

O LAPLACIANO COMO FILTRO NA ANÁLISE DE ONDAS CEREBRAIS *

C. G. CARVALHAES[†], J. A. DE BARROS[‡] & P. SUPPES[§]

Resumo

Apresentamos uma técnica de processamento de sinais de EEG que permite uma boa identificação de padrões de ondas cerebrais gerados em resposta a estímulos auditivos. Neste tratamento, o operador laplaciano é aplicado ao sinal de EEG como forma de se eliminar ruídos elétricos gerados por fontes de cargas não locais e melhorar o desempenho do algoritmo de reconhecimento de palavras. Foram analisados os sinais elétricos de dois indivíduos submetidos a estímulos auditivos durante a aquisição do EEG. As transformadas de Fourier são aplicadas para estabelecer filtros ótimos para o reconhecimento das palavras. O estudo mostra que a aplicação do laplaciano não apenas melhora o reconhecimento mas também aponta regiões específicas do cérebro que seriam responsáveis pelo processamento das palavras. Essa identificação é sugerida pelo aparente isomorfismo entre mapas de atividade cerebral dos dois indivíduos estudados.

**Palavras chave:* EEG, ondas cerebrais, laplaciano

[†]Instituto de Matemática e Estatística, UERJ, RJ, Brasil, carvalhaes@ime.uerj.br

[‡]Departamento de Física, UFJF, MG, Brasil, acacio@fisica.ufjf.br

[§]Center for the Study of Language and Information, Stanford University, Stanford, CA

1 Introdução

Em razão do seu baixo custo e praticidade, o eletroencefalograma (EEG) é uma técnica largamente empregada na neurociência cognitiva. Estudos do EEG mostram, por exemplo, que há uma ligação direta entre as frequências dominantes nas ondas cerebrais e o comportamento de uma pessoa. Oscilações entre 0,75 e 4 Hz são associadas a estágios do sono [1], enquanto frequências na banda de 10 a 40 Hz são típicas de estados de vigília [2, 3].

Recentemente, o EEG passou a ser empregado para se estudar a associação entre ondas cerebrais e a linguagem. Em uma série de artigos, Patrick Suppes e seus colaboradores [4–8] mostraram um procedimento computacional que permite, com boa taxa de reconhecimento, descobrir o que um indivíduo ouviu (palavras e sentenças) a partir do EEG (ou MEG).

O sinal do EEG é um traçado gráfico dos micropotenciais de superfície captados no couro cabeludo. Esses potenciais são gerados pela atividade neural coletiva no interior do cérebro e por fontes externas ao cérebro, como o movimento dos olhos, o batimento cardíaco e a tensão da rede elétrica. Essas fontes externas são indesejadas no estudo da atividade cerebral. Neste trabalho, propomos o uso do operador laplaciano de superfície ao sinal de EEG como forma de filtrar ruídos externos ao cérebro e melhorar a taxa de reconhecimento de palavras. A motivação é oriunda do laplaciano de superfície do potencial ser uma grandeza associada ao fluxo elétrico local no couro cabeludo. Para mostrar isso, seja ∇_s^2 o operador laplaciano de superfície, definido por $\nabla_s^2 = \nabla_s \cdot \nabla_s$, onde $\nabla_s = (D_x, D_y)$. Supondo que o couro cabeludo é um condutor ohmico com condutância σ , a densidade de corrente J é ligada ao potencial V por $J = -\sigma \nabla V$, onde ∇ é o operador 3D. Se o couro cabeludo não possui fontes de carga e se todas as fontes que geram o potencial estão no interior do crânio, o divergente 3D de J é nulo. Logo $\nabla_s \cdot J = -\sigma \nabla_s^2 V$. Ou seja, o laplaciano de superfície do potencial do couro cabeludo é proporcional ao fluxo *local* da carga elétrica do

crânio para o couro cabeludo.

Os dados experimentais (EEG) que analisaremos fazem parte do conjunto estudado na referência [8], que abordou experimentos com estímulos auditivos e visuais. Usaremos apenas os dados dos experimentos com estímulos auditivos, que foram coletados dos sujeitos rotulados em [8] por S6 e S7. Por conveniência, manteremos essa designação.

Na Seção 2, descrevemos o procedimento experimental, o algoritmo de reconhecimento de palavras e apresentamos a forma como o laplaciano será aplicado ao sinal de EEG. Os resultados são descritos na Seção 3. Na Seção 4 apresentamos nossas conclusões.

2 Material e Método

Os sujeitos S6 e S7 tiveram seu EEG gravado em um equipamento de 64 canais (eletrodos). Os dois são do sexo masculino, com idades 75 e 30 anos, respectivamente. S6 é nativo da língua inglesa e S7 da língua chinesa, mas com inglês fluente. Na captação, eles tiveram suas cabeças cobertas por um capuz com 64 eletrodos e o potencial foi gravado com taxa de amostragem de 500 Hz.

Em intervalos de 1,5 a 1,7 s, por intermédio de um fone de ouvido, os seguintes estímulos auditivos, consistindo de palavras em inglês, eram enviados aos sujeitos: *first*, *second*, *third*, *yes*, *no*, *left* e *right*. Cada estímulo durava cerca de 300 ms. Chamaremos *trial* o conjunto de amostras de EEG para um estímulo. Cada *trial* inicia-se 102 ms (204 pontos) antes de um estímulo e se estende por 512 ms (1.024 pontos). Cada um dos sete estímulos foi apresentado cerca de 100 vezes a cada indivíduo, de maneira aleatória. Dos 64 canais, apenas 57 captam potenciais do couro cabeludo.

O algoritmo de reconhecimento de palavras envolve vários procedimentos [8]. Cada *trial*, em cada canal, é ajustado na linha de base subtraindo-se a média

dos primeiros 204 pontos. Cada conjunto de 100 *trials* correspondentes à mesma palavra é separado em dois subconjuntos. Um subconjunto é denotado por E , e contém os *trials* pares, o outro é denotado por O , e contém os *trials* ímpares. São então criados *protótipos* e *amostras de teste*. Na configuração designada por **EO**, o protótipo é a média aritmética dos 50 *trials* do conjunto E e as amostras são médias de um número menor de *trials* do conjunto O (e.g., 5 amostras de 10 *trials*). Depois, cada amostra é comparada com cada um dos 7 protótipos de seu canal, através da distância dada por mínimos quadrados. Considera-se que uma amostra foi classificada corretamente se sua distância ao protótipo correto for a menor. A razão entre o número total de reconhecimentos corretos pelo número de possibilidades define a *taxa de reconhecimento*.

A taxa de reconhecimento é melhorada pela aplicação de filtros digitais aos protótipos e amostras. Essa aplicação consiste em selecionar uma banda de freqüências e em seguida: (i) tomar a transformada de Fourier dos protótipos e amostras; (ii) eliminar as freqüências que não pertencem à banda escolhida (filtragem); (iii) aplicar a transformada inversa. O reconhecimento é processado a cada filtragem, buscando-se bandas de freqüência que forneçam taxas de reconhecimento ótimas para o canal. Neste trabalho, utilizamos o algoritmo FFTW [9] para a transformada e um filtro *butterworth* de quarta ordem [10].

Para processarmos o algoritmo acima no laplaciano, precisamos computar a derivada do sinal discreto. Ao invés de usar diretamente métodos de diferenças finitas [11], utilizaremos a interpolação por harmônicos esféricos [12, 13], que representa o laplaciano num ponto $\mathbf{r}$ do couro cabeludo como

$$\nabla_s^2 V(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N c_i h_m \left(\frac{\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}}{r_i r} \right), \quad (2.1)$$

onde N é o número de eletrodos, $\mathbf{r}_i$ é a posição do eletrodo i ,

$$h_m(x) = -\frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)^2}{n^m (n+1)^m} P_n(x) \quad (2.2)$$

$P_n(x)$ é o polinômio de legendre de ordem n em x e $m > 1$ é um inteiro chamado *ordem de interpolação*.

3 Resultados

Calculamos o laplaciano do EEG para vários valores da ordem de interpolação e do truncamento ($n_{\max}$) no somatório em (2.2) e obtivemos como valor ideal $n_{\max} = 4$. Quanto à ordem de interpolação, as melhores taxas ocorrem para $m = 3, 4$ ou 5 . A Tabela 1 resume os melhores resultados ¹. As linhas em negrito indicam os maiores picos de reconhecimento.

Tabela 1: As linhas com a coluna m vazia referen-se ao processamento sem o laplaciano. Em todos os casos as amostras foram construídas com média em 10 trials.

Indivíduo	Configuração	Melhor Taxa (%)	m	Canal	Filtro
S6	EO	66	4	C1P	1,0 a 4,5 Hz
S6	EO	62		C6A	2,5 a 10,0 Hz
S6	OE	62	4	F7	1,5 a 22,5 Hz
S6	OE	62		C6A	2,5 a 8,0 Hz
S7	EO	79	4	F5	5,5 a 6,5 Hz
S7	EO	76		C2A	5,5 a 6,5 Hz
S7	OE	83	3	C4A	4,5 a 6,5 Hz
S7	OE	79		C3	2,0 a 12,5 Hz

Também estudamos como número de *trials* por amostra altera a taxa de reconhecimento. A Figura 1 mostra o resultado comparando o processamento do laplaciano com o processamento do potencial. Para o laplaciano, foi empregado o canal C4A com filtro 4,5 a 6,5 Hz (linha 7) e, para o potencial, o canal C3

¹As nomenclaturas dos canais segue o padrão internacional para o EEG de 64 canais.

com filtro 2,0 a 12,5 Hz (linha 8). Observe que as retas de melhores ajustes no gráfico projetam um desempenho superior para o laplaciano.

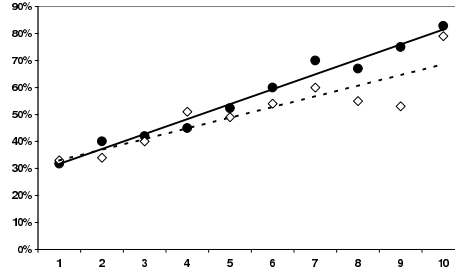
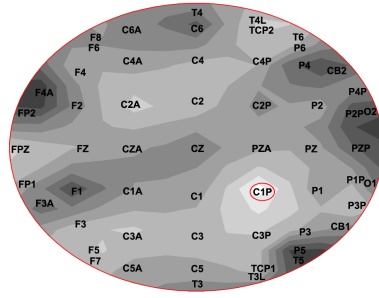


Figura 1: Taxa de reconhecimento para diferente números de *trials* compondo as amostras do indivíduo S7 na configuração OE. O eixo horizontal corresponde ao número de amostras e o vertical à percentagem de acertos. O símbolo $\square$ representa processamento com laplaciano no canal C4A e $\diamond$ com potencial no canal C3.

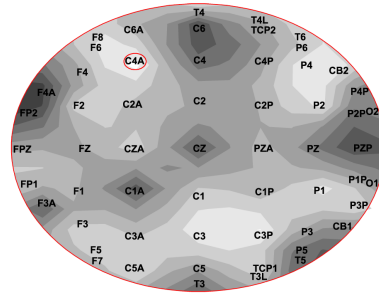
A Figura 2 mostra dois mapas onde as áreas da cabeça de S6 e S7 são coloridas de acordo com a taxa de reconhecimento de palavras em cada eletrodo. As áreas mais claras são aquelas em que as taxas de reconhecimento são mais altas. Os filtros empregados são os que fornecem os picos de reconhecimento (linhas 1 e 7 da Tabela 1).

4 Conclusões

Apresentamos um método para o processamento do EEG que emprega o laplaciano do potencial de superfície para eliminar ruídos de fontes não locais no potencial do couro cabeludo. Foram analisados os EEG de dois indivíduos e os resultados do processamento para reconhecimento de palavras foram comparados com os obtidos sem o emprego do laplaciano. Mostramos que, nos casos estudados, a taxa de reconhecimento de palavras obtida com o emprego



(a) Sujeito S6, filtro de 2,0 a 12,5 Hz, $m = 4$, EO.



(b) Sujeito S7, filtro de 4,5 a 6,5 Hz, $m = 3$, OE.

Figura 2: Mapas das taxas de reconhecimento para os melhores filtros da Tabela 1. As áreas claras correspondem às taxas mais altas. A primeira linha de eletrodos à esquerda se localizam na parte frontal da cabeça.

do laplaciano é ligeiramente superior ao caso comum. A Figura 1 mostra que essa superioridade aumenta à medida que o número de amostras de palavras disponíveis cresce.

Verificamos uma aparente semelhança nas distribuições das taxas de reconhecimento de S6 e S7 (Figura 2). Essa semelhança sugere que as regiões responsáveis pelo reconhecimento das palavras são as mesmas nos dois indivíduos. O fato do sujeito S6 não ser nativo da língua inglesa influencia os resultados e dificulta a detecção desse possível isomorfismo. Essa possibilidade deve então ser investigada analisando-se um número maior de experimentos com sujeitos da língua inglesa. Vale destacar que os mesmos mapas quando gerados pela técnica do potencial não destaca nenhuma propriedade especial.

Referências

- [1] J. S. Barlow, *The Electroencephalogram: its Patterns and Origins*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993.
- [2] A. A. Borbély, O. Hayaishi, T. J. Sejnowski & J. S. Altman (eds), *The Regulation of Sleep*, Human Frontier Science Program, Strasbourg, 2000.
- [3] A. Destexhe & T. J. Sejnowski, Why do we sleep?, *Brain Res.*, **886**: 208–223, 2000.
- [4] Patrick Suppes & Bing Han, Brain-wave representation of words by superposition of a few sine waves, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **97**: 8738–8743, 2000.
- [5] Patrick Suppes, Bing Han, J. Epelboim & Zhong-Lin Lu, Invariance of brain-wave representations of simple visual images and their names, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **96**: 14658–14663, 1999.
- [6] Patrick Suppes, Bing Han, J. Epelboim & Zhong-Lin Lu, Invariance between subjects of brain wave representations of language, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **96**: 12953–12958, 1999.
- [7] Patrick Suppes, Bing Han & Zhong-Lin Lu, Brain-wave recognition of sentences, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **95**, 15861–15866, 1998.
- [8] Patrick Suppes, Zhong-Lin Lu & Bing Han, Brain wave recognition of words, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **94**, 14965–14969, 1997.
- [9] Matteo Frigo & Steven G. Johnson, The Fastest Fourier Transform in the West, *Technical Report MIT-LCS-TR-728*, September, 1997 [A implementação do algoritmo FFTW em linguagem C pode ser obtido na página www.fftw.org].

- [10] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling & Brian P. Flannery, *Numerical Recipes in C++, The Art of Scientific Computing*, 2nd edition, Cambridge University Press, 2002.
- [11] C. A. de Moura, *Análise Funcional para Aplicações: Posologia*, Editora Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2002.
- [12] F. Perrin, J. Pernier, O. Bertrand, M. H. Giard & J. F. Echallier, Mapping of scalp potentials by surface spline interpolation, *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, **66**: 75–81, 1987.
- [13] F. Perrin, J. Pernier, O. Bertrand & J. F. Echallier, Spherical splines for scalp potential and current density mapping, *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, **72**: 184–187, 1989.