

Controlo activo de ruído

Ferreira, Pedro M. A. Silva, Tito L.S. Rosa, A.C.
 pferreira@isr.ist.utl.pt. tsilva@isr.ist.utl.pt. acrosa@isr.ist.utl.pt
 Instituto Superior Técnico. Instituto de Sistemas e Robótica

Abstract

In our work we develop a system to provide noise attenuation by active means. We accomplish this task by capturing the undesired noise (primary source) through a microphone, processing this signal in a digital computer and sending another signal (secondary source) aiming to attenuate the first one. We implement this technique in an opened space, for a desired direction and we also make a simulated study of noise control in an empty rectangular room. We achieved very good results in the experiments for the first case, and obtained also good results in the simulated study for the second one.

Introdução

Dia após dia, existem cada vez mais sons que não desejaríamos ouvir: o som emitido pelos aviões em aeroportos nas regiões limítrofes das grandes cidades, o emitido pelos comboios que passam perto de localidades; dentro de habitações, o som de um ar condicionado, de uma ventoinha, de um electrodoméstico usual ou mesmo dos vizinhos. Pretende-se exactamente atenuar o efeito dessas indesejadas fontes sonoras, através da elaboração de um controlador activo de ruído. A fonte de som a atenuar pode ser seleccionada de entre um conjunto de fontes captadas e a região do espaço onde se deseja sentir essa atenuação pode ser previamente especificada.

O controlador activo de ruído funciona de forma muito simples: o sinal a atenuar é captado e, com base no local do espaço onde se deseja atenuar o seu impacto, é gerado outro sinal que cancelará o efeito do primeiro. Assim, o sinal deverá ser adquirido por meio de um microfone e conduzido até ao controlador. Este, conjuntamente com a informação previamente armazenada da região do espaço onde se pretende atenuar o sinal, gera um sinal de saída que, conduzido a uma coluna, cancela o sinal recebido. É evidente que existe um conjunto de regras e normas a seguir visando o correcto funcionamento do sistema, entre as quais se salientam distâncias mínimas a respeitar, pois podemos desde já reparar que o tempo necessário para o processamento a efectuar pelo controlador deverá ser menor que o tempo demorado pelo som desde a sua fonte emissora ao local onde se deseja observar a sua atenuação.

Fundamento teórico

Defina-se então pressão gerada por uma fonte, que em muitos problemas de acústica se considera pontual. Para isso, introduz-se o conceito de força complexa efectiva (q), obtida pelo produto da velocidade das partículas à superfície emissora pela área dessa mesma superfície. Assim, pode dizer-se que a uma distância r de uma fonte a pressão é dada por

$$p(r) = \frac{j\omega\rho_0 q e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (1)$$

Esta expressão adquire uma forma mais complexa se considerarmos a fonte emissora dentro de uma caixa paralelepipedica. Neste caso, a pressão num ponto da caixa é dada por

$$p(x) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos \frac{n_1 \pi x_1}{L_1} \cos \frac{n_2 \pi x_2}{L_2} \cos \frac{n_3 \pi x_3}{L_3} \quad (2)$$

onde L_1, L_2 e L_3 são as suas dimensões e A_n um coeficiente que depende do seu material.

Se considerarmos uma fonte sonora cuja força complexa efectiva evolui segundo uma função Q_{vol} , podemos afirmar que a pressão num ponto do espaço x , devido à existência dessa fonte na posição y , é dada por

$$p(x) = \int_V Q_{vol}(y)G(x|y)dV + \int_S [G(x|y)\nabla \cdot p(y) - p(y)\nabla(Gx|y)]ndS \quad (3)$$

onde V representa o volume que se queira considerar, com fronteira S . Esta expressão geral complexa indicamos a pressão em função de $G(x|y)$ e em função de possíveis perturbações na fronteira do volume V .

As expressões (1) e (3) indicam-nos a pressão esperada para cada ponto do espaço e dão origem aos Controladores de Campo Aberto e Fechado, que têm por objectivo atenuá-las.

Campo aberto

Para procedermos a controlo em campo aberto, consideremos duas fontes de som segundo o eixo x , separadas por uma distância d (Figura 1).

Para o conjunto de fontes da Figura, vem que

$$p(r, \theta) = \frac{jw\rho_0q_p e^{-jk r_p}}{4\pi r_p} + \frac{jw\rho_0q_s e^{-jk r_s}}{4\pi r_s} \quad (4)$$

Considerando r suficientemente grande, muito maior que a distância d e que o comprimento de onda do som emitido pelas fontes, podem fazer-se algumas aproximações, como $r_p \approx r + (d/2)\cos(\theta)$ e $r_s \approx r - (d/2)\cos(\theta)$. Estas aproximações podem ser utilizadas para valores de r nos expoentes. Por nos ser útil mais tarde, repararemos que, feita esta aproximação, estamos a admitir que $r_p = r_s + d\cos(\theta)$. Para os denominadores, pode observar-se que quando $r \rightarrow \infty$ $r_p \approx r_s$. Assim, para tornar nula a pressão a uma distância r que se considera suficiente e segundo um ângulo θ_0 , $p(r, \theta_0) = 0$, obtem-se facilmente a relação entre q_s e q_p ,

$$q_s = -q_p e^{-jkd \cos(\theta_0)} \quad (5)$$

Para que exista atenuação da fonte primária em todas as direcções angulares, deve ter-se $|p(r, \theta)| < |p_p(r, \theta)|^2$ (onde p_p representa a pressão exercida exclusivamente pela essa fonte), pelo que

$$(1 - \cos[kd(\cos\theta_0 - \cos\theta)]) < \frac{1}{2} \quad (6)$$

Observando que o maior valor de $\cos\theta_0 - \cos\theta$ é 2, pode deduzir-se que $d < \lambda/12$. Este resultado permite-nos afirmar que se a fonte secundária estiver situada a uma distância da fonte primária inferior a um doze avos do comprimento de onda, é possível obter atenuação em todo o campo distante.

Façamos agora uma análise da forma com que se apresenta o resultado de um ambiente controlado. Para tal, estudemos a derivada angular do sinal captado no meio ambiente, dado por (4):

$$\frac{\partial p(r, \theta)}{\partial \theta} = p_p(r, \theta) jkd \sin(\theta) e^{-jkd(\cos\theta_0 - \cos\theta)} \quad (8)$$

Logo,

$$\left| \frac{\partial p(r, \theta)}{\partial \theta} \right| \propto |\sin\theta| \quad (9)$$

Desta forma, podemos contar com derivadas muito baixas para a zona dos 0° e dos 180° , resultando o aspecto geral em zonas de fraca turbulência nas vizinhanças do arco de raio r em torno desses ângulos. Por outro lado, podemos contar com zonas abruptas perto dos 90° , pelo que, ao efectuar controlo sobre esta zona, espera-se que o mínimo local não se mantenha numa região angular larga em seu torno. Serão pois mais visíveis os mínimos locais para 90° , enquanto para os zero graus espera-se um controlo mais abrangente.

Campo fechado

A pressão num ponto x dentro de uma caixa rectangular pode ser obtida pela soma de modos acústicos

$$\nabla^2 \varphi_n(x) + k_n^2 \varphi_n(x) = 0 \quad (10)$$

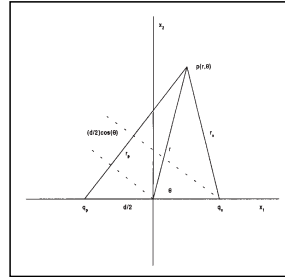


Figura 1. Influência de duas fontes de som num ponto específico do espaço.

representados por φ_n . Estes modos são as funções características da Equação de Helmholtz onde k_n^2 é o valor próprio associado à função característica $\varphi_n(x)$, e pode ser expresso em termos das dimensões da caixa (Figura 3.2)

$$k_n^2 = \frac{w_n^2}{c_0^2} = \left(\frac{n_1\pi}{L_1}\right)^2 + \left(\frac{n_2\pi}{L_2}\right)^2 + \left(\frac{n_3\pi}{L_3}\right)^2 \quad (11)$$

A pressão $p(x)$ pode ser descrita por uma série de modos

$$p(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \varphi_n(x) \quad (12)$$

Consideremos então a existência de duas fontes de som dentro da referida caixa, uma fonte primária de força complexa q_p na posição y_p e uma fonte secundária de força complexa q_s na posição y_s . Neste caso temos então

$$q_{vol} = q_p \delta(y-y_p) + q_s \delta(y-y_s) \quad (13)$$

$$a_n = \frac{w p_0 c_0^2}{\sqrt{2\zeta_n w_n w + j(w^2 - w_n^2)}} [q_p \varphi_n(y_p) + q_s \varphi_n(y_s)] \quad (14)$$

e podemos calcular os coeficientes para a série de modos acústicos para $p(x)$ obtendo o seguinte resultado

$$q_s = -q_p \varphi_n(y_p) / \varphi_n(y_s) \quad (15)$$

onde w_n representa a frequência do n -ésimo modo acústico e ζ_n é um coeficiente relacionado com a absorção de sinal pelas paredes. Desta relação decorre que a resposta em cada modo pode ser conduzida a zero desde que

Torna-se agora fundamental garantir que anular a resposta num modo particular não irá aumentar a excitação nos outros modos cujas respostas contribuem também para a pressão total obtida. Neste sentido define-se a média total temporal da energia potencial acústica dada por

$$E_p = \frac{1}{4\rho_0 c_0^2} \int_V |p(x)|^2 dV \quad (16)$$

$$q_s = \frac{-\sum_{n=0}^{\infty} |B_n|^2 a_{pn}}{\sum_{n=0}^{\infty} |B_n|^2} q_p = \frac{-\sum_{n=0}^{\infty} |A_n|^2 \varphi_n(y_p) \varphi_n(y_s)}{\sum_{n=0}^{\infty} |A_n|^2 \varphi_n^2(y_s)} q_p \quad (17)$$

Daqui podemos dizer que a força complexa óptima para a fonte secundária será por minimização

$$A_n = \frac{w}{\sqrt{2\zeta_n w_n w + j(w^2 - w_n^2)}} \quad (18)$$

onde

quantifica a resposta ressonante do n -ésimo modo. Podemos assim proceder a controlo em campo fechado global.

Implementação

Para termos um campo livre, usámos a Câmara Anecóica existente no Centro de Análise e Processamento de Sinal (CAPS), no IST. Esta Câmara possui a particularidade de evitar reflexões nas paredes; para tal, a sua superfície é constituída por formas piramidais, que retêm o som evitando o seu retorno.

Para realizar as experiências, verificaram-se algumas limitações quanto aos métodos a adoptar. Utilizou-se uma Sound Blaster PRO16 com uma

frequência de amostragem de 11025 Hz. Podemos dizer que o controlador funcionará correctamente para: Sinais com frequências entre os 300Hz e os 1200Hz; Distâncias entre fontes maiores que 1 metro; Distância do microfone de análise para o ponto médio entre as fontes maior ou igual a 2 metros (Campo Distante).

Resultados e conclusões

Antecedendo as experiências práticas, projectou-se um simulador deste controlador, no qual se pode observar o efeito de fontes sonoras em propagação no espaço tridimensional, e o efeito da aplicação do controlador a uma dessas fontes. Alguns resultados obtidos podem ser vistos nas figuras seguintes.

Após as simulações, realizou-se o controlador activo de ruído tendo em conta as problemáticas de aquisição e processamento de sinal, atrasos e tempos de processamento algorítmico. Os resultados obtidos foram satisfatórios pois conseguiu-se atenuar o efeito de fontes de ruído previamente seleccionadas, em regiões do espaço predefinidas, como se exemplifica nas próximas figuras.

Controlo Activo de Ruído, mediante a obediência de certas condições, provou ser um meio que atinge resultados mais objectivos com uso de recursos geralmente mais económicos que o Controlo Passivo. Seria impensável, até à aparição deste tipo de controlo, seleccionar qual a fonte a atenuar ou atenuá-la apenas numa região do espaço.

O maior problema do Controlo Activo de Ruído em tempo real reside no facto do tempo de processamento estar a competir com um sinal de som que já partiu, evidentemente, quando foi captado.

Em simulação pudémos observar, embora sem as contingências do mundo real, que as respostas provenientes de Controlo Activo permitem grandes índices de atenuação nas regiões pretendidas. Da análise das simulações pudémos chegar também à conclusão que a atenuação para determinada direcção só se começa a fazer sentir a partir de determinada distância, que depende da direcção.

A distância dada como Campo Distante, isto é, a distância para a qual são válidas as aproximações assumidas para dar origem ao Controlo em Campo Aberto, é afinal pequena se tivermos em conta que o Controlo em Campo Aberto está vocacionado para funcionar em grandes espaços - verificámos que para frequências de cerca de 1000Hz bastava menos de 2 metros.

Os resultados obtidos para as experiências efectuadas foram muito satisfatórios, conseguindo-se uma atenuação bastante perceptível ao próprio ouvido humano, apesar das dimensões da própria cabeça não permitirem a audição numa só recta. Podemos verificar que o Controlo em Campo Aberto produz melhores resultados (mais abrangentes) para ângulos próximos de zero graus.

Na aplicação prática, implementámos um mecanismo de previsão que consiste apenas em admitir que as últimas frequências emitidas se mantêm. Para maior abrangência do número de sinais a controlar a curta distância, futuramente pode ser aplicado um mecanismo de previsão mais complexo (tendo em conta porém que a complexidade desse mecanismo também vai fazer aumentar o tempo de processamento). Assim, pode implementar-se um algoritmo probabilístico que, tendo em conta a evolução do sinal no domínio da frequência, prevê a curto prazo quais as frequências que vão ser emitidas. Esse algoritmo pode ser complementado por um outro que, após uma separação inicial do sinal nas suas frequências constituintes, faz o "seguimento" de cada uma delas, tentando detectar a sua evolução. Como exemplo, a sirene de uma ambulância é um sinal cuja frequência evolui periodicamente; esse algoritmo pode estudá-lo por forma a detectar a sua periodicidade.

Se, por outro lado, o sinal for proveniente de um fenómeno conhecido, e depender directamente de uma "entrada" também conhecida, respondendo sempre da mesma forma para cada valor da entrada, então não precisamos de fazer controlo em tempo real. Basta-nos efectuar todos os cálculos previamente e depois ter um aparelho que, mediante a entrada, responde com a saída óptima

Referências

1. P. A. Nelson, S.J. Elliot, "Active Control of Sound", Institute of Sound and Vibration Research, Southampton University, Academic Press
2. A.V. Oppenheim, A.S. Willsky, "Signals and Systems", Prentice-Hall International Inc.

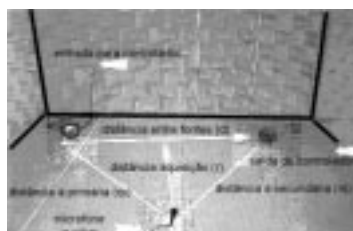


Figura 2. Esquema das experiências



Figura 3. Simulação da atenuação para 60 graus e zero graus, respectivamente. Valores de maior atenuação

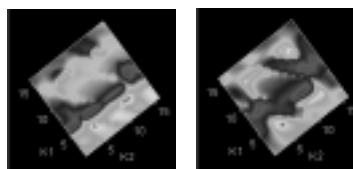


Figura 4. Simulação em Campo Fechado para uma e duas frequências fundamentais do sinal sonoro usado, respectivamente (gráficos de

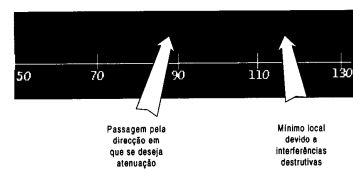


Figura 5. Experiência prática para atenuação a 90 graus. Para além se ser bem visível a atenuação obtida para essa direcção, notem-se registam-se outras atenuações devido a interferências destrutivas, tal como já se tinha verificado em simulação.



Figura 6. Sinal captado pelo microfone de análise numa experiência prática para controlo a 60° (sinal de 717Hz).