدلی تلفنی که در آن هر فردی دارای خط خصوصی خودش به دفتر پایانی است، مورد استفاده قرار گیرد؟ اگر چنین است، چند منزل تک - تلفنی می‌توانند به یک فیبر وصل شوند؟

۴۷. یک سیستم تلویزیون کابلی دارای ۱۰۰ کانال تجاری می‌باشد که تمام آن‌ها، برنامه‌ها و آگهی‌ها را به صورت نوبتی پخش می‌کنند. آیا این سیستم بیشتر شبیه به TDM است یا FDM؟

۴۸. یک شرکت کابلی تصمیم می‌گیرد تا دسترسی به اینترنت را، از طریق کابل در یک همسایگی مشتمل بر ۵۰۰۰ منزل، تأمین نماید. این شرکت از یک کابل کواکسیال استفاده می‌کند و طیف تخصیص یافته به آن، اجازه‌ی پهنای باند پایین‌دستی معادل 100 Mbps را به ازای هر کابل می‌دهد. این شرکت، به منظور جلب مشتری، تصمیم می‌گیرد تا پهنای باند پایین‌دستی دست کم 2 Mbps ای را به ازای هر منزل، در هر لحظه، ضمانت نماید. توضیح دهید که این شرکت کابلی برای تأمین این ضمانت، به چه نیاز دارد؟

۴۹. با استفاده از تخصیص طیف نشان داده شده در شکل ۲-۵۲ و اطلاعات داده شده در متن، یک

سیستم کابلی، چند Mbps برای بالادستی و چند تا برای پایین‌دستی تخصیص می‌دهد؟

۵۰. اگر یک شبکه از جهات دیگر بلااستفاده باشد، یک کابل کاربر، با چه سرعتی می‌تواند دریافت داده را انجام دهد؟ فرض کنید که رابط کاربری، موارد زیر باشد:

الف. اترنت 10-Mbps

ب. اترنت 100-Mbps

پ. بی‌سیم 54-Mbps

۵۱. تسهیم چندین جریان داده‌ی STS-1 که شاخه‌های فرعی جریان نام دارند، نقش مهمی در SONET

ایفا می‌کند. یک تسهیم کننده‌ی 3:1، سه شاخه‌ی فرعی STS-1 ورودی را به یک جریان STS-3 خروجی، تسهیم می‌کند. این عمل تسهیم، بابت به بابت انجام می‌شود. به این معنا که اولین سه بابت خروجی، به ترتیب عبارتند از سه بابت اول از شاخه‌های فرعی ۱، ۲، و ۳. سه بابت بعدی، به ترتیب، بابت‌های دوم از شاخه‌های فرعی ۱، ۲، و ۳ هستند و به همین ترتیب تا آخر. برنامه‌ای بنویسید که این تسهیم کننده‌ی 3:1 را شبیه‌سازی کند. برنامه‌ی شما بایستی از پنج پرده تشکیل شده باشد. پرده‌ی اصلی، چهار پرده را تولید می‌کند، یکی به ازای هر یک از سه شاخه‌ی فرعی STS-1 و یکی به عنوان تسهیم کننده. هر پرده‌ی مربوط به شاخه‌ی فرعی، یک قاب STS-1 را از فایل ورودی، به صورت دنباله‌ای از ۸۱۰ بایت می‌خواند. پرده‌ها، قاب‌هایشان را (بابت به بابت) به پرده‌ی تسهیم کننده ارسال می‌کنند. پرده‌ی تسهیم کننده، این بابت‌ها را دریافت کرده و یک

قاب STS-3 را (بایت به بایت) به خروجی می‌دهد، به این صورت که آن را در خروجی استاندارد، می‌نویسد. برای ارتباط میان پردازنده‌ها از خط لوله استفاده کنید.

۵۲. برنامه‌ای برای پیاده‌سازی CDMA بنویسید. فرض کنید که طول یک دنباله‌ی ذره‌ای، هشت و تعداد ایستگاه‌های فرستنده، چهار است. برنامه‌ی شما از سه مجموعه‌ی پردازنده تشکیل می‌شود: چهار پردازنده‌ی فرستنده (t_0, t_1, t_2, t_3)، یک پردازنده‌ی متصل کننده (joiner)، و چهار پردازنده‌ی دریافت کننده (r_0, r_1, r_2, r_3). ابتدا برنامه‌ی اصلی که به عنوان پردازنده‌ی متصل کننده هم عمل می‌کند، چهار دنباله‌ی ذره‌ای را از ورودی استاندارد می‌خواند (این چهار دنباله‌ی ذره‌ای، به شکل نشان‌گذاری دوقطبی^۱ هستند) و یک دنباله‌ی ۴ بیتی (یک بیت به ازای هر پردازنده‌ی فرستنده‌ای که عمل فرستادن را انجام داده است)، و چهار زوج - پردازنده‌های فرستنده و دریافت کننده را در هم ادغام می‌کند. به هر یک از زوج - پردازنده‌های فرستنده / دریافت کننده، یعنی ($t_0, t_1, t_2, t_3; r_0, r_1, r_2, r_3$)، یک دنباله‌ی ذره‌ای انتساب داده می‌شود و به هر پردازنده‌ی فرستنده، ۱ بیت انتساب داده می‌شود (اولین بیت به t_0 ، دومین بیت به t_1 ، و همین‌طور تا آخر). سپس هر یک از پردازنده‌های فرستنده، سیگنالی که باید فرستاده شود را محاسبه می‌کنند (به صورت یک دنباله‌ی ۸ بیتی) و آن را به پردازنده‌ی متصل کننده ارسال می‌کنند. پردازنده‌ی متصل کننده، پس از دریافت سیگنال‌ها از هر چهار پردازنده‌ی فرستنده، سیگنال‌ها را ترکیب کرده و این سیگنال ترکیبی را به چهار پردازنده‌ی دریافت کننده، ارسال می‌نماید. سپس هر یک از پردازنده‌های دریافت کننده، بیتی که دریافت نموده است را محاسبه می‌کند و آن را در خروجی استاندارد، چاپ می‌کند. برای ارتباط میان پردازنده‌ها از خط لوله استفاده کنید.

1. Bipolar notation