

Redes sem Fio

Tecnologia em Redes de Computadores
Prof. Macêdo Firmino

Aula 07

Propagação: Espaço Livre e Ambientes Fechados

“Todos os caminhos inadequados que tomamos ao longo da vida são parte essencial de nossa educação.”
(Hammed)



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
RIO GRANDE DO NORTE

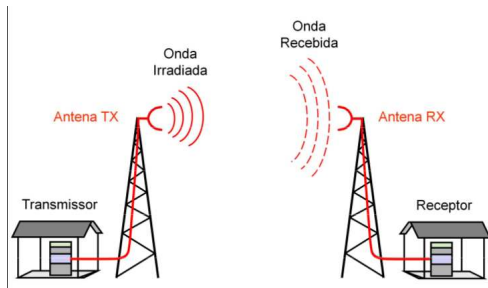
O que Aprenderemos?

- Compreender os conceitos de propagação eletromagnética em espaço livre.
- Identificar os principais fatores que afetam a propagação da onda eletromagnética.
- Calcular a potência recebida por uma antena na propagação em espaço livre (Equação de Friis);
- Determinar se um enlace pode ser enquadrado em espaço livre (Zonas de Fresnel);
- Descobrir o valor das perdas do sinal na propagação em ambientes fechados.



Propagação do Sinal Eletromagnético

Vimos como as ondas eletromagnéticas são geradas, o espectro eletromagnético e como as antenas colocam estas ondas eletromagnéticas no espaço. Agora iremos conhecer como se dá o processo pelo qual as ondas eletromagnéticas se movem ou se espalham pelo espaço, chamado de propagação do sinal eletromagnético.



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
RIO GRANDE DO NORTE

Propagação do Sinal Eletromagnético

A propagação depende de vários fatores, como a frequência da onda, a distância percorrida, as características do ambiente (como obstruções e condições atmosféricas) e a potência do sinal transmitido. A compreensão desses fatores é essencial para projetar sistemas de comunicação eficientes e confiáveis.

Propagação do Sinal Eletromagnético

A propagação do sinal eletromagnético pode ocorrer:

- Em espaço livre: ocorre em ambientes abertos, sem obstruções significativas entre o transmissor e o receptor. É amplamente utilizada em comunicações de longa distância, como em transmissões de rádio, televisão e comunicações via satélite.
- Em ambientes fechados: ocorre em ambientes onde o sinal pode ser refletido, refratado ou difratado por objetos e obstáculos presentes no ambiente. A propagação em ambientes fechados pode resultar em múltiplos caminhos de propagação, o que pode causar interferências e desvanecimentos do sinal. É comumente encontrada em comunicações sem fio internas, como em redes Wi-Fi, Bluetooth e sistemas de comunicação celular em ambientes urbanos.

Modelo de Propagação no Espaço Livre

O modelo de espaço livre descreve como a potência de um sinal eletromagnético se atenua ao se propagar em linha reta, sem obstáculos, em um ambiente ideal (espaço livre). É o modelo mais simples e serve de base para entender a perda de sinal com a distância e a frequência. Condições atmosféricas como chuva, neve, neblina e radiação solar são desprezadas na fórmula mas podem causar atenuação e distorção do sinal, especialmente em frequências mais altas.



Modelo de Propagação no Espaço Livre

A perda de caminho (path loss) no espaço livre é dada por:

$$L_p(dB) = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)$$

onde: d e λ são, respectivamente, distância em metros do transmissor e receptor e comprimento de onda em metros.

As perdas:

- Aumenta com a distância: quanto mais longe do transmissor, maior a perda.
- Aumenta com a frequência (diminuir o comprimento de onda): sinais em frequências mais altas (ex: 5 GHz) sofrem maior perda que em frequências menores (ex: 900 MHz).

Modelo de Propagação no Espaço Livre

A Equação de Friis expressa a potência recebida em função da potência transmitida, considerando os ganhos das antenas e a perda de caminho em espaço livre. Na forma logarítmica (em dB), ela é escrita como:

$$P_R(dB) = P_T(dB) + G_R(dB) + G_T(dB) - L_P(dB)$$
$$L_P(dB) = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)$$

onde: P_R , P_T , G_T , G_R , d , λ e L são, respectivamente, potência recebida, potência de transmissão, ganho da antena transmissora, ganho da antena receptora, distância em metros do transmissor e receptor e comprimento de onda em metros.

Exercício

01. Se um transmissor produz $50W$ de potência aplicados a antenas de ganho unitário (G_T e $G_R = 1$) com frequência de portadora de 900 MHz, responda:

- a) Expresse a potência de transmissão em dBm;
- b) Ache a potência recebida em dBm a uma distância de 100 m;
- c) Considerando a sensibilidade do receptor de -70 dBm o enlace terá sucesso?



Exercício

a) Expresse a potência de transmissão em dBm;

$$\begin{aligned}P_T &= 50W = 50 * 10^3 mW \\P_T(dBm) &= 10\log P_{mW} \\P_T(dBm) &= 10\log(50 * 10^3) \\P_T(dBm) &= 47dBm\end{aligned}$$



Exercício

b) Ache a potência recebida em dBm a uma distância de 100 m; $P_T(\text{dB}) = 47 \text{ dBm}$, $G_T = G_R = 1$, $d = 100\text{m}$, $f = 900\text{MHz}$, $c = 3 * 10^8 \text{ m/s}$ (velocidade da luz no vácuo).

- Encontrando o comprimento de onda (λ):

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{900 * 10^6}$$

$$\lambda = \frac{1}{3} = 0,33$$

- Encontrando a perda no espaço livre:

$$L_p(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)$$

$$L_p(\text{dB}) = 20 \log\left(\frac{4 * 3,14 * 100}{0,33}\right)$$

$$L_p(\text{dB}) = 71,6 \text{ dB}$$



Exercício

b) Ache a potência recebida em dBm a uma distância de 100 m; $P_T(dB) = 47$ dBm, $G_T = G_R = 1$, $d = 100$ m, $f = 900$ MHz, $c = 3 * 10^8$ m/s (velocidade da luz no vácuo).

$$P_R(dB) = P_T(dB) + G_R(dB) + G_T(dB) - L_P(dB)$$

$$P_R(dB) = 47 + 1 + 1 - 71,6$$

$$P_R(dB) = -22,6dBm.$$

Exercício

c) Considerando a sensibilidade do receptor de -70 dBm o enlace terá sucesso?

$$P_R(\text{dBm}) = -22,6 \text{ dBm}$$

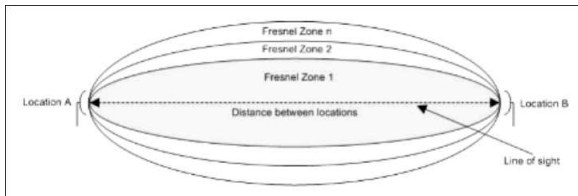
$$S_R(\text{dbm}) = -70 \text{ dBm}$$

Como a sensibilidade é de -70 dBm , ou seja, chegando um sinal com potência de até -70 dBm , o receptor conseguirá processar. E como a potência recebida é de $-22,6 \text{ dBm}$, o enlace terá sucesso.

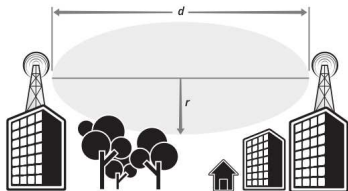


Modelo de Propagação no Espaço Livre

Mas como devermos lidar com espaço livre? Para isso, foi criada região elipsoidal em torno da linha de visão direta entre um transmissor e um receptor, chamadas de zona de Fresnel. Existem várias zonas de Fresnel, mas consideramos somente a primeira zona que representa 95% do sinal. A existência de obstáculos nesta zona poderá resultar em difrações, atenuações e reflexões e inviabilizar a transmissão.



É fortemente recomendado que, a primeira zona de Fresnel esteja livre de obstruções para garantir uma comunicação sem fio eficiente. Entretanto, estando 80% desobstruída já é possível ocorrer a comunicação. Portanto, ao projetar sistemas de comunicação sem fio, é importante considerar a altura das antenas transmissoras e receptoras e garantir que a zona de Fresnel esteja livre de obstruções, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas.



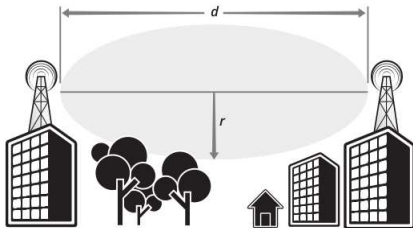
Modelo de Propagação no Espaço Livre



Equação de Fresnel: para determinarmos se existem obstáculos entre o transmissor e receptor na primeira zona de Fresnel devemos determinar o seu raio máximo (r) ocorre no meio do percurso, que é dado pela fórmula:

$$r_{max} = 8,657 \sqrt{\frac{d}{f}}$$

onde: r é o raio máxima da primeira zona (em metros) d é a distância entre o transmissor e receptor (em km) e f é a frequência transmitida (em GHz).



Exercício

02. Considere um enlace de 2,4 GHz, com o transmissor e receptor distantes em 2 Km. A linha de visada está a uma altura de 50 metros do solo. Durante o percurso temos apenas um obstáculo que é uma montanha com uma altura de 30 metros referente ao solo. Será que o enlace irá funcionar satisfatoriamente (com mínima perda de pacotes)?



Exercício

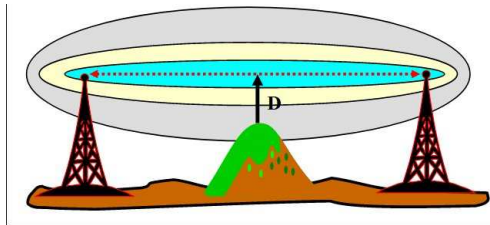
02. Considere um enlace de 2,4 GHz, com o transmissor e receptor distantes em 2 Km. A linha de visada está a uma altura de 50 metros do solo. Durante o percurso temos apenas um obstáculo que é uma montanha com uma altura de 30 metros referente ao solo. Será que o enlace irá funcionar satisfatoriamente (com mínima perda de pacotes)?

$$r = 8,657 \sqrt{\frac{2}{2,4}}$$

$$r = 7,90m$$



Exercício



Como distância entre a linha de visada e o apartamento é de $(50 - 30 = 20$ metros), como o raio máximo é de 7,9 metros, a montanha não entra no raio da primeira zona de Fresnel e o enlace irá ocorrer com a mínima perda de pacotes.

Propagação em Ambientes Fechados

Nos ambientes fechados, como escritórios ou residências, a propagação do sinal eletromagnético é muito mais complexa do que em espaço livre. Isso ocorre porque o sinal encontra múltiplos obstáculos e superfícies que causam:

- Reflexão;
- Difração;
- Espalhamento (scattering);
- Atenuação por paredes e objetos.



Propagação em Ambientes Fechados

Em ambientes fechados não temos ainda uma fórmula matemática que descreve esse fenômeno. Uma simplificação seria se considerarmos apenas a perda de propagação em espaço livre mais as perdas causadas pelas paredes e pisos.

$$L(dB) = L_p(dB) + \sum_{p=1}^p WAF(p) + \sum_{q=1}^q FAF(p)$$

$$L_p(dB) = 20 \log\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)$$

onde: $L(dB)$ é a perda por propagação em ambientes fechados, r é a distância entre transmissor e receptor, $WAF(p)$ é o fator de atenuação devido à parede, $FAF(q)$ é o fator de atenuação devido ao piso, p e q representam a quantidade de paredes e pisos que separam o transmissor e receptor, respectivamente, e λ é o comprimento de onda.

Propagação em Ambientes Fechados

Obstáculo	Perda adicional [dB]
Espaço Livre	0
Janela (tinta não metálica)	3
Janela (tinta metálica)	5 a 8
Parede fina (madeira)	5 a 8
Parede média (madeira)	10
Parede espessa (espessura aprox. 15 cm)	15 a 20
Parede muito espessa (espessura aprox. 30 cm)	20 a 25
Piso/Teto espesso	15 a 20
Piso/Teto muito espesso	20 a 25

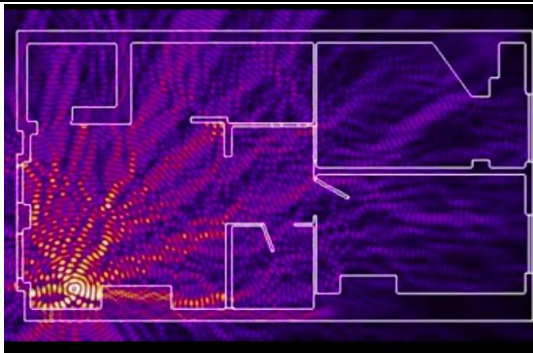
Tabela 2 – Perdas de penetração em obstáculos em 2,4 GHz



Para entendermos a propagação em ambientes fechados precisamos entender o comportamento das ondas ao se propagarem em ambiente fechado.

São efeitos de propagação nas ondas eletromagnéticas:

- Atenuação;
- Reflexão;
- Refração;
- Difração;
- Interferência.



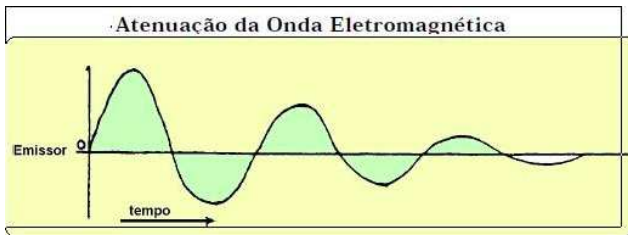
Wifi Solver (Android)



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
RIO GRANDE DO NORTE

Atenuação

A propagação de ondas através de qualquer meio, diferente do vácuo, é sempre acompanhada de perdas causadas pela absorção de potência pelas partículas do meio. A atenuação corresponde a esta absorção (diminuição) da energia em função do meio de propagação. Isso pode resultar em perda de sinal ou na diminuição da qualidade da transmissão.



Atenuação

O quanto de energia irá ser perdida depende da:

- Frequência, a absorção aumenta com o aumento da frequência;
- Tipo de superfície (material que a compõe): metais, água e moléculas de oxigênio absorvem bastante potência do sinal.

Curiosidade: uma maneira de saber o quanto um determinado material absorve de energia eletromagnéticas, basta coloca-lo dentro de um forno de microondas. Caso o material esquente, isto significa que ele absorveu energia eletromagnética.



Atenuação - Exemplos

Para transmissão em microondas, os dois principais materiais absorventes são:

- Metal: elétrons podem mover-se livremente em metais, sendo prontamente capazes de oscilar e absorver a energia de uma onda que passe por eles.
- Água: microondas fazem com que as moléculas de água agitem-se, tomando parte da energia da onda.

Atenuação em 2,4GHz

- Chuva torrencial: 0,05 dB/km
- Neblina: 0,02 dB/km

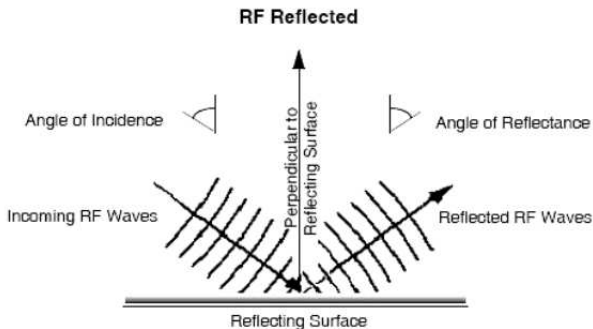
Atenuação em 5GHz

- Chuva torrencial: 0,5 dB/km
- Neblina: 0,07 dB/km



Reflexão

A reflexão de ondas eletromagnéticas ocorre quando uma onda encontra uma superfície que não pode atravessar completamente, como uma parede ou um espelho. Nesse encontro, parte da energia da onda é refletida de volta para o meio original, enquanto outra parte pode ser absorvida pela superfície.



Reflexão

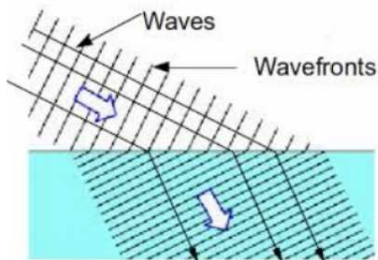
A reflexão depende da frequência:

- Nas baixas e médias frequências: as ondas são muito menos refletidas e as reflexões podem ser desprezadas;
- Nas altas frequências: a reflexão elas se tornam importantes, sendo o fenômeno, por vezes, aproveitado como base de sistemas eletrônicos, como o radar.

A reflexão pode ser usada para direcionar sinais de comunicação, como em antenas parabólicas, ou para melhorar a cobertura de sinal em ambientes urbanos, onde edifícios podem refletir e redirecionar ondas de rádio. Entretanto, a reflexão também poderá resultar em interferência e distorção do sinal.

Refração

Refração é o desvio de uma onda eletromagnética sempre que uma frente de onda se propaga por um meio onde ocorre uma variação de densidade, haverá uma variação da velocidade fazendo as ondas desviarem sua trajetória. Por exemplo, quando a luz passa do ar para outro meio, como água ou vidro, ela fica mais lenta. A refração modifica a velocidade de propagação e o comprimento de onda, entretanto, a frequência não se altera.



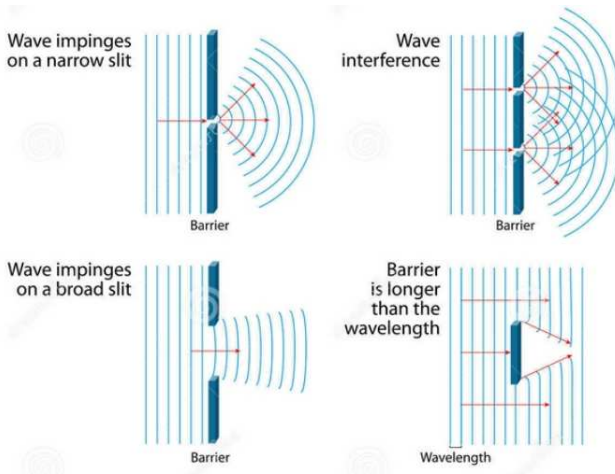
Difração

A difração é a mudança da direção da onda quando a mesma passa junto a um obstáculo, ou seja, quando uma onda se propaga em direção uma barreira contendo aberturas, a onda tende a contornar obstáculos à sua frente.

A facilidade de difração é inversamente proporcional à frequência, sendo maior nas frequências muito baixas.



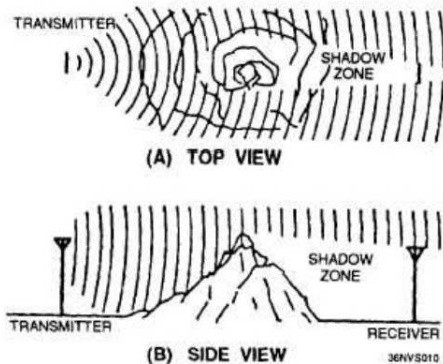
Difração



<https://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-interference>

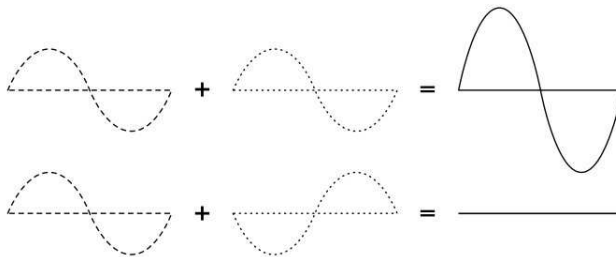
Difração

Este princípio explica o fato das ondas eletromagnética transporem colinas e contornarem construções para prover comunicação.



Interferência

Quando duas ondas eletromagnéticas se encontram, podem ocorrer fenômenos de interferência. Dependendo da fase das ondas, a interferência pode ser construtiva, resultando em um aumento na amplitude do sinal, ou destrutiva, resultando em uma diminuição da amplitude.



Resumo

Quando uma onda eletromagnética encontra um obstáculo, como uma superfície com densidade diferente, ela pode se comportar de várias maneiras. Parte da energia da onda é refletida de volta, parte é absorvida pela superfície e uma porção pode penetrar na superfície, refratando-se e propagando-se no segundo meio. Esse fenômeno é conhecido como reflexão, absorção e refração, respectivamente.

Outro fenômeno interessante é a difração, que ocorre quando uma onda muda de direção ao passar perto de um obstáculo. Isso pode resultar em curvas na propagação da onda, permitindo que ela contorne obstáculos e alcance áreas que não seriam diretamente visíveis.

Dúvidas



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
RIO GRANDE DO NORTE