

Modelação do Canal Rádio MIMO

Nuno Almeida, Susana Mota, Armando Rocha

Resumo – Neste artigo é apresentado um estudo sobre sistemas que utilizam múltiplas antenas para transmitir e receber informação (sistemas MIMO). Este tipo de sistemas permite usufruir de diversidade espacial ou formação de feixe tanto no transmissor como no receptor e em ambientes com elevado número de componentes multipercurso independentes, é possível atingir uma capacidade de transmissão superior a qualquer outro sistema baseado em agregados de antenas convencionais.

O desempenho dos sistemas MIMO depende do canal de propagação. Uma caracterização completa do canal de propagação é um ponto fulcral para avaliar a sua capacidade de transmissão sendo aqui abordados alguns modelos de propagação MIMO.

São implementados dois modelos de propagação MIMO: o modelo analítico Kronecker e o modelo físico GSCM e são comparados os resultados destas duas formas de modelar o canal.

Palavras-Chave: Canal de propagação, diversidade espacial, capacidade de um canal, MIMO, modelos de propagação.

Abstract - This article presents a study about systems that use multiple antennas to transmit and receive information (MIMO systems). This type of system allows in the transmitter and in the receiver, spatial diversity or beamforming, and in environments with large number of independent multipath components, achieves a transmission capacity higher than any other system based on arrays of conventional antennas.

The performance of MIMO systems depends on the propagation channel. A full characterization of the propagation channel is an important issue to evaluate the transmission capacity. Here we present some models for MIMO propagation.

Two propagation models for the MIMO channel are implemented: the analytical Kronecker model and the physical GSCM model and the results are compared.

Keywords: Propagation Channel, spatial diversity, channel capacity, MIMO, propagation models.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicações sem fios estão em constante evolução. Aumenta cada vez mais a procura de serviços de Internet, televisão de alta definição e serviços multimédia que em geral exigem elevados débitos de transmissão. Isto implica a necessidade de

criar tecnologias com a capacidade necessária para implementar estes serviços.

Os sistemas de comunicações móveis tradicionais são baseados na utilização de uma única antena de transmissão e recepção (sistemas SISO), permitindo a exploração dos domínios do tempo, da frequência e da codificação. A utilização de *smart antennas*, sistemas em que um dos terminais está equipado com um agregado de antenas (SIMO e MISO) permite a exploração parcial do domínio espacial, podendo-se obter ganhos de diversidade espacial e também ganhos fornecidos pela técnica de formação de feixe, quando utilizadas.

A tecnologia MIMO que consiste no uso de múltiplas antenas de transmissão e de recepção permite a exploração total do domínio espacial. A utilização de técnicas MIMO em sistemas de comunicação rádio digital constitui um dos avanços mais significativos e emergentes nas comunicações móveis modernas. O conceito inerente aos sistemas MIMO passa por combinar os sinais transmitidos e recebidos de uma determinada forma, de modo a que seja possível melhorar o desempenho do sistema. Esta melhoria reflecte-se na maximização dos débitos de transmissão associados e na melhoria da qualidade do serviço oferecido ao cliente final.

Os avanços da electrónica, que proporcionam cada vez mais a digitalização do sinal rádio em estágios a montante, transformaram a outrora complexidade de hardware dedicado em processamento digital de sinal e software. A largura de banda, dada sempre por escassa, acaba por ser cada vez mais eficientemente aproveitada com sucessivas inovações bastante transversais (redes, antenas, electrónica analógica e digital, comunicações ópticas, etc).

Pretende-se com este trabalho estudar e simular alguns modelos para modelação da matriz do canal MIMO, H , visto que o ganho de capacidade resultante da utilização da tecnologia MIMO é fortemente influenciado pelo canal de propagação.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: no capítulo II é feita uma abordagem aos sistemas MIMO e às suas potencialidades: ganho de capacidade, ganho de diversidade e formação de feixe; no capítulo III são abordados alguns dos mais importantes modelos analíticos de propagação MIMO; no capítulo IV é realizada uma simulação do canal MIMO através do modelo de Kronecker e do modelo GSCM, no capítulo V

são apresentados os resultados obtidos das simulações do canal MIMO, no capítulo VI são apresentadas as principais conclusões obtidas da realização deste trabalho e finalmente no capítulo VII são apresentados alguns tópicos de trabalho futuro em continuação do aqui realizado.

II. SISTEMAS MIMO

A. Modelo Matemático do Canal MIMO

O modelo matemático de um sistema MIMO, considerando o canal invariante no tempo e que este apresenta um comportamento uniforme na frequência é dado por [1]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

onde $\mathbf{y}$ é o sinal recebido, $\mathbf{s}$ o sinal transmitido, $\mathbf{H}$ a matriz do canal MIMO e $\mathbf{n}$ é ruído AWGN.

Os elementos h_{ij} da matriz do canal $\mathbf{H}$, idealmente são considerados amostras independentes e identicamente distribuídas (i.i.d) de uma variável aleatória complexa gaussiana, o que significa que os elementos h_{ij} não são correlacionados entre si, o que conduz à maximização do débitos de informação do canal MIMO. Na realidade estes elementos de desvanecimento nem sempre são amostras i.i.d devido ao espaçamentos entre as antenas não ser suficiente ou o próprio canal físico não o permitir (canal directivo).

B. Capacidade do Canal MIMO

O desafio de aumentar os débitos de transmissão e a fiabilidade da informação, envolve diversas dificuldades. Segundo Shannon [2] para se aumentar a capacidade de um canal (bps) é necessário aumentar a largura de banda de transmissão ou então a SNR. A limitação ao uso de uma maior largura de banda está no facto do espectro de frequência ser um recurso raro e caro. Por outro lado para se aumentar a SNR é necessário aumentar a potência de transmissão, o que não é desejável num dispositivo móvel que deve conviver com a necessidade do re-uso de frequência e também com o constrangimento da duração da bateria.

Um sistema MIMO com N_T antenas transmissoras e N_R antenas receptoras apresenta uma capacidade dada por [3]:

$$C_{MIMO} = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_R} + \frac{P_T}{NN_T} \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^H \right) \right] \quad (2)$$

onde $\mathbf{I}_{N_R}$ é a matriz identidade de dimensão $N_R \times N_R$, N é a potência do ruído, $\mathbf{H}$ é a matriz do canal de dimensão $N_R \times N_T$, e $\mathbf{H}^H$ é a matriz trans-conjugada da matriz do canal, $\mathbf{Q}$ a matriz de covariância do vector do sinal a transmitir $\mathbf{s}$.

Transmissor sem Informação do Canal MIMO

No caso em que o transmissor não tem informação acerca do canal de transmissão, considera-se que cada antena transmissora radia a mesma potência e que os sinais transmitidos são independentes. Esta consideração leva a $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_{N_T}$. Substituindo a matriz $\mathbf{Q}$ na equação (2) e efectuando a decomposição em valores próprios de $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$, denotados por λ_i , de acordo com [3] obtém-se a capacidade do canal MIMO, nestas condições dada por:

$$C_{MIMO_{DPU}} = \sum_{i=1}^{N_R} \log_2 \left(1 + \frac{P_T}{NN_T} \lambda_i \right) \quad (3)$$

Da equação (3) verifica-se que a capacidade do canal MIMO é o somatório das capacidades de N_R canais SISO independentes, em que os ganhos de canal SISO são os valores próprios da matriz $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ e cuja potência total é distribuída uniformemente por cada antena de transmissora. Assim, um sistema MIMO permite um aumento da capacidade que cresce linearmente com $\min(N_T, N_R)$. Como o ganho de capacidade depende dos valores próprios da matriz $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$, se estes apresentarem valores baixos ou nulos pode ser impossível a transmissão num canal virtual, podendo a potência associada a esse canal virtual não conseguir alcançar o receptor.

Transmissor com Informação do Canal MIMO

No caso em que o transmissor tem informação sobre o canal de propagação, esta pode contribuir para um ganho adicional de capacidade do canal. Se o transmissor conhecer a matriz do canal isto permite efectuar uma distribuição não uniforme de potência de forma a maximizar a capacidade do canal MIMO.

O objectivo consegue-se ajustando a matriz de covariância $\mathbf{Q}$ do vector a transmitir $\mathbf{s}$, sendo distribuída mais potência pelos canais virtuais cujos valores próprios correspondentes apresentem um maior valor (ganho), e menos potência pelos canais virtuais cujos valores próprios apresentem menor valor. Isto traduz-se na introdução de um factor adicional de ponderação, γ_i , na SNR de cada canal virtual. Sendo r a característica da matriz $\mathbf{H}$, i. e., o número de valores próprios não nulos, a capacidade do canal MIMO é dada por [3]:

$$C_{MIMO_{DPO}} = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \gamma_i \frac{P_T}{NN_T} \lambda_i \right) \quad (4)$$

O cálculo dos coeficientes de ponderação, γ_i , é realizada através de um algoritmo denominado de *water-filling*.

C. Diversidade Espacial do Canal MIMO

A técnica de diversidade espacial é uma das mais utilizadas nas comunicações sem fios na actualidade. Este tipo de diversidade pode ser realizado no receptor,

no transmissor ou em ambos. Consiste em ter antenas suficientemente espaçadas para que os sinais em cada antena sejam suficientemente descorrelacionados.

Um sistema MIMO com N_T antenas transmissoras e N_R antenas receptoras apresenta diversidade espacial na transmissão e na recepção. Assumindo que todos os caminhos possíveis entre as antenas transmissoras e as antenas receptoras são estatisticamente independentes, existem $N_T \times N_R$ caminhos independentes entre o transmissor e o receptor, ou seja, há no receptor $N_T \times N_R$ amostras do sinal transmitido, podendo o receptor escolher a que apresente um maior nível de potência ou combinar todas, resultando num aumento da fiabilidade do sistema.

O ganho de diversidade espacial é obtido através da utilização de códigos espaço-tempo (STC) [3] criados por Alamouti. Os códigos STC utilizam a combinação de técnicas de codificação do canal com a utilização de múltiplas antenas, ou seja, é introduzida diversidade espacial e temporal na informação transmitida.

D. Capacidade vs Diversidade

Zheng e Tse em [4] tratam o compromisso entre o ganho de diversidade e o ganho de capacidade num sistema MIMO. Os autores relacionam o ganho de diversidade designado por $d(r)$ em função do ganho de capacidade designado por r , em que $r = 0, \dots, \min(N_T, N_R)$. A relação entre $d(r)$ e r é dada por:

$$d(r) = (N_T - r)(N_R - r) \quad (5)$$

Da equação (5) verifica-se que a ausência de ganho de capacidade significa que o ganho de diversidade é máximo e corresponde a $N_T N_R$. Quando se pretende apenas ganho de capacidade este corresponde a $\min(N_T, N_R)$.

Por norma a introdução de diversidade no sistema MIMO conduz a um decréscimo na capacidade do canal. No entanto, a introdução de diversidade pode contribuir indirectamente para o aumento da taxa de transmissão, na medida em que a consequente diminuição da taxa de erro poderá permitir o uso de modulações com maiores constelações.

E. Formatação de Feixe

Esta técnica consiste na escolha adequada dos coeficientes complexos que fazem a ponderação dos sinais nas antenas do transmissor e do receptor. Consegue-se direccionar o diagrama de radiação em direcções desejadas levando a uma melhoria dos sinais transmitidos e recebidos. Perante interferências é possível direccionar os diagramas de radiação para que

nas direcções de onde estas provêm se criem nulos de forma minimizá-las.

III. MODELOS PARA CANAL MIMO

O desempenho dos sistemas MIMO depende das características de propagação do canal (a tecnologia MIMO faz uso do fenómeno de multipercursos para maximizar a capacidade). O estudo do canal de propagação e a sua modelação são cruciais para a quantificação dos ganhos de capacidade. Enquanto a codificação e o processamento dos sinais são elementos chave para o sucesso da implementação da tecnologia MIMO, o canal de propagação representa um importante factor que definitivamente gera impacto sobre o desempenho do sistema.

Almers *et al* em [1] apresentam diversos modelos para caracterização do canal rádio móvel MIMO. Modelos mais simplistas são baseados na correlação entre os coeficientes do canal. Estes modelos são designados de analíticos. São bastantes populares devido à sua simplicidade e facilidade de simulação.

Outros apresentam uma aproximação do canal baseada nos fenómenos de interacção das ondas nos obstáculos do cenário. Estes modelos são designados de físicos. São de implementação mais complexa, mas apresentam melhores resultados que os modelos analíticos.

Nesta secção são abordados os dois modelos analíticos mais utilizados para caracterização do canal de propagação devido à sua simplicidade.

A. Modelo de Kronecker

Considera as estatísticas de desvanecimento no transmissor e no receptor independentes e são descritas através de uma matriz de covariância para o transmissor e outra para o receptor. Assim o modelo de Kronecker propõe a obtenção da matriz do canal, $\mathbf{H}$, a partir de duas matrizes que descrevem as propriedades de correlação, uma para o transmissor, $\mathbf{R}_{Tx}$, e outra para o receptor,

$\mathbf{R}_{Rx}$.

A matriz dos coeficientes complexos de correlação dos sinais do canal de propagação MIMO, é obtida através do produto de Kronecker entre as matrizes de correlação no transmissor e no receptor, e é dada por [5]:

$$\mathbf{R}_H = \mathbf{R}_{Tx} \otimes \mathbf{R}_{Rx} \quad (6)$$

onde $\otimes^1$ representa o produto de Kronecker. A matriz do canal pode ser modelada por [1]:

¹ Considere duas matrizes $\mathbf{A}$ $m \times n$ e $\mathbf{B}$ $p \times q$. O produto de Kronecker é dado por:

$$\mathbf{A} \otimes \mathbf{B} = \begin{bmatrix} a_{11}\mathbf{B} & \dots & a_{1n}\mathbf{B} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}\mathbf{B} & \dots & a_{mn}\mathbf{B} \end{bmatrix} \text{ com dimensão } mp \times nq.$$

$$\mathbf{H} = (\mathbf{R}_{Rx})^{1/2} \mathbf{G} (\mathbf{R}_{Tx})^{1/2} \quad (7)$$

onde $\mathbf{G}$ é uma matriz complexa gaussiana com elementos i.i.d, e $(\cdot)^{1/2}$ é a raiz quadrada de qualquer matriz de forma que $\mathbf{R}^{1/2} (\mathbf{R}^{1/2})^H = \mathbf{R}$.

B. Modelo de Weichselberger

Este modelo pretende eliminar a principal limitação do modelo de Kronecker, que considera separáveis as estatísticas de desvanecimento entre o transmissor e o receptor, através da inclusão de uma matriz de acoplamento que relaciona as estatísticas de desvanecimento entre os terminais.

A definição deste modelo é baseada na decomposição em valores próprios das matrizes de correlação no transmissor e no receptor, que são dadas por [6]:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{Tx} &= \mathbf{U}_{Tx} \mathbf{\Lambda}_{Tx} \mathbf{U}_{Tx}^H \\ \mathbf{R}_{Rx} &= \mathbf{U}_{Rx} \mathbf{\Lambda}_{Rx} \mathbf{U}_{Rx}^H \end{aligned} \quad (8)$$

onde $\mathbf{U}_{Tx}$ e $\mathbf{U}_{Rx}$ são matrizes unitárias², $\mathbf{\Lambda}_{Tx}$ é uma matriz diagonal que contém os valores próprios de $\mathbf{R}_{Tx}$ e $\mathbf{\Lambda}_{Rx}$ é uma matriz diagonal que contém os valores próprios de $\mathbf{R}_{Rx}$. A matriz do canal é dada para este modelo por:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}_{Rx} \left(\tilde{\mathbf{\Omega}} \circ \mathbf{G} \right) \mathbf{U}_{Tx}^T \quad (9)$$

onde $\mathbf{G}$ é uma matriz complexa gaussiana com elementos i.i.d, o símbolo $\circ$ representa o produto de Hadamard³, e $\tilde{\mathbf{\Omega}}$ representa a matriz de acoplamento que determina a potência média de acoplamento entre o transmissor e o receptor.

IV. SIMULAÇÃO DO CANAL DE PROPAGAÇÃO MIMO

A simulação do canal de propagação MIMO é realizada, considerando dois cenários de propagação: macro célula e micro célula. Numa macro célula a estação base encontra-se livre à sua volta de objectos que causam espalhamento do sinal, ao passo que a estação móvel está rodeada de espalhadores. Numa micro célula quer a estação base quer a estação móvel apresentam as mesmas condições à sua volta, com bastantes objectos que causam espalhamento do sinal tornando o canal pouco directivo.

As simulações realizadas neste trabalho consideram o transmissor com sendo a estação base e a estação móvel corresponde ao receptor. É também considerada a

situação em que o transmissor faz uma distribuição de potência uniforme pelas suas antenas.

A. Implementação do Modelo de Kronecker

A simulação do canal de propagação MIMO através do modelo de Kronecker implica a construção das matrizes $\mathbf{R}_{Tx}$ e $\mathbf{R}_{Rx}$ de acordo com a equação (7).

Num canal micro celular a distribuição de potência numa dada direcção de azimute é considerada uniforme, quer na estação móvel quer na estação base. Nesta situação os coeficientes de correlação entre as antenas do transmissor e do receptor podem ser obtidos por:

$$\rho(kd) = J_0(kd) \quad (10)$$

onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ é o número de onda, $J_0(\cdot)$ é a função de Bessel de 1ª espécie de ordem 0 e d é a distância entre as antenas.

Num canal macro celular a distribuição de potência numa dada direcção de azimute é caracterizada por uma distribuição laplaciana em torno da estação base e por uma distribuição uniforme em torno da estação móvel. Nesta situação os coeficientes de correlação entre as antenas da estação base podem ser obtidos por:

$$\rho(kd) = J_0(kd) + \frac{2}{\sigma_A^2} \left[1 - \exp \left(-\sqrt{2} \frac{\pi}{\sigma_A} \right) \right] \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{J_{2n}(kd)}{\sigma_A^2 + 2n^2} \quad (11)$$

Nas Fig. 1 e Fig. 2, estão ilustrados os coeficientes de correlação entre os sinais nas antenas, quando a distribuição de potência de azimute é uniforme e laplaciana, respectivamente.

A partir das equações (10) e (11) são calculados os coeficientes de correlação para a construção das matrizes $\mathbf{R}_{Ms}$ e $\mathbf{R}_{Bs}$, a fim de obter a matriz do canal de propagação $\mathbf{H}$ de acordo com a equação (7)..

Posteriormente é realizada uma decomposição em valores singulares da matriz $\mathbf{H}$, e é calculada a capacidade do canal MIMO através de (3).

B. Implementação de um simulador MIMO baseado na descrição geométrica do canal

O simulador é baseado no modelo GSCM (*geometry-based stochastic channel model*), apresentado em [1]. Este modelo descreve o canal com base em considerações geométricas, ou seja consiste na criação de um cenário de propagação a partir duma distribuição de objectos que originam espalhamento do sinal (espalhadores), de acordo com uma dada função de distribuição. A distribuição dos espalhadores está relacionada com o cenário de propagação que se pretende simular. A resposta impulsional do canal é obtida a partir de traçado de raios no cenário simulado.

² Uma matriz $\mathbf{A}$ diz-se unitária se $\mathbf{A}\mathbf{A}^H = \mathbf{A}^H\mathbf{A} = \mathbf{I}$.

³ Considere duas matrizes $\mathbf{A}$ e $\mathbf{B}$ de dimensão $m \times n$. O produto de Hadamard entre ambas é representado por $\mathbf{A} \circ \mathbf{B} = [a_{ij} \times b_{ij}]$.

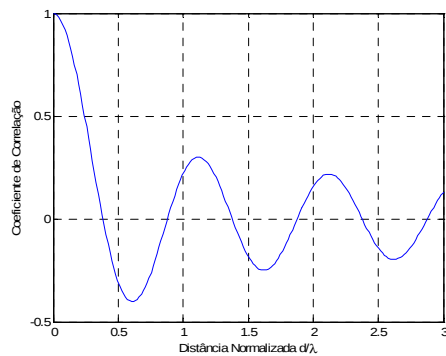
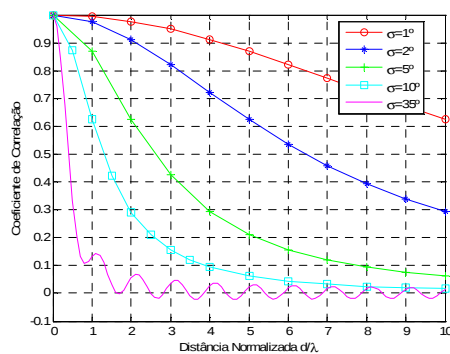


Fig. 1 - Coeficientes de correlação entre duas antenas quando a



distribuição de potência de azimuth em torno das antenas é uniforme

Fig. 2 - Coeficientes de correlação entre duas antenas quando a distribuição de potência de azimuth em torno das antenas é laplaciana onde σ representa o espalhamento angular (quanto mais directivo é o canal menor é o seu valor)

O simulador elaborado corresponde a uma versão melhorada da versão original apresentada em [7]. O simulador original considera um anel de espalhadores em torno da estação base. A distribuição dos espalhadores no cenário foi alterada.

Considerou-se uma distribuição uniforme de espalhadores dentro de uma circunferência em torno da estação móvel para simular um cenário macro celular.

Para simular um cenário micro celular considerou-se uma distribuição de espalhadores uniforme dentro de uma circunferência em torno da estação móvel e outra em torno da estação base, tal como ilustrado pelas Fig. 3 e Fig. 4.

O simulador GSCM considera apenas uma interação entre o raio e o espalhador no caminho entre o transmissor e o receptor (*single bounce*). Ambos os terminais apresentam um *array* linear de antenas. A estação base e os espalhadores são considerados fixos. O terminal móvel desloca-se criando um canal variável. O

número de espalhadores em torno de cada terminal é de 40.

O simulador GSCM consiste no cálculo de séries temporais que representam os elementos h_{ij} e, a partir destes constrói-se a matriz $\mathbf{H}$. As séries temporais são obtidas a partir de traçado de raios no cenário.

Finalmente decompondo a matriz $\mathbf{H}$ em valores singulares é obtida a capacidade do canal dada pela equação (3).

V. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A. Validação do Modelo de Kronecker

O modelo de Kronecker é um dos modelos MIMO mais populares devido à sua simplicidade, mas negligencia a estrutura espacial do canal, ao considerar as estatísticas de desvanecimento nos terminais independentes, o que pode originar uma estimativa da capacidade do canal irrealista. O modelo GSCM, devido à descrição física do canal, apresenta uma reprodução mais fiel deste. Assim de forma a validar os resultados do modelo de Kronecker, a capacidade do canal obtida a partir deste é comparada com a capacidade obtida pelo modelo GSCM.

As condições do cenário de propagação são iguais para ambos os modelos: SNR=30dB, espaçamento entre as antenas nos *arrays* de transmissão e recepção de λ e uma frequência de portadora de 2GHz.

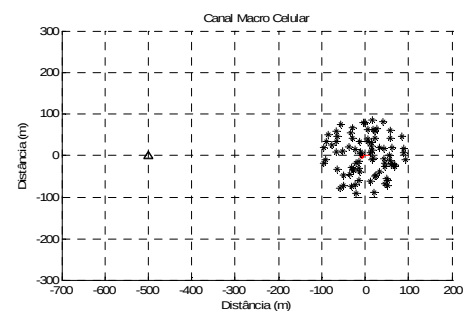


Fig. 3 - Cenário micro celular

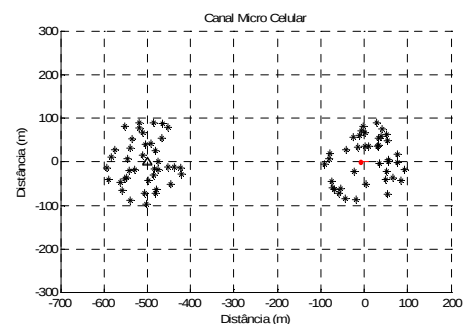


Fig. 4 - Cenário macro celular

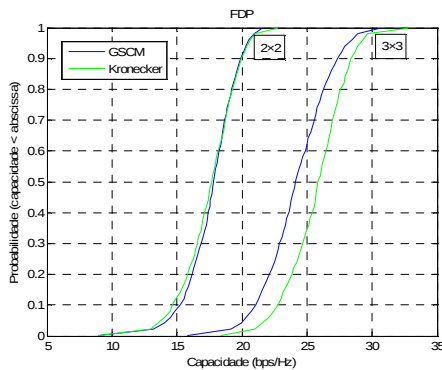


Fig. 5 - Função densidade de probabilidade da capacidade para um canal MIMO micro celular com uma topologia 2×2 e 3×3 obtida a partir do modelo de Kronecker e do modelo GSCM

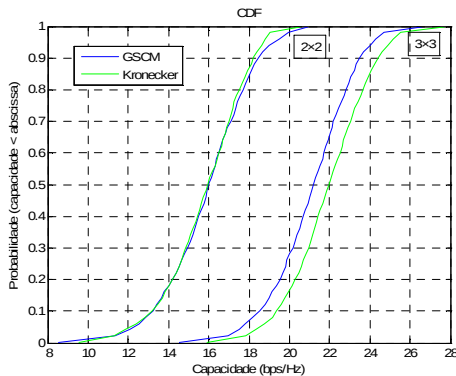


Fig. 6 - Função densidade de probabilidade da capacidade para um canal MIMO macro celular com uma topologia 2×2 e 3×3 obtida a partir do modelo de Kronecker e do modelo GSCM

Dos resultados obtidos ilustrados na Fig. 5 e na Fig. 6, verifica-se que devido à simplificação da estrutura espacial do canal, o modelo de Kronecker apresenta bons resultados para canais MIMO com duas antenas no transmissor e no receptor [8]. Quando o número de antenas é mais que três no transmissor e no receptor os resultados dados pelo modelo de Kronecker não reproduzem de uma forma correcta a capacidade do canal. O modelo de Kronecker comparativamente com o modelo GSCM apresenta uma sobre-estimativa da capacidade. Isto deve-se à simplificação dos coeficientes de correlação calculados a partir de (10). e (11).

Da Fig. 5 e da Fig. 6 verifica-se também que a capacidade do canal MIMO aumenta com o número de antenas dos *arrays* de transmissão e de recepção. Este aumento da capacidade deve-se ao aumento do número de canais virtuais paralelos criados entre o transmissor e o receptor pelos quais é multiplexada a informação. A capacidade do canal MIMO é maior numa micro célula do que numa macro célula, pois os elementos da matriz $\mathbf{H}$ são mais descorrelacionados.

VI. CONCLUSÕES

A tecnologia MIMO, uma das mais emergentes nas comunicações sem fios, já implementada em sistemas como Wimax e Wi-Fi, permite aumentar os débitos de informação, sem aumentar a largura de banda do canal e a potência de transmissão. A implementação da tecnologia MIMO aumenta a complexidade do sistema de comunicações sem fios em hardware (mais antenas) e também aumenta a complexidade de processamento da informação quer do lado do transmissor quer do lado do receptor.

A capacidade do canal MIMO depende do cenário de propagação, espaçamento entre antenas e número de antenas dos *arrays* do transmissor e do receptor.

Os débitos de informação permitidos são tanto maiores quanto maior for a descorrelação entre os sinais do canal MIMO. O coeficiente de correlação além do desvanecimento multipercursos depende também do espaçamento entre as antenas. Em cenários mais directivos os sinais são mais correlacionados, diminuindo a capacidade sendo necessário um maior espaçamento entre as antenas para a contrariar. Em terminais móveis esta não é uma boa solução pois o tamanho do terminal aumentava de forma significativa. Aumentar a frequência de operação reduziria o espaçamento entre as antenas, mas devido à falta de largura de banda no espectro de rádio frequência, esta também não é uma boa solução. Uma técnica muito em estudo na actualidade designada de MIMO Distribuído [9] pode ser a solução para o espaçamento entre as antenas imposto num terminal MIMO. O MIMO Distribuído consiste em encarar um conjunto de terminais móveis como sendo os vários elementos do *transceiver*.

Comparativamente com a tecnologia MIMO, a MIMO Distribuído têm a desvantagem de necessitar de um maior processamento de informação no móvel, para controlar os sinais em outros móveis que se referem a recepção/transmissão do próprio. Este aumento da complexidade no tratamento da informação pode ser bastante significativo, visto que em MIMO a complexidade do processamento de informação já é elevada. No entanto a nível de hardware é menos complexo, pois uma antena por terminal móvel é suficiente. Como não há necessidade de duas antenas no mesmo terminal poupa-se espaço e energia, que são dois itens extremamente importantes num terminal móvel.

VII. TRABALHO FUTURO

Como continuação do trabalho aqui apresentado, os seguintes tópicos podem servir de trabalho futuro:

- Implementação dum simulador de canal MIMO baseado no modelo de Weichselberger.
- Medição dos elementos da matriz $\mathbf{H}$ experimentalmente.

- Comparação dos dados experimentais com os modelos: Kronecker, Weichselberger e GSCM.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Almers, E. Bonek, A. Burr, N. Czink, M. Debbah, V. Degli-Esposti, H. Hofstetter, P. Kyosti, D. Laurenson, G. Matz, A. F. Molisch, C. Oestges, and H. Ozcelik, "Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007.
- [2] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," The Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, 1948.
- [3] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P. J. Smith, and A. Naguib, "From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems," IEEE Journal On Selected Areas In Communications, vol. 21, pp. 281-302, 2003.
- [4] L. Zheng, and D. N. C. Tse, "Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple-Antenna Channels," IEEE Transactions On Information Theory, vol. 49, pp. 1073-1096, 2003.
- [5] J. P. Kermoal, L. Schumacher, K. I. Pedersen, P. E. Mogensen, and F. Frederiksen, "A Stochastic MIMO radio channel model with experimental validation," IEEE Journal On Selected Areas In Communications, vol. 20, pp. 1211-1226, 2002.
- [6] W. Weichselberger, M. Herdin, H. Özcelik, and E. Bonek, "A Stochastic MIMO Channel Model With Joint Correlation of Both Link Ends," IEEE Transactions On Wireless Communications, vol. 5, pp. 90-100, 2006.
- [7] F. P. Fontán, and P. M. Espiñeira, Modeling the Wireless Propagation Channel - A simulation approach with Matlab: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [8] H. Ozcelik, M. Herdin, W. Weichselberger, J. Wallace and E. Bonek, "Deficiencies of Kronecker MIMO radio channel model," Electronics Letters, pp. 1209-1210, 2003.
- [9] Q. Zhou, H. Zang and H. Dai, "Adaptive Spatial Multiplexing Techniques for Distributed MIMO Systems," 2004.