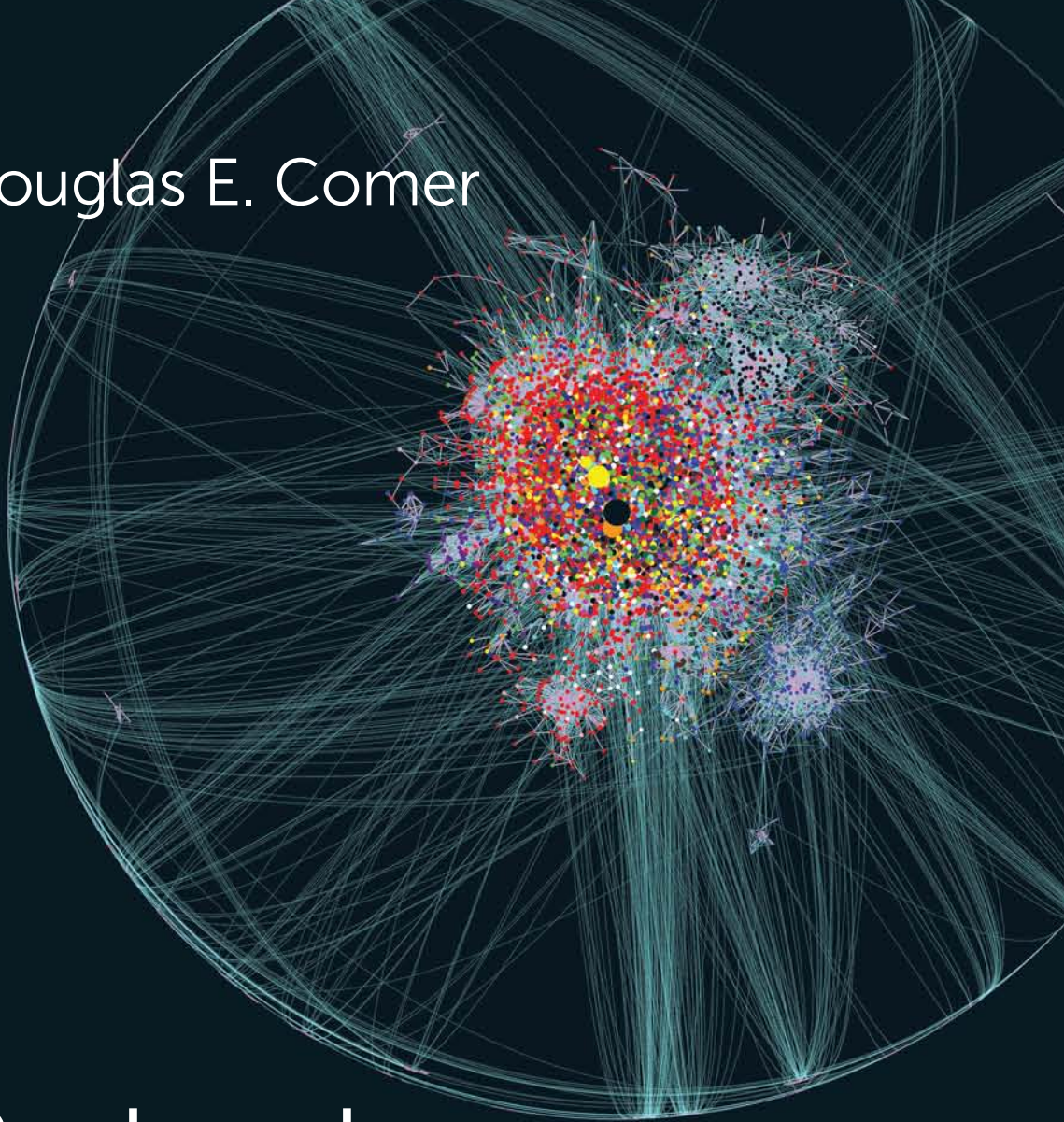


Douglas E. Comer



Redes de Computadores e Internet



6ª EDIÇÃO

O autor

Dr. Douglas Comer é um internacionalmente reconhecido especialista em redes de computadores, protocolos TCP/IP e Internet. Foi um dos pesquisadores que contribuíram com a formação da Internet no fim dos anos 1970 e nos anos 1980, sendo membro do *Internet Architecture Board*, o grupo responsável por guiar o desenvolvimento da Internet. Também foi presidente do comitê técnico CSNET, membro do comitê executivo CSNET e presidente do Distributed Systems Architecture Board da DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*). Foi ainda Vice-Presidente de Pesquisa na Cisco Systems.

Comer é consultor de projeto de redes de computadores para empresas e palestrante frequente em ambientes acadêmicos e profissionais ao redor do mundo. Seu sistema operacional, Xinu, e a implementação de protocolos TCP/IP (ambos documentados em seus livros) são utilizados em produtos comerciais. É professor honorário de Ciências da Computação na Purdue University, onde leciona redes de computadores, redes de internet, arquitetura de computadores e sistemas operacionais. Lá desenvolveu laboratórios de informática inovadores que dão aos alunos a oportunidade de ter experiências práticas na operação de sistemas, redes de computadores e protocolos.

Além de escrever livros técnicos *best-sellers*, já traduzidos para 16 idiomas, atuou como editor norte-americano do periódico *Software – Practice and Experience* por 20 anos. Comer é membro da ACM. Informações adicionais podem ser encontradas em: www.cs.purdue.edu/homes/comer.



C732r Comer, Douglas E.
Redes de computadores e internet [recurso eletrônico] /
Douglas E. Comer ; tradução: José Valdeni de Lima, Valter
Roesler. – 6. ed. – Porto Alegre : Bookman, 2016.

Editado como livro impresso em 2016.
ISBN 978-85-8260-373-4

1. Redes de computadores. 2. Internet. I. Título.

CDU 004.7

CAPÍTULO 7

Meios de transmissão

- 7.1 Introdução, 101
- 7.2 Transmissões guiadas e não guiadas, 101
- 7.3 A taxonomia por formas de energia, 102
- 7.4 Radiação de fundo e ruído elétrico, 103
- 7.5 Fiação de cobre par trançado, 103
- 7.6 Blindagem: cabo coaxial e par trançado blindado, 104
- 7.7 Categorias de cabo de par trançado, 106
- 7.8 Meios que usam energia da luz e fibras ópticas, 106
- 7.9 Tipos de fibra e transmissão de luz, 108
- 7.10 Fibra óptica comparada com fiação de cobre, 108
- 7.11 Tecnologias de comunicação por infravermelho, 109
- 7.12 Comunicação a laser ponto-a-ponto, 109
- 7.13 Comunicação eletromagnética (rádio), 110
- 7.14 Propagação de sinal, 111
- 7.15 Tipos de satélites, 112
- 7.16 Satélites geoestacionários (GEO), 112
- 7.17 Cobertura GEO da Terra, 113
- 7.18 Satélites de baixa órbita e clusters (agrupamentos), 114
- 7.19 Balanço entre os tipos de meios, 115
- 7.20 Mensuração dos meios de transmissão, 115
- 7.21 O efeito do ruído na comunicação, 115
- 7.22 O significado da capacidade do canal, 117
- 7.23 Resumo, 117

7.1 Introdução

O Capítulo 5 fornece uma visão geral da comunicação de dados. O capítulo anterior aborda as fontes de informação examinando informações analógicas e digitais e explicando a codificação.

Este capítulo continua a discussão sobre a comunicação de dados considerando os meios de transmissão, incluindo os meios com fio, os sem fio e os ópticos. O capítulo apresenta uma taxonomia de tipos de meios, introduz os conceitos básicos da propagação eletromagnética e explica como a blindagem (*shielding*) pode reduzir ou prevenir interferências ou ruídos. Além disso, explica o conceito de capacidade. Os próximos capítulos também discorrem sobre a comunicação de dados.

7.2 Transmissões guiadas e não guiadas

Os meios de transmissão são divididos em classes. Existem duas abordagens gerais:

- Por tipo de caminho: a comunicação pode seguir um caminho exato, tal como um fio, ou pode não ter nenhum caminho específico, tal como uma transmissão por ondas de rádio.
- Pela forma de energia: a energia elétrica é transmitida por fios, a transmissão por rádio é realizada sem fios e a luz é utilizada com a fibra óptica.

Para as transmissões, usamos os termos *guiadas* e *não guiadas* a fim de distinguir entre as mídias físicas, tais como fios de cobre ou fibras ópticas que fornecem um caminho específico, e a transmissão por rádio que viaja em todas as direções através do espaço livre. Informalmente, os engenheiros usam os termos *com fio* (*wired*) e *sem fio* (*wireless*). É importante destacar que a informalidade pode ser um pouco confusa, porque é possível ouvir o termo *com fio* (*wired*) mesmo quando o meio físico é uma fibra óptica.

7.3 A taxonomia por formas de energia

A Figura 7.1 ilustra como os meios físicos podem ser classificados de acordo com a forma de energia utilizada para transmitir os dados. As próximas seções descrevem cada um dos tipos de meios.

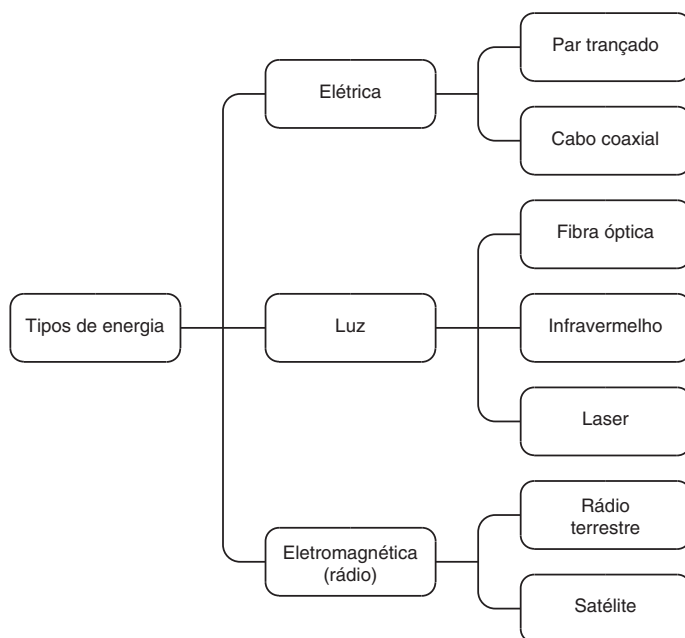


Figura 7.1 A taxonomia dos tipos de meios de acordo com a forma de energia usada.

Como a maioria das taxonomias, as categorias não são perfeitas e existem exceções. Por exemplo, uma estação espacial em órbita ao redor da Terra pode implementar a comunicação não terrestre que não envolve um satélite. No entanto, nossa taxonomia cobre a maioria das comunicações.

7.4 Radiação de fundo e ruído elétrico

Lembre-se do que aprendeu na física básica: a corrente elétrica flui ao longo de um circuito completo. Assim, todas as transmissões de energia elétrica necessitam de dois fios para formar um circuito – um fio para o receptor e um fio de retorno para o emissor. A forma mais simples de fiação consiste em um cabo que contém dois fios de cobre. Cada fio está envolto num revestimento de plástico que o isola eletricamente. O revestimento exterior do cabo mantém os fios relacionados juntos para facilitar o trabalho de quem conecta o equipamento.

As redes de computadores usam uma forma alternativa de fiação. Para entender o porquê, é preciso conhecer três fatos.

- A radiação eletromagnética randômica, chamada de *ruído*, permeia o ambiente. De fato, os sistemas de comunicação geraram quantidades menores de *ruído* elétrico como um efeito colateral do funcionamento normal.
- Quando toca em metal, a radiação eletromagnética induz um pequeno sinal que significa que o ruído randômico pode interferir nos sinais usados para a comunicação.
- Como absorvem a radiação, os metais agem como uma *blindagem*. Assim, a colocação de metal suficiente entre uma fonte de ruído e um meio de comunicação pode evitar ruídos de interferência na comunicação.

Os dois primeiros fatos delineiam um problema fundamental inerente aos meios de comunicação que usam energia elétrica ou de rádio. O problema é especialmente grave quando ocorre perto de uma fonte que emite radiação randômica. Por exemplo, lâmpadas fluorescentes e motores elétricos emitem radiação, especialmente motores potentes, como os usados para operar elevadores, aparelhos de ar condicionado e geladeiras. Surpreendentemente, dispositivos menores, como trituradores de papel ou ferramentas elétricas, também podem emitir radiação suficiente para interferir na comunicação. Em síntese:

A radiação eletromagnética randômica gerada por dispositivos como motores elétricos pode interferir na comunicação que utiliza transmissão de rádio ou energia elétrica enviada através de fios.

7.5 Fiação de cobre par trançado

O terceiro fato listado na seção anterior explica a fiação usada com sistemas de comunicação. Há três formas de fiação que ajudam a reduzir a interferência de ruídos elétricos:

- Par trançado não blindado (UTP, *Unshielded Twisted Pair*)
- Cabo coaxial
- Par trançado blindado (STP, *Shielded Twisted Pair*)

A primeira forma, que é conhecida como cabeamento de *par trançado* ou cabeamento de *par trançado não blindado* (*unshielded twisted pair wiring*)¹, é amplamente utilizada nas comunicações. Como o nome sugere, o cabeamento de par trançado é com-

¹ Uma seção mais adiante explica o termo *blindado* (*shielded*).

posto por dois fios que são trançados juntos. É claro que cada fio tem um revestimento de plástico que o isola do outro e impede que a corrente elétrica flua entre eles.

Surpreendentemente, trançar os dois fios os torna menos suscetíveis ao ruído elétrico que deixá-los paralelos. A Figura 7.2 ilustra o porquê.

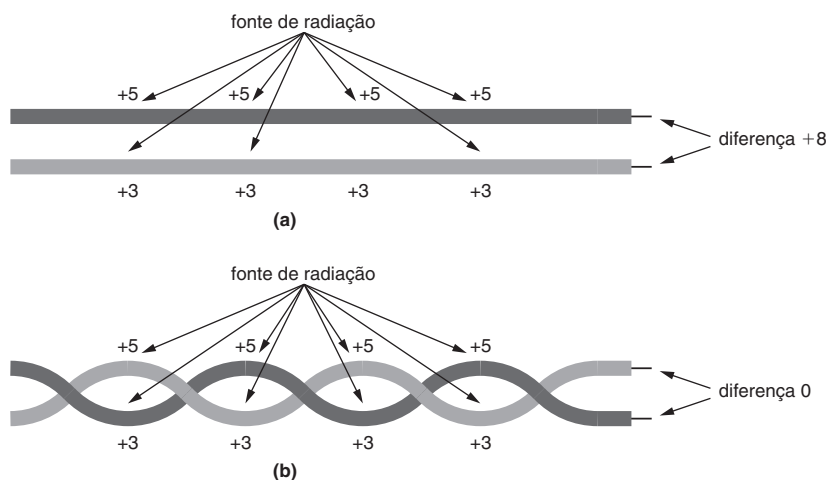


Figura 7.2 Radiação magnética não desejada afetando as fiações (a) dois fios paralelos e (b) par trançado.

Como mostra a figura, quando dois fios estão em paralelo, existe uma alta probabilidade de que um deles esteja mais próximo da fonte de radiação eletromagnética do que o outro. Na verdade, um fio tende a agir como uma blindagem que absorve parte da radiação eletromagnética. Assim, como está escondido atrás do primeiro fio, o segundo fio recebe menos energia. Na figura, um total de 32 unidades de radiação atingem cada um dos dois casos. Na Figura 7.2 (a), o fio superior absorve 20 unidades, e o fio inferior absorve 12, produzindo uma diferença de 8. Na Figura 7.2 (b), cada um dos dois fios está em cima por metade do tempo, o que significa que cada fio absorve a mesma quantidade de radiação.

Por que a igualdade de absorção é importante? A resposta é que, se a interferência induzir exatamente a mesma quantidade de energia elétrica em cada fio, nenhuma corrente extra fluirá. Assim, o sinal original não será perturbado. Ou seja:

Para reduzir a interferência causada pela radiação eletromagnética randômica, os sistemas de comunicação usam cabeamento de par trançado em vez de fios paralelos.

7.6 Blindagem: cabo coaxial e par trançado blindado

Embora seja imune à maioria da radiação de fundo, o cabeamento de par trançado não resolve todos os problemas. Ele tende a ter problemas:

- Especialmente com ruído elétrico forte

- Com a proximidade física da fonte de ruído
- Com altas frequências usadas para a comunicação

Se a intensidade é elevada (por exemplo, em uma fábrica que usa arco elétrico de equipamentos de solda) ou se cabos de comunicação funcionam perto da fonte de ruído elétrico, o par trançado pode não ser suficiente. Assim, se um par trançado corre acima do teto de um prédio de escritórios em cima de uma luminária fluorescente, pode haver interferência. Além disso, é difícil construir equipamentos que podem distinguir entre sinais válidos de alta frequência e de ruído, o que significa que mesmo uma pequena quantidade de ruído pode causar interferência quando as altas frequências são utilizadas.

Para lidar com situações em que o par trançado é insuficiente, existem formas de fiação disponíveis com uma blindagem extra de metal. A forma mais conhecida é o cabeamento utilizado para a televisão a cabo. Conhecido como *cabo coaxial* (*coaxial cable*), o cabeamento tem uma blindagem de metal grossa, formada a partir de fios trançados, que envolve completamente o fio central que transporta o sinal. A Figura 7.3 ilustra o conceito.

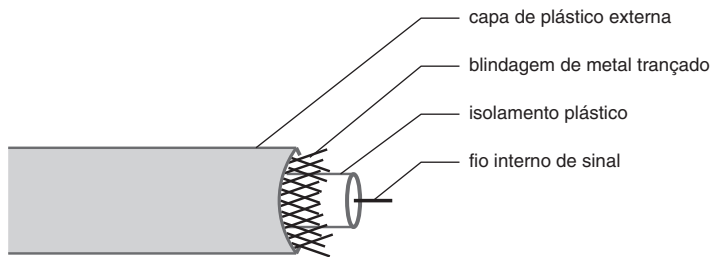


Figura 7.3 Ilustração do cabo coaxial com blindagem ao redor do fio de sinal.

A blindagem em um cabo coaxial forma um cilindro flexível ao redor do fio mais interno, fornecendo uma barreira contra a radiação eletromagnética vinda de qualquer direção. A barreira também protege os sinais no fio mais interno da radiação de energia eletromagnética que poderia afetar outros fios.

Consequentemente, um cabo coaxial pode ser colocado do lado de fontes de ruídos elétricos e outros cabos e pode ser usado por altas frequências. Em suma:

A blindagem pesada e simétrica faz o cabo coaxial ser imune ao ruído, ser capaz de transportar altas frequências e de impedir que os sinais de ruído sobre o cabo do emissor se propaguem aos cabos vizinhos.

Usar fios trançados em vez de uma blindagem de metal sólida mantém o cabo coaxial flexível, e a blindagem pesada deixa-o menos flexível do que o cabeamento de par trançado. As variações de blindagem foram criadas a partir desta noção: o cabo é mais flexível, mas tem um pouco menos de imunidade a ruídos elétricos. Uma variação popular é conhecida como *par trançado blindado* (STP, *Shielded Twisted Pair*). Um cabo STP tem uma blindagem de metal mais fina, mais flexível, com um ou mais pares de fios trançados. Na maioria das versões de cabos STP, a blindagem é constituída por uma lâmina metálica, semelhante ao papel-alumínio usado na cozinha.

O cabo STP tem a vantagem de ser mais flexível do que um cabo coaxial e menos suscetível à interferência elétrica do que o *Unshielded Twisted Pair* (UTP).

7.7 Categorias de cabo de par trançado

As empresas de telefonia especificaram originalmente normas para o cabeamento de par trançado usado na rede telefônica. Recentemente, três organizações padronizadoras trabalharam juntas para criar padrões para os cabos de par trançado usados em redes de computadores. O *American National Standards Institute* (ANSI), a *Telecommunications Industry Association* (TIA) e a *Electronic Industries Alliance* (EIA) criaram uma lista de categorias de cabeamento, com especificações rigorosas para cada uma. A Figura 7.4 resume as principais categorias.

Categoria	Descrição	Taxa de dados (em Mbit/s)
CAT 1	Par trançado não blindado usado para telefones	<0,1
CAT 2	Par trançado não blindado usado para dados T1	2
CAT 3	CAT2 melhorado usado para redes de computadores	10
CAT 4	CAT3 melhorado usado para redes Token Ring	20
CAT 5	Par trançado não blindado utilizado em redes locais	100
CAT 5E	CAT5 estendido para maior imunidade a ruídos	125
CAT 6	Par trançado não blindado testado para 200 Mbit/s	200
CAT 7	Par trançado blindado com lâmina metálica adicional envolvendo todo o cabo mais blindagem em torno de cada par trançado	600

Figura 7.4 As categorias de cabeamento de par trançado e a descrição de cada uma delas.

7.8 Meios que usam energia da luz e fibras ópticas

De acordo com a taxonomia mostrada na Figura 7.1, três meios usam a energia da luz para transportar informações:

- Fibras ópticas
- Transmissão por infravermelho
- Lasers ponto-a-ponto

O meio de comunicação mais importante que utiliza a luz é a *fibra óptica*. Cada fibra consiste em um fino fio de vidro ou de plástico transparente envolto em uma capa de plástico. Uma fibra óptica típica é usada para comunicação em uma única direção – uma extremidade da fibra se conecta a um laser ou LED usado para transmitir a luz e a outra extremidade é ligada a um dispositivo fotossensível utilizado para detectar a luz recebida. Para uma comunicação de duas vias, duas fibras são utilizadas, uma para transportar

informações em cada sentido. Assim, as fibras ópticas são normalmente colocadas em um cabo com uma cobertura de plástico ao redor delas; um cabo tem pelo menos duas fibras, e um cabo utilizado para conectar diferentes localidades que tenham vários dispositivos de rede pode conter muitas fibras.

Embora não possa ser dobrada em ângulo reto, uma fibra óptica é flexível o suficiente para formar um círculo com diâmetro inferior a duas polegadas sem quebrar. A questão que surge é: por que a luz viaja em torno de uma curva na fibra? A resposta vem da física: quando a luz encontra o limite entre duas substâncias, o seu comportamento depende da densidade das duas substâncias e do ângulo em que a luz atinge o limite. Para um dado par de substâncias, existe um *ângulo crítico*, θ , medido em relação a uma linha que é perpendicular ao limite. Se o ângulo de incidência é exatamente igual ao ângulo crítico, a luz viaja ao longo do limite. Quando o ângulo é inferior a θ graus, a luz atravessa a fronteira e é *refratada*, e, quando o ângulo é maior do que θ graus, a luz é refletida como se o limite fosse um espelho. A Figura 7.5 ilustra o conceito.

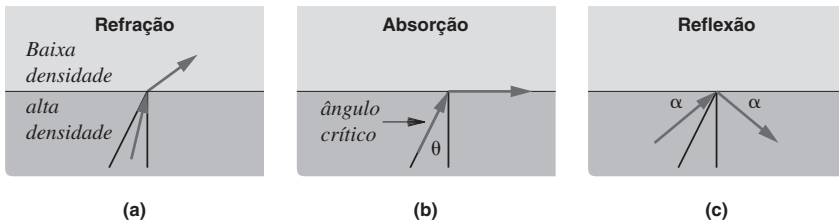


Figura 7.5 Comportamento da luz no limite da densidade quando o ângulo de incidência é (a) menor do que o ângulo crítico θ , (b) igual ao ângulo crítico e (c) maior do que o ângulo crítico.

A Figura 7.5 (c) explica por que a luz permanece dentro da fibra óptica – a substância chamada *cladding* serve de revestimento da fibra para formar um limite. À medida que viaja, a luz é refletida, permanecendo dentro da fibra.

Infelizmente, a reflexão em uma fibra óptica não é perfeita. A reflexão absorve uma pequena quantidade de energia. Além disso, se um fóton percorre um caminho em zig-zag que reflete das paredes da fibra, muitas vezes ele vai percorrer uma distância um pouco maior que a percorrida por um fóton que percorre um caminho em linha reta. O resultado é que um pulso de luz enviado a uma extremidade de uma fibra sai com menos energia e é *disperso* (isto é, esticado) ao longo do tempo, como ilustra a Figura 7.6.

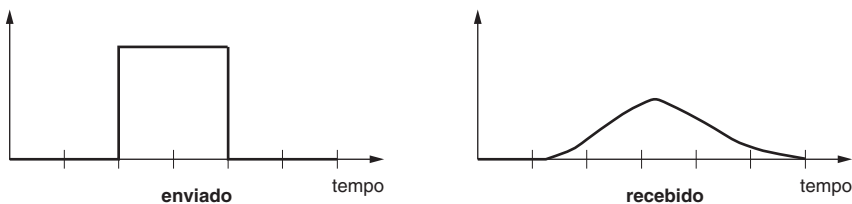


Figura 7.6 Um pulso de luz enviado e recebido através de uma fibra óptica.

7.9 Tipos de fibra e transmissão de luz

Embora não seja um problema das fibras ópticas utilizadas para conectar um computador a um dispositivo nas proximidades, a dispersão é um problema sério para as fibras ópticas longas, como as utilizadas entre duas cidades ou sob um oceano. Consequentemente, três formas de fibras ópticas foram criadas para permitir uma escolha entre desempenho e custo:

- *Multimodo, fibra de índice degrau (multimode, step index fiber)*: é a mais barata e é usada quando o desempenho é importante. O limite entre a fibra e o revestimento *cladding* é abrupto, o que faz com que a luz reflita com frequência. Consequentemente, a dispersão é alta.
- *Multimodo, fibra de índice gradual (multimode, graded index fiber)*: é um pouco mais cara do que a anterior. No entanto, ela tem a vantagem de aumentar a densidade da fibra perto da extremidade, o que reduz a reflexão e diminui a dispersão.
- *Fibra de modo único (single mode fiber)*: é a mais cara e fornece o mínimo de dispersão. A fibra tem um diâmetro menor e outras propriedades que ajudam a reduzir a reflexão. É usada para longas distâncias e taxas de bits de transmissão mais elevadas.

A fibra de modo único e o equipamento utilizado em cada extremidade são projetados para focar a luz. Como resultado, um pulso de luz pode viajar milhares de quilômetros sem se dispersar. A dispersão mínima ajuda a aumentar a taxa de bits a ser enviada, porque um pulso correspondente a um bit não se dispersa invadindo o pulso que corresponde ao bit posterior.

Como a luz é enviada e recebida em uma fibra? A explicação é que os dispositivos utilizados para a transmissão devem ser totalmente compatíveis com a fibra. Os mecanismos disponíveis incluem:

- Transmissão: *Light Emitting Diode (LED)* ou *Injection Laser Diode (ILD)*
- Recepção: célula fotossensível ou fotodiodo

Em geral, os LEDs e as células fotossensíveis são usados para curtas distâncias e velocidades de transmissão mais lentas com a fibra multimodo. A fibra de modo único, utilizada em longas distâncias com altas taxas de bits, em geral exige LEDs e fotodiodos.

7.10 Fibra óptica comparada com fiação de cobre

A fibra óptica tem várias propriedades que a tornam mais desejável do que a fiação de cobre. Ela é imune ao ruído elétrico, tem maior largura de banda, e a luz que viaja através dela não enfraquece tanto quanto os sinais elétricos que viajam através do cobre. No entanto, os fios de cobre são mais baratos. Além disso, as extremidades de uma fibra óptica devem ser polidas antes que possam ser usadas, enquanto a instalação de cabos de cobre não requer equipamento especial nem tanta experiência. Finalmente, como são mais fortes, os fios de cobre são menos propensos a quebrar se forem acidentalmente puxados ou dobrados. A Figura 7.7 resume as vantagens de cada um dos meios:

Fibra óptica <ul style="list-style-type: none"> • Imune a ruídos elétricos • Menos atenuação do sinal • Largura de banda superior
Fiação de cobre <ul style="list-style-type: none"> • Menor custo global • Menos experiência/equipamentos necessários • Mais resistente a rompimentos

Figura 7.7 Vantagens da fibra óptica e da fiação de cobre.

7.11 Tecnologias de comunicação por infravermelho

As tecnologias de comunicação por *infravermelho* (IR, *InfraRed*) usam o mesmo tipo de energia que um típico controle remoto de televisão: uma forma de radiação eletromagnética que se comporta como a luz visível, mas está fora do intervalo que é visível pelo olho humano. Como a luz visível, a luz infravermelha se dispersa rapidamente. Os sinais infravermelhos podem refletir a partir de uma superfície lisa e dura, e um objeto opaco tão fino como uma folha de papel pode bloquear o sinal, assim como faz a umidade na atmosfera.

Para resumir:

As tecnologias de comunicação por infravermelhos são as mais adequadas para o uso em ambientes fechados, em situações em que o caminho entre o emissor e o receptor seja curto e livre de obstáculos.

A tecnologia de infravermelhos mais comumente utilizada destina-se a ligar um computador a um periférico que está nas proximidades, tal como uma impressora. Uma interface no computador e uma interface na impressora enviam um sinal infravermelho que cobre um arco de aproximadamente 30°. Se os dois dispositivos estiverem alinhados, cada um pode receber o sinal do outro. A ausência de fios no infravermelho é especialmente atraente para os computadores portáteis, porque um usuário pode mover-se em um quarto e ainda ter acesso a uma impressora. A Figura 7.8 lista as três tecnologias de infravermelho mais comumente usadas e a taxa de bits de cada uma suporta.

Nome	Expansão	Velocidade
IrDA-SIR	Infravermelho de velocidade baixa	0.115 Mbit/s
IrDA-MIR	Infravermelho de velocidade média	1.150 Mbit/s
IrDA-FIR	Infravermelho de velocidade alta	4.000 Mbit/s

Figura 7.8 Três tecnologias comuns de infravermelho e a taxa de bits de cada uma delas.

7.12 Comunicação a laser ponto-a-ponto

Como conectam um par de dispositivos com um feixe de luz que segue uma linha, as tecnologias de infravermelho descritas anteriormente podem ser classificadas como fornecedoras de uma comunicação *ponto-a-ponto*. Além do infravermelho, existem outras

tecnologias de comunicação ponto-a-ponto. Um tipo de comunicação ponto-a-ponto utiliza um feixe de luz coerente produzido por um *laser*.

Como o infravermelho, a comunicação a laser segue uma linha de visão e requer um caminho claro sem obstáculos entre os dispositivos comunicantes. Ao contrário de um transmissor infravermelho, no entanto, um feixe de laser não cobre uma área ampla. Em vez disso, ele tem apenas alguns centímetros de largura. Consequentemente, os equipamentos de envio e recebimento devem ser alinhados com precisão para assegurar que o feixe do emissor atinja o sensor no equipamento do receptor. Em um sistema de comunicação típico, é necessária uma comunicação bidirecional. Assim, cada lado deve ter tanto um transmissor como um receptor, e ambos os transmissores devem estar cuidadosamente alinhados. Como o alinhamento é crítico, equipamento a laser ponto-a-ponto é normalmente montado permanentemente.

Os feixes de laser têm a vantagem de serem adequados para uso ao ar livre e podem se estender por distâncias maiores do que as atingidas pelo infravermelho. Como resultado, a tecnologia a laser é especialmente útil nas cidades para transmitir de prédio em prédio. Por exemplo, imagine uma grande empresa com escritórios em dois edifícios adjacentes. Não é permitido à corporação colocar fios que cruzem a rua entre os edifícios. No entanto, a empresa pode comprar equipamentos de comunicação a laser e montá-los permanentemente nas laterais ou nos telhados dos dois edifícios. Uma vez que o equipamento for comprado e instalado, os custos operacionais são relativamente baixos.

Para resumir:

A tecnologia a laser pode ser utilizada para criar um sistema de comunicação ponto-a-ponto. Como um laser emite um feixe estreito de luz, o transmissor e o receptor devem ser alinhados com precisão; instalações típicas fixam o equipamento a uma estrutura permanente, tal como o telhado de um edifício.

7.13 Comunicação eletromagnética (rádio)

Lembre-se de que o termo *não guiada* é utilizado para caracterizar as tecnologias de comunicação que podem propagar energia sem a necessidade de um meio como um fio ou uma fibra óptica. A forma mais comum de mecanismos de comunicação não guiados consiste em tecnologias de rede *sem fio* que usam energia eletromagnética na faixa da *radiofrequência* (RF, *Radio Frequency*). A transmissão RF tem uma vantagem distinta sobre a luz, porque pode percorrer longas distâncias e penetrar em objetos, como as paredes de um edifício.

As propriedades exatas da energia eletromagnética dependem da frequência. Nós usamos o termo *espectro* para nos referirmos à gama de frequências possíveis; os governos de todo o mundo atribuem frequências para fins específicos. Nos EUA, a *Comissão Federal de Comunicação* (Federal Communications Commission) define regras para a atribuição de frequências e estabelece limites para a quantidade de energia que o equipamento de comunicação pode emitir em cada frequência. A Figura 7.9 mostra o espectro eletromagnético geral e as características gerais de cada parte dele. Como mostra a figura, uma parte do espectro corresponde à luz infravermelha descrita acima. O espectro utilizado para comunicações RF abrange frequências de aproximadamente 3 kHz e 300

GHz e inclui frequências atribuídas ao rádio e à transmissão de televisão, bem como às comunicações por satélite e micro-ondas².

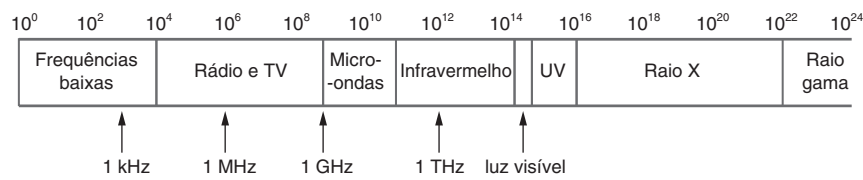


Figura 7.9 Maiores partes do espectro magnético com frequência em Hz mostradas na escala logarítmica.

7.14 Propagação de sinal

O Capítulo 6 explica que a quantidade de informação que uma onda eletromagnética pode representar depende da frequência da onda. A frequência de uma onda eletromagnética também determina como a onda se *propaga*. A Figura 7.10 descreve os três grandes tipos de propagação da onda.

Classificação	Alcance	Tipo de propagação
Frequência baixa	< 2MHz	A onda segue a curvatura da Terra, mas pode ser bloqueada por terrenos desnivelados
Frequência média	2 a 3 MHz	A onda pode ser refletida pelas camadas de atmosfera, especialmente a ionosfera
Frequência alta	> 30MHz	A onda viaja em linha reta e será bloqueada por obstruções

Figura 7.10 Propagação da onda eletromagnética em várias frequências.

De acordo com a figura, as frequências mais baixas de radiação eletromagnética seguem a superfície da Terra, o que significa que, se o terreno for relativamente plano, será possível colocar um receptor para além do horizonte de um transmissor. Com frequências médias, um transmissor e um receptor podem ficar mais distantes, porque o sinal pode saltar fora da ionosfera para viajar entre eles. Finalmente, as maiores frequências de transmissão de rádio se comportam como a luz – o sinal se propaga em linha reta do emissor para o receptor e o caminho deve estar livre de obstruções. Em síntese:

As frequências usadas para tecnologias de rede sem fio não podem ser escolhidas arbitrariamente, porque os governos controlam a utilização do espectro e cada frequência tem características como a propagação de ondas, os requisitos de energia e a suscetibilidade ao ruído.

² O Google fornece um sistema interessante que mostra a disponibilidade de espectro em vários pontos dos Estados Unidos: <https://support.google.com/spectrumdatabase/>.

As tecnologias sem fio são classificadas em duas grandes categorias:

- *Terrestre*: a comunicação utiliza equipamentos, como rádio ou transmissores de micro-ondas, que estão relativamente próximos da superfície da Terra. Os locais típicos mais comuns para antenas ou outros equipamentos incluem topos de morros, torres e edifícios altos.
- *Não terrestre*: alguns dos equipamentos utilizados na comunicação estão fora da atmosfera da Terra (por exemplo, um satélite em órbita em torno da Terra).

O Capítulo 16 apresenta tecnologias sem fio específicas e descreve as características de cada uma delas. Agora, basta compreender que a frequência e a quantidade de energia utilizada podem afetar a velocidade com que os dados são enviados, a distância máxima na qual a comunicação pode ocorrer e as características, como se o sinal pode penetrar em objetos sólidos.

7.15 Tipos de satélites

As leis da física (especificamente a *Lei de Kepler*) governam o movimento de um objeto, como um satélite que orbita a Terra. Em especial, o período (isto é, o tempo necessário para uma órbita completa) depende da distância entre o objeto e a Terra. Consequentemente, os satélites de comunicação são classificados em três grandes categorias, dependendo de sua distância da Terra. A Figura 7.11 lista as categorias e descreve cada uma.

Tipo de órbita	Descrição
Satélites de Baixa Órbita (LEO, <i>Low Earth Orbit</i>)	Tem a vantagem de baixo atraso, mas a desvantagem, do ponto de vista de um observador da Terra, é que o satélite parece mover-se devagar pelo céu
Satélites de Média Órbita (MEO, <i>Medium Earth Orbit</i>)	Uma forma elíptica (em vez de circular) de órbita utilizada para fornecer comunicação nos polos Norte e Sul ³
Satélites Geoestacionários (GEO, <i>Geostationary Earth Orbit</i>)	Tem a vantagem de o satélite permanecer em um local fixo em relação a uma localização na superfície da Terra, mas a desvantagem de estar mais longe

Figura 7.11 As três categorias básicas da comunicação por satélites.

7.16 Satélites Geoestacionários (GEO)

Como a Figura 7.11 explica, o principais efeitos colaterais em satélites de comunicação estão relacionados com a altura e o período orbital. A principal vantagem de um *Satélites Geoestacionários* (GEO, *Geostationary Earth Orbit*) é que seu período orbital é exatamente igual à taxa em que a Terra gira. Se posicionado acima do equador, um satélite GEO permanece exatamente na mesma posição sobre a superfície da Terra em todos os momentos. A posição do satélite estacionário significa que, uma vez que uma *estação terrestre* for alinhada com o satélite, o equipamento nunca precisará se movimentar. A Figura 7.12 ilustra o conceito.

³ Em 2013, uma empresa comercial (O3b) anunciou que criaria o primeiro satélite conjunto MEO com a intenção de oferecer serviços de Internet para pessoas sem acesso à rede (aproximadamente 3 bilhões).

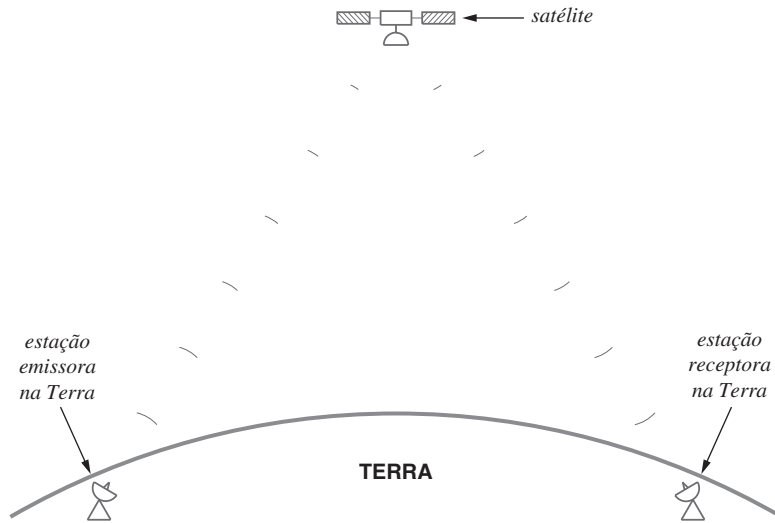


Figura 7.12 Um satélite GEO e as estações alinhadas permanentemente na Terra.

Infelizmente, a distância necessária para uma órbita geoestacionária é de 35.785 km ou 22.236 milhas, cerca de um décimo da distância até a Lua. Para entender o que tal distância significa para a comunicação, considere uma onda de rádio viajando, ida e volta, para um satélite GEO. Na velocidade da luz, 3×10^8 metros por segundo, a viagem demoraria:

$$\frac{2 \times 35,8 \times 10^6 \text{ metros}}{3 \times 10^8 \text{ metros/seg}} = 0,238 \text{ seg} \quad (7.1)$$

Embora pareça sem importância, um atraso de aproximadamente 0,2 segundo pode ser significativo para algumas aplicações. Em um telefonema ou uma videoconferência, um humano pode notar o atraso de 0,2 segundos. Para transações eletrônicas, como uma bolsa de valores que oferece um conjunto limitado de títulos, atrasar uma oferta em 0,2 segundos pode significar a diferença entre o sucesso e o insucesso dela. Para resumir:

Mesmo na velocidade da luz, um sinal leva mais do que 0,2 segundos para viajar para um satélite GEO partindo de uma estação terrestre e voltando a outra estação.

7.17 Cobertura GEO da Terra

Quantos satélites de comunicação GEO podem existir? Curiosamente, existe uma quantidade limitada de “espaço” disponível na órbita geoestacionária acima do equador, porque os satélites de comunicação usam uma dada frequência e devem ser separados um do outro para evitar a interferência. A distância mínima depende da potência dos transmissores, mas pode requerer uma separação angular de 4° a 8° . Assim, sem refinamentos adicionais, todo o círculo de 360° acima do equador só pode abrigar de 45 a 90 satélites.

Qual é o número mínimo de satélites necessários para cobrir a Terra? Três. Para entender o porquê, considere a Figura 7.13, que ilustra a Terra com três satélites GEO posicionados ao redor do equador com a separação de 120° . A figura ilustra como os sinais dos três satélites cobrem a circunferência da Terra. Na figura, o tamanho da Terra e a distância dos satélites estão desenhados em escala.

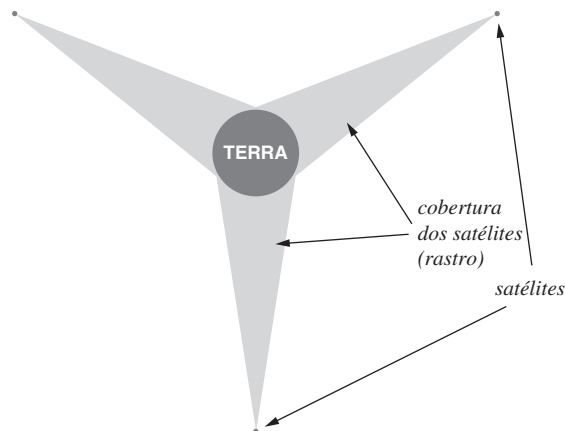


Figura 7.13 Os sinais de três satélites GEO são suficientes para cobrir toda a Terra.

7.18 Satélites de baixa órbita e clusters (agrupamentos)

Para a comunicação, a principal alternativa ao GEO é conhecida como *satélites de baixa órbita* ou *Low Earth Orbit (LEO)*, que é definida como altitudes de até 2.000 quilômetros. Por uma questão prática, um satélite deve ser colocado acima da margem da atmosfera para evitar o arrasto produzido pelo encontro dos gases. Assim, os satélites LEO são normalmente colocados em altitudes de no mínimo 500 quilômetros. A LEO oferece a vantagem de atrasos curtos (tipicamente de 1 a 4 milissegundos), mas a órbita do satélite não coincide com a rotação da Terra. Assim, do ponto de vista de um observador na Terra, um satélite LEO parece mover-se pelo céu, o que significa que uma estação terrestre deve ter uma antena capaz de girar para acompanhar o satélite. O rastreamento é difícil, porque os satélites movem-se rapidamente. Os satélites LEO de menor altitude orbitam a Terra em aproximadamente 90 minutos; os satélites LEO mais altos necessitam de várias horas.

A técnica geral usada com satélites LEO é conhecida como *cluster* ou *array deployment*. Um grande grupo de satélites LEO é projetado para trabalhar junto. Além de se comunicar com as estações na Terra, um satélite pode também comunicar-se com outros satélites do grupo. Os membros do conjunto permanecem em comunicação e concordam em encaminhar mensagens, conforme a necessidade. Por exemplo, considere o que acontece quando um usuário na Europa envia uma mensagem para um usuário na América do Norte. Uma estação terrestre na Europa transmite a mensagem para o satélite que está atualmente acima na órbita. O grupo de satélites se comunica para encaminhar a mensagem para o satélite no cluster que está sobre a estação terrestre na

América do Norte. Finalmente, este transmite a mensagem para uma estação terrestre. Para resumir:

Um cluster de satélites LEO trabalha para transmitir mensagens. Os membros do cluster devem saber qual satélite está atualmente sobre uma determinada área da Terra e encaminhar mensagens ao membro apropriado para que sejam transmitidas a uma estação terrestre.

7.19 Balanço entre os tipos de meios

A escolha de um meio é complexa e envolve uma avaliação de vários fatores. Aspectos que devem ser considerados:

- Custo: materiais, instalação, operação e manutenção
- Taxa de dados: número de bits que podem ser enviados por segundo
- Delay: tempo necessário para a propagação ou o processamento do sinal
- Efeito sobre o sinal: atenuação e distorção
- Ambiente: suscetibilidade a interferências e ruídos elétricos
- Segurança: suscetibilidade à espionagem

7.20 Mensuração dos meios de transmissão

Já mencionamos as duas medidas de desempenho mais importantes utilizadas para avaliar um meio de transmissão:

- Atraso de propagação: o tempo necessário para um sinal atravessar o meio
- Capacidade do canal: a taxa máxima de dados que o meio pode suportar

O Capítulo 6 explica que, na década de 1920, um pesquisador chamado Nyquist descobriu uma relação fundamental entre a largura de banda da rede de um sistema de transmissão e sua capacidade de transferência de dados. Conhecida como *Teorema de Nyquist*, a relação fornece um limite teórico para a taxa máxima na qual os dados podem ser enviados, sem considerar o efeito do ruído. Se um sistema de transmissão usa K possíveis níveis de sinal e tem uma largura de banda analógica B , o Teorema de Nyquist afirma que a taxa máxima de dados em bits por segundo, D , é:

$$D = 2 B \log_2 K \quad (7.2)$$

7.21 O efeito do ruído na comunicação

O Teorema de Nyquist fornece um valor máximo absoluto que não pode ser alcançado na prática. Em particular, os engenheiros têm observado que um sistema de comunicação real está sujeito a pequenas quantidades de ruídos elétricos e que tais ruídos tornam impossível atingir a taxa de transmissão teórica máxima. Em 1948, Claude Shannon estendeu o trabalho de Nyquist para especificar a taxa máxima de dados que poderia ser

alcançada por um sistema de transmissão que considera ruídos. O resultado, chamado *Teorema de Shannon*⁴, pode ser definido como:

$$C = B \log_2 (1 + S/N) \quad (7.3)$$

onde C é o limite efetivo na capacidade do canal em bits por segundo, B é a largura de banda de hardware e S/N é a *signal-to-noise ratio*, ou seja, a razão da potência média do sinal dividida pela potência média do ruído.

Como um exemplo do Teorema de Shannon, considere um meio de transmissão que tem uma largura de banda de 1 kHz, uma potência média de sinal de 70 unidades e uma potência média de ruído de 10 unidades. A capacidade do canal é:

$$C = 10^3 \times \log_2 (1 + 7) = 10^3 \times 3 = 3.000 \text{ bits por segundo}$$

A *signal-to-noise ratio* é frequentemente dada em *decibéis (dB)*, e um decibel é definido como uma medida da diferença entre dois níveis de potência. A Figura 7.14 ilustra a medida.

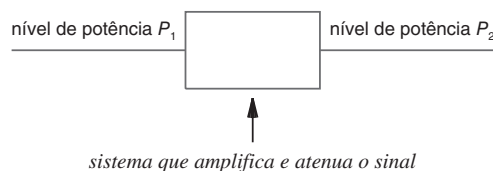


Figura 7.14 Níveis de potência medidos em ambos os lados de um sistema.

Uma vez que dois níveis de potência tenham sido medidos, a diferença é expressa em decibéis, como segue:

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (7.4)$$

Usar dB como medida pode parecer trivial, mas tem duas vantagens interessantes. Em primeiro lugar, um valor dB negativo significa que o sinal foi *atenuado* (ou seja, reduzido) e um valor dB positivo significa que o sinal foi *amplificado*. Em segundo lugar, se um sistema de comunicação tem várias partes dispostas numa sequência, as medidas de decibéis das partes podem ser somadas para produzir uma medida de todo o sistema.

O sistema de telefonia de voz tem uma *relação sinal-ruído (signal-to-noise ratio)* de aproximadamente 30 dB e uma largura de banda analógica de aproximadamente 3.000 Hz. Para converter de relação sinal-ruído em dB em uma fração simples, é preciso dividir por 10 e utilizar o resultado como uma potência de 10 (ou seja, 30/10 = 3 e $10^3 = 1.000$, de modo que relação sinal-ruído é 1.000). O Teorema de Shannon pode ser aplicado para determinar o número máximo de bits por segundo que podem ser transmitidos através da rede telefônica:

$$C = 3.000 \times \log_2 (1 + 1.000)$$

⁴ O resultado também é chamado de *Lei de Shannon-Hartley*.

ou aproximadamente 30.000 bit/s. Os engenheiros reconhecem esse como um limite fundamental – velocidades de transmissão mais rápidas somente serão possíveis se a relação sinal-ruído puder ser melhorada.

7.22 O significado da capacidade do canal

Os teoremas de Nyquist e Shannon, descritos acima, têm consequências para os engenheiros que projetam redes de comunicação de dados. O trabalho de Nyquist forneceu um incentivo para a exploração de formas complexas de codificar os bits em sinais:

O Teorema de Nyquist incentiva os engenheiros a estudar formas para codificar os bits em um sinal, porque uma codificação inteligente permite mais bits transmitidos por unidade de tempo.

Em certo sentido, o Teorema de Shannon é mais fundamental, porque ele representa um limite absoluto derivado das leis da física. Muito do ruído em uma linha de transmissão, por exemplo, pode ser atribuído à radiação de fundo do universo, que sobrou do *Big Bang*. Assim:

O Teorema de Shannon informa aos engenheiros que não existirá qualquer forma de codificação, por mais inteligente que seja, que possa superar as leis da física. Tais leis colocam um limite máximo do número de bits por segundo que podem ser transmitidos em um sistema real de comunicação.

7.23 Resumo

Existe uma variedade de meios de transmissão que podem ser classificados como guiados/não guiados ou divididos de acordo com a forma de energia utilizada (elétrica, luz ou transmissão de rádio). A energia elétrica é transmitida através de fios. Para se proteger contra a interferência elétrica, a fiação de cobre pode consistir em pares trançados ou ser envolta por uma capa que funciona como uma blindagem.

A energia luminosa pode ser transmitida através da fibra óptica ou da comunicação ponto-a-ponto, com infravermelho ou lasers. Como é refletida a partir do limite entre a fibra e o revestimento, a luz permanece na fibra óptica proporcionada pelo ângulo de incidência, que é maior do que o ângulo crítico. À medida que passa ao longo de uma fibra, um pulso de luz se dispersa; a dispersão é maior em uma fibra multimodo e menor em uma fibra de modo único. A fibra de modo único é mais cara.

A comunicação sem fio usa energia eletromagnética. A frequência utilizada determina tanto a largura de banda quanto o comportamento de propagação; as frequências baixas seguem a superfície da Terra, as frequências altas são refletidas a partir da ionosfera e as frequências mais altas se comportam como a luz visível, exigindo um caminho direto, sem obstruções entre emissor e receptor.

A principal tecnologia de comunicação não terrestre depende de satélites. A órbita de um satélite GEO corresponde à rotação da Terra, mas a alta altitude incorre em um atraso medido em décimos de segundos. Os satélites LEO têm baixo atraso e se movem pelo céu rapidamente; clusters são usados para transmitir as mensagens.

O Teorema de Nyquist apresenta um limite teórico sobre a capacidade do canal dos meios de transmissão quando nenhum ruído está presente; o Teorema de Shannon especifica a capacidade do canal em situações reais em que o ruído está presente. A relação sinal-ruído, termo do Teorema de Shannon, é normalmente medida em decibéis.

Exercícios

- 7.1 Qual é a diferença entre as transmissões guiadas e não guiadas?
- 7.2 Quais são os três tipos de energia utilizados na classificação de meios físicos de acordo com a energia utilizada?
- 7.3 O que acontece quando o ruído encontra um objeto de metal?
- 7.4 Quais são os três tipos de cabos usados para reduzir a interferência de ruído?
- 7.5 Explique como o cabo de par trançado reduz o efeito do ruído.
- 7.6 Desenhe um diagrama que ilustre a seção transversal de um cabo coaxial.
- 7.7 Se você estiver instalando o cabeamento de uma rede de computadores em uma casa nova, que categoria de cabo de par trançado você escolheria? Por quê?
- 7.8 Explique por que a luz não deixa uma fibra óptica quando esta é dobrada como um arco.
- 7.9 O que é dispersão?
- 7.10 Liste as três formas de fibra óptica e cite as propriedades gerais de cada uma.
- 7.11 Quais fontes de luz e sensores são usados com fibras ópticas?
- 7.12 Qual é a principal desvantagem da fibra óptica em oposição à fiação de cobre?
- 7.13 Qual é o ângulo cônico aproximado que pode ser usado com a tecnologia de infravermelhos?
- 7.14 Uma comunicação a laser pode ser utilizada em um veículo em movimento? Explique.
- 7.15 Por que a radiação eletromagnética de baixa frequência pode ser usada para as comunicações? Explique.
- 7.16 Quais são as duas grandes categorias da comunicação sem fio?
- 7.17 Liste os três tipos de satélites de comunicação e cite as características de cada um.
- 7.18 Se mensagens são enviadas da Europa para os Estados Unidos por meio de um satélite GEO, quanto tempo levará para que uma mensagem seja enviada e uma resposta seja recebida?
- 7.19 Quantos satélites GEO são necessários para cobrir todas as áreas povoadas da Terra?
- 7.20 O que é o atraso de propagação?
- 7.21 Qual é a relação entre a largura de banda da rede, os níveis de sinal e a velocidade de dados?
- 7.22 Se forem utilizados dois níveis de sinal, qual taxa de dados pode ser enviada através de um cabo coaxial que tem uma largura de banda analógica de 6,2 MHz?
- 7.23 Se um sistema tem um nível de potência média de 100, um nível de ruído médio de 33,33 e uma largura de banda de 100 MHz, qual é o limite efetivo da capacidade do canal?
- 7.24 Se um sistema tem um nível de potência de entrada de 9.000 e um nível de potência de saída de 3.000, qual é a diferença quando expressa em dB?
- 7.25 Se um sistema de telefone pode ser criado com uma relação sinal-ruído de 40 dB e uma largura de banda analógica de 3.000 Hz, quantos bits por segundo podem ser transmitidos?

Encerra aqui o trecho do livro disponibilizado para esta Unidade de Aprendizagem. Na Biblioteca Virtual da Instituição, você encontra a obra na íntegra.