

4

Sistemas MIMO, Multiple Input Multiple Output

Como já foi dito no primeiro capítulo, um sistema MIMO corresponde a um conjunto de antenas na transmissão e na recepção, caracterizando um sistema que utiliza diversidade espacial [19]. Com isso, um canal MIMO é o meio por onde se propaga a informação transmitida por este conjunto de antenas.

As propriedades espaciais dos canais de comunicação sem fio são muito importantes na determinação do desempenho de sistemas utilizando conjunto de antenas.

Neste capítulo, serão apresentados vários modelos que foram desenvolvidos para caracterizar determinados aspectos dos canais que estão diretamente ligados ao processamento espacial dos receptores e usados para diferentes aplicações [13],[14]. Alguns modelos apresentam informação sobre uma única característica do canal, como, por exemplo, o espalhamento angular, enquanto outros tentam determinar todas as propriedades do canal. Também será apresentado o cálculo da capacidade dos sistemas MIMO.

Os modelos clássicos de canal apresentam informações sobre a distribuição dos níveis de potência do sinal e do deslocamento Doppler na frequência dos sinais recebidos. Muitos modelos espaciais atuais se baseiam nos princípios fundamentais dos modelos clássicos. Entretanto, esses modelos incorporam conceitos adicionais como atraso no tempo devido ao espalhamento, ângulo de chegada (*Angle-Of-Arrival*) e geometrias adaptativas para os conjuntos de antenas.

As teorias de diversidade espacial, com base na perspectiva vista pelo móvel e pela estação base, foram introduzidas pelos modelos clássicos. Tais modelos levavam em consideração apenas a amplitude, que é variante no tempo, e a fase do canal. Eles foram melhorados adicionando a informação sobre o atraso no tempo devido ao espalhamento do sinal, a qual é muito importante para a análise de sistemas de comunicação sem fio com modulação digital.

Atualmente, com a introdução de técnicas que dependem da distribuição dos receptores móveis, informações temporais e espaciais tornaram-se importantes para um modelo eficiente do canal de transmissão.

As diferenças existentes entre a estação móvel e a estação base também são importantes. Os modelos clássicos demonstraram que a geometria dos obstáculos espalhadores na vizinhança da antena a ser estudada deve ser levada em consideração. O número e a localização destes obstáculos dependem das alturas das antenas utilizadas e do ambiente onde se realiza o estudo.

4.1. Modelos de Canais Espaço-Temporais em Sistemas MIMO

Em um sistema de comunicação rádio, o fenômeno de multipercursos pode limitar o desempenho de sistemas de faixa estreita, provocando desvanecimentos no sinal recebido, e de sistemas de banda larga, provocando interferência entre símbolos.

Em sistemas MIMO é muito importante caracterizar a distribuição angular (ou espacial) das componentes de multipercursos, para assim determinar o desempenho do enlace rádio, já que tais sistemas exploram esta diversidade de componentes.

Todos os modelos descritos abaixo variam na maneira adotada para distribuir os espalhadores pelo ambiente. A matriz de transferência H do canal MIMO, que será descrita após a apresentação dos modelos, é a mesma para todos os modelos, variando somente sua maneira de obtenção.

4.1.1. Modelo de Lee.

No modelo de Lee [13,14], os obstáculos estão uniformemente distribuídos em um anel circular ao redor do móvel, como mostra a figura 4.1 abaixo.

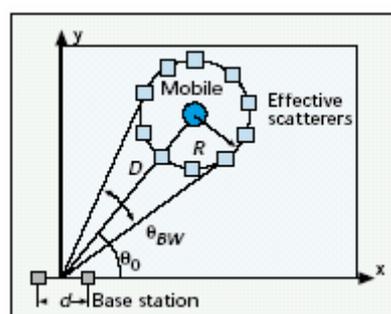


Figura 4.1: Modelo de Lee (reproduzida da referência [14]).

Cada um dos obstáculos representa o efeito de vários outros dentro da mesma região. Por isso, os obstáculos pertencentes ao anel são chamados de obstáculos efetivos.

O modelo foi desenvolvido para prever com eficiência a correlação entre os sinais recebidos por duas antenas em função do espaçamento entre elas. Como a matriz de correlação de um conjunto de antenas pode ser determinada a partir da correlação entre qualquer par de elementos deste conjunto, o modelo possui aplicação para um conjunto de antenas com qualquer número de elementos [13,14].

O nível de correlação determinará o desempenho do sistema. Em geral, quanto maior o espalhamento angular, menor será a correlação entre os elementos do conjunto, o que acarreta em um ganho de diversidade.

4.1.2.

Modelo de Stapleton *et al.* , extensão do modelo de Lee.

O modelo original de Lee apresenta informação somente sobre a correlação entre os sinais recebidos por antenas diferentes. Motivado pela necessidade de se considerar o desvanecimento de pequena escala em sistemas com conjunto de antenas, Stapleton *et al.* [13,14] propuseram uma extensão do modelo de Lee [13,14] que leva em consideração o deslocamento Doppler, impondo uma velocidade angular ao anel de obstáculos.

Quando usado para obter informações sobre DOA (*Direction Of Arrival*) e TOA (*Time Of Arrival*), tal modelo não se mostrou consistente com medidas realizadas. Por isso, continua sendo um bom modelo somente para indicar a matriz de correlação entre os elementos do conjunto de antenas.

Logo, o modelo de Stapleton *et al.* só acrescenta a informação sobre o deslocamento Doppler, continuando ambos os modelos a serem bons somente para prever a correlação entre os elementos do conjunto de antenas.

4.1.3.

Modelo de Distribuição Discreta Uniforme

É um modelo semelhante ao modelo de Lee [13,14], onde N obstáculos são uniformemente espalhados sobre um arco de círculo, cujo raio é igual à distância entre o arco e o conjunto de antenas orientado em relação ao móvel como mostra a figura 4.2 abaixo:

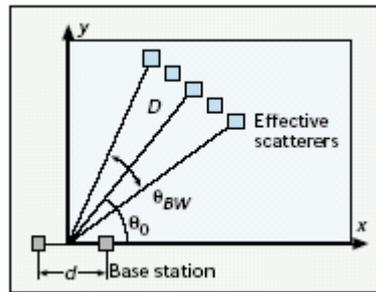


Figura 4.2: Geometria Discreta Uniforme (reproduzida da referência [14]).

O ângulo que forma o arco onde serão espalhados os N obstáculos deve ser estreito, conforme observado na figura 4.2 acima.

Com isso, é possível determinar as direções de chegada ao receptor (DOA). Supondo N ímpar, os possíveis ângulos de chegada são:

$$\varphi_i = \frac{1}{N-1} \varphi_{BW} i \quad (4.1)$$

$$\text{com } i = -\frac{N-1}{2}, \dots, \frac{N-1}{2}$$

Pode-se, então, obter a correlação entre os sinais que atingem duas antenas do conjunto.

Novamente, embora o modelo seja útil para a determinação da correlação entre qualquer par de elementos do conjunto de antenas (o que pode ser usado para o cálculo da matriz de correlação do conjunto), ele falha na determinação de outras características do canal, como espalhamento no tempo e na frequência (*Doppler spread*).

4.1.4. Modelos Geométricos e Estatísticos Baseados em Interação Única, *GBSB – Geometrically Based Single Bounce*

Estes modelos são definidos por uma função densidade de espalhamento espacial e são úteis para simulação e análise de cenários.

O uso destes modelos para simulação consiste em colocar aleatoriamente espalhadores na região de espalhamento de acordo com a forma da função densidade de espalhamento espacial [13,14].

A partir da localização de cada espalhador, determina-se o ângulo de chegada (AOA), o tempo de chegada (TOA) e a amplitude do sinal recebido.

Com base na função densidade de espalhamento, pode-se obter a função densidade de probabilidade marginal e conjunta do ângulo de chegada (AOA) e tempo de chegada (TOA). Tais funções estatísticas permitem determinar o desempenho do conjunto de antenas.

Duas variações do modelo GBSB têm sido bastante utilizadas: o modelo circular (*Geometrically Based Single Bounce Circular Model*), que é usado em cenários macrocelulares, onde a estação base é mais alta que os espalhadores, e o modelo elíptico (*Geometrically Based Single Bounce Elliptical Model*), que é mais usado para cenários microcelulares [13,14].

O modelo circular é baseado em uma distribuição circular dos espalhadores na região ao redor do móvel. No modelo elíptico, os espalhadores estão em todo o percurso entre transmissor e receptor, já que eles são uniformemente distribuídos dentro da elipse, cujos focos são o transmissor e receptor.

As figuras 4.3 e 4.4 abaixo mostram os modelos circular e elíptico:

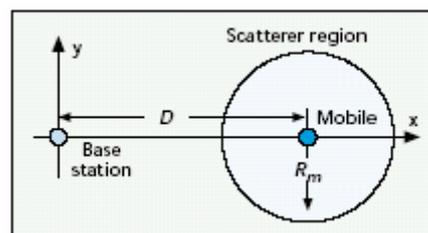


Figura 4.3: Geometria circular (reproduzida da referência [14]).

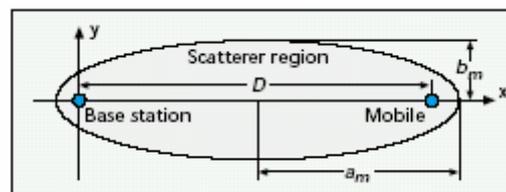


Figura 4.4: Geometria elíptica (reproduzida da referência [14]).

4.1.5.

Modelo de Espalhamento Gaussiano Descorrelatado e Estacionário no Sentido Amplo (GWSSUS)

Este modelo estatístico faz suposições com respeito à forma do vetor correspondente ao sinal recebido, que possui uma distribuição Gaussiana

descorrelatada e estacionária no sentido amplo [13,14]. A motivação de tal modelo é determinar uma equação geral para a matriz de correlação do sinal recebido.

Os espalhadores são agrupados em conjuntos, dispostos no cenário aleatoriamente conforme a figura 4.5 abaixo:

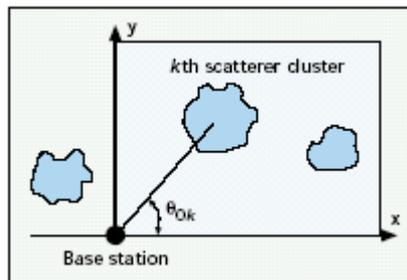


Figura 4.5: Geometria GWSSUS (reproduzida da referência [14]).

O modelo possui um resultado satisfatório para a forma da matriz de covariância do sinal. Porém, como não indica o número ou a posição dos conjuntos de espalhadores, ele necessita de informação adicional para aplicações em simulação de ambientes típicos.

4.1.6. Modelo Gaussiano de Ângulo de Chegada (GAA)

O Modelo Gaussiano de Ângulo de Chegada (GAA) é um caso especial do modelo Gaussiano Estacionário no Sentido Amplo (GWSSUS) que considera um único conjunto de espalhadores, como mostra a figura 4.6 abaixo:

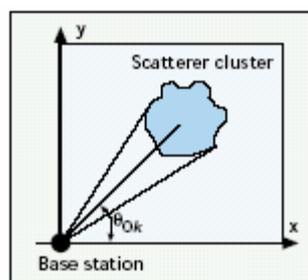


Figura 4.6: Geometria GAA (reproduzida da referência [14]).

Uma vez que um único conjunto de espalhadores é considerado, trata-se de um modelo de faixa estreita, válido quando o espalhamento no tempo do canal é menor que o inverso da largura da faixa de freqüências do sinal. Por

isso, os deslocamentos no tempo podem ser modelados como simples deslocamentos na fase e o desvanecimento é plano [13,14].

4.1.7. Modelo de Rayleigh

O modelo de Rayleigh foi desenvolvido tanto para análise de correlação dos sinais quanto para a simulação do canal [13,14]. O ambiente de propagação é bastante denso com grandes refletores, como mostra a figura 4.7 abaixo:

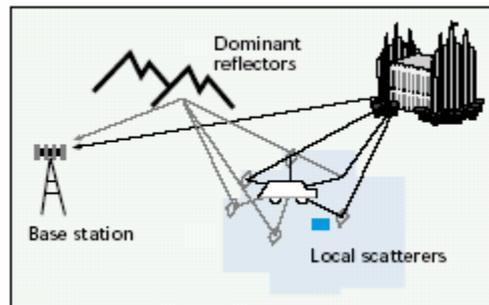


Figura 4.7: Ambiente de propagação modelo de Rayleigh (reproduzidas da referência [14]).

Neste modelo, a intensidade do sinal recebido tem uma distribuição complexa Gaussiana em todas as direções caracterizadas a partir do móvel. É um modelo que apresenta boa concordância de seus resultados para correlação dos sinais com os de medidas.

4.1.8. Modelos GSM para Simulação (*Typical Urban* e *Bad Urban*)

Dois modelos espaciais foram desenvolvidos para simulações aplicáveis ao padrão GSM. O modelo *Typical Urban* (TU) foi desenvolvido para possuir propriedades temporais apropriadas para ambientes de grandes cidades, enquanto o *Bad Urban* (BA) foi desenvolvido para modelar ambientes com grandes espalhamentos no tempo, com grandes espalhadores que não estão na vizinhança do móvel [13,14].

No modelo TU, 120 espalhadores são colocados aleatoriamente no interior de um círculo de raio igual a 1 km centrado no móvel. As posições dos espalhadores são mantidas fixas durante o tempo em que o móvel leva para

percorrer a distância de 5 metros. Ao final dos 5 metros, os espalhadores retornam às suas posições relativas originais com relação ao móvel.

A diferença entre os modelos BU e TU está na presença adicional de um outro círculo de 1 km de raio que está a 45° do primeiro círculo, contendo outro conjunto de 120 espalhadores, como mostra a figura 4.8 abaixo:

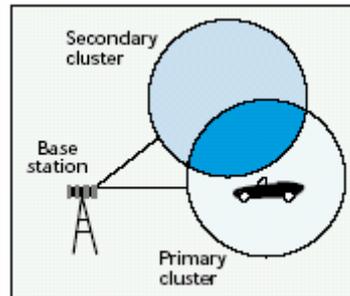


Figura 4.8: Geometria modelo *Bad Urban* (reproduzida da referência [14]).

A potência média do sinal recebido através do segundo conjunto de espalhadores é 5 dB mais baixa. A presença deste segundo conjunto resulta em um aumento no espalhamento angular e no espalhamento no tempo.

4.1.9. Modelo de Distribuição Setorizada Uniforme

Neste modelo, os espalhadores são distribuídos uniformemente na faixa angular φ_{BW} e na faixa radial Δ_R centrada no móvel, como mostra a figura 4.9 abaixo:

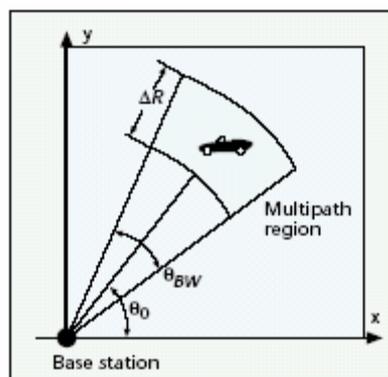


Figura 4.9: Geometria da Distribuição Setorizada Uniforme (reproduzida da referência [14]).

A magnitude e a fase associada a cada espalhador são selecionadas com base em distribuições uniformes entre $[0,1]$ e $[0,2\pi]$, respectivamente.

Este modelo foi usado para o estudo do efeito do espalhamento angular em técnicas de diversidade espacial [13,14].

4.1.10. Modelo de Saleh-Valenzuela

Este modelo foi desenvolvido para caracterizar tanto o ângulo de chegada (AOA) quanto o tempo de chegada (TOA). É baseado na observação de que as componentes de multipercurso chegam em grupos à antena receptora, sendo, por isso, utilizado em ambiente *indoor* [13,14].

O modelo supõe que tanto o AOA quanto o TOA são estatisticamente independentes. O tempo de chegada, tanto para os conjuntos de espalhadores quanto para os raios dentro de cada conjunto, possui uma distribuição de Poisson. Os ângulos de chegada dos conjuntos são uniformemente distribuídos entre $[0,2\pi]$ e os ângulos de chegada dos raios dentro de um conjunto são modelados por uma distribuição Laplaciana.

4.1.11. Modelo baseado em Sub-regiões Elípticas

Este modelo é semelhante ao modelo geométrico elíptico, onde os espalhadores estão dispostos dentro da elipse formada pelo transmissor e receptor.

Porém, neste modelo, a elipse é subdividida em sub-regiões concêntricas e o número de espalhadores dentro de cada sub-região é escolhido através da variável aleatória de Poisson [13,14].

A figura 4.10 abaixo mostra o modelo:

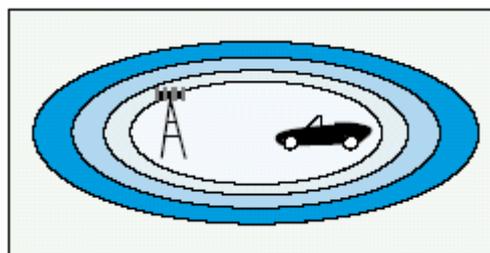


Figura 4.10: Sub-regiões elípticas (reproduzida da referência [14]).

Cada sub-região corresponde a uma faixa de espalhamento no tempo. Os resultados de simulações utilizando o modelo foram consistentes com medidas realizadas em Toronto [13,14].

4.1.12. Modelo de Traçado de Raios

Todos os modelos citados anteriormente são baseados em análises estatísticas e/ou geométricas ou em medidas de campo, apresentando a perda média de propagação, o espalhamento no tempo e o ângulo de chegada.

O modelo de Traçado de Raios, diferentemente dos anteriores, é um modelo determinístico porque utiliza informações específicas do ambiente para calcular a perda média de propagação, o espalhamento no tempo e o ângulo de chegada [13,14].

Tais características são calculadas a partir das teorias da ótica geométrica, da reflexão, da difração e do espalhamento.

A dificuldade em se obter bases de dados detalhadas dos ambientes, incluindo terreno e edificações, além do esforço computacional para os cálculos, torna mais difícil a utilização do modelo de traçado de raios.

Como já dito, o modelo determinístico do canal, determinado com base na técnica de traçado de raios, será utilizado no cálculo da capacidade dos sistemas MIMO, conforme apresentado no capítulo 3, utilizando a formulação apresentada no capítulo 2.

4.2. Capacidade para Canais MIMO

Considerando um canal MIMO com n_R antenas receptoras e n_T antenas transmissoras, a matriz de transferência do canal H possui dimensão $n_R \times n_T$. O elemento ij^{th} da matriz H corresponde ao resultado da propagação do sinal da j -ésima antena transmissora para i -ésima antena receptora. Assim, pode-se escrever:

$$\vec{r} = H\vec{s} + \vec{n} \quad (4.2)$$

onde \vec{r} é o vetor coluna de dimensão $n_R \times 1$ que corresponde ao sinal recebido em cada uma das n_R antenas receptoras; \vec{s} é o vetor coluna de dimensão $n_T \times 1$ que corresponde ao sinal transmitido por cada uma das n_T antenas transmissoras e \vec{n} corresponde ao vetor coluna de ruído de dimensão $n_R \times 1$.

Pode-se determinar cada um dos elementos da matriz H através dos parâmetros dos componentes de multipercurso, ou seja:

$$H_{ik} = \sum_{p=1}^{n_s} \left[\gamma_p e^{j \frac{2\pi}{\lambda} id \sin(\varphi_{R,p})} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} kd \sin(\varphi_{T,p})} \right] \quad (4.3)$$

onde n_s é o número de espalhadores; γ_p é o coeficiente complexo de espalhamento; λ é o comprimento de onda; d é o espaçamento entre as antenas dos conjuntos transmissor e receptor; $\varphi_{R,p}$ é o ângulo de chegada ao receptor relativo à normal ao conjunto receptor e $\varphi_{T,p}$ é o ângulo de partida do transmissor relativo à normal ao conjunto transmissor.

A capacidade de um canal de comunicações, deduzida por Shannon [16], corresponde à máxima taxa de transmissão sem erros suportada pelo canal.

Assim, a fórmula padrão deduzida por Shannon para a capacidade, expressa em bit/s/Hz é definida por:

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} |H|^2 \right) \quad \text{bps/Hz} \quad (4.4)$$

onde S/N corresponde à relação sinal-ruído e H , a matriz de transferência do canal.

Observando (4.4), verifica-se que um crescimento de 3 dB na relação sinal-ruído, provoca um crescimento de 1 bps/Hz na capacidade.

No caso de sistemas MIMO, o cálculo da capacidade está relacionado com a diversidade de espaço, na qual o receptor aproveita ao máximo os dados recebidos pelo vetor \vec{r} .

Assumindo que o vetor \vec{s} do sinal transmitido é composto de n_T componentes iguais e estatisticamente independentes, cada uma com uma distribuição gaussiana, pode-se deduzir a capacidade para um sistema MIMO a partir de (4.5) apresentada em [24]:

$$C = \log_2 \frac{\det A_s \det A_r}{\det A_u} \text{ bps/Hz} \quad (4.5)$$

onde $A_s = E[ss^+]$, $A_r = E[rr^+]$ e $A_u = E[uu^+]$, com $\vec{u} = (s, r)^T$, sendo o vetor de dimensão $n_T + n_R$.

Após alguns cálculos apresentados em [15], a capacidade do canal MIMO pode ser calculada por:

$$C = \log_2 \det \left[N \cdot I_{n_R} + \frac{S/N}{n_T} \cdot HH^+ \right] \cdot \det [N^{-1} \cdot I_{n_R}] \text{ bps/Hz} \quad (4.6)$$

onde apresentada de forma conveniente obtém-se:

$$C = \log_2 \det \left[I_{n_R} + \left(\frac{S/N}{n_T} \right) \cdot HH^+ \right] \text{ bps/Hz} \quad (4.7)$$

onde $\frac{S}{N}$ corresponde à relação sinal ruído; H^+ representa a conjugada transposta da matriz do canal; I_{n_R} é a matriz identidade de dimensão $n_R \times n_R$, com n_R o número de antenas receptoras e n_T o número de antenas transmissoras.