

CÁLCULO DA INTERFERÊNCIA DE SISTEMAS CELULARES CDMA USANDO ARRANJO DE ANTENAS

Sandra Kiomi Teshima* e Celso de Almeida*

Departamento de Comunicações – FEEC – UNICAMP

Caixa Postal: 6101, CEP: 13083-970, Campinas – SP

e-mail: sandra@decom.fee.unicamp.br, celso@decom.fee.unicamp.br

RESUMO

Neste trabalho é obtido um limitante inferior do valor médio e do desvio padrão da interferência em sistemas celulares CDMA onde a estação rádio base (ERB) utiliza um arranjo de antenas. Foram estudados arranjos lineares com diferentes números de elementos de antena e diferentes espaçamentos entre eles, bem como arranjos ortogonais também com diferentes espaçamentos. Foram obtidas expressões analíticas da função densidade de probabilidade, da média e do desvio padrão da interferência para arranjo lineares.

1. INTRODUÇÃO

Os serviços de comunicação rádio móvel tem sofrido um aumento na demanda, porém sem o correspondente acréscimo na faixa de frequência utilizada. Isto tem motivado o desenvolvimento de novas técnicas que consigam atingir uma eficiência espectral maior como, por exemplo, a tecnologia CDMA (*code division multiple access*). Porém este tipo de sistema é limitado pela interferência co-canal produzida por usuários da mesma célula e de células adjacentes, que quando reduzida traduz-se em aumento de capacidade do sistema. O arranjo de antenas é um conceito que pode ser aplicado em sistemas de comunicação rádio móvel justamente para se combater esta interferência co-canal.

Na referência [1] as interferências para um arranjo linear foram tratadas como tendo funções de densidade de probabilidade (FDP) de Bernoulli, o que, através de simulações iniciais, parecem não condizer com a realidade.

Neste trabalho foi feita uma estimativa das diferenças de fase do sinal dos usuários que chegam nos elementos de antenas e que permitirá uma análise da interferência causada pelos usuários como é mostrado na seção seguinte. Nas seções 3, 4 são apresentados os cálculos da média e do desvio padrão para os arranjos lineares e ortogonais respectivamente. Por fim, na seção 6 são apresentadas as conclusões.

2. CDMA E O ARRANJO DE ANTENAS

Os sistemas de comunicações sem fio baseados no esquema de múltiplo acesso por divisão em código (CDMA) usam a técnica de espalhamento espectral. Nesta técnica cada bit de informação a ser transmitido é multiplicado por uma seqüência de espalhamento PN (pseudo-aleatória), tornando o sinal transmitido em um sinal faixa larga e de baixa densidade

espectral. As seqüências PN utilizadas são distintas para cada usuário, razão pela qual são também conhecidos como assinatura do usuário e são usados para a separação de sinais.

No receptor o bit de informação recebido é novamente multiplicado pela seqüência, exatamente igual ao do transmissor. Esta operação contrai o sinal espalhado, recuperando a informação original. Enquanto isso a interferência que se soma ao sinal original é espalhado novamente e será eliminada, quase que totalmente, através de um filtro casado.

Este é o princípio do CDMA, uma técnica de múltiplo acesso por divisão em códigos, onde todos os usuários utilizam, ao mesmo tempo o mesmo espectro. Um dos fatores que limita a capacidade de sistemas CDMA é a interferência co-canal que pode ser reduzida com a utilização de um arranjo de antenas.

Um arranjo de antenas consiste de um conjunto de antenas espacialmente distribuídas. Em cada antena incide o sinal de diversos usuários com diferentes fases. A combinação apropriada dos sinais das antenas permite a redução da interferência.

A Figura 1 ilustra uma célula circular com uma estação rádio-base (ERB) ao centro. Esta ERB utiliza um arranjo linear de três antenas. Os elementos do arranjo são dispostos na direção horizontal com distância uniforme d entre os elementos. O ângulo θ caracteriza a posição do usuário em relação à linha de suporte dos elementos de antena.

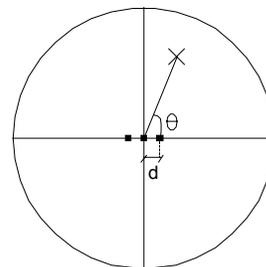


Figura 1 – Célula circular com arranjo linear de antenas

Supõe-se que as estações rádio-móveis (ERM) sejam distribuídas uniformemente na célula e que a distância e o ângulo em que cada uma delas se encontram são definidas por coordenadas polares. O sinal do usuário que estará sendo analisado chegará até o arranjo de antenas com uma diferença de fase entre os elementos do arranjo segundo o vetor [2]:

* Trabalho em parte apoiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

$$\vec{a}_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{M}} & \frac{e^{j\psi_i}}{\sqrt{M}} & \frac{e^{j2\psi_i}}{\sqrt{M}} & \dots & \frac{e^{jm\psi_i}}{\sqrt{M}} & \dots & \frac{e^{j(M-1)\psi_i}}{\sqrt{M}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde

$$\psi_i = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos(\theta_i) \quad (2)$$

M é o número de elementos do arranjo de antenas, θ é a posição angular do móvel na célula em relação à linha horizontal que suporta o arranjo, d é o espaçamento entre as antenas, $\lambda = c/f$ é o comprimento da onda eletromagnética, c é a velocidade da luz no ar e f a frequência da portadora do sinal.

Os elementos do vetor \vec{a} são normalizados por \sqrt{M} de modo a se garantir que o mesmo tenha norma unitária, onde entende-se por norma o módulo do produto escalar $\vec{a}_i \cdot \vec{a}_j^H$ onde H denota a operação conjugado transposto (Hermitiano), ou seja:

$$\left| \vec{a}_i \cdot \vec{a}_j^H \right|^2 = 1 \quad (3)$$

3. ARRANJOS LINEARES

Um usuário interferente j na posição θ_j produzirá no receptor associado ao usuário i na ERB uma potência de interferência proporcional a [1]:

$$\eta(\theta_i, \theta_j) = \left| \vec{a}_i \cdot \vec{a}_j^H \right|^2 = \left| \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} e^{jm\psi} \right|^2 = \left[\frac{1}{M} \frac{\text{sen} \frac{M\psi}{2}}{\text{sen} \frac{\psi}{2}} \right]^2 \quad (4)$$

onde

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} d (\cos\theta_i - \cos\theta_j) \quad (5)$$

O valor médio de η pode ser obtido pela dupla integração em θ_i e θ_j , ou seja:

$$\bar{\eta} = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \eta(\theta_i, \theta_j) p(\theta_i) p(\theta_j) d\theta_i d\theta_j \quad (6)$$

Esta integral dupla tem forma fechada que é dada por:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{M} + \frac{2}{M^2} \sum_{m=1}^{M-1} (M-m) J_0^2 \left(\frac{2\pi m d}{\lambda} \right) \quad (7)$$

onde $J_0(x)$ é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero. Supusemos uniforme as FDPs das posições das ERMs i e

j, ou seja, $p(\theta_i) = p(\theta_j) = \frac{1}{2\pi}$ para $-\pi \leq \theta_i \leq \pi$ e $-\pi \leq \theta_j \leq \pi$.

E considerando que $J_0^2 \left(\frac{2\pi m d}{\lambda} \right) \ll 1$, para $m \geq 1$ temos como valor aproximado da média:

$$\bar{\eta}_{\text{aprox}} \geq \frac{1}{M} \quad (8)$$

A Figura 2 ilustra o comportamento do valor médio da interferência em função do quociente $d/2\lambda$ e do número de antenas M. Observe que um espaçamento entre antenas levemente inferior a $\lambda/2$ propicia uma diminuição no valor médio da interferência.

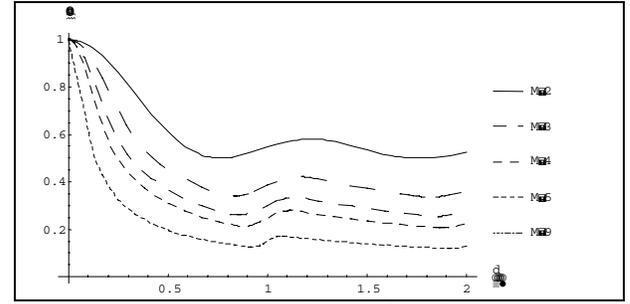


Figura 2 – Valor médio da interferência em função do quociente d/λ e do número de antenas M.

O valor quadrático médio de η pode ser obtido pela dupla integração em θ_i e θ_j , ou seja:

$$\overline{\eta^2} = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \eta^2(\theta_i, \theta_j) p(\theta_i) p(\theta_j) d\theta_i d\theta_j \quad (9)$$

Esta integral dupla é bem aproximada por:

$$\overline{\eta^2} \approx \frac{1}{M^2} + \sum_{m=1}^{M-1} \frac{2(M-m)^2}{M^4} + \sum_{m=1}^{M-1} \binom{2M-m+1}{3} J_0^2 \left(\frac{2\pi m d}{\lambda} \right) \quad (10)$$

Considerando, como na aproximação da média, que $J_0^2 \left(\frac{2\pi m d}{\lambda} \right) \ll 1$, o valor quadrático médio aproximado é dado por:

$$\overline{\eta^2} \geq \frac{1}{M^2} + \sum_{m=1}^{M-1} \frac{2(M-m)^2}{M^4} \quad (11)$$

E finalmente o desvio padrão é obtido a partir de:

$$\sigma_\eta = \sqrt{\overline{\eta^2} - (\bar{\eta})^2} \quad (12)$$

E o seu valor aproximado será:

$$\sigma_{\eta_{\text{aprox}}} \geq \sqrt{\frac{2}{M^4} \sum_{m=1}^{M-1} (M-m)^2} \quad (13)$$

3.1 CÁLCULO DA FDP DA INTERFERÊNCIA PARA 2 ANTENAS

A FDP de $y = \cos \theta$ para $p(\theta) = \frac{1}{2\pi}$ e $-\pi \leq \theta \leq \pi$ é dada por [3]:

$$p(y) = \frac{1}{\pi\sqrt{1-y^2}} \quad \text{para } -1 \leq y \leq 1 \quad (14)$$

A FDP de $z = \cos \theta_i - \cos \theta_j$ é dada pela convolução de duas FDPs idênticas à (14) onde $-2 \leq z \leq 2$. Como não existe uma expressão fechada para esta convolução, a Figura 3 mostra a fdp de z obtida numericamente, para $-2 \leq z \leq 0$.

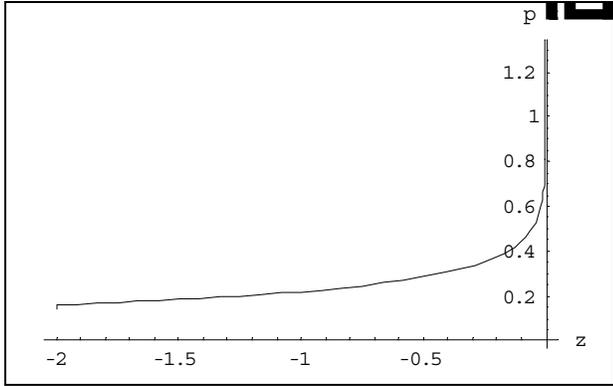


Figura 3 – Gráfico da FDP da variável z .

Apesar da variável z não ser constante em todo o seu domínio, ela é aproximadamente constante nos trechos de $-2 \leq \psi \leq 0$ e $0 \leq \psi \leq 2$. Assim, assumiremos que a variável z é uniformemente distribuída. Esta aproximação nos permitirá obter a FDP da variável η , bem como um limitante inferior no valor médio e no desvio padrão da interferência produzida em uma célula, que tem um arranjo linear de M antenas.

Para o caso em que $M=2$ e $d = \frac{\lambda}{2}$ temos que:

$$\eta = \left[\frac{\text{sen}(\pi z)}{2 \text{sen} \frac{\pi z}{2}} \right]^2 = \cos^2 \frac{\pi z}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\pi z) \quad (15)$$

onde usamos que $\psi = \pi z$. Através da transformação de variáveis aleatórias (v.a.) pode-se obter a função densidade de probabilidade de η para $M=2$ que é dada por:

$$p(\eta) = \frac{1}{\pi\sqrt{\eta(1-\eta)}} \quad (16)$$

A Figura 4 mostra a FDP de η para $M=2$, obtido através de simulação.

3.2 CÁLCULO DA FDP DA INTERFERÊNCIA PARA 3 ANTENAS

Para o caso em que $M=3$ temos que:

$$\eta = \frac{1}{3} + \frac{4}{9} \cos(\pi z) + \frac{2}{9} \cos(2\pi z) \quad (17)$$

Neste caso, a variável z é melhor modelada ainda como apresentando distribuição uniforme no terceiro termo de (17). Através da transformação de v.a., pode-se obter a FDP de η para $M=3$ que é dada por:

$$p(\eta) = \frac{1}{\pi\sqrt{\eta}\sqrt{\frac{1}{3} + \sqrt{\frac{4}{9}}\eta - \eta}} + \frac{1}{\pi\sqrt{\eta}\sqrt{\frac{1}{3} - \sqrt{\frac{4}{9}}\eta - \eta}} \quad (18)$$

para $0 \leq \eta \leq \frac{1}{9}$

e

$$p(\eta) = \frac{1}{\pi\sqrt{\eta}\sqrt{\frac{1}{3} + \sqrt{\frac{4}{9}}\eta - \eta}}, \quad \text{para } \frac{1}{9} \leq \eta \leq 1 \quad (19)$$

A Figura 5 mostra a FDP de η para $M=3$, também obtido através de simulação. Observe a existência de um ponto de singularidade em $\eta = \frac{1}{9}$.

Para mais de três antenas é impossível obter a FDP exata da interferência. Para quatro antenas, existem dois pontos de singularidade muito próximos, o que faz com que o esboço da FDP seja muito parecido com o que ocorre para três antenas. De modo geral, usando (17) podemos escrever que:

$$\eta = \frac{1}{M} + \sum_{m=1}^{M-1} \frac{2(M-m)}{M^2} \cos(m\pi z) \quad (20)$$

De onde se conclui que o valor médio aproximado da interferência produzida em uma célula é dado por:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{M} \quad (21)$$

se considerarmos que $\overline{\cos(m\pi z)} = 0$, ou seja, a suposição de que z é uniformemente distribuído nos fornece o mesmo valor médio aproximado obtido anteriormente por (8).

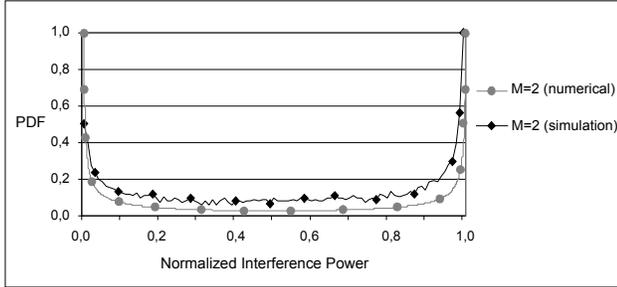


Figura 4 – FDP da interferência normalizada para um arranjo linear com M=2.

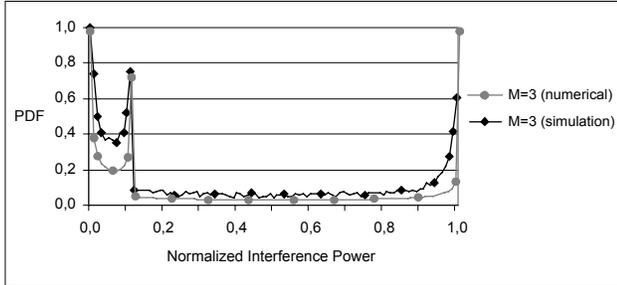


Figura 5 – FDP da interferência normalizada para um arranjo linear com M=3.

Por outro lado, o desvio padrão pode ser escrito como:

$$\sigma_{\eta} = \sqrt{\frac{2}{M^4} \sum_{m=1}^{M-1} (M-m)^2} \quad (22)$$

onde utilizamos que $\overline{\cos^2(\pi\tau z)} = \frac{1}{2}$, e que também reproduz o resultado conhecido anteriormente por (13).

Tabela 1 – Comparação entre valores exatos e aproximados do valor médio e do desvio padrão da interferência de um arranjo linear gerada em uma célula com espaçamento entre antenas de $d = \lambda/2$.

M	$\bar{\eta}$ Exata	$\bar{\eta}$ Aproximada	σ Exato	σ Aproximado
1	1	1	0	0
2	0,546	0,500	0,359	0,354
3	0,385	0,333	0,372	0,351
4	0,301	0,250	0,360	0,331
5	0,249	0,200	0,345	0,310
9	0,150	0,111	0,284	0,249

A Tabela 1 mostra uma comparação entre os valores exatos e aproximados da média e do desvio padrão da interferência em uma célula que se utiliza de um arranjo linear com espaçamento entre antenas de $d = \frac{\lambda}{2}$. Para a obtenção dos valores da média exata e aproximada utilizamos, respectivamente, as equações (7) e (8). Enquanto que os valores do desvio padrão exato e aproximado foram obtidos através das equações (12) e (13), respectivamente.

Observe que para M=1 não há rejeição de interferência pois neste caso não se tira o proveito de um arranjo de antenas, o que significa que 100% da interferência produzida por tanto por usuários da mesma célula quanto por usuários de células adjacentes entram no receptor.

Tabela 2 – Comparação entre valores exatos e aproximados do valor médio e do desvio padrão da interferência gerada em uma célula com espaçamento entre antenas normalizado em relação $2d/\lambda$, que apresenta menor valor médio de interferência para um arranjo linear.

M	$\frac{2d}{\lambda}$	$\bar{\eta}$ Exata	$\bar{\eta}$ Aproximada	σ Exato	σ Aproximado
2	0,765	0,500	0,500	0,363	0,353
3	0,818	0,340	0,333	0,364	0,351
4	0,856	0,261	0,250	0,345	0,331
5	0,878	0,213	0,200	0,327	0,310
9	0,924	0,126	0,111	0,218	0,249

A Tabela 2 mostra uma comparação entre os valores exatos e aproximados da média e do desvio padrão da interferência em uma célula que se utiliza de um arranjo linear com espaçamento entre antenas normalizado a $\frac{2d}{\lambda}$ que fornece a menor média da interferência. Observe que o valor médio da interferência varia com o valor de d e o valor ótimo será, em geral, ligeiramente inferior ao valor em $\lambda/2$.

4. ARRANJOS ORTOGONAIS

Dispusemos agora as antenas em dois eixos ortogonais entre si (cruz) como mostra a Figura 6.

Para esta disposição temos que η , para M par, será dado por:

$$\eta = \frac{1}{M} + \frac{1}{M^2} \sum_{q=0}^{\frac{M-4}{2}} (M-2-2q) \{ \cos[(q+1)\psi] + \cos[(q+1)\xi] \} + \frac{8}{M^2} \sum_{k=0}^{\frac{M-4}{2}} \sum_{p=0}^{\frac{M-4}{2}} \cos\left[\frac{2p+1}{2}\psi\right] \cos\left[\frac{2k+1}{2}\xi\right] \quad (23)$$

e para M ímpar:

$$\eta = \frac{1}{M} + \frac{1}{M^2} \sum_{q=0}^{\frac{M-3}{2}} (M-1-2q) \{ \cos[(q+1)\psi] + \cos[(q+1)\xi] \} + \frac{8}{M^2} \sum_{k=1}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{p=1}^{\frac{M-1}{2}} \cos[p\psi] \cos[k\xi] \quad (24)$$

onde $\xi = \frac{2\pi}{\lambda} d(\sin\theta_i - \sin\theta_j)$ e ψ é dado por (5):

A média exata será para M par:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{M} + \frac{2}{M^2} \sum_{q=0}^{\frac{M-4}{2}} (M-2-2q) J_0^2[0, (q+1)\pi] + \frac{8}{M^2} \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{k=0}^{\frac{M-4}{2}} \sum_{p=0}^{\frac{M-4}{2}} \cos\left[\frac{2p+1}{2}\psi\right] \cos\left[\frac{2k+1}{2}\xi\right] d\theta_i d\theta_j \quad (25)$$

Sendo M ímpar:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{M} + \frac{2}{M^2} \sum_{q=0}^{\frac{M-3}{2}} (M-1-2q) J_0^2[0, (q+1)\pi] + \frac{8}{M^2} \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{k=1}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{p=1}^{\frac{M-1}{2}} \cos[p\psi] \cos[k\xi] d\theta_i d\theta_j \quad (26)$$

A média aproximada será para M par:

$$\bar{\eta}_{\text{aprox}} = \frac{1}{M} + \frac{2}{M^2} \sum_{q=0}^{\frac{M-4}{2}} (M-2-2q) J_0^2[0, (q+1)\pi] \quad (27)$$

Sendo M ímpar:

$$\bar{\eta}_{\text{aprox}} = \frac{1}{M} + \frac{2}{M^2} \sum_{q=0}^{\frac{M-3}{2}} (M-1-2q) J_0^2[0, (q+1)\pi] \quad (28)$$

O valor quadrático médio, para M par, será:

$$\begin{aligned} \overline{\eta^2} &= \frac{1}{M^2} + \frac{4}{M^3} \sum_{q=0}^{\frac{M-4}{2}} (M-2-2q) J_0^2[0, (q+1)\pi] + \\ &+ \frac{1}{M^4} \sum_{q=0}^{\frac{M-4}{2}} (M-2-2q) (1 + J_0^2[0, (q+1)2\pi]) + \\ &+ \frac{4}{M^3 \pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{k=0}^{\frac{M-4}{2}} \sum_{p=0}^{\frac{M-4}{2}} \cos\left[\frac{2p+1}{2}\psi\right] \cos\left[\frac{2k+1}{2}\xi\right] + \\ &+ \frac{2}{M^4} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{q=0}^{\frac{M-4}{2}} (M-2-2q)^2 \cos[(q+1)\psi] \cos[(q+1)\xi] + \\ &+ \frac{16}{M^4} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{k=0}^{\frac{M-4}{2}} \sum_{p=0}^{\frac{M-4}{2}} (\cos\left[\frac{2p+1}{2}\psi\right] \cos\left[\frac{2k+1}{2}\xi\right])^2 + \\ &+ \frac{4}{M^4 \pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{q=0}^{\frac{M-4}{2}} \sum_{k=0}^{\frac{M-4}{2}} \sum_{p=0}^{\frac{M-4}{2}} (M-2-2q) \cos[(q+1)\psi] \cos[(q+1)\xi] \end{aligned}$$

$$\cos[(q+1)\psi] \cos[(q+1)\xi] d\theta_i d\theta_j \quad (29)$$

E para M ímpar:

$$\begin{aligned} \overline{\eta^2} &= \frac{1}{M^2} + \frac{4}{M^3} \sum_{q=0}^{\frac{M-3}{2}} (M-1-2q) J_0^2[0, (q+1)\pi] + \\ &+ \frac{1}{M^4} \sum_{q=0}^{\frac{M-3}{2}} (M-1-2q) (1 + J_0^2[0, (q+1)2\pi]) + \\ &+ \frac{4}{M^3 \pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{k=1}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{p=1}^{\frac{M-1}{2}} \cos[p\psi] \cos[k\xi] + \\ &+ \frac{2}{M^4} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{q=0}^{\frac{M-3}{2}} (M-1-2q)^2 \cos[(q+1)\psi] \cos[(q+1)\xi] + \\ &+ \frac{16}{M^4} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{k=1}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{p=1}^{\frac{M-1}{2}} (\cos[p\psi] \cos[k\xi])^2 + \\ &+ \frac{4}{M^4 \pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{q=0}^{\frac{M-3}{2}} \sum_{k=1}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{p=1}^{\frac{M-1}{2}} (M-1-2q) \cos[(q+1)\psi] \cos[(q+1)\xi] \end{aligned}$$

$$\cos[p\psi] \cos[k\xi] d\theta_i d\theta_j \quad (30)$$

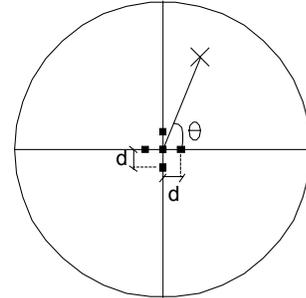


Figura 6– Célula circular com arranjo de antenas em cruz com M= 5.

A Tabela 3 mostra uma comparação entre os valores exatos e aproximados da média e do desvio padrão da interferência em uma célula que se utiliza de um arranjo ortogonal com espaçamento entre antenas de $d = \frac{\lambda}{2}$. Os valores exato e aproximado da média para M=4 foram obtidos por (25) e (27), enquanto que os valores do desvio padrão exato foi obtido por (29). Já para M= 5 e M= 9 os valores exatos e aproximados da média foram obtidos por (26) e (28) e os valores do desvio padrão foram obtidos através de (30).

Tabela 3 – Comparação entre valores exatos e aproximados do valor médio e do desvio padrão da interferência gerada em uma célula com arranjo ortogonal com espaçamento entre antenas de $d = \lambda/2$.

M	$\bar{\eta}$ Exata	$\bar{\eta}$ Aproximada	σ Exato
4	0,278	0,273	0,325
5	0,273	0,237	0,312
9	0,171	0,141	0,265

Tabela 4 – Comparação entre valores exatos e aproximados do valor médio e do desvio padrão da interferência gerada em uma célula com um arranjo ortogonal e espaçamento entre antenas normalizado em relação $2d/\lambda$, que apresenta menor valor médio de interferência.

M	$\frac{2d}{\lambda}$	$\bar{\eta}$ Exata	$\bar{\eta}$ Aproximada	σ Exato
4	1,00	0,278	0,273	0,325
5	0,90	0,212	0,237	0,262
9	0,87	0,128	0,141	0,218

A Tabela 4 mostra uma comparação entre os valores exatos e aproximados da média e do desvio padrão da interferência em uma célula que utiliza um arranjo linear com espaçamento entre antenas normalizado a $\frac{2d}{\lambda}$ que fornece a menor média da interferência.

5. CONCLUSÕES

Foram obtidas equações algébricas da média e do desvio padrão da interferência para arranjos lineares e ortogonais. Para os arranjos lineares ambas equações são bastante simples e foi possível obter boas aproximações. Já para os arranjos ortogonais foi possível também obter uma boa aproximação da média não acontecendo o mesmo para o desvio padrão, pois a equação é complexa.

Pôde-se observar que, do ponto de vista da média da interferência, o arranjo ortogonal tem um melhor desempenho para um número pequeno de antenas. Já quando um número maior de antenas é utilizado o arranjo linear torna-se mais interessante.

6. REFERÊNCIAS

- [1] A. F. Naguib, A. Paulraj and T. Kailath, 'Capacity Improvement with Base-Station Antenna Arrays in Cellular CDMA', IEEE Trans. Vehicular Tech., vol. 43, no. 3, Ago 1994.
- [2] S. Anderson, M. Millnert, M. Viberg, and B. Wahlberg, "An adaptive array for mobile communication systems," IEEE Trans. Veh. Technol., vol 40, no 1, pp. 230-236, Feb. 1991.
- [3] A. Papoulis – Probability, Random Variables, and Stochastic Processes – McGraw Hill.