

---

# Introdução

O telégrafo sem fio não é difícil de entender.  
O telégrafo comum é como um gato muito comprido.  
Você puxa o rabo dele em Nova York e ele mia em Los Angeles.  
O telégrafo sem fio é a mesma coisa, só que sem o gato.

Albert Einstein (1879-1955)

## 1.1 CRONOLOGIA DAS COMUNICAÇÕES SEM FIO (WIRELESS\*)

É um fato comprovado a existência das ondas eletromagnéticas e, por isso, para o entendimento das ondas de rádio é fundamental que se compreenda as comunicações wireless. A história das comunicações via ondas eletromagnéticas é relativamente recente; tem cerca de 150 anos. Nesse curto intervalo de tempo, tem sido intenso o desenvolvimento das radiocomunicações. Alguns marcos desse desenvolvimento são:

- Em 1864, James Clerk Maxwell formulou a Teoria Eletromagnética da Luz, em que *previu a existência das ondas de rádio*. Em sua homenagem, hoje o conjunto de equações básicas que regem a propagação das ondas eletromagnéticas é conhecido como *equações de Maxwell*.
- A comprovação da existência física das ondas de rádio foi demonstrada pela primeira vez em 1887, por Heinrich Hertz.
- Em 1894, baseado nos trabalhos pioneiros de Maxwell e Hertz, Oliver Lodge demonstrou as comunicações wireless, apesar de ter conseguido alcançar apenas 150 metros.
- Durante o período de 1895 a 1901, Guglielmo Marconi desenvolveu um aparato para transmitir ondas de rádios a longas distâncias, culminando na transmissão através do Oceano Atlântico no dia 12 de dezembro de 1901, da cidade Cornwall, na Inglaterra, à cidade de Signal Hill, em Newfoundland, no Canadá. Durante esse mesmo período, um desenvolvimento concomitante foi feito por A. S. Popoff na Rússia.
- Em 1902, o primeiro enlace de rádio ponto a ponto foi estabelecido nos Estados Unidos, interligando Califórnia e Catalina Island. Esse primeiro sistema de rádio era frequentemente denominado de telegrafia wireless ou telegrafia wireless.
- Em 1906, Reginald Fessenden entrou para história sendo o primeiro a realizar uma transmissão em radiodifusão, transmitindo voz e música usando uma técnica que veio a ser conhecida como *modulação em amplitude (Amplitude Modulation – AM)*.

---

\* N. de T.: O termo wireless é tão utilizado em sua forma original, em inglês, que resolvemos adotá-lo neste livro.

- Durante esse período inicial, o uso militar e comercial das transmissões de rádio foram sendo adotadas rapidamente. Frequentemente é creditado às comunicações wireless o salvamento de 700 pessoas durante o naufrágio do Titanic em 1912.
- O marco inicial das comunicações *móveis terrestres* é a história de pioneirismo da polícia de Detroit. Em 1921, o Departamento de Polícia de Detroit fez uso das comunicações wireless em um veículo operando um sistema de rádio cuja frequência portadora era próxima de 2MHz. Em 1934, 194 forças policiais municipais e 58 estaduais estavam utilizando rádio AM para realizar comunicações móveis de voz.
- Trabalhos paralelos realizados em ambos os lados do Atlântico resultaram na primeira transmissão multidifusão de televisão em 1927. O Bell Labs demonstrou a transmissão multidifusão em uma área nos arredores de Nova York, enquanto o inglês John Braid fez demonstrações similares no Reino Unido.
- As técnicas de *espalhamento espectral* (*spread spectrum*) surgiram um pouco antes da Segunda Guerra Mundial e as pesquisas se intensificaram durante o período de guerra para fins estritamente militares. Havia duas motivações em particular: codificação e otimização da faixa de frequência. As técnicas de codificação de espalhamento espectral eram puramente analógicas, por natureza, em que um sinal semelhante a um ruído (pseudo-ruído) multiplicava um sinal de voz. Esse pseudo-ruído ou sinal interferente era transmitido geralmente em um canal separado para permitir a decodificação no receptor.
- Em 1946, surgiram os *primeiros sistemas públicos de telefonia móvel* em cinco cidades americanas.
- Em 1947, foram implementados os primeiros enlaces de microondas constituído de sete torres conectando as cidades de Nova York e Boston. Esse sistema comutado era capaz de suportar 2400 conversações simultâneas entre as duas cidades.
- O ano de 1958 marcou uma nova era nas comunicações wireless com o lançamento do satélite SCORE (Signal Communication by Orbital Relay Equipment). Esse satélite era capaz de suportar apenas um canal de voz, mas o seu sucesso impulsionou uma nova área nas comunicações via rádio.
- Em 1981, foi inaugurado na Escandinávia o primeiro sistema de telefonia celular que ficou conhecido como Nordic Mobile Telephone (NMT). Dois anos depois (1983) entrou em operação o sistema americano Advanced Mobile Phone Service (AMPS).
- Em 1988, foi implementado na Europa o primeiro sistema de telefonia celular digital. Ele ficou conhecido como *GSM* (*Global System for Mobile Communications*). Originalmente, a intenção era desenvolver um padrão europeu que substituísse a grande quantidade de sistemas analógicos incompatíveis em operação simultânea em diversos países. O padrão americano IS-54 foi lançado logo depois do padrão GSM.

Esses são apenas alguns dos desenvolvimentos realizados nas comunicações wireless nos últimos 150 anos. Hoje, os dispositivos wireless estão em toda parte. Telefones celulares são itens de consumo muito comuns. Além disso, há uma tendência em substituir o cabeamento das redes Ethernet por redes wireless. A introdução desses serviços aumentou a mobilidade e a área de serviço de muitas das aplicações existentes, criando numerosas aplicações (não previstas). A tecnologia wireless é uma área em franco crescimento nas redes públicas e tem se destacado nos sistemas de

comunicações privados/dedicados. Estamos presenciando um momento histórico nas radiocomunicações.

## 1.2 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

Atualmente, as redes de comunicações públicas são sistemas complicados. Redes como o sistema de telefonia pública comutada (RTPC) e a Internet proporcionam comunicação entre cidades, através dos oceanos e entre diferentes países, não importando línguas e culturas. A comunicação wireless é uma das componentes desse sistema complexo. São três os níveis ou camadas em que ela pode afetar diretamente os novos projetos de sistemas modernos:

1. *Camada física.* Esta camada fornece os mecanismos físicos para a transmissão binária, codificada nos dígitos binários 0 e 1, entre dois nós de uma rede. Nos sistemas wireless, a camada física realiza a modulação e demodulação das ondas eletromagnéticas utilizadas para transmissão e também se caracteriza como meio físico de transmissão. O dispositivo que realiza a modulação e a demodulação na camada física é denominado *modem*.
2. *Camada de enlace.* Os enlaces wireless são normalmente não-confiáveis. Duas finalidades importantes da camada de enlace são realizar a detecção e a correção de erros, embora essas funções sejam compartilhadas com a camada física. Frequentemente, a camada de enlace retransmite pacotes recebidos com erros e, para algumas aplicações, até mesmo os descarta. Essa camada também é responsável pelo modo como os diferentes usuários compartilham o meio de transmissão. Nos sistemas wireless, o meio de transmissão é o espectro de frequências de rádio. A parte da camada de enlace responsável pela transmissão de *frames* (quadros) através do meio de transmissão compartilhado, com relativamente pouca interferência entre outros nós da rede, é denominada subcamada *Medium Access Control* (MAC). Esse aspecto das comunicações é conhecido como *comunicações de acesso múltiplo*.
3. *Camada de rede.* Esta camada possui diversas funções, uma das quais, e talvez a principal delas, é fornecer a informação sobre o *roteamento* entre dois os mais sistemas de comunicação. A segunda função, também muito importante, é determinar a *qualidade de serviço* (QoS) da rede. A terceira função é prover *controle de fluxo* para (tentar) evitar o congestionamento de rede (que muitas vezes parece inevitável). Sistemas wireless, nos quais um dos nós pode ser móvel, demanda muito da camada de rede, visto que o relacionamento entre os nós muda continuamente.

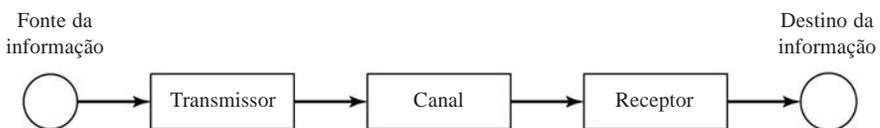
Essas três camadas se encaixam dentro de um modelo de referência de sete camadas que rege as funções encontradas tipicamente dentro dos processos de comunicação. Esse modelo de referência<sup>1</sup> é denominado *Open System Interconnection* (OSI) e será discutido com algum detalhamento neste livro. A camada física é a camada mais baixa do modelo e está diretamente ligada ao meio de transmissão. As camadas mais altas são proporcionalmente menos afetadas pelo meio de transmissão.

O foco deste livro está principalmente nas camadas física e de enlace. Concluiremos o livro mostrando como essas camadas são integradas às redes wireless.

### 1.3 CAMADA FÍSICA

A camada física fornece o equivalente ao canal de comunicação entre a fonte e o destino da informação. Nas comunicações wireless e em outros sistemas, a camada física possui três componentes básicos: o transmissor, o canal e o receptor, conforme está ilustrado na Figura 1.1 *Como estes componentes diferem em um sistema wireless?*

1. *Transmissor.* A função básica do transmissor é receber a informação produzida pela fonte e modificá-la de forma que o meio de transmissão (o canal) seja capaz de transmiti-la. Nos sistemas wireless,
  - a) o transmissor confere forma ao sinal de maneira a transmiti-lo confiável e eficientemente através do canal, utilizando-se dos *recursos limitados do meio de transmissão* (por exemplo, o *espectro de frequências de rádio*).
  - b) normalmente, os terminais são móveis e limitados pela necessidade de alimentação recebida de uma bateria. Assim, o transmissor deve empregar técnicas de modulação robusta e eficiente em termos de consumo de energia elétrica.
  - c) visto que o meio é compartilhado com os demais usuários, o projeto do transmissor deve minimizar a interferência com os outros usuários.
2. *Canal.* O canal é o caminho físico de transporte do sinal gerado pelo transmissor e que proporciona a entrega da informação ao receptor. Nos sistemas wireless, as perdas no canal mais comuns são:
  - a) *distorção no canal* que pode incluir o efeito dos múltiplos caminhos ou percursos possíveis para um mesmo sinal chegar até o destino – o que pode provocar interferência construtiva ou destrutiva entre as muitas cópias do mesmo sinal recebido pelo receptor;
  - b) *a natureza variável no tempo* dos parâmetros do sistema devido à mobilidade dos terminais ou às mudanças ocorridas nas condições de propagação ao longo do caminho;
  - c) *interferência* produzida, acidental ou intencionalmente, por fontes cujos sinais ocupam a mesma banda de frequência do sinal transmitido;
  - d) *ruídos do receptor* gerados pelos dispositivos eletrônicos colocados no circuito receptor. Embora sejam gerados pelo receptor, esses ruídos são considerados efeitos do canal e, assim, são tratados como *ruídos de canal*. Os efeitos dos ruídos gerados pelo receptor dependem da intensidade do sinal recebido, que por sua vez depende significativamente do caminho de propagação entre o transmissor e o receptor.



**Figura 1.1** Diagrama em bloco de um sistema de comunicação conectando uma fonte a um destino de informação.

3. *Receptor*. O receptor age sobre o sinal recebido para produzir uma *estimativa* do sinal de informação original transportado através do meio de propagação. O significado do termo “estimativa” do sinal portador de informação original, em contraponto à reprodução exata do sinal, deve-se à presença inevitável de *perdas* no canal. Nos sistemas wireless, o receptor:
  - a) freqüentemente *estima a natureza variável no tempo do canal* de modo a possibilitar o uso de alguma técnica de compensação;
  - b) implementa *técnicas de correção de erros* para melhorar a falta de confiabilidade dos canais wireless, no que tange às propriedades do meio;
  - c) *mantém-se sincronizado*, mesmo quando o canal apresenta características que variam muito rapidamente no tempo.

Todas essas facetas tornam a camada física alvo constante de novas implementações visando à melhoria contínua dos novos sistemas wireless. Podemos dizer que a camada física é freqüentemente a que encontra o maior número de novas tecnologias em decorrência dos avanços da tecnologia wireless.

## 1.4 CAMADA DE ENLACE

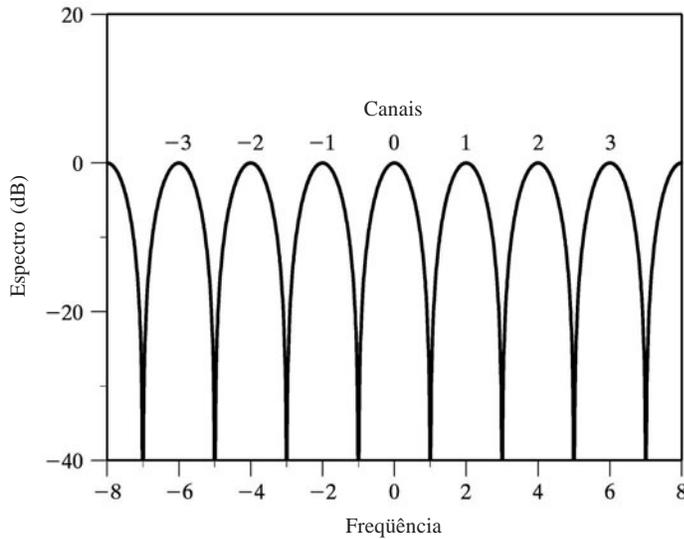
Conceitualmente, a principal função da camada de enlace é a capacidade de suportar *estratégias de acesso múltiplo* ao meio. Essa característica descreve a abordagem geral para o compartilhamento dos recursos físicos entre os diferentes usuários. Nos sistemas wireless, o principal recurso físico é o espectro de freqüências de rádio. Em geral, para qualquer serviço wireless, apenas uma porção fixa do espectro é permitida ao sistema de comunicação. Consideraremos quatro estratégias de acesso múltiplo de compartilhamento do espectro de freqüências:

1. FDMA (*Frequency-Division Multiple Access*) – No *acesso múltiplo por divisão de freqüência* o espectro de freqüência é compartilhado através da atribuição de canais de freqüência específicos, de modo fixo ou variável, aos usuários.
2. TDMA (*Time-Division Multiple Access*) – No *acesso múltiplo por divisão de tempo* todos os usuários têm acesso completo ao espectro de freqüências por um determinado período de tempo (fixo ou variável) dependendo do sistema em questão.
3. CDMA (*Code-Division Multiple Access*) – No *acesso múltiplo por divisão de código* o compartilhamento do espectro é feito por uma forma de modulação por espalhamento espectral, a qual permite que diversos usuários utilizem todo o espectro de freqüência disponível. Para possibilitar a diferenciação entre os usuários, os sinais de cada um deve sofrer espalhamento e ser “criptografado” por código específico para distingui-lo dos outros sinais.
4. SDMA (*Space-Division Multiple Access*) – No *acesso múltiplo por divisão de espaço* o compartilhamento do espectro de freqüências entre os usuários aproveita a distribuição espacial dos terminais usuários, através do uso de antenas direcionais inteligentes, para minimizar as interferências entre esses terminais.

O objetivo de todas essas estratégias é maximizar a utilização do espectro de frequência, isto é, fornecer serviço a muitos usuários utilizando o mesmo espectro de frequência. Na prática, a maioria dos sistemas wireless combina uma ou mais estratégias de acesso múltiplo. Historicamente, devido à tecnologia existente e às topologias das redes, essas estratégias de acesso múltiplo se desenvolveram na mesma ordem apresentada.

### 1.4.1 FDMA

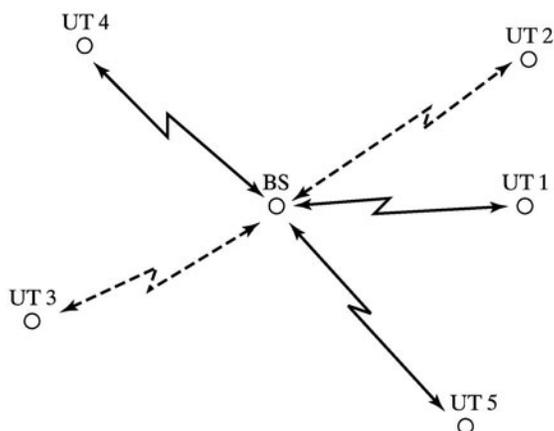
Os primeiros sistemas wireless visavam à comunicação ponto a ponto entre os sistemas finais, isto é, um transmissor se comunicava apenas com um receptor. A abordagem natural era atribuir a cada par de *terminais usuários* (*User Terminals – UTs*) um canal de frequência, isto é, uma forma de acesso múltiplo por divisão de frequência (FDMA). No domínio da frequência, o FDMA pode ser visualizado conforme ilustra a Figura 1.2. O espectro de frequências é dividido em um certo número de canais e a cada par de usuários é atribuído um canal diferente. Em alguns casos, um canal diferente é atribuído para cada direção de transmissão. Do ponto de vista de interferência, é importante que os sinais emitidos pelo UT fiquem confinados na banda de frequência à qual foram atribuídos.



**Figura 1.2** Uma representação no domínio da frequência da estratégia FDMA.

### 1.4.2 TDMA

Os sistemas mais recentes foram projetados para prover acesso múltiplo (ponto a multiponto) em que usuários compartilham uma estação rádio central. A arquitetura *ponto a multiponto* mostrada na Figura 1.3 consiste em muitos UTs comunicando-se com a estação rádio base central (*Base Station – BS*). Os muitos UTs compartilham um



**Figura 1.3** Arquitetura de rede ponto a multiponto.

ou mais canais de rádio da estação. Os primeiros sistemas de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) utilizavam modulação analógica e um protocolo simples, o *push-to-talk* (aperte para falar). Um usuário deve esperar até o canal ficar desocupado e então apertar (*push*) um botão ligado ao microfone para então falar (*talk*). Um exemplo desse tipo de sistema de comunicação é encontrado ainda hoje em táxis.

Com o advento da tecnologia digital, os sistemas TDMA ressurgiram mais complexos e com estratégias de compartilhamento mais eficientes. Um exemplo desse sistema é mostrado na Figura 1.4, no qual o tempo é dividido em quadros e cada quadro é dividido em *slots*. A cada UT ativo é atribuído um ou mais *slots* por quadro.

A estrutura da Figura 1.4 pode sugerir que a estratégia TDMA é adequada para as aplicações de transmissão de dados. De fato, muitas das aplicações iniciais utilizavam transmissão de voz. A idéia-chave para tais aplicações era reconhecer que a taxa de transmissão para um canal digital TDMA é tipicamente  $N$  vezes mais rápida que a taxa requerida por um canal isolado.



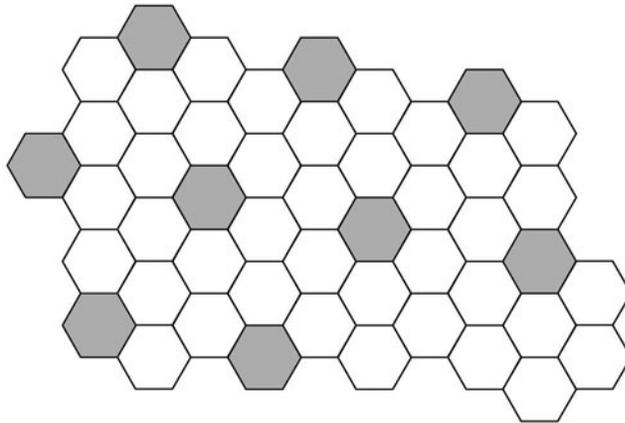
**Figura 1.4** Estrutura do quadro TDMA com  $N$  *slots* por quadro.

### 1.4.3 CDMA

O propósito de um sistema de *telefonia celular* é reusar o espectro de frequência, tantas vezes quanto possível, distribuído em uma grande área. Em um sistema celular, as células são modeladas para formar padrões hexagonais, conforme ilustra a Figura 1.5. Os UTs em cada célula comunicam-se com a estação rádio base localizada no centro da célula, como em um arranjo ponto a multiponto, mas ficando os UTs livres para se moverem entre células, comutando entre as estações rádio base à medida que se movem.

Dentro de uma célula, podem ser utilizadas técnicas FDMA ou TDMA para prover o compartilhamento do meio de transmissão. Conjuntos distintos de canais de frequência são atribuídos a cada célula, com os canais sendo reutilizados em células suficientemente separadas; um exemplo são as *células co-canal* que aparecem sombreadas na Figura 1.5.

Uma desvantagem de usar FDMA e TDMA nos sistemas de telefonia celular é que a *distância de reuso* fica limitada tipicamente ao pior caso de interferência. Células co-canal devem ser escolhidas de modo que o pior caso de interferência esteja em um nível aceitável. Intuitivamente, esperaríamos que o reuso de frequência melhoraria se as células co-canal fossem escolhidas com *base em uma interferência média*. A técnica de *espalhamento espectral* (*spread spectrum*) é uma estratégia de modulação muito tolerante à interferência e que forma a base para a técnica de acesso conhecida como acesso múltiplo por divisão de código (CDMA). A estratégia de espalhamento espectral difunde o sinal portador da informação em uma ampla largura de banda, alcançando o efeito médio desejado. Como resultado, ela permite que o mesmo espectro seja utilizado simultaneamente, sob certas condições, por muitos UTs em células adjacentes.



**Figura 1.5** Padrão hexagonal de células usadas em um sistema de telefonia celular.

#### 1.4.4 SDMA

As três técnicas de acesso múltiplo (FDMA, TDMA e CDMA) têm elevado a eficiência espectral através do aumento de reuso de frequência, tempo e espaço. Por enquanto, temos presumido que as antenas são *omnidirecionais* (isto é, antenas que irradiam de modo uniforme em todas as direções). Se as antenas transmissora e receptora puderem ser focadas diretamente nas duas extremidades de um enlace, é possível obter uma série de benefícios:

- Reduzir a potência total necessária a ser transmitida, pois toda a potência fluiria na direção correta.
- Reduzir a quantidade de interferências geradas por cada transmissor porque a potência total transmitida fica limitada/localizada.
- O receptor receberia um sinal de intensidade maior devido ao ganho de ambas antenas e ao menor nível de interferência no percurso.

O desenvolvimento dessas antenas “inteligentes” permitiriam até mesmo um fator de reuso maior do espectro de rádio. A técnica de acesso múltiplo por divisão de espaço (SDMA) provê melhorias na eficiência espectral obtidas através do aproveitamento da separação angular de UTs individuais. Em particular, *antenas multifeixes* são utilizadas para separar sinais de rádio apontando-os ao longo de direções diferentes. Logo, usuários diferentes seriam capazes de reusar o mesmo espectro de rádio, contanto que sejam separados em ângulos.

## 1.5 RESUMO DO LIVRO

O recurso físico fundamental nos sistemas wireless é o espectro de rádio frequências. *O desenvolvimento das comunicações wireless busca modos mais eficientes de utilizar o espectro de rádio frequências.* Essa evolução é consequência tanto do aumento da demanda por um recurso espectral limitado quanto por novas tecnologias que têm tornado realidade as técnicas de eficiência espectral. Este livro segue essa idéia evoluindo em busca da eficiência espectral.

Os vínculos fundamentais nesse processo evolucionário são os meios de transmissão, pois deles dependem as *propriedades físicas dos canais wireless*. Essas propriedades modelam e influenciam as técnicas de transmissão, tornando-as tanto práticas quanto confiáveis. Por essa razão, compreender o meio físico é uma das chaves para compreender as comunicações wireless e, portanto, é o tópico que compõe o Capítulo 2.

Os primeiros sistemas wireless eram todos sistemas ponto a ponto utilizando a técnica FDMA. À medida que o espectro de rádio ficava muito poluído, o interesse em melhorar a eficiência dos canais individuais aumentava. O papel que a *modulação* desempenha na eficiência espectral de canais individuais é o assunto do Capítulo 3. Para UTs móveis, as modulações possíveis ficam vinculadas à limitação de potência do terminal e à necessidade do sinal ser robusto e facilmente detectável em condições de desvanecimento.

A introdução da tecnologia digital trouxe enormes melhorias na eficiência de estratégias como o TDMA. Tecnologia similar pôde ser aplicada na redução da quantidade de informação a ser transmitida; em particular, as técnicas digitais de *codificação de voz*, as quais codificam inteligentemente sinais de voz para minimizar a quantidade de bits requeridos na conversão analógico-digital, são outro modo de aumentar a eficiência espectral. Uma vez iniciadas as redes wireless para digitalização de voz, o próximo passo foi utilizá-las também para o tráfego de dados. Isso gerou um problema, pois as redes existentes e os terminais móveis eram projetados para aplicações de voz. O fato básico é que os sinais de voz possuem uma tolerância relativamente alta a erros nos bits que compõem a informação, enquanto dados são muito susceptíveis a erros nos bits de informação – imagine alguém deslocando em uma casa decimal a quantia depositada em sua conta bancária! A transmissão de dados conduz ao uso de alguma técnica *codificação/correção direta de erros* nos sistemas wireless. A técnica TDMA e essas tecnologias pertinentes serão examinadas no Capítulo 4.

Após o estudo das melhorias na eficiência espectral sob o aspecto do tempo e da frequência, é inevitável o estudo da eficiência espectral sob a ótica espacial – isto é, o reuso do mesmo espectro, mas em diferentes localidades. Isso conduz à introdução dos sistemas de telefonia celular no Capítulo 5. O principal fator limitador do reuso do espectro é a interferência entre os sinais que trafegam nos terminais. Um planejamento

bem feito do enlace reduz os efeitos da interferência, otimizando a eficiência espectral. Esse é o caso da técnica de *espalhamento espectral*. Por isso, o Capítulo 5 inicia com uma discussão detalhada da modulação por espalhamento espectral e da estratégia CDMA, antes de introduzir a idéia por trás dos sistemas de telefonia celular.

Enquanto os sistemas celulares produziam melhorias significativas na eficiência espectral, melhorias adicionais ainda foram possíveis através do *reuso do espectro em direções angulares diferentes*. O reuso angular requer a utilização da tecnologia baseada em “antenas inteligentes” e é a motivação para a estratégia SDMA, tema do Capítulo 6. Um dos desafios das comunicações wireless é a natureza imprevisível e potencialmente incerta do percurso de propagação. Um método bastante conhecido de aumentar a confiabilidade nas comunicações é a *diversidade*. Diversidade é a transmissão do mesmo sinal portador da informação por diferentes métodos de modo a melhorar a confiabilidade. Uma das formas de diversidade é a diversidade espacial, a qual costuma implicar na transmissão ou recepção do sinal através do uso de múltiplas antenas, forçando o sinal a se deslocar em percursos diferentes no espaço. Por essa razão, a diversidade espacial é tão ligada às técnicas SDMA. Assim, tanto a discussão sobre diversidade quanto a discussão sobre SDMA são desenvolvidas no Capítulo 6.

O foco deste livro é a camada física e as técnicas de acesso múltiplo associadas com as comunicações wireless. É importante que o leitor compreenda qual dessas tecnologias utilizar nas redes wireless. O Capítulo 7 inclui uma comparação das diferentes estratégias de acesso múltiplo e das funções de gerenciamento de enlace e termina discutindo como elas se ajustam à arquitetura das redes wireless.

## NOTAS E REFERÊNCIAS

1. O modelo de referência OSI foi desenvolvido para ser um padrão de interconexão das redes de computadores. Ele tem sido aplicado de modo bastante efetivo a outros tipos de redes. O primeiro capítulo do livro de Bertsekas e Gallager (1992) faz um apanhado do modelo OSI e os demais capítulos descrevem a sua aplicação às redes de computadores\*.

---

\* N. de R.T.: Um tratamento excelente do modelo OSI e de suas aplicações nas redes de computadores pode ser encontrado em Forouzan, Behourz A.; *Redes de Comunicação de Dados*, 2ª Ed. Editora Bookman, 2005.

# Propagação e ruído

## 2.1 INTRODUÇÃO

O estudo da propagação é importante para a compreensão das comunicações sem fio porque fornece a modelagem física necessária que leva a uma boa estimativa da potência requerida para o *estabelecimento do enlace de comunicações* para fornecer comunicação confiável. O estudo da propagação também auxilia na compreensão das técnicas de recepção para compensação das perdas introduzidas pela transmissão sem fio. Neste capítulo, estudaremos os modelos físicos aplicados em vários fenômenos ligados à propagação e usaremos esses modelos para prever os efeitos da propagação sobre a transmissão. Para a maioria dos casos, os modelos físicos são simplificados de modo a tratar um problema menor, mais simples, embora tais modelos forneçam um panorama aproximado da forma como os sinais se propagam. Apesar de este capítulo enfatizar a propagação terrestre das comunicações wireless, também consideraremos as comunicações via satélite, pois normalmente elas se aproximam muito das condições ideais de propagação.

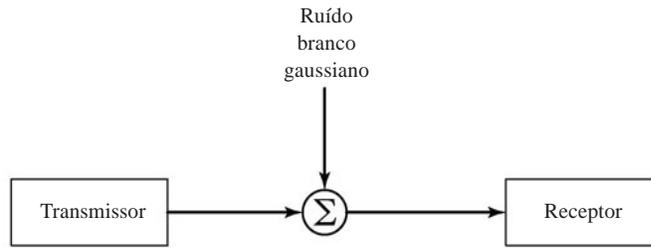
Os efeitos da propagação e outras perdas do sinal geralmente são agrupados e classificados como propriedades do *canal*. O canal com ruído branco gaussiano aditivo (AWGN) é o modelo básico utilizado no desenvolvimento da teoria das comunicações. Com esse modelo, o ruído possui média nula e o sinal apresenta uma distribuição Gaussiana como propriedade adicional. O ruído é presumido *branco* ao longo de toda a banda de interesse; isto é, amostras do ruído no intervalo não estão relacionadas entre si. Isso implica que o ruído possui uma função de autocorrelação dada por  $(N_0/2) \delta(t)$ , onde  $\delta(t)$  é a função Delta de Dirac ou, equivalentemente, o ruído branco possui uma densidade espectral de potência uniforme e numericamente igual a  $N_0/2$  (watts/Hz) na faixa de frequência  $-\infty < f < \infty$ . O modelo AWGN aparece em blocos na Figura 2.1.

Para as comunicações com um satélite geostacionário nas quais o percurso entre o transmissor e o satélite e entre o satélite e o receptor mantém-se fixo, o canal com ruído branco gaussiano aditivo (AWGN) é um modelo excelente.\* Em geral, os modelos para os canais de comunicação sem fio seguem uma das duas formas:

1. *Modelos determinísticos* levam em conta o modelo físico exato do meio de propagação. Conseqüentemente, para qualquer situação, a geometria do meio tem de ser levada em consideração. Esse método fornece as estimativas mais confiáveis do comportamento da propagação, sendo por isso complexo do ponto de vista computacional.

---

\* N. de R.T.: Cabe mencionar que o princípio da reciprocidade é válido apenas quando o meio é linear, passivo e isotrópico.



**Figura 2.1** Canal com ruído gaussiano.

2. *Modelos estatísticos* assumem uma forma de abordagem empírica, medindo as características da propagação em uma enorme variedade de meios e desenvolvendo-se então em um modelo baseado nas estatísticas medidas para uma classe específica de meios. Esses modelos são mais fáceis de descrever e de usar, mas não apresentam resultados tão exatos quanto os modelos determinísticos.

A seguir, apresentamos exemplos dos dois tipos de modelos.

Quando considerarmos modelos físicos, estaremos levando em conta um dos três modos básicos de propagação:

1. O modelo de propagação no espaço livre corresponde ao percurso de propagação livre, desimpedido, como sugere o nome, entre o transmissor e o receptor. As comunicações via satélite geralmente contam com a linha de visada direta entre o transmissor da estação base e o satélite e entre o satélite e o receptor.
2. O fenômeno da *reflexão* está ligado ao “efeito elástico” das ondas eletromagnéticas na fronteira de objetos como construções, montanhas e veículos. Nas comunicações wireless terrestres, normalmente não existe uma linha de visada direta no percurso entre o transmissor e o receptor e as comunicações geralmente envolvem reflexão e/ou difração (descritas a seguir).
3. O fenômeno da *difração* está ligado ao fato de as ondas eletromagnéticas contornarem objetos quando passam ao redor dos mesmos, tais como construções ou terrenos elevados (por exemplo, colinas) ou quando passam através de objetos contendo aberturas, como as folhas das árvores e outras formas de vegetação.

Como resultado de outro fenômeno de propagação, chamado *refração*, as ondas eletromagnéticas mudam a direção de propagação quando passam de um meio para outro. Um exemplo de refração ocorre quando a luz, propagando-se no ar, encontra uma interface com a água. A utilização da refração nas comunicações sem fio fica limitada à circunstâncias especiais, tais como comunicações ionosféricas.

Freqüentemente, o sinal recebido é uma combinação de muitos desses modos de propagação. Isto é, o sinal transmitido pode chegar ao receptor através de muitos percursos. Os sinais nesses diferentes percursos podem interferir uns com os outros construtiva ou destrutivamente. Isso é o que chamamos *multipercurso* ou *multicaminho*. Se o transmissor ou receptor estiverem em movimento, esses fenômenos de propagação serão variáveis no tempo e provocarão *desvanecimento* do sinal. Nesse caso, uma van-

tagem dos modelos estatísticos é o modo sucinto como eles descrevem essas situações complicadas.

Além das perdas devidas à propagação, outros dois fenômenos que limitam as comunicações são o *ruído* e a *interferência*. Existem muitas fontes que provocam esses tipos de perdas, incluindo o próprio receptor, as fontes artificiais, construídas pelo homem, e a ação de outros transmissores nas comunicações.

Este capítulo tem dois objetivos. O primeiro é fornecer os elementos necessários à compreensão básica da física por trás de vários fenômenos de propagação e ruídos e de como eles afetam as comunicações. Para esse fim, a Seção 2.2 explica a propagação no espaço livre, a Seção 2.3 e 2.4 explicam, respectivamente, os modelos físicos e estatísticos atuais para as comunicações sem fio terrestres e a Seção 2.5 explica a propagação em ambientes fechados (*indoor*). Essas explicações serão seguidas por uma discussão dos efeitos da propagação local, tais como o multipercurso e o desvanecimento de Rayleigh (Seção 2.6), e dos modelos de espalhamento estatístico (Seção 2.7).

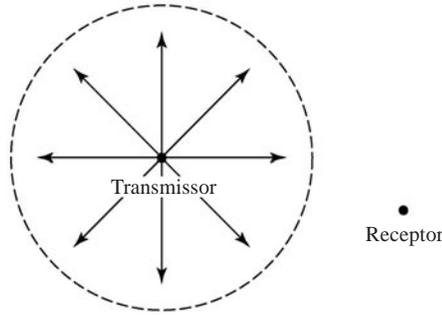
O segundo objetivo é fornecer ao leitor uma idéia, no nível de sistema, da importância da propagação e dos efeitos de ruídos nas comunicações sem fio. Para tanto, os ruídos e os efeitos de interferência são explicados na Seção 2.8 e o planejamento do enlace é apresentado na Seção 2.9. O capítulo termina com três Exemplos-tema: o primeiro descreve um modelo empírico para propagação terra-móvel (modelo empírico de Okumura-Hata), o segundo descreve como todas as facetas examinadas neste capítulo levam juntas ao projeto de uma rede local sem fio (*Wireless Local Area Network – WLAN*) e o terceiro descreve as vantagens da propagação de rádio em ultra banda larga (UWB – *Ultra-Wideband*).

## 2.2 PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE

A transmissão sem fio é caracterizada pela geração, no transmissor, de um sinal elétrico representando a informação desejada, pela propagação das ondas de rádio correspondente ao sinal através do espaço e pelo receptor responsável em estimar a informação transmitida, recuperando o sinal elétrico gerado no transmissor. O sistema de transmissão é caracterizado pela antena que converte um sinal elétrico em onda de rádio e pela propagação dessa onda de rádio através do espaço. Os efeitos da transmissão são mais bem descritos pelas equações de Maxwell; contudo, neste texto, modelaremos o método de propagação baseando-nos unicamente no campo elétrico e *consideraremos o meio linear, no qual todas as distorções podem ser caracterizadas pela atenuação ou superposição de diferentes sinais.*

### 2.2.1 Radiação isotrópica

Um conceito fundamental para a compreensão dos sistemas de transmissão sem fio é a operação da *antena isotrópica*. Uma antena isotrópica irradia igualmente em todas as direções. Na verdade, essa antena não existe e, assim, todas as antenas práticas têm associada alguma *diretividade*. A antena isotrópica é uma referência comparativa para as outras antenas, sendo útil na explicação de fundamentos.



**Figura 2.2** Ilustração da radiação isotrópica.

Considere uma fonte isotrópica que irradia a potência  $P_T$  (em watts) igualmente em todas as direções, conforme ilustra a Figura 2.2. A potência por unidade de área ou *densidade de potência* radiada na superfície de uma esfera de raio  $R$  centrada na fonte é dada por

$$\Phi_R = \frac{P_T}{4\pi R^2} \quad (2.1)$$

onde  $4\pi R^2$  é a área da superfície da esfera. A unidade típica de densidade de potência radiada é o watts por metro quadrado. A Equação (2.1) segue diretamente da lei de conservação da energia; isto é, a energia radiada pela fonte por unidade de tempo deve estar disponível na superfície da esfera ou em qualquer outra superfície fechada que encerra a fonte.

A potência  $P_R$  recebida pela antena receptora depende do tamanho e da orientação da antena relativamente ao transmissor. A potência recebida por uma antena de *área efetiva* ou *seção reta de absorção*  $A_e$  é dada por

$$P_R = \Phi_R A_e = \frac{P_T}{4\pi R^2} A_e \quad (2.2)$$

A área física da antena ( $A$ ) e a sua área efetiva ( $A_e$ ) estão relacionadas através da *eficiência da antena*

$$\eta = \frac{A_e}{A} \quad (2.3)$$

Esse parâmetro indica o quanto uma antena converte a radiação eletromagnética incidente no sinal elétrico correspondente. Para antenas parabólicas, a eficiência varia tipicamente de 45 a 75%; para antenas com captador direcional, a eficiência cobre a faixa de 50 a 80%.

Observando de pontos afastados da antena transmissora isotrópica é intuitivo presumir que o transmissor assume a forma pontual. Nesse caso, qual é a área efetiva de

uma antena receptora isotrópica? Se a fonte é considerada como um *ponto de absorção*, a resposta a essa questão não é óbvia. Contudo, partindo da teoria eletromagnética, notamos que a *área efetiva de uma antena isotrópica em qualquer direção* é dada por<sup>2</sup>

$$A_{\text{iso}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.4)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação. Substituindo a Equação (2.4) na (2.2), obtemos a seguinte relação entre a potência transmitida e recebida por antenas isotrópicas:

$$P_R = \frac{P_T}{(4\pi R/\lambda)^2} = \frac{P_T}{L_p} \quad (2.5)$$

Nessa equação, a perda do percurso ou do caminho é definida como

$$L_p = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \quad (2.6)$$

A quantidade  $L_p$  é a *perda no espaço livre* entre duas antenas isotrópicas. Essa definição de perda do percurso depende, de um modo surpreendente, do comprimento de onda irradiado – consequência da dependência da área efetiva de uma antena isotrópica com o comprimento de onda.

## Exemplo 2.1

### Sensibilidade do receptor

*Sensibilidade* é um parâmetro do receptor que indica o nível mínimo de sinal necessário nos terminais da antena de modo a prover confiabilidade às comunicações. Os fatores dos quais depende a sensibilidade incluem a geometria do receptor, o tipo de modulação e a taxa de transmissão. A sensibilidade do receptor é expressa freqüentemente em dBm – isto é, a potência em decibel relativa a um nível de referência de 1 mW. Por exemplo, uma antena receptora móvel comercial para transmissão de dados pode ser especificada com uma sensibilidade de -90 dBm. Considerando um transmissor de 100 mW e perda no espaço livre entre duas antenas isotrópicas, transmissora e receptora, qual é o raio da área de serviço desse receptor considerando que a transmissão ocorre em 800 MHz?

Para responder essa questão, primeiramente notamos que -90 dBm equivale a um nível potência de sinal de  $10^{-9}$  mW. Da Equação (2.5), a perda máxima tolerável no percurso é

$$L_p = \frac{P_T(\text{mW})}{P_R(\text{mW})} = \frac{100}{10^{-9}} = 10^{11}$$

Conseqüentemente, observando que  $\lambda = c/f$ , onde  $c$  é a velocidade da luz, e usando a Equação (2.6), determinamos o raio de alcance máximo por

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{L_p} = \frac{c}{4\pi f} \sqrt{L_p} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{4\pi \times 800 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} \sqrt{10^{11}} = 9,2 \text{ km}$$