

Nota de aula: Sistemas de Comunicações Móveis

Capítulo 4 – O canal móvel de comunicações

Resumo

O sinal do transmissor é irradiado na forma de ondas eletromagnéticas em um sinal modulado em uma portadora cuja frequência é classificada dentro de subfaixas, que, genericamente, possui propriedades específicas e serve a aplicações diretamente relacionadas com tais propriedades.

A onda eletromagnética é propagada pelo espaço aéreo, atravessando um meio repleto de obstáculos que produzem efeitos variados sobre o sinal de radiofrequência (RF), que carrega a informação. Para analisar o comportamento do sinal que atravessa o meio são utilizados modelos que buscam reproduzir o efeito típico produzido. Duas grandes categorias são estabelecidas: ambientes *indoor* e *outdoor*.

O sinal de RF ocupa uma banda do espectro eletromagnético, que é um bem público, portanto precisa ter sua exploração regulamentada. A regulamentação do uso do espectro é tratada em âmbito internacional e nacionalmente pela Anatel, órgão regulador da exploração dos serviços de telecomunicações.

O canal de comunicações móvel possui peculiaridades que o distingue substancialmente de outros meios de comunicação. Tipicamente, produz efeitos sobre o sinal transmitido, como atenuação, desvanecimento e multipercurso, que são discutidos detalhadamente nesta seção.

3.1 Introdução às radiofrequências

O canal móvel de comunicações é um meio pelo qual sinais de comunicação são transmitidos e recebidos entre diferentes dispositivos, utilizando ondas eletromagnéticas. A transmissão de um sinal ocorre através de uma portadora, que é uma onda de radiofrequência (RF) modulada com a informação a ser transmitida. Esta portadora é então irradiada por uma antena, que converte a corrente elétrica oscilante em uma onda eletromagnética que se propaga pelo ar.

As ondas eletromagnéticas são formas de energia que viajam através do espaço e do ar a uma velocidade de aproximadamente 300.000 quilômetros por segundo (a velocidade da luz). A faixa de frequências dessas ondas, que se estende de 3 kHz a 300 GHz, é conhecida como espectro radioelétrico. Este espectro é dividido em vários subfaixas, cada uma com suas próprias características de propagação e aplicações práticas.

Dependendo da frequência da portadora, o sinal é classificado em uma subfaixa. Cada uma das subfaixas possui características próprias e aplicações específicas. Abaixo, descrevemos cada uma dessas faixas de radiofrequência.

Very Low Frequency (VLF). Faixa de Frequência: 3 kHz a 30 kHz. Características: Ondas longas e baixas frequências que podem penetrar em águas e solo. Aplicações: Comunicação com submarinos, navegação marítima e alguns sistemas de radiodifusão.

Low Frequency (LF). Faixa de Frequência: 30 kHz a 300 kHz. Características: Ondas longas que podem cobrir grandes distâncias com baixa atenuação. Aplicações: Radiodifusão AM, navegação aérea e marítima (sistemas de balizamento).

Medium Frequency (MF). Faixa de Frequência: 300 kHz a 3 MHz. Características: Propagação eficiente durante o dia e a noite com alcance médio. Aplicações: Radiodifusão AM, radiocomunicação marítima e algumas aplicações de emergência.

High Frequency (HF). Faixa de Frequência: 3 MHz a 30 MHz. Características: Boa propagação em longas distâncias devido à reflexão na ionosfera. Aplicações: Radiocomunicação de longa distância, rádio amador, comunicação militar.

Very High Frequency (VHF). Faixa de Frequência: 30 MHz a 300 MHz. Características: Menor alcance que HF, mas maior largura de banda e melhor qualidade de sinal. Aplicações: Radiodifusão FM, televisão (canais 2-13), comunicação aeronáutica e marítima.

Ultra High Frequency (UHF). Faixa de Frequência: 300 MHz a 3 GHz. Características: Propagação em linha reta, limitada por obstáculos como edifícios e árvores. Aplicações: Televisão (canais 14-69), telefonia móvel, Wi-Fi, comunicação por satélite.

Super High Frequency (SHF). Faixa de Frequência: 3 GHz a 30 GHz. Características: Alta capacidade de largura de banda, ideal para comunicação de alta velocidade. Aplicações: Comunicação por satélite, radar, micro-ondas, Wi-Fi (5 GHz).

Extra High Frequency (EHF). Faixa de Frequência: 30 GHz a 300 GHz. Características: Alta taxa de absorção pela atmosfera, limitando o alcance. Aplicações: Comunicação por satélite, radares avançados, pesquisa científica.

Essas faixas de frequência são fundamentais para diferentes aplicações em comunicação, cada uma escolhida de acordo com suas características específicas de propagação, alcance e capacidade de transmissão de dados.

A frequência (f) de uma onda eletromagnética está intimamente relacionada ao seu comprimento de onda (λ). O comprimento de onda é a distância entre dois pontos correspondentes de ciclos consecutivos de uma onda, como de crista a crista ou de vale a vale. Esta relação é expressa pela fórmula:

$$\lambda = c/f_c$$

, onde c é a velocidade da luz no vácuo e f_c é a frequência da portadora.

As ondas eletromagnéticas são muitas vezes designadas pelo seu comprimento de onda em vez de sua frequência. O comprimento de onda é a distância entre dois pontos consecutivos de uma onda, como de crista a crista. Esta designação é comum em radiodifusão, onde diferentes faixas de frequências têm nomes específicos baseados em seus comprimentos de onda.

- Ondas Longas: Correspondem a frequências mais baixas e têm comprimentos de onda mais longos. Elas são usadas em aplicações de radiodifusão de longa distância e navegação.

- Ondas Médias: Usadas principalmente para radiodifusão AM. Estas ondas têm comprimentos de onda intermediários que permitem uma boa propagação tanto durante o dia quanto à noite, cobrindo distâncias regionais.

- Ondas Curtas: Frequências mais altas que podem refletir na ionosfera e alcançar grandes distâncias, mesmo intercontinentais. São usadas para radiodifusão internacional e comunicações militares.

Na prática, uma estação de rádio AM pode ser referida pelo seu comprimento de onda. Por exemplo, uma estação que transmite a 1 MHz pode ser chamada de "300 metros" devido ao comprimento de onda associado a essa frequência.

Essa designação pelo comprimento de onda ajuda a simplificar a identificação das estações de radiodifusão e é uma prática comum no campo das comunicações, especialmente em contextos históricos e operacionais.

3.2 Propagação

A maneira como essas ondas se propagam pelo ar depende de vários fatores, incluindo a frequência da portadora, as características do terreno, a presença de obstáculos e as condições atmosféricas.

Em relação à propagação das ondas eletromagnéticas pelo espaço aéreo, ela pode ocorrer de várias formas:

1. Propagação por Linha de Visada (LOS): Em frequências mais altas, como UHF e SHF, as ondas se propagam em linha reta e são limitadas pela curvatura da Terra e

por obstáculos físicos. Este tipo de propagação é comum em comunicações de televisão, telefonia móvel e Wi-Fi.

2. Propagação Ionosférica: Em frequências médias e altas (MF e HF), as ondas podem ser refletidas pela ionosfera, permitindo comunicação a longas distâncias. Este fenômeno é explorado em radiodifusão de ondas curtas e comunicações militares.

3. Propagação Terrestre: Em frequências mais baixas (VLF e LF), as ondas seguem a curvatura da Terra e podem cobrir grandes distâncias com baixa atenuação. São usadas em comunicações de submarinos e sistemas de navegação.

A propagação das ondas de rádio em ambientes de comunicações móveis pode ser dividida em dois principais cenários: propagação externa (*outdoor*) e propagação interna (*indoor*). Cada cenário possui características e desafios específicos que influenciam o desempenho dos sistemas de comunicação.

A propagação *outdoor* envolve a transmissão de ondas de rádio em ambientes abertos, como cidades, áreas rurais e rodovias. As ondas de rádio, ao se propagarem em ambientes externos, encontram diversos obstáculos naturais e artificiais, como edifícios, árvores, terrenos acidentados e veículos.

Existem modelos de propagação *outdoor* que são frequentemente usados, como o modelo de Okumura-Hata, adequado para áreas urbanas, suburbanas e rurais, fornece previsões da perda de caminho em função da distância e da frequência, e o modelo de Cost231-Hata, uma extensão do modelo de Okumura-Hata, ajustado para frequências mais altas, típicas das comunicações móveis modernas.

A propagação *indoor* refere-se à transmissão de ondas de rádio dentro de edifícios, onde as ondas interagem com paredes, móveis e outras estruturas internas. Os ambientes *indoor* são altamente variados, incluindo residências, escritórios, fábricas e centros comerciais. Os efeitos típicos observados são: reflexão Interna, em que as ondas de rádio são refletidas por superfícies internas como paredes, tetos e pisos; penetração, em que o sinal passa através de materiais de construção como concreto, madeira e vidro, com diferentes materiais produzindo diferentes níveis de atenuação; multipercurso, devido às múltiplas reflexões e refrações, as ondas de rádio seguem vários caminhos entre o transmissor e o receptor, causando interferência construtiva e destrutiva; e atenuação, pois a perda de sinal é mais pronunciada dentro de edifícios devido à absorção pelos materiais de construção.

Tabela 1 – Comparação propagação indoor x outdoor

Aspecto	Propagação Outdoor	Propagação Indoor
Obstáculos	Edifícios, árvores, terrenos	Paredes, móveis, equipamentos

Aspecto	Propagação Outdoor	Propagação Indoor
Reflexão	Superfícies grandes e lisas	Paredes internas, tetos, pisos
Difração	Contorno de edifícios e montanhas	Cantos de salas e corredores
Atenuação	Geralmente menor, com exceção de grandes obstáculos	Significativamente maior devido a materiais de construção
Multipercurso	Presente, mas menos severo	Muito comum e severo, causando interferência

Tabela 2 - Subfaixas de RF, mecanismos de propagação e efeitos

Frequências	Mecanismos de propagação	Efeitos da atmosfera e do terreno
ELF 30 - 300 Hz	Onda “guiada” entre a ionosfera e a superfície da Terra e refratada até grandes profundidades no solo e no mar	Atenuação em 100 Hz entre 0,003 e 0,03 dB/km sobre o solo e de 0,3 dB/km sobre a água do mar
VLF 3 - 30 kHz	Onda “guiada” entre a camada D da ionosfera e a superfície da Terra e refratada no solo e no mar	Baixas atenuações sobre o solo e no mar
LF 30 - 300 kHz	Onda “guiada” entre a camada D da ionosfera e a superfície da Terra até 100 kHz, onda ionosférica tornando-se distinta acima desta frequência.	Desvanecimento em distâncias curtas devido à interferência entre a onda ionosférica e a de superfície
MF 300 - 3000 kHz	Onda de superfície a curta distância e em frequências mais baixas e onda ionosférica a longa distância	Atenuação da onda de superfície reduz sua cobertura a 100 km; onda ionosférica forte à noite.
HF 3 - 30 MHz	Onda ionosférica acima da distância mínima; onda de superfície a distâncias curtas.	Comunicação muito dependente do comportamento da ionosfera; onda de superfície bastante atenuada.
VHF 30 - 300 MHz	Propagação em visibilidade; difração; tropodifusão (ondas espaciais).	Efeitos de refração; difração pelo relevo; espalhamento troposférico.
UHF 300 - 3000 MHz	Propagação em visibilidade; difração; reflexão e tropodifusão.	Efeitos de refração; multipercursos e dutos (faixa alta); difração e obstrução pelo relevo e vegetação.
SHF (3 - 30 GHz)	Propagação em visibilidade	Desvanecimento por multipercursos; atenuação por chuvas (acima de 10 GHz); obstrução pelo terreno.
EHF 30 - 300 GHz	Propagação em visibilidade	Desvanecimento por multipercursos; atenuação por chuvas; absorção por gases; obstrução por edificações.

3.3 Regulamentação do uso do espectro radioelétrico

O espectro radioelétrico é um recurso limitado e oneroso, gerenciado por agências reguladoras nacionais e internacionais para evitar interferências e garantir o uso eficiente das frequências. No Brasil, por exemplo, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é responsável pela regulamentação do uso do espectro.

A regulamentação do espectro radioelétrico é coordenada internacionalmente pela União Internacional de Telecomunicações (UIT), uma agência especializada das Nações Unidas. A UIT organiza conferências mundiais de radiocomunicação (WRC) para revisar e atualizar o Regulamento de Radiocomunicações, um tratado internacional que regulamenta o uso do espectro e das órbitas de satélites. A UIT divide o mundo em três regiões, cada uma com suas próprias alocações de espectro para evitar interferências entre países vizinhos e facilitar a coordenação internacional.

No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é a responsável pela regulamentação e gestão do espectro radioelétrico. A ANATEL estabelece normas e procedimentos para o uso eficiente e ordenado do espectro, garantindo que diferentes serviços possam operar sem causar interferências prejudiciais.

A ANATEL classifica os serviços de radiocomunicação em várias categorias, como Radiodifusão, Serviço Móvel Pessoal (Celular), Serviços de Satélite, entre outros.

Cada uma dessas categorias tem faixas de frequência específicas. A atribuição das faixas de frequência aos serviços é feita com base em estudos técnicos e consultas públicas para garantir que o espectro seja utilizado de maneira eficiente e atenda às necessidades da sociedade.

A concessão de faixas de frequência é um processo pelo qual a ANATEL autoriza o uso de partes específicas do espectro para diferentes serviços de comunicações. Esse processo pode envolver: leilões, onde as empresas competem pela atribuição de faixas, como no caso das frequências para telefonia móvel (4G, 5G); autorizações, para serviços específicos como radiodifusão, onde as emissoras de rádio e TV recebem concessões para operar em determinadas frequências; licenças, para serviços de comunicação de dados, incluindo provedores de internet sem fio e serviços de satélite.

Esses processos são regulamentados por leis e decretos que definem os critérios para a participação, a duração das concessões, e as obrigações dos concessionários, como o cumprimento de padrões técnicos e a oferta de serviços de qualidade.

A ANATEL desempenha um papel crucial na administração do espectro radioelétrico no Brasil, garantindo que ele seja utilizado de forma justa, eficiente e em conformidade com os regulamentos internacionais. Além de regular e conceder licenças, a ANATEL monitora o uso do espectro para evitar interferências e garantir que as frequências sejam utilizadas conforme previsto.

3.4 Efeitos do canal sobre o sinal transmitido

Tratando especificamente a propagação *outdoor*, os efeitos que o canal produz sobre o sinal podem ser classificados como segue: filtragem, doppler, desvanecimento (fading) e múltiplos percursos.

3.4.1 Múltiplos percursos

O efeito de múltiplos percursos é um dos principais mecanismos, o feixe principal do sinal resultante recebido, que é a soma de um raio direto entre as antenas e outros raios que seguem trajetos distintos do raio direto, sofre uma atenuação considerável. Os trajetos distintos, designados como percursos múltiplos, são originados das refrações e reflexões.



Figura 1 – Feixes de propagação multipercurso

Para compreender melhor o efeito multipercurso, convém falar sobre modelos de raios. O modelo de raios é uma abordagem teórica utilizada para descrever a propagação das ondas eletromagnéticas. Este modelo aproxima a onda eletromagnética como uma série de raios, cada um transportando uma parte da energia da onda. Em ambientes complexos, como áreas urbanas ou dentro de edifícios, este modelo ajuda a prever como as ondas de rádio se comportam ao encontrar obstáculos e superfícies reflexivas.

Cada raio no modelo representa uma trajetória específica que a energia da onda pode seguir. Ao se propagarem, os raios podem sofrer vários fenômenos como reflexão, refração, difração e dispersão. Esses fenômenos são descritos detalhadamente a seguir:

Reflexão. Ocorre quando um raio encontra uma superfície grande e lisa, como a parede de um edifício. A energia do raio é refletida em um novo ângulo, de acordo com as leis da reflexão (ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão). Esse

comportamento é crucial em áreas urbanas, onde os edifícios causam múltiplas reflexões.

Refração. A refração acontece quando um raio passa de um meio para outro com diferentes propriedades de propagação, como do ar para uma parede de vidro. O raio muda de direção conforme a mudança na velocidade de propagação.

Difração. A difração permite que os raios contornem obstáculos. Quando um raio encontra uma borda ou uma abertura, parte da energia do raio é desviada e se propaga em novas direções. Esse fenômeno é significativo para a propagação em áreas onde a linha de visada é obstruída. 4. **Atenuação:** A perda de intensidade do sinal à medida que ele se propaga através do espaço e encontra obstáculos.

Dispersão (Scattering). A dispersão ocorre quando um raio encontra pequenas partículas ou superfícies irregulares. A energia do raio é espalhada em múltiplas direções. Isso é comum em ambientes indoor, onde muitos objetos e superfícies pequenas causam dispersão.

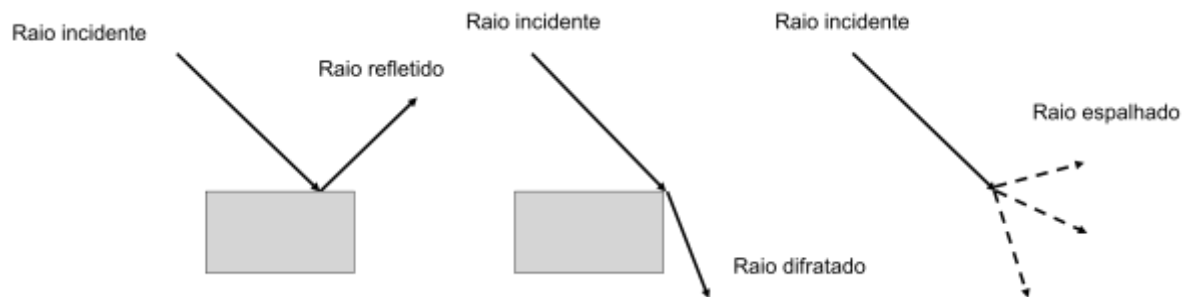


Figura 2 – Efeitos dos raios de propagação devido a obstáculos

As antenas desempenham um papel fundamental na emissão e recepção dos raios. Uma antena transmissora converte sinais elétricos em ondas eletromagnéticas, irradiando energia em várias direções dependendo de seu design e configuração. Da mesma forma, uma antena receptora capta os raios incidentes e converte a energia das ondas de volta em sinais elétricos.

Antenas Direcionais: Projetadas para concentrar a energia em uma direção específica, aumentando a eficiência da transmissão e recepção. São ideais para enlaces de longa distância onde a direção da comunicação é conhecida.

Antenas Omnidirecionais: Irradiam energia igualmente em todas as direções em um plano horizontal, proporcionando cobertura ampla. São comuns em aplicações como Wi-Fi e telefonia móvel, onde os dispositivos podem se mover livremente.

O modelo de raios é amplamente utilizado em simulações de propagação para prever a cobertura de sinal, identificar áreas de sombra (dead zones) e otimizar o posicionamento de antenas. Ferramentas de simulação baseadas em modelos de raios ajudam engenheiros a planejar redes de comunicação eficiente e a resolver problemas de interferência e baixa cobertura.

Embora poderoso, o modelo de raios tem limitações. Ele assume que as superfícies são perfeitamente refletoras ou difrativas, o que nem sempre é o caso. As interações complexas entre múltiplos raios também podem ser difíceis de modelar com precisão. Além disso, o modelo de raios é mais adequado para frequências mais altas (como UHF e SHF), onde o comportamento da onda é mais similar ao da luz.

Os sinais que percorrem caminhos que têm atrasos idênticos são subtraídos (interferência destrutiva) ou adicionados (interferência construtiva) na recombinção, dependendo se as fases dos sinais estão alinhadas ou não.

Se o sinal transmitido tem banda menor do que a banda de coerência do canal (faixa uniforme do canal) a recombinção na recepção é também uniforme, resultando em variações rápidas de intensidade e fase. Esse tipo de distorção é conhecido como desvanecimento de faixa estreita. Consequência: formação de erros em rajadas.

Quando a banda do sinal é maior do que a banda de coerência da canal, a interferência não é uniforme sobre os atrasos e as componentes de frequência do sinal, provocando distorção chamada de desvanecimento de faixa larga. Consequência: produzem o espalhamento do pulso, podendo produzir interferência intersimbólica.

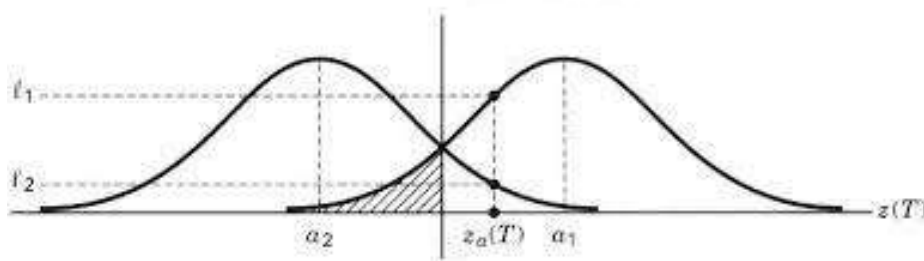


Figura 3 – Interferência intersimbólica

3.4.2 Desvanecimento (*fading*)

Desvanecimento (*fading*) são as variações aleatórias ao longo do tempo da intensidade e da fase do sinal recebido causadas pelo meio de propagação.

Os tipos de desvanecimento observados em um canal móvel sobre o sinal podem ser agrupados em três categorias principais: desvanecimento espacial, desvanecimento temporal e desvanecimento seletivo em frequência.

O desvanecimento espacial é caracterizado por uma variação da intensidade do sinal em função da distância e apresenta duas versões: desvanecimento de grande escala e de pequena escala.

Desvanecimento de grande escala é a média do conjunto das flutuações do sinal, enquanto o desvanecimento de pequena escala é a variação do sinal em torno do valor médio.

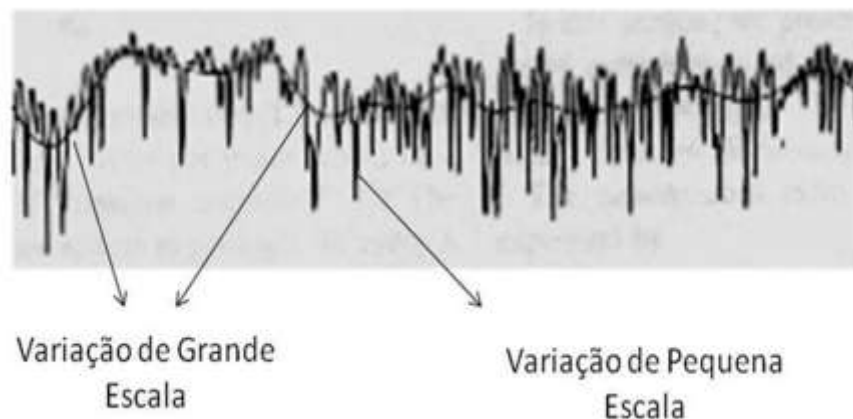


Figura 4 – Desvanecimento de pequena e grande escala

No desvanecimento espacial, a atenuação pode ser descrita por uma equação, conforme abaixo:

$$P=A.d^{-n}$$

em que P é a potência do sinal recebido, A é uma constante, d é a distância entre o transmissor e o receptor e n é o fator de atenuação, definido como

- $n=2$, em espaço livre (*outdoor*)
- $n<2$, em espaços com corredores (*indoor*)
- $n>2$, dentro de salas e escritórios (*indoor*)

A constante A representa a potência recebida a uma distância de referência (geralmente 1 metro) do transmissor. Em outras palavras, é a potência que seria recebida se o receptor estivesse exatamente a 1 metro de distância do transmissor, sem considerar outras perdas além da distância. Pode ser determinada por vários fatores, incluindo:

Potência de transmissão: A potência com a qual o sinal é transmitido.

Ganho das antenas: O ganho da antena transmissora e da antena receptora.

Frequência do sinal: A frequência de operação do sinal transmitido.

Perdas básicas do espaço livre: Perdas associadas à propagação do sinal no espaço livre sem obstáculos.

Em muitos casos, a constante A é calculada empiricamente ou usando modelos de propagação específicos. Por exemplo, no modelo de perda de caminho em espaço livre, a constante A pode ser calculada usando a fórmula

$$A = \frac{P_t G_t G_r}{\left(\frac{4\pi d_0}{c}\right)^2}$$

, onde P_t é a potência de transmissão, G_t é o ganho da antena transmissora, G_r é o ganho da antena receptora, f é a frequência do sinal e d_0 é a distância de referência (geralmente 1m).

O desvanecimento espacial depende fortemente da topografia. Normalmente leva a uma variação lenta da resposta do canal, seja na amplitude, fase ou atraso, por esse motivo chamado de desvanecimento lento.

O desvanecimento temporal caracteriza-se por apresentar uma variação da intensidade do sinal, medida em uma frequência particular fixa, como função do tempo, também chamado de desvanecimento de faixa estreita, porque, em sinais de faixa estreita, as variações temporais do canal afetam toda a largura de faixa do sinal uniformemente, sem afetar as suas componentes de frequência.

Uma das causas do desvanecimento temporal é o movimento físico dentro do canal, isto é, entidades móveis podem bloquear percursos do sinal e absorver parte da energia do sinal temporariamente, de forma a criar desvanecimentos momentâneos.

A outra causa do desvanecimento temporal é a natureza variante no tempo do canal, causado por mudanças nas características de propagação, resultante de mudanças na temperatura ambiente, mudanças na umidade relativa, fechamento e abertura de portas.

Finalmente, o desvanecimento seletivo em frequência é caracterizado como uma variação da intensidade do sinal em função da frequência, também conhecido como desvanecimento de faixa larga.

A principal causa do desvanecimento seletivo em frequência é a propagação em multipercurso. Em certas frequências, a combinação dos sinais em percursos múltiplos provoca a redução do sinal recebido, para sinais defasados, ou sua elevação, no caso de sinais em fase

3.4 Modelo de canais móveis

Um modelo apropriado para o canal deve levar em conta os três efeitos de desvanecimento. Os fatores que influenciam o desvanecimento são normalmente a propagação multipercurso; a velocidade (relativa) dos terminais móveis; a velocidade de objetos do ambiente eletromagnético do canal; e a largura de banda do sinal transmitido.

Modelo de dois raios

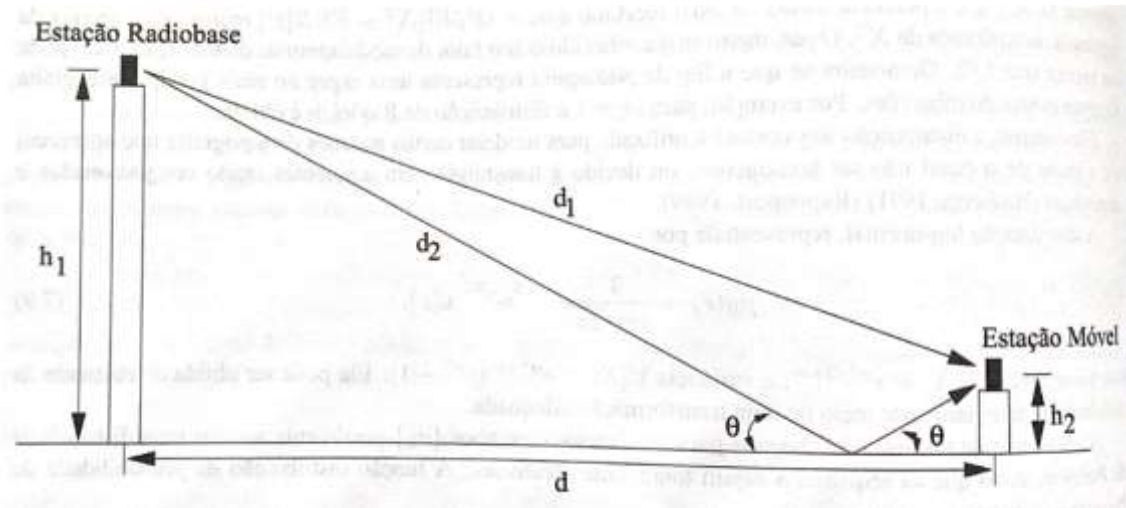


Figura 5 – Modelo de dois raios

Pode-se definir matematicamente a potência recebida, aplicando-se o modelo de dois raios, pela aplicação da fórmula

$$P_r = P_o \cdot \left(\frac{h_1 \cdot h_2}{d^2} \right)^2$$

Modelo de dois raios com seletividade de frequência

O modelo admite o ruído aditivo. Supõe-se funções de atenuação, α e β , que têm um efeito multiplicativo no sinal direto e refletido, respectivamente. O efeito líquido do multipercurso é introduzir o desvanecimento seletivo em frequência no sinal transmitido. O atraso no tempo σ para o sinal refletido é considerado constante.

O sinal recebido é dado por

$$r(t) = \alpha(t) \cdot s(t) + \beta(t) s(t - \sigma) + n(t)$$

Três casos importantes são considerados: no primeiro caso, as funções de atenuação são consideradas independentes do tempo; no segundo caso, elas são consideradas variantes no tempo, mas determinísticas; finalmente, considera-se que as duas funções têm natureza aleatória.

No caso de funções de atenuação constante, o módulo ao quadrado da função de transferência do canal pode ser obtido diretamente da equação

$$|H(w)|^2 = \alpha^2 + \beta^2 + 2. \alpha. \beta. \cos (w\sigma)$$

Os desvanecimentos temporal e de seletividade de frequência estão relacionados mais intensamente com as flutuações rápidas do canal relacionadas com o deslocamento entre transmissor e receptor, por esse motivo chamado de desvanecimento rápido.

A resposta em frequência de um canal variante no tempo é denotada por $H(w,t)$ e obtida por meio da transformada de Fourier da resposta ao impulso em relação à variável τ , $h(\tau, t)$.

3.5 Efeito Doppler

O efeito Doppler é um fenômeno que ocorre quando há uma variação na frequência percebida de uma onda devido ao movimento relativo entre a fonte da onda e o observador. Faz com que a frequência da portadora não seja idêntica na recepção, em virtude do desvio provocado pelo movimento relativo entre o transmissor e o receptor. Afeta a recepção do sinal de sincronização.

Em comunicações móveis, o efeito Doppler é particularmente importante, pois os dispositivos (transmissores e receptores) estão frequentemente em movimento.

Parâmetros Relevantes no Efeito Doppler

Banda Passante de Correlação (w_c). A banda passante de correlação é a faixa de frequências dentro da qual os componentes espectrais de um sinal sofrem variações similares devido ao efeito Doppler. Se os sinais transmitidos têm uma banda menor do que a banda passante de correlação, então todos os componentes espectrais sofrem variações similares. Este parâmetro é essencial para analisar a integridade do sinal transmitido sob a influência do efeito Doppler.

Espalhamento de Atraso (σ_{RMS}). O espalhamento de atraso é uma medida da dispersão do tempo de chegada dos diferentes componentes do sinal devido às múltiplas reflexões no ambiente. Ele está inversamente relacionado à banda passante de correlação, dado por:

$$\sigma_{RMS} = \frac{1}{w_c}$$

Tempo de Coerência (t_c). O tempo de coerência é o intervalo de tempo durante o qual o canal pode ser considerado constante. Em termos de banda Doppler, é dado por:

$$t_c \sim \frac{1}{f_D}$$

Este parâmetro quantifica a dispersão temporal e é crucial para entender a interferência entre os múltiplos caminhos que o sinal pode seguir.

Um tempo de coerência maior implica que o canal muda mais lentamente, o que é benéfico para a comunicação, pois reduz a necessidade de equalização frequente.

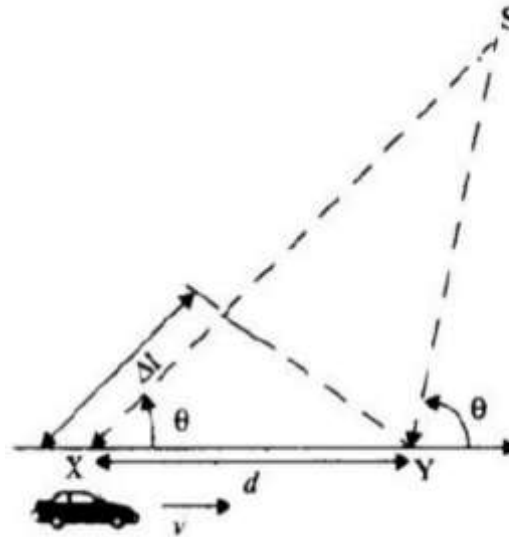


Figura 6 – Frequência Doppler

Frequência ou Banda Doppler (fD)

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos\theta$$

, onde v é a velocidade relativa entre a fonte e o receptor; λ é o comprimento de onda da portadora; e θ é o ângulo entre a direção do movimento e a linha de visada.

O efeito Doppler pode causar distorção significativa no sinal recebido em comunicações móveis. Ele pode levar a variações na frequência do sinal, o que pode resultar em deslocamento de frequência ou alargamento espectral. Esses efeitos podem degradar a qualidade do sinal e causar erros na recepção.

Quando um veículo se move em direção à torre de celular, a frequência do sinal recebido aumenta. Quando o veículo se afasta, a frequência diminui. Esse deslocamento pode levar a problemas de sincronização de frequência.

Em ambientes urbanos com muitos reflexos, diferentes trajetórias podem causar múltiplos deslocamentos de frequência, resultando em um alargamento do espectro do sinal recebido. Esse efeito pode dificultar a demodulação e aumentar a taxa de erro de bit (BER).

Para mitigar os efeitos Doppler em sistemas de comunicação, diversas técnicas podem ser empregadas. Equalizadores adaptativos podem ajustar continuamente os parâmetros de filtragem para compensar as variações do canal causadas pelo efeito Doppler. Utilizando múltiplas antenas (MIMO), os sinais podem ser combinados de forma a minimizar os efeitos negativos do desvanecimento Doppler. Modulações mais robustas, como QAM com maior ordem, podem ser usadas para melhorar a resistência às variações de frequência.