

Marca d'Água versus Superimposed Training em Filtragem Adaptativa

M. Uliani Neto, L. de C. T. Gomes e J. M. T. Romano

Resumo— Este trabalho apresenta uma comparação entre métodos de filtragem adaptativa baseados em marca d'água e em *superimposed training*. Ao contrário de técnicas adaptativas tradicionais, nas quais a comunicação é periodicamente interrompida para a transmissão de seqüências de treinamento, estes métodos empregam uma seqüência piloto que é transmitida ininterruptamente através do canal, juntamente com o sinal de informação. Esta seqüência é processada pelo filtro adaptativo, possibilitando o ajuste contínuo dos seus coeficientes. O diferencial dos métodos de marca d'água é a minimização das distorções introduzidas no sinal transmitido, preocupação esta inexistente nos métodos de *superimposed training*. Resultados de simulação evidenciam a viabilidade e as diferenças entre as técnicas discutidas.

Palavras-Chave— Filtragem adaptativa, marca d'água digital, *superimposed training*, equalização adaptativa, identificação adaptativa.

Abstract— This work presents a comparison between adaptive filtering methods based on watermark and superimposed training. In contrast to traditional adaptive methods, characterized by the periodic interruption of communication for the transmission of training sequences, these methods employ a pilot sequence transmitted uninterruptedly through the system, along with the information signal. This sequence is processed by the adaptive filter, allowing for the continuous adjustment of filter coefficients. The advantage of watermark methods is the minimization of the distortion introduced in the transmitted signal, which is not a concern in superimposed training methods. Simulation results illustrate the differences between the methods discussed.

Keywords— Adaptive filtering, digital watermark, superimposed training, adaptive equalization, adaptive identification.

I. INTRODUÇÃO

Métodos tradicionais de equalização e identificação adaptativas supervisionada baseiam-se na interrupção periódica da transmissão de informação para o envio de seqüências de treinamento, através das quais os coeficientes do filtro adaptativo são ajustados. O uso de seqüências de treinamento pode ser evitado recorrendo-se a técnicas cegas ou não-supervisionadas, que não contam com sinal de referência, baseando-se geralmente na análise de estatísticas de ordem superior do sinal; no entanto, estas técnicas podem enfrentar dificuldades pela existência de múltiplas soluções.

Uma alternativa aos métodos mencionados é conhecida como *superimposed training* [1]. Esta técnica baseia-se na

sobreposição ao sinal de informação de uma seqüência de dados piloto conhecida, antes da etapa de modulação em um sistema de comunicação. A seqüência piloto é detectada no receptor e usada como sinal de referência na filtragem adaptativa. O *superimposed training* não apresenta a propriedade de *transparência*, isto é, a seqüência de dados sobreposta ao sinal de informação pode prejudicar a detecção deste último por um sistema não preparado para a detecção da seqüência sobreposta, podendo inviabilizar a compatibilidade com sistemas de comunicação já existentes.

Foi proposto em [2], [3] um método de filtragem adaptativa supervisionada baseado no uso de uma *marca d'água digital* como sinal de referência. A marca d'água é um sinal de natureza similar à do sinal de informação e é continuamente inserida neste último ao longo do tempo. A marca d'água, conhecida no receptor, é utilizada para estimar as características do canal. Assim como no *superimposed training*, os sinais de informação e de referência são transmitidos continuamente.

As técnicas de marca d'água têm como requisito a *transparência*, isto é, a adição de uma marca ao sinal de informação não deve causar distorções prejudiciais ao sistema. Tais distorções poderiam ser minimizadas no *superimposed training* por meio do escalonamento da seqüência sobreposta, reduzindo a sua potência; no entanto, potências muito baixas do sinal sobreposto tornam o esquema menos robusto. Além disso, esta solução pode não ser apropriada para sinais que apresentem interpretação sensorial, como no caso de áudio, pois muitas vezes ruídos com pequenas amplitudes já são suficientes para ocasionar distorções perceptíveis. Neste contexto, o uso do *superimposed training* pode ser inviável. Nas técnicas de marca d'água, algoritmos específicos são empregados para garantir a *transparência* ao mesmo tempo em que a potência da marca é maximizada.

Este artigo apresenta uma comparação entre as técnicas de filtragem adaptativa utilizando marca d'água e *superimposed training* como sinal de supervisão. Mais especificamente, são abordados os problemas de equalização e identificação de canais. O artigo está estruturado como descrito a seguir. Nas seções II e III, são apresentados os métodos de equalização e identificação adaptativas utilizando marca d'água. A seção IV apresenta uma comparação entre as técnicas de marca d'água e *superimposed training*. Na seção V, são apresentados resultados experimentais que ilustram a comparação da seção precedente, tomando como exemplo canais de áudio e técnicas perceptivas que exploram fenômenos psicoacústicos. Finalmente, a seção VI traz algumas conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

Mário Uliani Neto e Leandro de C. T. Gomes, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), Rod. Campinas-Mogi-Mirim (SP 340), km 118,5, CEP 13086-902, Campinas, SP, Brasil; Tel.: (19) 3705-6724; e-mail: {uliani, tgomes}@cpqd.com.br.

João Marcos T. Romano e Mário Uliani Neto, DSPCom - Lab. de Proc. de Sinais para Comunicações Móveis - Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Caixa Postal 6101, CEP 13083-970, Campinas, SP, Brasil; Tel.: (19) 3521-3703, Fax: (19) 3289-1395; e-mail: romano@decom.fee.unicamp.br, uliani@cpqd.com.br.

II. EQUALIZAÇÃO ADAPTATIVA UTILIZANDO MARCA D'ÁGUA

Partes do sistema de equalização supervisionada aqui discutido foram apresentadas em [2], [3], [4], [5]. Uma marca d'água é transmitida continuamente, sobreposta ao sinal de informação, com $s(n) = t(n) + \alpha_m m(n)$, onde $s(n)$ é o sinal transmitido, $t(n)$ é o sinal de informação, $m(n)$ é a marca d'água e α_m é um fator de escala. A marca d'água $m(n)$ é um sinal branco, de potência normalizada e independente do sinal de informação $t(n)$. A marca d'água escalonada é utilizada como sinal de referência no filtro equalizador, levando a uma função custo que expressa o critério de Wiener: $J = E[|y(n) - d(n)|^2]$, onde $d(n)$ é o sinal de referência e $y(n)$ o sinal na saída do equalizador. A solução é obtida através da minimização da função custo com respeito aos coeficientes do equalizador \mathbf{w} .

A matriz de correlação \mathbf{R} do sinal $x(n)$ na entrada do equalizador, de dimensão $M \times M$, é expressa como:

$$\mathbf{R} = \alpha_m^2 \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{m}(n) \mathbf{m}^T(n)] \mathbf{H}^T + \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{t}(n) \mathbf{t}^T(n)] \mathbf{H}^T \quad (1)$$

onde α_m^2 corresponde à variância da marca d'água, $\mathbf{m}(n)$ e $\mathbf{t}(n)$ são, respectivamente, vetores com M elementos contendo amostras da marca d'água e do sinal de informação, e $\mathbf{H} \in \mathfrak{R}^{M \times (M+N-1)}$ é uma matriz de convolução do canal, sendo M a ordem do equalizador. Assume-se o canal como sendo FIR com função de transferência de ordem N e coeficientes $\mathbf{h} = [h_0 \cdots h_{N-1}]^T$. O vetor de correlação cruzada \mathbf{p} entre a entrada do equalizador $x(n)$ e o sinal desejado $\alpha_m m(n)$ é dado por:

$$\mathbf{p} = \alpha_m^2 \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{m}(n) m(n-d)] \quad (2)$$

onde d é o atraso ótimo de equalização. O ponto de mínimo global para a função custo J é:

$$\mathbf{w}_o = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} = \alpha_m^2 (\alpha_m^2 \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{m}(n) \mathbf{m}^T(n)] \mathbf{H}^T + \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{t}(n) \mathbf{t}^T(n)] \mathbf{H}^T)^{-1} \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{m}(n) m(n-d)] \quad (3)$$

A presença de $\mathbf{t}(n)$ na equação (3) implica em uma dependência da solução de Wiener com relação ao sinal de informação.

Pelo fato de a marca d'água ter espectro branco e ser normalizada em potência, o termo $E[\mathbf{m}(n) \mathbf{m}^T(n)]$ torna-se uma matriz identidade. Assumindo que o sinal de informação seja decorrelacionado, o termo $E[\mathbf{t}(n) \mathbf{t}^T(n)]$ é também uma matriz identidade multiplicada pela variância σ_t^2 de $\mathbf{t}(n)$. Com isso, a matriz \mathbf{R} pode ser reescrita como:

$$\mathbf{R} = \alpha_m^2 \mathbf{H} \mathbf{H}^T + \sigma_t^2 \mathbf{H} \mathbf{H}^T = (\alpha_m^2 + \sigma_t^2) \mathbf{H} \mathbf{H}^T \quad (4)$$

Agora, \mathbf{R} não está mais subordinada ao sinal $\mathbf{t}(n)$ (exceto à variância σ_t^2 , que pode ser estimada). Os coeficientes ótimos referentes à solução de Wiener podem ser expressos como:

$$\mathbf{w}_o = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} = \frac{\alpha_m^2}{\alpha_m^2 + \sigma_t^2} (\mathbf{H} \mathbf{H}^T)^{-1} \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{m}(n) m(n-d)] \quad (5)$$

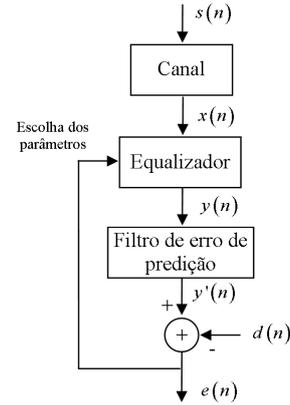


Fig. 1. Esquema básico de equalização utilizando marca d'água.

Exceto por um fator de escala, os coeficientes do equalizador tendem a um ponto que inverte a resposta impulsiva do canal.

Para o caso de sinais de informação correlacionados, tem-se:

$$\mathbf{R} = \alpha_m^2 \mathbf{H} \mathbf{H}^T + \mathbf{H} \mathbf{E} [\mathbf{t}(n) \mathbf{t}^T(n)] \mathbf{H}^T \quad (6)$$

Empregando-se um método de branqueamento, pode-se fazer com que o sistema convirja para a solução dada na equação (5). No esquema da figura 1, é introduzido um filtro de erro de predição na saída do equalizador. Este filtro tem como objetivo branquear o sinal $y(n)$ através da filtragem de suas componentes redundantes (periódicas). A saída do preditor será composta pela parte correlacionada do sinal $y(n)$. Através do cálculo da diferença entre $y(n)$ e o sinal na saída do preditor, obtemos $y'(n)$, que corresponde à parcela decorrelacionada da saída do equalizador. Tem-se assim:

$$y'(n) = y(n) - \sum_{k=0}^{P-1} w_{f,k} y(n+k-\Delta) \quad (7)$$

onde $w_{f,k}$ são os coeficientes do preditor com P elementos de atraso. Como a função custo do equalizador tende a um mínimo, o sinal de erro $y'(n)$ tende às componentes decorrelacionadas do sinal de informação, mais a marca d'água (que é um sinal decorrelacionado). O atraso Δ deve ser grande o suficiente para que o filtro de predição seja capaz de remover a correlação do sinal $y(n)$.

Para garantir a transparência da marca d'água, a seqüência pseudo-aleatória $m(n)$ é submetida a um processo de conformação espectral realizado por meio de um filtro $H(f)$, cuja resposta em frequência segue um limiar obtido através de uma análise espectral. No caso de sinais sensoriais, a conformação espectral é guiada por um limiar de mascaramento fornecido por um modelo perceptivo. O sinal $w(n)$ resultante é adicionado ao sinal $t(n)$, produzindo o sinal marcado $s(n)$. Esta abordagem é ilustrada na figura 2.

Para que seja possível utilizar a informação da marca d'água como sinal de referência no filtro equalizador, o sinal $x(n)$ (marcado e distorcido pelo canal) é primeiramente filtrado por $G(f)$. Este último é um filtro de conformação espectral com resposta em frequência invertida com relação ao limiar espectral do sinal $x(n)$. O objetivo deste filtro é contrabalançar

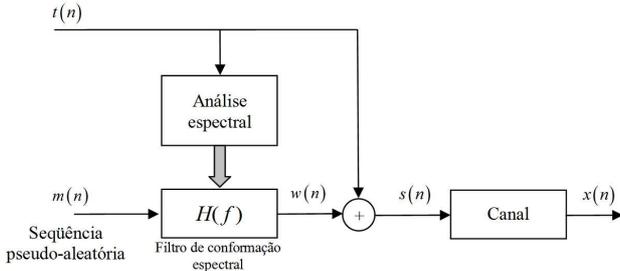


Fig. 2. Esquema de inserção de marca d'água.

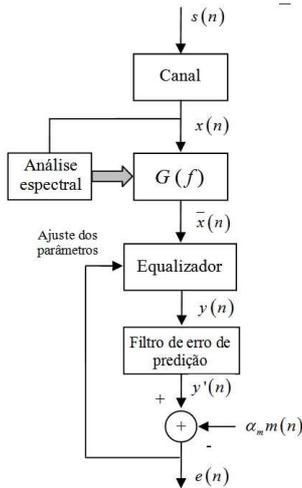


Fig. 3. Esquema completo de equalização utilizando marca d'água.

a conformação espectral $H(f)$ imposta ao sinal de marca d'água para garantir a sua transparência. Supõe-se aqui que a potência da marca d'água é muito inferior à do sinal de informação, não afetando significativamente o limiar espectral, e que a distorção do canal não é forte o bastante para inutilizar o limiar espectral calculado a partir do sinal recebido.

O sinal $\bar{x}(n)$ na saída do filtro $G(f)$ contém uma estimativa do sinal $m(n)$ distorcido pelo canal, mais o sinal de informação distorcido pelo canal e filtrado por $G(f)$. O sinal $\bar{x}(n)$ é então utilizado no processo descrito anteriormente para a obtenção dos coeficientes do equalizador. O processo completo encontra-se ilustrado na figura 3. Para a obtenção do sinal de informação equalizado, o sinal $x(n)$ na saída do canal deve ser filtrado diretamente pelo equalizador calculado através do algoritmo descrito.

III. IDENTIFICAÇÃO ADAPTATIVA UTILIZANDO MARCA D'ÁGUA

Como no método descrito na seção precedente, uma marca d'água é transmitida continuamente, sobreposta ao sinal de informação, utilizando a técnica de espalhamento espectral [2], [6]. A marca d'água $m(n)$ é um sinal branco, de potência normalizada e independente do sinal de informação $t(n)$. A marca d'água escalonada é utilizada como sinal de referência no filtro identificador adaptativo, levando a uma função custo $J = E[|y(n) - d(n)|^2]$. A solução é obtida através da minimização da função custo com respeito aos coeficientes \mathbf{w} do modelo.

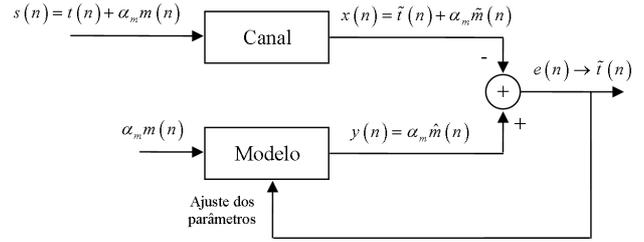


Fig. 4. Esquema básico de identificação utilizando marca d'água.

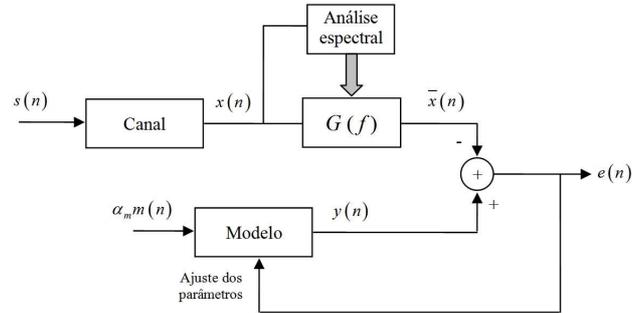


Fig. 5. Esquema completo de identificação utilizando marca d'água.

A superfície de erro do critério de Wiener para este sistema pode ser escrita da seguinte forma:

$$J(\mathbf{w}) = \sigma_x^2 - \mathbf{p}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{p}_m + (\mathbf{w} - \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{p}_m)^T \mathbf{R}_m (\mathbf{w} - \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{p}_m) \quad (8)$$

onde σ_x^2 é a variância do sinal de referência, e os termos \mathbf{R}_m e \mathbf{p}_m expressam, respectivamente, a autocorrelação e a correlação cruzada do sinal de marca d'água.

Para obter-se o ponto de mínimo na equação (8), o termo $(\mathbf{w} - \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{p}_m)$ deve ser igualado a zero:

$$\mathbf{w}_0 - \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{p}_m = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{w}_0 = \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{p}_m \quad (9)$$

O ponto de mínimo obtido, mostrado na equação (9), depende apenas das características do sinal de marca d'água, bastando o conhecimento prévio deste sinal para que seja possível o ajuste dos coeficientes do modelo. A figura 4 ilustra este esquema.

Para garantir a inaudibilidade da marca d'água, a sequência pseudo-aleatória $m(n)$ é submetida a uma conformação espectral, tendo sua densidade espectral de potência adequada a um limiar por meio de um filtro $H(f)$. O sinal $w(n)$ resultante é adicionado ao sinal $t(n)$, produzindo o sinal marcado $s(n)$, conforme ilustrado na figura 2.

Assumindo que a potência da marca d'água seja muito inferior à do sinal de informação e que a distorção do canal não seja forte o bastante para inutilizar o limiar espectral calculado a partir do sinal recebido, $x(n)$ é filtrado no receptor por um filtro de conformação espectral $G(f)$ com resposta em frequência invertida com relação ao limiar espectral do sinal recebido. O sinal filtrado $\bar{x}(n)$ é então utilizado no processo de identificação, conforme descrito anteriormente. O esquema completo resultante encontra-se ilustrado na figura 5.

IV. MARCA D'ÁGUA VERSUS SUPERIMPOSED TRAINING

A diferença principal entre métodos de marca d'água e *superimposed training* reside no conceito de transparência. Em ambas as técnicas, um sinal de referência é transmitido continuamente, adicionado ao sinal de informação. Em um receptor não preparado para detectar o sinal de referência, este último é encarado como ruído. No *superimposed training*, não existe preocupação com a transparência do sinal de referência, de modo que o ruído introduzido no sinal transmitido pode inviabilizar a compatibilidade deste sinal com sistemas de comunicação já existentes (não preparados para tirar proveito do sinal de referência). Além disso, no caso de sinais com interpretação sensorial (e.g. áudio e imagens), a degradação introduzida pelo *superimposed training* pode ser inaceitável.

Já nos métodos de marca d'água, a transparência é um requisito básico. Isto significa que as distorções provocadas pela adição do sinal de referência ao sinal de informação são minimizadas, tornando o sinal marcado compatível com receptores já existentes (não preparados para detectar a marca d'água) e possibilitando a aplicação destes métodos a sinais com interpretação sensorial. A transparência da marca d'água pode ser obtida, por exemplo, empregando-se uma análise espectral que defina limites para a densidade de potência da marca d'água em cada faixa do espectro. Por meio de um filtro de conformação espectral, a marca pode ser ajustada a esses limites, maximizando a sua potência (e portanto a robustez do sistema) sem violar o requisito de transparência.

No contexto dos métodos de filtragem adaptativa utilizando um sinal de referência sobreposto, a propriedade de transparência amplia a gama de aplicações desses métodos. Com relação ao processamento de sinais com interpretação sensorial, como áudio, imagem e vídeo, podem-se citar como possíveis aplicações o cancelamento de eco, o cancelamento dinâmico de reverberação e a melhoria do desempenho de algoritmos de compressão de áudio ou imagem [2]. Além disso, a marca d'água também pode melhorar a eficiência de sistemas de comunicação, permitindo, por exemplo, a maximização da potência do sinal de referência entre canais de comunicação separados no espectro, ou a maximização deste sinal em regiões já poluídas do espectro, nas quais a introdução de um ruído adicional não provoque mudança significativa no desempenho do sistema.

Embora o termo *superimposed training* seja tradicionalmente utilizado na literatura para designar métodos de filtragem adaptativa baseados na sobreposição de um sinal de referência ao sinal de informação, a introdução do requisito de transparência os torna muito próximos dos métodos de marca d'água, também tradicionais na literatura. Neste sentido, parece-nos adequado o emprego do termo "marca d'água", no contexto de filtragem adaptativa, para designar sinais de referência que apresentem a propriedade de transparência.

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA CANAIS DE ÁUDIO

Com o objetivo de evidenciar a diferença entre as técnicas de marca d'água e *superimposed training* no contexto de filtragem adaptativa, tomamos como exemplo um canal de áudio em banda base. Para evitar degradações audíveis, o sinal

de referência deve apresentar uma potência muito inferior à do sinal de áudio. Além disso, sinais de áudio são geralmente não-estacionários e fortemente coloridos.

Em sistemas de marca d'água para áudio, modelos psicoacústicos podem ser empregados para estimar o limiar de mascaramento do sinal de áudio e fornecê-lo a um algoritmo de conformação espectral. Esta operação resulta no sinal de marca d'água, cuja densidade espectral de potência estará abaixo do limiar de mascaramento do áudio, não podendo ser ouvido na presença deste último. Com isso, respeitada a condição de transparência, a energia da marca d'água é maximizada, aumentando a robustez do sistema. Caso se necessite, por um motivo qualquer, de uma marca d'água com potência diferente da obtida pelo processo descrito, o sinal de marca d'água pode ser escalonado. Se a densidade espectral de potência da marca resultante ultrapassar o limiar de mascaramento, a marca se tornará audível; no entanto, ainda assim a distorção percebida tenderá a ser significativamente menos acentuada do que a obtida no *superimposed training* com um sinal de referência de energia uniformemente distribuída em frequência.

Nos resultados apresentados nesta seção, foi empregado o modelo psicoacústico número 1 do padrão MPEG-1, disponibilizado pela ISO em implementação de referência. O filtro de conformação espectral foi obtido a partir do limiar de mascaramento por meio do algoritmo de Levinson [7].

Foram realizadas simulações com materiais de áudio variados e potencialmente sensíveis a degradações, tomando por base avaliações realizadas pelo *Communications Research Centre* do Canadá [8]. O material selecionado, apresentado na tabela I, inclui voz e instrumentos musicais, tanto isolados como em conjunto.

Sinal	Descrição	Duração	Fonte
<i>dirs</i>	<i>Dire Straits</i>	10 s	CD 7599-25264-2 (trilha 6)
<i>svega</i>	<i>Suzanne Vega</i>	10 s	AT&T mix
<i>trump</i>	<i>Solo trompete</i>	10 s	Universidade de Miami
<i>symph</i>	<i>Orquestra</i>	10 s	EBU SQAM CD (trilha 17)

TABELA I

MATERIAL DE ÁUDIO UTILIZADO NAS AVALIAÇÕES DE QUALIDADE.

Para avaliação da qualidade do áudio após a inserção da marca d'água, foi empregada uma implementação comercial do algoritmo de avaliação objetiva PEAQ [9]. Foram utilizados arquivos de áudio no formato PCM linear, 16 bits por amostra, mono, com taxa de amostragem de 44,1 kHz (aceita pelo algoritmo PEAQ graças a uma extensão proprietária da implementação utilizada).

A. Qualidade do Áudio

O indicador de qualidade de áudio do PEAQ, denominado *Objective Difference Grade* (ODG), varia em uma escala contínua desde 0,0 (degradação imperceptível) até -4,0 (degradação muito incômoda). Degradações na faixa de -1,0 a -0,1 podem ser consideradas imperceptíveis para ouvintes comuns (sem treinamento específico para detecção de degradações em áudio), enquanto degradações compreendidas

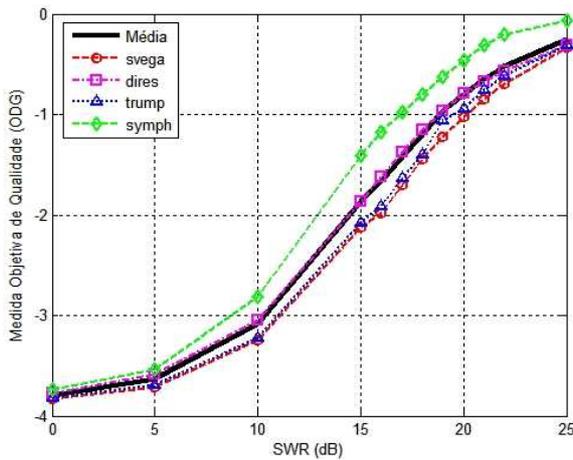


Fig. 6. Medida ODG versus SWR usando marca d'água.

entre $-0,5$ e $-0,1$ são em geral imperceptíveis até mesmo para especialistas em áudio [10].

A figura 6 apresenta a curva de ODG em função da relação sinal-marca d'água (SWR, do inglês *signal-to-watermark ratio*) para todas as amostras de áudio analisadas, incluindo também a curva média, utilizando o método de marca d'água. Observa-se que, para $SWR=20$ dB, tem-se um valor ODG médio de $-0,8$, dentro da faixa de imperceptibilidade para um ouvinte comum. Para $SWR=23$ dB, tem-se um valor ODG médio de $-0,45$, dentro da faixa de imperceptibilidade para especialistas em áudio. A faixa de SWR entre 20 e 23 dB é portanto adequada para sistemas de marca d'água de áudio.

A figura 7 apresenta a medida de distorção ODG em função da relação sinal-sequência sobreposta (ITR, do inglês *information-to-training ratio*) para as amostras de áudio analisadas, nas quais foi inserida uma sequência branca, conforme o método de *superimposed training*. Para $SWR=20$ dB e $SWR=23$ dB, respectivamente, o ODG médio está em torno de $-3,60$ e $-3,25$, ambos na faixa classificada como degradação muito incômoda. Para uma $SWR=25$ dB, a medida ODG média aproxima-se de $-3,0$, limiar entre as faixas de degradação incômoda e muito incômoda.

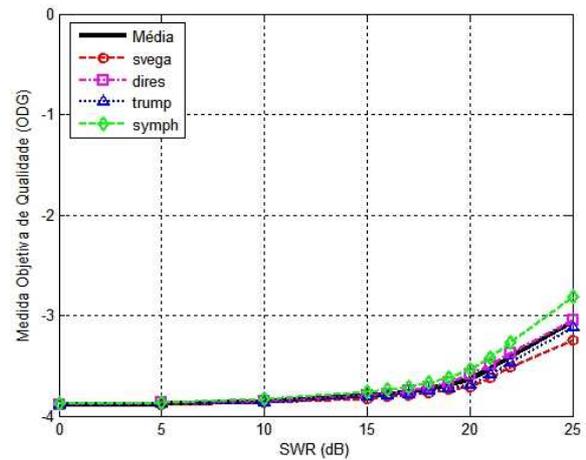
A comparação entre os resultados das figuras 6 e 7 evidencia a diferença entre a técnica de marca d'água e os métodos de *superimposed training*. Para que o *superimposed training* pudesse ser aplicado a sinais de áudio sem introduzir degradações perceptíveis, seria necessário reduzir a potência do sinal de referência a níveis praticamente indetectáveis.

B. Sistema de Equalização

Apresentamos a seguir resultados experimentais para o sistema de equalização. O canal foi simulado por um filtro FIR de quatro coeficientes e fase mista:

$$H(z) = 1 + 1,2z^{-1} - 0,3z^{-2} + 0,8z^{-3} \quad (10)$$

Foi empregado um equalizador adaptativo com cinco coeficientes inicializados na origem.

Fig. 7. Medida ODG versus ITR usando *superimposed training*.

Para branqueamento dos sinais de áudio, utilizou-se um filtro de erro de predição linear com 750 coeficientes e um atraso Δ de 2.200 amostras. Este atraso foi determinado supondo uma correlação significativa dos sinais de áudio numa faixa de até 50 ms, a uma taxa de 44,1 kHz. O filtro equalizador foi otimizado através do algoritmo RLS com fator de esquecimento $\lambda = 1$. O filtro de erro de predição foi otimizado através do algoritmo LMS com passo $\mu = 0,0001$. Essa combinação apresentou 100% de convergência global.

Sinal	EQM (20 dB)	EQM (23 dB)
<i>diras</i>	0,179	0,211
<i>svega</i>	0,176	0,206
<i>trump</i>	0,161	0,192
<i>symph</i>	0,169	0,201

TABELA II

EQM DO SINAL EQUALIZADO COM MARCA D'ÁGUA.

A tabela II apresenta o erro quadrático médio (EQM) entre o sinal original e o sinal equalizado para SWR de 20 e 23 dB, tendo sido empregados o modelo psicoacústico e o filtro de conformação espectral para minimização da distorção audível. A título de comparação, o equalizador ótimo de Wiener de cinco coeficientes, calculados analiticamente, fornece os seguintes valores de EQM: 0,082 para *diras*, 0,079 para *svega*, 0,060 para *trump* e 0,080 para *symph*. Para $SWR=20$ dB, o EQM apresenta valores relativamente baixos e próximos dos valores ótimos. Para $SWR=23$ dB, o EQM apresenta um ligeiro aumento, porém permanece relativamente próximo dos valores ótimos, encontrando-se em um patamar satisfatório para a maioria das aplicações.

A tabela III apresenta medidas similares para o *superimposed training*, no qual a energia do sinal de referência é uniformemente distribuída em frequência; esta técnica foi simulada por meio do esquema da figura 1 (marca d'água branca). Apesar de uma ligeira redução no EQM, os resultados são praticamente equivalentes aos obtidos com o uso da marca d'água, indicando que os métodos apresentam características de convergência similares.

Sinal	EQM (20 dB)	EQM (23 dB)
di-res	0,173	0,202
svega	0,168	0,197
trump	0,154	0,187
symph	0,165	0,192

TABELA III

EQM DO SINAL EQUALIZADO COM *superimposed training*.

C. Sistema de Identificação

Apresentamos a seguir resultados experimentais para o sistema de identificação. O canal foi simulado por meio do filtro especificado na equação 10. Foi utilizado um modelo de identificação com quatro coeficientes inicializados na origem. O filtro modelo foi otimizado através do algoritmo RLS com fator de esquecimento $\lambda = 1$. O algoritmo de marca d'água utilizou um filtro de conformação espectral de ordem 50.

Para avaliação do desempenho do algoritmo, foi utilizada uma medida de desvio dos coeficientes do filtro identificador em relação aos coeficientes do canal dada por $D = \|\mathbf{h}_{obtido} - \mathbf{h}\|/\|\mathbf{h}\|$, sendo \mathbf{h}_{obtido} a estimativa dos coeficientes do canal e \mathbf{h} o seu valor exato. Quanto mais próximo D estiver de zero, melhor é o desempenho do algoritmo.

Sinal	Desvio D (20 dB)	Desvio D (23 dB)
di-res	0,0586	0,0779
svega	0,0464	0,0656
trump	0,0373	0,0513
symph	0,0428	0,0639

TABELA IV

DESvio DA IDENTIFICAÇÃO COM MARCA D'ÁGUA.

A tabela IV apresenta o desvio D dos parâmetros do filtro identificador para valores de SWR de 20 e 23 dB, utilizando a marca d'água com conformação espectral. Para uma mesma SWR, os valores obtidos para o desvio D foram muito próximos entre si para todos os sinais analisados. O desvio máximo admissível depende da aplicação em questão.

Sinal	Desvio D (20 dB)	Desvio D (23 dB)
di-res	0,0521	0,0703
svega	0,0394	0,0589
trump	0,0318	0,0446
symph	0,0382	0,0576

TABELA V

DESvio DA IDENTIFICAÇÃO COM *superimposed training*.

A tabela V apresenta medidas similares para o *superimposed training*, simulado por meio do esquema de identificação da figura 4 (marca d'água branca). Apesar de uma ligeira redução no desvio D , os resultados são muito próximos dos obtidos com a marca d'água, indicando que a conformação espectral não prejudicou a convergência do sistema.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma comparação entre métodos de filtragem adaptativa baseados em marca d'água

e *superimposed training*. Foram discutidas as similaridades e diferenças entre os métodos, ressaltando-se a propriedade de transparência que caracteriza a marca d'água. Esta propriedade amplia a gama de aplicações das técnicas de sobreposição de sinal de referência; em particular, ela permite a sua aplicação a sinais com interpretação sensorial, além de possibilitar a compatibilidade do sinal transmitido com receptores já existentes.

Como exemplos concretos de aplicação das técnicas discutidas, foram abordados os problemas de equalização e identificação adaptativas de canais. Foram apresentados resultados de simulações computacionais tomando como base um canal de áudio. No caso da técnica de marca d'água, foi empregado um modelo psicoacústico em conjunto com um algoritmo de conformação espectral.

Conforme avaliações objetivas de qualidade de áudio, a marca d'água mostrou-se imperceptível para uma relação de potência áudio/marca acima de um limiar entre 20 e 23 dB, enquanto o *superimposed training* levou a uma degradação impraticável mesmo para 25 dB. Além disso, os resultados indicaram que a marca d'água, utilizando a análise espectral e o filtro de conformação, não prejudicou significativamente a convergência dos sistemas adaptativos em relação ao *superimposed training* para um sinal de referência de mesma potência.

Como perspectiva de trabalhos futuros, pretende-se avaliar a aplicabilidade da marca d'água a problemas correlatos de processamento de áudio, tais como cancelamento de eco e reverberação. Planeja-se ainda adaptar os métodos apresentados a outras classes de sinais com interpretação sensorial, tais como imagens e vídeo. Além disso, pretende-se avaliar a aplicação dos métodos de marca d'água e *superimposed training* a sinais de telecomunicações (e.g. modulação OFDM).

REFERÊNCIAS

- [1] A. R. Varma, L. L. H. Andrew, C. R. N. Athaudage, J. H. Manton, *Iterative algorithms for channel identification using superimposed pilots*, Australian Communications Theory Workshop, February, 2004.
- [2] M. Uliani Neto, *Equalização e Identificação Adaptativas Utilizando Marca d'Água como Sinal de Supervisão*, Dissertação de Mestrado, Unicamp, 2008.
- [3] L. de C. T. Gomes, M. Uliani Neto e J. M. T. Romano, *Equalização e Identificação Adaptativas para Áudio Utilizando Marca d'Água como Sinal de Supervisão*, 6º Congresso de Engenharia de Áudio (AES 2008), 5-7 de maio de 2008, São Paulo, Brasil.
- [4] M. Uliani Neto, L. de C. T. Gomes, J. M. T. Romano, and M. Bonnet, *Égalisation et synchronisation utilisant un tatouage comme signal de référence*, XXI colloque GRETSI, 11-14 de setembro, Troyes, França, 2007.
- [5] M. Uliani Neto, L. de C. T. Gomes, J. M. T. Romano, and M. Bonnet, *Adaptive equalization based on watermarking*, VI International Telecommunications Symposium (ITS2006), 3-6 de setembro, Fortaleza, Brasil, 2006.
- [6] M. Uliani Neto, L. de C. T. Gomes e J. M. T. Romano, *Identificação Adaptativa Supervisionada Utilizando Marca d'Água Digital*, XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBTr 2007), 3-6 de setembro de 2007, Recife, Brasil.
- [7] L. de C. T. Gomes, *Tatouage de signaux audio*, Tese de doutorado, Université René Descartes (Paris V), France, 2002.
- [8] G. A. Soulodre, T. Grusec, M. Lavoie, and L. Thibault, *Subjective evaluation of state-of-the-art 2-channel audio codecs*, AES 104th Convention, 1998.
- [9] ITU-R Recommendation BS.1387-1, *Method for objective measurements of perceived audio quality*, 1998.
- [10] M. Arnold, *Subjective and objective quality evaluation of watermarked audio tracks*, Proceedings of the Second International Conference on WEB Delivering of Music (WEDELMUSIC.02), 2002.