

El resultado principal de Shannon es que la tasa de datos máxima de un canal ruidoso cuyo ancho de banda es H Hz y cuya relación señal a ruido es S/N , está dada por

$$\text{número máximo de bits/seg} = H \log_2 (1 + S/N)$$

Por ejemplo, un canal con un ancho de banda de 3000 Hz y con una relación señal a ruido térmico de 30 dB (los parámetros típicos de la parte analógica del sistema telefónico) no puede transmitir más allá de 30,000 bps, sin importar cuántos niveles de señal se utilicen, ni con qué frecuencia se tomen los muestreos. El resultado de Shannon se dedujo aplicando argumentos de la teoría de la información y es válido para cualquier canal sujeto a ruido térmico. Los ejemplos contrarios se deben clasificar en la misma categoría de las máquinas de movimiento perpetuo. Sin embargo, cabe señalar que éste solamente es un límite superior y que los sistemas reales rara vez lo alcanzan.

2.2 MEDIOS DE TRANSMISIÓN GUIADOS

El propósito de la capa física es transportar un flujo de datos puro de una máquina a otra. Es posible utilizar varios medios físicos para la transmisión real. Cada uno tiene su propio nicho en términos de ancho de banda, retardo, costo y facilidad de instalación y mantenimiento. Los medios se clasifican de manera general en medios guiados, como cable de cobre y fibra óptica, y medios no guiados, como radio y láser a través del aire. Analizaremos estos temas en las siguientes secciones.

2.2.1 Medios magnéticos

Una de las formas más comunes para transportar datos de una computadora a otra es almacenarlos en cintas magnéticas o medios extraíbles (por ejemplo, DVDs grabables), transportar físicamente la cinta o los discos a la máquina de destino y leer dichos datos ahí. Si bien este método no es tan avanzado como utilizar un satélite de comunicaciones geosíncrono, con frecuencia es más rentable, especialmente para aplicaciones en las que un ancho de banda alto o el costo por bit transportado es un factor clave.

Un cálculo simple aclarará este punto. Una cinta Ultrium estándar puede almacenar 200 gigabits. Una caja de $60 \times 60 \times 60$ cm puede contener aproximadamente 1000 de estas cintas, con una capacidad total de 200 terabytes, o 1600 terabits (1.6 petabits). Una caja de cintas puede enviarse a cualquier parte de Estados Unidos en 24 horas por Federal Express y otras compañías. El ancho de banda efectivo de esta transmisión es de $1600 \text{ terabits} / 86,400 \text{ seg}$ o 19 Gbps. Si el destino está a sólo una hora por carretera, el ancho de banda se incrementa a casi 400 Gbps. Ninguna red de computadoras puede aprovechar esto.

En el caso de un banco que diariamente tiene que respaldar muchos gigabytes de datos en una segunda máquina (para poder continuar en caso de que suceda alguna inundación o un terremoto), es probable que ninguna otra tecnología de transmisión pueda siquiera acercarse en rendimiento a la cinta magnética. Es cierto que la rapidez de las redes se está incrementando, pero también las densidades de las cintas.

Si vemos ahora el costo, obtendremos un panorama similar. El costo de una cinta Ultrium es de aproximadamente \$40 cuando se compra al mayoreo. Una cinta puede reutilizarse al menos 10 veces, por lo que el costo de la cinta podría ser de \$4000 por caja, por uso. Agreguemos otros \$1000 por el envío (probablemente menos), y tenemos un costo de más o menos \$5000 por almacenar 200 TB. Esto equivale a 3 centavos por cada gigabyte. Ninguna red puede superar esto. La moraleja es:

Nunca subestime el ancho de banda de una camioneta repleta de cintas que va a toda velocidad por la carretera

2.2.2 Par trenzado

Aunque las características del ancho de banda de una cinta magnética son excelentes, las de retardo son pobres. El tiempo de transmisión se mide en minutos u horas, no en milisegundos. Para muchas aplicaciones se necesita una conexión en línea. Uno de los medios de transmisión más viejos, y todavía el más común, es el **cable de par trenzado**. Éste consiste en dos alambres de cobre aislados, por lo regular de 1 mm de grueso. Los alambres se trenzan en forma helicoidal, igual que una molécula de DNA. Esto se hace porque dos alambres paralelos constituyen una antena simple. Cuando se trenzan los alambres, las ondas de diferentes vueltas se cancelan, por lo que la radiación del cable es menos efectiva.

La aplicación más común del cable de par trenzado es en el sistema telefónico. Casi todos los teléfonos están conectados a la compañía telefónica mediante un cable de par trenzado. La distancia que se puede recorrer con estos cables es de varios kilómetros sin necesidad de amplificar las señales, pero para distancias mayores se requieren repetidores. Cuando muchos cables de par trenzado recorren de manera paralela distancias considerables, como podría ser el caso de los cables de un edificio de departamentos que van hacia la compañía telefónica, se suelen atar en haces y se cubren con una envoltura protectora. Los cables dentro de estos haces podrían sufrir interferencias si no estuvieran trenzados. En algunos lugares del mundo en donde las líneas telefónicas se instalan en la parte alta de los postes, se observan frecuentemente dichos haces, de varios centímetros de diámetro.

Los cables de par trenzado se pueden utilizar para transmisión tanto analógica como digital. El ancho de banda depende del grosor del cable y de la distancia que recorre; en muchos casos pueden obtenerse transmisiones de varios megabits/seg, en distancias de pocos kilómetros. Debido a su comportamiento adecuado y bajo costo, los cables de par trenzado se utilizan ampliamente y es probable que permanezcan por muchos años.

Hay varios tipos de cableado de par trenzado, dos de los cuales son importantes para las redes de computadoras. Los cables de par trenzado **categoría 3** consisten en 2 alambres aislados que se trenzan de manera delicada. Cuatro de estos pares se agrupan por lo regular en una envoltura de plástico para su protección. Antes de 1988, la mayoría de los edificios de oficinas tenía un cable de categoría 3 que iba desde un **gabinete de cableado** central en cada piso hasta cada oficina. Este esquema permitió que hasta cuatro teléfonos comunes o dos teléfonos de múltiples líneas en cada oficina se conectaran con el equipo de la compañía telefónica en el gabinete de cableado.

A comienzos de 1988 se introdujeron los cables de par trenzado **categoría 5** más avanzados. Son similares a los de la categoría 3, pero con más vueltas por centímetro, lo que produce una menor diafonía y una señal de mejor calidad a distancias más largas. Esto los hace más adecuados para una comunicación más rápida entre computadoras. Las siguientes son las categorías 6 y 7, que tienen capacidad para manejar señales con anchos de banda de 250 y 600 MHz, respectivamente (en comparación con los 16 y 100 MHz de las categorías 3 y 5, respectivamente).

Todos estos tipos de cableado comúnmente se conocen como **UTP (Par Trenzado sin Blindaje)**, en comparación con los cables de par trenzado costosos, blindados y voluminosos que IBM introdujo a principios de la década de 1980, los cuales no ganaron popularidad fuera de las instalaciones de IBM. En la figura 2-3 se muestra un cableado de par trenzado.



Figura 2-3. (a) UTP categoría 3. (b) UTP categoría 5.

2.2.3 Cable coaxial

Otro medio común de transmisión es el **cable coaxial** (conocido frecuentemente tan sólo como “coax”). Este cable tiene mejor blindaje que el de par trenzado, así que puede abarcar tramos más largos a velocidades mayores. Hay dos clases de cable coaxial que son las más utilizadas. Una clase: el cable de 50 ohms, se usa por lo general para transmisión digital. La otra clase, el cable de 75 ohms, se utiliza comúnmente para la transmisión analógica y la televisión por cable, pero se está haciendo cada vez más importante con el advenimiento de Internet a través de cable. Esta distinción se basa en hechos históricos, más que en técnicos (por ejemplo, las antenas antiguas de dipolos tenían una impedancia de 300 ohms y era fácil utilizar los transformadores adaptadores de impedancia 4:1).

Un cable coaxial consiste en un alambre de cobre rígido como núcleo, rodeado por un material aislante. El aislante está forrado con un conductor cilíndrico, que con frecuencia es una malla de tejido fuertemente trenzado. El conductor externo se cubre con una envoltura protectora de plástico. En la figura 2-4 se muestra una vista en corte por capas de un cable coaxial.

La construcción y el blindaje del cable coaxial le confieren una buena combinación de ancho de banda alto y excelente inmunidad al ruido. El ancho de banda posible depende de la calidad y longitud del cable, y de la relación señal a ruido de la señal de datos. Los cables modernos tienen un ancho de banda de cerca de 1 GHz. Los cables coaxiales solían ser ampliamente usados en el sistema telefónico para las líneas de larga distancia, pero en la actualidad han sido reemplazados por la fibra óptica en rutas de distancias considerables. Sin embargo, el cable coaxial aún se utiliza ampliamente en la televisión por cable y en las redes de área metropolitana.

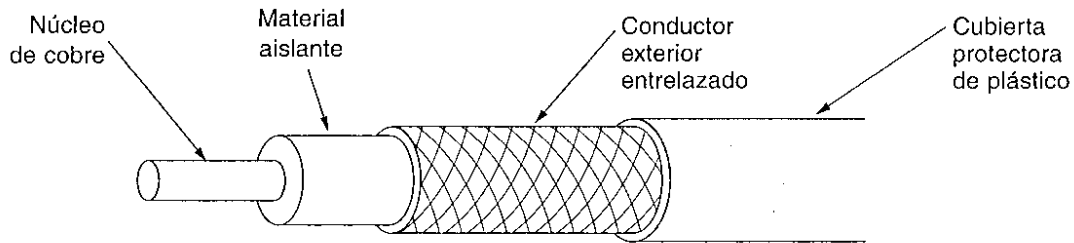


Figura 2-4. Un cable coaxial.

2.2.4 Fibra óptica

Muchas personas de la industria de la computación se enorgullecen de lo rápido que está mejorando la tecnología en esta área. La PC original de IBM (1981) se ejecutaba a una velocidad de reloj de 4.77 MHz. Veinte años más tarde, las PCs pueden correr a 2 GHz, con un factor de ganancia de 20 por década. No está nada mal.

En el mismo periodo, la comunicación de datos de área amplia pasó de 56 kbps (ARPANET) a 1 Gbps (comunicación óptica moderna), con un factor de ganancia de más de 125 por década, y al mismo tiempo la tasa de error pasó de 10^{-5} por bit hasta casi cero.

Además, las CPUs individuales están empezando a aproximarse a límites físicos, como la velocidad de la luz y los problemas de la disipación de calor. En contraste, con la tecnología *actual* de fibras, el ancho de banda alcanzable ciertamente está por encima de los 50,000 Gbps (50 Tbps) y muchas personas se están esforzando arduamente para encontrar mejores tecnologías y materiales. El límite práctico de señalización actual de aproximadamente 10 Gbps se debe a nuestra incapacidad para convertir con mayor rapidez las señales eléctricas a ópticas, aunque en el laboratorio se han alcanzado hasta 100 Gbps en una sola fibra.

En la competencia entre la computación y la comunicación, esta última ganó. La generación de científicos e ingenieros de computación acostumbrados a pensar en términos de los bajos límites de Nyquist y Shannon impuestos por el alambre de cobre aún no ha comprendido todas las implicaciones del ancho de banda prácticamente infinito (aunque no sin un costo). El nuevo sentido común debería ser que todas las computadoras son desesperadamente lentas y que las redes deberían tratar de evitar las tareas de cómputo a cualquier precio, sin importar cuánto ancho de banda se desperdicie. En esta sección analizaremos la fibra óptica para ver cómo funciona esa tecnología de transmisión.

Un sistema de transmisión óptico tiene tres componentes: la fuente de luz, el medio de transmisión y el detector. Convencionalmente, un pulso de luz indica un bit 1 y la ausencia de luz indica un bit 0. El medio de transmisión es una fibra de vidrio ultradelgada. El detector genera un pulso eléctrico cuando la luz incide en él. Al agregar una fuente de luz en un extremo de una fibra óptica y un detector en el otro, se tiene un sistema de transmisión de datos unidireccional que acepta una señal eléctrica, la convierte y transmite mediante pulsos de luz y, luego, reconvierte la salida a una señal eléctrica en el extremo receptor.

Este sistema de transmisión tendría fugas de luz y sería inútil en la práctica excepto por un principio interesante de la física. Cuando un rayo de luz pasa por un medio a otro —por ejemplo, de sílice fundida al aire—, el rayo se refracta (se dobla) en la frontera de la sílice y el aire, como se muestra en la figura 2-5(a). En ella vemos un rayo de luz que incide en la frontera con un ángulo α_1 y que emerge con un ángulo β_1 . El grado de refracción depende de las propiedades de los dos medios (en particular sus índices de refracción). Para ángulos con incidencias mayores de ciertos valores críticos, la luz se refracta nuevamente a la sílice; ninguna parte de él escapa al aire. Por lo tanto, un rayo de luz que incide en un ángulo mayor o igual que el crítico queda atrapado dentro de la fibra, como se muestra en la figura 2-5(b), y se puede propagar por varios kilómetros prácticamente sin pérdida.

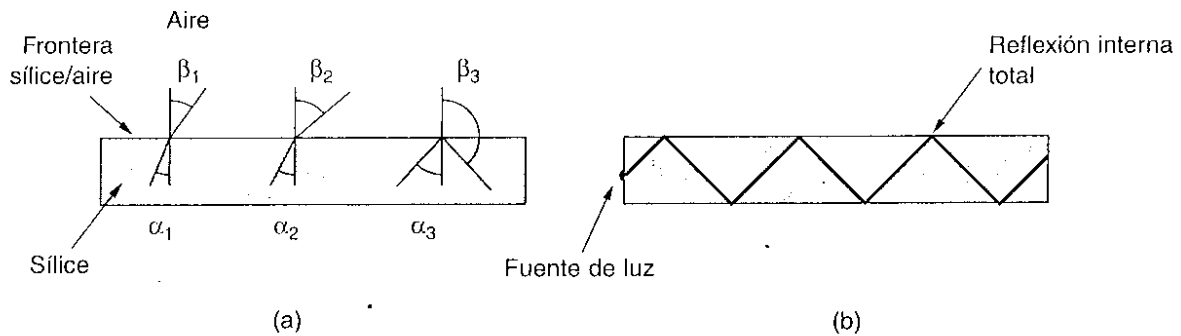


Figura 2-5. (a) Tres ejemplos de un rayo de luz procedente del interior de una fibra de sílice que incide sobre la frontera de la sílice y el aire con diferentes ángulos. (b) Luz atrapada por reflexión interna total.

El diagrama de la segunda figura únicamente muestra un rayo atrapado, pero puesto que cualquier rayo de luz que incida en la frontera con un ángulo mayor que el crítico se reflejará internamente, muchos rayos estarán rebotando con ángulos diferentes. Se dice que cada rayo tiene un **modo** diferente, por lo que una fibra que tiene esta propiedad se denomina **fibra multimodo**.

Por otro lado, si el diámetro de la fibra se reduce a unas cuantas longitudes de onda de luz, la fibra actúa como una guía de ondas y la luz se puede propagar sólo en línea recta, sin rebotar, lo cual da como resultado una **fibra monomodo**. Las fibras monomodo son más caras, pero se pueden utilizar en distancias más grandes. Las fibras monomodo disponibles en la actualidad pueden transmitir datos a 50 Gbps a una distancia de 100 km sin amplificación. En el laboratorio se han logrado tasas de datos todavía mayores a distancias más cortas.

Transmisión de la luz a través de fibra óptica

Las fibras ópticas se hacen de vidrio, que a su vez se fabrica con arena, una materia de bajo costo disponible en cantidades ilimitadas. La fabricación de vidrio era conocida por los antiguos egipcios, pero su vidrio no tenía más de 1 mm de espesor, porque de lo contrario la luz no podía atravesarlo. Durante el Renacimiento se forjó un vidrio suficientemente transparente para utilizarlo en ventanas. El vidrio utilizado para fabricar fibras ópticas modernas es tan transparente que si

el océano estuviera lleno de éste en lugar de agua, el fondo del mar sería tan visible desde la superficie como lo es el suelo desde un avión en un día claro.

La atenuación de la luz dentro del vidrio depende de la longitud de onda de la luz (así como de algunas propiedades físicas del vidrio). En la figura 2-6 se muestra la atenuación para la clase de vidrio que se usa en las fibras, en decibeles por kilómetro lineal de fibra. La atenuación en decibeles está dada por la fórmula:

$$\text{Atenuación en decibeles} = 10 \log_{10} \frac{\text{potencia transmitida}}{\text{potencia recibida}}$$

Por ejemplo, un factor de pérdida de dos da como resultado una atenuación de $10 \log_{10} 2 = 3$ dB. La figura muestra la parte cercana al infrarrojo del espectro, que es la que se utiliza en la práctica. La luz visible tiene longitudes de onda ligeramente más cortas, de 0.4 a 0.7 micras (1 micra es 10^{-6} metros). Los puristas de la métrica se referirían a estas longitudes de onda como 400 nm a 700 nm, pero nosotros nos apegaremos al uso tradicional.

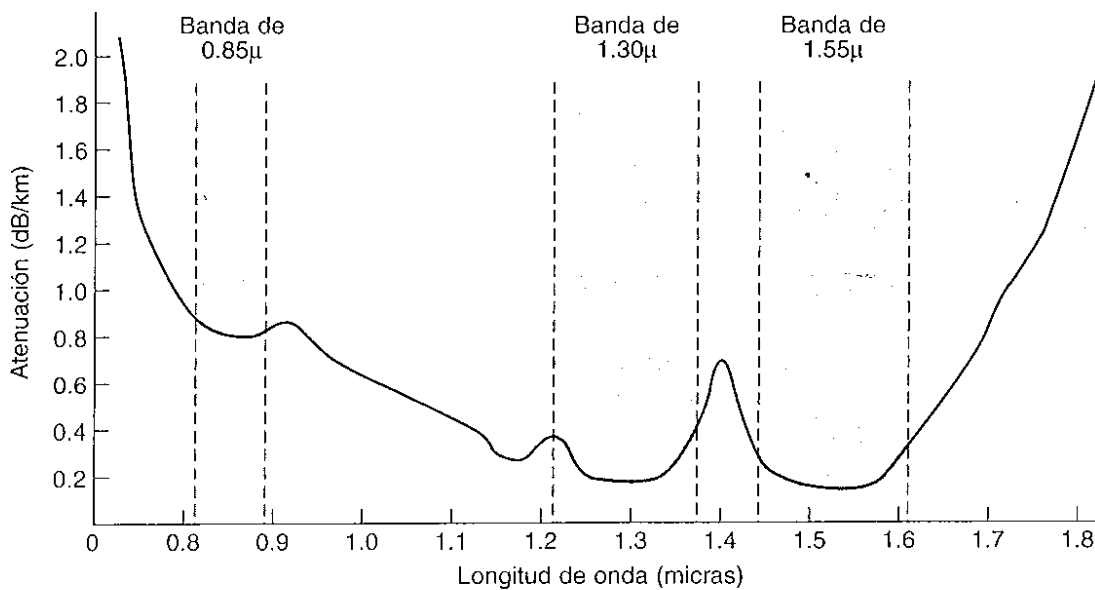


Figura 2-6. Atenuación de la luz dentro de una fibra en la región de infrarrojo.

Para las comunicaciones se utilizan tres bandas de longitud de onda, las cuales se centran en 0.85, 1.30 y 1.55 micras, respectivamente. Las últimas dos tienen buenas propiedades de atenuación (una pérdida de menos de 5% por kilómetro). La banda de 0.85 micras tiene una atenuación más alta, pero a esa longitud de onda, los láseres y los componentes electrónicos se pueden fabricar con el mismo material (arseniuro de galio). Las tres bandas tienen una anchura de entre 25,000 y 30,000 GHz.

La longitud de los pulsos de luz transmitidos por una fibra aumenta conforme se propagan. Este fenómeno se llama **dispersión cromática**. La magnitud de ésta depende de la longitud de

onda. Una forma de evitar que se encimen estos pulsos dispersos es incrementar la distancia entre ellos, pero esto solamente se puede hacer reduciendo la tasa de transmisión. Por fortuna, se ha descubierto que al dar a los pulsos cierta forma especial relacionada con el recíproco del coseno hiperbólico, casi todos los efectos de la dispersión se disipan y puede ser posible enviar pulsos a miles de kilómetros sin una distorsión apreciable de la forma. Estos pulsos se llaman **solitones**. Se está realizando un enorme esfuerzo de investigación para llevar a la práctica el uso de los solitones.

Cables de fibra

Los cables de fibra óptica son similares a los coaxiales, excepto por el trenzado. La figura 2-7(a) muestra una fibra individual vista de lado. Al centro se encuentra el núcleo de vidrio, a través del cual se propaga la luz. En las fibras multimodo el diámetro es de 50 micras, aproximadamente el grosor de un cabello humano. En las fibras monomodo el núcleo es de 8 a 10 micras.

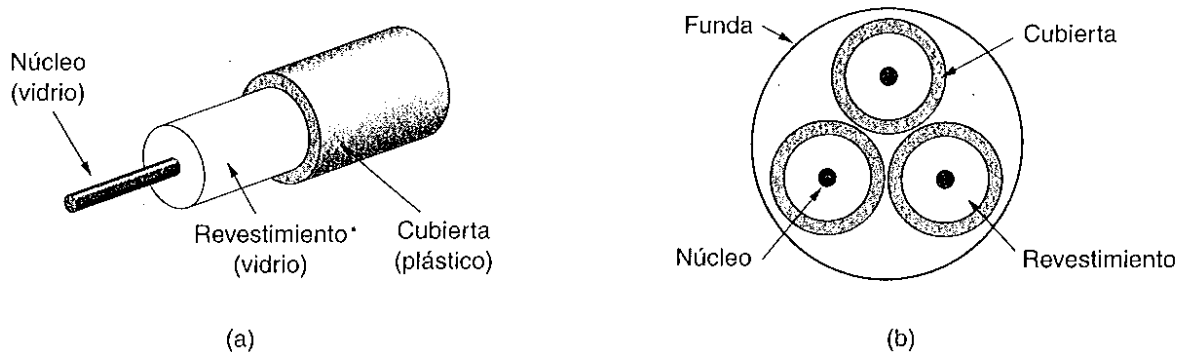


Figura 2-7. (a) Vista de lado de una fibra individual. (b) Vista de extremo de una funda con tres fibras.

El núcleo está rodeado por un revestimiento de vidrio con un índice de refracción menor que el del núcleo, con el fin de mantener toda la luz en este último. A continuación está una cubierta plástica delgada para proteger al revestimiento. Las fibras por lo general se agrupan en haces, protegidas por una funda exterior. La figura 2-7(b) muestra una funda con tres fibras.

Las cubiertas de fibras terrestres por lo general se colocan en el suelo a un metro de la superficie, donde a veces pueden sufrir daños ocasionados por retroexcavadoras o tuzas. Cerca de la costa, las cubiertas de fibras transoceánicas se entierran en zanjas mediante una especie de arado marino. En las aguas profundas, simplemente se colocan al fondo, donde los barcos de arrastre pueden tropezar con ellas o los calamares gigantes pueden atacarlas.

Las fibras se pueden conectar de tres formas diferentes. Primera, pueden terminar en conectores e insertarse en enchufes de fibra. Los conectores pierden entre 10 y 20% de la luz, pero facilitan la reconfiguración de los sistemas.

Segunda, se pueden empalmar de manera mecánica. Los empalmes mecánicos acomodan dos extremos cortados con cuidado, uno junto a otro, en una manga especial y los sujetan en su lugar. La alineación se puede mejorar pasando luz a través de la unión y haciendo pequeños ajustes para maximizar la señal. Personal especializado realiza los empalmes mecánicos en alrededor de cinco minutos, y la pérdida de luz de estos empalmes es de 10%.

Tercera, se pueden fusionar (fundir) dos tramos de fibra para formar una conexión sólida. Un empalme por fusión es casi tan bueno como una sola fibra, pero aun aquí hay un poco de atenuación.

Con los tres tipos de empalme pueden ocurrir reflejos en el punto del empalme, y la energía reflejada puede interferir la señal.

Por lo general se utilizan dos clases de fuente de luz para producir las señales: LEDs (diodos emisores de luz) y láseres semiconductores. Estas fuentes tienen propiedades diferentes, como se muestra en la figura 2-8, y su longitud de onda se puede ajustar mediante la inserción de interferómetros Fabry-Perot o Mach-Zehnder entre la fuente y la fibra. Los interferómetros Fabry-Perot son cavidades simples de resonancia que consisten en dos espejos paralelos. La luz incide de manera perpendicular en los espejos. La longitud de la cavidad separa las longitudes de onda que caben en ella un número entero de veces. Los interferómetros de Mach-Zehnder separan la luz en dos haces. Éstos viajan distancias ligeramente diferentes. Se vuelven a combinar en el extremo y quedan en fase sólo para ciertas longitudes de onda.

Elemento	LED	Láser semiconductor
Tasa de datos	Baja	Alta
Tipo de fibra	Multimodo	Multimodo o monomodo
Distancia	Corta	Larga
Tiempo de vida	Largo	Corto
Sensibilidad a la temperatura	Menor	Considerable
Costo	Bajo	Elevado

Figura 2-8. Comparación de diodos semiconductores y LEDs como fuentes de luz.

El extremo receptor de una fibra óptica consiste en un fotodiodo, el cual emite un pulso eléctrico cuando lo golpea la luz. El tiempo de respuesta típico de un fotodiodo es 1 nseg, lo que limita las tasas de datos a aproximadamente 1 Gbps. El ruido térmico también es un problema, por lo que un pulso de luz debe llevar suficiente potencia para que se pueda detectar. Al hacer que los pulsos tengan suficiente potencia, la tasa de errores puede disminuirse de manera considerable.

Redes de fibra óptica

La fibra óptica se puede utilizar en LANs, así como en transmisiones de largo alcance, aunque conectarse a ellas es más complicado que a una Ethernet. Una forma de superar el problema es reconocer que una red de anillo es en realidad una colección de enlaces punto a punto, como se muestra en la figura 2-9. La interfaz en cada computadora pasa el flujo de pulsos de luz hacia el siguiente enlace y también sirve como unión T para que la computadora pueda enviar y aceptar mensajes.

Se usan dos tipos de interfaz. Una interfaz pasiva consiste en dos derivaciones fusionadas a la fibra principal. Una derivación tiene un LED o un diodo láser en su extremo (para transmitir) y la otra tiene un fotodiodo (para recibir). La derivación misma es pasiva por completo y, por lo

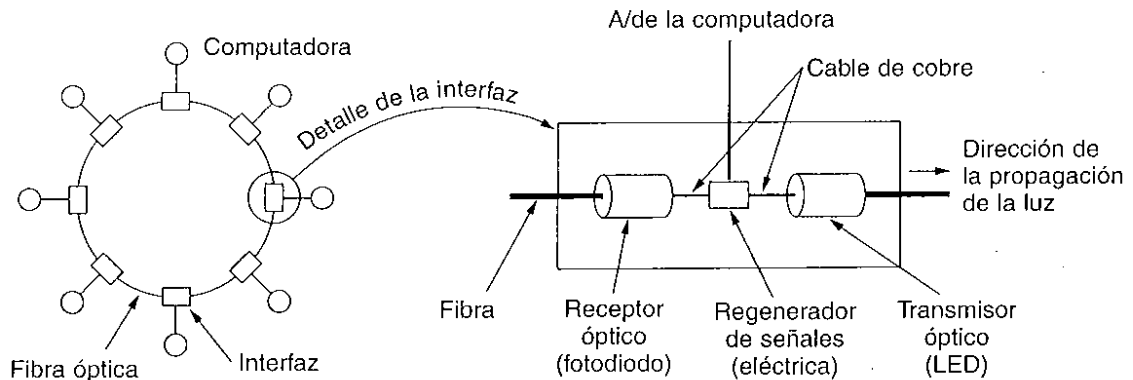


Figura 2-9. Anillo de fibra óptica con repetidores activos.

mismo, es extremadamente confiable pues un LED o un fotodiodo descompuesto no romperá el anillo, sólo dejará fuera de línea a una computadora.

El otro tipo de interfaz, mostrado en la figura 2-9, es el **repetidor activo**. La luz entrante se convierte en una señal eléctrica que se regenera a toda su intensidad si se debilitó y se retransmite como luz. La interfaz con la computadora es un alambre ordinario de cobre que entra en el regenerador de señales. En la actualidad también se usan los repetidores puramente ópticos. Estos dispositivos no requieren las conversiones óptica a eléctrica a óptica, lo que significa que pueden operar con anchos de banda muy altos.

Si falla un repetidor activo, el anillo se rompe y la red se cae. Por otro lado, puesto que la señal se regenera en cada interfaz, los enlaces individuales de computadora a computadora pueden tener una longitud de kilómetros, virtualmente sin un límite para el tamaño total del anillo. Las interfaces pasivas pierden luz en cada unión, de modo que la cantidad de computadoras y la longitud total del anillo se restringen en forma considerable.

La topología de anillo no es la única manera de construir una LAN con fibra óptica. También es posible tener difusión por hardware utilizando la construcción de **estrella pasiva** de la figura 2-10. En este diseño, cada interfaz tiene una fibra que corre desde su transmisor hasta un cilindro de sílice, con las fibras entrantes fusionadas a un extremo del cilindro. En forma similar, las fibras fusionadas al otro extremo del cilindro corren hacia cada uno de los receptores. Siempre que una interfaz emite un pulso de luz, se difunde dentro de la estrella pasiva para iluminar a todos los receptores, con lo que se alcanza la difusión. En efecto, la estrella pasiva combina todas las señales entrantes y transmite el resultado combinado por todas las líneas. Puesto que la energía entrante se divide entre todas las líneas que salen, la cantidad de nodos en la red está limitada por la sensibilidad de los fotodiodos.

Comparación de la fibra óptica y el alambre de cobre

Es instructivo comparar la fibra con el cobre. La fibra tiene muchas ventajas. Para empezar, puede manejar anchos de banda mucho mayores que el cobre. Tan sólo por esto, su uso sería indispensable en redes de alto rendimiento. Debido a la baja atenuación, sólo se necesitan repetidores cada 50 km aproximadamente en líneas largas, contra casi cada 5 km cuando se usa cobre, lo que

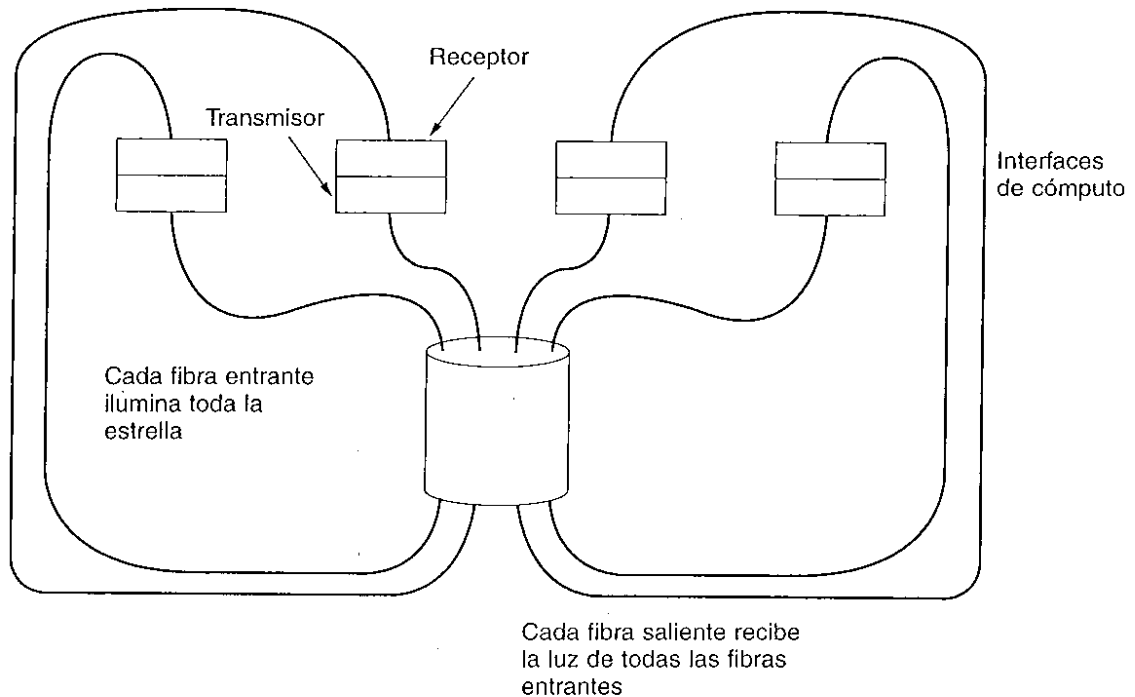


Figura 2-10. Conexión de estrella pasiva en una red de fibra óptica.

implica un ahorro considerable. La fibra también tiene la ventaja de que las sobrecargas de energía, la interferencia electromagnética o los cortes en el suministro de energía no la afectan. Las sustancias corrosivas del ambiente tampoco la afectan, lo que la hace ideal para ambientes fabriles pesados.

A las compañías telefónicas les gusta la fibra por una razón diferente: es delgada y ligera. Muchos conductos de cable existentes están completamente llenos, por lo que no hay espacio para agregar más capacidad. Al eliminar todo el cobre y reemplazarlo por fibra, se vacían los conductos y el cobre tiene un valor de reventa excelente para los refinadores de cobre quienes lo aprecian como materia prima de alta calidad. Además, las fibras son más ligeras que el cobre. Mil cables de par trenzado de 1 km pesan 8000 kg. Dos fibras tienen más capacidad y pesan sólo 100 kg, lo cual reduce de manera significativa la necesidad de sistemas mecánicos de apoyo que tienen que mantenerse. Para las nuevas rutas, la fibra se impone debido a su bajo costo de instalación.

Por último, las fibras no tienen fugas de luz y es difícil intervenirlas y conectarse a ellas. Estas propiedades dan a las fibras una seguridad excelente contra posibles espías.

Su parte negativa consiste en que es una tecnología poco familiar que requiere habilidades de las cuales carece la mayoría de los ingenieros, y en que las fibras pueden dañarse con facilidad si se doblan demasiado. Debido a que la transmisión óptica es unidireccional, la comunicación en ambos sentidos requiere ya sea dos fibras o dos bandas de frecuencia en una fibra. Por último, las interfaces de fibra cuestan más que las eléctricas. No obstante, el futuro de todas las comunicaciones fijas de datos para distancias de más de unos cuantos metros claramente es la fibra. Para un análisis de todos los aspectos de la fibra óptica y sus redes, vea (Hecht, 2001).

2.3 TRANSMISIÓN INALÁMBRICA

En nuestra era han surgido los adictos a la información: gente que necesita estar todo el tiempo en línea. Para estos usuarios móviles, el cable de par trenzado, el cable coaxial y la fibra óptica no son útiles. Ellos necesitan obtener datos para sus computadoras *laptop*, *notebook*, de bolsillo, de mano o de reloj pulsera sin estar limitados a la infraestructura de comunicaciones terrestre. Para estos usuarios, la comunicación inalámbrica es la respuesta. En las siguientes secciones veremos la comunicación inalámbrica en general, y veremos que tiene otras aplicaciones importantes además de proporcionar conectividad a los usuarios que desean navegar por Web desde la playa.

Algunas personas creen que en el futuro sólo habrá dos clases de comunicación: de fibra óptica e inalámbrica. Todos los aparatos fijos (es decir, no móviles): computadoras, teléfonos, faxes, etcétera, se conectarán con fibra óptica; todos los aparatos móviles usarán comunicación inalámbrica.

Sin embargo, la comunicación inalámbrica también tiene ventajas para los dispositivos fijos en ciertas circunstancias. Por ejemplo, si es difícil tender fibras hasta un edificio debido al terreno (montañas, selvas, pantanos, etcétera), podría ser preferible un sistema inalámbrico. Vale la pena mencionar que la comunicación digital inalámbrica moderna comenzó en las islas de Hawai, en donde partes considerablemente grandes del océano Pacífico separaban a los usuarios, y el sistema telefónico era inadecuado.

2.3.1 El espectro electromagnético

Cuando los electrones se mueven crean ondas electromagnéticas que se pueden propagar por el espacio libre (aun en el vacío). El físico británico James Clerk Maxwell predijo estas ondas en 1865 y el físico alemán Heinrich Hertz las observó en 1887. La cantidad de oscilaciones por segundo de una onda electromagnética es su **frecuencia**, f , y se mide en **Hz** (en honor a Heinrich Hertz). La distancia entre dos puntos máximos (o mínimos) consecutivos se llama **longitud de onda** y se designa de forma universal con la letra griega λ (lambda).

Al conectarse una antena del tamaño apropiado a un circuito eléctrico, las ondas electromagnéticas pueden ser difundidas de manera eficiente y ser captadas por un receptor a cierta distancia. Toda la comunicación inalámbrica se basa en este principio.

En el vacío, todas las ondas electromagnéticas viajan a la misma velocidad, no importa cuál sea su frecuencia. Esta velocidad, por lo general llamada **velocidad de la luz**, c , es de aproximadamente 3×10^8 m/seg o de un pie (30 cm) por nanosegundo. En el cobre o en la fibra óptica, la velocidad baja a casi 2/3 de este valor y se vuelve ligeramente dependiente de la frecuencia. La velocidad de la luz es el límite máximo de velocidad. Ningún objeto o señal puede moverse más rápido que la luz.

La relación fundamental entre f , λ y c (en el vacío) es:

$$\lambda f = c \quad (2-2)$$

Puesto que c es una constante, si conocemos el valor de f , podremos encontrar el de λ , y viceversa. Como regla general, cuando λ se expresa en metros y f en MHz, $\lambda f \approx 300$. Por ejemplo, las

ondas de 100 MHz son de aproximadamente 3 metros de longitud, las de 1000 MHz son de 0.3 metros y las ondas de 0.1 metros de longitud tienen una frecuencia de 3000 MHz.

En la figura 2-11 se muestra el espectro electromagnético. Las porciones de radio, microondas, infrarrojo y luz visible del espectro pueden servir para transmitir información modulando la amplitud, frecuencia o fase de las ondas. La luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma serían todavía mejores, debido a sus frecuencias más altas, pero son difíciles de producir y modular, no se propagan bien entre edificios y son peligrosos para los seres vivos. Las bandas que se listan en la parte inferior de la figura 2-11 son los nombres oficiales de la ITU y se basan en las longitudes de onda, de modo que la banda LF va de 1 a 10 km (aproximadamente 30 a 300 kHz). Los términos LF, MF y HF se refieren a las frecuencias baja, media y alta, respectivamente. Como podrá observar, cuando se asignaron los nombres, nadie esperaba que se superarían los 10 MHz, por lo que posteriormente a las bandas más altas se les nombró como bandas VHF (frecuencia muy alta), UHF (frecuencia ultraalta), EHF (frecuencia extremadamente alta) y THF (frecuencia tremendamente alta). No hay más nombres aparte de éstos, pero IHF, AHF y PHF (increíblemente alta frecuencia, asombrosamente alta frecuencia y prodigiosamente alta frecuencia) sonarían bien.

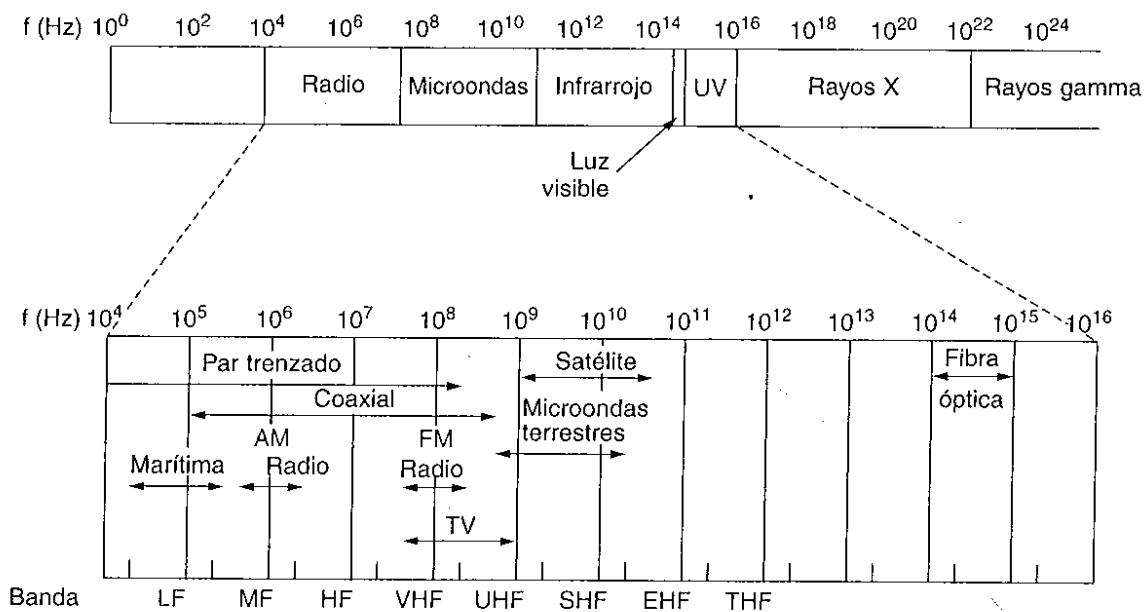


Figura 2-11. El espectro electromagnético y sus usos para comunicaciones.

La cantidad de información que puede transportar una onda electromagnética se relaciona con su ancho de banda. Con la tecnología actual, es posible codificar unos cuantos bits por hertz a frecuencias bajas, pero a frecuencias altas el número puede llegar hasta 8, de modo que un cable coaxial con un ancho de banda de 750 MHz puede transportar varios gigabits/seg. La figura 2-11 debe dejar en claro ahora por qué a la gente de redes le gusta tanto la fibra óptica.

Si resolvemos la ecuación (2-2) para f y la diferenciamos con respecto a λ , obtenemos

$$\frac{df}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2}$$

Si ahora usamos diferencias finitas en lugar de diferenciales y sólo consideramos los valores absolutos, obtenemos

$$\Delta f = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2} \quad (2-3)$$

Por lo tanto, dado el ancho de una banda de longitud de onda, $\Delta\lambda$, podemos calcular la banda de frecuencia correspondiente, Δf , y a partir de ella, la tasa de datos que puede producir la banda. Cuanto más ancha sea ésta, mayor será la tasa de datos. Por ejemplo, considere la banda de 1.30 micras de la figura 2-6. Aquí tenemos $\lambda = 1.3 \times 10^{-6}$ y $\Delta\lambda = 0.17 \times 10^{-6}$, de manera que Δf es de aproximadamente 30 THz. A 8 bits/Hz, obtenemos 240 Tbps.

La mayoría de las transmisiones ocupa una banda de frecuencias estrecha (es decir, $\Delta f/f \ll 1$) a fin de obtener la mejor recepción (muchos watts/Hz). Sin embargo, en algunos casos se utiliza una banda ancha, con dos variaciones. En el **espectro disperso con salto de frecuencia**, el transmisor salta de frecuencia en frecuencia cientos de veces por segundo. Es popular en la comunicación militar debido a que de esta manera es difícil detectar las transmisiones y casi imposible intervenirlas. Ofrece buena resistencia al desvanecimiento por múltiples trayectorias debido a que la señal directa siempre llega primero al receptor. Las señales reflejadas siguen una trayectoria más larga y llegan más tarde. Para ese entonces, tal vez el receptor ya haya cambiado de frecuencia y no acepte señales de la frecuencia anterior, con lo que se elimina la interferencia entre las señales directas y reflejadas. En años recientes, esta técnica también se ha aplicado comercialmente —por ejemplo, tanto 802.11 como Bluetooth la utilizan.

Como nota curiosa, la atractiva austriaca Hedy Lamarr, la primera mujer que apareció desnuda en una película cinematográfica (el filme checoslovaco *Extase* de 1933), colaboró en la invención de esta técnica. Su primer esposo, un fabricante de armamento, le comentó lo fácil que era bloquear las señales de radio, las cuales en ese entonces se utilizaban para controlar los torpedos. Cuando descubrió que su esposo estaba vendiendo armas a Hitler, se horrorizó y se disfrazó de criada para escapar de él rumbo a Hollywood para continuar su carrera como actriz de cine. En su tiempo libre, inventó el salto de frecuencia para ayudar a los aliados en la guerra. Su diseño utilizaba 88 frecuencias, el número de teclas (y frecuencias) de un piano. Por su invento, ella y el compositor de música George Antheil, su amigo, recibieron la patente 2,292,387 de Estados Unidos. Sin embargo, no pudieron convencer a la Marina de Estados Unidos de que su invento era útil y, por lo tanto, nunca recibieron regalías. Años después de que la patente expirara, su invento cobró popularidad.

El otro tipo de espectro disperso, el **espectro disperso de secuencia directa** —el cual dispersa la señal a través una banda de frecuencia ancha—, está ganando popularidad en el mundo comercial. En particular, algunos teléfonos móviles de segunda generación lo utilizan, y dominará en los de tercera generación, gracias a su buena eficiencia espectral, inmunidad al ruido y otras propiedades. Algunas LANs inalámbricas también lo utilizan. Posteriormente volveremos al tema del espectro disperso. Si desea ver una historia fascinante y detallada de las comunicaciones por espectro disperso, vea (Scholtz, 1982).

Por el momento, supondremos que todas las transmisiones utilizan una banda de frecuencia estrecha. Ahora veremos cómo se emplean las distintas partes del espectro electromagnético de la figura 2-11, comenzando por la radio.

2.3.2 Radiotransmisión

Las ondas de radio son fáciles de generar, pueden viajar distancias largas y penetrar edificios sin problemas, y por ello su uso está muy generalizado en la comunicación, tanto en interiores como en exteriores. Las ondas de radio también son omnidireccionales, lo que significa que viajan en todas direcciones a partir de la fuente, por lo que no es necesario que el transmisor y el receptor se encuentren alineados físicamente.

En ocasiones la radio omnidireccional es buena, y en otras no lo es tanto. En la década de 1970, General Motors decidió equipar sus Cadillacs nuevos con frenos antibloqueo controlados por computadora. Cuando el conductor pisaba el pedal del freno, la computadora accionaba los frenos de manera intermitente en lugar de bloquearlos firmemente. Un buen día, un oficial que patrullaba las carreteras de Ohio encendió su nuevo radio móvil para llamar a su cuartel general y, de repente, el Cadillac que iba junto a él empezó a comportarse de manera muy extraña. El oficial le indicó al conductor que se detuviera a un lado del camino y, cuando lo hizo, el conductor alegó que él nada había hecho y que el carro se había vuelto loco.

Con el tiempo empezó a surgir un patrón: los Cadillacs ocasionalmente se comportaban de manera muy extraña, pero sólo en las principales carreteras de Ohio y sólo cuando alguna patrulla de caminos estaba cerca. Durante mucho tiempo General Motors no pudo comprender por qué los Cadillacs funcionaban bien en todos los demás estados e incluso en los caminos secundarios de Ohio. Después de una búsqueda intensa descubrieron que el cableado de los Cadillacs constituía una excelente antena para la frecuencia que usaba el nuevo sistema de radio de las patrullas de caminos de Ohio.

Las propiedades de las ondas de radio dependen de la frecuencia. A bajas frecuencias, esas ondas cruzan bien casi cualquier obstáculo, pero la potencia se reduce de manera drástica a medida que se aleja de la fuente, aproximadamente en proporción a $1/r^2$ en el aire. A frecuencias altas, las ondas de radio tienden a viajar en línea recta y a rebotar en los obstáculos. También son absorbidas por la lluvia. En todas las frecuencias, las ondas de radio están sujetas a interferencia por los motores y otros equipos eléctricos.

Por la capacidad del radio de viajar largas distancias, la interferencia entre usuarios es un problema. Por esta razón, todos los gobiernos reglamentan estrictamente el uso de radiotransmisores, con una excepción, que veremos más adelante.

En las bandas VLF, LF y MF las ondas de radio siguen la curvatura de la Tierra, como se ilustra en la figura 2-12(a). Estas ondas se pueden detectar quizá a 1000 km en las frecuencias más bajas, y a menos en frecuencias más altas. La difusión de radio AM usa la banda MF, y es por ello que las estaciones de radio AM de Boston no se pueden oír con facilidad en Nueva York. Las ondas de radio en estas bandas cruzan con facilidad los edificios, y es por ello que los radios portátiles funcionan en interiores. El problema principal al usar bandas para comunicación de datos es su ancho de banda bajo (vea la ecuación 2-3).

En las bandas HF y VHF, las ondas a nivel del suelo tienden a ser absorbidas por la tierra. Sin embargo, las ondas que alcanzan la ionosfera, una capa de partículas cargadas que rodea a la Tierra a una altura de 100 a 500 km, se refractan y se envían de regreso a nuestro planeta, como se muestra en la figura 2-12(b). En ciertas condiciones atmosféricas, las señales pueden rebotar varias veces. Los operadores de radio aficionados usan estas bandas para conversar a larga distancia. El ejército se comunica también en las bandas HF y VHF.

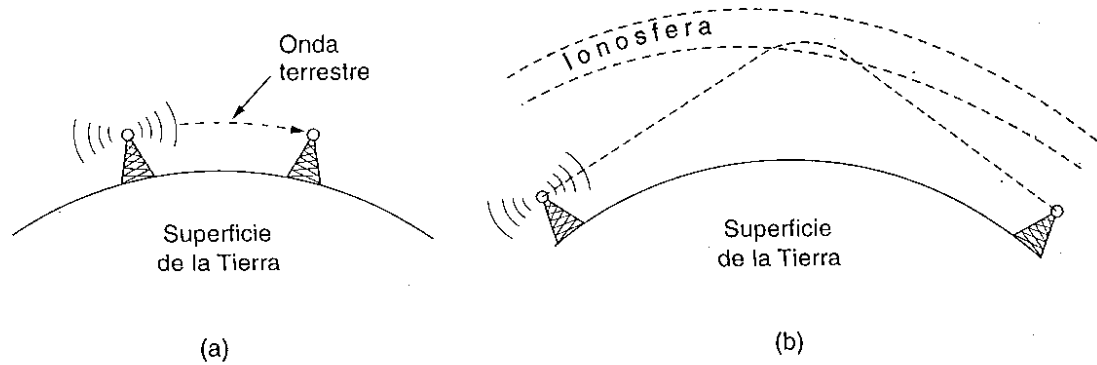


Figura 2-12. (a) En las bandas VLF, LF y MF, las ondas de radio siguen la curvatura de la Tierra. (b) En la banda HF las ondas rebotan en la ionosfera.

2.3.3 Transmisión por microondas

Por encima de los 100 MHz las ondas viajan en línea recta y, por lo tanto, se pueden enfocar en un haz estrecho. Concentrar toda la energía en un haz pequeño con una antena parabólica (como el tan familiar plato de televisión por satélite) produce una relación señal a ruido mucho más alta, pero las antenas transmisora y receptora deben estar bien alineadas entre sí. Además, esta direccionalidad permite que varios transmisores alineados en una fila se comuniquen sin interferencia con varios receptores en fila, siempre y cuando se sigan algunas reglas de espaciado. Antes de la fibra óptica, estas microondas formaron durante décadas el corazón del sistema de transmisión telefónica de larga distancia. De hecho, MCI, uno de los primeros competidores de AT&T después de que esta compañía fue desregularizada, construyó todo su sistema utilizando las comunicaciones mediante microondas que iban de torre en torre ubicadas a decenas de kilómetros una de la otra. Incluso el nombre de la compañía reflejó esto (MCI son las siglas de Microwave Communications, Inc.). Tiempo después, MCI adoptó la fibra y se fusionó con WorldCom.

Ya que las microondas viajan en línea recta, si las torres están muy separadas, partes de la Tierra estorbarán (piense en un enlace de San Francisco a Ámsterdam). Como consecuencia, se necesitan repetidores periódicos. Cuanto más altas sean las torres, más separadas pueden estar. La distancia entre los repetidores se eleva en forma muy aproximada con la raíz cuadrada de la altura de las torres. Con torres de 100 m de altura, los repetidores pueden estar separados a 80 km de distancia.

A diferencia de las ondas de radio a frecuencias más bajas, las microondas no atraviesan bien los edificios. Además, aun cuando el haz puede estar bien enfocado en el transmisor, hay cierta divergencia en el espacio. Algunas ondas pueden refractarse en las capas atmosféricas más bajas y tardar un poco más en llegar que las ondas directas. Las ondas diferidas pueden llegar fuera de fase con la onda directa y cancelar así la señal. Este efecto se llama **desvanecimiento por múltiples trayectorias** y con frecuencia es un problema serio que depende del clima y de la frecuencia. Algunos operadores mantienen 10% de sus canales inactivos como repuesto para activarlos cuando el desvanecimiento por múltiples trayectorias cancela en forma temporal alguna banda de frecuencia.

La creciente demanda de espectro obliga a los operadores a usar frecuencias más altas. Las bandas de hasta 10 GHz ahora son de uso rutinario, pero con las de aproximadamente 4 GHz surge un problema: son absorbidas por el agua. Estas ondas sólo tienen unos centímetros de longitud y la lluvia las absorbe. Este efecto sería útil si se quisiera construir un enorme horno de microondas externo para rostizar a los pájaros que pasen por ahí, pero para la comunicación es un problema grave. Al igual que con el desvanecimiento por múltiples trayectorias, la única solución es interrumpir los enlaces afectados por la lluvia y enrutar la comunicación por otra trayectoria.

En resumen, la comunicación por microondas se utiliza tanto para la comunicación telefónica de larga distancia, los teléfonos celulares, la distribución de la televisión, etcétera, que el espectro se ha vuelto muy escaso. Esta tecnología tiene varias ventajas significativas respecto a la fibra. La principal es que no se necesita derecho de paso; basta con comprar un terreno pequeño cada 50 km y construir en él una torre de microondas para saltarse el sistema telefónico y comunicarse en forma directa. Así es como MCI logró establecerse tan rápidamente como una compañía nueva telefónica de larga distancia. (Sprint siguió un camino totalmente diferente: la fundó el ferrocarril Southern Pacific Railroad, que ya poseía una gran cantidad de derechos de paso, limitándose a enterrar la fibra junto a las vías.)

Las microondas también son relativamente baratas. Erigir dos torres sencillas (podrían ser simplemente postes grandes con cables de retén) y poner antenas en cada una puede costar menos que enterrar 50 km de fibra a través de un área urbana congestionada o sobre una montaña, y también puede ser más económico que rentar la fibra de la compañía de teléfonos, en especial si ésta aún no ha recuperado por completo la inversión hecha por el cobre que quitó cuando instaló la fibra.

Las políticas del espectro electromagnético

Para evitar el caos total, hay acuerdos nacionales e internacionales acerca de quién utiliza cuáles frecuencias. Puesto que todos desean una tasa de transferencia de datos más alta, también desean más espectro. Los gobiernos nacionales asignan espectros para la radio AM y FM, la televisión y los teléfonos móviles, así como para las compañías telefónicas, la policía, la marina, la navegación, la milicia, el gobierno y muchos otros usuarios en competencia. A nivel mundial, una agencia de la ITU-R (WARC) trata de coordinar esta asignación de manera que se puedan fabricar los dispositivos que operan en diversos países. Sin embargo, los países no están atados a las recomendaciones de la ITU-R por lo que la FCC (Comisión Federal de Comunicaciones), que hace la asignación para Estados Unidos, ha rechazado ocasionalmente las recomendaciones de la ITU-R (por lo general, porque estas recomendaciones pedían a algún grupo políticamente poderoso que cediera una parte del espectro).

Incluso cuando una parte del espectro se ha asignado para un uso en particular, como para los teléfonos móviles, existe el aspecto adicional de cuál empresa portadora tiene permitido utilizar cuáles frecuencias. En el pasado se utilizaban tres algoritmos. El más antiguo, llamado **concurso de méritos** (*beauty contest*), requiere que cada empresa portadora explique por qué su propuesta es la que sirve mejor para los intereses públicos. Después los funcionarios del gobierno deciden

cuál de todas esas historias los convence más. Debido a que alguno de estos funcionarios otorgaban propiedad valuada en miles de millones de dólares a la compañía de su preferencia, esto conducía a soborno, corrupción, nepotismo, etcétera. Además, incluso un funcionario escrupulosamente honesto que piense que una compañía extranjera podría hacer mejor trabajo que cualquiera de las nacionales, tiene que dar muchas explicaciones.

Esta observación nos lleva al segundo algoritmo, en el que se realiza un sorteo entre las compañías interesadas. El problema con esta idea es que las compañías que no tienen ningún interés en utilizar el espectro, pueden entrar al sorteo. Por ejemplo, si un restaurante de comida rápida o una cadena de zapaterías gana, puede revender el espectro a una empresa portadora, sacando una ganancia inmensa y sin ningún riesgo.

La concesión de ganancias inesperadas a compañías atentas, aunque aleatorias, ha sido severamente criticada por muchos, lo que nos lleva al algoritmo 3: subastar el ancho de banda al mejor postor. Cuando en el año 2000 Inglaterra subastó las frecuencias necesarias para los sistemas móviles de la tercera generación, esperaba obtener aproximadamente \$4 mil millones. En realidad recibió \$40 mil millones debido a que las empresas portadoras cayeron en la desesperación ante la posibilidad de perder el mercado móvil. Este evento despertó la avaricia de los gobiernos vecinos y los motivó a llevar a cabo sus propias subastas. Funcionó, pero también dejó a algunas empresas portadoras con deudas enormes que ahora las tienen al borde de la bancarrota. Incluso en los mejores casos, les tomará muchos años recuperar la inversión en la licencia.

Un enfoque totalmente diferente para asignar frecuencias es no asignarlas por completo. Tan sólo se deja que todos transmitan a voluntad, pero se regula la potencia utilizada de manera que las estaciones tengan un rango tan corto que no interfieran entre ellas. Por consiguiente, la mayoría de los gobiernos han apartado algunas bandas de frecuencias, llamadas bandas **ISM (industriales, médicas y científicas)** de uso no autorizado. Los dispositivos para abrir puertas de garaje, teléfonos inalámbricos, juguetes controlados por radio, ratones inalámbricos y muchos otros dispositivos inalámbricos domésticos utilizan las bandas ISM. Para minimizar la interferencia entre estos dispositivos no coordinados, la FCC exige que todos los dispositivos que utilizan las bandas ISM utilicen técnicas de espectro disperso. En algunos otros países se aplican reglas similares.

La ubicación de las bandas ISM varía un poco de país a país. Por ejemplo, en Estados Unidos los dispositivos cuya potencia esté debajo de 1 watt, pueden utilizar las bandas que se muestran en la figura 2-13 sin requerir una licencia de la FCC. La banda de 900 MHz funciona mejor, pero está atestada y no está disponible en todo el mundo. La banda de 2.4 GHz está disponible en la mayoría de los países, pero está sujeta a interferencia por parte de los hornos de microondas e instalaciones de radar. Bluetooth y algunas de las LANs inalámbricas 802.11 operan en esta banda. La banda de 5.7 GHz es nueva y no se ha desarrollado del todo, por lo que el equipo que la utiliza es costoso, pero debido a que 802.11 la utiliza, se popularizará con rapidez.

2.3.4 Ondas infrarrojas y milimétricas

Las ondas infrarrojas y milimétricas no guiadas se usan mucho para la comunicación de corto alcance. Todos los controles remotos de los televisores, grabadoras de vídeo y estéreos utilizan comunicación infrarroja. Estos controles son relativamente direccionales, económicos y fáciles de

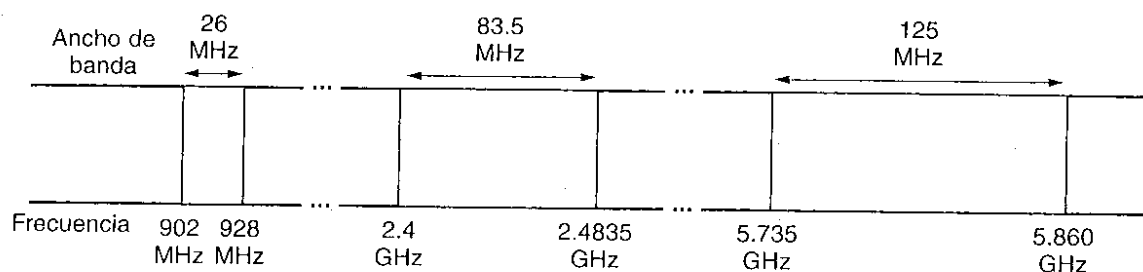


Figura 2-13. Las bandas ISM de Estados Unidos.

construir, pero tienen un inconveniente importante: no atraviesan los objetos sólidos (párese entre su televisor y su control remoto y vea si todavía funciona). En general, conforme pasamos de la radio de onda larga hacia la luz visible, las ondas se comportan cada vez más como la luz y cada vez menos como la radio.

Por otro lado, el hecho de que las ondas infrarrojas no atraviesen bien las paredes sólidas también es una ventaja. Esto significa que un sistema infrarrojo en un cuarto de un edificio no interferirá con un sistema similar en cuartos adyacentes. Por esta razón, la seguridad de estos sistemas contra el espionaje es mejor que la de los sistemas de radio. Además, no es necesario obtener licencia del gobierno para operar un sistema infrarrojo, en contraste con los sistemas de radio, que deben tener licencia afuera de las bandas ISM. La comunicación infrarroja tiene un uso limitado en el escritorio; por ejemplo, para conectar computadoras portátiles e impresoras, aunque no es un protagonista principal en el juego de la comunicación.

2.3.5 Transmisión por ondas de luz

La señalización óptica sin guías se ha utilizado durante siglos. Paul Revere utilizó señalización óptica binaria desde la Iglesia Old North justo antes de su famoso viaje. Una aplicación más moderna es conectar las LANs de dos edificios por medio de láseres montados en sus azoteas. La señalización óptica coherente con láseres es inherentemente unidireccional, de modo que cada edificio necesita su propio láser y su propio fotodetector. Este esquema ofrece un ancho de banda muy alto y un costo muy bajo. También es relativamente fácil de instalar y, a diferencia de las microondas, no requiere una licencia de la FCC.

Sin embargo, la ventaja del láser, un haz muy estrecho, aquí también es una debilidad. Apuntar un rayo láser de 1 mm de anchura a un blanco del tamaño de la punta de un alfiler a 500 m de distancia requiere la puntería de una Annie Oakley moderna. Por lo general, se añaden lentes al sistema para desenfocar ligeramente el rayo.

Una desventaja es que los rayos láser no pueden penetrar la lluvia ni la niebla densa, pero normalmente funcionan bien en días soleados. Sin embargo, en una ocasión el autor asistió a una conferencia en un moderno hotel de Europa en el que los organizadores tuvieron la atención de proporcionar un salón lleno de terminales para que los asistentes leyeran su correo electrónico durante las presentaciones aburridas. Puesto que la PTT local no estaba dispuesta a instalar un gran

número de líneas telefónicas sólo para tres días, los organizadores colocaron un láser en el techo, lo apuntaron al edificio de ciencias de la computación de su universidad, el cual está a unos cuantos kilómetros de allí; lo probaron la noche anterior a la conferencia y funcionó a la perfección. A las 9 a.m. del siguiente día, que era brillante y soleado, el enlace falló por completo y permaneció caído todo el día. Esa noche los organizadores volvieron a probar con mucho cuidado el enlace y de nuevo funcionó a la perfección. El patrón se repitió durante dos días más de forma idéntica.

Después de la conferencia, los organizadores descubrieron el problema. Durante el día, el calor del sol causaba corrientes de convección que se elevaban desde el techo del edificio, como se muestra en la figura 2-14. Este aire turbulento desviaba el rayo y lo hacía danzar alrededor del detector. Una "vista" atmosférica como ésta hace titilar a las estrellas (y es la razón por la cual los astrónomos ponen sus telescopios en las cimas de las montañas, para quedar tan arriba en la atmósfera como sea posible). Este fenómeno es también la causa del aspecto trémulo de las carreteras en un día caluroso y de las imágenes ondulantes cuando se mira sobre un radiador caliente.

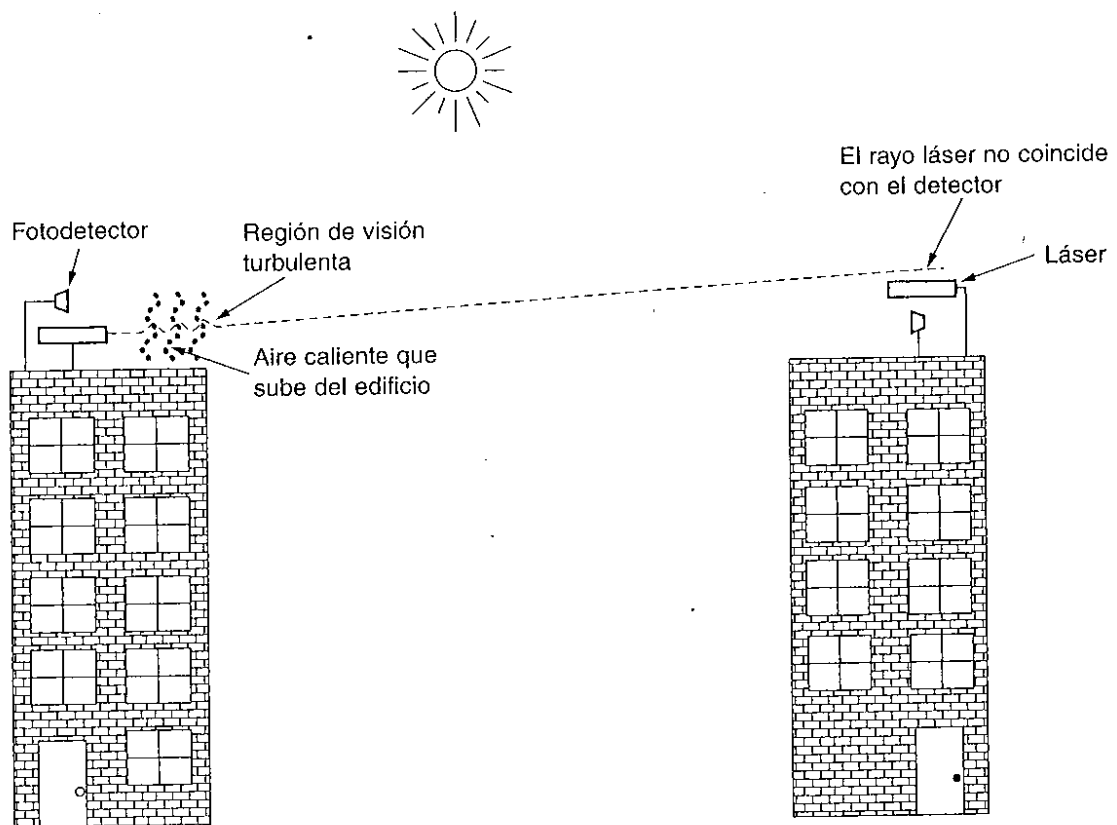


Figura 2-14. Las corrientes de convección pueden interferir los sistemas de comunicación por láser. Aquí se ilustra un sistema bidireccional con dos láseres.

2.4 SATÉLITES DE COMUNICACIONES

En la década de 1950 y principios de la de 1960, hubo intentos por establecer sistemas de comunicación mediante el rebote de señales sobre globos climáticos. Por desgracia, las señales que se recibían eran demasiado débiles para darles un uso práctico. Entonces, la Marina de Estados Unidos descubrió una especie de globo climático en el cielo —la Luna— y desarrolló un sistema de comunicaciones por repetición (o de barco a tierra) que rebotaba señales de él.

Progresos posteriores en el campo de las comunicaciones por el cielo tuvieron que esperar hasta que se lanzó el primer satélite de comunicaciones. La principal diferencia entre un satélite artificial y uno real es que el primero puede amplificar las señales antes de mandarlas de regreso, convirtiendo lo que parecía una idea estafalaria en un poderoso sistema de comunicaciones.

Los satélites de comunicaciones tienen algunas propiedades interesantes que los hacen atractivos para muchas aplicaciones. En su forma más simple, un satélite de comunicaciones se puede considerar como un enorme repetidor de microondas en el cielo. Contiene numerosos **transpondedores**, cada uno de los cuales se encarga de una parte del espectro, amplifica la señal entrante y a continuación la retransmite en otra frecuencia para evitar interferencia con la señal entrante. Los haces pueden ser amplios y cubrir una fracción sustancial de la superficie de la Tierra, o estrechos, y abarcar sólo algunos cientos de kilómetros de diámetro. Este modo de operación se conoce como de **tubo doblado**.

De acuerdo con la ley de Kepler, el periodo orbital de un satélite varía según el radio de la órbita a la $3/2$ potencia. Entre más alto esté el satélite, más largo es el periodo. Cerca de la superficie de la Tierra, el periodo es de aproximadamente 90 minutos. En consecuencia, los satélites con órbitas bajas desaparecen de la vista con bastante rapidez, aunque algunos de ellos son necesarios para proporcionar una cobertura continua. A una altitud de cerca de 35,800 km, el periodo es de 24 horas. A una de 384,000 km, el periodo es cercano a un mes, como puede atestiguar cualquiera que haya observado la Luna con regularidad.

El periodo de un satélite es importante, aunque no es el único punto para determinar dónde colocarlo. Otro aspecto es la presencia de los cinturones de Van Allen, capas de partículas altamente cargadas de energía, atrapadas por el campo magnético de la Tierra. Cualquier satélite que vuele dentro de ellas sería destruido rápidamente por las partículas con una alta carga de energía. Del análisis de estos factores resulta que hay tres regiones para colocar con seguridad los satélites. En la figura 2-15 se muestran estas regiones y algunas de sus propiedades. Enseguida describiremos brevemente los satélites que habitan cada una de estas regiones.

2.4.1 Satélites geoestacionarios

En 1945, el escritor de ciencia-ficción Arthur C. Clarke calculó que un satélite a una altitud de 35,800 km en una órbita ecuatorial circular aparentaría permanecer inmóvil en el cielo, por lo que no sería necesario rastrearlo (Clarke, 1945). Se dio a la tarea de describir un sistema de comunicaciones completo que utilizaba estos (tripulados) **satélites geoestacionarios**, incluyendo

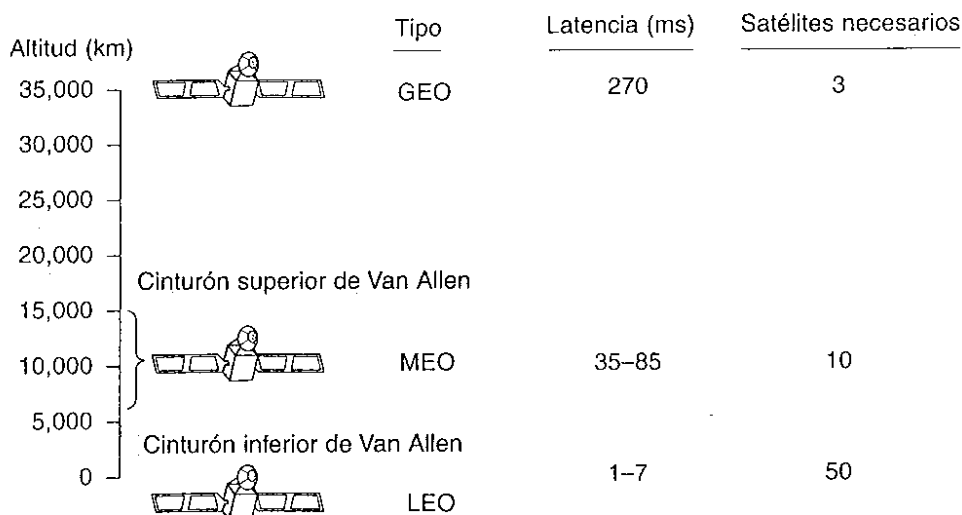


Figura 2-15. Satélites de comunicaciones y algunas de sus propiedades, entre ellas: altitud sobre la Tierra, tiempo de duración de un viaje de ida y vuelta y la cantidad de satélites necesarios para abarcar toda la Tierra.

las órbitas, paneles solares, radiofrecuencias y procedimientos de lanzamiento. Desafortunadamente, llegó a la conclusión de que los satélites no eran prácticos debido a la imposibilidad de poner en órbita amplificadores de tubos catódicos frágiles que consumían una gran cantidad de energía, por lo cual nunca le dio seguimiento a esta idea, aunque escribió algunos relatos de ciencia ficción al respecto.

La invención del transistor cambió las cosas, y el primer satélite de comunicaciones artificial, Telstar, fue lanzado en julio de 1962. Desde entonces, los satélites de comunicaciones se han convertido en un negocio multimillonario y en el único aspecto del espacio exterior altamente rentable. Con frecuencia, a estos satélites que vuelan a grandes alturas se les llama satélites **GEO (Órbita Terrestre Geostacionaria)**.

Con la tecnología actual, es poco aconsejable utilizar satélites geoestacionarios espaciados a menos de dos grados en el plano ecuatorial de 360 grados para evitar interferencia. Con un espaciamiento de dos grados, sólo puede haber $360/2 = 180$ de estos satélites a la vez en el cielo. Sin embargo, cada transpondedor puede utilizar múltiples frecuencias y polarizaciones para incrementar el ancho de banda disponible.

Para evitar el caos total en el cielo, la ITU asigna la posición orbital. Este proceso tiene fuertes connotaciones políticas, y países que apenas están saliendo de la edad de piedra demandan "sus" posiciones orbitales (con el propósito de alquilarlas al mejor postor). No obstante, algunos países sostienen que la propiedad no se extiende a la Luna y que ningún país tiene derechos legales sobre las posiciones orbitales que se encuentran arriba de su territorio. Por si esto no fuera suficiente, las telecomunicaciones comerciales no son la única aplicación. Las compañías televisoras, los gobiernos y la milicia también quieren su tajada del pastel orbital.

Los satélites modernos pueden ser bastante grandes, pesar hasta 4000 kg y consumir varios kilowatts de electricidad producida por paneles solares. La gravedad del Sol, la Luna y los planetas

tiende a desplazar a los satélites de sus órbitas y orientaciones asignadas, efecto contrarrestado por los motores turbo integrados de los satélites. Esta actividad de ajuste se conoce como **control de la posición orbital**. Sin embargo, cuando se termina el combustible de los motores, por lo general a los 10 años, el satélite navega a la deriva y cae sin remedio, por lo cual es necesario desactivarlo. Con el tiempo, la órbita se deteriora y el satélite reingresa a la atmósfera y se incendia o en ocasiones se estrella contra la Tierra.

Las posiciones orbitales no son la única manzana de la discordia. También lo son las frecuencias, debido a que las transmisiones de los enlaces descendentes interfieren con los usuarios de microondas existentes. En consecuencia, la ITU ha asignado bandas de frecuencia específicas a los usuarios de satélites. Las principales se muestran en la figura 2-16. La banda C fue la primera que se destinó al tráfico comercial por satélite. Tiene dos rangos de frecuencia, el inferior para el tráfico descendente o de bajada (proveniente del satélite) y el superior para el tráfico ascendente o de subida (hacia el satélite). Para permitir que el tráfico fluya en ambos sentidos al mismo tiempo, se requieren dos canales, uno para cada sentido. Estas bandas están sobresaturadas debido a que las empresas portadoras también las utilizan para los enlaces de microondas terrestres. Las bandas L y S fueron incorporadas en el año 2000 mediante un acuerdo internacional. No obstante, son estrechas y saturadas.

Banda	Enlace descendente	Enlace ascendente	Ancho de banda	Problemas
L	1.5 GHz	1.6 GHz	15 MHz	Bajo ancho de banda; saturada
S	1.9 GHz	2.2 GHz	70 MHz	Bajo ancho de banda; saturada
C	4.0 GHz	6.0 GHz	500 MHz	Interferencia terrestre
Ku	11 GHz	14 GHz	500 MHz	Lluvia
Ka	20 GHz	30 GHz	3500 MHz	Lluvia, costo del equipo

Figura 2-16. Principales bandas de satélite.

La siguiente banda más ancha disponible para los operadores de telecomunicaciones es la banda Ku (K abajo). Esta banda aún no está saturada, y a estas frecuencias es posible espaciar los satélites a cerca de un grado. No obstante, hay otro problema: la lluvia. El agua es un gran absorbente de estas microondas cortas. La buena noticia es que por lo general las tormentas se confinan a sitios específicos, por lo que el problema se soluciona con la instalación de varias estaciones terrestres con suficiente separación en vez de una sola, al costo de más antenas, cables y aparatos electrónicos que permitan pasar rápidamente de una estación a otra. También se ha asignado ancho de banda para tráfico comercial por satélite en la banda Ka (K arriba), pero el equipo necesario para utilizar esta banda aún es caro. Además de estas bandas comerciales, también hay muchas bandas gubernamentales y militares.

Un satélite moderno tiene alrededor de 40 transpondedores, cada uno con un ancho de banda de 80 MHz. Por lo general, cada transpondedor opera como un tubo doblado, pero algunos satélites recientes tienen capacidad de procesamiento a bordo, lo cual les permite una operación más refinada. La división de los transpondedores en canales era estática en los primeros satélites: el

ancho de banda se dividía simplemente en bandas de frecuencia fija. En nuestros días, cada haz del transpondedor se divide en ranuras temporales, y varios usuarios su turnan para utilizarlo. Más tarde en este mismo capítulo analizaremos en detalle estas dos técnicas (multiplexión por división de frecuencia y multiplexión por división de tiempo).

Los primeros satélites geoestacionarios tenían un solo haz espacial que iluminaba cerca de un tercio de la superficie de la Tierra, al cual se le conoce como **huella**. Con la considerable reducción en precio, tamaño y requerimientos de energía de los componentes microelectrónicos, se ha vuelto posible una estrategia de difusión mucho más refinada. Cada satélite está equipado con múltiples antenas y transpondedores. Cada haz descendente se puede concentrar en un área geográfica pequeña, de tal forma que es posible llevar a cabo simultáneamente una gran cantidad de transmisiones hacia y desde el satélite. Normalmente, estos haces, conocidos como **haces reducidos**, tienen forma elíptica y pueden ser tan pequeños como algunos cientos de kilómetros. Por lo general, un satélite de comunicaciones para los Estados Unidos de América tiene un haz ancho para los 48 estados contiguos y haces reducidos para Alaska y Hawaii.

Un avance reciente en el mundo de los satélites de comunicaciones es el desarrollo de microestaciones de bajo costo, llamadas **VSATs (Terminales de Apertura Muy Pequeña)** (Abramson, 2000). Estas diminutas terminales tienen antenas de un metro o más pequeñas (en comparación con los 10 metros que mide una antena GEO estándar) y pueden producir alrededor de un watt de energía. Por lo general, el enlace ascendente funciona a 19.2 kbps, pero el enlace/descendente funciona con frecuencia a 512 kbps o más. La televisión de difusión directa por satélite utiliza esta tecnología para transmisión unidireccional.

En muchos sistemas VSAT, las microestaciones no tienen suficiente potencia para comunicarse directamente una con la otra (a través del satélite, por supuesto). En vez de ello, como se muestra en la figura 2-17, es necesaria una estación especial en tierra, la **estación central**, que cuenta con una antena grande, para retransmitir el tráfico entre VSATs. En este modo de operación, el emisor o el receptor tienen una antena grande y un amplificador potente. La desventaja es que existe un retardo más prolongado al contar con estaciones de usuario más económicas.

Las VSATs tienen un futuro prometedor en las zonas rurales. Aún no tienen una amplia aceptación, pero más de la mitad de la población del mundo vive a una hora de distancia del teléfono más cercano. El tendido de redes telefónicas a miles de pequeñas poblaciones excede el presupuesto de la mayoría de los gobiernos del tercer mundo, pero lo que sí es factible es la instalación de antenas VSAT de un metro alimentadas por celdas solares. Las VSATs proporcionarán la tecnología que enlazará al mundo.

Los satélites de comunicaciones tienen diversas propiedades radicalmente distintas a las de los enlaces terrestres de punto a punto. Para empezar, aun cuando las señales hacia y desde un satélite viajan a la velocidad de la luz (cerca de 300,000 km/seg), el largo viaje de ida y vuelta provoca un retardo sustancial para los satélites GEO. Dependiendo de la distancia entre el usuario y la estación terrestre, así como de la elevación del satélite en el horizonte, el tiempo de tránsito de un extremo al otro es de entre 250 y 300 mseg. Un valor común es de 270 mseg (540 mseg para un sistema VSAT con una estación central).

Con propósitos de comparación, los enlaces terrestres de microondas tienen un retardo de propagación de casi 3 μ seg/km, en tanto que los enlaces de cable coaxial o la fibra óptica tienen un

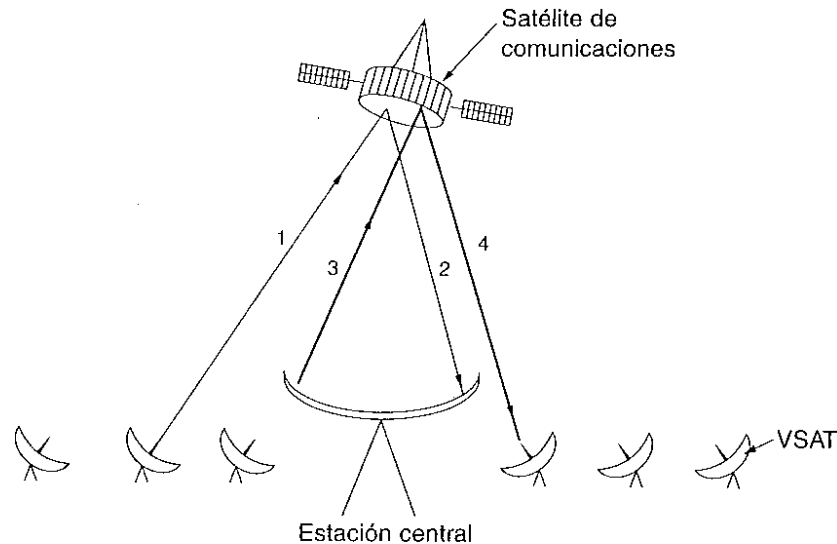


Figura 2-17. VSATs con una estación central.

retardo de aproximadamente 5 $\mu\text{seg}/\text{km}$. El último es más lento que el primero debido a que las señales electromagnéticas viajan más rápido en el aire que en materiales sólidos.

Otra propiedad importante de los satélites es que son esencialmente medios de difusión. No cuesta más enviar un mensaje a miles de estaciones dentro de la huella de un transpondedor de lo que cuesta enviarlo a una sola estación. Esta propiedad es muy útil para algunas aplicaciones. Por ejemplo, es posible que un satélite difunda páginas Web populares a los cachés de una gran cantidad de computadoras diseminadas en un área amplia. Aun cuando la difusión se puede simular con líneas punto a punto, la difusión por satélite es mucho más económica. Por otro lado, los satélites son un verdadero desastre en el aspecto de seguridad y privacidad: cualquiera puede escuchar todo. La encriptación es esencial cuando se requiere seguridad.

Los satélites también tienen la propiedad de que el costo de transmitir un mensaje es independiente de la distancia que se recorra. Una llamada al otro lado del océano tiene el mismo costo que una al otro lado de la calle. Los satélites también cuentan con excelentes tasas de error y se pueden desplegar de manera casi instantánea, un aspecto importante para las comunicaciones militares.

2.4.2 Satélites de Órbita Terrestre Media

Los satélites **MEO (Órbita Terrestre Media)** se encuentran a altitudes mucho más bajas, entre los dos cinturones de Van Allen. Vistos desde la Tierra, estos satélites se desplazan lentamente y tardan alrededor de seis horas para dar la vuelta a la Tierra. Por consiguiente, es necesario rastrearlos conforme se desplazan. Puesto que son menores que los GEO, tienen una huella más pequeña y se requieren transmisores menos potentes para alcanzarlos. Hoy en día no se utilizan para telecomunicaciones, por lo cual no los examinaremos aquí. Los 24 satélites **GPS (Sistema de Posicionamiento Global)** que orbitan a cerca de 18,000 km son ejemplos de satélites MEO.

2.4.3 Satélites de Órbita Terrestre Baja

En una altitud más baja encontramos a los satélites **LEO (Órbita Terrestre Baja)**. Debido a la rapidez de su movimiento, se requieren grandes cantidades de ellos para conformar un sistema completo. Por otro lado, como los satélites se encuentran tan cercanos a la Tierra, las estaciones terrestres no necesitan mucha potencia, y el retardo del viaje de ida y vuelta es de tan sólo algunos milisegundos. En esta sección examinaremos tres ejemplos, dos sobre las comunicaciones de voz y uno sobre el servicio de Internet.

Iridium

Como ya mencionamos, durante los primeros 30 años de la era de los satélites casi no se utilizaban los satélites de órbita baja porque aparecían y desaparecían con mucha rapidez. En 1990, Motorola abrió un nuevo camino al solicitar permiso a la FCC (Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos) para lanzar 77 satélites de órbita baja para el proyecto Iridium (el iridio es el elemento 77). El plan fue modificado más tarde para utilizar sólo 66 satélites, por lo que el proyecto debió haberse renombrado como Dysprosium (elemento 66), pero quizá este nombre sonaba demasiado a enfermedad. El propósito era que tan pronto como un satélite se perdiera de vista, otro lo reemplazaría. Esta propuesta desató un frenesí entre otras compañías. De pronto, todos querían lanzar una cadena de satélites de órbita baja.

Después de siete años de improvisación de socios y financiamiento, los socios lanzaron los satélites Iridium en 1997. El servicio de comunicaciones empezó en noviembre de 1998. Por desgracia, la demanda comercial de teléfonos por satélite grandes y pesados fue insignificante porque la red telefónica móvil había crecido de manera espectacular desde 1990. En consecuencia, el proyecto Iridium no fue rentable y quebró en agosto de 1999 en lo que fue uno de los fracasos corporativos más espectaculares de la historia. Los satélites y otros activos (con valor de 5000 millones de dólares) fueron adquiridos posteriormente por un inversionista en 25 millones de dólares en una especie de venta de garaje extraterrestre. El servicio Iridium se reinició en marzo de 2001.

El negocio de Iridium era (y es) ofrecer servicio de telecomunicaciones en todo el mundo a través de dispositivos de bolsillo que se comunican directamente con los satélites Iridium. Proporciona servicio de voz, datos, búsqueda de personas, fax y navegación en cualquier parte, sea en tierra, mar y aire. Entre sus clientes están las industrias marítima, de la aviación y exploración petrolera, así como personas que viajan a partes del mundo que carecen de infraestructura de telecomunicaciones (por ejemplo, desiertos, montañas, selvas y algunos países del tercer mundo).

Los satélites Iridium están a una altitud de 750 km, en órbitas polares circulares. Están dispuestos en forma de collar de norte a sur, con un satélite a cada 32 grados de latitud. La Tierra completa se cubre con seis collares, como se aprecia en la figura 2-18(a). Quienes no tengan muchos conocimientos sobre química pueden pensar que esta disposición es un gran átomo de disprosio, con la Tierra como núcleo y los satélites como electrones.

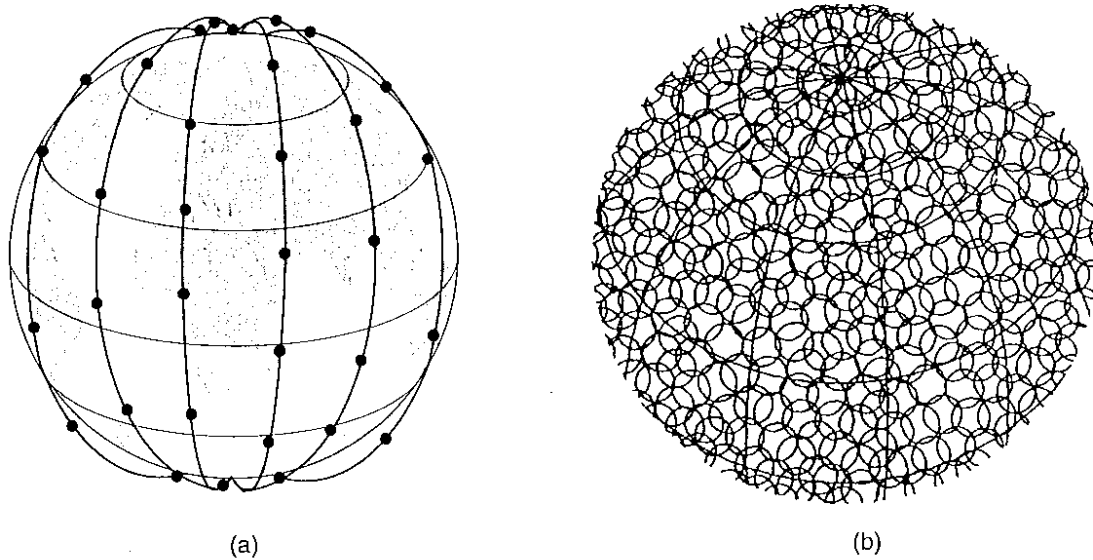


Figura 2-18. (a) Los satélites Iridium forman seis collares alrededor de la Tierra. (b) 1628 celdas en movimiento cubren la Tierra.

Cada satélite tiene un máximo de 48 celdas (haces reducidos), con un total de 1628 celdas sobre la superficie de la Tierra, como se muestra en la figura 2-18(b). Cada satélite tiene una capacidad de 3840 canales, o 253,440 en total. Algunos de estos canales se utilizan para localización de personas y navegación, en tanto que otros, para datos y voz.

Una propiedad interesante de Iridium es que la comunicación entre clientes distantes tiene lugar en el espacio, con un satélite retransmitiendo datos al siguiente, como se muestra en la figura 2-19(a). Aquí vemos que quien llama está en el Polo Norte y hace contacto con un satélite que se encuentra directamente arriba de él. La llamada se retransmite a través de otros satélites y por último es entregada al destinatario en el Polo Sur.

Globalstar

Globalstar es un diseño alternativo para Iridium. Se basa en 48 satélites LEO pero utiliza un esquema de conmutación diferente al de Iridium. En tanto que Iridium retransmite las llamadas de satélite en satélite, lo cual requiere un equipo de conmutación refinado en los satélites, Globalstar utiliza un diseño de tubo doblado tradicional. La llamada que se originó en el Polo Norte en la figura 2-19(b) es devuelta a la Tierra y recogida por la enorme estación terrestre. A continuación la llamada se enruta, a través de una red terrestre, a la estación terrestre más cercana al destinatario y se entrega mediante una conexión de tubo doblado como se muestra. La ventaja de este esquema es que mucha de la complejidad queda en tierra, donde es más sencillo manejarla. Asimismo,

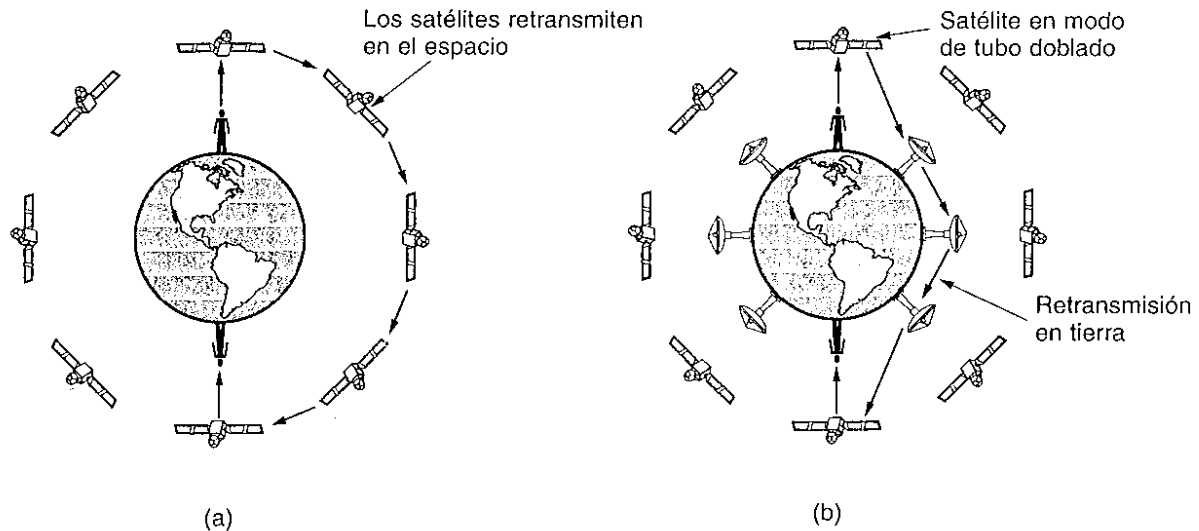


Figura 2-19. (a) Retransmisión en el espacio. (b) Retransmisión en tierra.

el uso de antenas grandes en las estaciones terrestres que pueden producir una señal potente y recibir una señal débil, permite la utilización de teléfonos de baja potencia. Después de todo, el teléfono produce tan sólo unos cuantos miliwatts de potencia, por lo cual la señal que llega a las estaciones terrestres es sumamente débil, aun cuando el satélite la haya amplificado.

Teledesic

Iridium está destinada a usuarios de teléfonos que se encuentran en lugares extremos. Nuestro siguiente ejemplo, **Teledesic**, está destinada a usuarios de Internet de todo el mundo deseosos de ancho de banda. Fue concebida en 1990 por Craig McCaw, pionero de la telefonía móvil, y por Bill Gates, fundador de Microsoft, quienes estaban inconformes con el lento ritmo al cual las compañías telefónicas de todo el mundo proporcionaban ancho de banda alto a los usuarios de computadoras. La meta del sistema Teledesic es ofrecer a los millones de usuarios concurrentes de Internet un enlace ascendente de hasta 100 Mbps y un enlace descendente de hasta 720 Mbps mediante antenas tipo VSAT pequeñas y fijas, que ignoran por completo el sistema telefónico. Para las compañías telefónicas esto es demasiado bello para ser realidad.

El diseño original consistía en un sistema de 288 satélites de huella pequeña, dispuestos en 12 planos justo debajo del cinturón inferior de Van Allen a una altitud de 1350 km. Posteriormente se modificó el diseño a 30 satélites con huellas más grandes. La transmisión se realiza en la banda Ka, relativamente poco saturada y con un ancho de banda alto. El sistema es de conmutación de paquetes en el espacio, en el cual cada satélite tiene la capacidad de enrutar paquetes a los satélites vecinos. Cuando un usuario necesita ancho de banda para enviar paquetes, tal ancho de banda se solicita y asigna de manera dinámica en alrededor de 50 mseg. Si todo marcha bien, el sistema está programado para empezar a funcionar en 2005.

2.4.4 Satélites en comparación con fibra óptica

Una comparación entre comunicación por satélite y comunicación terrestre es aleccionadora. Apenas hace 20 años se podía afirmar que el futuro de las comunicaciones estaba en los satélites. Después de todo, el sistema telefónico ha cambiado poco en los pasados 100 años y no hay señales de que cambie en los próximos 100 años. Este lento movimiento fue ocasionado en gran parte por las regulaciones que obligaban a las compañías telefónicas a ofrecer un buen servicio de voz a precios razonables (lo cual hicieron), y a cambio obtuvieron utilidades garantizadas sobre sus inversiones. Para quienes tenían que transmitir datos, había módems de 1200 bps. Por mucho, esto es todo lo que había.

Esta situación cambió radicalmente en 1984 con la entrada de la competencia en Estados Unidos y un poco más tarde en Europa. Las compañías telefónicas comenzaron a reemplazar sus viejas redes con fibra óptica e introdujeron servicios de ancho de banda alto como ADSL (Línea Digital de Suscriptor Asimétrica). También suspendieron su añeja práctica de cargar precios artificialmente altos a los usuarios de larga distancia para subsidiar el servicio local.

De buenas a primeras, las conexiones terrestres de fibra óptica dieron la impresión de que serían las ganadoras a largo plazo. No obstante, los satélites de comunicaciones tienen algunos nichos de mercado importantes a los cuales la fibra óptica no se dirige (en ocasiones porque no puede). A continuación veremos algunos de ellos.

En primer lugar, a pesar de que una fibra óptica tiene más ancho de banda potencial que todos los satélites que se han lanzado, este ancho de banda no está disponible para la mayoría de los usuarios. La fibra que se instala actualmente se utiliza en el sistema telefónico para manejar muchas llamadas de larga distancia al mismo tiempo, no para ofrecer un ancho de banda alto a los usuarios individuales. Con los satélites, es factible que un usuario instale una antena en el techo de la casa y evada por completo el sistema telefónico para conseguir un ancho de banda alto. Teledesic se apoya en esta idea.

Un segundo nicho es el de la comunicación móvil. En estos días mucha gente desea comunicarse mientras trota, maneja, navega o vuela. Los enlaces terrestres de fibra óptica no sirven para este uso, pero los enlaces por satélite sí. Sin embargo, es posible que una combinación de radio celular y fibra óptica funcionara para la mayoría de los casos (aunque quizá no para aquellos que viajen por aire o por mar).

Un tercer nicho es para aquellas situaciones en las cuales se requiere difusión. Un mensaje enviado desde un satélite se puede recibir en miles de estaciones terrestres al mismo tiempo. Por ejemplo, para una organización que transmita un flujo de precios de acciones, bonos o commodities a miles de operadores de bolsa le resultaría más económico un sistema por satélite que simular la difusión en tierra.

Un cuarto nicho es el de las comunicaciones en lugares agrestes o con una infraestructura terrestre pobremente desarrollada. Por ejemplo, Indonesia tiene su propio satélite para el tráfico telefónico interno. El lanzamiento de un satélite resultó más económico que el enlace de miles de cables bajo el mar entre las 13,667 islas que conforman el archipiélago.

Un quinto nicho de mercado para los satélites son las áreas donde es difícil o extremadamente costoso conseguir un derecho para el tendido de fibra óptica.

Sexto, cuando un despliegue rápido es primordial, como en un sistema de comunicaciones militar en época de guerra, los satélites ganan con facilidad.

En resumen, al parecer la tendencia general de las comunicaciones en el futuro será la fibra óptica terrestre en combinación con radio celular, pero los satélites son mejores para algunos usos especializados. Sin embargo, hay un imponderable que se aplica en todos los casos: el aspecto económico. Aunque la fibra óptica ofrece más ancho de banda, es muy probable que las comunicaciones terrestres y por satélite competirán agresivamente en precio. Si los avances tecnológicos reducen de manera drástica el costo de despliegue de un satélite (por ejemplo, algún transbordador espacial futuro que pueda diseminar docenas de satélites en un solo lanzamiento) o los satélites de órbita baja se popularizan, no hay certeza de que la fibra óptica ganará en todos los mercados.

2.5 LA RED TELEFÓNICA PÚBLICA CONMUTADA

Cuando dos computadoras propiedad de la misma empresa u organización, localizadas cerca una de la otra, necesitan comunicarse, es más fácil conectarlas mediante un cable. Las LANs funcionan de esta manera. Sin embargo, cuando las distancias son considerables o hay muchas computadoras o los cables tienen que pasar por una vía pública o alguna zona restringida, los costos de tender cables privados por lo general son prohibitivos. Además, en casi todos los países del mundo también es ilegal el enlace de líneas de transmisión privadas a través (o por debajo) de una propiedad pública. En consecuencia, los diseñadores de redes deben depender de las instalaciones de telecomunicaciones existentes.

Por lo general, estas instalaciones, en especial la **PSTN (Red Telefónica Pública Conmutada)**, fueron diseñadas hace muchos años, con un propósito completamente distinto: transmitir la voz humana en una forma más o menos reconocible. Su aplicabilidad en las comunicaciones de computadora a computadora es muy limitada, pero esta situación está cambiando rápidamente con la introducción de la fibra óptica y la tecnología digital. De cualquier manera, el sistema telefónico está tan estrechamente entrecruzado con las redes de computadoras (de área amplia) que bien vale la pena dedicarle un poco de tiempo a su estudio.

Con el propósito de entender la importancia del problema, realicemos una comparación burda pero ilustrativa de las propiedades de una conexión típica de computadora a computadora a través de un cable local y otra mediante una línea de acceso telefónico. Un cable entre dos computadoras puede transferir datos a 10^9 bps, o tal vez un poco más. En contraste, una línea de acceso telefónico tiene una tasa máxima de datos de 56 kbps, una diferencia de un factor de casi 20,000. Es como la diferencia entre un pato contoneándose campantemente entre la hierba y un cohete a la Luna. Si la línea de acceso telefónico se reemplaza por una conexión ADSL, sigue habiendo una diferencia de un factor de 1000-2000.

Por supuesto, el problema es que los diseñadores de sistemas de cómputo suelen trabajar con sistemas de cómputo y cuando de repente se enfrentan con un sistema cuyo desempeño (según lo que ellos piensan) es tres o cuatro órdenes de magnitud peor, ellos, lo cual no es una sorpresa,