

Desempenho de Algoritmos de Sincronização para Sistemas OFDM em Canais de HF

Claudio Penedo de Albuquerque e Ernesto Leite Pinto

Resumo—Este artigo investiga através de simulação em computador o desempenho de algoritmos de sincronização recentemente propostos para sistemas OFDM, quando utilizados na transmissão em canais de HF. Tais algoritmos, de moderada complexidade computacional, possibilitam conjuntamente a correção de desvios de frequência (aquisição e rastreamento) e temporização de símbolos e de quadros de símbolos. Diversas condições de transmissão são consideradas na investigação, no que diz respeito ao canal de propagação e à razão sinal/ruído na entrada do receptor. Algumas pequenas alterações são sugeridas visando a melhoria de desempenho dos algoritmos na aplicação considerada.

Palavras-Chave—Sincronização de relógio e de portadora, OFDM, transmissão multiportadora, canal ionosférico, transmissão digital em HF.

Abstract—This article investigates by computer simulation the performance of synchronization algorithms recently proposed for OFDM systems, when employed in ionospheric HF transmission. The algorithms exhibit a moderate implementational complexity and make joint time-and-frequency synchronization possible. Several conditions of transmission were investigated. To improve the performance of the algorithms several changes are suggested.

Index Terms—Clock and carrier synchronization, OFDM, multicarrier transmission, ionospheric channel, HF digital transmission.

I. INTRODUÇÃO

A propagação ionosférica em HF possibilita a transmissão além da linha de visada sem a utilização de sistemas intermediários tais como repetidores de satélites de comunicações, o que implica redução de custo entre outras vantagens. Além disso, os canais ionosféricos de HF em regiões como a Amazônia, por exemplo, são muitas vezes os únicos meios possíveis para comunicação de pequenas comunidades situadas em localidades isoladas.

Por outro lado, a reduzida largura de faixa disponível e a ocorrência de desvanecimento seletivo em frequência e variante no tempo impõem severas restrições à transmissão digital nesta faixa do espectro.

Por estas razões, o desenvolvimento de novas técnicas de transmissão digital em HF é hoje em dia um campo de pesquisas ativo. Neste contexto, a utilização de sistemas de transmissão OFDM (de “Orthogonal Frequency Division Multiplexing”) tem sido recentemente considerada como uma alternativa promissora para se obter maiores taxas de transmissão nos canais de 3 KHz internacionalmente adotadas para sistemas de comunicações ionosféricas.

Sendo os algoritmos de sincronização reconhecidamente cruciais para o desempenho de receptores OFDM, o seu emprego em canais de HF requer especial atenção, dadas as peculiaridades destes canais.

Neste artigo avalia-se o desempenho de algoritmos recentemente propostos para sincronização de sistemas OFDM visando outras aplicações, quando empregados em canais de HF. Tais algoritmos possibilitam a estimação de desvios de frequência (aquisição e rastreamento), além da temporização de símbolos e de quadros de símbolos.

De moderada complexidade implementacional, estes algoritmos têm sua eficiência testada em canais de HF através de simulações em computador, segundo modelos de canal padronizados pelo CCIR (atual ITU-R). Pequenas alterações nos algoritmos são sugeridas como forma de se obter melhoria de desempenho.

O artigo está organizado em 6 seções. Na seção II descreve-se sucintamente a geração do sinal multiportadora (OFDM). Na seção III são apresentados os algoritmos de sincronização empregados. Na seção IV são apresentados os modelos de canal de HF do CCIR. Na seção V são relatados e discutidos os resultados de diversos experimentos de simulação. Por fim, na seção VI são apresentadas as conclusões do trabalho.

II. TRANSMISSÃO OFDM

A técnica OFDM consiste na transmissão paralela de dados em diversas subportadoras ortogonais por separação em frequência, com modulação QAM ou PSK.

Considerando-se um intervalo de símbolo que se inicie em $t = t_s$, o equivalente em banda básica de um sinal OFDM com N subportadoras pode ser dado por:

$$s_i(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} d_i \cdot \exp \left[j2\pi \left(\frac{i}{T} \right) (t - t_s) \right] \right\}, \quad t_s \leq t \leq t_s + T \quad (2.1)$$

onde:

T = duração do símbolo;

d_i = símbolo complexo (subsímbolo de um símbolo OFDM)

A recuperação dos símbolos no receptor pode em princípio ser realizada pela passagem do sinal OFDM através de um

Claudio Penedo de Albuquerque, Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil, E-mail: penedo@cds.eb.mil.br. Ernesto Leite Pinto, Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, E-mails: ernesto@epq.ime.eb.br.

banco de N correlatores complexos, seguidos de comparações com limiares de decisão adequados.

Pela observação de (2.1) nota-se que o equivalente em banda básica do sinal OFDM pode ser gerado utilizando-se a IDFT (Transformada de Fourier Discreta Inversa) da seqüência discreta formada pelos N subsímbolos que compõem cada símbolo OFDM. Na prática é comum se utilizar respectivamente algoritmos de transformada rápida de Fourier (IFFT e FFT) para a modulação e a demodulação do sinal [1].

Para se evitar problemas de interferência entre símbolos e interferência entre subportadoras decorrentes da transmissão por canais dispersivos no tempo, é comum se utilizar um intervalo de guarda entre símbolos OFDM consecutivos [1].

A Figura 2.1 ilustra o processo usual de geração de um sinal OFDM.

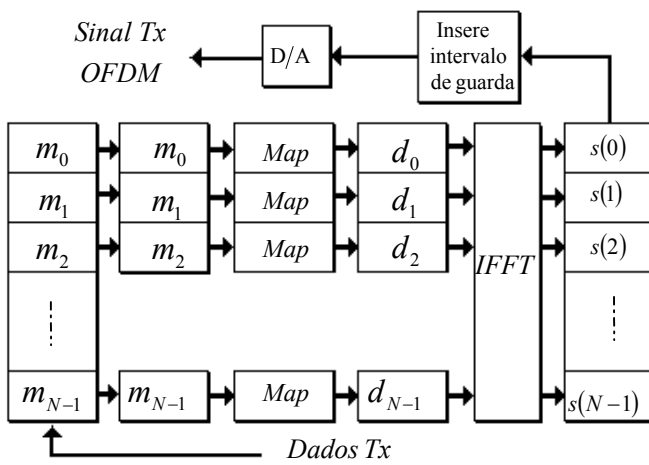


Fig. 2.1. Geração do sinal OFDM.

Realiza-se inicialmente uma conversão série-paralelo (S/P) na qual conjuntos de N palavras de k bits são armazenadas num buffer e mapeadas em N subsímbolos complexos d_i , de acordo com o tipo de modulação empregada. Em seguida é aplicada uma IFFT a este bloco de subsímbolos complexos, fornecendo como resultado N amostras do sinal OFDM $s(i)$. A seguir é realizado o procedimento de acréscimo de intervalo de guarda ao sinal (repetição de N_g amostras iniciais do símbolo no final do mesmo). Por fim, segue-se uma conversão D/A para geração do sinal em tempo contínuo.

III. ALGORITMOS DE SINCRONIZAÇÃO

Cabe notar de antemão que o sistema de sincronismo de um receptor tem que garantir tanto sincronização no tempo quanto correção de desvios de frequência (e de fase, se a demodulação de subportadoras for coerente).

A sincronização no tempo em geral compreende a temporização de quadros e o alinhamento da janela de recepção de símbolos OFDM. A tarefa de sincronização em frequência é preservar a ortogonalidade entre as subportadoras, evitando a ocorrência de interferência entre elas [1].

A sincronização de frequência é executada em duas etapas: aquisição e rastreamento. A aquisição de desvios de frequência requer algoritmos robustos, de maior complexidade computacional, e em geral uma maior redundância no sinal transmitido. Já o rastreamento de desvios de frequência geralmente emprega algoritmos com menor faixa de estimação de desvios de frequência, requerendo menor complexidade e redundância, particularmente para canais invariantes no tempo.

Os algoritmos aqui investigados foram propostos em [2] e supõem a transmissão da informação numa estrutura de quadros de duração fixa cujo início é marcado por um símbolo de referência. Conforme ilustrado na Figura 3.1, o símbolo de referência consiste em cópias repetitivas de um padrão de sincronização de N_{ps} amostras pseudo-aleatórias.

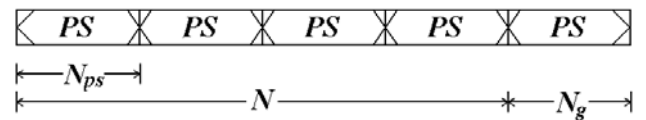


Fig. 3.1. Símbolo de referência.

Nenhum conhecimento à priori da seqüência de sincronização é requerido por estes algoritmos, sendo somente exploradas a estrutura do símbolo de referência, as propriedades do intervalo de guarda do símbolo OFDM e a estrutura de quadro. Todo o processamento é realizado no domínio do tempo, portanto, nenhuma demodulação baseada em FFT é necessária para sincronização.

Cabe destacar a existência de três níveis hierárquicos de periodicidade que são explorados com objetivos distintos para fins de sincronização, como se segue. A periodicidade intrínseca de curto termo, no símbolo de referência, é explorada para aquisição de desvios de frequência. A periodicidade de médio termo, associada à extensão cíclica do sinal, é utilizada para se extrair o sincronismo de símbolos OFDM e para rastreamento de desvios de frequência. Por fim, a periodicidade de longo termo, da estrutura de quadros, é explorada para se gerar o sincronismo de quadros.

A exploração destas periodicidades é feita através do emprego de duas funções de autocorrelação, denotadas $G(j)$ e $R(j)$. A função $G(j)$ é utilizada para rastreamento de desvios de frequência e sincronização de símbolos. Ela expressa, na recepção do sinal, a correlação entre duas seqüências de N_g amostras, sendo uma delas uma versão retardada da outra (retardo de N amostras). Esta função é definida como

$$G(j) = \sum_{m=0}^{N_g-1} z(j-m) \cdot z(j-m-N)^* \quad (3.1)$$

Cabe notar que o módulo de $G(j)$ é máximo se j é a última amostra de um símbolo, devido à repetição das amostras iniciais no intervalo de guarda.

Um desvio de frequência δf resulta num deslocamento de fase $\Psi(\delta f, j)$ para a amostra $z(j)$ dado por

$$\Psi(\delta f, j) = 2\pi \cdot \delta f \cdot j \cdot T_s \quad (3.2.a)$$

$$\Psi(\delta f, j) = 2\pi \cdot \frac{\delta f \cdot j}{N \cdot \Delta f} \quad (3.2.b)$$

onde:

T_s = intervalo de amostragem;

$\Delta f = 1/NT_s$ = espaçamento entre subportadoras

Assim sendo, no cálculo da diferença de fase entre duas amostras espaçadas no tempo ocorre um erro que é função do valor da separação das amostras e do próprio desvio de frequência δf .

Desconsiderando-se outras fontes de variação de fase, e admitindo-se que as duas amostras em questão são idênticas (por força de um padrão de repetição introduzido intencionalmente), vê-se que é possível calcular o valor do desvio de frequência δf com base na diferença entre as fases destas amostras.

Deve-se notar que, para cada valor de j , a fase de $G(j)$ é uma média de N_g valores de diferenças de fase entre amostras separadas no tempo por um intervalo de duração $N \cdot T_s$. Em particular, para a última amostra do símbolo (j_{\max}), onde se tem na ausência de ruído um pico da função $|G(j)|$, uma estimativa do desvio de frequência sofrido pelo sinal pode ser calculada da seguinte forma

$$\delta f_r = \frac{\angle G(j_{\max})}{2\pi \cdot N \cdot T_s} \quad (3.3)$$

onde $\angle G(j_{\max})$ denota a fase de $G(j_{\max})$.

É importante ressaltar que o procedimento acima descrito para estimação do desvio de frequência poderá produzir resultados ambíguos se os valores de diferença de fase (média) não estiverem restritos ao intervalo $(-\pi, \pi]$. Ou seja, o algoritmo deve ser projetado visando a identificação correta de desvios de frequência dentro de uma determinada faixa. Em termos mais específicos, o espaçamento entre subportadoras Δf do sinal OFDM limitará a faixa de desvios de frequência corretamente identificada, sendo esta dada por

$$-\frac{\Delta f}{2} < \delta f_r \leq \frac{\Delta f}{2} \quad (3.4)$$

A função $R(j)$ é utilizada para aquisição de desvios de frequência e sincronização de quadros de símbolos, expressando, na recepção do sinal, a correlação entre duas seqüências de N amostras, sendo uma delas uma versão retardada da outra (retardo de N_{ps} amostras). Esta função é definida como

$$R(j) = \sum_{m=0}^{N-1} z(j-m) \cdot z(j-m-N_{ps})^* \quad (3.5)$$

A sua exploração é feita de forma semelhante ao descrito para $G(j)$, tanto no que diz respeito à aquisição de desvios de frequência quanto para a sincronização de quadros.

O valor de aquisição de desvio de frequência, de acordo com $R(j)$, é calculado da seguinte forma

$$\delta f_a = \frac{\angle R(j_{\max})}{2\pi \cdot N_{ps} \cdot T_s} \quad (3.6)$$

onde $\angle R(j_{\max})$ denota a fase de $R(j_{\max})$.

Devido ao espaçamento entre pares de amostras empregado em $R(j)$ ser menor do que aquele empregado em $G(j)$, o máximo desvio de frequência detectável é aumentado por um fator N/N_{ps} em relação ao máximo desvio de frequência detectável por $G(j)$. A faixa de desvios de frequência corretamente identificada por $R(j)$ é dada por

$$-\frac{N}{N_{ps}} \cdot \frac{\Delta f}{2} < \delta f_a \leq \frac{N}{N_{ps}} \cdot \frac{\Delta f}{2} \quad (3.7)$$

A partir deste ponto, os métodos de sincronização de frequência acima descritos serão denominados algoritmos $G(j)$ e $R(j)$ para sincronização de frequência. Uma denominação similar será adotada para a sincronização de símbolo e de quadro.

IV. MODELO DE CANAL IONOSFÉRICO

Watterson [3] propôs um modelo estatístico para caracterizar o canal ionosférico, o qual tem sido extensamente utilizado na avaliação de desempenho de sistemas de transmissão digital em HF. Este modelo contempla o multipercorso e a natureza dispersiva em frequência, característicos dos enlaces ionosféricos na faixa de HF.

Em 1986 o CCIR (atual ITU-R) publicou normas para a utilização de simuladores empregando este modelo, tendo proposto três padrões de canal para simulação denominados Bom, Moderado e Pobre.

A saída de cada um dos canais CCIR consiste de duas cópias independentes do sinal transmitido, com retardos distintos e de mesma potência média, cada uma delas com desvanecimento Rayleigh. Essas duas cópias modelam reflexões provenientes em duas grandes camadas da ionosfera. O espectro Doppler, que modela a variabilidade destas camadas com o tempo, tem um formato gaussiano com média nula e desvio padrão (espalhamento Doppler) específico.

Os retardos entre os raios e os espalhamentos Doppler associados aos três modelos de canal HF do CCIR são listados na Tabela I.

TABELA I
PARÂMETROS DO MODELO CCIR

Canal	Retardo entre raios	Espalhamento Doppler
Bom	0.5 ms	0.1 Hz
Moderado	1.0 ms	0.5 Hz
Pobre	2.0 ms	1.0 Hz

V. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

O sistema de transmissão OFDM considerado para avaliação dos algoritmos tem os seguintes parâmetros e características: frequência de amostragem de 6 KHz, largura de banda de 3 KHz, 32 subportadoras, intervalo de guarda de duração igual à quarta parte da duração do símbolo útil

OFDM e FFT de comprimento 64. Esses parâmetros fornecem um símbolo OFDM constituído de 80 amostras sendo 16 destas, o intervalo de guarda. O espaçamento entre subportadoras é de 93.75 Hz.

Para a frequência de amostragem empregada, os canais do CCIR Bom, Moderado e Pobre, apresentam respectivamente retardos de 3, 6 e 12 intervalos de amostragem (T_s).

O símbolo de referência empregado é constituído de 16 amostras pseudo-aleatórias ($N_{ps}=N_g$) repetidas quatro vezes dentro de um símbolo útil OFDM.

Na avaliação de desempenho dos algoritmos adotou-se um erro de frequência constante de $0.3\Delta f$ e assumiu-se o instante de chegada do primeiro raio do canal do CCIR como sendo o instante de sincronização correto.

Para a simulação dos canais do CCIR utilizou-se o método de Monte Carlo proposto em [4], fixando-se o parâmetro de ordem deste método de simulação em 20. Uma avaliação de desempenho apresentada em [5] indicou ser um valor de ordem adequado para se reproduzir na simulação as propriedades estatísticas desejadas.

Os algoritmos $G(j)$ e $R(j)$ foram avaliados levando-se em consideração: diferentes valores de razão sinal/ruído (SNR, de "Signal to Noise Ratio") na entrada do receptor, os três tipos de canais do CCIR e ainda o emprego de símbolos QPSK e QAM-16.

Gerou-se uma quantidade de 10000 amostras em cada caso para levantamento de uma estimativa da distribuição de probabilidade das variáveis erro de rastreamento de frequência e de instante de sincronização de símbolos, no caso do algoritmo $G(j)$ e erro de aquisição de frequência e de ponto de sincronização de quadros de símbolos, no caso do algoritmo $R(j)$.

Toda a programação foi realizada em Matlab, num Pentium III, 1 GHz e 256 MB RAM. Tal plataforma gerou cada conjunto de 10000 amostras num tempo médio de 13 minutos.

No que diz respeito ao emprego de símbolos QPSK ou QAM, verificou-se que não há diferença significativa de desempenho dos algoritmos com a variação da constelação de símbolos. Este era um resultado esperado, uma vez que os algoritmos exploram propriedades de correlação produzidas pelas estruturas de símbolo de referência, dos símbolos OFDM usuais e do quadro de símbolo, e não os seus conteúdos em si.

Ao se avaliar o desempenho do algoritmo $G(j)$, no que diz respeito ao erro no sincronismo de símbolos, verificou-se uma dispersão deste erro que se eleva com a queda de qualidade dos canais empregados, e que é reduzida com a elevação da razão sinal/ruído. A Figura 5.1 ilustra, para o canal Bom do CCIR, o efeito da razão sinal/ruído na dispersão do erro de sincronismo de símbolo, tendo sido considerado os valores de 10, 20 e 30 dB para a SNR.

Percebe-se também que os valores do ponto de sincronismo que ocorrem com maior frequência correspondem aos instantes de chegada do primeiro e do segundo raios dos canais do CCIR. Isto se deve ao fato de que o algoritmo procura sincronizar não necessariamente no primeiro raio, mas sim no raio que apresente maior amplitude¹. Constata-se

também a elevação da probabilidade de ocorrência destes dois valores do ponto de sincronismo com o aumento da SNR.

Devido à possibilidade de sincronização pelo segundo raio, sugere-se que a consideração prática de projeto de modem OFDM para valor de intervalo de guarda (intervalo de guarda com valor maior que o retardo máximo do canal) seja alterada [1]. Projetando-se um intervalo de guarda de valor duas vezes maior que o retardo máximo do canal pode-se evitar que a componente multipercurso de um símbolo não interfira no símbolo seguinte (caso de sincronização pelo primeiro raio) e também que a componente multipercurso de um símbolo seguinte não interfira no símbolo atual (caso de sincronização pelo segundo raio).

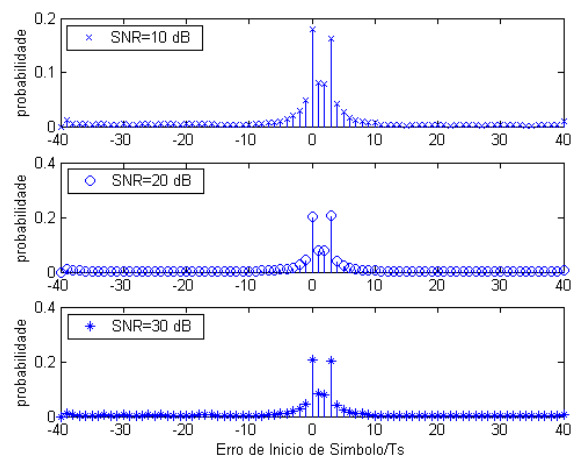


Fig. 5.1. Desempenho de $G(j)$ para sincronismo de símbolos em canal do CCIR Bom.

A Figura 5.2 ilustra a dispersão de erros em desvio de frequência normalizados em relação ao espaçamento entre subportadoras Δf calculado por $G(j)$, sob as mesmas condições da Figura 5.1. Constata-se a significativa diminuição desta dispersão com a elevação da SNR.

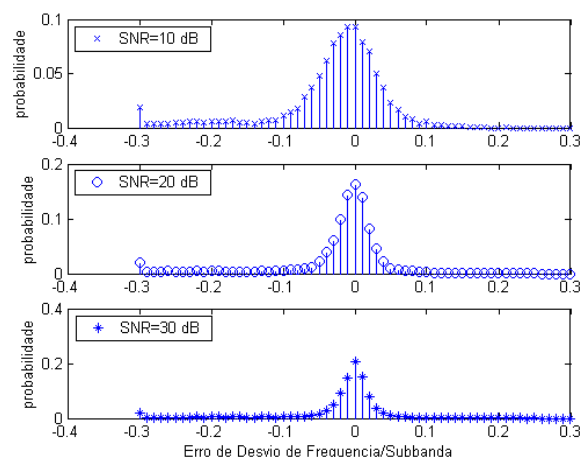


Fig. 5.2. Desempenho de $G(j)$ para sincronismo de frequência para canal do CCIR Bom.

¹ Cabe lembrar neste ponto que nos modelos de canal do CCIR o segundo raio pode ter maior intensidade do que o primeiro com probabilidade 50%. Trata-se portanto, de modelos pessimistas.

As dispersões verificadas, no instante de sincronismo de símbolos e, por conseguinte, no erro no sincronismo de frequência, revelam não ser este algoritmo suficiente para emprego em canais de HF. Reconhecendo as precaríssimas condições de sincronização temporal impostas pelos modelos de canal adotados, cabe destacar que a dispersão se encontra em poucas quantidades de amostras, de forma que a técnica pode ser empregada em conjunto com a utilização de tons pilotos, no que diz respeito à correção do alinhamento da janela de recepção de símbolos (propriedade da FFT) [6]. A diminuição da dispersão no erro de sincronismo de símbolos implicará também uma diminuição na dispersão do erro em frequência.

Um segundo procedimento adicional para a diminuição da dispersão do erro de sincronismo de frequência seria o emprego de uma média de diferenças de fases para o cálculo do desvio de frequência gerada sob um número menor de pares de amostras. Por exemplo, ao invés do cômputo das 16 multiplicações para o seu cálculo, utilizar-se-ia apenas as oito amostras centrais. Isto diminui a probabilidade de utilização de pares de amostras erroneamente incluídas no cálculo do desvio de frequência.

Na avaliação do desempenho do algoritmo $R(j)$, relativamente ao erro no sincronismo de quadros observou-se uma menor dispersão dos erros quando comparados ao equivalente do algoritmo $G(j)$ (sincronismo de símbolos). A Figura 5.3 ilustra este comportamento, o qual se deve ao fato do algoritmo $R(j)$ ser um algoritmo mais robusto, por se basear num número maior de multiplicações, que produz um melhor efeito de média.

Observou-se também a elevada ocorrência da sincronização com instantes de chegada do primeiro e segundo raios dos canais do CCIR.

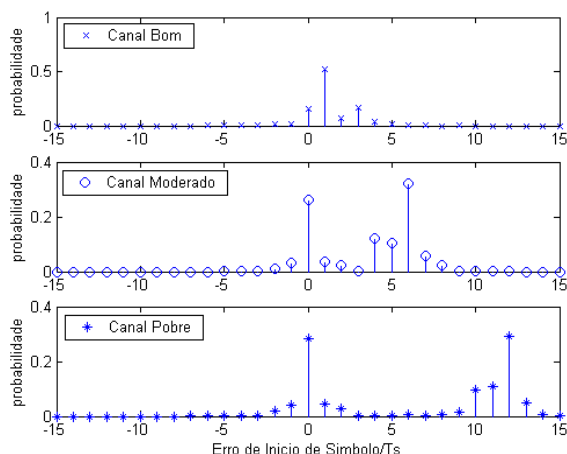


Fig. 5.3. Desempenho de $R(j)$ para sincronismo de quadros (SNR=30 dB).

A Figura 5.4 ilustra o desempenho do algoritmo $R(j)$ na sincronização de frequência e foi gerada levantando-se as mesmas estatísticas anteriores.

Observou-se comparativamente ao sincronismo de frequência para $G(j)$, que o erro de sincronismo de

frequência para $R(j)$ também apresenta-se com menor dispersão, confirmando as características de maior robustez deste algoritmo.

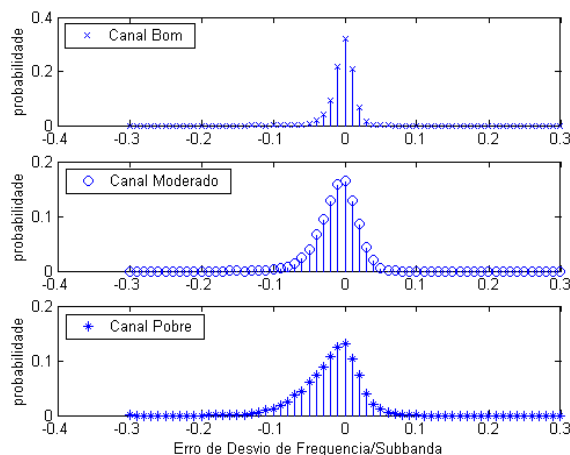


Fig. 5.4. Desempenho de $R(j)$ para sincronismo de frequência (SNR=30 dB).

VI. CONCLUSÕES

Avaliou-se neste artigo, através de simulação em computador, o desempenho em canais ionosféricos de HF da técnica de sincronismo desenvolvida por Hanzo [2] para sinais OFDM empregando funções de autocorrelação do sinal.

Foram constatadas as boas características de desempenho destes algoritmos, apesar das severas condições de sincronização no tempo impostas pelos modelos de canal adequados. Foi verificado que as dispersões apresentadas pelos erros produzidos nos algoritmos se encontram dentro de faixa de valores passíveis de serem corrigidos com o emprego em conjunto de outras técnicas.

Na continuação deste trabalho cabem diversas investigações, como se segue. Avaliar o emprego dos algoritmos de sincronismo em conjunto com outras técnicas, tais como a utilização de tons pilotos. Avaliar o desempenho dos algoritmos com as alterações sugeridas para o cálculo dos desvios de frequências. E, por fim, avaliar uma variação para estes algoritmos, o qual consistiria num procedimento de sincronismo de tempo e frequência em duas etapas distintas. A primeira delas empregando símbolo OFDM com estrutura apenas pseudo-aleatória para sincronismo de tempo e outra seguinte empregando símbolo OFDM com estrutura apenas de repetição para sincronismo de frequência.

REFERÊNCIAS

- [1] PRASAD, R., e VAN NEE, R., "OFDM for Wireless Multimedia Communications", Artech House Publishers, 2000.
- [2] KELLER, T., HANZO, L., "Orthogonal Frequency Division Multiplex Synchronization Techniques for Wireless Local Area Network", PIMRC'96, TAIPEI, TAIWAN, 15-18 OCT., 1996, PP 963-967.
- [3] WATTERSON C. C., JURUSHEK J. R. and BENSEMA W. D., "Experimental Confirmation of an HF Channel Model", IEEE

Transactions on Communications Technology, Vol COM-18, No 6, Dec 1970.

- [4] MÜLLER, A., "Simulation of Multipath Fading Channels Using the Monte-Carlo Method", IEEE, SUPERCOMM/ICC '94, 1994, p. 1536-1540, Vol. 3.
- [5] GUIMARÃES, A. G., "Modelagem e Simulação de Canais Rádio Móveis", Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 1998.
- [6] KELLER, T., HANZO, L., PIAZZO, L., MANDARINI, P., "Orthogonal Frequency Division Multiplex Synchronization Techniques for Frequency Selective Fading Channels", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 19, No 06, June 2001.