

UTILIZAÇÃO DO FILTRO DE SAVITZKY-GOLAY NO CANCELAMENTO DE INTERFERÊNCIAS DE 60-HZ EM SINAIS DE ELETROCARDIOGRAMA

BRUNA A. FERNANDES*, GUSTAVO D. COLLETTA*, LUÍS H. C. FERREIRA*

**Universidade Federal de Itajubá*

*Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação
37500-903 Itajubá, Minas Gerais, Brasil.*

Emails: brunaalmeida@unifei.edu.br, gustavo.colletta@unifei.edu.br, luis@unifei.edu.br

Abstract— This paper presents the use of Savitzky-Golay filter in 60-Hz interference cancellation in ECG signals. A Savitzky-Golay filter with eleven samples window and seventh order polynomial, running with a 192-Hz sampling rate, enables the matching of first zero crossing frequency in 60-Hz for a bandwidth of 40-Hz, satisfying the standard NBR IEC 60601-2-27: 2013. The arithmetical simplicity and the use of few integer coefficients allows the filter to be implemented in low-cost microcontrollers present in remote monitoring systems.

Keywords— Electrocardiogram, 60-Hz power line interference, Savitzky-Golay filter.

Resumo— Este artigo apresenta a utilização do filtro de Savitzky-Golay no cancelamento de interferências de 60-Hz em sinais de eletrocardiograma. Um filtro de Savitzky-Golay com janela de onze amostras e polinômio de sétima ordem, operando com uma taxa de amostragem de 192-Hz, possibilita o casamento da frequência de primeiro nulo espectral em 60-Hz para uma banda passante de 40-Hz, satisfazendo a norma ABNT NBR IEC 60601-2-27:2013. A simplicidade aritmética e a utilização de poucos coeficientes inteiros permite que o filtro seja implementado em microcontroladores de baixo custo presentes em sistemas de monitoramento remoto.

Palavras-chave— Eletrocardiograma, interferências de 60-Hz, filtro de Savitzky-Golay.

1 Introdução

O corpo humano é dotado de diversos tipos de sinais elétricos. O monitoramento de sinais elétricos provenientes das atividades cerebrais e cardíacas, pressão sanguínea, entre outros, é de suma importância, uma vez que eles fornecem informações que permitem a avaliação de quadros clínicos durante tratamentos, intervenções cirúrgicas, ou até mesmo pós-cirúrgicas.

O registro gráfico das oscilações elétricas resultantes da atividade do músculo cardíaco, denominado eletrocardiograma (ECG), permite a identificação de uma série de patologias que afetam a atividade elétrica do coração, como o infarto do miocárdio, arritmias cardíacas, hipertensão arterial, entre outras. A amplitude dos sinais cardíacos varia entre 100- μ V e 4-mV enquanto sua frequência se situa entre 0,1-Hz e 250-Hz, sendo, portanto, susceptíveis a interferências, especialmente a de 60-Hz, proveniente da rede de distribuição de energia elétrica (ElAnsary et al., 2015).

Uma maneira de minimizar a influência da interferência de 60-Hz no eletrocardiograma é a utilização de filtros *notch* nos eletrocardiógrafos. Diversas topologias de sistemas para filtragem e cancelamento destas interferências já foram implementados e se mostraram eficazes na rejeição do ruído (Ziarani and Konrad, 2002; Ma et al., 2009; Bohorquez et al., 2011).

Considerando a tendência recente da utilização de dispositivos portáteis para o monitoramento cardíaco (Zhang et al., 2011; O'Connell et al., 2010; Capua et al., 2009), a implementação de um filtro digital para interferências de 60-Hz se

torna interessante, uma vez que tais equipamentos possuem algum tipo de microcontrolador de baixo poder de processamento, que pode ser utilizado para embarcar o filtro digital de 60-Hz.

A característica de baixo consumo energético dos dispositivos portáteis requer um algoritmo de filtragem simples e leve, que possa ser implementado em microcontroladores de baixo poder de processamento, possibilitando redução da complexidade e de custo dos circuitos, em troca de um ligeiro aumento de consumo energético do microcontrolador. O filtro de suavização proposto em 1964 por Abraham Savitsky e Marcel J. E. Golay apresenta as propriedades necessárias, uma vez que utiliza poucos coeficientes inteiros e uma aritmética simples em sua rotina de implementação (Savitzky and Golay, 1964). Além disso, sua resposta em frequência pode ser projetada de forma a atender a norma ABNT NBR IEC 60601-2-27:2013.

Este artigo apresenta a utilização do filtro de Savitzky-Golay no cancelamento de interferências de 60-Hz provenientes da rede de distribuição elétrica, que atende a norma ABNT NBR IEC 60601-2-27:2013 e pode ser facilmente implementado em microcontroladores de baixo custo presentes nos equipamentos de monitoração cardíaca remota. O artigo está organizado da maneira a seguir. A Seção 2 mostra o embasamento teórico necessário para o projeto do filtro. A Seção 3 mostra o projeto do filtro que atende a norma ABNT NBR IEC 60601-2-27:2013. A Seção 4 mostra a caracterização e o teste do filtro projetado enquanto a Seção 5 é devotada às conclusões.

2 Fundamentação Teórica

O filtro de Savitzky-Golay $SG(k, n)$ utiliza uma abordagem polinomial do método dos mínimos quadrados para realizar a suavização de dados previamente amostrados. Para tanto, compreende uma janela (ímpar) de n amostras afim determinar o valor suavizado do ponto central da janela através de uma regressão polinomial de ordem k . A janela é então deslocada ponto a ponto até que toda a série de dados seja suavizada (Schafer, 2011).

A Figura 1 mostra a resposta em frequência de dois filtros de Savitzky-Golay $SG(1, 7)$ e $SG(3, 7)$ com janela de sete amostras e polinômios de primeira e terceira ordens. Nota-se que um aumento de ordem do filtro representa um aumento da sua banda passante através do deslocamento do primeiro nulo espectral. Entretanto, para esses dois filtros, se o ruído nas amostras for aleatório com desvio padrão constante, o sinal suavizado herdará um ruído aleatório com 37,80-% e 57,74-% do desvio padrão original, respectivamente.

Assim, o aumento de banda implica em uma diminuição da capacidade de filtragem de sinais de distribuição gaussiana, caracterizando uma relação de compromisso entre capacidade de filtragem e banda passante. Essa relação se torna ainda mais evidente uma vez que um filtro de Savitzky-Golay de polinômio de primeira ordem recai no método de suavização de média-móvel, mais indicado para eliminar sinais aleatórios.

Dessa maneira, um bom projeto de filtro digital deve atender as características de banda de passagem e capacidade de filtragem estabelecidas na norma ABNT NBR IEC 60601-2-27:2013. A norma especifica o teste a ser realizado considerando-se uma banda de passagem que se inicia em 0,67-Hz e se estende até 40-Hz. São aplicados à entrada do filtro três sinais senoidais com frequências 0,67-Hz, 5-Hz e 40-Hz, e amplitude de 1-mV. As saídas correspondentes aos sinais de 0,67-Hz e 40-Hz, devem apresentar variação de amplitude entre 71-% e 110-% da amplitude obtida com o sinal senoidal de 5-Hz.

Uma vez que o filtro apresenta um comportamento de passa-baixas, sinais de frequências próximas de 40-Hz representam naturalmente a condição de pior caso de operação.

3 Filtro Proposto

Como o objetivo do filtro proposto é a utilização em microcontroladores com baixo poder de processamento, é necessário utilizar o filtro que apresente uma relação razoável entre a quantidade de coeficientes e a quantidade de dados a ser processados, além de ser consistente com os parâmetros normatizados segundo a ABNT NBR IEC 60601-2-27:2013.

A Figura 2 mostra a resposta em frequên-

cia de dois filtros de Savitzky-Golay $SG(5, 11)$ e $SG(7, 11)$ com janela de onze amostras e polinômios de quinta e sétima ordem, que atendem a norma referida. É importante notar que as taxas de amostragem dos dados foram ajustadas de maneira a fazer com que o primeiro nulo espectral de cada filtro ocorra na frequência de 60-Hz. Para esses dois filtros, se o ruído nas amostras for aleatório com desvio padrão constante, o sinal suavizado herdará um ruído aleatório com 57,74-% e 68,99-% do desvio padrão original, respectivamente.

Outro aspecto importante é que polinômios de maior ordem promovem um aumento na banda de passagem do filtro além de necessitar de uma taxa de amostragem inferior. Dessa maneira, o filtro de Savitzky-Golay $SG(7, 11)$ é o mais indicado, uma vez que sua menor taxa de amostragem implica em uma menor quantidade de dados a serem tratados. Contudo, a capacidade de filtragem de ruído aleatório é menor.

4 Aplicação

Essa seção investiga a utilização do filtro de Savitzky-Golay proposto na a remoção de interferência de 60-Hz provenientes da alimentação da rede elétrica em sinais cardíacos.

Na posição superior da Figura 3 são mostrados um sinal de ECG puro (traço preto) e seu equivalente poluído por uma interferência de 60-Hz (traço cinza) ao longo do tempo. Na posição central há uma comparação entre o sinal puro (traço preto) e o sinal filtrado (traço cinza) em que se nota claramente a redução da interferência de 60-Hz ao custo de um leve atraso no sinal filtrado em relação ao sinal puro. Na posição inferior é mostrada a correlação entre o sinal puro e sinal filtrado, evidenciando que o atraso do sinal filtrado corresponde a cinco amostras.

A Figura 4 ilustra os testes realizados seguindo as orientações da norma ABNT NBR IEC 60601-2-27:2013. Na parte superior está representada a resposta em frequência do filtro, com amplitude normalizada e limitada em 50-Hz, mostrando que na frequência de 40-Hz, aproximadamente 85-% do sinal estará disponível após a filtragem. Na parte central são mostrados o sinal senoidal de referência com frequência de 5-Hz e amplitude de 1-mV de pico (traço preto) e seu equivalente filtrado (traço cinza), sendo possível notar o atraso característico do filtro. A parte inferior mostra um sinal senoidal de frequência 40-Hz e amplitude de 1-mV de pico (traço preto) aplicado à entrada do filtro e seu equivalente filtrado (traço cinza). Nota-se que o atraso característico do filtro, cinco amostras, representa um ciclo completo do sinal de 40-Hz.

A Tabela 1 resume os valores obtidos para os testes de conformidade realizados seguindo as

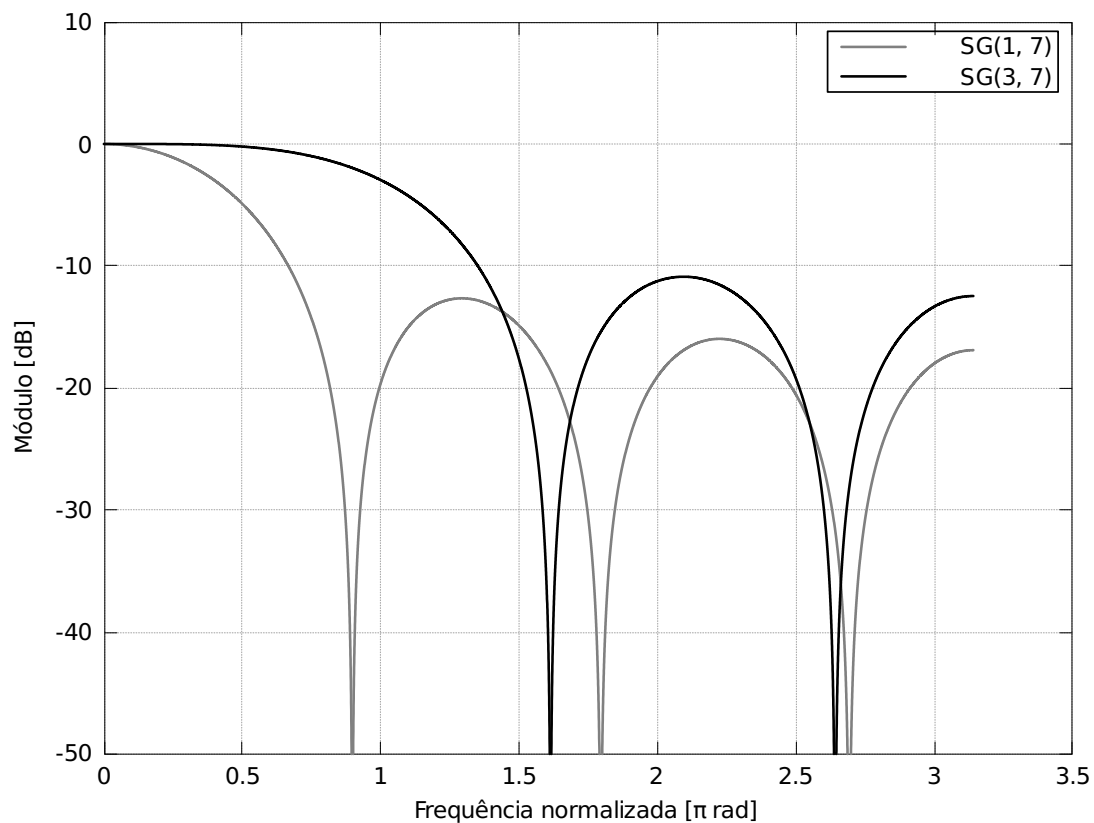


Figura 1: Resposta em frequência de filtros de Savitzky-Golay com janela de sete amostras e polinômios de primeira e terceira ordem.

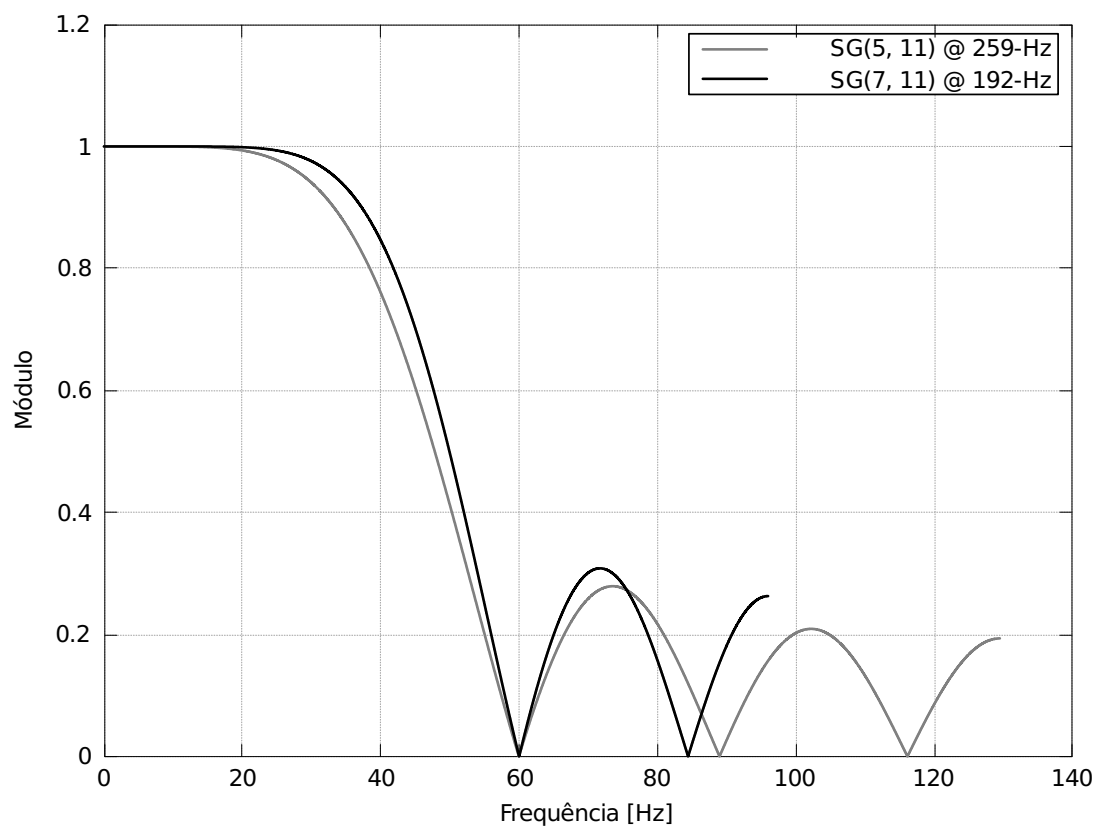


Figura 2: Resposta em frequência de filtros de Savitzky-Golay com janela de onze amostras e polinômios de quinta e sétima ordem.

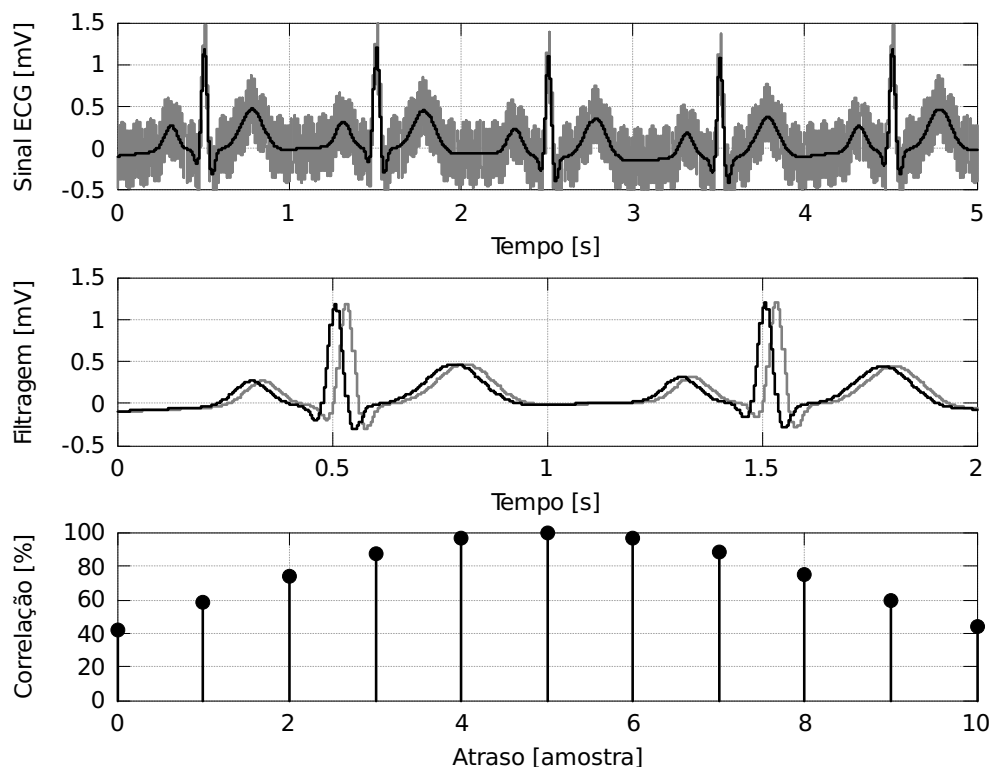


Figura 3: Filtragem do sinal cardíaco. Sinal cardíaco puro e contaminado por uma interferência de 60-Hz, na parte superior; comparativo entre sinal puro e sinal filtrado, na parte central; e correlação entre os sinais puro e filtrado mostrando um atraso de 5 amostras no sinal filtrado, na parte inferior.

orientações da norma ABNT NBR IEC 60601-2-27:2013.

Tabela 1: Resultados dos testes de conformidade.

Frequência (Hz)	Amplitude (mV)	Porcentagem (%)
5	1	100
0,67	1	100
40	0,8461	84,61

Nota-se que na frequência de 40-Hz, pior caso para o filtro, o sinal de saída corresponde a 84,61% do sinal de entrada, como mostrado na Figura 4. Considerando os requisitos exigidos pela norma, o filtro de Savitzky-Golay proposto apresenta uma resposta em frequência dentro da faixa de valores de amplitude esperados.

5 Conclusão

Nesse trabalho foi mostrada a utilização de um filtro de Savitzky-Golay com janela de onze amostras e polinômio de sétima ordem trabalhando em 192-Hz para o cancelamento de interferências de 60-Hz provenientes da rede de distribuição elétrica em sinais cardíacos. O filtro foi testado seguindo

as orientações da norma ABNT NBR IEC 60601-2-27:2013, atendendo aos requisitos necessários de resposta em frequência, sendo notória a redução do ruído de 60-Hz após a aplicação do filtro digital proposto.

A simplicidade aritmética do algoritmo aliada à pequena quantidade de coeficientes inteiros necessários para sua implementação possibilita sua utilização nos microcontroladores de baixo poder de processamento comuns nos *front ends* dos equipamentos de monitoramento cardíaco atuais.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente suportado pelos convênios FAPEMIG PPM-00495-15 e FINEP 01.13.0387.00.

Referências

- Bohorquez, J. L., Yip, M., Chandrakasan, A. P. and Dawson, J. L. (2011). A biomedical sensor interface with a sinc filter and interference cancellation, *IEEE Journal of Solid-State Circuits* **46**(4): 746–756.
- Capua, C. D., Meduri, A. and Morello, R. (2009). A remote doctor for homecare and medical

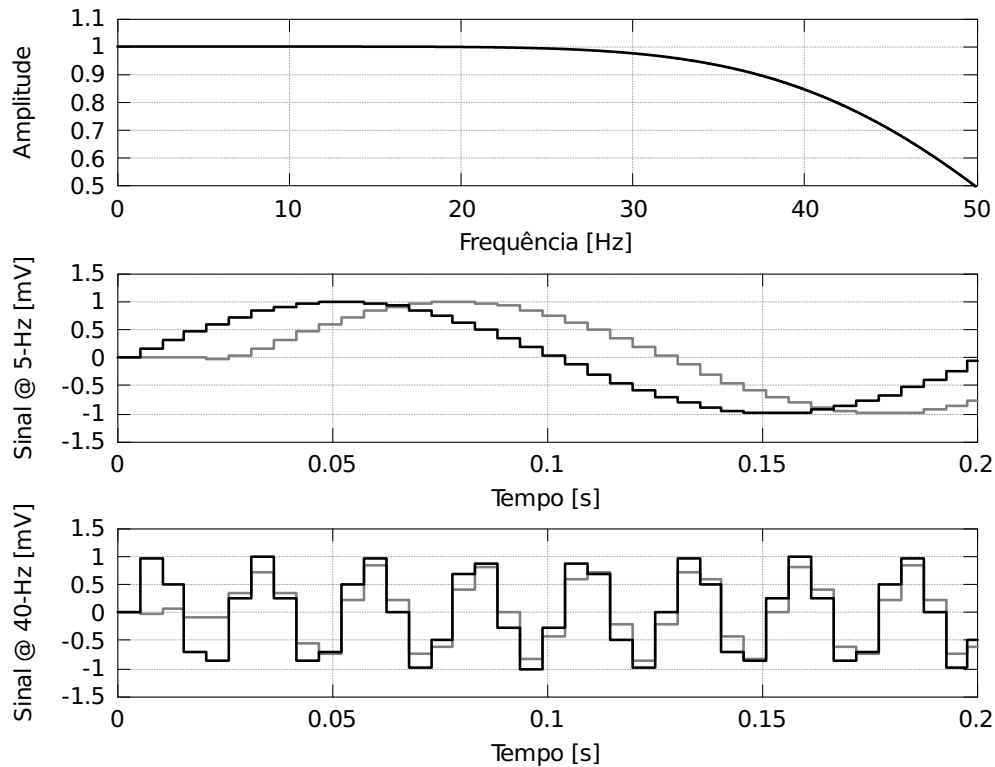


Figura 4: Teste do filtro proposto seguindo orientações da norma ABNT NBR IEC 60601-2-27:2013. Na parte superior é mostrada a resposta em frequência do filtro, limitada em 50-Hz. Na parte central, o teste para um sinal de frequência 5-Hz e amplitude 1-mV de pico. Na parte inferior, o teste para um sinal de frequência 40-Hz e amplitude 1-mV de pico.

- diagnoses on cardiac patients by an adaptive ECG analysis, *Medical Measurements and Applications, 2009. MeMeA 2009. IEEE International Workshop on*, pp. 31–36.
- ElAnsary, M., El-Nozahi, M. and Ragaie, H. F. (2015). Biomedical sensor interface for PLI cancellation, *Circuits and Systems (MWSCAS), 2015 IEEE 58th International Midwest Symposium on*, pp. 1–4.
- Ma, C. T., Mak, P. I., i. Vai, M., Mak, P. U., Pun, S. H., Feng, W. and Martins, R. P. (2009). Frequency-bandwidth-tunable powerline notch filter for biopotential acquisition systems, *Electronics Letters* **45**(4): 197–199.
- O’Connell, E., O’Connell, S., McEvoy, R. P. and Marnane, W. P. (2010). A low-power wireless ECG processing node and remote monitoring system, *Signals and Systems Conference (ISSC 2010), IET Irish*, pp. 48–53.
- Savitzky, A. and Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures., *Analytical Chemistry* **36**(8): 1627–1639.
- Schafer, R. W. (2011). What is a Savitzky-Golay filter? [lecture notes], *IEEE Signal Processing Magazine* **28**(4): 111–117.
- Zhang, K., Song, L. and Lu, D. (2011). Design of remote ECG monitoring system based on GPRS, *Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2011 International Conference on*, Vol. 1, pp. 319–322.
- Ziarani, A. K. and Konrad, A. (2002). A nonlinear adaptive method of elimination of power line interference in ECG signals, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* **49**(6): 540–547.