

# Aplicação de Arranjo de Antenas em Comunicações Móveis

Luciano Ataíde Valle - Amauri Lopes  
FEEC - UNICAMP - SP

**Resumo**—Motivado pela expansão dos sistemas móveis, este trabalho apresenta uma visão geral das principais técnicas de aplicação de arranjo de antenas em comunicações celulares. Esta aplicação visa o aumento da capacidade e a melhoria na performance dos sistemas de telefonia móvel. Os conceitos de diversidade espacial e *beamforming* são apresentados juntamente com os métodos mais conhecidos de implementação de cada conceito. O processamento do sinal em cada método é representado por diagramas de blocos, possibilitando comparar suas limitações e vantagens. São analisadas as vantagens proporcionadas, caracterizando a potencialidade da aplicação do arranjo de antenas.

**Palavras-Chave**—Comunicações móveis, arranjo de antenas, *beamforming*, diversidade espacial.

## I. INTRODUÇÃO

Diante do rápido crescimento de usuários, associado à demanda por serviços mais sofisticados, tornou-se necessário aumentar a eficiência espectral dos sistemas móveis, e melhorar a qualidade do sinal transmitido. O desafio é encontrar técnicas capazes de superar “obstáculos”, como desvanecimento multipercurso, interferência inter-simbólica (IIS) e interferência inter-usuário (IIU), que prejudicam a performance dos sistemas celulares [1].

A recuperação dos sinais transmitidos/recebidos por diversos usuários em ambiente adverso constitui a meta das principais técnicas de processamento de sinais. A utilização de arranjo de antenas em comunicações móveis apresenta-se como opção para minimizar os efeitos de “obstáculos” que prejudicam a recuperação do sinal, resultando em melhoria significativa no desempenho dos sistemas móveis. Este trabalho apresenta as principais possibilidades de aplicação de arranjo de antenas em comunicações móveis, exibindo as etapas de processamento do sinal no *uplink* (transmissão do móvel para a Estação Rádio-Base (ERB)), e comenta as possíveis técnicas para o *downlink* (transmissão da ERB para o móvel). Relata as limitações de cada método, e os benefícios alcançados com a utilização do arranjo de antenas.

## II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A ampliação da capacidade dos sistemas celulares, juntamente com a melhoria em sua performance, é limitada, principalmente, pelo desvanecimento multipercurso, interferência inter-usuário, interferência inter-simbólica, e potência de transmissão. A utilização de arranjo de antenas em comunicações móveis é capaz de minimizar os efeitos destes fatores restritivos. Diversos métodos de utilização de arranjo de antenas foram desenvolvidos, e os principais serão apresentados após breve descrição do arranjo de antenas.

O arranjo de antenas é constituído por um conjunto de antenas omnidirecionais, onde o sinal recebido/transmitido é ponderado por um vetor  $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_N]^T$ , sendo que cada elemento  $w_i$  pondera o sinal em cada antena, e  $[\cdot]^T$  indica a operação de transposição. Neste trabalho, o emprego do arranjo de antenas será considerado apenas nas Estações Rádio-Base, pois sua utilização nos aparelhos móveis resulta em dispositivos maiores e mais caros, características indesejáveis para o mercado [2].

Supondo sinais de faixa estreita, o sinal em banda base,  $x_i(t)$ , recebido pela ERB (situação de *uplink*) através do  $i$ -ésimo elemento (antena) do arranjo, composto de  $N$  antenas, é dado por [3]

$$x_i(t) = \sum_{q=1}^Q \sum_{m=1}^M \alpha_{mq}(t) a_i(\varphi_{mq}) s_q(t - \tau_{mq}) + n_i(t) \quad (1)$$

onde  $Q$  representa o número de usuários;  $M$ , o número de percursos;  $\alpha_{mq}(t)$  representa o desvanecimento complexo no  $m$ -ésimo percurso do  $q$ -ésimo usuário;  $a_i(\varphi_{mq})$  é a resposta complexa do arranjo no  $i$ -ésimo elemento para o  $m$ -ésimo percurso do  $q$ -ésimo usuário da direção  $\varphi_{mq}$ ;  $s_q(\cdot)$  representa o sinal transmitido pelo  $q$ -ésimo usuário;  $\tau_{mq}$  é o atraso do  $m$ -ésimo percurso referente ao  $q$ -ésimo usuário; e  $n_i(t)$  é o ruído aditivo. Considerando uma modulação linear, o sinal transmitido em banda-base é dado por

$$s_q(t) = \sum_n g(t - nT) b_q(n) \quad (2)$$

onde  $g(\cdot)$  representa um pulso retangular com período de duração  $T$ , e  $b_q(n)$  é a seqüência de *bits* de informação associada ao  $q$ -ésimo usuário.

A combinação dos sinais  $x_i(t)$  ponderados pelos pesos  $w_i$  de cada antena resulta no sinal  $y(t)$  de saída do arranjo, dado por

$$y(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) \quad (3)$$

onde o índice  $H$  indica transposto conjugado, e o vetor  $\mathbf{x}(t)$  é composto pelos sinais da eq. (1).

A implementação do arranjo de antenas tem objetivos distintos quando recebendo sinais (situação de *uplink*) em contraste com a transmissão de sinais (situação de *downlink*). No caso de *uplink*, o arranjo de antenas combina os sinais recebidos em cada antena através do vetor  $\mathbf{w}$  objetivando criar melhores condições de recepção. Para o *downlink*, os sinais são combinados através de  $\mathbf{w}$  com o intuito de melhorar a qualidade do sinal que chega ao móvel. A obtenção do vetor  $\mathbf{w}$  é realizada por diferentes métodos para os casos de *uplink*

e *downlink*, resultando em vetores  $\mathbf{w}$  distintos para a recepção e transmissão do sinal.

A utilização do arranjo de antenas em comunicação móveis é baseada em dois conceitos: diversidade espacial e *beamforming*. Cada conceito possui suas propostas para obtenção do vetor  $\mathbf{w}$  adequado. Os métodos são apresentados a seguir.

### III. DIVERSIDADE ESPACIAL

A diversidade espacial explora a existência de múltiplos percursos descorrelacionados em ambiente sem fio com o objetivo de minorar os efeitos do desvanecimento gerado pela propagação do sinal através de vários percursos simultâneos. Emprega antenas separadas espacialmente, utilizando arranjo de antenas, para que as réplicas do sinal (propagação múltipercursos) incidam sobre cada antena com desvanecimento independente, minimizando a probabilidade de profundo desvanecimento do sinal em todas as antenas ao mesmo tempo. O arranjo de antenas combina os sinais independentes recebidos por cada elemento para compor o sinal de saída [4].

A distância entre os elementos do arranjo deve garantir que o sinal em cada antena seja independente dos demais, ou, ao menos, descorrelacionados, evitando o mesmo desvanecimento do sinal em todos elementos. Esta distância depende da largura típica do feixe contendo os múltiplos percursos (espalhamento angular) que incide sobre o arranjo.

A combinação dos sinais realizada pelo arranjo de antenas com a implementação de diversidade espacial resulta em um aumento significativo da relação sinal-ruído (*SNR - Signal-to-Noise Ratio*) do sinal recebido, possibilitando uma redução de potência dos transmissores da ERB e do móvel. Tal redução resulta em menor interferência inter-usuário, possibilitando o aumento da capacidade do sistema, e no aumento da vida útil da bateria do móvel [5]. A capacidade do sistema é ampliada apenas pela redução da interferência inter-usuário, pois os métodos de acesso tradicionais, como *FDMA (Frequency Division Multiple Access)*, *TDMA (Time Division Multiple Access)* e *CDMA (Code Division Multiple Access)*, permanecem os mesmos utilizados nos sistemas que não empregam diversidade espacial.

O processamento para a recuperação do sinal no *uplink* utilizando diversidade espacial é representado pelo diagrama de blocos da Figura 1. Os blocos desta figura serão descritos na seqüência.

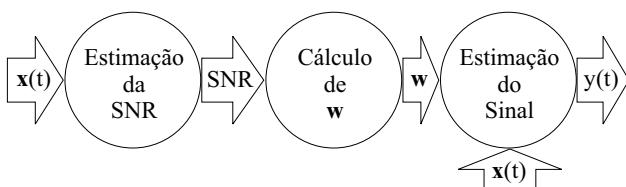


Fig. 1. Diagrama de processamento do sinal utilizando diversidade espacial no *uplink*.

Após a recepção dos sinais descorrelacionados  $x_i(t)$ , mede-se o nível de potência total do sinal mais ruído ( $S+N$  - *Signal+Noise*) em cada receptor conectado a cada antena. Embora fosse desejável avaliar a relação sinal-ruído (*SNR*)

instantânea do sinal, esta é uma difícil tarefa que resultaria em aumento da complexidade computacional sem alcançar ganho significativo. A utilização da potência total é viável por considerar-se que a potência média do ruído é a mesma em todos os elementos do arranjo [4], caracterizando um ruído estacionário e independente dos canais. Os critérios para a obtenção do vetor  $\mathbf{w}$  são baseados na potência total ( $S+N$ ) medida, e dão nome aos métodos de diversidade espacial. Os principais critérios para a obtenção de  $\mathbf{w}$  são: seleção, combinação por máxima razão (*MRC - Maximal Ratio Combining*) e combinação com mesmo ganho (*EGC - Equal Gain Combining*) [6]. Através do vetor  $\mathbf{w}$  determinado por qualquer um destes critérios, estima-se o sinal de saída segundo a eq. (3).

No *downlink*, o objetivo é transmitir, através de cada elemento do arranjo de antenas, réplicas do sinal descorrelacionadas entre si, disponibilizando ao receptor do móvel cópias do sinal transmitido com níveis de desvanecimentos diferenciados. Este procedimento reduz significativamente a possibilidade dos sinais recebidos pelo móvel sofrerem profundo desvanecimento ao mesmo tempo. Os principais métodos de transmissão em diversidade espacial podem ser encontrados em [7].

Em sistemas *indoor*, o espalhamento angular é tipicamente de  $360^\circ$ , devido à grande quantidade de objetos em torno do receptor. O espaçamento de  $1/4$  de comprimento de onda ( $\lambda$ ) entre os elementos do arranjo é suficiente para que os sinais cheguem descorrelacionados em cada antena [4]. Entretanto, em sistemas *outdoor*, o espalhamento angular próximo à ERB é tipicamente de  $1^\circ$  em áreas rurais planas, devido à grande altura do receptor da ERB em relação ao móvel e/ou à ausência de objetos em torno do receptor. Em áreas urbanas, o espalhamento angular típico é de  $20^\circ$ , devido à existência de construções em torno da ERB [3]. Portanto, em sistemas *outdoor*, o espaçamento entre os elementos deve ser significativamente maior para que os sinais cheguem descorrelacionados em cada antena do arranjo. Tipicamente, deve ser de 10 a 20 comprimentos de onda [1]. Logo, a utilização de técnicas de diversidade espacial em sistemas *indoor* é beneficiada pelo meio de propagação, possibilitando a montagem do arranjo de antenas em pequenos espaços, mesmo em arranjos com mais de duas antenas. Por outro lado, a utilização de diversidade espacial nos sistemas *outdoor* pode ser de difícil implementação, devido à necessidade de maiores espaçamentos inter-elementos, principalmente para arranjos com mais de duas antenas.

Diversidade espacial é eficiente no combate ao desvanecimento na ausência de interferência comum a todas as antenas do arranjo, como a interferência inter-usuário. Em ambientes onde este tipo de interferência degrada a qualidade do sinal, a técnica de diversidade espacial não é capaz de prover melhor performance ao sistema [8].

Os sistemas celulares que utilizam tecnologias da Segunda Geração (2G), em geral, implementam técnicas de diversidade espacial apenas no *uplink*, utilizando duas antenas na composição do arranjo. Experimentos mostraram que ganhos de 8 a 11 dB podem ser alcançados com a utilização de diversidade espacial no *uplink* [9]. Por outro lado, as propostas

para a implementação da Terceira Geração (3G) de telefonia celular incluem em suas especificações (*International Mobile Telecommunications 2000 - IMT 2000*) a utilização de técnicas de diversidade espacial também para o *downlink*.

#### IV. BEAMFORMING

*Beamforming* é a técnica de simulação de uma antena direcional através da combinação de sinais em um arranjo de antenas, onde o diagrama de radiação é produzido eletronicamente para apontar em diferentes direções. O controle da formação do padrão de energia do arranjo é realizado através do vetor  $\mathbf{w}$ .

O espaçamento  $d$  entre os elementos do arranjo é condição essencial para a criação do *beamforming*. A distância entre as antenas deve ser tal que cada sinal incidente sobre o arranjo mantenha-se correlacionado em todos os elementos, e que evite a formação de lóbulos laterais da mesma dimensão do lóbulo principal no diagrama de radiação ( $d \leq \lambda/2$ ). Deve, também, garantir a formação do diagrama de radiação em todas as direções ( $d \geq \lambda/2$ ). Logo, o espaçamento que obedece tais exigências é de meio comprimento de onda ( $\lambda/2$ ) [10].

O objetivo da aplicação de *beamforming* em comunicações móveis é melhorar a qualidade do sinal apontando o padrão de energia (lóbulo principal) na direção do móvel desejado, e reduzir ao máximo a transmissão deste sinal nas direções dos outros móveis (“nulos” do padrão de radiação).

Os métodos para a utilização de *beamforming* em sistemas celulares são descritos abaixo.

##### A. *Beamforming Fixo (Multifeixe Chaveado)*

O *beamforming* fixo emprega configurações pré-determinadas de composição do vetor  $\mathbf{w}$  de modo a gerar um número pré-determinado de lóbulos principais fixos (estáticos). A cada situação, um deles é selecionado para a recepção ou transmissão do sinal. O *hardware* matriz de Butler [11], conectado ao arranjo de antenas, gera  $N$  padrões de radiação (lóbulos principais) independentes. Estes lóbulos independentes são fixos e adjacentes, possibilitando a cobertura de uma determinada área geográfica. Cada feixe (lóbulo principal) independente é capaz de receber/transmitir sinais distintos através de seu respectivo receptor/transmissor conectado ao *hardware* matriz de Butler. A transmissão/recepção do sinal é realizada através da seleção do “melhor” feixe, ou seja, aquele que contém o “melhor” sinal. Este sistema é chamado de Multifeixe Chaveado [12].

No *uplink*, como os lóbulos principais são adjacentes e existem múltiplos percursos, as diversas réplicas do sinal transmitido chegam ao arranjo de antenas com distintas direções. Logo, os diferentes feixes, gerados pelo *hardware* matriz de Butler, recebem cópias do sinal transmitido, possibilitando aos  $N$  receptores avaliar e selecionar o lóbulo com o “melhor” sinal para realizar a recepção.

Os critérios de seleção do lóbulo principal dependem da disponibilidade de um sinal conhecido *a priori* pelo receptor, denominado sinal de referência. Caso o sistema disponibilize tal sinal, avalia-se a taxa de erro de bit (*BER* - *Bit Error*

*Rate*) ou a relação sinal-interferência mais ruído (*SINR* - *Sinal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) das réplicas do sinal, e seleciona-se o receptor referente ao lóbulo que obtiver a menor *BER* ou a maior *SINR* para a recepção. Caso contrário, a seleção é realizada de acordo com a análise da relação sinal-ruído (*SNR*), e o receptor que obtiver a maior *SNR* é selecionado e o seu respectivo lóbulo é utilizado para a recepção [12].

No *downlink*, utiliza-se o mesmo feixe selecionado no *uplink*.

A natureza direcional dos lóbulos selecionados para transmissão/recepção possibilita reduzir potência tanto do móvel quanto da ERB. Tal redução implica em menor interferência inter-usuário, possibilitando o aumento da capacidade do sistema [13]. Estes benefícios são alcançados através de baixa complexidade e de custo reduzido, quando comparado ao arranjo ajustável de antenas, que será visto a seguir. Porém, esta técnica não é capaz de distinguir entre sinal desejado e interferente quando ambos encontram-se no mesmo lóbulo. Logo, a identificação do usuário deve ser realizada através dos métodos de acesso tradicionais, pois não é possível separar de forma eficiente através do posicionamento geográfico do móvel [5].

##### B. *Beamforming Ajustável*

O *beamforming* ajustável propõe a alteração dinâmica do vetor  $\mathbf{w}$  do arranjo de antenas com o intuito de gerar feixes capazes de “rastrear” o sinal desejado, e rejeitar os sinais interferentes.

A utilização do *beamforming* ajustável, em conjunto com técnicas de múltiplo acesso tradicionais como, *FDMA*, *TDMA* e *CDMA*, é denominada Redução de Interferência por Filtragem Espacial (*SFIR* - *Spacial Filtering for Interference Reduction*). Neste caso, o “canal físico” disponibilizado pelos métodos de acesso tradicionais permanece inalterado [14].

A possibilidade de “rastrear” o sinal de cada móvel viabiliza a identificação (separação) dos usuários por sua localização dentro da célula. Assim, usuários em posições distintas poderiam utilizar a mesma faixa de frequência e *slot* de tempo simultaneamente. Esta proposta constitui uma técnica de acesso alternativa denominada Acesso Múltiplo por Divisão no Espaço (*SDMA* - *Space Division Multiple Access*). Porém, sua implementação se torna inviável se nenhum outro método de acesso for utilizado em conjunto. O principal obstáculo no emprego do *SDMA* como única forma de acesso é a dependência em relação ao número de antenas, pois a largura do lóbulo principal produzido pelo arranjo é inversamente proporcional ao número de antenas. Logo, seria necessário um enorme número de antenas para identificar com precisão todos os usuários. Considerando tal obstáculo, o *SDMA* também é implementado em conjunto com as técnicas de acesso tradicionais. Porém, é diferenciado da proposta *SFIR* pelo compartilhamento do “canal físico” por mais de um usuário, os quais são separados por sua posição geográfica dentro da célula. No entanto, o número de usuários a compartilhar o mesmo “canal físico” deve ser da ordem de algumas unidades, para que a restrição quanto ao número de antenas não torne inviável sua utilização [14].

A capacidade dos métodos de *beamforming* ajustável de “rastrear” o posicionamento do móvel desejado na transmissão/recepção pode trazer melhorias significativas à performance dos sistemas celulares. A natureza diretiva do padrão de radiação do *beamforming* reduz o desvanecimento multipercurso, e como conseqüência, reduz a interferência intersimbólica causada pelo espalhamento em atraso. A possibilidade de rastreamento do móvel e criação de “nulos” em outras direções reduz a interferência inter-usuário (proposta *SFIR*) ou compartilha cada canal com mais um usuário (proposta *SDMA*), resultando em melhoria na qualidade do sinal e no aumento da eficiência espectral do sistema.

O *beamforming* ajustável pode ser implementado através das seguintes propostas para o ajuste dinâmico do vetor  $\mathbf{w}$ : Seqüência de Treinamento, Característica Espacial e Característica Temporal. Estas propostas são apresentadas a seguir.

1) *Seqüência de Treinamento*: A implementação do *beamforming* ajustável pode ser realizada através do conhecimento *a priori* de parte do sinal transmitido, conhecido como seqüência de treinamento ou sinal de referência. A disponibilidade de seqüências de treinamento possibilita a obtenção do vetor  $\mathbf{w}$  conforme descrito a seguir.

Dado um sinal de referência  $r_q(t)$ , é gerado um sinal de erro entre o sinal de saída do arranjo e o sinal de referência. O vetor  $\mathbf{w}$  é ajustado dinamicamente através da minimização quadrática média do sinal de erro [15], o que faz com que o lóbulo principal seja dinamicamente apontado na direção do móvel desejado. Este método apresenta grande robustez e precisão na obtenção do vetor  $\mathbf{w}$  [3].

O processamento do sinal para a geração do lóbulo principal do arranjo de antenas na direção do móvel desejado utilizando seqüência de treinamento no *uplink*, é representado pelo diagrama de blocos da Figura 2. Os blocos desta figura serão descritos na seqüência.

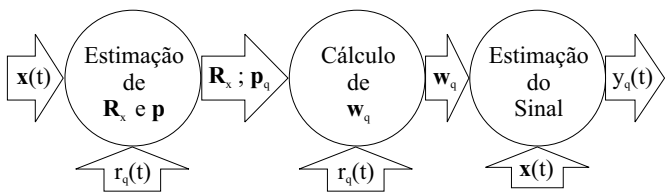


Fig. 2. Diagrama de processamento do sinal utilizando seqüência de treinamento no *uplink*.

Após a recepção dos sinais incidentes no arranjo, estima-se a matriz de correlação  $\mathbf{R}_x$  do sinal recebido, e o vetor de correlação cruzada  $\mathbf{p}_q$  entre o sinal recebido  $\mathbf{x}(t)$  e o sinal de referência  $r_q(t)$  do  $q$ -ésimo usuário. O vetor  $\mathbf{w}_q$  é calculado segundo a equação de Wiener [16], minimizando o erro quadrático médio entre o sinal de referência do usuário desejado e o sinal de saída do arranjo. Algoritmos adaptativos, como *LMS* (*Least Mean Square*), *RLS* (*Recursive Least Square*) e *SMI* (*Sample Matrix Inverse*) [16] utilizam a seqüência de treinamento disponível para a atualização dinâmica do vetor  $\mathbf{w}_q$ . Através do vetor  $\mathbf{w}_q$  determinado, estima-se o sinal de saída do arranjo referente ao  $q$ -ésimo usuário, dado por

$$y_q(t) = \mathbf{w}_q^H \mathbf{x}(t) \quad (4)$$

No *downlink*, o objetivo permanece o mesmo do *uplink*. Porém, no sentido de transmissão ERB - Móvel é necessário um conhecimento *a priori* do canal de transmissão para a determinação do lóbulo principal na direção correta do móvel desejado.

O processamento do sinal para o *downlink* depende diretamente da técnica de duplexação utilizada. Em sistemas com duplexação por divisão no tempo (*TDD - Time Division Duplex*), onde os canais de *uplink* e *downlink* utilizam a mesma faixa de frequência, as características de propagação do canal de *uplink* podem ser consideradas as mesmas do canal de *downlink*, pois, em geral, o intervalo de tempo entre eles é menor que o tempo de coerência do canal<sup>1</sup>. Logo, o mesmo vetor  $\mathbf{w}$  determinado no processamento de *uplink* pode ser utilizado para o *downlink*. Em sistemas com duplexação por divisão em frequência (*FDD - Frequency Division Duplex*), onde os canais de *uplink* e *downlink* utilizam faixas de frequência distintas, existirá independência entre os canais de *uplink* e *downlink*, pois, em geral, a largura de banda em frequência entre eles é superior a largura de banda de coerência do canal<sup>2</sup> [17]. Neste caso, é necessário estimar o canal de *downlink* para o cálculo do vetor  $\mathbf{w}$ . Esta estimação pode ser realizada através da técnica de Realimentação [18].

O uso da seqüência de treinamento na recepção/transmissão do sinal reduz a utilização do espectro disponível para informação, e, para algumas técnicas, requer sincronismo com o sinal transmitido pelo móvel, dificultando sua implementação [17].

2) *Característica Espacial*: A implementação do *beamforming* ajustável pode ser realizada com base na localização geográfica do móvel dentro da célula. A estimação do posicionamento do móvel é realizada conhecendo-se a direção de chegada de seu sinal em relação ao arranjo de antenas, a qual, por sua vez, é obtida através da característica espacial do sinal. A estimativa da direção de chegada (*DOA - Direction of Arrival*) do sinal é utilizada no cálculo do vetor  $\mathbf{w}$  com o objetivo de posicionar ambos, o lóbulo principal na direção do móvel desejado e os “nulos” na direção dos móveis interferentes. Tal proposta torna desnecessária a utilização de seqüências de treinamento, resultando em aumento do espectro de frequência disponível para informação.

O processamento do sinal para o rastreamento do lóbulo principal do arranjo de antenas na direção do móvel desejado utilizando a característica espacial no *uplink*, é representado pelo diagrama de blocos da Figura 3. Os blocos desta figura serão descritos na seqüência.

As direções de chegada são estimadas através da matriz de correlação  $\mathbf{R}_x$  do sinal recebido. Assim, após a recepção dos sinais incidentes no arranjo, estima-se a matriz de correlação. Os métodos de estimação *DOA* que utilizam decomposição de  $\mathbf{R}_x$  em valores singulares (*SVD - Single Value Decompo-*

<sup>1</sup>O tempo de coerência do canal representa a separação temporal na qual a resposta do canal em dois instantes distintos permanece fortemente correlacionados. É definido pelo espalhamento *Doppler*, pois são grandezas inversamente proporcionais.

<sup>2</sup>A largura de banda de coerência do canal representa a separação máxima em frequência na qual a resposta do canal em duas frequências distintas permanecem fortemente correlacionada. É definida pelo espalhamento em atraso, pois são grandezas inversamente proporcionais.

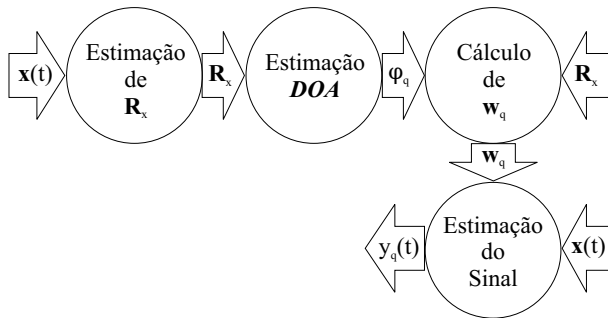


Fig. 3. Diagrama de processamento do sinal utilizando característica espacial no *uplink*.

*sition*) dependem do número de sinais incidentes no arranjo. Como a estimação da matriz de correlação introduz algumas distorções devido ao número finito de amostras, é necessário a introdução de um estimador para o número de sinais incidentes. Os métodos que podem ser utilizados para esta estimação são: *MDL (Minimum Description Length)* [19], *AIC (Akaike's Information Criterion)* [19], e o método proposto por Xu [19]. Após a obtenção do número de sinais, realiza-se a estimativa *DOA* dos sinais incidentes através de um dos seguintes métodos: *MUSIC (Multiple Signal Classification)* [20], *ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique)* [21], *MV (Máxima Verossimilhança)* [20], entre outros. No caso da implementação de *SDMA*, pequenas seqüências de treinamento identificam a qual usuário pertence a direção do sinal estimado. Após a identificação dos usuários e determinação do usuário desejado, o cálculo do vetor  $\mathbf{w}_q$  pode ser realizado através de critérios de otimização, como: *beamforming* convencional [20], *MVDR (Minimum Variance Distortionless Response)* [20], *MMSE (Minimum Mean Squared Error)* [15], *SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio)* [15], entre outros. Através do vetor  $\mathbf{w}_q$  determinado, estima-se o sinal de saída do arranjo referente ao  $q$ -ésimo usuário segundo a eq. (4).

A estimativa *DOA* obtida no *uplink* é usada diretamente no processamento do sinal referente ao *downlink*, pois considera-se que o deslocamento do móvel é mínimo entre o intervalo de recepção e transmissão do sinal [17]. Logo, não é necessário métodos para estimar o "canal" de *downlink*, simplificando o processamento do sinal.

A implementação da característica espacial é limitada por alguns fatores, como: o número de antenas deve ser superior ao número de sinais incidentes no arranjo para a estimação precisa dos ângulos de chegada dos sinais incidentes, o que dificulta sua implementação em meio multipercursivo; os métodos utilizados na estimativa *DOA* exigem alta complexidade computacional; baixo espalhamento angular é exigido, pois reduz significativamente a possibilidade de estimativa *DOA* referente a percursos que não correspondem à verdadeira direção de chegada do móvel; e ainda, devido à diferença existente entre os padrões de radiação das antenas do arranjo, supostos idênticos, e devido à influência do acoplamento

mútuo<sup>3</sup> existente entre as antenas, é necessário calibrar<sup>4</sup> o arranjo periodicamente, evitando erros em suas estimativas [17].

A restrição quanto ao número de sinais em relação ao número de antenas pode ser amenizada através de métodos capazes de estimar a direção de chegada de um ângulo central e um pequeno espalhamento angular em torno de tal ângulo, possibilitando o cálculo do vetor  $\mathbf{w}$  para guiar o feixe principal na direção do ângulo central, supondo que seja este o posicionamento correto do móvel. Neste método, os múltiplos percursos que chegam ao arranjo com valores dos ângulos de chegada próximos (baixo espalhamento angular) não são considerados sinais distintos, mas são considerados como uma direção de chegada. Logo, mesmo que o número de múltiplos percursos em torno dos ângulos centrais seja superior ao de antenas, é possível estimar a direção do sinal do móvel desejado através da obtenção do ângulo central. Porém, o número de ângulos centrais estimados ainda deve obedecer a restrição quanto ao número de antenas, ou seja, deve ser inferior ao número de elementos do arranjo [23].

3) *Característica Temporal*: O conhecimento de propriedades estatísticas (características temporais) do sinal recebido pelo arranjo de antenas pode ser utilizado para a implementação do *beamforming* ajustável. Tais propriedades possibilitam estimar informações que caracterizam o canal móvel dos usuários. O conhecimento do canal possibilita o cálculo do vetor  $\mathbf{w}$  através de critérios de otimização, visando compensar os efeitos do meio de transmissão para recuperar com qualidade os sinais recebidos. Métodos que utilizam características temporais são chamados de métodos de estimação cega, pois tornam desnecessária a estimação *DOA* e o uso de seqüências de treinamento na obtenção do vetor  $\mathbf{w}$ .

Uma das principais técnicas de estimação cega explora a propriedade do módulo constante de sinais digitais, dando origem ao algoritmo do módulo constante (*CMA - Constant Modulus Algorithm*). Este método visa a manutenção da propriedade do módulo constante para realizar a recepção de sinais distorcidos pelo meio, restaurando o sinal recebido através de equalização temporal (filtro *FIR - Finite Impulse Response*) [24]. A implementação do *CMA* juntamente com arranjo de antenas resulta em equalização espaço-temporal, possibilitando o desenvolvimento do algoritmo do módulo constante multiusuário (*MU CMA - MultiUser CMA*). Tal proposta possibilita minimizar a degradação imposta pelo meio, juntamente com a recuperação do sinal referentes a múltiplos usuários compartilhando o mesmo canal, segundo o critério do módulo constante [25], resultando no ajuste dinâmico do direcionamento do padrão de radiação. A equalização espaço-temporal transforma o vetor  $\mathbf{w}$  em matriz  $\mathbf{W}$ .

O *CMA* espaço-temporal não exige calibração do arranjo de antenas, nem um baixo espalhamento angular, pois não estima direções de chegada do sinal. O cálculo da matriz  $\mathbf{W}$  do

<sup>3</sup>Acoplamento mútuo é a interação entre os elementos do arranjo de antenas, onde a proximidade entre as antenas gera tensão induzida umas sobre as outras, alterando os níveis de corrente normais de cada antena [22].

<sup>4</sup>Calibrar o arranjo de antenas é incluir na estimação dos ângulos de chegada uma correção em seus valores devido aos possíveis erros causados pela diferença existente entre as antenas e pelo acoplamento mútuo [17].

*MU CMA* possui baixa complexidade computacional quando comparado aos métodos baseados em característica espacial (estimativa *DOA*) [25].

O processamento do sinal para a recuperação do sinal recebido no *uplink* utilizando *CMA* espaço-temporal, é representado pelo diagrama de blocos da Figura 4. Os blocos desta figura serão descritos na seqüência.

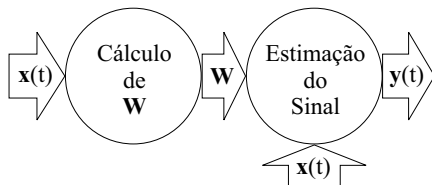


Fig. 4. Diagrama de processamento do sinal utilizando *MU CMA* no *uplink*.

Após a recepção dos sinais incidentes no arranjo, a matriz  $\mathbf{W}$  é estimada diretamente segundo o critério do módulo constante, onde a minimização da função custo referente ao *MU CMA* gera o algoritmo adaptativo para o cálculo de  $\mathbf{W}$  e sua atualização dinâmica [25]. Através da matriz  $\mathbf{W}$  determinada, estima-se o sinal de saída do arranjo, dado por

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W} \mathbf{x}(t) \quad (5)$$

onde os elementos do vetor de saída  $\mathbf{y}(t)$  representam os sinais referentes a cada usuário para a proposta *SDMA*. Para a proposta *SFIR*, a matriz  $\mathbf{W}$  volta a ser o vetor  $\mathbf{w}$ .

A implementação do *CMA* espaço-temporal com o objetivo de separar os usuários na proposta *SDMA* possui restrições quanto ao número de usuários compartilhando o mesmo canal. A separação dos usuários será realizada com eficiência apenas se o número de usuário for inferior ou igual ao número de antenas [25].

Em geral, na América do Norte, Europa e Ásia, os sistemas celulares que utilizam tecnologias da Segunda Geração (2G) implementam técnicas de *beamforming* em pequena escala, com o objetivo de verificar sua eficiência, e avaliar a possibilidade de implementação em maior escala. Isto porque os equipamentos com *beamforming* são de custo elevado quando comparados aos equipamentos tradicionais. As propostas da Terceira Geração (3G) de telefonia celular incluem em suas especificações (*International Mobile Telecommunications 2000 - IMT 2000*) a implementação das técnicas de *beamforming* para a melhoria da performance do sistema.

## V. CONCLUSÃO

A utilização de arranjo de antenas em comunicações móveis surge como importante ferramenta para a melhoria da performance dos sistemas celulares. A implementação do arranjo possibilita ampliação da capacidade do sistema e a melhoria da qualidade de transmissão do sinal de comunicação móvel. Neste trabalho foram apresentados os principais métodos referentes à aplicação de arranjo de antenas em comunicações móveis, juntamente com o processamento do sinal na situação de *uplink* para cada método. Dentre as várias alternativas apresentadas neste trabalho, a escolha do método adequado deve considerar se o meio de propagação é favorável, pois a

rápida variação do canal móvel associado ao atraso multipercurso e ao espalhamento angular oferecem um significativo desafio. Outro aspecto a ser avaliado na escolha do método é a complexidade do sistema de processamento do sinal, pois as diferenças também são significativas. O desenvolvimento da implementação de arranjo de antenas em comunicações móveis vai em direção à técnicas robustas de processamento de sinal, caracterizando sua performance em sistemas celulares.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. H. Winters. "Smart Antennas for Wireless Systems". *IEEE Personal Communications*, Fevereiro 1998.
- [2] S. M. Alamouti. "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications". *IEEE Journal on Select Areas in Communications*, 1998.
- [3] A. J. Paulraj; C. B. Papadias. "Space-Time Processing for Wireless Communications". *IEEE Signal Processing Magazine*, Novembro 1997.
- [4] W. C. Jakes. *Microwave Mobile Communications*. IEEE Press, 1994.
- [5] A. J. Paulraj; D. Gesbert; C. Papadias. "Smart Antennas for Mobile Communications". *Encyclopedia for Electrical Engineering, John Wiley Publishing CO.*, 2000.
- [6] T. S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 1996.
- [7] R. T. Derryberry; S. D. Gray; D. M. Ionescu; G. Mandyam; B. Raghathan. "Transmit Diversity in 3G CDMA Systems". *IEEE Communications Magazine*, Abril 2002.
- [8] L. C. Godara. "Applications of Antennas Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility, and System Considerations". *Proceedings of the IEEE*, Julho 1997.
- [9] C. B. Dietrich Jr.; W. L. Stutzman; B. Kim; K. Dietze. "Smart Antennas in Wireless Communications: Base-Station Diversity and Handset Beamforming". *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Outubro 2000.
- [10] S. U. Pillai. *Array Signal Processing*. Springer-Verlag New York Inc., 1989.
- [11] J. Butler; R. Lowe. "Beam-Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas". *Electronic Design*, 1961.
- [12] H. Novak. *Switched-Beam Adaptive Antenna System*. PhD thesis, Viena University, 1999.
- [13] A. U. Bhojbe; P. L. Perini. "An Overview of Smart Antenna Technology for Wireless Communication". *IEEE*, 2000.
- [14] E. Buracchini. "SDMA in Mobile Systems: Capacity Enhancement in GSM and IS-95".
- [15] A. F. Naguib. *Adaptive Antennas for CDMA Wireless Networks*. PhD thesis, Stanford University, 1996.
- [16] S. Haykin. *Adaptive Filter Theory*. Prentice-Hall, 1995.
- [17] J. Baltersee. "Smart Antennas and Space-Time Processing". Technical report, Aachen University Technology, Maio 1998.
- [18] D. Gerlach; A. Paulraj. "Adaptive Transmitting Antenna Arrays with Feedback". *IEEE Signal Processing Letters*, Outubro 1994.
- [19] A. S. Boaventura. "Avaliação de Métodos de Estimação da Direção de Chegada de Sinais em Sistemas de Comunicações Celulares". Master's thesis, PUC-Rio, 1998.
- [20] H. Krim; M. Viberg. "Two Decades of Array Signal Processing Research". *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996.
- [21] L. C. Godara. "Applications of Antennas Arrays to Mobile Communications, Part II: Beam-Forming and Direction-of-Arrival Considerations". *Proceedings of the IEEE*, 1997.
- [22] S. Robert. "Receiver Imperfections and Calibration of Adaptive Antennas". Master's thesis, Viena University, 1998.
- [23] S. Forcellini. "Antenas Inteligentes para Comunicações Móveis". Master's thesis, Universidade de São Paulo, 2001.
- [24] Francisco R. P. Cavalcanti. *Antenas Inteligentes e Processamento Espaço-Temporal Para Sistemas de Comunicação Sem Fio*. PhD thesis, UNICAMP, Julho 1999.
- [25] C. B. Papadias; A. J. Paulraj. "A Constant Modulus Algorithm for Multiuser Signal Separation in Presence of Delay Spread Using Antenna Arrays". *IEEE Signal Processing Letters*, Junho 1997.