

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Física



LISBOA

UNIVERSIDADE
DE LISBOA

Advanced Applications for Acoustic Cardiac Triggering

Tiago Fernando Ferreira da Silva

Dissertação

Mestrado integrado em Engenharia Biomédica e Biofísica

Perfil em Radiações em Diagnóstico e Terapia

2013

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Física



LISBOA

UNIVERSIDADE
DE LISBOA

Advanced Applications for Acoustic Cardiac Triggering

Tiago Fernando Ferreira da Silva

Dissertação

Mestrado integrado em Engenharia Biomédica e Biofísica
Perfil em Radiações em Diagnóstico e Terapia

Orientador Externo: Professor Doutor Thoralf Niendorf
Orientador Interno: Professor Doutor Alexandre Andrade

2013

Resumo

A ressonância magnética de campo ultra elevado (UHF MRI) fornece imagens de alta resolução e um aumento de possíveis aplicações para a ressonância magnética (MRI). No entanto, ela acarreta novas restrições e desafios. Um desses desafios é o facto que o *triggering* recorrendo à electrocardiografia (ECG) falha devido a interferências eletromagnéticas com estes novos e mais fortes campos magnéticos. O *Acoustic Cardiac Triggering* (ACT) foi criado para resolver este problema e funciona usando o primeiro som cardíaco para efetuar a sincronização entre os movimentos cardíacos e as imagens. [1-4] O *EasyACT* é um dispositivo desenvolvido para implementar o ACT e geralmente trabalha corretamente mas foram detetados alguns problemas quando ele está a ser usado em exames com uma inovadora sequência de MRI em tempo real (*real time* MRI) [5-8].

Nesta tese de mestrado foi demonstrado que os problemas com o *triggering* surgem porque esta sequência é extremamente ruidosa em frequências inferiores a 100 Hz (usualmente à volta de 27 Hz) que são exatamente as frequências que o *EasyACT* não filtra e usa para detetar o primeiro som cardíaco. Este problema é agravado porque análises ao processamento de sinal do dispositivo mostraram que este está a filtrar frequências inferiores a 100 Hz, e portanto está-se a perder amplitudes relativas a sons cardíacos que seriam particularmente úteis em casos como este, onde existe um forte ruído acústico em frequências não filtradas pelo dispositivo. Adicionalmente, foram efetuadas experiências para estudar as especificidades desta sequência como alteração de certos parâmetros do protocolo e estudo da fonte e propagação do ruído acústico. Assim, sabendo que o *EasyACT* poderia com determinadas sequências não trabalhar corretamente, experiências debruçadas no *hardware* e *software* inerente ao ACT foram efetuadas com o objetivo de aumentar a sua eficácia, fiabilidade e versatilidade.

O *EasyACT* é constituído por uma unidade de acoplamento ao MRI, uma unidade principal e um estetoscópio. O estetoscópio foi analisado com o objetivo de aumentar a sua razão sinal-ruído (SNR) pois medições comparando o estetoscópio com um microfone ótico mostraram que o estetoscópico pode ser substancialmente melhorado. As 4 secções do estetoscópio foram testadas (auscultador, tubo de condução acústica, microfone e cabo elétrico) comparando os resultados do usual *EasyACT* com resultados de um *EasyACT* com diferentes componentes ou alterações em determinada secção. Foi descoberto que um estetoscópio sem tubo de condução acústica ou usando um microfone mais sensível iria aumentar substancialmente o SNR. O tubo de condução acústica conecta o auscultador ao microfone e dentro dele ocorrem perdas de amplitudes referentes aos sons cardíacos e entra inevitavelmente ruído. Por isso, conectando o auscultador diretamente ao microfone, o SNR é aumentado. Por sua vez, o microfone mais sensível aumenta consideravelmente a amplitude dos sons cardíacos sem aumentar significativamente o ruído e por isso possibilita também um aumento do SNR. Estas melhorias no estetoscópio prometem aumentar substancialmente a eficácia e a fiabilidade do *EasyACT* e permitem que com as devidas modificações de *software* e *hardware*, o *EasyACT* seja menos afetado por ruído e seja menos provável ter falsos positivos.

Dois novos *softwares* (métodos) denominados método da subtração e método da correlação foram desenvolvidos para melhorar a performance do ACT. Estes métodos são

baseados num conceito denominado cancelamento de ruído que se baseia no facto que 2 ondas sonoras se anulam se tiverem a mesma amplitude e 1 delas tiver a fase invertida em relação à outra. Eles foram implementados num novo dispositivo criado para o efeito chamado *DualACT* que é basicamente constituído por 2 *EasyACTs* conectados e portanto tem 2 estetoscópios, um estetoscópio para receber ruído e sons cardíacos e um estetoscópio para receber apenas ruído. O *EasyACT* equipado com o estetoscópio que recebe os sons cardíacos e ruído funciona como *master* recebendo também o sinal com apenas ruído já processado pelo *hardware* do outro *EasyACT*, para além disso, o *EasyACT master* controla a parte do *hardware* do outro *EasyACT* que pode ser controlada por *software*. Obtendo um sinal com sons cardíacos e ruído e um sinal com apenas ruído é teoricamente possível separar o ruído dos sons cardíacos. O *triggering* é apenas baseado no primeiro som cardíaco e portanto após se enviar um *trigger* é criado um período temporal onde os *triggers* não podem ser enviados para se evitar que eles sejam enviados devido ao surgimento do segundo som cardíaco. Um método baseado no conceito cancelamento de ruído é teoreticamente não afetado por mudanças no ruído, não perde eficácia com ruídos extremos e não interfere com as amplitudes dos sons cardíacos. Além disso, estes métodos podem ser teoricamente aplicados em áreas como a ressonância magnética cardíaca fetal e a ressonância magnética cardíaca durante exercício que são duas áreas onde o *triggering* em tempo real está ainda à procura de uma solução fiável. O método da subtração é semelhante ao método habitualmente usado no *EasyACT* com a diferença que subtrai os sinais dos 2 estetoscópios para efetuar alguma filtração. Esta subtração permite decrescer a amplitude relativa ao ruído e portanto aplicar mais eficazmente um *threshold* no domínio do tempo. Este método mostrou no geral melhorias em relação ao método usado no *EasyACT* devido a ter uma filtração adicional em toda a gama de frequências. O método da correlação é um método completamente novo que usa o coeficiente de correlação de *Pearson* para comparar os 2 sinais. Este método foi desenvolvido para aumentar a eficácia mas também a velocidade do *triggering*, pois este deve ser o mais em tempo real possível. Ele encontra os sons cardíacos comparando os sinais através da correlação e usando um *threshold* no domínio do tempo. O *threshold* no domínio do tempo é fiável em casos de sequências silenciosas e a correlação é fiável em sequências mais ruidosas, permitindo ter o *DualACT* preparado para todo o tipo de sequências. Este *threshold* no domínio do tempo é menor do que o *threshold* usado nos outros métodos pois a correlação permite-lhe evitar os falsos positivos, e assim consegue-se um *triggering* substancialmente mais rápido sem perder robustez contra o ruído. Experiências pós-processadas num interface gráfico criado em Matlab para avaliar a eficácia e velocidade de *triggering* mostraram que o método da correlação permite um intervalo temporal mais curto entre o primeiro som cardíaco e o envio do *trigger* e é menos afetado pelo ruído do que os restantes métodos. Outra versão deste método sem o *threshold* no domínio do tempo foi também testada e como esperado, o *triggering* foi ainda mais rápido devido à capacidade da correlação de detetar sons cardíacos logo no seu início, contudo, esta versão apresenta um número de falsos positivos que dificulta a sua utilização. Assim, o método da correlação tem muito potencial e pode levar o *ACT* para um novo nível de performance e possibilidades. Este método vai muito provavelmente ser o escolhido para ser implementado na futura versão comercial do *DualACT*.

Alguns aspetos limitaram os resultados desta tese, sendo dois de importância considerável. Relativamente ao melhoramento do estetoscópio, o *triggering* de um *EasyACT*

com o microfone mais sensível não pôde ser testado pois o *hardware* não conseguia atenuar suficientemente os sinais, para testá-lo seriam necessárias morosas modificações nos amplificadores que não era de todo o objetivo desta tese. No caso do *DualACT*, este era constituído por 2 *EasyACTs* (diferentes versões) conectados e esta é a maneira mais rápida mas não a melhor de construir este dispositivo. Um *DualACT* construído para receber 2 sinais e processá-los da maneira mais similar possível melhoraria ainda mais os resultados e evitaria grande parte dos problemas que apareceram durante a implementação e teste dos novos métodos.

Resumindo, os resultados mais relevantes desta tese foram: encontrar e esmiuçar a razão por que o *EasyACT* não funcionava unicamente com determinada sequência descobrindo assim importantes limitações no dispositivo, descobrir que um microfone mais sensível pode aumentar muito o SNR do estetoscópio criando condições para aumentar a eficácia e fiabilidade do *EasyACT* e, criar, desenvolver e testar um novo dispositivo mais versátil que implementa o ACT com 2 novos *softwares* sendo que particularmente o método da correlação apresenta resultados muito auspiciosos e que prometem levar o ACT para um novo nível de desempenho.

Concluindo, o ACT foi analisado e melhorado para aumentar a sua performance e permitir a sua utilização em aplicações de complexidade avançada como sequências ruidosas abaixo de 100 Hz, ressonância magnética cardíaca fetal e ressonância magnética cardíaca durante exercício.

Palavras-chave: Ressonância Magnética, Sons cardíacos, *Acoustic Cardiac Triggering*, MRI em tempo real, Cancelamento de ruído

Abstract

Acoustic cardiac triggering (ACT) is a triggering technique implemented in a device named EasyACT that uses first heart tones to perform synchronization between cardiac motion and imaging [1-4]. Some technical and reliability issues were found when ACT was used for a real time MRI of the heart [5-8].

Measurements performed during this thesis proved that the gating/triggering problems appeared because the speed and performance requirements of real time imaging induce a high sound pressure level in the frequency range below 100 Hz which is the domain of the first heart tones. Realizing these challenges, ACT hardware and software were evaluated and improved.

The whole EasyACT stethoscope was compared to optical microphone and a possible improvement of signal-to-noise ratio (SNR) was identified. Further, the four sections of the stethoscope were individually analysed. The results of the analyses have lead towards more sensitive microphone and shorter acoustic waveguide.

A new device named DualACT was developed to allow the use of 2 stethoscopes (one for receiving heart tones and surrounding noise and the other for receiving surrounding noise) and two analysis procedures (subtraction method and correlation method) were implemented. Subtraction method is similar to the method usually used on EasyACT with the difference that subtracts the signals from the 2 stethoscopes in order to perform some filtering. Correlation method is a completely new method that uses Pearson correlation coefficient to compare the 2 signals. Measurements showed that the correlation method provides a faster triggering and is less affected by noise. Therefore, correlation method was suggested for implementation in the commercial version of DualACT.

To conclude, the capabilities of ACT were improved in order to allow its utilization in advanced applications in cardiac magnetic resonance imaging (CMR) including imaging techniques with sound pressure level peaks below 100 Hz, fetal CMR and CMR during exercise.

Keywords: Magnetic Resonance Imaging, Heart tones, Acoustic Cardiac Triggering, Real time MRI, Noise cancellation

Contents

1.	Introduction	- 1 -
1.1.	Magnetic Resonance Imaging (MRI) Basics.....	- 1 -
1.1.1.	Spins	- 2 -
1.1.2.	Relaxation.....	- 3 -
1.1.3.	Excitation.....	- 4 -
1.1.4.	Gradients	- 4 -
1.1.5.	K-space	- 5 -
1.1.6.	MRI Hardware	- 6 -
1.1.7.	UHF MRI	- 7 -
1.2.	Heart Basics.....	- 8 -
1.2.1.	Anatomy	- 8 -
1.2.2.	Physiology.....	- 9 -
1.2.3.	Electrocardiography	- 9 -
1.2.4.	Heart Sounds	- 10 -
1.3.	Cardiac MRI (CMR)	- 11 -
1.3.1.	Segmentation	- 11 -
1.3.2.	Synchronization.....	- 11 -
1.3.3.	Triggering/gating Techniques.....	- 13 -
2.	Materials and Methods.....	- 16 -
2.1.	Tools and Materials.....	- 16 -
2.1.1.	EasyACT	- 16 -
2.1.2.	DualACT	- 20 -
2.1.3.	Real Time MRI	- 22 -
2.1.4.	MRI measurements	- 24 -
2.1.5.	Measurements outside the scanner	- 27 -
2.2.	Signal and noise analysis – Source and frequency	- 27 -
2.2.1.	EasyACT signal processing.....	- 27 -
2.2.2.	Frequency analysis	- 28 -
2.2.3.	Source analysis	- 28 -

2.3.	SNR improvements.....	- 29 -
2.3.1.	EasyACT stethoscope vs optical microphone.....	- 29 -
2.3.2.	Stethoscope improvements	- 30 -
2.4.	Noise cancellation	- 32 -
2.4.1.	Subtraction method	- 32 -
2.4.2.	Correlation method.....	- 34 -
3.	Results	- 39 -
3.1.	Signal and noise analysis – Source and frequency.....	- 39 -
3.1.1.	EasyACT signal processing.....	- 39 -
3.1.2.	Frequency analysis	- 40 -
3.1.3.	Source analysis	- 41 -
3.2.	SNR improvements.....	- 42 -
3.2.1.	Standard stethoscope vs optical microphone.....	- 42 -
3.2.2.	Stethoscope improvements	- 43 -
3.3.	Noise cancellation	- 45 -
3.3.1.	Subtraction method	- 45 -
3.3.2.	Correlation method.....	- 46 -
3.3.3.	Benchmarking.....	- 50 -
4.	Discussion.....	- 52 -
5.	Conclusion	- 56 -
	Acknowledgements.....	X
	References.....	XI
	List of Figures	XIV
	List of Symbols and Abbreviations	XVI