

Circuitos, Sensores e Actuadores para Detecção Remota de Comboios

Carlos F. Carvalho¹, Carlos R. Martins² e Mário S. Nunes³

¹Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa
Departamento de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores
Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1
P-1950-062 Lisboa, Portugal

²Escola Náutica Infante D. Henrique e Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores – Investigação e Desenvolvimento (INESC-ID)

³Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa e Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores – Investigação e Desenvolvimento (INESC-ID)

cfc@isel.ipl.pt

Resumo

Neste artigo descreve-se um sistema para a detecção remota de comboios [1], caracterizando-se a parte material que consubstancia a aplicação no terreno. Os circuitos transmissor e receptor, desenvolvidos de raíz, destinam-se à geração e à recepção dos trens de impulsos do sistema. Conjuntamente com os estes circuitos, foram utilizados os transdutores adequados a cada uma das vertentes. Associado ao circuito de transmissão foi empregue um transdutor magnetoestrutivo que excita o carril com trens de impulsos gerados pelo transmissor. No que respeita ao receptor, este recebe o eco do carril através de um acelerómetro piezoeléctrico. Serão descritos os circuitos que implementam os módulos de transmissão e de recepção, bem como as características dos transdutores associados a cada um deles. Por último, são considerados os aspectos da realização experimental no que toca à instalação dos transdutores no meio físico no qual decorreram os trabalhos de campo.

Introdução

A ideia da realização deste trabalho, descrito em [1], prende-se com uma proposta de implementação de um sistema que realize a detecção remota de comboios. Testa-se a viabilidade da utilização do princípio de funcionamento do sonar. Tal princípio é aplicado em dois métodos destinados a estimar a aproximação e respectiva distância ao comboio: correlação-cruzada e filtro de captura. No sonar existe um circuito transmissor, responsável pela emissão de trens de impulsos e um circuito receptor responsável pela captação

dos ecos dos trens de impulsos previamente transmitidos. É assumido que o comboio servirá como caminho de retorno para o outro carril, ou reflectirá no mesmo carril os trens de impulsos gerados pelo circuito transmissor. Na primeira hipótese ter-se-ão transmissor e receptor ligados em carris opostos, ao passo que na segunda, ambos os transdutores, transmissor e receptor, estarão ligados ao mesmo carril.

Assim, do ponto de vista físico, existirão dois circuitos electrónicos com funções bem distintas, assim como os respectivos transdutores que fazem a sua interface com o meio físico de transmissão, ou seja, o carril. Para além do circuitos electrónicos referidos há que realizar o processamento dos sinais envolvidos.

Materiais e transdutores magnetoestritivos

No circuito transmissor utilizou-se um transdutor magnetoestritivo. Trata-se de um dispositivo que é composto por dois enrolamentos percorridos por correntes desfasadas entre si de 180° . Estas duas bobinas encontram-se enroladas em torno de um núcleo composto por um material magnético com propriedades magnetoestritivas. A corrente eléctrica, que percorre cada uma das bobinas do transdutor, dá origem a uma deformação proporcional à amplitude da corrente de excitação. Deste modo faz-se a conversão do sinal eléctrico em acústico. O sinal utilizado tem forma de onda rectangular com um factor de ciclo de 50% e uma frequência de 1550 Hz [2].

Os materiais magnetoestritivos têm como propriedade a capacidade de transformar a energia magnética em mecânica e vice-versa. Quando um material magnetoestritivo é magnetizado, deforma-se. De maneira inversa, se for aplicada uma força externa, causando esta deformação, o estado magnético do material modifica-se. Esta reversibilidade entre as energias mecânica e magnética traduz a capacidade do transdutor poder ser utilizado quer em sensores, quer em actuadores. A magnetoestrictão é uma propriedade inerente aos materiais e não se degrada com o tempo. Os materiais magnetoestritivos mais comuns são o níquel, o ferro e o cobalto, com alterações de comprimento da ordem de 10 a 50 partes por milhão [3]. A gama de frequências de funcionamento cobre tipicamente as baixas frequências, até aproximadamente 20 kHz.

Acelerómetros piezoeléctricos

Do lado da recepção ter-se-á um sinal acústico proveniente do carril, o qual necessita ser convertido para sinal eléctrico de maneira a ser processado analogicamente pelo circuito receptor. Esta conversão é realizada através de um acelerómetro piezoeléctrico. A deformação dos elementos piezoeléctricos dá origem a uma tensão eléctrica que é proporcional à aceleração.

O acelerómetro utilizado neste trabalho, que se mostra na figura 1.a [4], é da Brüel & Kjaer, do tipo DeltaShear® UniGain® DeltaTron®, referência 4399. Este acelerómetro mede a aceleração uniaxial e foi construído segundo a tecnologia esquematizada na figura 1.b. Os elementos piezoeléctricos deste acelerómetro são de zirconato titanato de chumbo (PZ 23) e o invólucro é de titânio. Estes acelerómetros dispõem internamente de um amplificador para acondicionamento de

sinal, por isso necessita de uma fonte constante, tipicamente de 2 mA. A tensão de alimentação pode variar entre 18 V e 40 V. O circuito de alimentação será descrito mais adiante.



Figura 1.a. Acelerómetro utilizado no trabalho.

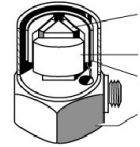


Figura 1.b. Acelerómetro Deltashear. M – massa, P – elemento piezoeléctrico, B – base, R – anel fixante.

Circuitos electrónicos do sistema

Transmissor

Este circuito é composto por um oscilador baseado no circuito integrado 555 que gera uma forma de onda rectangular. Este sinal corresponde à portadora que será posteriormente modulada em amplitude com uma taxa de modulação de 100%. Dever-se-á garantir que o nível médio do sinal eléctrico a aplicar ao transdutor seja nulo. Para garantir tal, é conveniente que a portadora gerada tenha um factor de ciclo de 50%. A opção tomada foi a de gerar um sinal no oscilador com uma frequência igual ao dobro da frequência pretendida. Este sinal é aplicado a um *flip-flop* tipo D, obtendo-se nas suas saídas o sinal com a frequência desejada para a portadora e com um factor de ciclo de exactamente 50%. Para estabelecer os intervalos de tempo em que existe emissão de impulsos, foi utilizado outro circuito multivibrador astável, baseado em portas lógicas NAND.

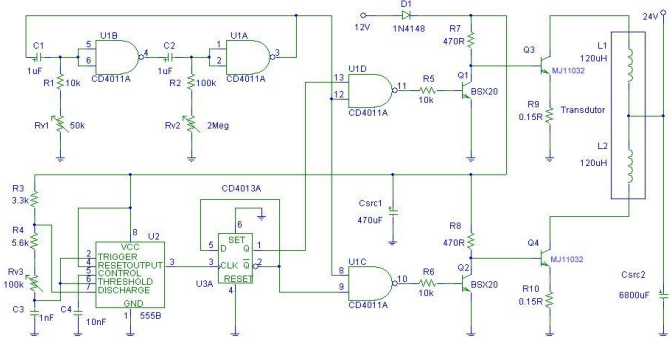


Figura 2. Esquema completo do circuito transmissor.

Neste, pode controlar-se o intervalo de tempo entre cada trem de impulsos e também a duração de cada um. O circuito gera dois trens de impulsos complementares, os quais são obtidos a partir de cada uma das saídas do *flip-flop* D (Q e \bar{Q}). Estes dois trens de impulsos são gerados porque o transdutor magnetoestritivo dispõe de duas bobinas iguais, conforme se mostra no esquema da figura 2, o que permite ter um fluxo magnético com valor médio nulo. A excitação em corrente de cada um dos enrolamentos é feita à custa de transístores de potência do tipo MJ11032. Por seu turno, a excitação destes transístores de potência é feita por transístores de baixa potência comutados pelos sinais, complementares entre si, provenientes das saídas do *flip-flop* D.



Figura 3. Aspecto do protótipo do circuito transmissor.

Receptor

O circuito receptor realiza o acondicionamento do sinal obtido através do acelerômetro usado para medir as vibrações do carril por onde se faz o retorno do sinal emitido. Este circuito é constituído por três blocos funcionais. O primeiro é constituído por um triplicador de tensão e uma fonte de corrente baseada no circuito integrado monolítico LM334. Este circuito é necessário para a alimentação do acelerômetro. Este tipo de transdutor inclui um circuito interno de pré-amplificação que deve ser alimentado com uma tensão de alimentação mínima de 18 V, devendo ser excitado em corrente. Para obter a tensão de alimentação do acelerômetro a partir de uma alimentação de 9 V (utilizada no receptor), utiliza-se um circuito triplicador de tensão baseado num circuito astável. Este recorre a um circuito integrado tipo 555, dimensionado para uma frequência de oscilação de cerca de 47 kHz. A saída do triplicador é filtrada e estabilizada, eliminando possíveis interferências de alta frequência. A jusante deste circuito de estabilização e filtragem encontra-se uma fonte de corrente compensada em temperatura, baseada no integrado LM334, a qual fornece ao acelerômetro uma corrente contínua de cerca de 2 mA. Na figura 3 mostra-se o esquema desta parte do circuito receptor.

No que respeita ao circuito de acondicionamento de sinal, utiliza-se um pré-amplificador recorrendo a uma montagem não-inversora baseada num AmpOp. O ganho deste amplificador pode ser ajustado de 14 dB a 35 dB. Simultaneamente, neste circuito, realiza-se uma filtragem passa-alto de 1ª ordem com uma frequência de corte de 1060 Hz com o intuito de eliminar a componente contínua e o ruído de baixa frequência. A par deste amplificador, existe um circuito de controlo automático de ganho, que na verdade funciona como inibidor da recepção durante o intervalo de tempo em que é enviado um trem de impulsos para o carril, sendo ainda necessário prolongar um pouco mais este período de inibição devido ao tempo de decaimento do sinal acústico no carril. Assim, torna-se indispensável a existência do circuito monostável para definir o tempo de inibição, porque caso contrário, o próprio sinal de disparo do circuito monostável serviria como sinal de inibição. Este tempo de inibição é determinado por um monostável baseado no circuito integrado 555. O controlo deste monostável provém do circuito transmissor. Na figura 4 é mostrado o esquema desta parte do receptor.

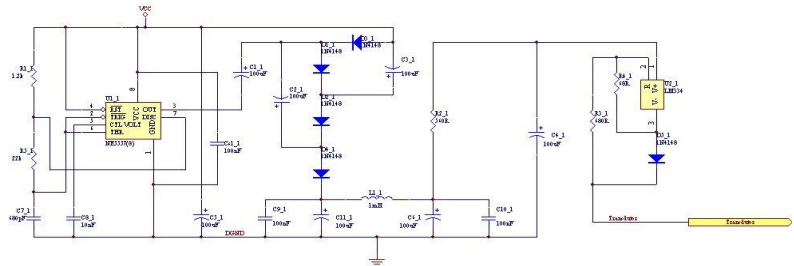


Figura 3. Circuito triplicador de tensão, respectiva filtragem, e fonte de corrente.

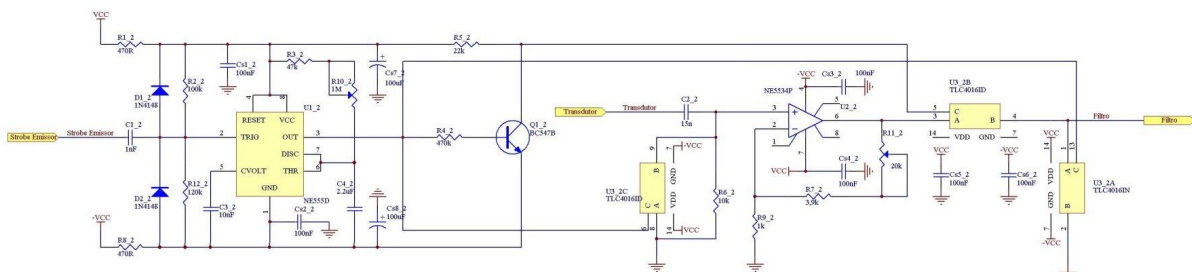


Figura 4. Circuito amplificador e de inibição da recepção.

Por último, o sinal amplificado é filtrado com um filtro passa-baixo de 2ª ordem, em topologia Sallen & Key, com frequência de corte de 4150 Hz, consistindo assim as filtragens aplicadas, num filtro passa-banda com as frequências limite iguais às indicadas. Estes valores têm como intenção melhorar a gama dinâmica de operação, garantindo a passagem das duas primeiras harmónicas do sinal transmitido. É a saída desta última filtragem que constitui o sinal que será processado segundo os métodos preconizados em [1]. Na figura 5 é mostrado o aspecto do protótipo do circuito receptor.



Figura 5. Aspecto do protótipo do circuito receptor.

Realização experimental

Na figura 6.a mostra-se o aparato experimental numa das sessões de campo. O transdutor magnetoestrutivo foi acoplado lateralmente ao carril. A razão para este tipo de montagem tem a ver com as características do carril em termos de rigidez, sabendo-se que a rigidez longitudinal e vertical é muito maior do que a rigidez lateral. Desta forma, tira-se maior partido da flexibilidade do carril [5]. Por outro lado, a transferência de energia para o carril vai depender do grau de acoplamento entre o mesmo e o transdutor. O método adoptado para a fixação inclui a utilização de grampos, os quais conferem uma elevada rigidez. Por seu turno, o acelerómetro é fixo ao carril por intermédio de um magneto. Pode ver-se na figura 6.b o aspecto geral da instalação dos transdutores no carril.



Figura 6.a. Instalação do aparato, envolvendo transmissor, receptor, e demais componentes.

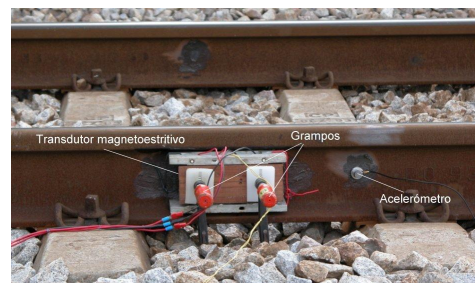


Figura 6.b. Fixação do transdutor magnetoestrutivo e do acelerómetro ao carril.

Para uma instalação eficaz dos transdutores, dever-se-á remover o óxido de ferro e outras irregularidades da superfície do carril que irá estar em contacto com os mesmos. Para além disso, para facilitar o acoplamento acústico entre os transdutores e o carril, à semelhança do procedimento utilizado na realização de ecografias e ecocardiogramas, em que as superfícies de contacto são barradas com uma pasta que permite minimizar a impedância acústica de acoplamento, foi utilizada massa lubrificante, tipo massa consistente.

Resultados experimentais

Os resultados obtidos neste trabalho, documentados em [1], são em suma consequência dos condicionalismos da infra-estrutura ferroviária. Tal como mencionado, os resultados no terreno não se revelaram tão

satisfatórios como as simulações realizadas com sinais reais. Em particular, numa das experiências em que o comboio estava parado a uma distância conhecida, a distância estimada pelos métodos propostos apresentava um erro significativo. Tal sucedia porque o sinal acústico apresenta um decaimento mais longo. O tempo de inibição do receptor é, então, interpretado (erradamente) como o tempo de ida e volta do trem de impulsos. Tal é visível na figura 7.a em que se pode ver em cima o sinal transmitido, ao nível eléctrico, e em baixo o seu correspondente acústico no carril (com a inibição aplicada). O sinal de cima é obtido através de um enrolamento com duas espiras em torno do núcleo magnetoestritivo do transdutor, como se pode ver na figura 7.b.

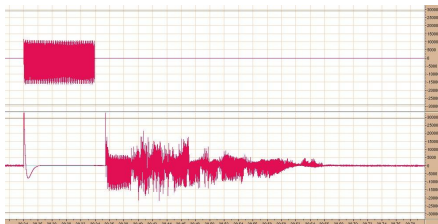


Figura 7.a. Sinal transmitido, ao nível eléctrico e ao nível acústico.

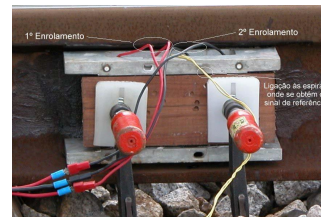


Figura 7.b. Ligação para obtenção do sinal transmitido (referência) ao nível eléctrico.

Conclusões e perspectivas futuras

Neste texto foi apresentada a parte electrónica e de transdução de um sistema com o objectivo de realizar a detecção remota de comboios. O princípio de funcionamento proposto é baseado no funcionamento do sonar, em que se envia um impulso de energia que resultará num eco do impulso previamente enviado. Este sistema é pioneiro, uma vez que não se havia implementado anteriormente qualquer sistema deste tipo, tratando-se de um trabalho com um cariz eminentemente experimental. Verificou-se que os métodos propostos para estimação da distância ao comboio [1] não conduziram aos resultados mais satisfatórios, mas no decurso do trabalho veio a perfilar-se um novo método para o processamento das vibrações geradas pelos comboios em movimento. Este método assenta fundamentalmente na modelação espectral e no reconhecimento de padrões. Nesta óptica, como se aproveita a excitação do carril pelo comboio em movimento, apenas será necessário um circuito receptor, excitado pelo sinal proveniente do acelerómetro, podendo o desempenho deste circuito ser, eventualmente, melhorado.

Referências

- [1] Carlos F. Carvalho, Carlos R. Martins and Mário S. Nunes, “Remote Train Detection System” in *Proc. ICSV12 – Twelfth International Congress on Sound and Vibration*, Lisbon, Portugal, July 2005.
- [2] Carlos F. Carvalho. *Sistema de Detecção Remota de Comboios*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico (Universidade Técnica de Lisboa), Lisboa, Maio de 2004.
- [3] University of Hull, Magnetics Group. *Magnetostriction*.
- [4] Brüel & Kjaer. *Piezoelectric DeltaShear® Accelerometers: Uni-Gain®, DeltaTron® and Special Types*.
- [5] S. L. Grassie, R. W. Gregory and K. L. Johnson, The behaviour of railway wheelsets and track at high frequencies of excitation. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 24(2):103-111, 1982.