

## 2. Canal de rádio propagação móvel

Em um sistema de comunicações móveis sem fio, o sinal transmitido sofre atenuação com a distância e desvanecimentos que variam de acordo com as características do canal.

O sinal banda passante recebido em um dado instante de tempo ( $s(t)$ ) é composto por dois termos, sendo um deles referente à fase do sinal ( $e^{j2\pi f_c(t)}$ ) e o outro, ao envelope ( $r(t)$ ) do mesmo, como mostra a Equação 2.1.

$$s(t) = \Re\{r(t) (e^{j2\pi f_c(t)})\} \quad \text{Equação 2.1}$$

O envelope do sinal recebido é composto pelo produto das componentes do sinal afetadas pelos desvanecimentos em pequena e larga escala, como mostra a Equação 2.2.

$$r(t) = m(t)r_0(t) \quad \text{Equação 2.2}$$

onde  $m(t)$  representa o desvanecimento em larga escala e  $r_0(t)$  representa as componentes do sinal sobre o efeito do desvanecimento em pequena escala.

O sinal complexo banda estreita pode ser expresso pela Equação 2.3:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta) \quad \text{Equação 2.3}$$

onde se tem: amplitude ( $A$ ), frequência central ( $f_c$ ) e fase ( $\theta$ ) do sinal.

O envelope do sinal também pode ser expresso em função das suas componentes em fase ( $I$ ) e quadratura ( $Q$ ) e estas podem ser representadas tanto em coordenadas polares quanto cartesianas, sendo esta última mais utilizada na literatura. Na Figura 2.1, essas componentes são visualizadas em coordenada polar. A distância entre o ponto e a origem

representa a magnitude (amplitude) do sinal. Por outro lado, o ângulo a partir do eixo horizontal representa a fase do sinal.

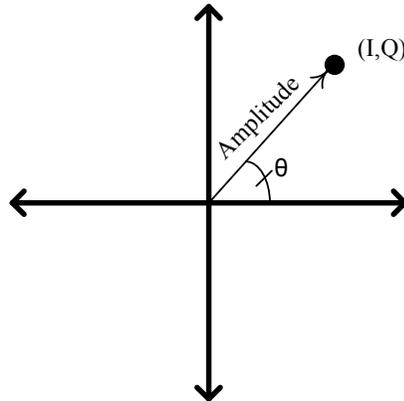


Figura 2.1: Componentes em fase e quadratura em coordenadas polares.

Aplicando as regras da trigonometria na Figura 2.1, pode-se concluir que a amplitude ( $r$ ) e a fase ( $\theta$ ) do sinal podem ser representadas pelas Equação 2.4 e Equação 2.5, respectivamente.

$$r = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad \text{Equação 2.4}$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{Q}{I} \quad \text{Equação 2.5}$$

Equivalentemente, I e Q podem ser expressas em coordenadas cartesianas, como mostra a Figura 2.2

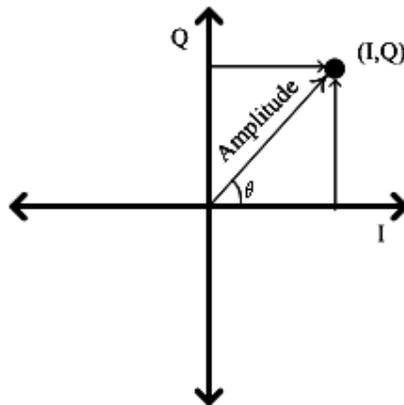


Figura 2.2: Componentes em fase e quadratura em coordenadas cartesianas e polar.

Utilizando a trigonometria aplicada à Figura 2.2, tem-se a Equação 2.6:

$$\begin{aligned} I &= A \cdot \cos(\theta) \\ Q &= A \cdot \text{sen}(\theta) \end{aligned} \quad \text{Equação 2.6}$$

Manipulando a Equação 2.3 pode-se escrevê-la como mostra a Equação 2.7 e, finalmente, aplicando a Equação 2.6 na Equação 2.7, obtém-se a envoltória do sinal complexo em função das componentes em fase e quadratura do sinal, Equação 2.8

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t) \cos(\theta) - A \cdot \text{sen}(2\pi f_c t) \text{sen}(\theta) \quad \text{Equação 2.7}$$

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \text{sen}(2\pi f_c t) \quad \text{Equação 2.8}$$

As variáveis aleatórias I e Q são gaussianas de média zero ( $m = 0$ ) e variância  $\sigma$ .

A primeira seção deste capítulo abrange, de forma sucinta, a atenuação do sinal com a distância e foca nos desvanecimentos temporais que ocorrem no envelope do sinal recebido devido a efeitos provocados pela composição do canal de propagação. As seções seguintes tratam dos mecanismos de propagação e algumas características do canal, tal como largura de banda do sinal, banda de coerência do canal, perfil de retardo, tempo de coerência e espalhamento Doppler.

## 2.1.

### Atenuação com a distância, desvanecimento em pequena e larga escala

O comportamento típico de um sinal de comunicações móveis celulares é apresentado na Figura 2.3 [29].

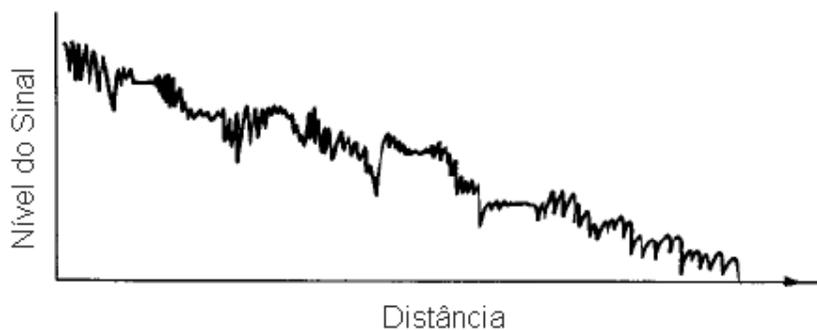


Figura 2.3. Típico sinal recebido por uma unidade móvel.

Na Figura 2.3, é possível distinguir dois comportamentos distintos do sinal, sendo eles: a flutuação rápida e profunda do nível do sinal e a variação mais suave e lenta. As flutuações rápidas do sinal são denominadas desvanecimento em pequena escala e são provenientes do efeito do multipercurso. À variação mais suave e lenta dá-se a denominação de

desvanecimento em larga escala, associada ao sombreamento causado por obstáculos. Aliada aos dois comportamentos do sinal há, ainda, naturalmente, a tendência de queda do nível, segundo algum expoente de atenuação com a distância, variante conforme o ambiente.

A forma mais simples de determinar a perda de propagação do sinal ao longo da distância é considerar o modelo de propagação no espaço livre, o qual admite a região entre o transmissor e o receptor como sendo desprovida de obstáculos que refletem ou absorvem parte da intensidade da onda de rádio frequência, bem como, admitir que a atmosfera é um meio uniforme perfeito que não absorve potência do sinal. A perda de propagação média no espaço livre ( $\bar{L}_p(d)$ ) é dada pela Equação 2.9:

$$\bar{L}_p(d) = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^n \quad \text{Equação 2.9}$$

onde,  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor,  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal transmitido e  $n$  é um valor que tem a função de caracterizar o ambiente de propagação, a frequência e a altura das antenas. Para a situação de propagação no espaço livre usa-se  $n = 2$ .

Assim como o modelo de propagação no espaço livre, vários outros modelos (analíticos, empíricos e semi-empíricos) de predição da atenuação com a distância foram propostos pela literatura.

Existem dois tipos de desvanecimentos que caracterizam o canal de rádio propagação móvel, sendo eles: desvanecimento em pequena escala (ou rápido) e desvanecimento em larga escala (ou lento).

O desvanecimento em larga escala, visto na Figura 2.4 □[30], representa a atenuação da potência média do sinal devida ao grande deslocamento do receptor, em torno de dezenas de comprimentos de onda. Este fenômeno é caracterizado pelo fato de o sinal recebido sofrer variações produzidas por alterações na morfologia do terreno (morros, colinas, encostas, árvores, etc) e por obstáculos criados pelo homem (prédios, casas, etc) ao longo do percurso entre o transmissor e o receptor. Nesta situação, diz-se que o receptor está em posição de sombreamento, devido aos obstáculos citados.

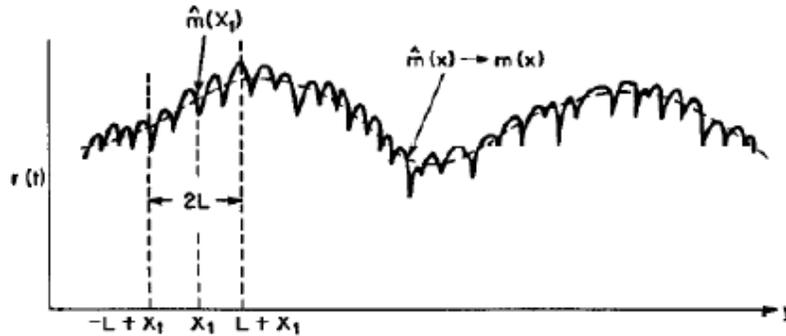


Figura 2.4: Desvanecimento em larga escala.

Não existe um modelo matemático satisfatório para descrever o desvanecimento em larga escala. Entretanto, campanhas de medições indicam que a perda de percurso média pode ser descrita (caracterizada) estatisticamente pela função densidade de probabilidade (pdf) log-normal com desvio padrão que varia de acordo com a frequência e o ambiente [49], ou, equivalentemente, sua magnitude em decibéis pode ser caracterizada pela função densidade de probabilidade Gaussiana.

O desvanecimento em pequena escala é caracterizado pelas flutuações rápidas e profundas do envelope do sinal em um curto período de tempo ou distância de propagação. Estas flutuações ocorrem devido à diferença de distância entre o transmissor e o receptor na ordem de um quarto de comprimento de onda, uma vez que esta pequena alteração da localização do receptor modifica a relação entre as fases das diversas componentes do sinal provenientes do multipercurso. Outros fatores no canal de rádio comunicação que influenciam o desvanecimento em pequena escala são: i) o deslocamento relativo entre o receptor e o transmissor; ii) velocidade de deslocamento do receptor; iii) largura de banda do canal. A Figura 2.5 [29] mostra um sinal que sofreu desvanecimento em pequena escala.

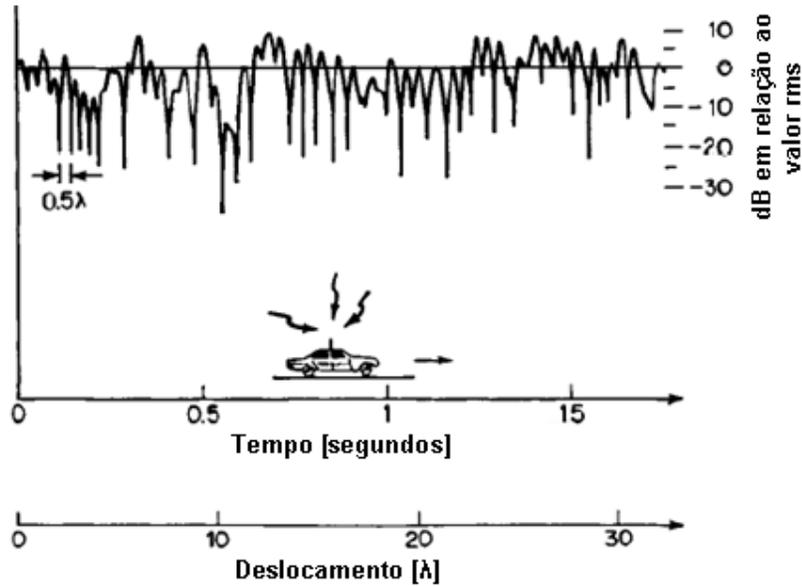


Figura 2.5: Desvanecimento em pequena escala.

O desvanecimento é, basicamente, um fenômeno espacial, que acarreta em variações temporais do envelope do sinal à medida que o receptor se move ao longo do ambiente de multipercursos [50, 52]. Mesmo que o receptor móvel esteja em estado estacionário, o sinal recebido sofrerá efeitos do desvanecimento, devido ao movimento dos objetos que o rodeiam.

O envelope do sinal resultante dos efeitos do desvanecimento em pequena escala pode ser descrito (caracterizado) estatisticamente pelas funções densidade de probabilidade (pdf) Rayleigh, Rice ou m-Nakagami. Sinais que são compostos apenas pelas componentes de múltiplos percursos do sinal transmitido possuem o comportamento do envelope oscilando de acordo com a distribuição Rayleigh. Por outro lado, os sinais recebidos, compostos não só pelas componentes de múltiplos percursos, mas também por uma componente em linha de visada (LOS - *line-of-sight*), são melhores descritos estatisticamente pela fdp de Rice ou m-Nakagami.

Considerando que o sinal afetado pelo desvanecimento em pequena escala possua sua amplitude caracterizada estatisticamente de acordo com a função densidade de probabilidade Rayleigh, é possível determinar a amplitude deste sinal ( $r_0(y)$ ) de posse das informações da estimativa da média local ( $\hat{m}(y)$ ) do sinal e do sinal recebido ( $r(y)$ ). Matematicamente,  $r_0(y)$  é expresso pela divisão do sinal recebido ( $r(y)$ ) pela estimativa da média local ( $\hat{m}(y)$ ), Equação 2.10.

$$r_0(y) = \frac{r(y)}{(\hat{m}(y))} \quad \text{Equação 2.10}$$

onde  $y$  é uma posição no espaço referente a um dado tempo  $t$ . O comportamento do sinal proveniente dos efeitos do desvanecimento em pequena escala pode ser adquirido pela subtração entre o sinal recebido e a estimativa da média local do sinal, Equação 2.11, uma vez que os parâmetros estejam em escala logarítmica.

$$r_0(y) = r(y) - (\hat{m}(y)) \quad \text{Equação 2.11}$$

## 2.2. Mecanismos de propagação

Os ambientes de propagação típicos são aqueles que abrangem pessoas e edificações, acarretando na impossibilidade da visada direta entre o transmissor e o receptor. Tal cenário proporciona, na prática, a possibilidade de o receptor detectar uma combinação de componentes do sinal provenientes de diversos mecanismos de propagação, tais quais, reflexão, difração, refração e espalhamento nas edificações existentes, caracterizando uma situação de multipercurso, ou seja, detecção da energia do sinal proveniente de direções distintas com diferentes atrasos temporais.

Ondas eletromagnéticas possuem certo comprimento. Uma vez que estas incidam sobre objetos muito maiores que seu comprimento de onda, ocorre atenuação da potência do sinal (partindo do pressuposto de que parte do sinal é capaz de atravessar o obstáculo) e há reflexão da onda em diversas direções, caracterizando o efeito da reflexão. Um exemplo é mostrado na Figura 2.6.

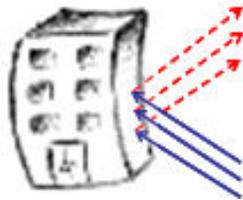


Figura 2.6: Reflexão.

O fenômeno da difração consiste na mudança de percurso do sinal, devida à incidência da onda eletromagnética na quina de um obstáculo ou em uma superfície irregular. A difração depende fortemente da frequência da onda transmitida, em razão da obstrução do elipsóide de Fresnel. Em sinais de alta frequência, a difração pode inviabilizar uma transmissão entre dois pontos. Entretanto, este efeito é muito útil para sinais de frequência mais baixa, como as

faixas de celulares e PCS, para fazer com que o sinal mude sua trajetória ao incidir sobre obstáculos e ter seu percurso ligeiramente alterado, conforme mostrado a Figura 2.7.



Figura 2.7: Difração.

O fenômeno do multipercurso tem efeitos distintos em sinais faixa estreita e banda larga. Na primeira situação, o multipercurso gera variações rápidas e profundas na amplitude e fase do sinal. Por outro lado, os efeitos do multipercurso no sinal banda larga é o de produzir réplicas atenuadas e retardadas do sinal transmitido.

### 2.3.

#### Características do canal de rádio propagação móvel

O canal de rádio propagação móvel é caracterizado pelos parâmetros de banda de coerência, perfil de retardo, espalhamento Doppler (Doppler Spread) e tempo de coerência. A natureza do sinal (faixa estreita ou banda larga) a ser transmitido é o fator determinante para a atuação destes fenômenos. Os sinais faixa estreita sofrem com os efeitos do espalhamento *Doppler* que acarreta em dispersão na frequência e seletividade no tempo (desvanecimento rápido). Por outro lado, os sinais de banda larga sofrem os efeitos do espalhamento de retardo do canal, que ocasiona dispersão no tempo e seletividade em frequência.

Os parâmetros banda de coerência e perfil de retardo descrevem a natureza de dispersão temporal do canal. Estes não oferecem informações sobre a variação do canal, no tempo, causada pelo deslocamento relativo entre o transmissor e o receptor. Os parâmetros que descrevem tal natureza (variação temporal) do canal são denominados espalhamento Doppler e tempo de coerência.

Nas seções subsequentes deste capítulo são detalhadas algumas informações dos parâmetros supracitados.

**2.3.1. Perfil de retardos (*Power delay profile*)**

As unidades de recepção de um sinal de rádio estão geralmente inseridas em um ambiente que gera multipercurso. Com isso, o sinal resultante recebido é composto por um conjunto de versões do sinal enviado, que possuem retardos entre si. Estes raios provenientes do multipercurso do sinal transmitido são visualizados por meio do perfil de retardos, mostrados na Figura 2.8 [49], onde é possível verificar a potência e o instante de chegada dos raios. Os parâmetros retardo médio ( $\bar{\tau}$ ), espalhamento de retardo ( $\sigma_{\tau}$ ), intervalo de retardo ( $I_p$ ) e janela de retardo ( $W_q$ ) são analisados a partir do perfil de retardos [49]. Estes parâmetros possuem o segundo como unidade de medida.

As características de dispersão temporal de um canal banda larga sujeito a multipercurso são, geralmente, quantificadas pelo retardo médio e espalhamento de retardos, mais conhecido como *delay spread*.

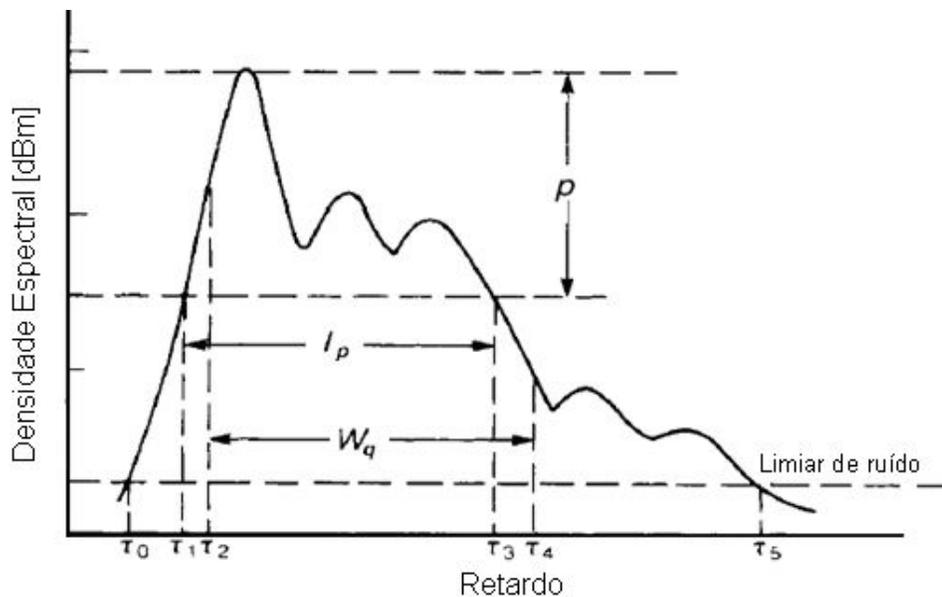


Figura 2.8: Perfil de retardos.

O retardo médio é definido pela média ponderada dos retardos, dado pela

**Equação 2.12**

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=0}^N \tau_i P(\tau_i)}{\sum_{i=0}^N P(\tau_i)} \tag{Equação 2.12}$$

O *delay spread* caracteriza o desvio padrão dos retardos. Matematicamente, é definido pela Equação 2.13.

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (\tau_i - \bar{\tau})^2 P(\tau_i)}{\sum_{i=0}^N P(\tau_i)}} \quad \text{Equação 2.13}$$

O parâmetro intervalo de retardo é o tempo entre o momento que o perfil de retardo cruza pela primeira vez um nível X dB abaixo do valor máximo e o momento em que cruza este nível pela última vez. Este parâmetro é ilustrado na Figura 2.8 e podemos equacioná-la da forma mostrada na Equação 2.14

$$I_p = (\tau_3 - \tau_1)_p \quad \text{Equação 2.14}$$

Por fim, a janela de retardo é definida pela duração do tempo em que a porção central do perfil de retardo contenha q% do total da energia.

Consequentemente,  $\frac{100\% - q\%}{2}$  está concentrado no início do perfil de retardo

e o mesmo valor no final do perfil. Com base na Figura 2.8, define-se a janela de retardo como a Equação 2.15.

$$W_q = (\tau_4 - \tau_2) \quad \text{Equação 2.15}$$

### 2.3.2. Banda de coerência

A largura de banda do canal pode ser quantizada pela banda de coerência. A banda de coerência é uma medida estatística que determina o intervalo de frequência em que o canal possui todas as suas componentes espectrais com amplitudes altamente correlacionadas. Nesta faixa de frequência, o canal pode ser considerado plano, isto é, com aproximadamente ganho constante e fase linear.

Se for considerada correlação entre frequências superior a 0,9, então a banda de coerência é estimada pela Equação 2.16 [51]:

$$B_{0,9} = \frac{1}{50\sigma_{\tau}} \quad \text{Equação 2.16}$$

onde,  $\sigma_{\tau}$  é o parâmetro espalhamento de retardos (*delay spread*).

Por outro lado, considerando a correlação entre frequências superior, apenas, a 0,5 tem-se que a banda de coerência é estimada pela Equação 2.17 [51]:

$$B_{0,5} = \frac{1}{5\sigma_{\tau}} \quad \text{Equação 2.17}$$

Ambas as equações Equação 2.16 e Equação 2.17 são de natureza empírica, não havendo um rigor matemático para obtenção destas equações.

Caso o sinal transmitido tenha largura de banda menor do que a banda de coerência do canal, a amplitude do mesmo muda rapidamente, mas o sinal não sofre distorção no tempo. A banda de coerência descreve a dispersão temporal do canal em uma área local. O sinal banda larga sofre o efeito de seletividade em frequência.

De acordo com a relação entre a largura de banda do sinal transmitido e a banda de coerência, o sinal transmitido pode ser classificado como banda larga ou banda estreita. Quando a largura do sinal é menor que a banda de coerência do canal ( $B_S < B_{coer}$ ), tem-se um sinal banda estreita, caso contrário ( $B_S > B_{coer}$ ), o sinal é classificado como banda larga.

### 2.3.3. Espalhamento Doppler

Desvio Doppler é um fenômeno que caracteriza o desvio de frequência, positivo ou negativo, devido ao movimento relativo entre o transmissor e o receptor.

Uma componente do sinal transmitido sofre um desvio de frequência ( $f_d$ ) dado por:

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cdot \cos \theta \quad \text{Equação 2.18}$$

onde:

$\lambda$  é o comprimento de onda da portadora;

$v$  é a velocidade relativa entre o transmissor e o receptor;

$\beta$  é o ângulo gerado entre a direção do movimento do móvel e a direção de chegada da onda eletromagnética.

A Figura 2.9 retrata os parâmetros utilizados na Equação 2.18.

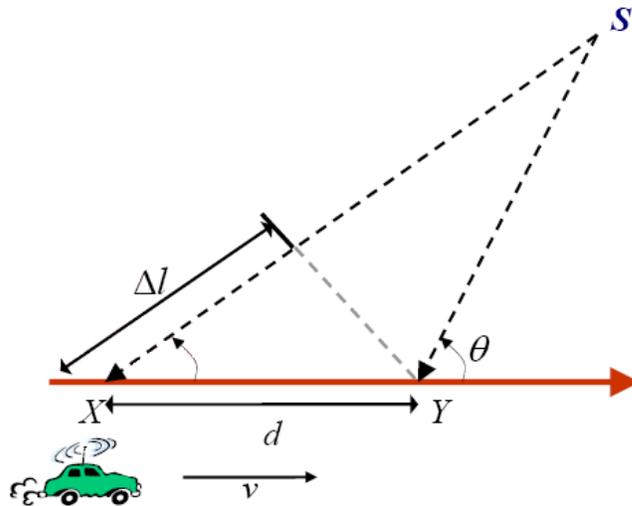


Figura 2.9: Efeito Doppler.

O desvio Doppler pode ser positivo, caso o sinal esteja chegando pela frente do receptor, ou negativo, caso o receptor esteja se afastando da direção de chegada do sinal. Esta característica é facilmente percebida pela presença do cosseno na Equação 2.18.

As diversas componentes de multipercurso, provenientes de diferentes direções, contribuem com determinado desvio Doppler de tal forma que o espectro de frequência do sinal recebido sofre um espalhamento (espalhamento Doppler), logo, aumentando a largura de banda do mesmo.

O espalhamento Doppler,  $\sigma_{f_d}$ , é definido como desvio padrão da variável aleatória desvio Doppler.

As diversas componentes em frequência de um sinal são submetidas a diferentes deslocamentos Doppler. Entretanto, ao considerar um sinal com largura de banda estreita, pode-se assumir que todas as frequências são afetadas da mesma forma [49]. Sinais de transmissão em banda estreita são degradados pelo fenômeno de espalhamento *Doppler* que acarreta em dispersão no domínio da frequência e seletividade no domínio do tempo.

#### 2.3.4. Tempo de coerência

O parâmetro Tempo de Coerência ( $T_c$ ) é definido pelo tempo em que a resposta impulsiva do canal é essencialmente invariante e caracteriza a variação temporal do canal no domínio do tempo. Esta definição implica que dois sinais que incidem no receptor com separação maior que o tempo de coerência são

afetados de forma diferente pelo canal de comunicação, bem como sinais com intervalo de tempo de chegada menor que  $T_C$  possuem alta probabilidade de apresentarem amplitudes correlacionadas. Matematicamente, o tempo de coerência é definido pela Equação 2.19.

$$T_C = \frac{1}{5 \cdot \sigma_{f_d}} \quad \text{Equação 2.19}$$

onde,  $\sigma_{f_d}$  é o espalhamento Doppler.