

**Peer-reviewed  
Proceedings  
Vol. 23, 2018  
annually  
Vedecký  
recenzovaný  
zborník  
Roč. 23, 2018**

## **Akustická kamera a jej využitie pri lokalizácii zdrojov zvuku elektromechanických systémov riadenia**

**Ján HAŠKO, Ing. PhD.**  
ZF TRW, Nové Mesto nad Váhom  
e-mail: [jan.hasko@zf.com](mailto:jan.hasko@zf.com)

### **Úvod**

Z hľadiska ďalšieho zlepšovania akustického komfortu vozidiel sa stalo nevyhnutným, okrem dominantných zdrojov hluku, zaoberať sa i tzv. vedľajšími zdrojmi. K týmto vedľajším zdrojom patria okrem iného i nové elektromechanické systémy riadenia vozidiel. Len systematický prístup a včasné integrovanie NVH problematiky do vývojových fáz vozidiel a ich komponentov, môže zabezpečiť akusticky optimálne a zároveň cenovo dostupné vozidlá. Vibroakustická optimalizácia sa tak stala neodlučiteľnou súčasťou procesu vývoja nových vozidiel a ich komponentov. Pri tejto optimalizácii sa v poslednom období čoraz viac využívajú i moderné techniky lokalizácie zdrojov hluku, využitím meraní prostredníctvom poľa mikrofónov (tzv. akustickej kamery).

V rámci tohto príspevku by som sa chcel zamerať najmä na popis a možnosti využitia moderných akustických kamier pri vývoji elektromechanických systémov riadenia a ich zabudovaní do vozidiel, tak i pri identifikácii príčin zvýšenej hlučnosti systémov (napr. pri riešení zákazníckych reklamácií).

### **Metódy lokalizácie**

#### *NAH – near-field acoustic holography*

Pole mikrofónov je umiestnené blízko pri zdroji, maximálne do 2-násobku vlnovej dĺžky najvyššej frekvencie. Akustický tlak je meraný mikrofónmi, spravidla v obdĺžnikovom rovinnom poli. Akustický tlak v rovine poľa je potom zobrazený na povrchu objektu.

*Vzdialenosť mikrofónov = ( $\lambda / 2$ ) maximálnej frekvencie*  
*Veľkosť poľa (priemer kamery) = ( $\lambda / 2$ ) minimálnej frekvencie*

Vzdialenosť mikrofónov určuje i priestorové rozlíšenie (riedke pole mikrofónov nemôže presne lokalizovať zdroje). Priestorové rozlíšenie nezávisí od frekvencie, je rovné vzdialenosti mikrofónov. Veľkosť rovinného poľa musí byť totožná s veľkosťou meraného objektu. Pre stacionárne režimy je možné načítať data postupne i s menším polom mikrofónov. Pre vyššie frekvencie je potrebná menšia vzdialenosť mikrofónov. Výstupom je hologram (zobrazenie zdroja zvuku).

### Beamforming

Pole mikrofónov je umiestnené vo vzdialenom poli – ďalej od zdroja ako sú rozmery poľa (priemer kamery) – zvukové vlny je tu možné považovať za rovinné. Konfigurácia mikrofónov je kompromisom medzi dynamickým rozsahom a presnosťou lokalizácie zdroja. Optimálne je kruhové pole s pseudo-náhodným rozložením mikrofónov.

Vlastnosti:

- celý objekt je meraný súčasne
- meraný objekt môže byť väčší ako je pole mikrofónov
- priestorové rozlíšenie =  $(d/D) \lambda$ , kde

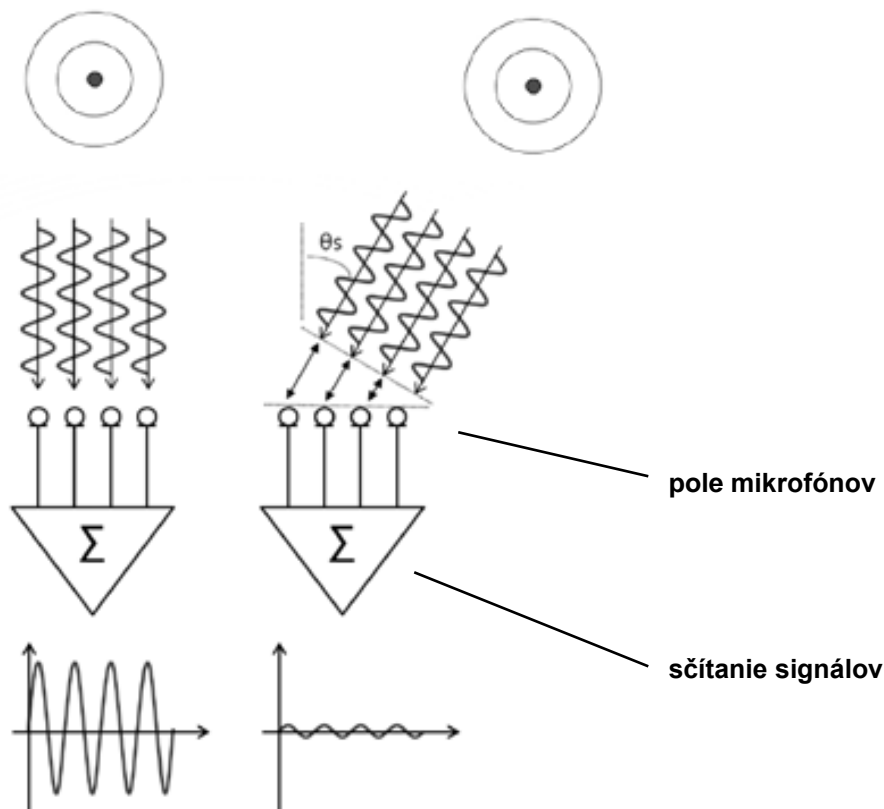
*d - vzdialenosť medzi objektom a polom*

*D – priemer poľa*

*$\lambda$  – vlnová dĺžka*

- so zväčšovaním vzdialenosti sa rozlíšenie zhoršuje
- všeobecne je vhodné pre frekvencie nad 1000 Hz
- nemôže byť použité na výpočet „sound power“
- maximálna frekvencia je tiež limitovaná vzdialenosťou mikrofónov a ich hustotou v poli
- priestorové rozlíšenie rastie s frekvenciou
- dynamický rozsah závisí od frekvencie (čím je frekvencia nižšia tým vyšší je dynamický rozsah)
- rýchle spracovanie dát

Beamforming (Obrázok 1) je dnes štandardnou metódou lokalizácie zdrojov zvuku na pohybujúcich sa objektoch (lietadlá, vysokorýchlostné vlaky, automobily a pod.). Pri stacionárnych aplikáciách poskytuje táto metóda, potlačením hluku pozadia, možnosť skúmať zdroje zvuku nachádzajúce sa v hlučnom prostredí [3]. To môže byť výhodné pri testovaní našich systémov zabudovaných vo vozidlách (v tesnej blízkosti spaľovacieho motora) vzhľadom k tomu, že tieto systémy riadenia pracujú len pri bežiacom spaľovacom motore. Navyše je možné odhaliť i ďalšie problematické miesta v súvislosti s natáčaním kolies (dorazy, guľové čapy a pod.).



Obrázok 1 – Zameranie akustickej kamery na zdroj a vedľa zdroja zvuku, po korekcii vzdialenosti mikrofónov.

### **Techniky zlepšenia vlastností NAH a beamformingu**

Near-field focalization – beamforming pole mikrofónov sa prisunie bližšie ku zdroju – dosiahne sa asi 2-násobné zlepšenie priestorového rozlíšenia v celom frekvenčnom rozsahu [2].

Spherical beamforming – vhodné pre interiéry vozidiel, vlakov, lietadiel (zložité zvukové polia s odrazmi). Vyžaduje to sférické pole mikrofónov (uzavreté pole – je to lepšie z hľadiska priestorového rozlíšenia a dynamického rozsahu). Ďalšie zlepšenie pomocou „equivalent source method“ (ESM) [2].

Rotating beamforming – pre testovanie rotačných častí [4].

Irregular-NAH (NAH s nepravidelným rozložením mikrofónov) – NAH vyžaduje štandardne pravouhlé pole mikrofónov, s ich pravidelným usporiadaním. Tieto požiadavky je možné eliminovať tzv. inverznou metódou (pre nepravidelné rozloženie mikrofónov), čím sa dosiahne zníženie minimálnej frekvencie na (60÷70) Hz [2].

SONAH – štatisticky optimalizovaná NAH [4].

## Kritériá pre voľbu vhodnej metódy lokalizácie zdrojov zvuku

- frekvenčný rozsah
- vzdialenosť od zdroja
- fyzikálne vlastnosti zdroja (rozmery, granularita - kamera musí prekryť kritickú testovanú oblasť systému, pre dobré rozlíšenie je potrebná čo najmenšia vzájomná vzdialenosť mikrofónov)
- prevádzkové podmienky (možnosť testovania v stacionárnom i prechodovom režime a pod.)



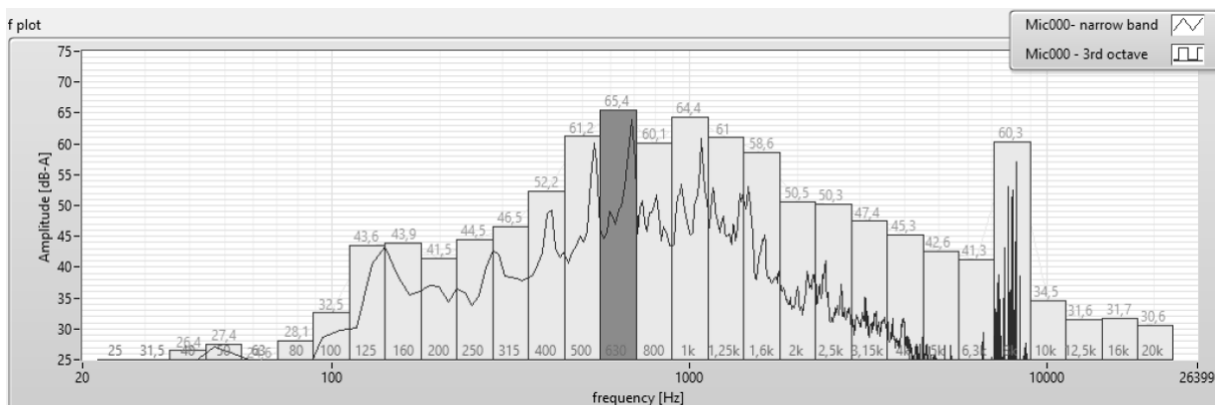
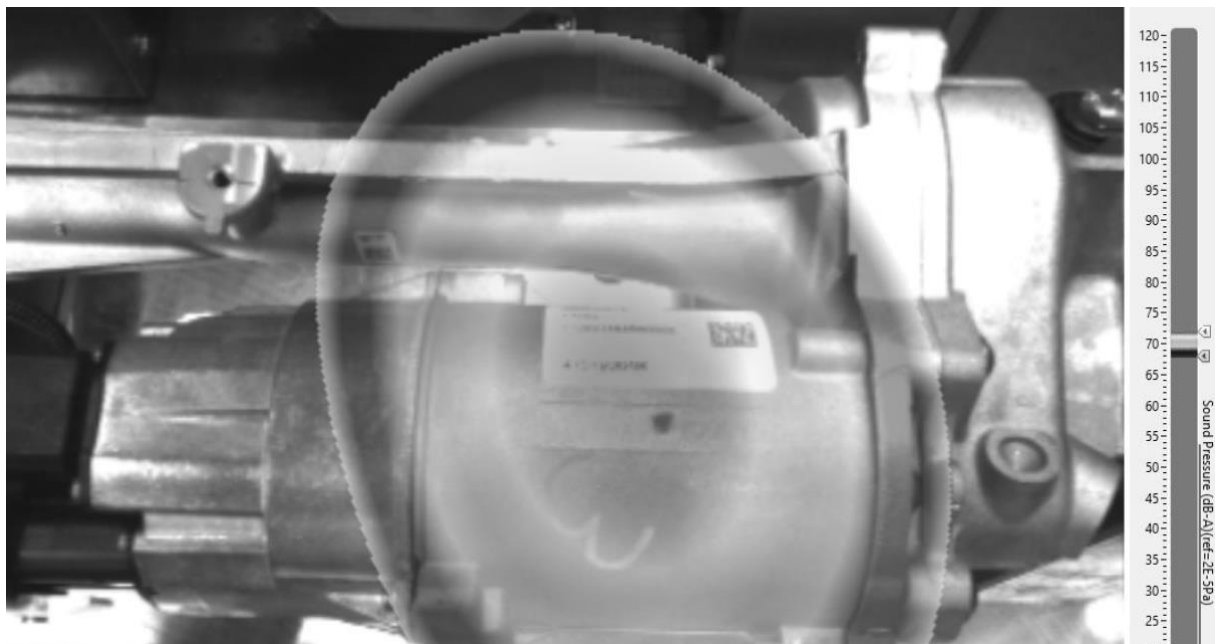
Obrázok 2 – Akustické kamery firiem SIEMENS a CAE Software und Systems.

## Možnosti využitia akustickej kamery v našich podmienkach

V minulom roku sme v rámci výberového konania na dodávateľa vhodnej kamery uskutočnili porovnávacie merania našich systémov, využitím akustických kamier niekoľkých renomovaných výrobcov (Obrázok 2). Výsledky meraní a analýz (Obrázok 3) preukázali veľký potenciál takéhoto vybavenia, či už v rámci riešenia zákazníckych reklamácií alebo tiež i pri vývoji nových systémov [1].

Kameru bude možné využiť ako pri analýze systému na testovacom zariadení, tak i pri systéme zabudovanom vo vozidle. Nízka hmotnosť moderných kamier, daná i použitím digitálnych mikrofónov, a obvykle i možnosť nasadenia kamery na ručný držiak, umožňujú veľkú flexibilitu využitia. Zariadenie môže byť napájané i externou 12 V batériou. Vzhľadom k počtu a konfigurácii digitálnych (MEMS) mikrofónov (bežne viac než 100 mikrofónov) majú kamery dobré priestorové rozlíšenie potrebné k lokalizácii zdrojov zvuku, ako i vysoký dynamický rozsah v celom využiteľnom frekvenčnom rozsahu (obvykle od 100 Hz do 20 kHz). Vzhľadom k typu použitých mikrofónov zariadenie nevyžaduje kalibráciu a je takmer okamžite pripravené na meranie. Zariadenie navyše bežne obsahuje i ďalšie vstupy napr. pre pripojenie snímača zrýchlenia, tacho sondy a pod. V prípade ďalších zdrojov hlučnosti, ktoré pre nás nie sú zaujímavé, je možné využitím týchto vstupov tento zvuk odfiltrovať.

V strede zariadenia je štandardne umiestnená kamera a často i laserový merač vzdialenosti. Nasnímané dáta je možné softvérovo spracovať ako pre meranie v blízkom, tak i pre meranie vo vzdialenom poli (acoustic holography, beamforming). Kameru je možné využiť i na meranie hladiny akustického výkonu zdroja zvuku, na analýzu technického stavu rôznych strojných zariadení (porovnaním s pôvodným stavom, napr. pre potreby údržby) a pod. Použitie digitálne mikrofóny umožnili i výrazne znížiť cenu zariadenia, takmer na 20% v porovnaní so staršími typmi.



Obrázok 3 – Hologram SONAH vs spektrá zvuku.

### Očakávané prínosy využitia akustickej kamery

- rýchla a objektívna analýza príčin zvýšenej hlučnosti systémov
- preukázateľná identifikácia problematických komponentov bez potreby SWOP analýz
- rýchle odhalenie problémových miest umožní i rýchle nasadenie účinných nápravných opatrení

- možnosť identifikácie zdrojov hluku, ktoré nie sú periodické (kontaminácia, poškodenia kontaktných plôch, uvoľnené spoje, vôle a pod.)
- možnosť skúmania prechodových dejov (videosekvencie)
- kvantifikácia príspevku jednotlivých zdrojov z hľadiska akustického výkonu
- objektívne potvrdenie alebo vylúčenie zákaznických reklamácií pri systéme zabudovanom vo vozidle (vplyv montáže do vozidla, preukázateľná identifikácia iných zdrojov, ktoré nesúvisia s našim systémom a pod.)

## Záver

V rámci tohto článku som sa zamerlal na moderné techniky lokalizácie zdrojov hluku, využitím meraní prostredníctvom poľa mikrofónov, tzv. akustickej kamery. Vykonané merania a analýzy preukázali veľký potenciál takéhoto vybavenia, či už v rámci riešenia zákaznických reklamácií alebo tiež i pri vývoji nových systémov. Implementovanie vyššie uvedeného moderného vybavenia tak môže spoločnosti ZF TRW priniesť ďalšie zvýšenie kvality a konkurencieschopnosti produktov.

## Literatúra

- [1] Interné materiály spoločnosti ZF TRW
- [2] Lanslots, J., Deblauwe, F., Janssens, K.: Selecting the most appropriate sound source localization techniques for modern-day industrial applications. Journal of Sound and Vibration. April 2010, Volume 7.
- [3] Ulf, M.: History of acoustic beamforming. In: Berlin Beamforming Conference 2006 Berlin/Germany.
- [4] CAE Software und Systems: Noise Inspector. CAE Software und Systems, Gutersloh, 2017

## Resumé

**The acoustic camera and its utilisation at the localization of the sound sources of electromechanical steering systems.** This contribution is focused on the modern experimental methods, that would be applicable at the development of electromechanical steering systems and their integration into the vehicles as well as for identifying the causes of increased noise levels of systems. The measurements by the acoustic camera has become a standard method for localizing the noise sources on aircrafts, trains, cars and other machinery. Also our comparison measurements on the our steering systems confirmed a great potential of this modern equipment in solving noise problems, both in the frame of the diagnostics of the claimed systems as well as at the development of the new steering systems.

## Podakovanie

Ďakujem vedeniu spoločnosti ZF TRW v Novom Meste nad Váhom, že mi umožnilo účasť a prezentáciu interných materiálov spoločnosti na tomto podujatí.