

CAMADA FÍSICA E MEIOS DE TRANSMISSÃO

Nossa discussão sobre a pilha de protocolos TCP/IP ficaria incompleta sem uma explicação sobre a camada física e os meios de transmissão que transportam os sinais criados por ela. Entretanto, este capítulo pode ser parcial ou totalmente ignorado se o leitor tiver algum conhecimento sobre a camada física, cujo papel, é importante ressaltar, é receber o *bit* da camada de aplicação e transformá-lo em um sinal elétrico, acústico, luminoso ou qualquer outro que possa ser usado para transmitir os dados. Nas seções deste capítulo discutimos essa tarefa. Depois, dois *bits* transmitidos convertidos em sinais, esses sinais enviados para os meios de transmissão, tema da nossa discussão na última seção. Dividimos este capítulo em cinco seções:

- Na primeira seção, discutimos primeiramente a relação entre dados e sinais. Mostramos, com exemplos, como os dados são transformados em sinais e discutimos algumas características dos sinais analógicos e suas características, bem como os sinais digitais e suas características. Também discutimos algumas questões relacionadas com a capacidade e o desempenho dos canais físicos.
- Na segunda seção, nos concentramos na transmissão digital. Primeiramente, mostramos como converter dados digitais em sinais digitais, e depois, dados analógicos em sinais digitais.
- Na terceira seção, nos concentramos na transmissão analógica. Primeiramente, mostramos como converter dados digitais em sinais analógicos, e depois, dados analógicos em sinais analógicos.
- Na quarta seção, primeiramente mostramos como técnicas de multiplexação podem complementar a técnica de modulação para permitir a transmissão de sinais de alta taxa de transmissão em um canal de baixa taxa de transmissão. Depois, discutimos como as técnicas de espalhamento espectral podem proteger um sinal contra intrusos.
- Na quinta seção, vamos abaixo da camada física e discutimos os meios de transmissão usados na comunicação de dados. Apresentamos tanto os meios guiados (fios e cabos) como meios não guiados (ar).

7.1 DADOS E SINAIS

Na camada física, a comunicação é *não a nã*, porém os nós trocam sinais eletromagnéticos entre eles. A Figura 7.1 usa o mesmo cenário que mostramos nos quatro capítulos anteriores, mas a comunicação agora é na camada física.

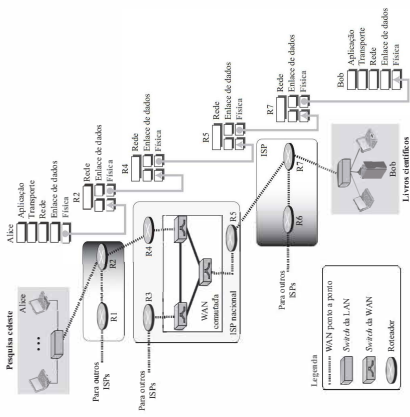


Figura 7.1 Comunicação na camada física.

Uma das principais funções da camada física é rotear *bits* entre nós. No entanto, como os *bits* representam dois valores possíveis armazenados na memória de um nó (*bit*, *pacote* ou *segmento*), o roteamento é feito com base no endereço lógico do nó, e não no endereço físico. Os dados são roteados em unidades antes da transmissão. Assim, a principal tarefa da camada física é converter de maneira eficiente esses *bits* em sinais eletromagnéticos. Primeiramente, precisamos entender a natureza dos dados, e então os tipos de sinais, para aprender a fazer essa conversão de forma eficiente.

7.1.1 Analógico e digital

Os dados podem ser analógicos ou digitais. O termo **dados analógicos** refere-se a informações contínuas. Os dados analógicos, como os dados de áudio e vídeo, são representados por uma onda contínua. Quando um sinal físico pode assumir qualquer valor dentro de um intervalo contínuo, esse sinal é considerado analógico e convertido em um sinal analógico ou então amostrado e convertido em um sinal digital.

Os dados digitais assumem valores discretos. Por exemplo, os dados são armazenados na memória de um computador na forma de bits e se podem ser representados em um sinal digital modulado ou em um sinal analógico para a transmissão através de um meio.

Assim como os dados que eles representam, os *sinais* podem ser analógicos ou digitais. Um **sinal analógico** apresenta um número infinitamente grande de níveis de intensidade em certo intervalo de tempo. A medida que o sinal se move de um valor A para o valor B, ele pode assumir um número infinito de valores ao longo do caminho. Um **sinal digital** , por outro lado, pode apresentar apenas um número restrito de níveis de intensidade. Embora tal sinal possa ser transmitido através de um meio analógico, ele não é um **sinal analógico** . Um **sinal digital** pode ser transmitido através de um meio analógico, mas não é um **sinal analógico** . Um **sinal digital** pode ser transmitido através de um meio digital, mas não é um **sinal digital** . Um **sinal digital** pode ser transmitido através de um meio analógico, mas não é um **sinal analógico** . Um **sinal digital** pode ser transmitido através de um meio digital, mas não é um **sinal digital** . Um **sinal digital** pode ser transmitido através de um meio analógico, mas não é um **sinal analógico** . Um **sinal digital** pode ser transmitido através de um meio digital, mas não é um **sinal digital** .

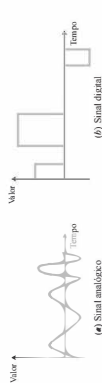


Figura 7.2 Comparação entre sinais analógicos e digitais.

Sinais analógicos

Primeiramente, explicaremos os sinais analógicos. Um sinal analógico pode assumir uma de duas formas: **periódico** ou **aperiódico (não periódico)** . Um **sinal analógico periódico** apresenta um padrão dentro de um intervalo de tempo mensurável, denominado **período** , e repete esse padrão em intervalos de tempo iguais. Um **sinal analógico aperiódico** varia sem seguir um padrão ou ciclo que se repete ao longo do tempo. No contexto de comunicação de dados, geralmente usamos sinais analógicos periódicos.

Os sinais analógicos periódicos podem ser classificados como simples ou compostos. Um sinal analógico periódico simples consiste em uma **onda senoidal** , não podendo ser decomposto em sinais ainda mais básicos. Um **sinal analógico periódico composto** é uma combinação de diversos ondas senoidais. A **onda senoidal** é a forma mais fundamental de um sinal analógico periódico. Quando a comunicação de dados é feita por meio de ondas senoidais, o sinal resultante é um **sinal analógico periódico composto** , criando um fluxo contínuo e ondulante. A Figura 7.3 mostra uma **onda senoidal** . Cada ciclo é constituído por um único arco acima do eixo de tempo seguido por um único arco abaixo dele.

Uma **onda senoidal** pode ser representada por três parâmetros: a **amplitude de pico** , a **frequência** e a **fase** . Esses três parâmetros descrevem completamente uma **onda senoidal** . A **amplitude de pico** de um sinal corresponde ao valor absoluto de sua intensidade mais elevada e é proporcional à energia que o sinal transporta. Para sinais elétricos, a amplitude de pico é medida em volts. Para sinais mecânicos, a amplitude de pico é medida em metros. A **frequência** é o número de ciclos completos de uma **onda senoidal** por unidade de tempo, em segundos, que um sinal leva para completar um ciclo. A **frequência** medida em Hertz (Hz) refere-se ao número de períodos em 1 segundo. Perceba que período e frequência referem-se a uma mesma característica definida de duas formas distintas: Período e frequência são inversos um do outro ($f = 1/T$).

O tempo f descreve a posição da forma de onda em relação ao instante de tempo 0. Se passarmos na onda um valor que pode ser escolhido para ser 0 para a frente ao longo do eixo do tempo, a onda senoidal muda de fase. Um ciclo completo corresponde a 2π radianos (360°) e medido em graus ou radianos (360°) corresponde a 2π radianos.

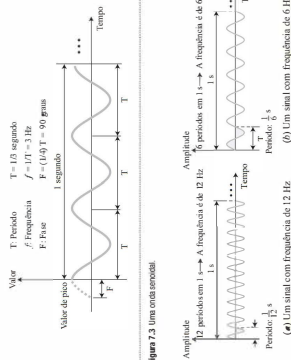


Figura 7.3 Comprimento de onda e período.

O **comprimento de onda** é outra característica de um sinal viajando por um meio de transmissão. O comprimento de onda corresponde à distância que um sinal simples pode viajar em um período. O comprimento de onda vincula o período ou a frequência de uma **onda senoidal** simples à velocidade de propagação do meio (ver Figura 7.4).

Quando se fala em comprimento de onda, o comprimento de onda do meio, o comprimento de onda depende tanto da frequência como do meio. O comprimento de onda é uma propriedade de qualquer tipo de sinal. No contexto de comunicações de dados, geralmente usamos o comprimento de onda para descrever a transmissão de luz em uma fibra óptica.

O comprimento de onda pode ser calculado a partir da velocidade de propagação do meio e da frequência do sinal. Se representarmos o comprimento de onda por λ , a velocidade de propagação por c (velocidade da luz) e a frequência por f , temos

$$\lambda = c / f = c \times T$$

Domínios do tempo e da frequência

Uma **onda senoidal** é completamente definida por sua amplitude, frequência e fase. Até aqui temos mostrado uma **onda senoidal** usando a chamada **representação no domínio do tempo** , que mostra as variações na amplitude do sinal em função do tempo. Para mostrar a relação entre a amplitude e a frequência de uma **onda senoidal** , usamos a **representação no domínio da frequência** . A Figura 7.5 mostra um **sinal** representado usando os domínios do tempo e da frequência. No domínio da frequência, uma **onda senoidal** é representada por uma linha vertical. A posição da linha mostra a frequência; a sua altura mostra a amplitude de pico.

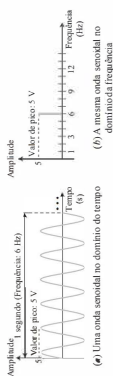


Figura 7.5 Representações no domínio do tempo e no domínio da frequência de uma onda senoidal.

Exemplo 7.1

O domínio da frequência é mais conveniente do que o domínio do tempo para analisar uma única onda senoidal. A Figura 7.6 mostra três ondas senoidais, cada uma com amplitude e frequência diferentes. Todas elas podem ser representadas usando três linhas verticais no domínio da frequência.

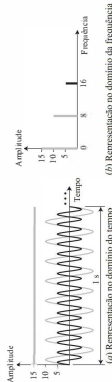


Figura 7.6 O domínio do tempo e o domínio da frequência de três ondas senoidais.

Sinais compostos

Até aqui, nos concentráramos em ondas senoidais simples, que têm muitas aplicações na vida cotidiana, como para avar a energia de um lugar para outro. No entanto, se tivéssemos uma única onda senoidal para transmitir uma conversa por telefone, daí não faria sentido e não carregaria qualquer informação. Para transmitir uma conversa por telefone, precisamos de ondas senoidais compostas, ou seja, ondas senoidais compostas. Um **sinal composto** é constituído por diversas ondas senoidais simples. No início dos anos 1900, o matemático francês Jean-Baptiste Fourier mostrou que qualquer sinal composto é, na verdade, uma combinação de ondas senoidais simples com diferentes frequências, amplitudes e fases.

Um sinal composto pode ser periódico ou aperiódico. Um sinal periódico composto pode ser decomposto em um número infinito de ondas senoidais simples com frequências contínuas, ou seja, frequências que assumem valores no domínio dos números reais.

Largura de banda

A faixa de frequências contidas em um sinal composto determina sua **largura de banda**, que é normalmente, uma diferença entre dois números. Por exemplo, se um sinal composto contém frequências entre 1 000 e 5 000, a sua largura de banda é 5 000 – 1 000, ou 4 000.

A largura de banda de um sinal composto é a diferença entre a maior e a menor frequências contidas naquele sinal.

A Figura 7.7 ilustra o conceito de largura de banda e mostra dois sinais compostos, um periódico e outro aperiódico. A largura de banda de um sinal periódico contém diversas frequências discretas e suas várias múltiplas harmônicas é fundamental. A largura de banda de um sinal aperiódico apresenta a mesma faixa de valores, mas as frequências são contínuas.

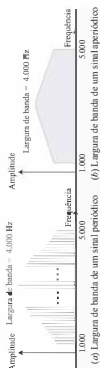


Figura 7.7 A largura de banda de sinais compostos periódicos e aperiódicos.

Sinais digitais

Além de ser representado por um sinal analógico, a informação pode também ser representada por um sinal digital. Por exemplo, um **bit** 1 pode ser codificado como uma tensão positiva e um **bit** 0 como uma tensão nula. Um sinal digital pode ser mais de dois níveis. Neste caso, podemos evitar muitos erros de interpretação e, portanto, podemos transmitir mais dados em menos tempo. Quando transmitimos um sinal digital, precisamos de um meio de transmissão adequado. Por exemplo, a **taxa de bits** (a taxa de 2 bits por segundo) da figura 7.8a é baixa. Geralmente, um sinal tem L níveis, cada nível pode carregar $\log_2 L$ bits.

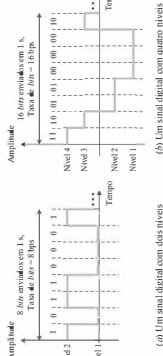


Figura 7.8 Dois sinais digitais: um com dois níveis de sinal e outro com quatro níveis de sinal.

Taxa de bits

A maioria dos sinais digitais são aperiódicos e, portanto, o período e frequência não são características apropriadas para descrevê-los. Outro termo – **taxa de bits** (em vez de **frequência**) – é usado para descrever sinais digitais. A **taxa de bits** corresponde ao número de bits enviados em 1 segundo, expresso em bits por segundo (bps).

Exemplo 7.2

Considere que precisamos receber documentos de texto a uma taxa de 100 páginas por minuto. Qual é a taxa de bits necessária para o canal? Uma página tem em média 24 linhas com 80 caracteres em cada uma. Se considerarmos que um caractere requer 8 bits, a taxa de bits será

$$100 \times 24 \times 80 \times 8 = 1.536.000 \text{ bits} = 1.536 \text{ Mbits}$$

Comprimento de bit

Discutimos o conceito de comprimento de onda para um sinal analógico: a distância que um ciclo ocupa no meio de transmissão. Podemos definir algo semelhante para um sinal digital: o comprimento de bit. O comprimento de bit corresponde à distância que um bit ocupa no meio de transmissão.

$$\text{Comprimento de bit} = \text{velocidade de propagação} \times \text{duração do bit}$$

Sinal digital como um sinal analógico composto

De acordo com a análise de Fourier, um sinal digital corresponde a um sinal analógico composto. A largura de banda é infinita, como você já deve ter suposto. Podemos, intuitivamente, chegar a essa conclusão analisando o sinal digital sob o ponto de vista de suas componentes de frequência. Os segmentos de linha verticais e horizontais encadeados. Uma linha vertical no domínio do tempo significa uma frequência de valor infinito (variação súbita em um curto intervalo de tempo); uma linha horizontal no domínio do tempo significa uma frequência de valor zero (sem variação no tempo). Ir de uma frequência zero até outra infinita (e vice-versa) implica que todas as frequências intermediárias fazem parte do domínio de frequência. Assim, para descompor um sinal digital, basta ser periódico, algo raro em comunicações de dados, a representação do sinal descomposto no domínio da frequência apresenta uma largura de banda infinita e frequências discretas. Se for aperiódico, o sinal descomposto ainda apresenta uma largura de banda infinita, mas as frequências são contínuas. A Figura 7.9 mostra um sinal digital periódico e um aperiódico juntamente com suas larguras de banda. Observe que ambas as larguras de banda são infinitas, mas o sinal periódico apresenta frequências discretas, enquanto no sinal aperiódico, as frequências são contínuas.

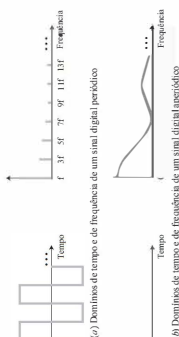


Figura 7.9 Os domínios de tempo e de frequência de sinais digitais periódicos e aperiódicos.

Transmissão de sinais digitais

Na discussão anterior, discutimos que um sinal digital, periódico ou aperiódico, é um sinal composto analógico com frequências entre zero e infinito. A partir de agora, consideraremos o caso de um sinal digital aperiódico. Como vimos, a transmissão de um sinal digital periódico é mais simples, fundamentalmente, é como podemos enviar um sinal digital (do ponto de vista físico)? Podemos transmitir um sinal digital usando uma dentre duas abordagens distintas: transmissão em banda base ou transmissão em banda larga (utilizando modulação).

Transmissão em banda base

A transmissão em banda base corresponde ao envio de um sinal digital por um canal sem transformar o sinal digital em analógico. A Figura 7.10 mostra a transmissão em banda base.



Figura 7.10 Transmissão em banda base.

A transmissão em banda base requer o uso de um canal passa-baixas, um canal com uma banda que se inicia em zero. Esse é o caso se tivermos um meio dedicado cuja largura de banda seja usada por um único canal. Por exemplo, toda a largura de banda de um cabo que conecta dois computadores a um meio, podem não permitir que mais de duas estações se comuniquem ao mesmo tempo. Temos novamente um canal passa-baixas, que pode ser usado para comunicações em banda base.

Exemplo 7.3

Um exemplo de um canal dedicado no qual a largura de banda inteira do meio é usada como um único canal é uma LAN. Quase todas as LANs com fios atuais utilizam um canal dedicado para que duas estações se comuniquem umas com as outras.

Transmissão em banda larga

A transmissão em banda larga em modulação corresponde a transformar o sinal digital em um sinal analógico. Quando usamos modulação, temos um canal passa-faixa, um canal com uma largura de banda que não se inicia em zero. Esse tipo de canal é mais facilmente encontrado que um canal passa-baixas. A Figura 7.11 mostra um canal passa-faixa.

Perciba que um canal passa-baixas pode ser considerado um canal passa-faixa cuja frequência inferior se inicia em zero. A Figura 7.12 mostra a modulação de digital. Na figura, um sinal digital é convertido em um sinal analógico periódico. O sinal analógico periódico é convertido em um sinal de portadora, a amplitude da portadora foi alterada para se parecer com o sinal digital. O resultado, no entanto, não é um sinal de frequência única; trata-se de um sinal composto, conforme veremos mais adiante. No receptor, o sinal analógico recebido é convertido em um sinal digital e o resultado é uma cópia daquele que foi enviado.



Figura 7.11 Largura de banda de um canal passa-faixa.

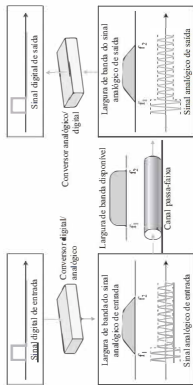


Figura 7.12 Modulação de um sinal digital para transmissão em um canal passa-faixa.

Exemplo 7.4

Um exemplo de transmissão em banda larga usando modulação é o envio de dados de um computador por meio de uma linha telefônica de assinante, a linha conectando uma residência à central telefônica. Tais linhas, necessariamente, têm muitos anos, são projetadas para transportar voz (sinal analógico) com uma largura de banda de 3,4 kHz. Embora tenham sido projetadas para voz, elas também podem ser usadas para transmitir dados. Normalmente consideramos um canal passa-faixa, uma razão para isso é que a largura de banda é tão estreita (4 kHz), que, se tratarmos o canal com um passa-baixas e o usarmos para a transmissão em banda base, a taxa de bits máxima pode chegar a apenas 8 kbps (conforme explicado mais adiante). A solução é considerar o canal como um canal passa-faixa, converter o sinal digital proveniente do computador em um sinal analógico e enviá-lo. Podemos realizar duas conversões para transformar o sinal digital em analógico e vice-versa no lado do receptor. O conversor, nesse caso, é denominado um *modem (modulador/demodulador)*, conforme discutido no capítulo 3.

Exemplo 7.5

Um segundo exemplo é o telefone celular digital. Para obter uma melhor recepção, os telefones celulares digitais digitalizam a voz analógica. Embora a largura de banda alocada a uma empresa prestadora de serviços de telefonia celular digital seja muito grande, ainda assim nós podemos enviar o sinal digitalizado sem conversão. A razão é que temos apenas um canal passa-faixa disponível entre o usuário que faz a chamada e aquele que recebe a chamada. Se a largura de banda de um sistema de telefonia celular for 100 para o canal de transmissão, o canal de recepção também terá 100 para o canal de recepção. Portanto, a largura de banda completa. Precisamos converter a voz digitalizada em um sinal analógico composto antes da transmissão.

7.1.2 Problemas na transmissão

Os sinais viajam por meios de transmissão que não são perfeitos; as imperfeições causam danos ao sinal. Isso significa que o sinal no início do meio não é igual ao do final do meio. Aquilo que é enviado não é exatamente o que é recebido. Três causas de danos ao sinal são atenuação, distorção e ruído.

Atenuação

Atenuação significa uma perda de energia. Quando um sinal, simples ou composto, viaja por um meio, ele perde parte da sua energia para superar a resistência do meio. É por isso que um fio que transporta sinais elétricos fica quente, ou, mesmo quente, depois de algum tempo. Uma parte da energia é dissipada na forma de calor. Quando os sinais viajam por meios de transmissão sem fio, são usados para aumentar o sinal. A Figura 7.13 mostra o efeito da atenuação e da amplificação.

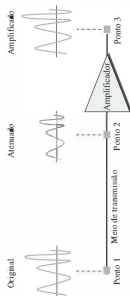


Figura 7.13 Atenuação e amplificação.

Para mostrar que um sinal perdeu ou ganhou força, os engenheiros usam o decibel (dB), unidade que mede as forças relativas de dois sinais ou de um mesmo sinal em dois pontos diferentes. Perceba que o decibel é negativo se o sinal for atenuado e positivo se o sinal for amplificado.

$$\text{dB} = 10 \log_{10} (P_2/P_1)$$

As variáveis P_1 e P_2 correspondem à potência de um sinal nos pontos 1 e 2, respectivamente.

Exemplo 7.6

Considere que um sinal viaja por um meio de transmissão e que a sua potência seja reduzida pela metade. Isso significa que $P_2 = 0,5 P_1$. Nesse caso, a atenuação (em dB) pode ser calculada como

$$10 \log_{10} (P_2/P_1) = 10 \log_{10} (0,5 P_1/P_1) = 10 \log_{10} 0,5 = 10 \times (-0,3) = -3 \text{ dB}$$

Uma perda de 3 dB (-3 dB) é equivalente à perda de metade da potência.

Distorção

Distorção significa que a forma do sinal é alterada. A distorção pode afetar um sinal composto constituído por diferentes frequências. Cada componente de sinal apenas ataca sua própria velocidade de propagação em um meio e, portanto, o seu próprio atraso até chegar ao destino final. Diferenças no atraso podem criar uma diferença de fase se o valor do atraso não for exatamente igual à duração de um período das várias componentes do sinal. Quando os sinais chegam no receptor apresentam fases diferentes, o que pode causar distorção. A forma de onda do sinal pode ser má e, portanto, a mesma. A Figura 7.4 mostra o efeito da distorção em um sinal composto.

Ruído

Ruído é uma outra fonte de problemas. Diversos tipos de ruído, como térmico, indutivo, interferências cruzadas e ruído impulsivo, podem corromper o sinal. ● Ruído térmico consiste no movimento

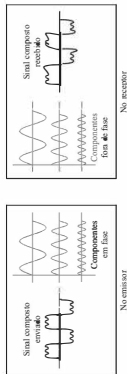


Figura 7.14 Distúrbio

atualizado de elétrons em um fio, o qual gera um sinal extra não enviado originalmente pelo emissor. O ruído indutivo provém de fontes como motores e eletrodomésticos. Esses dispositivos, assim como uma antena emissora, enquanto o meio de transmissão age como a antena receptora. **Interferência cruzada** (também denominada **diafonia**) corresponde ao efeito de um fio sobre o outro. Um fio atua como uma antena emissora e o outro como a antena receptora. O ruído impulsivo é um pulso (um sinal com energia elevada e duração muito curta) proveniente de linhas de transmissão de energia, raios, e assim por diante. A Figura 7.15 mostra o efeito do ruído sobre um sinal. No Capítulo 5, discutimos como detectar e controlar esses tipos de erros.

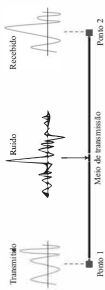


Figura 7.15 Ruído

Relação Sinal/Ruído

Conforme veremos mais adiante, para determinar o limite teórico da taxa de bits, precisamos saber a razão entre a potência do sinal e a potência de ruído. A **relação Sinal/Ruído** (SR), ou **Signal-to-Noise Ratio** (SNR), é definida como

$$SR = (\text{potência média do sinal}) / (\text{potência média do ruído}).$$

Precisamos considerar a potência média do sinal e a potência média do ruído, porque esses valores podem mudar com o tempo. A Figura 7.16 ilustra a ideia da SR. Uma SR alta indica que o sinal é menos corrompido pelo ruído; uma SR baixa indica que o sinal é mais corrompido pelo ruído. Como a SR é a razão entre duas potências, ela é muitas vezes escrita em unidades de decibéis, SNR_{dB} , definida a seguir.

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} SR$$

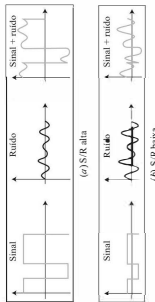


Figura 7.16 Dois casos de SR: uma SR alta e uma SR baixa

7.1.3 Limites da taxa de transferência de dados

Uma consideração muito importante na comunicação de dados é a rapidez com que podemos enviar dados, em bits por segundo, através de um canal. A taxa de transferência de dados depende de três fatores.

1. A largura de banda disponível
2. O número de níveis dos sinais que estamos usando
3. A qualidade do canal (o nível de ruído)

Dois fórmulas teóricas foram desenvolvidas para calcular a taxa de transferência de dados: uma por Nyquist para um canal sem ruído e outra por Shannon para um canal com ruído.

Canal sem ruído: Taxa de bits de Nyquist

Para um canal sem ruído, a fórmula da taxa de bits de Nyquist define o valor máximo teórico da taxa de bits.

$$\text{TaxaDeBits} = 2 \times B \times \log_2 L$$

Nessa fórmula, B é a largura de banda do canal, L é o número de níveis de sinal usados para representar os dados e TaxaDeBits é o número de bits transmitidos por segundo.

De acordo com essa fórmula, poderíamos pensar que, dada uma largura de banda específica, podemos obter qualquer taxa de bits que quisermos simplesmente aumentando o número de níveis de sinal. Embora a ideia esteja correta na teoria, na prática existe um limite. Quando aumentamos o número de níveis de sinal, impomos uma maior dificuldade ao receptor. Se o número de níveis de sinal for muito grande, o receptor não conseguirá distinguir entre os níveis de sinal. Quando o número de níveis de sinal for 64, o receptor deve ser muito mais sofisticado para distinguir entre 64 níveis diferentes. Em outras palavras, aumentar o número de níveis de um sinal reduz a confiabilidade do sistema.

Exemplo 7.7

Precisamos enviar 256 Kbps usando um canal sem ruído (ideal) com uma largura de banda de 20 kHz. Quantos níveis de sinal são necessários? Podemos usar a fórmula de Nyquist, conforme mostrado a seguir:

$$265.000 = 2 \times 20.000 \times \log_2 L \quad \rightarrow \quad \log_2 L = 6,625 \quad L = 2^{6,625} = 98,7 \text{ níveis.}$$

Como esses sinais não são e não podem ser, precisamos aumentar o número de níveis para reduzir a taxa de bits. Se usarmos 128 níveis, a taxa de bits será de 260 kbps. Se usarmos 64 níveis, a taxa de bits será de 240 kbps.

Canal com ruído: Capacidade de Shannon

Na realidade, não é possível ter um canal sem ruído, pois o ruído sempre ocorre. Em 1944, Claude Shannon apresentou uma fórmula denominada **capacidade de Shannon** para determinar o valor máximo da taxa de transmissão de dados no caso de um canal ruidoso. Essa fórmula é mostrada a seguir.

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

Nela, B é a largura de banda do canal, S/R é a relação sinal/ruído e C é a capacidade do canal em bits por segundo. Perceba que a fórmula de Shannon não faz qualquer consideração sobre o número de níveis do sinal, o que significa que, independentemente de quantos níveis usarmos, não precisamos fazer nenhuma alteração na fórmula. Isso é verdade para qualquer canal, seja com outras palavras, a fórmula define uma característica do canal, não do método de transmissão. A capacidade define o limite superior da taxa de bits do canal.

Exemplo 7.8

Considere um canal extremamente ruidoso no qual o valor da relação sinal/ruído seja quase zero. Em outras palavras, o ruído é tão forte que em comparação o sinal é fraco. Para esse canal a capacidade C é calculada conforme mostrado a seguir.

$$C = B \log_2(1 + S/N) = B \log_2(1 + 0) = B \log_2 1 = B \times 0 = 0$$

Isso significa que a capacidade desse canal é zero, independentemente da largura de banda. Em outras palavras, os dados não são corrompidos, mas também também nunca podem ser recebidos.

Exemplo 7.9

Podemos calcular o valor teórico máximo da taxa de bits para uma linha telefônica com um. Uma linha telefônica típica tem uma largura de banda de 3,4 kHz e uma relação sinal/ruído de 30 dB. Qual é a capacidade máxima de transmissão de dados? A relação sinal/ruído é geralmente 3,162. Para esse canal a capacidade é calculada conforme mostrado a seguir.

$$C = B \log_2(1 + S/N) = 3.000 \log_2(1 + 3,162) = 34.881 \text{ bps}$$

Isso significa que a taxa de bits máxima para uma linha telefônica é 34,881 kbps. Se quisermos enviar dados mais rapidamente, podemos aumentar a largura de banda da linha ou melhorar a relação sinal/ruído.

Usando ambos os limites

Na prática, precisamos usar os dois métodos para determinar os limites e os níveis de sinal. Mostremos como com um exemplo.

Exemplo 7.10

Temos um canal com uma largura de banda de 1 MHz. A SNR para esse canal é 63. Quais são os valores apropriados da taxa de bits e de níveis de sinal?

Solução

Primeiro, usamos a fórmula de Shannon para determinar o limite superior.

$$C = B \log_2(1 + S/N) = (10^6 \log_2(1 + 63)) = 10^6 \log_2 64 = 64 \text{ Mbps}$$

A fórmula de Shannon nos fornece o valor do limite superior, que é 64 Mbps. Para obter um número discreto, usamos o arredondamento para cima, arredondamos esse valor e obtemos a fórmula de Nyquist para determinar o número de níveis de sinal.

$$4 \text{ Mbps} = 2 \times 1 \text{ MHz} \times \log_2 L \quad \rightarrow \quad \log_2 L = 2 \quad \rightarrow \quad L = 4$$

A capacidade de Shannon nos fornece o limite superior;
a fórmula de Nyquist nos diz quantos níveis de sinal são necessários.

7.1.4 Desempenho

Até aqui, discutimos as ferramentas de transmissão de dados (sinais) em uma rede e como os dados se comportam. Uma questão importante no contexto de redes refere-se à qualidade do desempenho da rede. Discutamos em detalhes a qualidade do serviço, uma medida global do desempenho da rede, no Capítulo 8.

Largura de banda

Uma característica que mede o desempenho da rede é a largura de banda. No entanto, o termo pode ser usado em dois contextos diferentes com dois valores de medição distintos: largura de banda em hertz e largura de banda em bits por segundo.

Largura de banda em hertz

Ja discutimos esse conceito. A largura de banda em hertz consiste na faixa de frequências contidas em um sinal composto ou na faixa de frequências que um canal pode de fato passar. Por exemplo, podemos dizer que a largura de banda de uma linha telefônica comum é de 4 kHz.

Largura de banda em bits por segundo

● **termo largura de banda** também pode se referir ao número de bits por segundo que pode ser transmitido por um canal, por um enlace, ou mesmo por uma rede. Por exemplo, podemos dizer que a largura de banda de uma rede *Fast Ethernet* (ou dos enlaces nessa rede) é de 100 Mbps. Isso significa que essa rede pode enviar dados a uma velocidade de 100 Mbps.

Relação

Existe uma relação explícita entre a largura de banda em hertz e a largura de banda em bits por segundo. Basicamente, um aumento na largura de banda em hertz leva a um aumento na largura de banda em bits por segundo. A relação exata depende se estamos usando transmissão em banda base ou transmissão em banda larga.

Exemplo 7.11

A largura de banda de um link telefônico comum é de 4 kHz para os dois lados. A largura de banda desse link para a transmissão de dados pode chegar a 35 kbps usando um modem sofisticado para transformar o

analógico em analógico. Se a comparação evidenciar melhoria a qualidade de linha e aumentar a largura de banda para 8 KHz, poderemos mudar para 112 Kbps.

Vazão

A vazão é uma medida da velocidade com que podemos de fato enviar dados por uma rede. Embora, à primeira vista, a largura de banda em bits por segundo e a vazão pareçam grandezas equivalentes, elas são diferentes. Um enlace pode ter uma largura de banda de 8 bps, porém podemos enviar apenas 2 bps por dia, onde 7 é sempre menor que 8. Em outras palavras, a largura de banda é uma medida do potencial de um enlace; a vazão é uma medida da rapidez com que podemos efetivamente enviar dados. Por exemplo, podemos ter um enlace com uma largura de banda de 1 Mbps, porém não podemos enviar dados a essa velocidade. Se o enlace estiver ocupado por 200 Kbps, podemos enviar apenas 200 Kbps. Isso significa que não podemos enviar dados a uma taxa maior que 200 Kbps no enlace.

Considere uma rede via projetada para permitir a passagem de 1.000 carros por minuto de um ponto a outro. Se, entretanto, houver um congestionamento na estrada, esse valor pode ser reduzido para 100 carros por minuto. A largura de banda é de 1.000 carros por minuto, a vazão é de 100

Latência (atraso)

A latência, ou atraso, define quanto tempo leva para uma mensagem inteira chegar completamente ao destino, a contar do momento em que o primeiro bit foi enviado pelo emissor. Já discutimos o atraso de um pacote no Capítulo 4. Note, discursos que normalmente temos quatro tipos de atraso de propagação, de transmissão, de fila e de processamento. O atraso ou latência total é calculado como

$$\text{Latência} = \text{atraso de propagação} + \text{atraso de transmissão} + \text{atraso de fila} + \text{atraso de processamento.}$$

Produto largura de banda-atraso

A largura de banda e atraso são duas métricas de desempenho de um enlace. Entretanto, uma medida muito importante no contexto de comunicações de dados é o produto dessas duas grandezas, conhecido como produto largura de banda-atraso. Discutiremos essa questão em mais detalhes usando dois casos hipotéticos como exemplo (Figura 7.17).

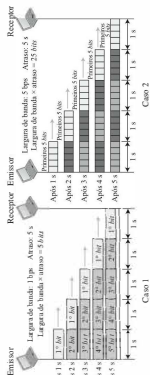


Figura 7.17 Preenchendo enlace com diferentes casos 1 e 2.

- **Caso 1.** Considere que temos um enlace com uma largura de banda de 1 bps (algo pouco realista, mas não importa para o exemplo). Suponha que o primeiro pacote de 1000 bytes seja de 5 segundos (também pouco realista). ● Vamos entender o que o produto largura de banda-atraso significa nesse caso. Observando a figura, podemos ver que o produto da largura de banda pelo atraso (1×5) corresponde ao número máximo de bits que o enlace pode comportar. Em qualquer momento, não pode haver mais do que 5 bits no enlace.

- **Caso 2.** Agora, consideremos que temos uma largura de banda de 5 bps com um atraso de 5 segundos. A Figura 7.17 mostra que pode haver um máximo de $5 \times 5 = 25$ bits no enlace. O motivo é que, em cada segundo, existem 5 bits no enlace; a duração de cada bit é de 0,2 s.

- Os dois casos anteriores mostram que o produto da largura de banda pelo atraso corresponde ao número de bits que pode ser comportado pelo enlace. Essa medida é importante se precisarmos enviar dados a uma velocidade e aguardar a confirmação de cada rajada antes de enviar a próxima. Para entender isso, considere o seguinte exemplo. Suponha que tenhamos um enlace com uma largura de duas vezes o valor do produto largura de banda-atraso; precisamos ocupar todo o canal *full duplex* (nos dois sentidos). O emissor deve enviar uma rajada de dados de $2 \times$ largura de banda $\times$ atraso (bits). Em seguida, o receptor aguarda a confirmação da recepção de parte da rajada antes de enviar outra rajada. O valor $2 \times$ largura de banda $\times$ atraso corresponde ao número de bits que podem estar em trânsito a qualquer momento.

O produto largura de banda-atraso define o número de bits que o enlace é capaz de comportar.

Exemplo 7.12

Podemos pensar o enlace entre dois pontos como um tubo. A seção transversal do tubo representa a largura de banda, enquanto o comprimento do tubo representa o atraso. Podemos dizer que o volume do tubo corresponde ao produto largura de banda-atraso, conforme mostrado na Figura 7.18.

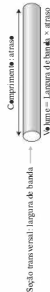


Figura 7.18 Conceito de produto largura de banda-atraso.

Fluxo

Outra maneira de desempenho que está relacionada ao atraso é o *fluxo*, ou *variação de atraso*. Basicamente, podemos dizer que o *fluxo* é um problema se pacotes de dados diferentes sofrirem atrasos diferentes e a aplicação que usa os dados no lado do receptor for sensível a questões de tempo (dados de áudio e vídeo, por exemplo). Se o atraso para o primeiro pacote for de 20 ms, para o segundo for de 45 ms e para o terceiro for de 10 ms, então a aplicação de tempo real que usa os pacotes sofrerá com o *fluxo*. Discutimos o *fluxo* com mais detalhes no Capítulo 8.

7.2 TRANSMISSÃO DIGITAL

Uma rede de computadores é propiada para enviar informações de um ponto a outro. Essas informações precisam ser convertidas em um sinal digital ou analógico para a transmissão. Nesta seção,

Codificação 4B/5B

O esquema de codificação **4-Binário/5-Binário** (4B/5B) foi projetado para ser usado em conjunto com esquemas de codificação de linha, como o NRZ-I, no qual uma sequência longa de 0s pode fazer com que o relógio do receptor perca sincronismo. Uma solução é modificar o fluxo de *b/s* antes da codificação com o NRZ-I, de modo que ele não apresente uma longa sequência de 0s. O fluxo de *b/s* modificado é então codificado com o NRZ-I. Assim, o fluxo de *b/s* original é codificado após a codificação de um bloco. No receptor, o sinal digital decodificado usando NRZ-I praticamente é decodificado em um fluxo de *b/s* e, em seguida, decodificado para remover as redundâncias. A Figura 7.24 ilustra essa ideia.



Figura 7.24 Usando codificação de bloco 4B/5B em conjunto com o esquema de codificação de linha NRZ-I.

No 4B/5B, a saída de 5 *b/s* que sobe a entrada de 4 *b/s* não apresenta mais do que um *b/s* zero inicial (*b/s* à esquerda), nem mais do que dois zeros finais (*b/s* à direita). Então, quando grupos distintos são combinados para criar uma nova sequência, nunca há mais do que três 0s consecutivos.

Codificação 8B/10B

A codificação **8-Binário/10-Binário** (8B/10B) é semelhante à codificação 4B/5B, exceto pelo fato de que um grupo de 8 *b/s* de dados é agora substituído por um código de 10 *b/s*. Esse esquema fornece maior capacidade de detecção de erros do que o 4B/5B. A codificação de bloco 8B/10B é, na realidade, uma combinação das codificações 5B/6B e 3B/4B, conforme mostra a Figura 7.25.

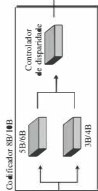


Figura 7.25 Codificação de bloco 8B/10B.

Os cinco *b/s* mais significativos de um bloco de 10 *b/s* passam pelo codificador 5B/6B, os três *b/s* menos significativos passam por um codificador 3B/4B. A separação é feita para simplificar a tabela de mapeamento. Para prevenir o aparecimento de um longo intervalo de 0s ou 1s consecutivos, o código usa um controlador de disparidade que monitora um número excessivo de 0s em relação ao número de 1s (ou de 1s em relação a 0s). Se os *b/s* do bloco sendo processado criarem um código com mais de 1s do que 0s, o código é invertido. Assim, o código de 10 *b/s* original é complementado (um 0 é transformado em um 1 e um 1 é transformado em um 0). A codificação

apresenta $2^{10} - 2^0 = 768$ grupos redundantes que podem ser utilizados para verificação de disparidade e detecção de erro. Em tal caso, a taxa de erro do 4B/5B devido à maior capacidade embutida de verificação de erros é a melhor sincronização.

Embaralhamento

Esquemas binários adequados para enlaces dedicados entre estações em uma LAN são adequados para comunicações de longa distância porque eles exigem uma ampla largura de banda. A combinação da codificação de bloco com a codificação de linha NRZ também não é adequada para comunicações de longa distância. Em tal caso, a taxa de erro do 4B/5B devido à maior capacidade embutida de verificação de erros é a melhor sincronização. A codificação binária AMI por outro lado tem uma largura de banda estreita e não cria um componente CC. Entretanto, uma longa sequência de 0s dificulta a sincronização. Se pudermos encontrar uma maneira de evitá-la no fluxo original, então poderemos usar o esquema binário AMI para longa distância. Exatidão em busca de uma técnica que não aumente o número de *b/s* e que forneça sincronização. Em outras palavras, estamos buscando uma solução que substitua longos pulsos de nível zero por uma combinação de outros níveis, de modo a fornecer sincronização. A solução é o embaralhamento. O embaralhamento é o processo de embaralhar os dados. Modificamos parte das regras do esquema AMI para incluir embaralhamento, conforme mostra a Figura 7.26. Perceba que o embaralhamento, ao contrário da codificação de bloco, é executado ao mesmo tempo em que a codificação. O sistema precisa inserir os pulsos necessários com base nas regras de embaralhamento definidas. Duas técnicas comuns de embaralhamento são o BZS e o HDZS.



Figura 7.26 AMI usado com embaralhamento.

Codificação BZS

A codificação **Binária com Substituição de 8 Zeros** (BZS – Bipolar with 8-Zero Substitution) é geralmente utilizada na América do Norte. Nessa técnica, oito valores consecutivos de tensão no nível zero são substituídos pela sequência 00V0V0V. Os V nessa sequência denota *volt/zero*, uma tensão diferente de zero que quebra uma regra da codificação AMI (uso de polaridade inversa à anteriormente usada). O 0 na sequência denota *bipolar*, o que significa uma tensão diferente de zero de acordo com a regra da codificação AMI. Dois casos são possíveis, conforme mostra a Figura 7.27.



Figura 7.27 Dois casos de tensão durante a sequência BZS.

Perceba que o embasamento, nesse caso, não altera a taxa de bits. Além disso, a técnica de equilíbrio CC é muito simples de implementar, pois não requer nenhum conhecimento prévio que o equilíbrio CC e a modulação por código de pulso (PCM – Pulse Code Modulation). Um *bit* 1, por exemplo, depois da substituição, a codificação AMI precisa seguir suas regras.

Vale a pena mencionar mais um ponto. A letra V (velocidade) ou B (bipolar) aqui é relativa. V significa a mesma polaridade que a polaridade do pulso anterior diferente de zero; B significa a polaridade oposta à polaridade do pulso anterior diferente de zero.

Codificação HDB3

O esquema **Bipolar de Alta Densidade de 3 Zeros (HDB3 – High-Density Bipolar 3-Zero)** é geralmente usado fora da América do Norte. Nessa técnica, mais conservadora que o esquema B8ZS, quatro tentativas consecutivas no nível zero são substituídas por uma sequência 000V ou 000V, onde V para haver duas substituições diferentes é mantido o número de pulsos diferentes de zero após cada substituição. As duas regras podem ser descritas como se segue. Se o número de zeros consecutivos for par, a sequência de substituição é 000V, onde V representa o nível de pulso diferente de zero após a substituição. Se o número de zeros consecutivos for ímpar, a sequência de substituição é 000V, onde V representa o nível de pulso diferente de zero após a substituição. Se o número de zeros consecutivos for ímpar, a sequência de substituição será 000V, o que também faz com que o número total de pulsos diferentes de zero seja par. A Figura 7.28 mostra um exemplo.

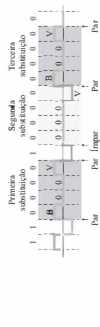


Figura 7.28 Diferentes situações técnicas de embasamento HDB3.

Há vários pontos que precisamos reexaminar aqui. Em primeiro lugar, antes da primeira substituição, o número de pulsos diferentes de zero é par, então a primeira substituição é feita usando 000V. Fato é isso, a polaridade do *bit* 1 é alterada porque o esquema AMI, após cada substituição, deve seguir suas próprias regras. Depois disso, *bit* 0, precisamos de outra substituição, feita usando 000V porque tivemos apenas um pulso diferente de zero (*impulso*) após a substituição passada. A terceira substituição é feita usando 000V porque não houve pulsos diferentes de zero após a segunda substituição (*par*).

7.2.2 Conversão analógico-digital

As técnicas descritas na Seção 7.2.1 convertem dados digitais em sinais digitais. Algumas vezes, porém, temos sinais analógicos, como um sinal de áudio, que precisamos converter para uma forma digital. A conversão de um sinal analógico para um digital é feita por meio de dois processos: amostragem e modulação delta. Depois que os dados digitais tenham sido criados (processo de digitalização), podemos usar uma das técnicas descritas na seção anterior para converter os dados digitais em um sinal digital.

Modulação por Código de Pulsos

A técnica mais comum para transformar um sinal analógico em dados digitais (processo de digitalização) é a denominada **Modulação por Código de Pulsos (PCM – Pulse Code Modulation)**. Um codificador PCM executa três processos, conforme mostra a Figura 7.29.

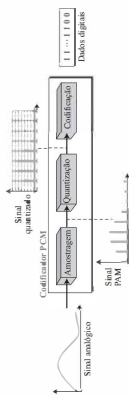


Figura 7.29 Componentes de um codificador PCM.

Os três processos são os seguintes:

1. O sinal analógico é amostrado.
2. O sinal amostrado é quantizado.
3. Os valores quantizados são codificados como seqüências de bits.

Amostragem

O primeiro passo na PCM consiste na **amostragem**. O sinal analógico é amostrado a cada T_s segundos, onde T_s é o intervalo ou período de amostragem. O inverso do intervalo de amostragem é denominado **frequência de amostragem** e é denotado por f_s e medido em Hz. A Figura 7.30 mostra os três métodos de amostragem – ideal, natural e de topo plano (*flat-top*) – conforme mostra a Figura 7.30.

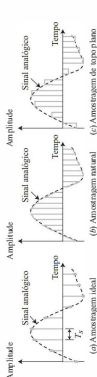


Figura 7.30 Três métodos diferentes de amostragem PCM.

Na amostragem ideal, são amostrados pulsos do sinal analógico. É um método de amostragem ideal e não pode ser facilmente implementado. Na amostragem natural, um amostrador de alta velocidade é avaliado apenas pelo pequeno intervalo de tempo que a amostragem ocorre. O resultado é uma seqüência de amostras que retém a forma do sinal analógico. O método de amostragem mais comum, denominado **amostragem e retenção (sample and hold)**, entretanto, cria amostras com topo plano (*flat-top*) usando um circuito.

O processo de amostragem é também denominado **Modulação de Amplitude de Pulso (PAM – Pulse Amplitude Modulation)**. Apresentamos dois exemplos, considerando que o resultado final é um sinal analógico com valores não inteiros.

Taxa de amostragem. Uma consideração importante refere-se à taxa de amostragem ou frequência de amostragem (f_s). Segundo o **teorema de Nyquist**, para reproduzir o sinal analógico original, uma codificação necessita é que a **taxa de amostragem** seja pelo menos o dobro da frequência mais elevada do sinal original.

Precisamos discutir melhor o teorema neste ponto. Em primeiro lugar, podemos amostrar um sinal apenas se tiver uma banda limitada. Em outros palavras, um sinal com uma largura de banda infinita não pode ser amostrado. Em segundo lugar, o valor da taxa de amostragem deve ser pelo menos o dobro da frequência mais elevada do sinal original. Se a taxa de amostragem for passabaixa, a largura de banda e a frequência mais alta têm o mesmo valor. Se o sinal analógico for passabaixa, o valor da largura de banda é menor que o valor da frequência máxima. A Figura 7.31 mostra o valor da taxa de amostragem para esses dois tipos de sinal.

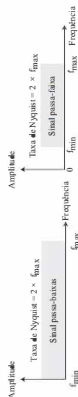


Figura 7.31 Taxa de amostragem de Nyquist para sinais passabaixa e passabaixa.

Quantização

O resultado da amostragem consiste em uma série de pulsos cujos valores de amplitude ficam entre as amplitudes máxima e mínima do sinal. O conjunto de amplitudes pode ser infinito, com valores não inteiros entre os dois limites. Esses valores não podem ser usados no processo de codificação. As etapas da quantização (também conhecida como quantização) são as seguintes:

1. Consideramos que o sinal analógico original tem valores entre $V_{\min}$ e $V_{\max}$.
2. Dividimos a faixa de valores em L zonas, cada uma apresentando altura Δ (deixa).
3. Atribuímos valores quantizados entre 0 e $L-1$ para o ponto médio de cada zona.
4. O valor da amplitude amostrada é aproximado para o valor quantizado.

Como um exemplo simples, suponha que temos um sinal amostrado as amplitudes da amostra estejam entre -20 e 20 V. Decidimos usar oito níveis ($L=8$). Isso significa que o valor de Δ é 5 V. A Figura 7.32 mostra esse exemplo. Quando usamos amostragem ideal (para simplificar), o valor no topo de cada amostra no gráfico mostra a amplitude real. No gráfico, a primeira linha corresponde ao valor normalizado para cada amostra (amplitude real/ Δ). O processo de quantização seleciona o valor de quantização a partir do meio de cada zona. Isso significa que os valores normalizados quantizados (segunda linha) são diferentes das amplitudes normalizadas.

A diferença é denominada **erro normalizado** (terceira linha). A quarta linha é o código de quantização para cada amostra em base dois. Os produtos finais de quantização na parte esquerda do gráfico. As palavras codificadas (quinta linha) são os produtos finais de conversão.

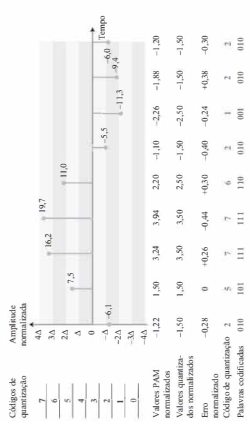


Figura 7.32 Quantização e codificação de um sinal amostrado.

Níveis de quantização. No exemplo anterior, mostramos oito níveis de quantização. A escolha de L , o número de níveis, depende da faixa de amplitudes do sinal analógico e de como desejamos recuperar o sinal. Se a amplitude de um sinal varia apenas entre dois valores, precisamos apenas de dois níveis; se o sinal, tal como um sinal de voz, apresentar diversos valores de amplitude, precisamos de mais níveis de quantização. Na digitalização de áudio, L é normalmente escolhido como sendo 256, no caso de vídeo, L normalmente vale algumas milhares. A escolha de valores pequenos de L aumenta o erro de quantização se houver uma grande quantidade de variação no sinal.

Erro de quantização. Uma questão importante refere-se ao erro criado no processo de quantização. A quantização é um processo de aproximação. Os valores de entrada do quantizador são os valores reais do sinal, os valores de saída são os valores aproximados. Cada valor de saída é escolhido a partir de um conjunto finito de valores possíveis. Portanto, há sempre um erro de quantização, há qualquer erro de quantização, caso contrário, exatidão, exatidão. No exemplo anterior, a amplitude normalizada da terceira amostra é 3,24, mas o valor normalizado quantizado é 3,50. Isso significa que há um erro de $+0,26$. O valor do erro para qualquer amostra é inferior a $\Delta/2$. Em outros palavras, temos $-\Delta/2 \leq \text{erro} \leq \Delta/2$.

O erro de quantização altera a relação sinal/ruído do sinal, o que por sua vez reduz o limite superior da capacidade de acordo com Shannon.

Para determinar o erro de quantização na SNR, do sinal depende do número de bits por amostra n , o número de bits por amostra n , conforme mostrado na seguinte fórmula.

$$SNR_{\text{q}} = 6,02n - 1,76 \text{ dB}$$

Codificação

A última etapa da PCM é a codificação. Depois de cada amostra ter sido quantizada e do número de bits por amostra ter sido decidido, cada amostra pode ser transformada em uma palavra

de código de n_b bits. Na Figura 7.32, as palavras codificadas são mostradas na última linha. Um código de transmissão de 24 bits codificados como 0101 5 é codificado como 101 101 por dialeto. Perceba que o número de bits de cada amostra é determinado a partir do número de níveis de quantização. Se o número de níveis de quantização for L , o número de bits $n_b = \log_2 L$. No nosso exemplo, L vale 8 e n_b é, portanto, 3. A taxa de bits pode ser determinada usando a fórmula a seguir.

$$\text{Taxa de bits} = \text{taxa de amostragem} \times \text{número de bits por amostra} = f_s \times n_b$$

Exemplo 7.13

Queremos digitalizar a voz humana. Qual é a taxa de bits necessária, considerando 8 bits por amostra?

Solução

A voz humana requer amostras com frequências entre 0 e 4000 Hz. Portanto, a taxa de amostragem e a taxa de bits são calculadas conforme se segue.

$$\text{Taxa de amostragem} = 4000 \times 2 = 8000 \text{ amostras/s} \rightarrow \text{Taxa de bits} = 8000 \times 8 = 64.000 \text{ bits} = 64 \text{ kbps}$$

Recuperação do sinal original

A recuperação do sinal original requer o decodificador PCM, que primeiramente utiliza mecanismos para converter as palavras de código em um pulso que mantém sua amplitude até o pulso seguinte. Após o sinal de degrau ter sido completado, ele passa por um filtro passa-baixas para suavizar o sinal. O decodificador PCM também realiza o inverso da operação de amostragem e reconstrução do sinal original no emissor. Se o sinal for amostrado usando a taxa de amostragem de Nyquist (ou uma taxa superior) e se houver níveis suficientes de quantização, o sinal original será recuperado. Perceba que os valores máximo e mínimo do sinal original podem ser obtidos amplificando-se o sinal. A Figura 7.33 mostra o processo simplificado.

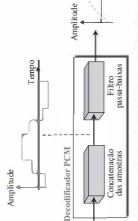


Figura 7.33 Componentes de um decodificador PCM.

Largura de banda PCM

Pode-se provar que a largura de banda mínima do sinal digital é a mesma mostrada a seguir.

$$B_{\text{PCM}} = n_b \times f_s$$

Isso significa que a largura de banda mínima do sinal digital é n_b vezes maior do que a largura de banda do sinal analógico. Esse é o preço que pagamos pela digitalização.

Modulação Delta

A PCM é uma técnica muito complexa. Outras técnicas foram desenvolvidas para reduzir a complexidade da PCM. A mais simples delas é a **Modulação Delta (DM - Delta Modulation)**. A PCM é usada para determinar o valor da amplitude do sinal para cada amostra; já a DM determina a variação com relação a amostra anterior. A Figura 7.34 mostra o processo. Perceba que não há palavras de código aqui, os bits são enviados um após o outro.

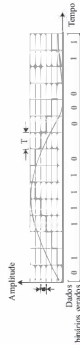


Figura 7.34 O processo de Modulação Delta.

7.3 TRANSMISSÃO ANALÓGICA

Assim como a transmissão digital ser descrita, ela requer um canal passa-baixas, a transmissão analógica é a inversa disso, requer um canal passa-altos. O ato de converter dados digitais em um sinal analógico passa-baixas é tradicionalmente denominado **conversão digital-analógico**. O ato de converter um sinal analógico passa-baixas em um sinal analógico passa-altos é tradicionalmente denominado **conversão analógico-analógico**. Nesta seção, discutimos esses dois tipos de conversão.

7.3.1 Conversão digital-analógico

A conversão digital-analógico consiste no processo de transformar uma das características de um sinal digital em uma característica de um sinal analógico. A Figura 7.35 mostra a relação entre a informação digital, o processo de modulação digital-analógico e o sinal analógico resultante.

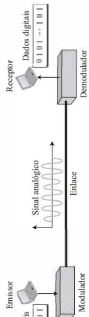


Figura 7.35 Conversão digital-analógico.

Conforme discutido anteriormente, uma onda senoidal é definida por três características: amplitude, frequência e fase. Quando variamos qualquer uma dessas características, criamos uma versão diferente dessa onda. Assim, variando uma característica de um sinal digital simples, podemos usá-lo para representar dados digitais. Qualquer uma das três características seguintes pode ser alterada dessa forma, o que nos dá pelo menos três mecanismos para modular

dados, digitais ou um sinal analógico. **Modulação por Chaveamento de Amplitude (ASK – Amplitude Shift Keying), Modulação por Chaveamento de Fase (FSK – Phase Shift Keying),** e **Modulação por Chaveamento de Fase (FSK – Phase Shift Keying).** Além disso, existe um quarto (e melhor) mecanismo que combina a modulação de amplitude e de fase, denominado **Modulação por Amplitude em Quadratura (QAM – Quadrature Amplitude Modulation)**. A modulação QAM é a mais eficiente dentre essas opções e é o mecanismo geralmente utilizado atualmente.

Modulação por chaveamento de amplitude (ASK)

Na modulação por chaveamento de amplitude (ASK), a amplitude do sinal de portadora é variada para criar elementos de sinal. Frequência e fase permanecem constantes enquanto a amplitude varia.

ASK binária

A modulação ASK é normalmente implementada usando apenas dois níveis. Essa estratégia é conhecida como **modulação ASK binária (BASK)** ou como **chaveamento ligar-desligar (OOK – On-Off Keying)**. A amplitude do pso acm nos níveis do sinal é 0 e 1, assim a igual a amplitude do elemento de sinal. A Figura 7.36 mostra a largura de banda usada pela modulação ASK. Embora o sinal de portadora seja apenas uma onda senoidal simples, o processo de modulação produz um sinal composto aperiódico. Este, conforme discutimos anteriormente, apresenta um conjunto contínuo de frequências. Como esperado, a largura de banda é proporcional à taxa de transferência do sinal (B_{ASK}). Entretanto, de fato, a largura de banda necessária para transmitir o sinal é $B_{ASK} = 1 + \theta$, onde θ é a taxa de filtragem. O valor de θ varia entre 0 e 1. Isso significa que a largura de banda pode ser expressa conforme mostrado na figura, onde S é a taxa de transferência do sinal e B é a largura de banda.

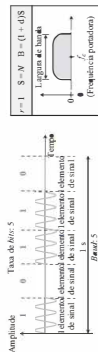


Figura 7.36 Modulação ASK binária (BASK).

A fórmula, $B = (1 + \theta) S$, mostra que a largura de banda necessária tem um valor mínimo de S e um valor máximo de $2S$. O ponto mais importante aqui é a localização da largura de banda. O meio da largura de banda é onde f_c , a frequência portadora, está localizada. Isso significa que se tivermos um canal passante-banda real, podemos escolher nosso valor θ de modo que o canal passe exatamente o sinal. Se o canal não for passante-banda, podemos escolher o valor θ de modo que o canal passe exatamente o sinal. Podemos deslocar a largura de banda resultante para corresponder aquela que se encontra disponível.

ASK multinível

A discussão anterior utiliza apenas dois níveis de amplitude. Podemos ter um ASK multinível, no qual existam mais de dois níveis. Podemos usar 4, 8, 16 ou um número maior de amplitudes diferentes para o sinal e modular os dados usando 2, 3, 4 ou mais bits de cada vez. Nesses casos, $r = \log_2 M$, onde M é o número de níveis de amplitude. O ASK multinível não seja implementado no ASK, mas, é implementado no QAM (canal com variáveis mais avançadas).

Modulação por chaveamento de frequência

Na modulação por chaveamento de frequência (FSK), a frequência do sinal de portadora varia para representar os dados. A frequência do sinal modulado permanece constante por toda a duração de um elemento de sinal, mas se altera para o elemento de sinal seguinte se o elemento de sinal mudar. A amplitude do pso é a fase permanece constante para todos os elementos de sinal.

FSK binária

Uma maneira de enviar um FSK binário (ou BFSK) é considerar duas frequências portadoras. Na Figura 7.37, escolhemos duas frequências portadoras, f_1 e f_2 . Usamos a primeira portadora se o elemento de dados for 0 e usamos a segunda se o elemento de dados for 1. Entretanto, percebe que esse é um exemplo não realista, usado apenas para fins de demonstração. Normalmente, as frequências portadoras são muito elevadas e a diferença entre elas é muito pequena.

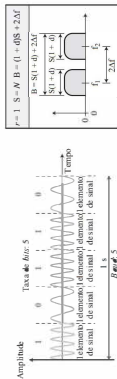


Figura 7.37 FSK binária.

Conforme mostra a Figura 7.37, o meio de uma largura de banda Δf e o meio da entre f_1 e f_2 . Tanto f_1 como f_2 são por uma distância Δf do ponto médio entre as duas bandas. A diferença entre as duas frequências é $2\Delta f$.

A Figura 7.37 mostra também a largura de banda usada pela modulação FSK. Novamente, os sinais de portadora são apenas ondas senoidais simples, porém a modulação cria um sinal aperiódico composto por frequências contínuas. Podemos enxergar o FSK como dois sinais ASK, cada um com a largura de banda necessária $B = (1 + \theta) S$. A diferença entre as duas frequências for $2\Delta f$, então a largura de banda necessária é $B = (1 + \theta) S + 2\Delta f$.

Qual deve ser o valor mínimo de $2\Delta f$? Na Figura 7.37, escolhemos um valor maior do que $(1 + \theta) S$. Podemos demonstrar que o valor mínimo deve ser pelo menos S para o bom funcionamento dos processos de modulação e demodulação.

FSK multinível

Não é incomum aplicar modulação multinível com o método FSK (o resultado é conhecido como MFSK). Podemos usar mais do que duas frequências. Por exemplo, podemos usar quatro frequências diferentes f_1, f_2, f_3 e f_4 para enviar 2 bits de cada vez. Para enviar 3 bits de cada vez, podemos usar 8 frequências diferentes $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7$ e f_8 . No entanto, os elementos de sinal devem estar separados por uma distância de $2\Delta f$. Para que o modulador e o demodulador operem corretamente, pode-se demonstrar que o valor mínimo de $2\Delta f$ precisa ser S . Podemos mostrar que a largura de banda para $d = \theta$ é

$$B = (1 + \theta) S + (1 - 1) 2\Delta f \rightarrow B = L \cdot S$$

Modulação por chaveamento de fase

Na modulação por chaveamento de fase (PSK), a fase da portadora varia para representar dois ou mais elementos de sinal diferentes. A amplitude de pico e a frequência permanecem ambas constantes enquanto a fase muda. Atualmente, o PSK é mais usado que o ASK ou o FSK. No entanto, veremos em breve que o QAM, que combina ASK e PSK, é o método dominante de modulação digital-analógica.

PSK binário

O PSK mais simples é o PSK binário (BPSK), no qual temos apenas dois elementos de sinal, um com uma fase de 0° e o outro com uma fase de 180° . A Figura 7-38 mostra a forma de onda de um sinal PSK. O PSK binário é tão simples quanto o ASK binário, mas com uma grande vantagem: ele é menos suscetível a ruídos. No ASK, o critério para a detecção de *bits* é a amplitude do sinal; no PSK, a fase é usada para esse propósito. O ruído é capaz de alterar a amplitude mais facilmente do que a fase. O PSK é superior ao FSK porque não precisamos de dois sinais de portadora.

A Figura 7-39 também mostra a largura de banda necessária para a modulação BPSK, aqui chamada de ASK binário. Como você pode ver, a largura de banda necessária para o ASK binário é a mesma usada para separar dois sinais de portadora.

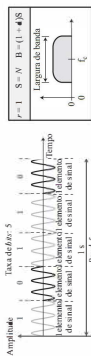


Figura 7-38 PSK binário.

PSK em quadratura

Assimilidade do BPSK, inventores projetistas a usar 2 *bits* de cada vez em cada elemento de sinal, diminuindo, assim, a taxa de *band* e, consequentemente, a largura de banda necessária. O esquema resultante é denominado *Quadrature PSK*, porque é uma combinação de ASK e PSK. O ASK é usado para transmitir o primeiro *bit* e o PSK é usado para transmitir o segundo *bit*. Os dois *bits* são combinados para formar um elemento de sinal. As duas entradas passam primeiro por um conversor de série para paralelo, que envia uma *bit* para um modificador e o próximo *bit* para o outro modificador. Se a duração de cada *bit* no sinal de entrada for T , a duração de cada *bit* enviada pelo sinal BPSK correspondente será $2T$. Isso significa que o *bit* em cada sinal BPSK tem metade da frequência que tinha no sinal original.

Diagrama de constelação

Um diagrama de constelação pode nos ajudar a definir a amplitude e a fase de um elemento de sinal, particularmente quando utilizamos dois pontos de fase e o amplitudão é constante. O diagrama de constelação para o ASK binário é mostrado na Figura 7-39a. O elemento de sinal ASK binário tem duas posições possíveis: o elemento de sinal ASK, PSK ou QAM (ver próxima seção). Em um diagrama de constelação, um elemento de sinal é representado como um ponto. O *bit* ou a combinação de *bits* que ele transporta é geralmente escrito ao lado dele.

O diagrama tem dois eixos. O eixo horizontal X refere-se à portadora em fase, o eixo vertical Y refere-se à portadora em quadratura. Para cada ponto no diagrama, quatro informações podem ser projetadas: a projeção de pico do elemento de sinal, a projeção de pico do componente em fase, a projeção de pico do componente em quadratura e a definição da amplitude de pico do elemento de sinal.

O comprimento da linha (vetor) que liga o ponto à origem fornece a amplitude de pico do elemento

de sinal (a combinação das componentes X e Y), o ângulo que a linha faz com o eixo X representa a fase do elemento de sinal. Portanto, todas as informações necessárias podem ser facilmente encontradas em um diagrama de constelação. A Figura 7-39 ilustra a ideia com três diagramas de constelação, um para cada sinal BASK (OOK), BPSK e QPSK.

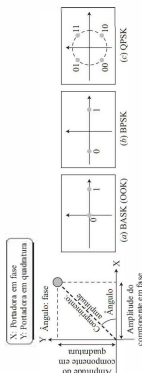


Figura 7-39 Conceito de um diagrama de constelação.

Modulação por Amplitude em Quadratura

O PSK é limitado pela capacidade do equipamento em distinguir pequenas diferenças de fase. Esse fator limita sua taxa de *bits* em potência. Até aqui, mostramos esquemas que alteram apenas uma das três características de uma onda senoidal por vez, mas se alterarmos duas? Por que não combinamos ASK e PSK? A resposta é: sim, e esse é o princípio da modulação por Amplitude em Quadratura (Modulação QAM – Quadrature Amplitude Modulation).

Existem numerosas variações possíveis para a modulação QAM. A Figura 7-40 mostra alguns desses esquemas. A Figura 7-40a mostra o esquema mais simples, o 4-QAM (quatro tipos diferentes de transmissão). Cada ponto no diagrama representa cada portadora. Para cada portadora, há dois níveis de amplitude, mas os níveis no BASK (OOK) são diferentes, na figura, quatro níveis. Assim, cada portadora tem 4-QAM com níveis de amplitude diferentes para cada portadora, é o conceito subjacente à **Modulação por Amplitude em Quadratura** (Modulação QAM – Quadrature Amplitude Modulation).

Existem numerosas variações possíveis para a modulação QAM. A Figura 7-40 mostra alguns desses esquemas. A Figura 7-40a mostra o esquema mais simples, o 4-QAM (quatro tipos diferentes de transmissão). Cada ponto no diagrama representa cada portadora. Para cada portadora, há dois níveis de amplitude, mas os níveis no BASK (OOK) são diferentes, na figura, quatro níveis. Assim, cada portadora tem 4-QAM com níveis de amplitude diferentes para cada portadora, é o conceito subjacente à **Modulação por Amplitude em Quadratura** (Modulação QAM – Quadrature Amplitude Modulation).

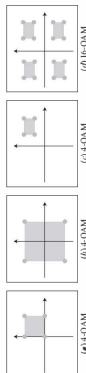


Figura 7-40 Diagramas de constelação para a sinal QAM.

Largura de banda do QAM

A largura de banda mínima necessária para a transmissão usando QAM é igual àquela exigida pela modulação ASK e pela modulação PSK. A modulação QAM apresenta as mesmas vantagens que a modulação PSK, apresenta sobre a modulação ASK.

7.3.2 Conversão analógico-analógico

A conversão analógico-analógico, ou modulação analógica, consiste na representação da informação analógica por meio de um sinal analógico. Podemos nos perguntar por que precisamos modular um sinal analógico, afinal, ele já é analógico. A modulação é necessária se o meio for naturalmente passa-faixa ou se tivermos a nossa disposição apenas um canal passa-faixa. Um exemplo é o rádio. O governo atribui uma largura de banda estreita para cada estação de rádio. O sinal analógico que queremos transmitir precisa ser convertido para um sinal analógico que possa ocupar a faixa de frequência necessária para ser transmitido. Assim, conseguimos evitar estações diferentes, os sinais possuem-seções precisas ser dedicadas, cada um para uma posição diferente.

Na conversão analógico-analógico pode ser realizada de três maneiras: **Modulação de Amplitude** (AM - Amplitude Modulation), **Modulação de Frequência** (FM - Frequency Modulation) e **Modulação de Fase** (PM - Phase Modulation). As modulações FM e PM são geralmente classificadas como uma só.

Modulação de Amplitude (AM)

Na transmissão AM, o sinal de portadora é modulado de forma que a sua amplitude se altera com as variações de amplitude do sinal que está sendo modulado. A frequência e a fase da portadora permanecem inalteradas, apenas a amplitude se altera de acordo com as variações da informação. A Figura 7.41 mostra como esse conceito funciona. O sinal que está sendo modulado é o envelope da portadora.

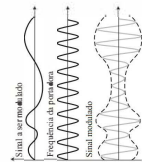


Figura 7.41 Modulação de amplitude.

Conforme mostra a Figura 7.41, a modulação AM é normalmente implementada usando um multiplicador. O sinal a ser modulado é multiplicado por uma portadora de frequência igual à da banda de um sinal AM. A modulação cria uma largura de banda que é o dobro da largura de banda do sinal que está sendo modulado e cobre uma faixa centrada na frequência portadora. Entretanto, os componentes de sinal acima e abaixo da frequência portadora transportam exatamente a mesma informação. Por isso, algumas implementações descartam metade dos sinais e cortam a largura de banda ao meio.

Modulação de Frequência (FM)

Na transmissão FM, a frequência do sinal de portadora é modulada de forma a seguir as mudanças no nível de tensão (amplitude) do sinal que está sendo modulado. A amplitude de pico

e a fase do sinal de portadora permanecem constantes, mas a medida que a amplitude do sinal que está sendo modulado varia, a frequência do sinal de portadora também varia. A Figura 7.42 mostra as relações entre o sinal que está sendo modulado, o sinal da portadora e o sinal FM resultante.

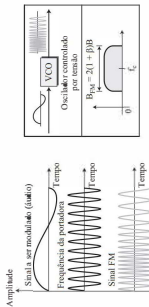


Figura 7.42 Modulação de frequência.

Conforme mostra a Figura 7.42, a modulação FM é normalmente implementada usando um oscilador controlado por tensão (voltagem), como ocorre no FSK. A frequência do oscilador muda de acordo com a tensão de entrada, que é a amplitude do sinal que está sendo modulado. A Figura 7.42 mostra também a largura de banda de um sinal FM. É difícil determinar a largura de banda de um sinal FM, mas podemos usar a regra de Carson, que afirma que $B_{FM} = 2(1 + \beta)f_m$, onde β é um fator que depende da técnica de modulação, mas cujo valor geralmente é 1.

Modulação de Fase (PM)

Na transmissão PM, a fase do sinal de portadora é modulada para variar conforme a variação do nível de tensão (amplitude) do sinal sendo modulado. A amplitude de pico e a frequência de pico permanecem constantes, mas a medida que a amplitude do sinal que está sendo modulado varia, a frequência do sinal de portadora também varia. A Figura 7.43 mostra como esse conceito funciona. Pode-se demonstrar matematicamente que a modulação PM é igual à FM com uma diferença. Na modulação FM, a variação instantânea na frequência portadora é proporcional à amplitude do sinal que está sendo modulado; na modulação PM, a variação instantânea na frequência portadora é proporcional à derivada da amplitude do sinal que está sendo modulado. A Figura 7.43 mostra as relações entre o sinal que está sendo modulado, o sinal da portadora e o sinal PM resultante.

Conforme mostra a Figura 7.43, a modulação PM é normalmente implementada usando um oscilador controlado por tensão (voltagem). A frequência do oscilador varia de acordo com a derivada da tensão de entrada, que corresponde à amplitude do sinal que está sendo modulado.

A Figura 7.43 também mostra a largura de banda de um sinal AM. É difícil determinar a largura de banda efetiva com exatidão, mas pode-se mostrar empiricamente que seu valor é várias vezes a largura do sinal analógico. Embora a fórmula mostre a mesma largura de banda para a modulação FM e para a modulação PM, o valor de β é menor no caso da modulação PM (cerca de 1 para uma banda estreita e $\approx 0,3$ para uma banda larga).

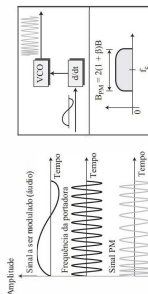


Figura 7.43 Modulação de base.

7.4 UTILIZAÇÃO DE BANDA

Na vida real encontramos conceitos físicos com largura de banda limitada. O uso criterioso dessas bandeiras de frequência é essencial para a utilização eficiente do espectro de radiofrequência. O tanto o significado de *criterioso* depende da aplicação. Em alguns casos, precisamos combinar vários canais que tenham uma largura de banda reduzida para fazer o melhor uso de um canal alocado. Em outros casos, precisamos expandir a largura de banda de um canal para atingir objetivos como privacidade e resistência a interferências. Nesta seção, exploramos essas duas grandes categorias de utilização de banda: *multiplexação* e *espalhamento*. Na multiplexação, nosso objetivo é aumentar a privacidade e a resistência a interferências, expandindo a largura de banda de um canal para inserir redundância, algo necessário para atingir esse objetivo.

7.4.1 Multiplexação

Sempre que a largura de banda de um meio ligando dois dispositivos é maior do que a largura de banda exigida pelos dispositivos, o meio pode ser compartilhado. A **multiplexação** consiste no compartilhamento de um meio de transmissão entre dois ou mais dispositivos. A largura de banda de um enlace de dados é a soma das larguras de banda dos dispositivos que se comunicam, aumentando o tráfego. Podemos acomodar esse aumento se continuarmos a criar enlaces individuais toda vez que um novo canal passar a ser necessário, ou podemos instalar enlaces de maior largura de banda e usar cada um para transportar múltiplos sinais. Tecnologias atuais fornecem meios com elevada largura de banda, como fibra óptica e micro-ondas terrestres e via satélite. Cada uma dessas opções oferece uma largura de banda maior do que aquela necessária para os dispositivos ligados a ela, a largura de banda acaba desperdiçada. Um sistema eficiente é capaz de maximizar a utilização de todos os recursos, a largura de banda é um dos recursos mais preciosos existentes no contexto de comunicação de dados.

Em um sistema multiplexado, as linhas compartilham a largura de banda de um enlace. A Figura 7.44 mostra o formato básico de um sistema multiplexado. As linhas na esquerda direcionam os dados para o sistema multiplexado, e as linhas na direita direcionam os dados para os receptores. No lado do receptor, o fluxo passa por um **demultiplexador**, que separa novamente o fluxo em seus componentes de transmissão (on-pair-mux) e as direciona para as linhas de saída correspondentes. Na figura, a palavra *enlace* se refere ao caminho físico. A palavra *canal* se refere à porção de um enlace que carrega uma transmissão entre um certo par de linhas. Um enlace pode ter muitos (n) canais.

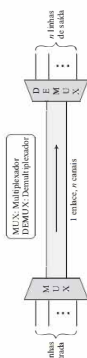


Figura 7.44 Divisão em enlaces.

Existem três técnicas básicas de multiplexação: Multiplexação por Divisão de Frequência (FDM – Frequency-Division Multiplexing), Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM – Wavelength-Division Multiplexing) e Multiplexação por Divisão de Tempo (TDM – Time-Division Multiplexing). As duas primeiras são técnicas projetadas para sinais analógicos, e a terceira para sinais digitais.

Além disso, os termos FDMA e FDM (ou TDMA e TDM) como sendo equivalentes. Acreditamos que FDMA e TDM são protocolos de acesso definidos na camada de enlace de dados e que usam os serviços de FDM e da TDM na camada física. Discutimos o FDMA e o TDMA no Capítulo 6. Além disso, alguns livros tratam o Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA – Code Division Multiple Access) como uma quarta categoria de multiplexação. Discutimos o CDMA como um método de acesso na camada de enlace de dados também no Capítulo 6, não há um nicho correspondente na camada física.

Multiplexação por Divisão de Frequência

A **multiplexação por Divisão de Frequência** (FDM – Frequency-Division Multiplexing) é uma técnica analógica que pode ser aplicada quando a largura de banda de um enlace (em hertz) for maior do que as larguras de banda combinadas dos sinais a serem transmitidos. Na FDM, os sinais gerados por cada dispositivo emissor modulam frequências portadoras diferentes. Esses sinais modulados são então combinados em um único sinal composto que pode ser transportado pelo meio de transmissão. Esse sinal composto pode ser dividido novamente em suas partes originais para acomodar o sinal modificado. Essas divisões de largura de banda podem ser vistas como canais através dos quais os vários sinais viajam. Os canais podem ser separados por faixas de banda não utilizadas – **bandas de guarda** – para evitar que os sinais se sobreponham. Além disso, frequências portadoras não devem interferir com as frequências de dados originais.

A Figura 7.45 fornece uma visão conceitual da FDM. Nela, o caminho de transmissão é dividido em três partes, cada uma representando um canal que comporta uma transmissão.

Desenhos que a FDM é uma técnica de multiplexação analógica; entretanto, isso não significa que ela seja usada apenas para sinais analógicos. Sinais digitais também podem ser convertidos em sinais analógicos antes que a FDM seja aplicada aos multiplexadores.

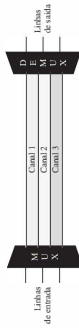


Figura 7.45 Multiplexação por divisão de frequência.

Exemplo 7.14

Considere que um canal de voz ocupa uma largura de banda de 4 kHz. Precisamos combinar três canais de voz em um enlace com uma largura de banda de 12 kHz, indo de 12 kHz até 32 kHz. Mostre a configuração correspondente a esse cenário, usando o domínio da frequência. Considere que não existem bandas de guarda.

Solução

Deslocamos (modulamos) cada um dos três canais de voz para uma banda diferente, conforme mostrado na Figura 7.46. Usamos a banda de 20 a 24 kHz para o primeiro canal, a banda de 24 a 28 kHz para o segundo e a banda de 28 a 32 kHz para o terceiro. Como resultado, o sinal combinado ocupa a largura de banda de 20 a 32 kHz. No exemplo da Figura 7.46, usamos o domínio da frequência para mostrar como o sinal. O primeiro canal usa um filtro que permite a passagem de frequências entre 20 a 24 kHz e filtra (descarta) quaisquer outras frequências. O segundo canal utiliza um filtro que permite a passagem de frequências entre 24 e 28 kHz e o terceiro canal utiliza um filtro que permite a passagem de frequências entre 28 e 32 kHz. Finalmente, cada canal dedica a frequência de modo que ela se incide em zero.



Figura 7.46 Esquema para o Exemplo 7.14.

Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda

A técnica de **Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda** (WDM — Wave-length-Division Multiplexing) foi proposta para usar a elevada capacidade de transferência de dados dos cabos de fibra óptica. A taxa de transferência de dados da fibra óptica é maior do que a taxa de transferência de dados de um cabo de transmissão metálico. O uso de um cabo de fibra óptica para uma única linha acaba desperdiçando a largura de banda disponível. A multiplexação nos permite combinar os sinais de diversas fontes em um só. Assim, a WDM é um método eficiente equivalente à de FDM, exceto que a multiplexação e a demultiplexação envolvem sinais ópticos transmitidos por cabos de fibra óptica. A ideia é a mesma: estamos combinando sinais de frequências distintas. A diferença é que as frequências são muito elevadas.

A Figura 7.47 fornece uma visão conceitual de um multiplexador e de um demultiplexador WDM. Bandas muito estreitas de luz provenientes de diferentes fontes são combinadas para criar uma ampla banda de luz. No receptor, os sinais são separados pelo demultiplexador.

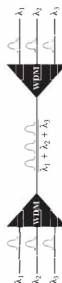


Figura 7.47 Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda.

Uma aplicação da técnica de WDM é a rede SONET, na qual múltiplas linhas de fibra óptica são multiplexadas e demultiplexadas. Discutiremos SONET no Capítulo 5.

Multiplexação por Divisão de Tempo

A técnica de **Multiplexação por Divisão de Tempo** (TDM — Time-Division Multiplexing) é um processo digital que permite que várias conexões compartilhem a largura de banda de um enlace. Em vez de compartilhar uma parte da largura de banda como ocorre na técnica de FDM, o tempo é compartilhado. Assim, cada conexão recebe uma parcela do tempo para transmitir seus dados. A taxa de transmissão é a mesma, mas a largura de banda é compartilhada. Assim, como na FDM, nesse caso, o enlace mostrado é dividido em seções por tempo, e não por frequência. Na figura, as porções dos sinais 1, 2, 3 e 4 ocupam o enlace sequencialmente.

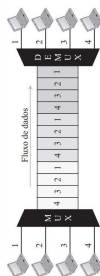


Figura 7.48 TDM

Pareça que, na Figura 7.48, estamos preocupados apenas com a multiplexação, não com a comutação. Isto significa que todos os dados de uma mensagem provenientes da fonte 1 sempre vão para um destino específico, seja ela 1, 2, 3 ou 4. A entrega é fixa e invariável, ao contrário do que ocorre na comutação.

Podemos também lembrar que a técnica de TDM é, em princípio, uma técnica de multiplexação digital. Isto significa que os dados são enviados em unidades discretas, chamadas de dígitos, no tempo. No entanto, isto não significa que as fontes não podem gerar dados analógicos; estes podem ser amostrados, transformados em dados digitais e, em seguida, multiplexados usando TDM.

Podemos dividir a técnica de TDM em dois esquemas diferentes: síncrono e estatístico. Discutiremos primeiramente a **TDM síncrona** e, em seguida, mostramos quais as diferenças da **TDM estatística**. Na TDM síncrona, cada conexão de entrada tem uma saída e é alocada, mesmo que não esteja enviando dados.

TDM síncrona

Na TDM síncrona, o fluxo de dados de cada conexão de entrada é dividido em unidades, de modo que cada entrada ocupa uma parcela de tempo na entrada. Uma unidade pode ser um $1/n$, um caractere ou um bloco de dados. Cada unidade de entrada torna-se uma unidade de saída e ocupa uma parcela de tempo de saída, porém a duração de uma parcela de tempo de saída é n vezes menor do que a duração de uma parcela de tempo de entrada. Se uma parcela de tempo de entrada tiver T segundos, a parcela de tempo de saída terá T/n segundos, onde n é o número de conexões. Em outras palavras, a duração de uma parcela de tempo de saída é n vezes menor do que a duração de uma parcela de tempo de entrada. Assim, a duração de uma parcela de tempo de saída é n vezes mais rápida. A Figura 7.49 mostra um exemplo de TDM síncrona no qual n vale 4.

Na TDM síncrona, um conjunto de unidades de dados de cada conexão de entrada é agrupado em um quadro (veremos a razão para isso mais adiante). Se tivermos n conexões, cada quadro é dividido em n parcelas de tempo e uma parcela de tempo é alocada a cada conexão, uma de cada linha de entrada. Se a duração de uma entrada for T , a duração de cada parcela será T/n e a de cada quadro será T (é menos que um quadro carregue alguma outra informação, conforme veremos a seguir).

de tempo em quadros de salto. Na multiplexação e existência, o elemento de tempo de tempo em cada quadro é representado por um bit de tempo de tempo. O multiplexador verifica cada linha de entrada no estilo *round-robin*, ou seja, ele aloca uma parcela de tempo para uma linha de entrada caso a linha tenha dados para enviar e, caso contrário, ignora essa linha e verifica a próxima. A Figura 7.52 mostra um exemplo de TDM síncrona e de TDM estatística. No primeiro caso, algumas parcelas de tempo ficam vazias porque a linha correspondente não tem dados para enviar. Nesse caso, por outro lado, nenhuma parcela de tempo fica vazia enquanto houver dados para serem enviados por qualquer linha de entrada.

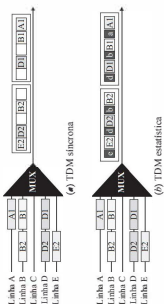


Figura 7.52 Comparação das parcelas de tempo nos métodos de TDM.

A Figura 7.52 também mostra uma grande diferença entre as parcelas de tempo na TDM síncrona e na TDM estatística. Na saída da TDM síncrona, cada parcela de tempo é ocupada apenas por uma linha de entrada. Na TDM estatística, uma parcela de tempo pode ser ocupada por mais de uma linha de entrada. Na TDM síncrona, não é necessário usar endereçamento, a sincronização e as relações pré-atribuídas entre as entradas e saídas servem como endereço. Sabemos, por exemplo, que a entrada 1 vai sempre para a saída 2. Se o multiplexador e o demultiplexador estiverem sincronizados, isso é garantido. Na multiplexação estatística, não há uma relação fixa entre as entradas e as saídas, pois as parcelas de tempo não são pré-atribuídas ou reservadas. Precisamos incluir o endereço do receptor junto com cada parcela de tempo para mostrar onde ela deve ser enviada. Isso é feito com o uso de um endereço de destino. Na TDM estatística, cada parcela de tempo tem um endereço de destino, com $n = \log_2 P$. Por exemplo, para oito linhas de saída diferentes, precisamos de um endereço de 3 bits.

7.4.2 Espalhamento Espectral

A multiplexação combina sinais de diversas fontes para conseguir uma maior eficiência no uso da largura de banda, em um enlace, ele é dividido entre as fontes. No **Espalhamento Espectral** (SS – Spread Spectrum), também combinamos sinais de diferentes fontes para preencher uma largura de banda bem maior do que a necessária para transmitir os dados. O objetivo do SS é espalhar os dados por uma largura de banda maior do que a necessária. O SS é usado em aplicações de comunicação sem fio (LANs e WANs sem fio). Nesse tipo de aplicação, temos algumas preocupações mais importantes que a eficiência no uso da largura de banda. Em aplicações de comunicação sem fio, todos as estações usam o ar (ou o vácuo) como meio de comunicação. As estações devem ser capazes de compartilhar esse meio sem que haja interceptação de dados por um intruso e sem que a comunicação fique sujeita a interferências geradas por uma entidade mal-intencionada (em operações militares, por exemplo).

Para atingir esses objetivos, as técnicas de espalhamento espectral adicionam redundância aos dados, e as estações de destino recebem e decodificam o sinal recebido por cada estação. Se a largura de banda disponível for B , a largura de banda espectral deve ser B_s , de forma que $B_s \gg B$. A largura de banda espectral permite que a fonte coloque sua mensagem em um envelope de proteção para criar uma transmissão mais segura. Uma analogia é o envio de um presente delicado e caro. Podemos colocá-lo em uma caixa especial para impedir que ele seja danificado durante o transporte, e podemos usar um serviço de entrega de melhor qualidade para garantir a entrega no prazo estabelecido.

A Figura 7.53 mostra a ideia do espalhamento espectral, que atinge seus objetivos por meio de dois princípios:

1. A largura de banda alocada para cada estação precisa ser muito maior do que a necessária, isto permite a introdução de redundância.
2. O aumento da largura de banda do valor original P para o valor P_s deve ser feito por meio de uma sequência de números de espalhamento. Em outras palavras, o processo de espalhamento ocorre após o sinal ser criado pela fonte.

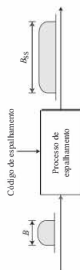


Figura 7.53 Espalhamento espectral.

Após o sinal ter sido criado pela fonte, o processo de espalhamento usa um código de espalhamento para criar uma sequência de números de espalhamento. Essa sequência é combinada com a largura de banda expandida B_s . O código de espalhamento consiste em uma série de números de espalhamento, mas que apresentam, na verdade, um padrão.

Existem duas técnicas para espalhar a largura de banda: **Espalhamento Espectral por Saltos em Frequências** (FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum) e **Espalhamento Espectral por Sequência Direta** (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum).

Espalhamento Espectral por Saltos em Frequências

A técnica de **Espalhamento Espectral por Saltos em Frequências** (FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum) utiliza M frequências portadoras diferentes que são moduladas pelo sinal de origem. Em certo instante, o sinal modula uma frequência portadora, no instante seguinte, o sinal modula outra frequência portadora. Embora a modulação seja feita usando uma frequência portadora de cada vez, as M frequências são utilizadas quando se observa um longo período de tempo. A largura de banda ocupada por uma fonte espalhada é B_{FHSS} . A Figura 7.54 mostra a estrutura para FHSS. Uma sequência de bits para cada período de salto T_s é combinada com uma sequência de bits para cada período de salto T_s . A tabela de frequência usa essa sequência para determinar a frequência a ser utilizada no período de salto atual e passa o resultado para o sintetizador de frequência. Este cria um sinal portadora com aquela frequência, enquanto o sinal original modula o sinal de portadora. Considere que decidimos usar oito frequências de salto, um número é convenientemente baixo para aplicações reais, sendo usado apenas para fins de ilustração. Nesse caso, $M = 8$ e $k = 3$. O gerador de código pseudorrandômico cria uma sequência de bits diferentes. Essas sequências são mapeadas para as oito frequências utilizadas na técnica de frequência.

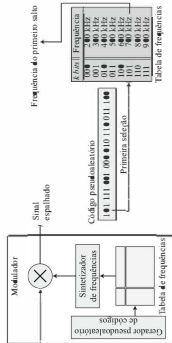


Figura 7.54 Espalhamento Espectral por Salto em Frequência (FHSS).

A sequência para esta estação é: 011, 111, 000, 010, 011, 100. Perceba que a sequência é pseudoaleatória e é repetida após oito saltos. Isso significa que, no período de salto 1, o padrão é 101. A frequência selecionada vale 7000 Hz, o sinal da fonte modula essa frequência portadora. O segundo padrão de *k* bits escolhido é 111, que seleciona a portadora de 9000 kHz, a oitava sequência é 100, e, portanto, a frequência é 6000 kHz. Depois de oito saltos, o padrão se repete, começando novamente em 101. A Figura 7.55 mostra como o sinal salta de portadora em portadora. Consideramos que a largura de banda necessária para o sinal original é de 100 kHz.

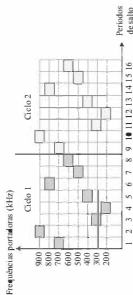


Figura 7.55 Saltos de FHSS.

Pode-se demonstrar que esse esquema é capaz de satisfazer as metas mencionadas anteriormente. Se existirem muitas sequências de *k* bits e o período de salto for curto, um emissor e um receptor serão capazes de se encontrar rapidamente. Se o período de salto for longo, o emissor e o receptor serão capazes de se encontrar uma parte dos dados, pois não conhece a sequência de espalhamento de forma a se adaptar rapidamente para o próximo salto. O esquema também apresenta um efeito anti-interferência. Um emissor malicioso pode ser capaz de transmitir ruído para causar interferência no sinal durante um período de salto (aleatoriamente), mas isso não pode ser feito para todo o período.

Compartilhamento de largura de banda

Se o número de frequências de salto for *M*, podemos multiplexar *M* canais em um usando a mesma largura de banda B_p . Isso é possível porque cada estação utiliza apenas uma frequência em cada

período de salto; e os canais *M* - 1 frequências podem ser usados por outros *M* - 1 estações. Em outros palavras, *M* estações diferentes podem compartilhar a mesma B_p se usarem de modulação análoga, como o FSK multinível (MFSK), por usado. O FHSS é semelhante à técnica de FDM, conforme mostra a Figura 7.56.

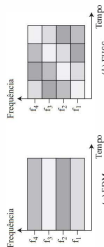


Figura 7.56 Compartilhamento de largura de banda.

A Figura 7.56 mostra um exemplo de quatro canais usando FDM e quatro canais usando FHSS. Na FDM, cada estação utiliza $1/M$ da largura de banda, mas a alocação é fixa; no FHSS, cada estação também utiliza $1/M$ da largura de banda, porém a alocação é alternada salto a salto.

Esalhamento Espectral por Sequência Direta

A técnica de **Esalhamento Espectral por Sequência Direta** (DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum) também espalha a largura de banda do sinal original, mas o processo é diferente. No DSSS, substituímos cada *bit* de dados por *n* bits usando um código de espalhamento. Em outras palavras, a cada *bit* é atribuído um código de *n* bits, denominado uma *chips*, onde a taxa de chips corresponde a *n* vezes a taxa de *bits* de dados. A Figura 7.57 ilustra o conceito do DSSS.

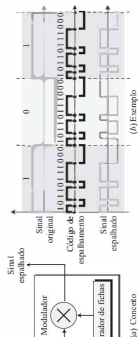


Figura 7.57 DSSS.

A título de exemplo, consideramos a sequência usada em uma LAN sem fio, a famosa **sequência de Barker**, na qual *n* vale 11, e o sinal original e as chips no gerador de chips usam a codificação NRZ polar. A Figura 7.57 mostra as chips e o resultado da multiplicação dos dados originais pelas chips para obter o sinal espalhado. O código de espalhamento consiste em 11 chips com a sequência 1011011000 (note caso). Se a taxa de transferência do sinal original for *N*, a taxa de transferência do sinal

espalhado pela 110V. Isso significa que a largura de banda necessária para o sinal espalhado é 11 vezes maior do que a largura de banda do sinal original. O sinal espalhado pode ser usado para privacidade à comunicação e ao invasor não saber o código. Ele também pode fornecer imunidade contra interferências se cada estação utilizar um código diferente.

7.5 MEIOS DE TRANSMISSÃO

Discutimos diversas questões relacionadas à camada física neste capítulo. Nesta seção, abordamos os meios de transmissão, que ficam, na realidade, localizados abaixo da camada física e são controlados diretamente por ela. Podemos dizer que os meios de transmissão pertencem à camada zero. A Figura 7.58 mostra a localização dos meios de transmissão em relação à camada física.



Figura 7.58 Meios de transmissão e a camada física.

Um **meio de transmissão** pode ser definido de forma ampla como qualquer coisa capaz de transportar informações de uma origem até um destino. Por exemplo, o meio de transmissão no caso de duas pessoas tendo uma conversa durante um jantar é o ar, que também pode ser usado para transmitir mensagens na forma de um sinal de fumaça ou de um sinal luminoso de um semáforo. Para uma mensagem escrita, o meio de transmissão pode ser um cartão, um canalho ou um avião.

No contexto de comunicação de dados, as definições de informação e de meio de transmissão são mais específicas. O meio de transmissão é normalmente um espaço aberto, cabo metálico ou semiacondutor. A informação contida em um sinal resultante da conversão de dados representados em 0 e 1 em forma.

A energia eletromagnética, uma combinação de campos elétricos e magnéticos oscilando ortogonalmente em relação um ao outro, inclui ondas de rádio, luz infravermelha, luz visível, luz ultravioleta, raios X, raios gama e raios cósmicos. Cada uma dessas ondas compõe uma porção do **espectro eletromagnético**. Nem todas as porções do espectro são utilizadas atualmente na tecnologia de comunicação. Alguns tipos de meios de transmissão são limitados a tipos de meios de comunicação utilizados para aproveitar as porções óveis do espectro.

Nas telecomunicações, os meios de transmissão podem ser divididos em duas grandes categorias: guiados e não guiados. Meios guiados incluem cabos de par trançado, coaxiais e de fibra óptica. O meio não guiado é o espaço aberto.

7.5.1 Meios guiados

Os **meios guiados**, que são aqueles que fornecem um canal para a condução do sinal de um dispositivo para outro, são aqueles que são usados para transmitir dados entre dispositivos. Os meios guiados são aqueles que são usados para transmitir dados entre dispositivos. Os meios guiados são aqueles que são usados para transmitir dados entre dispositivos. Os meios guiados são aqueles que são usados para transmitir dados entre dispositivos.

Cabo de par trançado

Um cabo de par trançado consiste em dois condutores (normalmente fios de cobre), cada um com seu próprio revestimento de plástico, trançados um ao redor do outro, conforme mostrado na Figura 7.59.

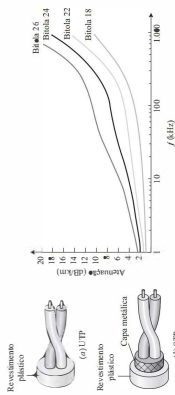


Figura 7.59 Cabo de par trançado.

Um dos fios é usado para transportar sinais provenientes do receptor, enquanto o outro é usado apenas como um valor de referência (terra). O receptor usa a diferença entre os dois.

Um dos sinais provenientes da transmissão, a interferência (ruído) e a difusão (interferência cruzada) desses sinais indesejáveis não são o mesmo em ambos os fios, pois eles ficam em locais diferentes em relação às fontes de ruído ou de difusão. Isso resulta em uma diferença no sinal que chega ao receptor. Ao trançar os pares, um equilíbrio é mantido. O cabo de par trançado de modo geral usado em comunicações é conhecido como **cabo Par Trançado sem Blindagem (UTP)** – um tipo de cabo de par trançado que não possui uma blindagem para proteger os pares de interferências externas. Um tipo de cabo de par trançado com blindagem é o **cabo Par Trançado Blindado (STP)** – Shielded Twisted Pair. O cabo STP apresenta uma cobertura na forma de uma folha ou malha trançada de metal, a qual envolve cada par de condutores isolados. Embora o envoltório de metal melhore a qualidade do cabo, impedindo a penetração de sinais de ruído ou de difusão, ele torna o cabo mais volumoso e mais caro.

Desempenho

Uma maneira de medir o desempenho do cabo de par trançado consiste em comparar a atenuação do sinal com a frequência. A atenuação é a perda de potência do sinal medida em decibéis (dB) por quilômetro (dB/km). No entanto, a Figura 7.59 também mostra que, com o aumento da frequência, a atenuação, medida em decibéis por quilômetro (dB/km), aumenta consideravelmente para frequências acima de 100 kHz. Perceba que a **bissal**, também conhecida como **cabine**, é uma medida da espessura do fio (inversamente proporcional a ela).

Aplicações

Cabos de par trançado são usados em linhas telefônicas para fornecer canais de voz e de dados. O tipo de cabo de par trançado usado em linhas telefônicas é o **cabo de par trançado sem blindagem**. As linhas DSL, que são usadas pelas companhias telefônicas para fornecer conexões de dados de alta velocidade, também utilizam a elevada largura de banda dos cabos de par trançado sem blindagem. Redes locais, como 10Base-T e 100Base-T, também utilizam cabos de par trançado. Discutimos essas redes no Capítulo 5.

Cabo coaxial

Os cabos coaxiais (ou *coax*) transportam sinais de faixas de frequências mais altas do que aquelas transportadas em cabos de par trançado, em parte porque os dois meios são construídos de forma bastante diferente. Em vez de apresentarem dois fios, os cabos coaxiais têm um núcleo central isolante e um condutor externo envolto por uma camada isolante. Essa capa é, por sua vez, revestida por um condutor externo metálico na forma de uma folha, malha ou uma combinação de ambas. O moléculo externo metálico serve como uma proteção contra ruído e como um segundo condutor, completando o circuito. Esse condutor externo também é revestido por uma capa isolante e o cabo todo é protegido por uma cobertura plástica (ver Figura 7.60).

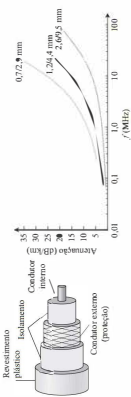


Figura 7.60 Cabo coaxial.

Desempenho

Assim como fios sem cabo de par trançado, podemos medir o desempenho de um cabo coaxial. Por exemplo, em um cabo de par trançado, o sinal se espalha ao longo do comprimento do cabo de par trançado. Em outros palavras, embora o cabo coaxial apresente uma largura de banda muito mais elevada, o sinal se enfraquece rapidamente e requer o uso frequente de repetidores.

Aplicações

Os cabos coaxiais foram amplamente utilizados em redes telefônicas analógicas nas quais uma única rede coaxial podia transportar 10.000 sinais de voz. Mais tarde, eles foram utilizados em redes telefônicas digitais, nas quais um único cabo coaxial em lugar de transportar dados digitais a uma taxa de até 600 Mbps. Entretanto, atualmente, os cabos coaxiais usados nas redes telefônicas foram, em sua maioria, substituídos por cabos de fibra óptica.

Redes de TV a cabo também usam cabos coaxiais; nas tradicionais, toda a rede é composta por cabos coaxiais. Mais tarde, porém, os provedores de TV a cabo substituíram a maioria de seus cabos por cabos de fibra óptica; redes híbridas usam cabos coaxiais apenas nas bordas da rede, próximo às instalações do consumidor. As aplicações de TV a cabo usam cabos coaxiais RG-59. Outra aplicação comum de cabos coaxiais é nas LANs Ethernet tradicionais (ver Capítulo 5). Os cabos coaxiais foram essenciais para a transmissão digital nos primeiros LANs Ethernet. As redes do tipo Thick Ethernet (10BASE5), também conhecidas como redes de cabo Ethernet grosso, usam conectores especiais.

Cabo de fibra óptica

Um cabo de fibra óptica é feito de vidro ou plástico e transmite sinais na forma de luz. Para entender as fibras ópticas, primeiro precisamos explorar vários aspectos da natureza da luz.

A luz viaja em linha reta enquanto estiver atravessando uma única substância uniforme. Se um raio de luz viajar através de uma substância de espessura constante, mas com uma densidade diferente, o raio muda de direção. A Figura 7.61 mostra como um raio de luz muda de direção quando ele passa de uma substância mais densa para outra menos densa.

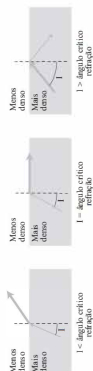


Figura 7.61 Atenção na direção de um raio de luz.

Conforme mostrado na figura, se o **ângulo de incidência** i (o ângulo que o raio faz com a linha perpendicular à interface entre as duas substâncias) for menor do que o **ângulo crítico**, o raio refrata e se aproxima da superfície. Se o ângulo de incidência for igual ao ângulo crítico, a luz não muda de direção para a outra substância. Se o ângulo de incidência for maior do que o ângulo crítico, o raio é refletido (ele penetra na outra substância, mas não a atravessa). Perceba que o ângulo crítico é uma propriedade da substância, e o seu valor difere de uma substância para outra.

As fibras ópticas usam a reflexão para guiar a luz através de um canal. Um **núcleo** de vidro ou de plástico é cercado por um **revestimento** de vidro ou plástico menos denso. A diferença de densidade dos dois materiais deve ser tal que um feixe de luz atravessando o núcleo seja refletido pelo revestimento em vez de ser refratado através dele. Ver Figura 7.62.

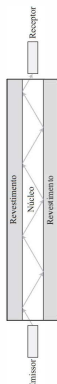


Figura 7.62 Fibras ópticas.

Modos de propagação

A tecnologia atual fornece suporte a dois modos (multimodo e modo único) de propagação da luz ao longo dos cabos ópticos, cada um deles exigindo uma fibra com características físicas diferentes. A propagação multimodo pode ser implementada de duas formas: *índice degrau* (*step-index*) ou *índice gradual* (*gradi-index*). A propagação multimodo é assim denominada porque, em um índice degrau, múltiplos feixes provenientes de uma fonte de luz atravessam o núcleo por caminhos distintos. A fibra multimodo não se movem dentro de cabo depende da estrutura do núcleo, conforme mostra a Figura 7.63.

Nas **fibras multimodo de índice degrau**, a densidade do núcleo permanece constante do centro até as bordas. Um feixe de luz move-se através dessa densidade constante em linha reta até atingir a interface entre o núcleo e o revestimento. Nela, ocorre uma mudança abrupta devido à menor densidade do revestimento; isto altera o ângulo da direção do feixe. O termo *índice degrau* refere-se à mudança dessa mudança, a qual contribui para a distorção do sinal à medida que ele viaja pela fibra.

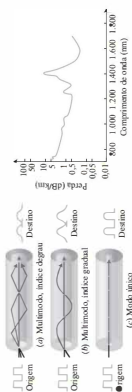


Figura 7.53 Meios

Um segundo tipo de fibra, denominado **fibra multimodo de índice gradual**, diminui essa dispersão do sinal ao longo do cabo. A palavra *gradual* aqui se refere ao índice de refração. Conforme vimos anteriormente, o índice de refração tem relação com a densidade do meio. Uma fibra de fibra multimodo de índice gradual possui um núcleo com uma densidade de refração que varia no sentido do eixo da fibra, gradualmente convergindo para o eixo central. Os raios de luz, ao serem refletidos, sofrem uma refração que limita os ângulos das fibras a um pequeno intervalo, de modo que todos os raios fiquem próximos da horizontal. As **fibras de modo único** em si são fabricadas com um diâmetro muito menor do que aquele das fibras multimodo, e com uma densidade (índice de refração) substancialmente menor. A diminuição na densidade resulta em um ângulo crítico que fica suficientemente próximo de 90° para fazer com que a propagação dos feixes seja quase horizontal.

Nesse caso, a propagação dos diferentes feixes permanece quase idêntica e os atrasos são insignificantes. Os feixes de luz chegam ao destino "juntos" e podem ser recombinados com reduzida dispersão do sinal.

Desempenho

O gráfico da atenuação *versus* o comprimento de onda apresentado na Figura 7.63 também mostra um fenômeno muito interessante que ocorre em cabos de fibra óptica. A curva de atenuação, apresentada no gráfico, é mais achatada do que no caso de cabos de par trançado ou cabos coaxiais. O desempenho é tal que precisamos de menos (na verdade, 10 vezes menos) repetidores quando usamos cabos de fibra óptica.

Aplicações

Os cabos de fibra óptica são frequentemente encontrados em redes de *backbone*, porque sua ampla largura de banda apresenta uma melhor relação custo-benefício. Atualmente, com a multiplicação por divisão de comprimento de onda (WDM), podemos transmitir dados a uma velocidade de 1.600 Gbps. A rede S-NET, que discutimos no Capítulo 5, fornece *full backbone*.

Algumas empresas de TV a cabo usam uma combinação de fibras ópticas e cabos coaxiais, criando, assim, uma rede híbrida. As fibras ópticas constituem a espinha dorsal do *backbone*, enquanto os cabos coaxiais são usados para as ramificações locais. A fibra óptica também pode ser usada para a transmissão de dados que a largura de banda necessária pelos usuários finais é estritamente justificada pelo uso de fibras ópticas.

Redes locais, como 100Base-FX (Fast Ethernet) e 1000Base-X também usam cabos de fibra óptica. A operação da Ethernet 10-Gigabit também utiliza cabos de fibra óptica.

7.5.2 Meios não guiados: Sem fios

Os meios não guiados transportam ondas eletromagnéticas sem usar um condutor físico. Esse tipo de comunicação é muitas vezes considerado como a *comunicação sem fios* ou *comunicação wireless*. Os sinais são normalmente transmitidos na forma de *ondas eletromagnéticas* e, portanto, ficam disponíveis para quem quer que tenha um dispositivo capaz de captá-los.

A frequência utilizada para a comunicação sem fios depende do espectro eletromagnético, na faixa de 3 kHz a 900 THz, usada para a comunicação sem fios.

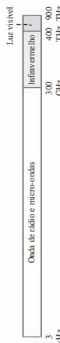


Figura 7.64 Espectro eletromagnético usado na comunicação sem fios.

Sinais não guiados podem viajar da origem até o destino de diversas formas: propagação terrestre, propagação celeste e propagação em visada direta.

Na **propagação terrestre**, as ondas de rádio viajam na porção mais baixa da atmosfera, junto à Terra. As sinais são de baixa frequência e se propagam em todas as direções a partir da antena de transmissão e seguem a curvatura do planeta. A distância alcançada depende da quantidade de energia transmitida e da frequência utilizada. As ondas de rádio de baixa frequência são chamadas de **ondas de rádio de frequência mais alta** são irradiadas para o alto, chegando até a ionosfera (camada da atmosfera onde as partículas existem como íons), onde são refletidas de volta para a Terra. Esse tipo de transmissão permite alcançar maiores distâncias com uma menor potência de saída. Na **propagação em visada direta**, sinais de frequência muito alta são transmitidos em linha reta, diretamente de antena a antena. As antenas devem ser direcionais, voltadas uma para a outra, e altas o suficiente ou estar em proximidade o suficiente de modo a não serem afetadas por obstáculos. A propagação em visada direta é complicada, porque há a possibilidade de interferências de rádio complementares locais.

A porção do espectro eletromagnético definida como ondas e micro-ondas de rádio é dividida em oito faixas, denominadas *bandas*, cada uma regulamentada por autoridades governamentais. Essas bandas são classificadas de Frequência Muito Baixa (VLF – Very Low Frequency) a Frequência Extremamente Alta (EHF – Extremely High Frequency). A Tabela 7.1 lista as bandas, suas faixas de valores, os métodos de propagação correspondentes e algumas de suas aplicações.

Os meios de transmissão são divididos em três grandes grupos: ondas de rádio, micro-ondas e infravermelhos.

Ondas de rádio

Embora não exista uma denominação exata que diferencie ondas de rádio e micro-ondas, as ondas eletromagnéticas com frequências variando entre 3 kHz e 1 GHz são normalmente denominadas **ondas de rádio**, ondas com frequências variando entre 1 e 300 GHz são denominadas **micro-ondas**, e ondas com frequências variando entre 300 GHz e 900 THz são denominadas **ondas de luz visível**. As ondas de rádio, em sua maior parte, são omnidirecionais. Quando uma antena transmite ondas de rádio, elas se propagam em todas as direções. Isso significa que as antenas

* N. de T.: Somente ondas em determinadas faixas de frequência são refletidas por diferentes camadas da ionosfera. Frequências em faixas muito altas podem atravessar a ionosfera e continuar se propagando no espaço (VLF ou).

Table 7.1 Bondage

Modelo	Faixa	Propriedade	Aplicação
HF Very Low Frequency ou Frequência Muito Baixa	3-30 kHz	Tensão	Rádio de longa distância
HF Low Frequency ou Frequência Baixa	30-300 kHz	Tensão	Radiofótil*
HF Medium Frequency ou Frequência Média	300 kHz-3 MHz	Onda	Rádio AM
HF High Frequency ou Frequência Alta	3-30 MHz	Onda	Rádiorreceptor, comunicação de navios transmissor
VLF Very Low Frequency ou Frequência Muito Baixa	30-3000 MHz	Onda e Voz alta	Voz FM, rádio FM
VLF/ultrahigh Frequency ou Frequência Muito Baixa/ultraalta	300 MHz-3 GHz	Voz alta	TV FM, telefonia celular, pager, satélite
RF Radio Frequency ou Frequência de Rádio	3-30 GHz	Voz alta	Comunicação via satélite
RF Super High Frequency ou Super Alta	30-300 GHz	Voz alta	Radar, Wi-Fi
RF Extremely High Frequency ou Frequência Extremamente Alta	30-3000 GHz	Voz alta	

emissora e receptora não precisam estar alinhadas. Uma antena emissor emite ondas que podem ser recebidas por qualquer antena receptora. A propriedade de omnidirecional também tem uma desvantagem. As ondas de rádio transmitidas por uma antena são suculentas a interferências causadas por outra antena que esteja enviando sinais na mesma frequência ou na mesma banda.

As ondas de rádio, em particular as ondas que a apresentam propagação celeste, podem viajar longas distâncias tornando-se boas candidatas para a transmissão de mensagens *broadcast* em longa distância, como no caso do rádio AM.

As ondas de rádio, em particular aquelas de frequências baixas e médias, podem atravessar paredes. Por exemplo, um rádio AM dentro de um edifício é capaz de receber os sinais. É uma vantagem porque não se pode isolar uma comunicação de modo que ela fique confinada apenas no interior ou ao exterior de um edifício. A banda das ondas de rádio é relativamente estreita, ficando ligeiramente comprida à banda de micro-ondas. Quando estas ondas são transmitidas em sub-bandas, estas também são comprimidas, levando a uma redução a ser transmitida

Aproximadamente toda a banda é regulada pelas autoridades²² (por exemplo, a FCC nos Estados Unidos). O uso de qualquer parte da banda requer a permissão das autoridades locais.

Micro-ondas

As ondas eletromagnéticas com frequências entre 1 e 300 GHz são denominadas micro-ondas. Micro-ondas são unidirecionais. Quando uma antena transmite micro-ondas, elas podem ser concentradas em uma região estreita. Isto significa que as antenas emissora e receptora precisam estar

N de T: Transmissão que serve de auxílio de navegação para determinar a direção ou a posição.

N de T: No Brasil, o órgão responsável por regular e fiscalizar o setor de telecomunicações é a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel).

alinhas. A propriedade unidirecional tem uma vantagem óbvia. Um par de antenas pode ser alinhado sem interferir com outro par de antenas alinhadas. A seguir, são descritas algumas características da propagação de micro-ondas:

- A propagação das micro-onças é de tipo visada direta. Como as torres com as antenas montadas precisam ser diretamente visíveis umas pelas outras, torres que estejam muito afastadas precisam ser muito altas. A comunicação da Terra, bem como outros obstáculos, não permite que duas torres baixas se comuniquem usando micro-onças. Repetidores são muitos necessários para permitir a comunicação de áreas distintas.

Aplicações

Micro-ondas, devido às suas propriedades unidirecionais, são muito úteis quando a comunicação *unicast* (um para um) se faz necessária entre o emissor e o receptor. Elas são usadas em telefones celulares, redes de satélite e redes locais sem fios.

Infravermelho

[illegible]

7.6 MATERIAL DO FINAL DO CAPÍTULO

7.6.1 Leitura recomendada

- Para mais detalhes sobre os assuntos discutidos neste capítulo, recomendamos os seguintes livros. Os itens entre colchetes [...] referem-se à lista de referências no fim do texto.

Livros

Diversos livros cobrem os temas discutidos neste capítulo, incluindo [Pea 92], [Cou 01], [Ber 96], [Hsu 03], [Spi 74], [Sta 04], [Tan 03], [G & W 04], [SSS 05], [BEL 01] e [Max 93].

7.6.2 Termos-chave

- Q:
- amostra e refém (sample and hold)
 - amostragem
 - amplitude de pico

7-4 A representação no domínio da frequência de uma onda senoidal é conhecida como:

- transformada de Fourier.
- transformada de Laplace.
- transformada de Fourier.
- transformada de Laplace.

7-5 Qual das seguintes descrições caracteriza um canal passa-baixas?

- Um canal cuja largura de banda começa no zero.
- Um canal cuja largura de banda não começa no zero.
- Um canal cuja largura de banda começa no zero.
- Um canal cuja largura de banda não começa no zero.

7-6 Qual das seguintes descrições caracteriza um canal passa-altas?

- Um canal cuja largura de banda começa no zero.
- Um canal cuja largura de banda não começa no zero.
- Um canal cuja largura de banda começa no zero.
- Um canal cuja largura de banda não começa no zero.

7-7 Enviamos um sinal de voz de um microfone para um gravador. É uma transmissão em banda base ou em banda passiva?

7-8 Enviamos um sinal digital de uma estação em uma LAN para outra estação. É uma transmissão em banda base ou em banda passiva?

7-9 Qual das seguintes opções corresponde à definição de uma transmissão em banda base?

- Envio de um sinal digital ou analógico sem modulação usando um canal passa-baixas.
- Modulação de um sinal digital ou analógico usando um canal passa-baixas.
- Envio de um sinal digital ou analógico sem modulação usando um canal passa-altas.
- Modulação de um sinal digital ou analógico usando um canal passa-altas.

7-10 Como um canal passa-baixas pode ser decomposto em suas frequências individuais?

7-11 Qual das seguintes opções define a taxa de bits máxima teórica para um canal sem ruído?

- Taxa de bits de Shannon.
- Capacidade de Shannon.
- Capacidade de Shannon.
- Capacidade de Shannon.

7-12 Qual das seguintes técnicas é um exemplo de mecanismo de conversão digital-digital?

- codificação de linha
- codificação de bloco
- codificação de amplitude
- codificação de fase

7-13 Defina codificação de bloco e diga qual a sua finalidade.

7-14 Descreva o método PCM.

7-15 Defina transmissão analógica.

- Qual das seguintes descrições caracteriza um canal passa-baixas?
- Qual das seguintes descrições caracteriza um canal passa-altas?
- Qual das seguintes descrições caracteriza um canal passa-baixas?
- Qual das seguintes descrições caracteriza um canal passa-altas?

7-17 Qual das quatro técnicas de conversão digital-analógico é mais suscetível a ruído?

- ASK
- FSK
- PSK
- QAM

7-18 Qual componente de um sinal é mostrado no eixo horizontal em um diagrama de constelação?

7-19 Quais características de um sinal analógico são alteradas para representar o sinal analógico passa-baixas em cada um dos seguintes casos de conversão analógico-analógico?

- FM
- PM
- ASK
- FSK

7-20 Descreva multiplexação.

7-21 Defina o que significa um enlace multiplexado.

7-22 Qual das três técnicas de multiplexação é usada para transmitir dados em uma rede de computadores?

7-23 Defina TDM síncrona e TDM estatística e compare-as.

7-24 Defina FHSS e explique como essa técnica faz o espalhamento espectral.

7-25 Qual a localização dos meios de transmissão na pilha de protocolos TCP/IP?

7-26 Nomeie as duas principais categorias de meios de transmissão.

7-27 Quais são as três classes principais de meios guiados?

7-28 Para que serve a camada de revestimento em uma fibra óptica?

7-29 Descreva como as ondas viajam da origem até o destino na propagação coerente.

7-30 Descreva como as ondas omnidirecionais são propagadas.

7-31 Dadas as frequências listadas a seguir, calcule os períodos correspondentes.

- 24 Hz
- 5 MHz
- 140 Hz

7-32 Qual é o deslocamento de fase para cada uma das seguintes ondas?

7-3 Uma onda senoidal que atinge amplitude pico após 3/4 de ciclo e cuja amplitude aumenta em seguida.

7-4 Qual a largura de banda de um sinal que pode ser decomposto em cinco ondas senoidais com frequências de 0, 20, 50, 100 e 200 Hz? Todas as amplitudes de pico são iguais. Descreva a largura de banda composta e a largura de banda contida.

7-5 Um sinal digital composto com uma largura de banda de 100 Hz formado por duas ondas senoidais. A primeira tem uma frequência de 100 Hz com uma amplitude máxima de 20 V. Descreva o sinal e mostre a largura de banda.

7-6 Qual sinal tem uma largura de banda de 100 Hz? Descreva o sinal e mostre a largura de banda.

7-7 Qual é a taxa de bits para cada um dos seguintes sinais?

- Um sinal no qual um bit dura 0,001 s
- Um sinal no qual um bit dura 2 ms
- Um sinal no qual 10 bits duram 20 μs

7-8 Um dispositivo está enviando dados a uma taxa de 1000 kbps.

- Quanto tempo demora para enviar 10 bits?
- Quanto tempo demora para enviar um caractere (8 bits)?
- Quanto tempo demora para enviar um arquivo de 100 kbytes?

7-9 Qual é a taxa de bits para o sinal na Figura 7.6-7?

7-10 Qual é a frequência do sinal na Figura 7.6-7?

7-11 Qual é a largura de banda do sinal composto mostrado na Figura 7.6-7?

7-12 Qual é a largura de banda de um sinal composto formado por duas ondas senoidais com frequências de 0, 20, 50, 100 e 200 Hz? Todas as amplitudes de pico são iguais. Descreva a largura de banda composta e a largura de banda contida.

7-13 Um sinal digital composto com uma largura de banda de 100 Hz formado por duas ondas senoidais. A primeira tem uma frequência de 100 Hz com uma amplitude máxima de 20 V. Descreva o sinal e mostre a largura de banda.

7-14 Qual sinal tem uma largura de banda de 100 Hz? Descreva o sinal e mostre a largura de banda.

7-15 Qual é a taxa de bits para cada um dos seguintes sinais?

- Um sinal no qual um bit dura 0,001 s
- Um sinal no qual um bit dura 2 ms
- Um sinal no qual 10 bits duram 20 μs

7-16 Um dispositivo está enviando dados a uma taxa de 1000 kbps.

- Quanto tempo demora para enviar 10 bits?
- Quanto tempo demora para enviar um caractere (8 bits)?
- Quanto tempo demora para enviar um arquivo de 100 kbytes?

7-17 Qual é a taxa de bits para o sinal na Figura 7.6-7?

7-18 Qual é a frequência do sinal na Figura 7.6-7?

7-19 Qual é a largura de banda do sinal composto mostrado na Figura 7.6-7?

7-20 Qual é a largura de banda de um sinal composto formado por duas ondas senoidais com frequências de 0, 20, 50, 100 e 200 Hz? Todas as amplitudes de pico são iguais. Descreva a largura de banda composta e a largura de banda contida.

7-21 Um sinal digital composto com uma largura de banda de 100 Hz formado por duas ondas senoidais. A primeira tem uma frequência de 100 Hz com uma amplitude máxima de 20 V. Descreva o sinal e mostre a largura de banda.

7-22 Qual sinal tem uma largura de banda de 100 Hz? Descreva o sinal e mostre a largura de banda.

7-23 Qual é a taxa de bits para cada um dos seguintes sinais?

- Um sinal no qual um bit dura 0,001 s
- Um sinal no qual um bit dura 2 ms
- Um sinal no qual 10 bits duram 20 μs



Figura 7.6-7 Esquema para o Problema 7-10.

7-10 Qual a largura de banda de um sinal que pode ser decomposto em cinco ondas senoidais com frequências de 0, 20, 50, 100 e 200 Hz? Todas as amplitudes de pico são iguais. Descreva a largura de banda composta e a largura de banda contida.

7-11 Um sinal digital composto com uma largura de banda de 100 Hz formado por duas ondas senoidais. A primeira tem uma frequência de 100 Hz com uma amplitude máxima de 20 V. Descreva o sinal e mostre a largura de banda.

7-12 Qual sinal tem uma largura de banda de 100 Hz? Descreva o sinal e mostre a largura de banda.

7-13 Qual é a taxa de bits para cada um dos seguintes sinais?

- Um sinal no qual um bit dura 0,001 s
- Um sinal no qual um bit dura 2 ms
- Um sinal no qual 10 bits duram 20 μs

7-14 Um dispositivo está enviando dados a uma taxa de 1000 kbps.

- Quanto tempo demora para enviar 10 bits?
- Quanto tempo demora para enviar um caractere (8 bits)?
- Quanto tempo demora para enviar um arquivo de 100 kbytes?

7-15 Qual é a taxa de bits para o sinal na Figura 7.6-7?

7-16 Qual é a frequência do sinal na Figura 7.6-7?

7-17 Qual é a largura de banda do sinal composto mostrado na Figura 7.6-7?

7-18 Qual é a largura de banda de um sinal composto formado por duas ondas senoidais com frequências de 0, 20, 50, 100 e 200 Hz? Todas as amplitudes de pico são iguais. Descreva a largura de banda composta e a largura de banda contida.

7-19 Um sinal digital composto com uma largura de banda de 100 Hz formado por duas ondas senoidais. A primeira tem uma frequência de 100 Hz com uma amplitude máxima de 20 V. Descreva o sinal e mostre a largura de banda.

7-20 Qual sinal tem uma largura de banda de 100 Hz? Descreva o sinal e mostre a largura de banda.

7-21 Qual é a taxa de bits para cada um dos seguintes sinais?

- Um sinal no qual um bit dura 0,001 s
- Um sinal no qual um bit dura 2 ms
- Um sinal no qual 10 bits duram 20 μs

7-22 Um dispositivo está enviando dados a uma taxa de 1000 kbps.

- Quanto tempo demora para enviar 10 bits?
- Quanto tempo demora para enviar um caractere (8 bits)?
- Quanto tempo demora para enviar um arquivo de 100 kbytes?

7-23 Qual é a taxa de bits para o sinal na Figura 7.6-7?

7-24 Qual é a frequência do sinal na Figura 7.6-7?

7-25 Qual é a largura de banda do sinal composto mostrado na Figura 7.6-7?

7-26 Qual é a largura de banda de um sinal composto formado por duas ondas senoidais com frequências de 0, 20, 50, 100 e 200 Hz? Todas as amplitudes de pico são iguais. Descreva a largura de banda composta e a largura de banda contida.

7-27 Um sinal digital composto com uma largura de banda de 100 Hz formado por duas ondas senoidais. A primeira tem uma frequência de 100 Hz com uma amplitude máxima de 20 V. Descreva o sinal e mostre a largura de banda.

7-28 Qual sinal tem uma largura de banda de 100 Hz? Descreva o sinal e mostre a largura de banda.

7-4 Descreva o método PCM.

7-5 Defina transmissão analógica.

- Qual das seguintes descrições caracteriza um canal passa-baixas?
- Qual das seguintes descrições caracteriza um canal passa-altas?
- Qual das seguintes descrições caracteriza um canal passa-baixas?
- Qual das seguintes descrições caracteriza um canal passa-altas?

7-7 Qual das quatro técnicas de conversão digital-analógico é mais suscetível a ruído?

- ASK
- FSK
- PSK
- QAM

7-18 Qual componente de um sinal é mostrado no eixo horizontal em um diagrama de constelação?

7-19 Quais características de um sinal analógico são alteradas para representar o sinal analógico passa-baixas em cada um dos seguintes casos de conversão analógico-analógico?

- FM
- PM
- ASK
- FSK

7-20 Descreva multiplexação.

7-21 Defina o que significa um enlace multiplexado.

7-22 Qual das três técnicas de multiplexação é usada para transmitir dados em uma rede de computadores?

7-23 Defina TDM síncrona e TDM estatística e compare-as.

7-24 Defina FHSS e explique como essa técnica faz o espalhamento espectral.

7-25 Qual a localização dos meios de transmissão na pilha de protocolos TCP/IP?

7-26 Nomeie as duas principais categorias de meios de transmissão.

7-27 Quais são as três classes principais de meios guiados?

7-28 Para que serve a camada de revestimento em uma fibra óptica?

7-29 Descreva como as ondas viajam da origem até o destino na propagação coerente.

7-30 Descreva como as ondas omnidirecionais são propagadas.

7-31 Dadas as frequências listadas a seguir, calcule os períodos correspondentes.

- 24 Hz
- 5 MHz
- 140 Hz

7-32 Qual é o deslocamento de fase para cada uma das seguintes ondas?

Problemas

7-1 Dadas as frequências listadas a seguir, calcule os períodos correspondentes.

- 24 Hz
- 5 MHz
- 140 Hz

7-2 Qual é o deslocamento de fase para cada uma das seguintes ondas?

plano com 1.000 bits/sec e, portanto, qual a largura de banda desse sistema.

- 0,0000000
- 1111111
- 0,010001
- 0,010011

Desenhe o gráfico do esquema Manchester usando cada uma das seqüências de dados a seguir, considerando que o nível de último sinal foi positivo. A partir dos gráficos, determine a largura de banda desse sistema.

- 0,0000000
- 1111111
- 0,0100101
- 0,0110011

Quanto seqüências de código inválidas (não utilizadas) podem existir na codificação 3B6P?

Qual o resultado do embaralhamento (scrambling) de uma seqüência de dados com a chave de codificação 18/25? Suponha que o nível do último zero tenha sido positivo.

Qual é a taxa de amostragem de Nyquist para cada um dos seguintes sinais?

- Um sinal passa-baixas com largura de banda de 200 KHz.
- Um sinal passa-faixa com largura de banda de 200 MHz e cuja frequência mais baixa é de 100 KHz.

Anoteamos um sinal passa-baixas com largura de banda de 100 KHz usando 1024 níveis de quantização.

Calcule a taxa de bits do sinal digitalizado.

- Calcule a taxa de bits do sinal digitalizado.
- Calcule a largura de banda PCM desse sinal.

Qual é a taxa máxima de transferência de dados de um canal cuja largura de banda é de 200 MHz se usarmos quatro níveis para representar o sinal digital?

Um sinal analógico apresenta uma largura de banda de 4 KHz. Se amostrarmos esse sinal e codificarmos cada amostra com 30 Kbps, qual será o valor da S/N?

Temos um canal de banda larga com largura de banda de 1 MHz. Qual é a taxa de transferência de dados desse canal se usarmos cada um dos seguintes esquemas de codificação de linha?

Um sinal com 200 milwatts de energia atravessa 10 dispositivos, cada um com um ruído médio de 2 mWatts. Qual o valor da S/N?

Se o valor de banda de pico de um sinal é 20 vezes o valor da taxa de modulação, qual é o valor da S/N? Qual é o valor da S/N?

Queremos expandir a largura de banda de um canal. Responda às seguintes perguntas:

- O quanto a taxa de transferência (capacidade do canal) é melhorada se dobrarmos a largura de banda?
- O quanto a taxa de transferência (capacidade do canal) é melhorada se dobrarmos a S/N?

Qual é o tempo de transmissão de um pacote enviado por uma estação e o tamanho do pacote for 1 milhão de bytes (1 byte = 8 bits) e a largura de banda do canal for 200 Kbps?

Qual é o comprimento de um bit em um canal se a velocidade de propagação no meio for de 2,0 $\times 10^8$ m/s e a largura de banda do canal for 10 Mbps?

Quanto bits podem existir simultaneamente em um enlace com um atraso de 2 ms se a largura de banda do enlace for de:

- 1 Mbps?
- 10 Mbps?

Qual é o atraso total (inércia) para um quadro de 5 milhies de bits que está sendo enviado por um enlace com 10 meatores, cada um apresentando um atraso de 2 μ s e se a velocidade de propagação no meio for de 2 $\times 10^8$ m/s.

O enlace apresenta uma largura de banda de 5 Mbps. Qual componente do atraso total é dominante? Qual deles é insignificante?

Em uma transmissão digital, o redondo do bit é o tempo que o receptor leva para detectar o bit. Qual é o tempo de detecção de um bit se a taxa de transferência de dados for de 1 Mbps?

Desenhe o gráfico do esquema NRZ-L usando cada uma das seqüências de dados a seguir, considerando que o nível do último sinal

- NRZ-L
- Manchester

Calcule a taxa de *baud* referente às seguintes seqüências de dados:

- 2.000 bps, FSK
- 4.000 bps, ASK
- 3.000 bps, 6-QAM
- 1.000 bps, 8-QAM

Calcule a taxa de *baud* referente às seguintes seqüências de dados:

- 1.000 bps, FSK
- 1.000 bps, 16-QAM

Qual é o número de *baud* por *baud* para as seguintes técnicas?

- FSK com 8 freqüências
- QAM com uma constelação de 128 pontos

Desenhe o diagrama de constelação para as seguintes situações:

- ASK, com valores de amplitude de pico de 1 e 3
- 8-QAM com dois valores de amplitude de pico diferentes, 1 e 3, e quatro fases distintas.

Quanto *baud* por *baud* podemos enviar em um enlace com uma largura de banda de 100 KHz se o nível de constelação do sinal tem os números de pontos dados a seguir?

- 2
- 4
- 16
- 1024

Qual é a largura de banda necessária para os seguintes casos se precisarmos enviar 4.000 bps? Considere $d = 1$.

- ASK
- FSK, 12M = 4 MHz
- 16-QAM

Uma empresa com um meio de comunicação de banda larga precisa criar 10 canais independentes 4Mhz, cada um capaz de enviar dados a taxa de pelo menos 10 Mbps. A empresa precisa usar a tecnologia QAM. Qual o número de *baud* por *baud* necessário para esse sistema? Qual é o número de pontos de constelação para cada canal? Considere $d = 0$.

usando seis taxa de amostragem: $f_s = 4f$ (usando a taxa de Nyquist), $f_s = 2f$ (usando a taxa de Nyquist), e $f_s = f$ (metade da taxa de Nyquist). Mostre como podemos reconstruir a onda.

Suponha que um canal de voz ocupe uma largura de banda de 4 KHz. Precisamos multiplexar 10 canais de voz com bandas de guardas de 100 Hz usando FDM. Calcule a largura de banda necessária.

Precisamos transmitir 100 canais de voz digitalizados usando um canal passa-faixa de 20 KHz. Qual deve ser a razão de *baud*/Hz e não usarmos bandas de guarda?

Precisamos usar TDM síncrona e combinar os sinais digitais de 20 fontes, cada um de 100 Kbps. Calcule a taxa de tempo de saída de cada fonte, mas um *baud* está adicionado a cada quadro para a sincronização. Responda às seguintes perguntas:

- Qual é o tamanho de um quadro de saída, em *baud*?
- Qual é a taxa de saída de quadros?
- Qual é a duração de um quadro de saída?
- Qual é a taxa de saída de dados?

Qual é a eficiência do sistema (razão entre *baud* e *bits* reais)?

Temos um canal de banda larga com 500 canais e precisamos transmitir 100 Mbps. Como apenas algumas dessas fontes encontram-se ativas a qualquer momento, usamos o esquema de TDM estatística para combinar os sinais de todas as fontes usando caracteres intercalados. Qual é a taxa de saída de dados para cada vez, mas precisamos adicionar 4 bits de *end-repôs* em cada parcela de tempo. Responda às seguintes perguntas:

- Qual é o tamanho de um quadro de saída, em *baud*?
- Qual é a taxa de saída de quadros?
- Qual é a duração de um quadro de saída?
- Qual é a taxa de saída de dados?

Mostre o conteúdo dos cinco quadros de saída para um multiplexador TDM síncrono que recebe os seguintes dados de 10 fontes e os envia para a rede. Preveja que os caracteres são enviados na mesma ordem em que são digitados. A terceira fonte permanece em silêncio.

- Mensagem da fonte 1: 01A
- Mensagem da fonte 2: 01

c. Mensagem da fonte 3.

7-53 A Figura 7-68 mostra uma TDM binária.

O comprimento de cada entrada é de 10 bits e o comprimento (3 bits) vindo de cada entrada mais 1 bit de equidistância. Qual é a sequência de dados na saída?



Figura 7-68 Esquema para o Problema 7-53.

7-54 Um sistema de FSSS utiliza uma sequência de ruído pseudorrandômico (RP) de 4 bits. Supondo uma taxa de bits de RP de 64 bits por segundo, responda às seguintes perguntas:

- Qual é o número total de bits possíveis?
- Qual é o tempo necessário para completar um ciclo completo de RP?

7-55 Temos um meio digital com uma taxa de transferência de dados de 10 Mbps. Quantos

canais de voz de 64 kbps podem ser transportados por esse meio? Quantos TSSS com a sequência de Barker?

7-56 Considere que a potência de um sinal sem ruído seja de 10 mW. O sinal passa por cinco estágios de um amplificador. Cada estágio duplica a potência, mas também acrescenta 10 mW de ruído ao sinal. Qual é a SNR_{dB} do sinal no estágio 5? Qual é o ruído médio?

7-57 Qual é o valor da SNR quando se transmite uma voz humana usando 8 bits por amostra?

7-58 Temos um canal de banda base de 5 kHz. Precisamos enviar dados a uma taxa de transferência de 48 Kbps utilizando esse canal.

- Qual deve ser o número de bits de bit para obter essa taxa?
- Qual deve ser a qualidade mínima do canal (SNR) para obter essa taxa?

7-59 Um cabo STP apresenta uma perda de 1 dB por mil 10 kHz. Precisamos obter um enlace de 10 km. Qual é a potência mínima necessária a potência do sinal na origem se desejamos que o sinal apresente 10 mW de potência no destino?