

## Um novo esquema de recepção MLSE adaptativo aplicado a canais rádio móveis

Juraci F. Galdino e Ernesto L. Pinto\*

### RESUMO

Neste artigo são abordadas técnicas de recepção de seqüências de símbolos adaptativas baseadas no critério de máxima verossimilhança e que empregam o princípio do processamento por percurso sobrevivente (*maximum-likelihood sequence estimation using per survivor processing* - MLSE-PSP) [1]. Propõe-se um novo esquema de recepção MLSE-PSP utilizando filtro de *Kalman* (FK) com modelo auto-regressivo de segunda ordem (AR(2)) para o canal de comunicação. O esquema proposto é avaliado e comparado com outros esquemas de recepção MLSE-PSP mediante simulação computacional. As simulações são realizadas adotando-se modelos de canais com desvanecimento rápido e seletivo em frequência. Os resultados de simulação indicam que a estrutura de recepção proposta apresenta uma excepcional melhoria de desempenho em relação às demais estratégias avaliadas.

### 1. INTRODUÇÃO

Técnicas de recepção MLSE adaptativas que empregam o princípio do processamento por percurso sobrevivente (PSP) têm sido alvo de grande interesse da comunidade internacional [1-5], devido aos bons desempenhos apresen-

tados por estas técnicas em relação aos esquemas MLSE que não adotam o PSP [6], principalmente em presença de canais com desvanecimento rápido e seletivo em frequência.

Nos esquemas de recepção MLSE adaptativos, os símbolos detectados são utilizados para acompanhar a resposta impulsional (RI) do canal. Nessa estratégia de recepção, uma pequena seqüên-

\* Departamento de Engenharia Elétrica - DE/3 - IME

cia de símbolos detectada erroneamente pode desencadear o surgimento de uma enorme quantidade de símbolos errados, ocasionando a perda de acompanhamento da RI do canal. A técnica comumente empregada para minimizar este problema propõe a transmissão da informação em blocos delimitados por uma seqüência previamente estabelecida, denominada seqüência de treinamento. Nos períodos de treinamento o receptor obtém uma nova estimativa da RI do canal. Esta abordagem, apesar de produzir bons resultados, reduz a vazão do sistema de transmissão. Além disso, em aplicações que envolvem canais com desvanecimento rápido tem sido observado o efeito de probabilidade de erro irreduzível em receptores deste tipo [6].

A fim de tentar contornar este problema, muitas técnicas de recepção MLSE têm sido propostas, destacando-se dentre elas o esquema de recepção MLSE-PSP [1], o qual considera um conjunto de estimativas de canal, ao contrário das técnicas MLSE convencionais, que utilizam apenas uma estimativa. Por este e outros motivos que serão discutidos na próxima seção, os receptores MLSE-PSP apresentam um desempenho superior às técnicas MLSE convencionais. No entanto, resultados de simulação ainda indicam a presença de taxa de erro irreduzível para canais com desvanecimento rápido [7].

Para projetar receptores de seqüências de símbolos eficientes em canais rapidamente variantes com o tempo é preciso adotar um esquema de filtragem adaptativa robusto a erros ocorridos na detecção dos símbolos. Uma forma de obter tal robustez é empregar esquemas de filtragem que utilizem informações sobre o canal, como por exemplo, o seu modelo estatístico. Esta estratégia pode ser adotada nos esquemas de filtragem baseados no FK, ao passo que não pode ser considerada nos esquemas que se baseiam nos algoritmos LMS e RLS. Portanto, é razoável esperar que os receptores MLSE-PSP que empregam o FK apresentem desempenho superior ao dos receptores que utilizam o LMS ou o RLS [13].

Com base nesta expectativa, alguns artigos propõem usar o FK na estrutura de recepção MLSE-PSP com o processo AR(1) modelando o canal de comunicação [2,3]. A opção pelo modelo AR(1) é motivada por questões de simplicidade computacional, sem, no entanto, considerar critérios de ajuste estatístico entre este modelo e os modelos irracionais que têm sido propostos para caracterizar o canal de comunicação móvel. O esquema de recepção MLSE-PSP empregando o FK com modelo AR(1) para o canal de comunicação é aqui denotado por PSP-FK(1).

Apesar do processo AR(1) ter sido proposto para modelar o canal de comunicação móvel, em [8] foi mostrado que este processo apresenta erros de predição elevados, não sendo adequado para modelar a evolução no tempo da RI do canal de comunicação. Além disso, em [8] foi verificado que, dentre os modelos autoregressivos o AR(2) é o mais adequado para prever tais variações. Com base nesses resultados, aqui propõe-se utilizar o FK no esquema de recepção MLSE-PSP, adotando-se o modelo AR(2) para o canal de comunicação. Esta estratégia de recepção, doravante denominada PSP-FK(2), é avaliada mediante simulação computacional e o seu desempenho é comparado com os das técnicas de recepção PSP-FK(1) e PSP-LMS<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Os resultados de simulação aqui apresentados referentes ao esquema de recepção PSP-FK(2) foram inicialmente publicados em [7] e [9].

O restante deste trabalho é organizado como segue. Na seção II são apresentados de forma sucinta os esquemas básicos de recepção MLSE. Na seção III é apresentado o sistema simulado, na seção IV são apresentados os resultados das simulações e, por fim, na seção V são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 2. ESQUEMAS DE RECEPÇÃO MLSE

Um esquema de recepção baseado em estimação de seqüência de símbolos escolhe dentre as possíveis seqüências aquela que otimiza uma função associada ao critério de decisão adotado. Um critério muito utilizado para estabelecer a função a ser otimizada é o de máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood* – ML). Admitindo-se a transmissão de seqüências igualmente prováveis, o critério ML equivale ao de mínima probabilidade de erro. Esquemas de recepção de seqüência que adotam este critério são denominados MLSE.

O critério MLSE para canal conhecido e ruído branco aditivo Gaussiano pode ser implementado de forma eficiente pelo **algoritmo de Viterbi** (AV) [6], o qual obtém a seqüência ótima realizando busca iterativa sobre uma estrutura em treliça. Malgrado o esquema MLSE ser eminentemente de decisão de seqüência, a sua implementação através do AV, permite, com alta probabilidade, a obtenção da seqüência ML *símbolo a símbolo*, apenas com um pequeno retardo de decisão.

Para implementar o critério MLSE é preciso conhecer a RI do canal de comunicação. Infelizmente, muitas das vezes a RI do canal é desconhecida e variante no tempo. A solução tradicional para este problema utiliza uma seqüência de treinamento para obter a estimativa da RI do canal. Se o canal é variante com o tempo, adota-se um esquema adaptativo para atualizar a estimativa da RI durante o processo de recepção. Estes esquemas são denominados MLSE adaptativos. Deve-se notar que, neste caso, tem-se um problema de estimação conjunta da RI do canal e da seqüência de símbolos.

Diversos esquemas de recepção MLSE adaptativos têm sido sugeridos na literatura. Eles podem ser enquadrados em duas categorias básicas: MLSE adotando-se detecção direta (MLSE-DD) e MLSE-PSP. Estes dois esquemas são discutidos a seguir.

No esquema de recepção MLSE-DD (Figura 1) os símbolos detectados pelo AV com um determinado atraso são utilizados por um filtro adaptativo para acompanhar as mudanças

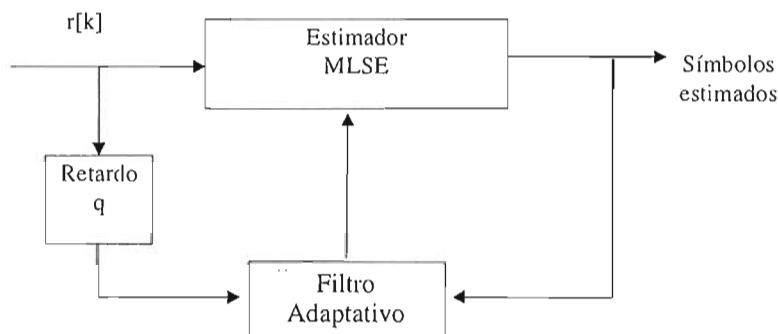


Figura 1– Diagrama de bloco do MLSE convencional

da RI do canal [6]. Alguns destes esquemas adotam preditores para compensar o retardo na estimativa da RI do canal. Apesar desse procedimento ser bastante simples, o atraso na detecção dos símbolos pode ocasionar perda de acompanhamento, principalmente para canais com desvanecimento rápido. A perda de acompanhamento do canal, por sua vez, prejudica as futuras detecções e isto pode provocar o efeito indesejável de propagação do erro.

Por outro lado, no esquema de recepção MLSE-PSP (Figura 2), a cada estado na treliça é associado um estimador de canal. Desta forma, as seqüências de dados que estão atreladas aos estados da treliça (seqüências sobreviventes) são utilizadas pelos vários estimadores de canal. Admitindo-se que, dentre estas seqüências sobreviventes, existe uma que aproxime a verdadeira (provavelmente a seqüência ML), haverá uma estimativa de canal sendo com ela atualizada, e sem retardo. No final da recepção do bloco de informação espera-se que, com alta probabilidade, estejam vinculados ao estado escolhido a estimativa de canal e a seqüência de símbolo que aproximem a solução do problema ML conjunto.

A técnica PSP permite resolver o problema do retardo inerente ao modo de recepção MLSE-DD, proporcionando um melhor desempenho, principalmente em presença de canais com desvanecimento rápido. Contudo, isto é obtido com grande aumento de complexidade. Ao invés de um filtro adaptativo, utiliza-se um banco de filtros e, dependendo da memória do canal e da constelação de símbolos adotada, a técnica pode ser extremamente complexa.

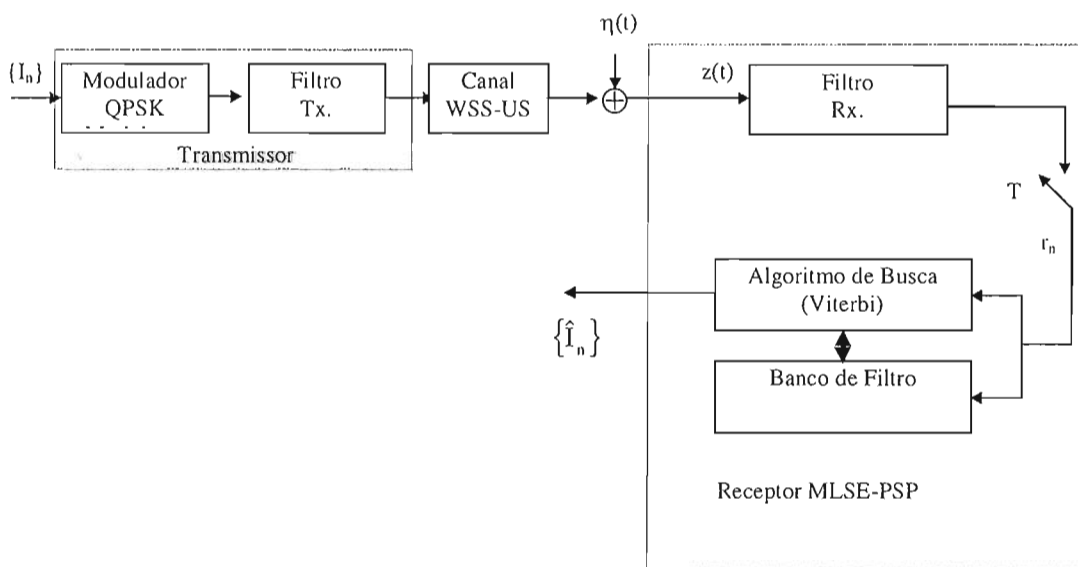


Figura 2 – Sistema de Transmissão com Receptor MLSE-PSP

### 3. O SISTEMA SIMULADO

O modelo em banda básica do sistema simulado é equivalente ao mostrado na Figura 2, onde a seqüência  $\{I_n\}$  representa a informação transmitida,  $\eta(t)$  representa uma função

amostra do ruído, que é modelado como um processo Gaussiano complexo com média nula,  $z(t)$  é o sinal em banda básica na entrada do receptor,  $\{r_n\}$  é a sequência amostrada na taxa de símbolo  $(1/T)$  e, finalmente,  $\{\hat{I}_n\}$  representa a estimativa de  $\{I_n\}$ .

Foi adotado um modulador QPSK com taxa de símbolo igual a 24,3 Kbaud. Os filtros do transmissor e do receptor são casados e possuem RI do tipo coseno levantado, com fator de excesso de faixa (*roll-off*) igual a 50%. Supondo-se perfeito sincronismo entre o receptor e transmissor, a interferência entre símbolos presente na sequência  $r_n$  deve-se unicamente à ação dispersiva do canal [6]. A variância do ruído é ajustada de acordo com a razão sinal ruído (RSR) desejada, a qual é expressa pela razão entre a energia do bit ( $E_b$ ) e a densidade espectral de potência do ruído ( $N_0$ ).

Admite-se que os símbolos são transmitidos em blocos delimitados por sequências de treinamento e possuem comprimento BL. O desempenho dos esquemas de recepção é avaliado considerando-se vários valores de BL.

O canal de comunicação é simulado com base no modelo WSS-US (“Wide Sense Stationary – Uncorrelated Scattering”), adotando-se um perfil de atrasos discreto, com raios espaçados de um intervalo de símbolo. Os raios são modelados por processos complexos Gaussianos com média nula, estatisticamente independentes. Os espectros desses processos são obtidos a partir do espectro *Doppler* desejado. A RI do canal de comunicação foi simulada pela técnica de *Monte Carlo* decrita em [11].

#### 4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Nesta seção são apresentados os resultados da avaliação de desempenho das técnicas de recepção PSP-FK(1), PSP-LMS e PSP-FK(2), obtidos por simulação de *Monte Carlo*, considerando-se uma massa de dados de  $10^6$  símbolos QPSK dividida em blocos de BL símbolos.

Os parâmetros de desempenho adotados são a taxa de erro de bit (BER) e o erro médio quadrático (EMQ) na estimação da RI do canal. Várias simulações foram realizadas, variando-se a RSR e o máximo desvio *Doppler* ( $f_D$ ). Em todos os casos adotou-se um perfil *Doppler* com formato similar ao espectro de *Jakes* [12] e perfil de retardo contendo 3 raios.

As curvas de BER obtidas, para valores de  $f_D$  iguais a 50, 100 e 200 Hz são mostradas nas figuras 3, 4 e 5. Como estamos interessados em avaliar apenas a capacidade de acompanhamento da RI do canal de comunicação, o receptor é inicializado com a RI verdadeira, simulando-se, portanto, um treinamento perfeito. A sensibilidade do desempenho destes receptores a incertezas nas estimativas iniciais da RI do canal será abordada em um trabalho subsequente.

Para  $f_D = 50$  Hz (Figura 3), os resultados indicam que os três esquemas de recepção apresentam desempenhos similares, evidenciando-se apenas uma pequena superioridade do esquema de recepção PSP-FK(2). Observamos também que o esquema de recepção PSP-FK(1) é o que apresenta pior desempenho.

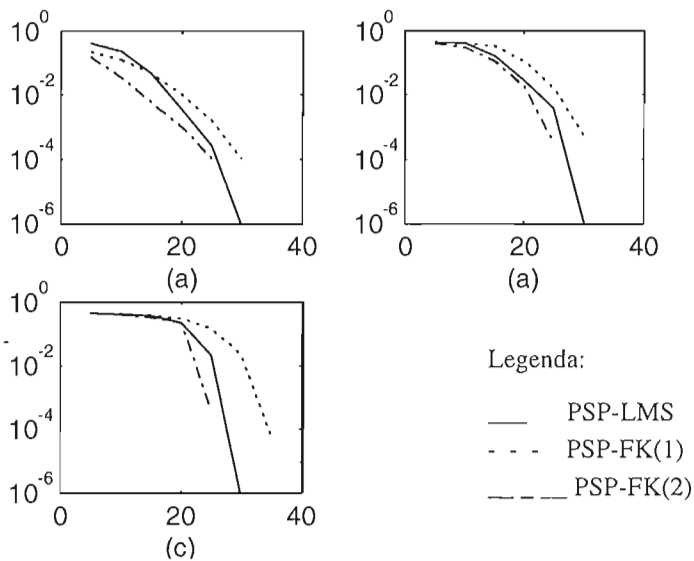


Figura 3 – BER x RSR para  $f_D=50$ Hz.  
 (a)  $BL=100$ , (b)  $BL=1000$  e (c)  $BL=10000$ .

À medida que o valor de  $f_D$  ou o de  $BL$  é aumentado (Figura 4 e Figura 5), os esquemas de recepção PSP-LMS e PSP-FK(1) apresentam uma sensível degradação de desempenho, surgindo inclusive o efeito de taxa de erro irreduzível. Por outro lado, o esquema de recepção PSP-FK(2) mantém o seu desempenho praticamente inalterado.

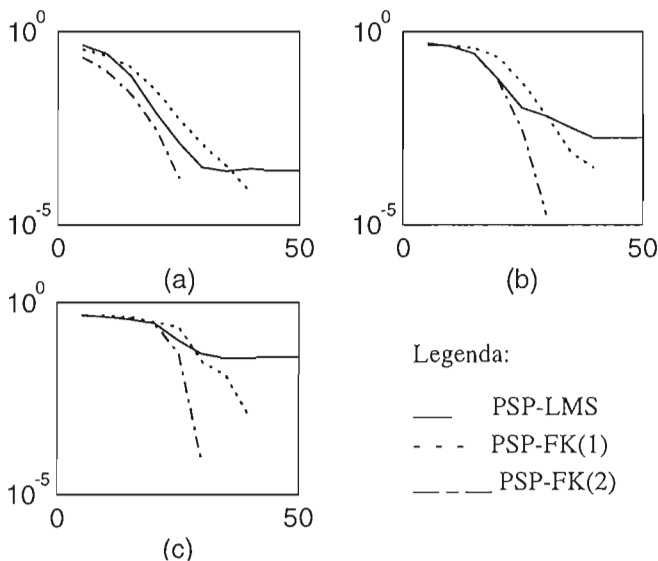


Figura 4. BER x RSR para  $f_D = 100$ Hz.  
 (a)  $BL=100$ ,  $BL=1000$  e (c)  $BL=10000$ .

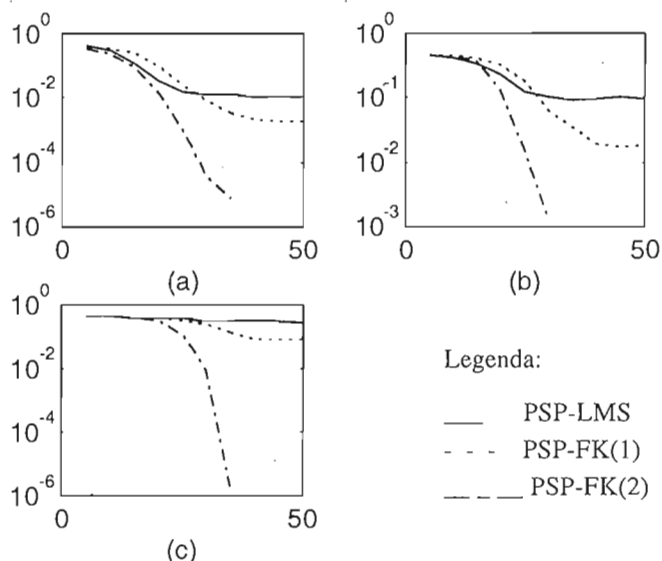


Figura 5. BER x RSR para  $f_D=200\text{Hz}$ .  
 (a)  $BL=100$ , (b)  $BL=1000$  e (c)  $BL=10000$ .

A Figura 6 apresenta as curvas de EMQ produzidas pelo 3 esquemas, para  $f_D = 200\text{ Hz}$ ,  $RSR=40\text{dB}$  e  $BL = 10.000$  símbolos. Os resultados indicam que o esquema de recepção PSP-FK(2) apresenta uma baixa variância de estimação e excepcional capacidade de acompanhamento da RI do canal. As outras duas técnicas de recepção apresentam rápida perda de acompanhamento da RI do canal com o passar do tempo.

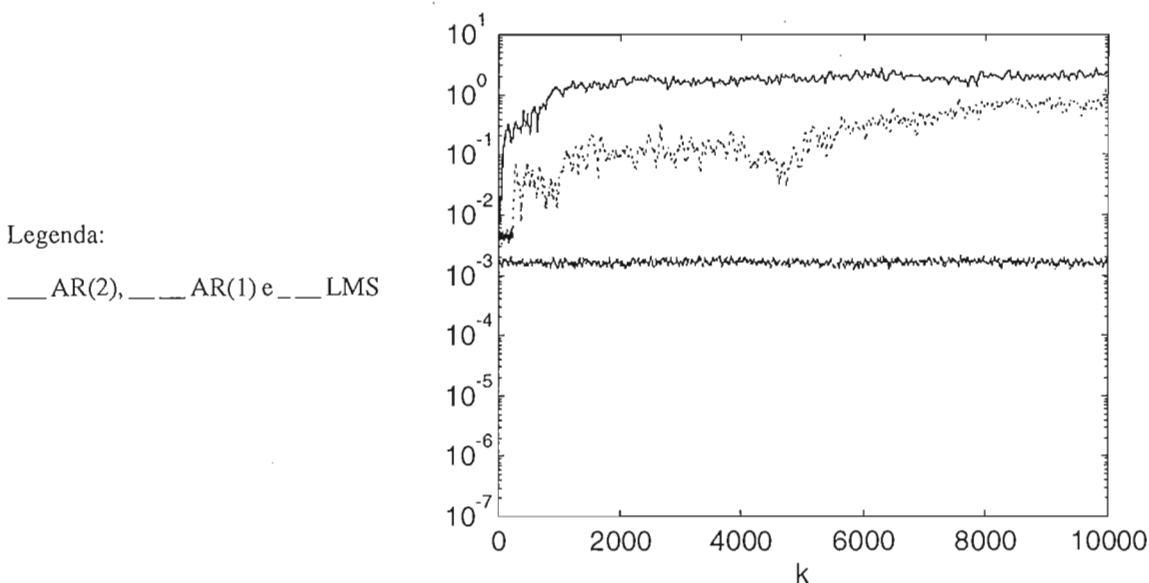


Figura 6 – EMQ para  $f_D=200\text{Hz}$  e  $RSR = 40\text{dB}$ .

À luz dos resultados apresentados, verifica-se que a perda de acompanhamento é causada pelas rápidas flutuações do canal e pelos erros ocorridos no algoritmo de busca. Estes fatores tornam-se mais intensos à medida que se aumenta o valor de BL. Isto justifica a degradação de desempenho dos receptores PSP-LMS e PSP-FK(1) com o aumento de BL e as excepcionais curvas de BER do PSP-FK(2).

No caso dos receptores PSP-FK(1) e PSP-LMS, a perda de acompanhamento da RI do canal cria a necessidade de se transmitir a informação em pequenos blocos, entre os quais o receptor obtém nova estimativa de canal mediante uso de seqüência de treinamento. Por outro lado, verificamos que o esquema de recepção PSP-FK(2) pode dispensar o uso de fases de treinamento durante o período de recepção da informação, desde que o receptor disponha da RI correta no início da recepção. Desta forma, pode ser obtido um significativo aumento na vazão do sistema de transmissão.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram abordados alguns esquemas de recepção MLSE-PSP aplicados a canais de comunicação móveis, especialmente aqueles caracterizados pelo efeito de desvanecimento rápido e seletivo em frequência. O desempenho dos esquemas de recepção foi avaliado mediante simulação computacional pela técnica de *Monte Carlo*.

Dentre os blocos que compõem um receptor MLSE-PSP, especial atenção foi dedicada à escolha do algoritmo de filtragem adaptativa. Nesse sentido, dois algoritmos foram considerados: o filtro de *Kalman* e o LMS. No caso do filtro de *Kalman* considerou-se a utilização dos modelos AR(1) e AR(2) associados à dinâmica do canal de comunicação. Os resultados obtidos permitem enumerar algumas conclusões importantes:

- o receptor PSP-FK(1) apresenta um desempenho comparável ao do esquema de recepção PSP-LMS. Observou-se uma pequena melhoria apenas nos casos em que utilizou-se valores elevados para a RSR e para o máximo desvio *Doppler*. Isto se justifica pela pobre parametrização do canal obtida com o uso do modelo AR(1), conforme discutido em [8];
- em todas as simulações realizadas o esquema de recepção PSP-FK(2) apresenta uma significativa redução da taxa de erro em comparação com os outros dois esquemas de recepção avaliados. Em toda a faixa de desvio *Doppler* considerada não foi observado o efeito de taxa de erro irreduzível, um problema típico das demais técnicas de recepção aplicadas a canais com desvanecimento rápido;
- mesmo quando se aumenta o tamanho do bloco de informação, o esquema de recepção PSP-FK(2) obtém e mantém a estimativa da RI do canal com pequena variância. Isto explica as excepcionais características das curvas de BER obtidas com este esquema de recepção, as quais indicam que é possível dispensar novas fases de treinamento durante o processo de recepção.



Os esquemas de recepção PSP-LMS e PSP-FK(1) apresentam desempenho satisfatórios quando são adotados pequenos blocos de informação e um valor relativamente baixo para o máximo desvio *Doppler* (50Hz). À medida que a intensidade do efeito *Doppler* aumenta, verifica-se uma sensível degradação de desempenho, associado à perda de acompanhamento da RI do canal.

Os resultados obtidos evidenciam a importância da escolha adequada do esquema de filtragem adaptativa. Esquemas que possuem pouca robustez a erros ocorridos na saída do algoritmo de busca e elevada variância de acompanhamento não são adequados para a aplicação em questão.

Malgrado o excepcional desempenho obtido pelo esquema de recepção proposto (PSP-FK(2)) em relação aos demais esquemas avaliados, este receptor possui complexidade computacional bem superior aos outros. Em [10] são investigadas alternativas para se obter redução na complexidade do esquema proposto, com pouca degradação de desempenho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – Raheli, R.; Polydoros, A.; Tzou, C., “Pre-Survivor Processing: A General Approach MLSE in Uncertain Environments”, *IEEE Transactions on Communications*, 1995, Feb., Vol. 43, No. 2/3/4, pp. 354-364.
- [2] – Dai, Q.; Shwedyk, E., “Detection of Bandlimited Signals Over Frequency Selective Rayleigh Fading Channels”, *IEEE Transactions on Communications*, 1994, Feb., Vol. 42, No. 2/3/4, pp. 941-950.
- [3] – Rollins, M. E.; Simmons, S. J., “Simplified Per-Survivor Kalman Processing in Fast Frequency-Selective Fading Channels”, *IEEE Transactions on Communications*, 1997, May, Vol. 45, No. 5, pp. 544-553.
- [4] – Chugg, K. M.; Polydoros, A., “MLSE for Unknown Channel – Part I: Optimality Considerations”, *IEEE Transactions on Communications*, 1996, Jul., Vol. 44, No. 7, 836-846.
- [5] – Chugg, K. M.; Polydoros, A., “MLSE for Unknown Channel – Part II: Tracking Performance”, *IEEE Transactions on Communications*, 1996, Aug., Vol. 44, No. 8, pp. 949-958.
- [6] – Proakis, J. G. *Digital Communications*. McGraw-Hill, Singapore, 1995.
- [7] – Galdino, J. F. Recepção de Sequências de Símbolos em canais variantes com o tempo, Tese de Mestrado, IME, Dez., 1997.
- [8] – Galdino, J. F. e Pinto E. L. “Modelagem AR aplicada a Receptores MLSE adaptativos”, *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, 3º trimestre de 1998, pp. 25-34.
- [9] – Galdino, J. F. e Pinto E. L. “A Simulation Study of Adaptive Filtering Applied to MLSE-PSP Receivers, trabalho aceito para inclusão nos anais e apresentação no 1998 IEEE Military Communications, 18 a de 21 de Out. de 1998, Bedford, MA. USA.

- [10] – Galdino, J. F. e Pinto E. L. “A New MLSE-PSP Scheme Over Fast Frequency-Selective Fading Channels, trabalho aceito para inclusão nos anais e apresentação no 1998 IEEE International Symposium on Information Theory and its Applications.
- [11] – HOEHER; Peter, “A Statistical Discrete-Time Model for the WSSUS Multipath Channel”, *IEEE, IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1992, Nov., Vol. 41, No. 4, pp. 461-468.
- [12] – Parsons, J. D., *The mobile radio propagation channel*, J. D. Parsons, 1992.
- [13] – Haykin, Simon. *Adaptive Filter Theory*. Prentice Hall, USA, 1991.

## Errata

No artigo “Uma Fórmula Simples para o Cálculo da Altura de Antenas de Microondas” – C&T – Vol. XV – 3ª Trim/98 – pág.81– do Engenheiro **Marcello Praça Gomes da Silva** a fórmula correta é:

$$RF_1 = 17,3 \times \sqrt{\frac{d_1 \times d_2}{d \times f}} \quad (2)$$

*e não*

$$Dh = \sqrt{\frac{d_1 \times d_2}{d \times f}} \quad (2)$$

*como está na revista.*