

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R016 Stavba výrobních strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měřicí zařízení pro měření zvukových polí

Autor: **Filip HÁLA**

Vedoucí práce: **Ing. Michal Křížek, Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip HÁLA**
Osobní číslo: **S09B0271P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba výrobních strojů a zařízení**
Název tématu: **Měřicí zařízení pro měření zvukových polí**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Zpracujte možnosti mapování zvukových polí dle platných norem. Popište jeho význam pro diagnostiku hluku, trendy v této oblasti. Vypracujte konstrukční návrh zařízení pro mapování zvukových polí, založený na dostupném měřicím systému.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Zvuk, zvuková pole
2. Mapování zvukových polí, postupy
3. Návrh algoritmu na zpracování mapového pole
4. Konstrukční návrh zařízení pro mapování zvukových polí



Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **30-40 stran A4**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika : senzory - metody - analýza signálu.*
Praha: nakl. BEN - technická literatura, 2006

SMETANA, C. *Hluk a vibrace, měření a hodnocení.* Praha: nakl. Sdělovací technika,
1998

HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Příručka strojního inženýra 1.* Brno: Computer Press,
1999

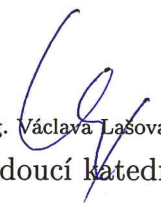
Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Křížek, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Michal Křížek, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **24. září 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 24. září 2012

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému odbornému konzultantovi a zároveň vedoucímu práce Ing. Michalovi Křížkovi, Ph.D., za poskytnuté konzultace, kvalifikované rady a odbornou pomoc při sepisování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat svému otci Zdeňkovi Hálovi za odborné rady a pomoc při konstrukční části bakalářské práce.

Tato bakalářská práce byla podpořena formou odborné konzultace Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky v rámci projektu č. CZ.1.07/2.3.00/35.0048 „Popularizace výzkumu a vývoje ve strojním inženýrství a jeho výsledků (POPULÁR)“.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Hála	Jméno Filip	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Stavba výrobních strojů a zařízení“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Křížek, Ph.D.	Jméno Michal	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Měřicí zařízení pro měření zvukových polí		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	40	TEXTOVÁ ČÁST	0	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	---	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce pojednává o problematice monitorování zvukových polí pomocí metody beamformingu. Na základě zpracované teorie je v praktické části navržena konstrukce akustické kamery, která je jako výsledek práce vyrobena a smontována.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">zvuk, hluk, akustická kamera, beamforming, lokalizace zdroje hluku</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Hála	Name Filip	
FIELD OF STUDY	2301R016 "Machine design"		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Křížek, Ph.D.	Name Michal	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Sound field measurements		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2013
----------------	---------------------------	-------------------	-------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	40	TEXT PART	40	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This bachelor thesis deals with issue of mapping noise sources by beamforming. On the basis of theoretical part of thesis the optimal design of acoustical camera is chosen. This camera is produced and assembled as a result of this thesis.
KEY WORDS	sound, noise, acoustical camera, beamforming, identification of noise source

Obsah

Obsah	7
Přehled použitých zkratk a symbolů	9
Úvod	10
1 Základní pojmy	11
1.1 Definice zvuku a hluku	11
1.2 Akustické veličiny	11
1.2.1 Akustický tlak	11
1.2.2 Akustická rychlost	12
1.2.3 Porovnání akustického tlaku a akustické rychlosti	12
1.2.4 Akustická intenzita	12
1.2.5 Akustická impedance	12
1.2.6 Akustický výkon	12
1.3 Hladiny akustických veličin	13
1.4 Typy zvukových polí	14
1.4.1 Volné pole	14
1.4.2 Difúzní pole	14
1.4.3 Blízké zvukové pole	15
1.4.4 Vzdálené zvukové pole	15
1.5 Snímače akustických veličin	16
1.5.1 Mikrofon	16
1.5.2 Intenzitní sonda	16
1.5.3 Microflown	17
2 Metody monitorování zvukových polí pomocí mikrofonního pole	19
2.1 Mikrofonní pole	19
2.2 Akustická kamera	19
2.3 Beamforming	20
2.3.1 Princip beamformingu	21
2.3.2 Normalizace	24

2.3.3	Rozlišení	24
2.3.4	Maximální úroveň vedlejších laloků (Maximum Sidelobe Level).....	27
2.4	Konstrukce mikrofonního pole pro beamforming	29
2.4.1	Design pole	30
3	Praktická realizace.....	36
3.1	Stanovení cílů práce.....	36
3.2	Konstrukce držáku	36
3.2.1	Dostupné součástky	36
3.2.2	Požadavky na konstrukci	36
3.2.3	Nástin realizace.....	36
3.3	Návrh algoritmu na zpracování mapového pole	39
Závěr.....		43
Citovaná literatura		44
Seznam obrázků.....		45

Přehled použitých zkratk a symbolů

MEMS	Micro-Electro-Mechanical-System
NAH	Near Field Acoustical Holography
SONAH	Statistically Optimal Near Field Acoustic Holography
IBEM	Inverse Boundary Element Method
STSF	Spatial Transformation of Sound Fields
NS-STSF	Non-Stationary Spatial Transformation of Sound Fields
DAS	Delay-And-Sum
MSL	Maximum Sidelobe Level
ULA	Uniform Linear Array

Pozn.: V práci jsou používány veličiny a jednotky všeobecně známé. Méně známé veličiny jsou vysvětleny v textu.

Úvod

Monitorování zvukových polí patří v současnosti k důležitému odvětví diagnostiky nejen ve strojírenství, ale i v ostatních oborech lidské činnosti. Se zvukem či hlukem se člověk setkává při každodenních činnostech. Právě zvuk je důležitým nositelem informací o technickém stavu zařízení a schopnost najít zdroj tohoto zvuku je logicky počátečním krokem k jeho odstranění. Zařízení používané k mapování zvukových polí se nazývá akustická kamera. Toto zařízení se skládá z pole mikrofónů, které je obvykle opatřeno kamerou, která poskytuje reálný obraz monitorované oblasti. Obraz je překrýván tzv. akustickou mapou, která zobrazuje zdroje hluku a jejich intenzitu. Princip lze přirovnat k termovizi s tím rozdílem, že u akustické kamery není nosičem informace teplo, nýbrž akustický tlak.

Monitorování zvukových polí neslouží pouze k lokalizaci zdroje hluku, ale slouží i při řešení odhlučnění určitého prostoru. Používá se například při odhlučnění interiéru osobních vozidel použitím kulové akustické kamery, která dokáže zobrazovat akustickou mapu ve třech dimenzích a následně identifikovat všechna místa, kde je použita nedostatečná izolace prostoru.

Téma práce mne oslovilo především tím, že jsem v něm viděl příležitost zabývat se problematikou moderní technologie diagnostiky, která není v současnosti v České republice příliš používána a do budoucnosti má zajisté vysoký potenciál. Ke špičce oboru, který se zabývá touto problematikou, patří nizozemské společnosti Brüel & Kjær a Microflown Technologies a právě poznatky odborníků z těchto společností jsou zpracovány v teoretické části této bakalářské práce (dále jen práce). Další výzvou byla možnost podílet se na zrodu experimentální akustické kamery, která bude sloužit jako učební pomůcka Katedry konstruování strojů ZČU.

Hlavním cílem této práce je zpracovat teorii vybrané metody mapování zvukových polí. Vybrána a následně aplikována je metoda beamformingu, která je jednou z nejpoužívanějších metod při mapování zvukových polí ve vzdáleném poli. Na základě zpracované teorie jsem se dále zabýval návrhem designu akustické kamery, která bude sloužit jako experimentální pomůcka. V závěru práce je navrhnout algoritmus naprogramování akustické kamery.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část je dále členěna na dvě hlavní kapitoly. V první kapitole jsou uvedeny základní pojmy z oblasti akustiky a dále jsou popsány nejpoužívanější snímače akustických veličin při monitorování zvukových polí. V druhé kapitole je zpracována teorie beamformingu a následně je rozebrán nástin konstrukce akustické kamery. V praktické části je proveden návrh experimentální akustické kamery a algoritmu jejího naprogramování.

1 Základní pojmy

1.1 Definice zvuku a hluku

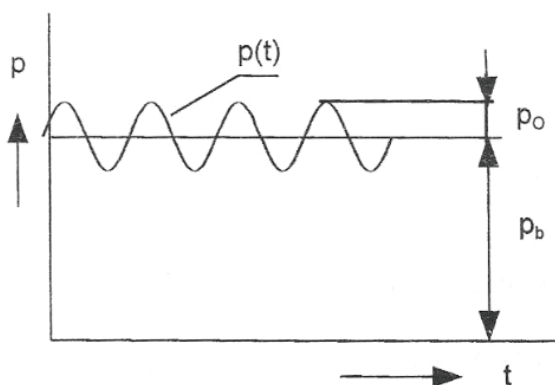
Zvuk je mechanické kmitání pružného prostředí v kmitočtovém rozsahu normálního lidského sluchu. Prostředí může být jakékoliv kromě vakua, kde se zvuk nemůže šířit. Kmitočtový rozsah lidského sluchu je 20 Hz až 20 kHz. Zvuk nižší 20 Hz se nazývá infrazvuk, zvuk vyšší 20 kHz je označován jako ultrazvuk [1]. Slyšitelná horní hranice 20 kHz je pouze teoretická, reálnější je hranice 16 kHz, která však s rostoucím věkem jedince klesá. Lidské ucho je nejcitlivější v rozmezí 2 kHz až 4 kHz.

Hlukem je označován každý nežádoucí zvuk ve slyšitelném frekvenčním pásmu. Pohybující se části strojů budí vibrace jejich povrchu a formou hluku dochází k přenosu energie ze stroje do okolního prostředí. Hluk, jako bezdotykově měřitelnou diagnostickou veličinu, lze využívat jako zdroj informace o technickém stavu zařízení. Na vytváření hluku se podílí třecí síly a mikroskopické silové impulzy, generované vzájemným pohybem drsných nebo nepřesně opracovaných ploch v místě styku dvojic dílů [2].

1.2 Akustické veličiny

1.2.1 Akustický tlak p [Pa]

Tlak je obecně definován jako síla působící na plochu. Tato síla je způsobena množstvím vzduchových částic v určité poloze. Z toho vyplývá, že změna akustického tlaku je ovlivněna změnami počtu částic vzduchu [1]. Změna počtu částic je způsobena výchylkami jednotlivých částic, zapříčiněným šířícím se rozruchem v určitém prostředí. Ve vzduchu si lze tento jev představit jako postupné zhušťování a zředování vzduchu [3]. Průběh akustického tlaku má vlnový charakter a jeho hodnota je superponována k barometrickému tlaku, což lze vidět na obr. 1.1. Hodnota akustického tlaku se pohybuje v rozmezí $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (práh slyšitelnosti) až $2 \cdot 10^2$ Pa (práh bolesti) [2].



Obr. 1.1 Průběh akustického tlaku [2]

1.2.2 Akustická rychlost \vec{u} [$m \cdot s^{-1}$]

Akustická rychlost je rychlost, kterou se pohybují částice vzduchu působením akustického tlaku kolem své rovnovážné polohy. Tato veličina je nepřímo měřitelná, má vlnový charakter a jedná se o vektor.

Akustická rychlost se pohybuje v rozmezí $5 \cdot 10^{-8} m \cdot s^{-1}$ (práh slyšitelnosti) až $1,6 \cdot 10^{-1} m \cdot s^{-1}$ (práh bolesti) [2].

1.2.3 Porovnání akustického tlaku a akustické rychlosti

Obecně je akustická rychlost spojena s příčinou akustické události a akustický tlak je spojen s výsledkem této události. V elektrické analogii si lze akustický tlak představit jako elektrické napětí a akustickou rychlost jako elektrický proud [1].

1.2.4 Akustická intenzita \vec{I} [$W \cdot m^{-2}$]

Akustická intenzita je měřítkem akustické energie procházející jednotkou plochy. Jedná se o vektorovou veličinu s vlnovým charakterem, nepřímo měřitelnou.

Je dána vzorcem:

$$\vec{I} = p(t) \cdot \vec{u}(t) \quad (1.1)$$

1.2.5 Akustická impedance Z [$Pa \cdot m^{-1} \cdot s$]

Akustická impedance v určitém bodě zvukového pole je definována poměrem akustického tlaku v tomto místě a rychlosti kmitání. Jedná se o komplexní číslo, které nám určuje, jak velikost, tak fázový poměr jednotlivých frekvenčních složek. V elektrické analogii si tuto veličinu lze představit jako elektrický odpor. Akustická impedance může být použita např. při určování odrazu nebo zjišťování hodnoty akustické pohltivosti materiálu.

Je dána vztahem:

$$Z = \frac{p}{u} \quad (1.2)$$

1.2.6 Akustický výkon P [W]

Akustický výkon je měřítkem celkové akustické energie, která je vyzářena ze zdroje nebo která prochází danou plochou. Jedná se o skalární veličinu s vlnovým charakterem, nepřímo měřitelnou.

Je dán vzorcem:

$$P = |I| \cdot S \quad (1.3)$$

Akustický výkon je základní a nejdůležitější veličinou popisující akustické vlastnosti zdroje zvuku [2].

1.3 Hladiny akustických veličin

Z důvodu zkreslení akustického signálu v lidském uchu se zavedl Weber-Fechnerův zákon, který říká, že akustické veličiny, které se mění řadou geometrickou, vnímá lidské ucho řadou aritmetickou. Násobek akustického signálu je lidským uchem vnímán jako přírůstek. Tento převod je uskutečněn logaritmickou funkcí.

Platí:

$$L = \log \frac{x}{x_0} [B] \quad (1.4)$$

Kde L je určitá hladina, x je velikost akustické veličiny a x_0 velikost vztažné akustické veličiny.

Protože Bel [B] by dával akustické veličině velmi hrubou stupnici, používá se jednotka deci Bel [dB], která je 10x menší. [3]

$$L = 10 \cdot \log \frac{x}{x_0} [dB] \quad (1.5)$$

Hladina akustického tlaku:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \cdot \log \frac{P}{P_0} [dB] \quad p_0 = 2 \cdot 10^{-5} [Pa] \quad (1.6)$$

Na prahu slyšitelnosti je $L_p=0$ [dB].

Na prahu bolesti je $L_p=140$ [dB]

Hladina akustické rychlosti:

$$L_u = 10 \cdot \log \frac{u^2}{u_0^2} = 20 \cdot \log \frac{u}{u_0} [dB] \quad u_0 = 2 \cdot 10^{-5} [m \cdot s^{-1}] \quad (1.7)$$

Hladina intenzity zvuku:

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} [dB] \quad I_0 = 1 \cdot 10^{-12} [W \cdot m^{-2}] \quad (1.8)$$

Hladina akustického výkonu:

$$L_P = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} [dB] \quad P_0 = 1 \cdot 10^{-12} [W] \quad (1.9)$$

Měřidla přímo vyhodnocují hladiny a operátor nemusí zadávat hodnoty vztažných veličin. Tyto veličiny jsou již implementovány v měřidlech. Hladiny jsou především hygienickou veličinou. Pro přepočítání hladiny na fyzikální veličinu je třeba použít inverzní funkci k hladinám:

$$x = x_0 \cdot 10^{\frac{L}{20}} \quad (1.10)$$

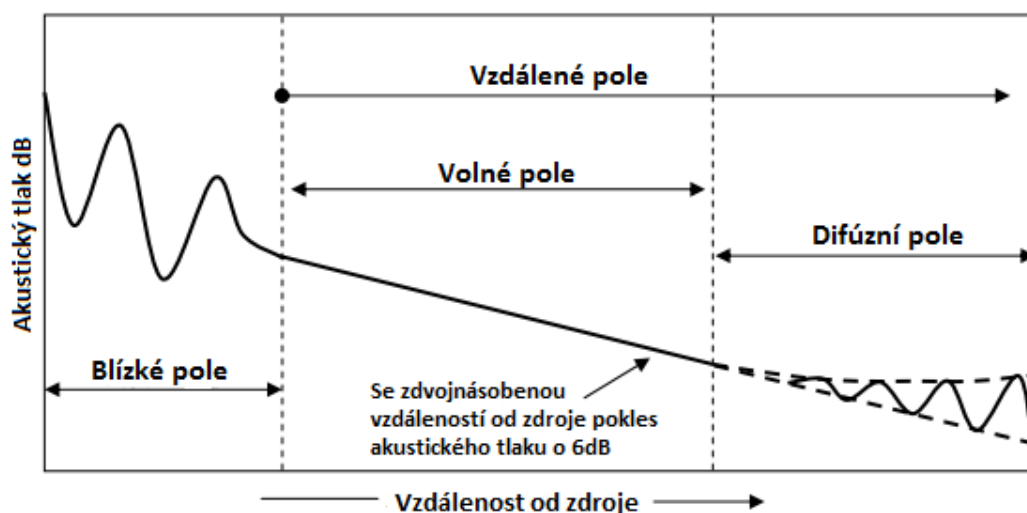
[2]

1.4 Typy zvukových polí

Pod pojmem zvukové pole se rozumí prostor, v němž se šíří zvukové vlny [3].

- Na zvukové pole má vliv:
- šíření zvuku
 - ohyb a odraz vlnění
 - akustické vlastnosti prostředí
 - členitost prostředí

Rozdělení jednotlivých zvukových polí v uzavřeném prostoru je naznačeno na obr. 1.2. Základním dělení zvukových polí je na blízké a vzdálené pole. Pro jednotlivé typy polí se používají i specifické metody měření.



Obr. 1.2 Typy akustických polí [4]

1.4.1 Volné pole

Zvuk se ve volném poli šíří v přímých vlnách, nedochází v něm k odrazům, absorpci nebo jakékoliv deformaci. V této oblasti platí, že se zdvojnásobením vzdálenosti od zdroje zvuku akustický tlak sníží přibližně o 6 dB [6]

1.4.2 Difúzní pole

V čistě difúzním poli se vyskytují mnohonásobné odrazy zvukových vln, které vytvářejí pole odražených vln, v němž nelze určit, kterým směrem se zvuková energie šíří. Směr šíření je náhodný a stále se měnící. Hranicí mezi polem volným a difúzním označujeme vzdálenost,

kde hustota akustické energie vlného pole se rovná hustotě akustické energie difúzního pole. Platí zde následující vztahy:

Hustota akustické energie ve vlném poli:

$$w_v = \frac{P}{c \cdot S} [J \cdot m^{-3}] \quad (1.11)$$

Kde c [ms^{-1}] je rychlost šíření rozruchu.

Hustota akustické energie v difúzním poli:

$$w_d = \frac{4 \cdot P}{c \cdot A} [J \cdot m^{-3}] \quad (1.12)$$

Kde A [m^2] je celková pohltivost prostoru. [2]

1.4.3 Blízké zvukové pole

Blízké zvukové pole je bezprostřední okolí kolem zdroje zvuku. Jinak se toto pole nazývá jako Fresnellův prostor. Důležitou vlastností tohoto pole je výrazná změna akustického tlaku s rostoucí vzdáleností od zdroje zvuku. V tomto poli jsou akustické veličiny obtížně měřitelné, proto se, až na výjimky, měření v této oblasti vyhýbáme [6]. Při měření v blízkém akustickém poli dopadají na měřicí přístroj sférické vlny.

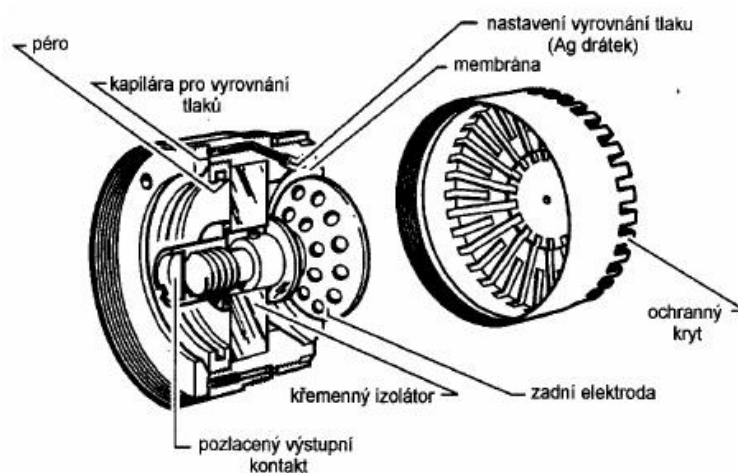
1.4.4 Vzdálené zvukové pole

Jedná se oblast zvukového pole, která se vyskytuje v dostatečně vzdálenou od zdroje hluku. V této oblasti se zvukové vlny jeví jako rovinné.

1.5 Snímače akustických veličin

1.5.1 Mikrofon

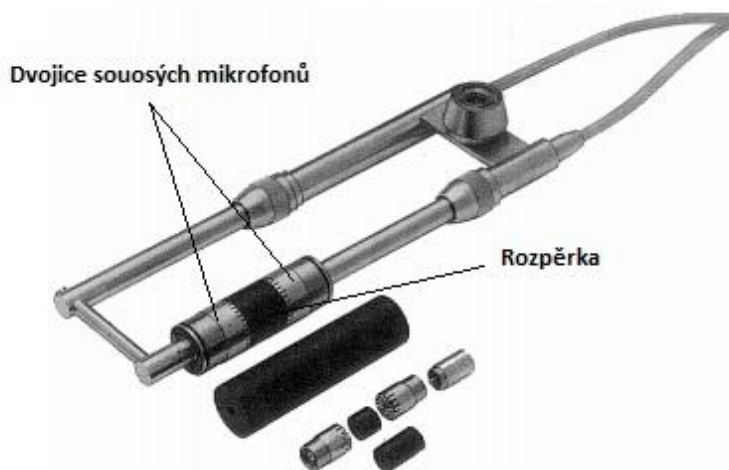
Mikrofon je akusticko-mechanicko-elektrický měnič, který snímané kmitání vnějšího plynného prostředí převádí na elektrický signál. Pro mapování zvukových polí se výhradně používá kondenzátorový mikrofon. Tento typ mikrofonu pracuje na principu kondenzátoru s proměnnou kapacitou, jehož jedna elektroda je pevná a druhá je tvořena velmi tenkou membránou, která se rozkmitá pomocí dopadající tlakové vlny zapříčiněné zhušťováním a zředováním vzduchu. Změny kapacity mikrofonní vložky, vyvolané průhyby membrány, jsou převáděny na změny elektrického napětí mezi oběma elektrodami zajištěním konstantního náboje na tomto kondenzátoru. Typická vnitřní konstrukce kondenzátorového mikrofonu firmy Brüel & Kjær je viditelná na obr. 1.3 [3].



Obr. 1.3 Typická konstrukce měřících mikrofonů Brüel & Kjær [5]

1.5.2 Intenzitní sonda

Intenzita zvuku určuje akustický tok energie a poskytuje informace o amplitudě kmitu a jeho směru ve zvukovém poli. Pro měření intenzity zvuku se používá intenzitní sonda, která se v podstatě skládá z dvojice souose uspořádaných identických kondenzátorových mikrofonů. Mezi mikrofony je umístěna rozpěrka, která zajišťuje jejich vhodnou vzdálenost dle frekvenčního rozsahu měření. Délka rozpěrky se pohybuje mezi 6 až 50 mm. Pro nižší rozsahy měření se používá delší rozpěrka. Intenzita zvuku se určuje z fázového rozdílu dvou hladin akustického tlaku měřících mikrofonů. Typická konstrukce intenzitní sondy je zobrazena na obr. 1.4.



Obr. 1.4 Sonda intenzity zvuku [1]

Okamžitá akustická rychlost se vypočte použitím termodynamické Eulerovy rovnice pro šíření vlny ve směru r :

$$v = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt = -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_1 - p_2}{\Delta r} dt \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (1.13)$$

Kde p_1 a p_2 jsou okamžité hodnoty akustických tlaků měřených dvěma sousými mikrofony vzdálených o Δr , ρ je hustota prostředí.

Okamžitá intenzita zvukového pole je poté určena jako součin průměrného akustického tlaku pole a průměrné akustické rychlosti pole.

$$I_r = \bar{p}(t) \cdot \bar{v}_r(t) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.14)$$

Průměrný akustický tlak:

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (1.15)$$

Intenzita zvukového pole může být v reálném čase vypočtena pomocí následujícího vztahu, který časově průměruje proces:

$$I = -\frac{p_1 + p_2}{2\rho\Delta r} \int (p_1 - p_2) dt \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.16)$$

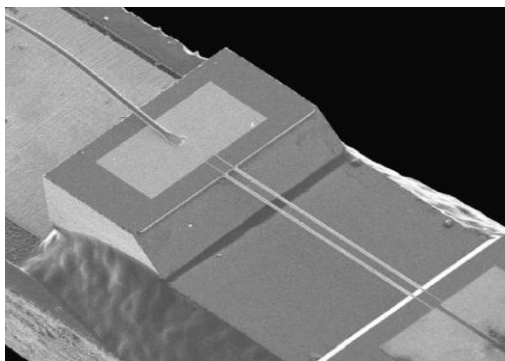
[6]

1.5.3 Microflown

Microflown je tzv. MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) zařízení, které přímo měří akustickou rychlost. Tento systém byl vynalezen v roce 1994 na univerzitě v Twente

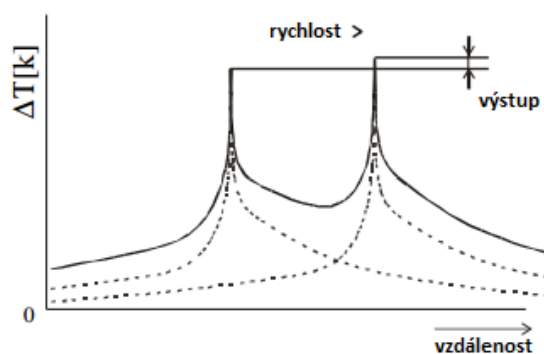
v Nizozemsku a v současnosti patří mezi nejmodernější technologie používané v oblasti mapování zvukových polí.

Snímač se skládá ze dvou paralelně umístěných nano drátků, oddělených od sebe o $\sim 100\mu\text{m}$. Tyto drátky jsou platinové rezistory, které fungují jako teplotní senzory. Drátky jsou ohřáty na teplotu přibližně od 200°C až do 400°C průchodem proudu v řádech několika mA. Složení čidla je dobře viditelné na obr. 1.5.



Obr. 1.5 Mikroskopický snímek snímače Microflown [7]

Princip snímače je založen na ochlazování drátků a měření jejich teplotních rozdílů. Nevyskytují-li se v monitorované oblasti zvukové vlny, teplo ze snímačů je předáváno okolí. Prochází-li však vektor akustické rychlosti kolmo na drátky, dochází k asymetrickému rozložení teploty. Drátek bližší směru šíření vlnění je ochlazován více než vzdálenější drátek. Tím vzniká teplotní rozdíl, který je viditelný na grafu 1.1. Tečkovaná čára naznačuje chování snímače bez přítomnosti kmitání, plná čára zobrazuje chování snímače při průchodu vlnění přes drátky.



Obr. 1.6 Graf změny teploty [7]

Protože odpor platinových drátků je úměrný jejich teplotě, rozdíl jejich teplot je úměrný změně jejich odporu [8].

2 Metody monitorování zvukových polí pomocí mikrofonního pole

Mezi metody používané pro lokalizaci zdrojů hluku patří především dva způsoby, což jsou beamforming a holografie v blízkém poli (Near Field Acoustical Holography, NAH). Tyto dvě základní metody lze i různě kombinovat, čímž vznikly používané metody SONAH, IBEM, STSF, NS-STSF a další. Vzhledem k rozsahu práce se budeme zabývat pouze metodou beamformingu, která je v praxi i nejméně využívána a je vhodná k použití u akustické kamery při měření ve vzdáleném poli.

2.1 Mikrofonní pole

Mikrofonní pole reprezentuje, jak již název vypovídá, sestavu mikrofonů stejného typu, jejichž počet se může teoreticky rovnat pouze dvěma, přičemž v praxi je běžný počet mikrofonů až v řádu několika desítek. Použité mikrofony jsou uspořádány dle určité geometrie do určitého pole, které může být jednodimenzionální, dvojdimenzionální a ve speciálních případech i třidimenzionální. Jednodimenzionální pole se v praxi nepoužívá z důvodu zpracování výsledků pouze v jedné ose. Na druhou stranu je toto pole vhodné k popsání teorie beamformingu v kapitole 2.2.1. V praxi jsou nejpoužívanější dvojdimenzionální mikrofonní pole. Třidimenzionální pole jsou používána pro vytvoření trojrozměrného obrazu monitorované oblasti, např. při monitorování zvukových polí v interiérech automobilů.

Geometrie uspořádání mikrofonů je závislá na mnoho aspektech, které jsou popsány v kapitole 2.3.1.

2.2 Akustická kamera

Akustická kamera se skládá z mikrofonního pole zpravidla doplněného o kameru, která je použita za účelem zobrazení autentického obrazu monitorované oblasti. Další důležitou součástí je převodník analogového signálu na digitální. Digitální signál je následně zpracován počítačem a výsledek je zobrazen na obrazovce.



Obr. 2.1 Akustická kamera [7]



Obr. 2.2 Příklad akustické mapy [5]

2.3 Beamforming

Beamforming je metoda pro monitorování zdrojů hluku v dalekém poli. Beamforming byl vyvíjen pro použití v ponorkách a pro monitorování hluku v běžném životě. Základní princip beamformingu je zachytit signál jednotlivými mikrofony, následně tyto signály patřičně opozdit dle zaostření pole a nakonec tyto signály sečíst.

Výhody beamformingu:

- Velikost monitorovaného objektu nezávisí na velikosti mikrofonního pole. Například s polem o průměru 0,5 m lze monitorovat celý osobní automobil. Protože všechny data jsou měřeny současně, výsledky měření si lze prohlédnout téměř v okamžiku, kdy jsou data pořízena.

- Z důvodu rychlosti snímání a vyhodnocování dat tato metoda redukuje čas potřebný pro vlastní měření.
- Prostorové rozlišení pole je přímo úměrné vlnové délce.

Nevýhody beamformingu:

- Hlavní nevýhodou beamformingu je fakt, že nemůže být použit pro snímání nízkých frekvencí. Tento problém lze eliminovat použitím speciální metody beamformingu tzv. near-field localization. Tato metoda používá oproti klasickému beamformingu měření v blízkém poli, ve kterém jsou vlny dopadající na mikrofony sférické.
- Beamforming nemůže být použit pro snímání akustického výkonu.

2.3.1 Princip beamformingu

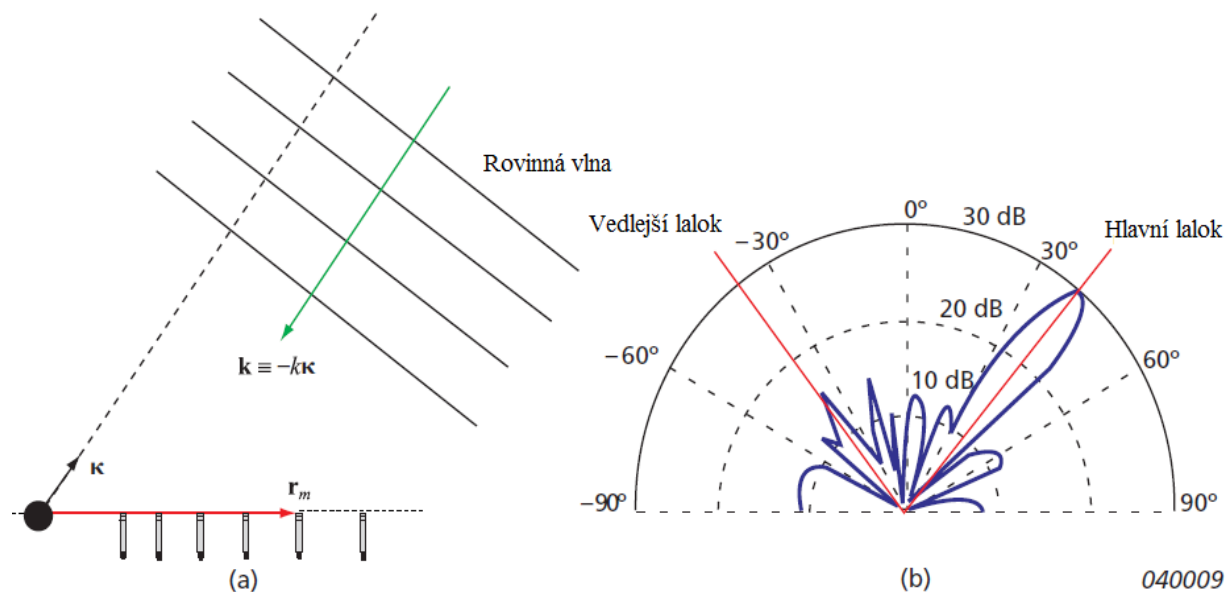
Princip beamformingu je dobře pochopitelný na popisu funkce základního Delay-And-Sum beamformera (v textu dále značeno DAS beamformer). Jak anglický název zařízení naznačuje, tak se něco zpozdí a poté sečte. To něco jsou tlakové signály. Jak je vidět na obr. 2.3(a), předpokládáme rovinné pole M mikrofonů ve vzdálenostech r_m ($m=1,2,\dots,M$) od počátku souřadného systému xy na ose x . Použijeme-li takovéto pole pro DAS beamforming, měřené tlakové signály p_m jsou individuálně zpožděny a poté sečteny dle následující rovnice:

$$b(\kappa, t) = \sum_{m=1}^M w_m \cdot p_m \cdot (t - \Delta_m(\kappa)) \quad (2.1)$$

Kde w_m je nastavení váhování nebo koeficient stínění jednotlivých měřících mikrofonů, Δ_m jsou individuální časové posuny, které jsou vybrány za účelem dosažení směrové citlivosti v určitém směru, dané vektorem κ . Toho je docíleno způsobem, že signály spojené s rovinnou vlnou dopadající ze směru κ jsou ještě před sečtením seřazeny. Geometrické úvahy z obrázku ukazují, že toto seřazení lze provést následujícím vztahem:

$$\Delta_m = \frac{\kappa \cdot r_m}{c} \quad (2.2)$$

Kde c je rychlost zvuku v daném prostředí. Signály přicházející z jiných vzdálených polí nebudou připojeny před sumarizací, a proto nebudou souvisle přidány. Tímto způsobem je zajištěna směrová citlivost zobrazená na obr. 2.3(b).



Obr. 2.3 (a) Mikrofonní pole, rovinná vlna dopadající ze zaostřeného směru κ . (b) Typický směrový diagram citlivosti s hlavním lalokem v zaostřeném směru a nižšími vedlejšími laloky z jiných směrů [5]

Frekvenční verze pro výstup z DAS beamformeru je:

$$B(\kappa, \omega) = \sum_{m=1}^M w_m P_m(\omega) e^{-j\omega \Delta_m(\kappa)} = \sum_{m=1}^M w_m P_m(\omega) e^{jk \cdot r_m} \quad (2.3)$$

Kde ω je úhlová frekvence, $\mathbf{k} = -k\boldsymbol{\kappa}$ je vlnové číslo vektoru rovinné vlny přicházející ze směru κ . Právě na směr κ je beamformer zaměřen. Mocnitel k je vlnové číslo a je dané vztahem:

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (2.4)$$

V rovnici (2.3) se předpokládá implicitní časový faktor $e^{j\omega t}$. Protože platí, že $\mathbf{k} = -k\boldsymbol{\kappa}$, může se psát $B(\mathbf{k}, \omega)$ místo $B(\boldsymbol{\kappa}, \omega)$.

Prostřednictvím výběru časového zpoždění $\Delta_m(\kappa)$, nebo ekvivalentně preferovaného vlnového čísla vektoru $\mathbf{k} = -k\boldsymbol{\kappa}$ je beamformer zaostřen na vzdálené pole směrem κ . Ideálně by bylo žádoucí zachycovat jen signál přicházející ze směru zaručující optimální lokalizaci zdrojů hluku, což je však zatím nemožné. Chceme-li zjistit podíl signálu přicházejícího z jiného směru než κ , budeme předpokládat rovinnou vlnu s vlnovým číslem vektoru k_0 odlišného od požadovaného vlnového čísla vektoru $\mathbf{k} = -k\boldsymbol{\kappa}$, což je viditelné na obr. 2.4. Tlak změřený pomocí mikrofonů bude poté odpovídat:

$$P_m(\omega) = P_0 e^{-jk_0 \cdot r_m} \quad (2.5)$$

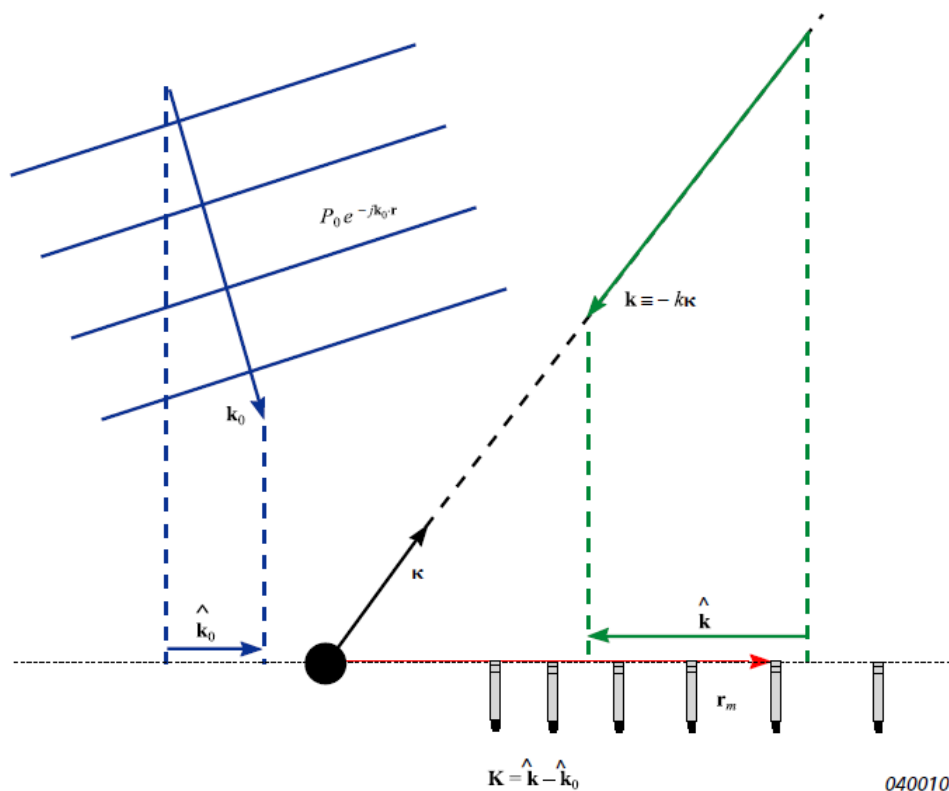
Dosazením vztahu (2.5) do rovnice (2.3) dostaneme:

$$B(\kappa, \omega) = P_0 \sum_{m=1}^M w_m e^{j(k-k_0) \cdot r_m} = P_0 W(k - k_0) \quad (2.6)$$

Kde funkce W je přijímací charakteristika pole (Array Pattern):

$$W(K) = \sum_{m=1}^M w_m e^{jK \cdot r_m} \quad (2.7)$$

Funkce W má tvar všeobecné prostorové diskrétní Fourierovy transformace váhové funkce w , která se rovná nule mimo oblast pole. V případě jednotného stínování, $w_m \equiv 1$, rovnice přijímací charakteristiky závisí pouze na geometrii pole.



Obr. 2.4 Rovinná vlna dopadající z odlišného směru než je směr zaostření κ [5]

Protože umístění mikrofonu r_m má souřadnici z rovno nule, přijímací charakteristika není závislá na K_z . Může se tedy uvažovat přijímací charakteristika jen v souřadnicích x a y (K_x, K_y), což znamená, že uvažujeme projekci vlnového čísla vektoru na dané rovině dle obr. 2.4. Na tomto obrázku je zřejmé, že W dosahuje největší hodnoty v oblasti zdroje, s maximální hodnotou rovnou M v místě $(K_x, K_y) = (0, 0)$. Vzhledem k rovnici (2.6) tato špička zobrazuje vysokou citlivost na rovinné vlny přicházející ze směru κ , na které je měřicí pole zaměřeno. Obr. 2.3(b) zobrazuje tuto citlivost jako špičku, která se nazývá hlavní lalok. Špičky z ostatních směrů se nazývají vedlejší laloky. Tento obrázek dává informace pouze

o jedné frekvenci a jednom směru zaostření pole. Rovnice (2.7) obsahuje informace o struktuře vedlejších laloků pro všechny zaostřitelné směry a všechny frekvence.

Vedlejší lalok má za následek, že jednotlivé dopadající rovinné vlny budou změřeny s podstatnou velikostí při zaostření na určitý směr neodpovídající směru, z kterého rovinná vlna ve skutečnosti dopadá. Vedlejší lalok proto vytvoří ve výsledné směrové mapě zdrojů zvuku obraz fiktivního zdroje (tzv. Ghost Image). Úroveň vedlejších laloků ve srovnání s hlavním lalokem určuje schopnost beamformeru potlačit tyto obrazy fiktivních zdrojů.

2.3.2 Normalizace

V případě ideálního zaostření ($k=k_0$), DAS beamformer zesiluje vstupní signál počtem mikrofonů: $B(-k_0/k, \omega) = MP_0$. Z tohoto důvodu je DAS beamformer často normalizován počtem mikrofonů dle následující rovnice:

$$B(\kappa, \omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M P_m(\omega) e^{jk \cdot r_m} \quad (2.8)$$

2.3.3 Rozlišení

Rozlišení beamformeru určuje jeho schopnost separovat dva blízko u sebe umístěné zdroje hluku. Jedná se tedy o schopnost rozlišit dopadající vlny ze směrů blízko u sebe. Při zaostření beamformeru na zdroj zvuku ve vzdáleném poli, je rozlišení dáno nejmenší úhlovou separací dvou rovinných vln, které umožňuje jejich oddělení. Pro zdroje v konečné vzdálenosti je praktická definice rozlišení minimální vzdálenost mezi dvěma zdroji zvuku taková, aby mohly být beamformerem odděleny.

Uvažujme dvě rovinné vlny s vlnovým číslem vektoru k_1 a k_2 , $|\mathbf{k}_1| = |\mathbf{k}_2| = k$ dopadající na beamformer s přijímací charakteristikou W . Za předpokladu, že jsou shodné amplitudy pro obě rovinné vlny, výstup z beamformeru je superpozicí jejich tvaru dle následující rovnice:

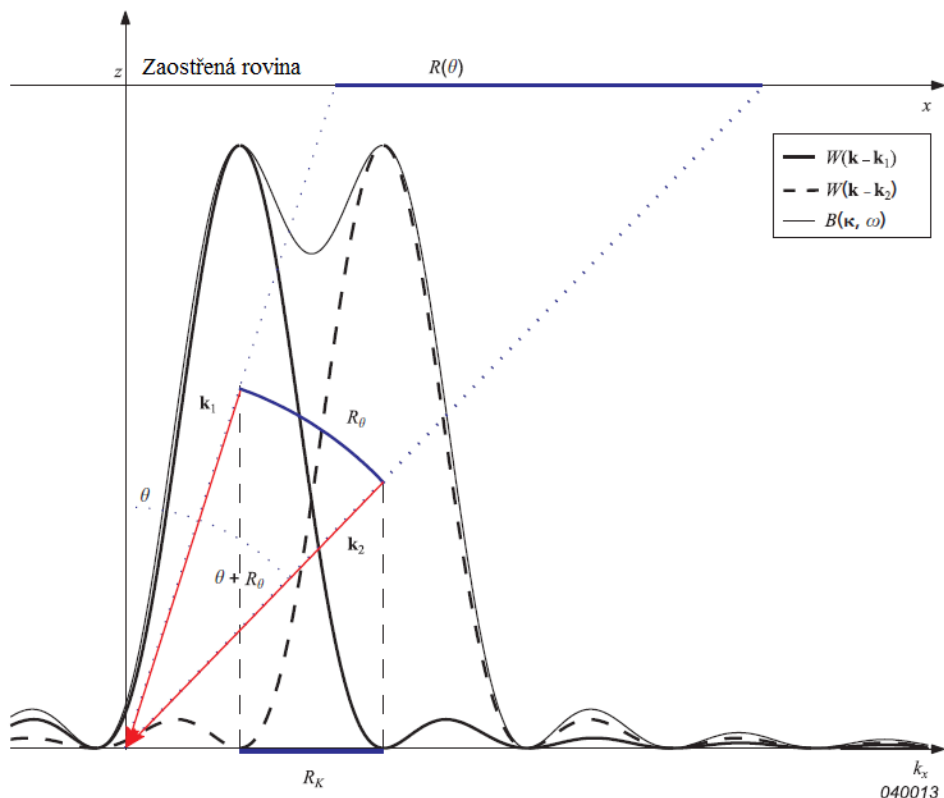
$$B(\kappa, \omega) = W(k - k_1) + W(k - k_2) \quad (2.9)$$

Rayleighovo kritérium říká, že dva směry mohou být odlišeny, jestliže maximum $W(\mathbf{k}-\mathbf{k}_2)$ leží na stejné x-souřadnici jako první minimum $W(\mathbf{k}-\mathbf{k}_1)$ dle obrázku 2.5. Za předpokladu, že požadovaná úhlová separace mezi k_1 a k_2 je malá, lze dokázat, že při konečné vzdálenosti z je minimální řešitelné rozlišení zdrojů v radiálním směru $R(\theta)$ dáno rovnicí:

$$R(\theta) = \frac{zR_K}{k} \cdot \frac{1}{\cos^3 \theta} \quad (2.10)$$

Kde R_K je šířka hlavního laloku ve vzoru pole a θ je úhel měřený od osy kolmé na mikrofonní pole dle obrázku 2.6. Hodnota R_K , v závislosti na Rayleighovu kritériu, dává první minimum, K_{min}^0 , vzoru pole: $R_K = K_{min}^0$. Přesná hodnota závisí na pozici všech

měřících mikrofونů dle rovnice (2.7). Všeobecně lze rozlišení pole i dobře odhadnout, kdy je proveden výpočet s ohledem na limitní případy, kde je nekonečná hodnota převodníku rovnoměrně rozložené části úsečky délky D nebo kruhového oblouku o rádiu $D/2$. Pro lepší pochopení si lze představit případ zvukového pole ve všech bodech prostoru na místo několika diskretních pozic. V tomto případě lze použít integrální výraz pro vzor pole tzv. aperture smoothing function:



Obr. 2.5 Princip superpozice pomocí Rayleighova kritéria [5]

$$W(K) = \frac{1}{(2\pi)^d} \int_{|r| \leq D/2} w(r) e^{iK \cdot r} d^d r \quad (2.11)$$

Kde $d=1$ pro úsečku, $d=2$ pro kruhový oblouk a $w(r)$ je nyní tzv. spojitá funkce stínování. V případě jednotného stínování, rovnice (2.11) může být vyhodnocena pomocí funkce J_1 , což je Besselova funkce prvního řádu:

$$W(K_x) = \frac{\sin\left(\frac{K_x D}{2}\right)}{\frac{K_x}{2}}, \quad d=1 \quad (2.12)$$

$$W(K) = \frac{\pi \cdot D}{K} \cdot J_1 \cdot \left(\frac{K \cdot D}{2}\right), \quad K = \sqrt{K_x^2 + K_y^2}, \quad d=2 \quad (2.13)$$

Z rovnic (2.12) a (2.13) zjistíme, že první minimum v přijímací charakteristice odpovídá úsečce a kruhová clona se nachází na:

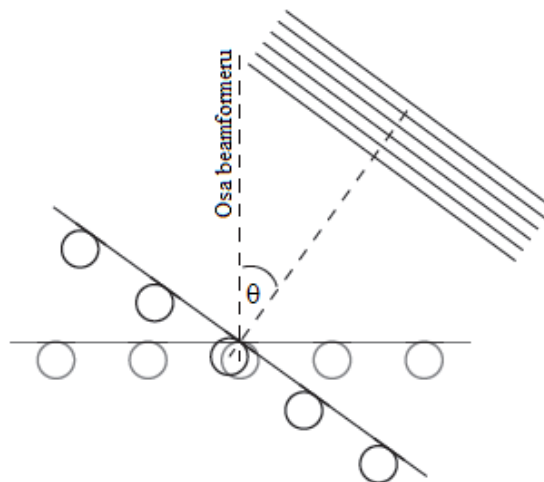
$$K_{\min}^0 = a \frac{2\pi}{D} \quad (2.14)$$

Kde $a=1$ je pro lineární clonu a $a \approx 1,22$ je pro kruhovou clonu. Vzhledem k faktu, že vlnové číslo k má vztah s vlnovou délkou λ , $k=2\pi/\lambda$, získáme vložení do rovnice (2.10) požadovaný výraz pro rozlišení beamformery:

$$R(\theta) = \frac{a}{\cos^3 \theta} \cdot \frac{z}{D} \cdot \lambda \quad (2.15)$$

Pro případ, že $\theta = 0$ platí:

$$R(\theta) = a \cdot \left(\frac{z}{D} \right) \cdot \lambda \quad (2.16)$$



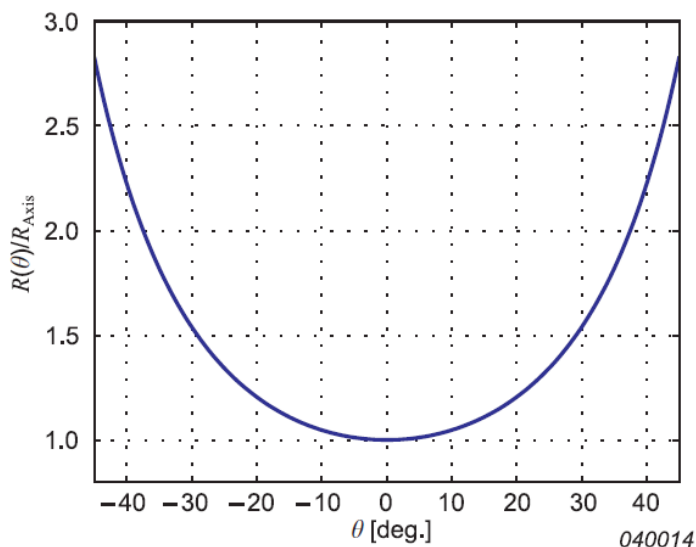
Obr. 2.6 Natočení beamformery vůči dopadající vlně [5]

Dle rovnice (2.15) je zřejmé, že rozlišení je úměrné vlnové délce, a proto je lepší s větší velikostí štrěbiny. Zároveň se rozlišení zhoršuje se zvyšující se vzdáleností pole mikrofonů od měřeného objektu. Tento vztah není závislý na akustice. Analogii lze hledat u fotoaparátů, kdy schopnost fotoaparátu rozlišit detaily závisí na průměru čočky a na vzdálenosti od fotografovaného objektu.

Porovnání rozlišení beamformery ve směru shodném s osou ($\theta = 0$) a ve směru obecného mimosového lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$\frac{R(\theta)}{R_{Osa}} = \frac{1}{\cos^3 \theta} \quad (2.17)$$

Tento poměr je zobrazen na grafu 2.1, kde lze pozorovat, že pro úhly dopadu více než 30° mimo osu beamformeru je rozlišení o více než 50% lepší než rozlišení ve směru osy. Z tohoto důvodu je v praxi užitečný úhel otevření beamformeru omezen na 30°.



Obr. 2.7 Graf porovnání rozlišení beamformeru ve směru osy a obecného směru [5]

2.3.4 Maximální úroveň vedlejších laloků (Maximum Sidelobe Level)

Přítomnost vedlejších laloků v přijímací charakteristice měřicího pole je způsobena dopadajícími vlnami z jiných směrů, než je směr zaostření beamformeru. Tyto dopadající vlny prosakují do požadovaného měření hlavního laloku ve směru κ . Následně vytvářejí ve výsledné směrové mapě zdrojů hluku falešné špičky, které zobrazují fiktivní zdroje. Vhodně navržené měřicí pole je tedy charakterizováno nízkou hodnotou maximální úrovně vedlejších laloků (v textu dále označováno MSL).

Definujme radiální profil přijímací charakteristiky $W_p(K)$ jako:

$$W_p(K) \equiv 10 \cdot \log_{10} \left[\max_{|K|=K} |W(K)|^2 / M^2 \right] \quad (2.18)$$

Na základě znalosti tohoto profilu lze definovat funkci MSL jako:

$$MSL(K) \equiv \max_{K_{\min}^0 < K' \leq K} W_p(K') = 10 \cdot \log_{10} \left[\max_{K_{\min}^0 < K' \leq K} |W(K')|^2 / M^2 \right] \quad (2.19)$$

Kde K_{\min}^0 je dáno rovnicí (2.14).

Z praktického hlediska je znalost radiálního profilu a funkce MSL důležitá pro zjištění, která část přijímací charakteristiky beamformeru je v daném okamžiku aktivní při použití měřicího pole pro specifickou frekvenci. S ohledem na rovnici (2.6) je argument přijímací charakteristiky rozdílový vektor $k(\kappa) - k_0$, kde k je vlnové číslo vektoru zaostřené vlny a k_0

je vlnové číslo vektoru dopadající rovinné vlny. Obě zmíněná vlnová čísla vektorů mají délku stejnou, jako vlnové číslo k . Rozdílový vektor má maximální délku právě tehdy, mají-li dvě rovinné vlny opačný směr. Jedná se např. o případ, že vlny směřují z pozitivního a zároveň z negativního směru osy x do středu. Tento případ je zobrazen na obr. 2.2 a platí, že $|k - k_0| \leq 2k$. Proto bude při dané frekvenci ω zobrazena pouze část přijímací charakteristiky dle vztahu $|K| \leq 2k = 2\omega/c$. Pokud omezíme zaostřitelný směr κ v rozmezí úhlu θ od osy pole, poté se zmenší maximální délka rozdílového vektoru a bude zobrazena pouze část $|K| \leq K_{max}^\theta$ přijímací charakteristiky pole dané vztahem:

$$K_{max}^\theta(\omega) \equiv [1 + \sin(\theta)] \frac{\omega}{c} \quad (2.20)$$

Jestliže má přijímací charakteristika nízkou hodnotu MSL pro $|K| \leq K_{max}$, poté je výsledná směrová mapa zdrojů hluku velmi kvalitní s nízkým stupněm falešných obrazů až do frekvence ω_{max} .

Z rovnice (2.20) lze vyjádřit maximální frekvenci jako:

$$K_{max}^\theta(\omega_{max}) = K_{max} \Rightarrow \omega_{max}(\theta) = \frac{K_{max} c}{1 + \sin(\theta)} \quad (2.21)$$

Pro případ, že beamformer bude zaostřen ve směru κ , který bude odpovídat úhlu měřenému od osy pole menšímu než 30° , poté horní limitní frekvence bude odpovídat:

$$\omega_{max}(30^\circ) = \frac{2}{3} K_{max} c \quad (2.22)$$

Z předchozího vztahu si lze odvodit obecný vztah:

$$\omega_{max}(30^\circ) = \frac{4}{3} \omega_{max}(90^\circ) \quad (2.23)$$

Rovnice (2.20) reprezentuje lineární závislost mezi frekvencí ω a nejvyšším vlnovým číslem přijímací charakteristiky pole $K = K_{max}^\theta(\omega)$, které je aktivní v dané frekvenci. Argument K funkce MSL, dle rovnice (2.21), je právě horní limitní vlnové číslo v přijímací charakteristice pole, a proto je přímo použito $K = K_{max}^\theta(\omega)$ jako argument v rovnici určující velikost MSL. Tímto můžeme vyjádřit MSL jako funkci frekvence ω , $MSL[K_{max}^\theta(\omega)]$. Pro výpočet MSL při dané frekvenci je potřeba stanovit maximální zaostřitelný úhel θ , který se ze zkušeností volí maximálně $\pm 30^\circ$ od osy beamformery.

2.4 Konstrukce mikrofonního pole pro beamforming

Při konstrukci beamformeru a poté následujícím praktickém měření, musí být vzato v úvahu množství praktických aspektů.

Mezi tyto aspekty patří:

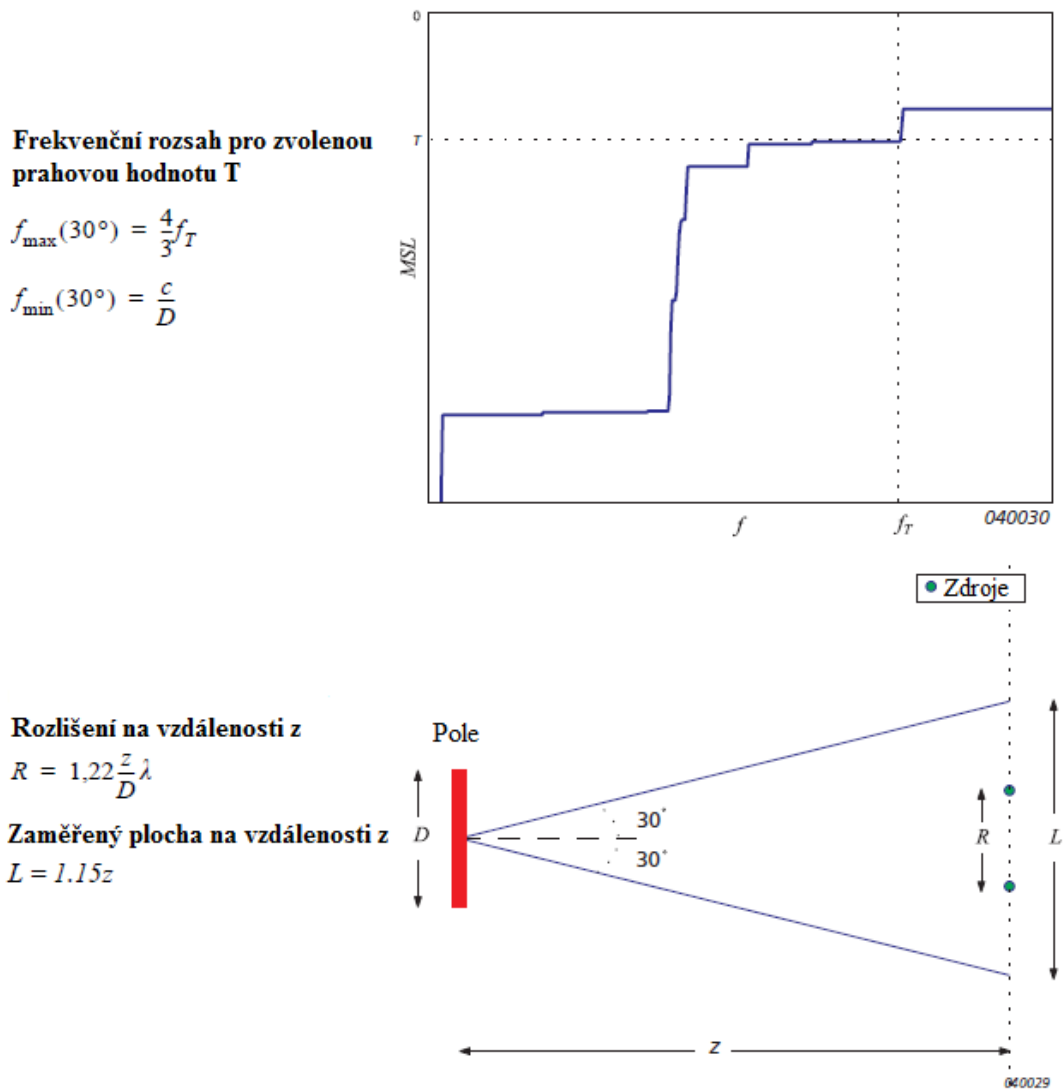
- nejnižší a nejvyšší požadovaná měřitelná frekvence
- velikost MSL
- rozměr měřicího pole
- vzdálenost mikrofonního pole od měřeného objektu
- prostorové rozlišení a velikost monitorované oblasti

Jak bude vysvětleno níže, tyto jednotlivé aspekty jsou vzájemně propojeny. Některé ze souvislostí jsou zobrazeny v obr. 2.7.

Velikost MSL definuje schopnost pole separovat zdroje z jiných směrů, než je směr zaostření pole. Jestliže je například hodnota MSL rovna -12 dB pro frekvence až 5 kHz a zaměření beamformeru je v úhlu 30° mimo osu, tak jsou parazitní obrazy vznikající od fiktivního zdroje z jednoho směru potlačeny o 12 dB v porovnání s intenzitou reálného zdroje. Ostatní zdroje, které nejsou o 12 dB slabší než první zdroj, proto nebudou zakryty parazitujícími obrazy prvního zdroje. Velikost MSL je důležitý parametr, který závisí na designu pole. Zároveň při interpretaci výsledků získaných daným polem, musí být brána v potaz velikost jeho MSL.

Dalším důležitým faktorem, na který musí být brán ohled při konstrukci pole, je akustická vlastnost prostředí. Do této kategorie patří především odrazy a rušivé zdroje hluku. Plně reflexní plocha může být použita pro konstrukci pole, založené na bázi reflexní plochy. Například se jedná o použití půlkruhového pole, viz. obr. 2.8 (f), a následného aplikování algoritmu pro reflexní plochu ke zpracování signálu. Ostatní odrazy budou měřicím zařízením podstatně potlačeny, jestliže se úroveň jejich odrazů nachází v dynamickém rozsahu daného pole. Tyto odrazy jsou tedy potlačeny pouze v případě, že se utlumí vzhledem k přímému odrazu o méně než je úroveň MSL daného pole. Zároveň je třeba se vyhnout silným rušivým zdrojům umístěným za rovinným polem nebo jejich odrazům, protože monitorovací pole není schopno rozeznat zdroj umístěný za měřicím polem z jeho odrazu v oblasti monitorování. Zdroje umístěné za polem jsou ve výsledné mapě zdrojů hluku reprezentovány jako zdroje umístěné před polem.

U mnoho typů použité geometrie pole není možné striktně určit horní hranici využitelného frekvenčního pásma, protože hodnota MSL pro daný úhel rozevření beamformeru pomalu narůstá se zvyšující se frekvencí. U pravidelného pole přítomnost prostupujícího laloku způsobuje vznik docela přesné horní frekvenční hranice. Tento jev lze lépe popsat pomocí obr. 2.9 pro mřížové pole s roztečí mikrofónů d . Daná křivka vykazuje prudký nárůst u prostorové úhlové frekvence odpovídající $K_S = 2K_N = 2\pi/d$, která pro maximální zaostřitelný úhel 90° odpovídá maximální frekvenci rovné $f_{\max}(90^\circ) = K_{\max}c/4\pi$.

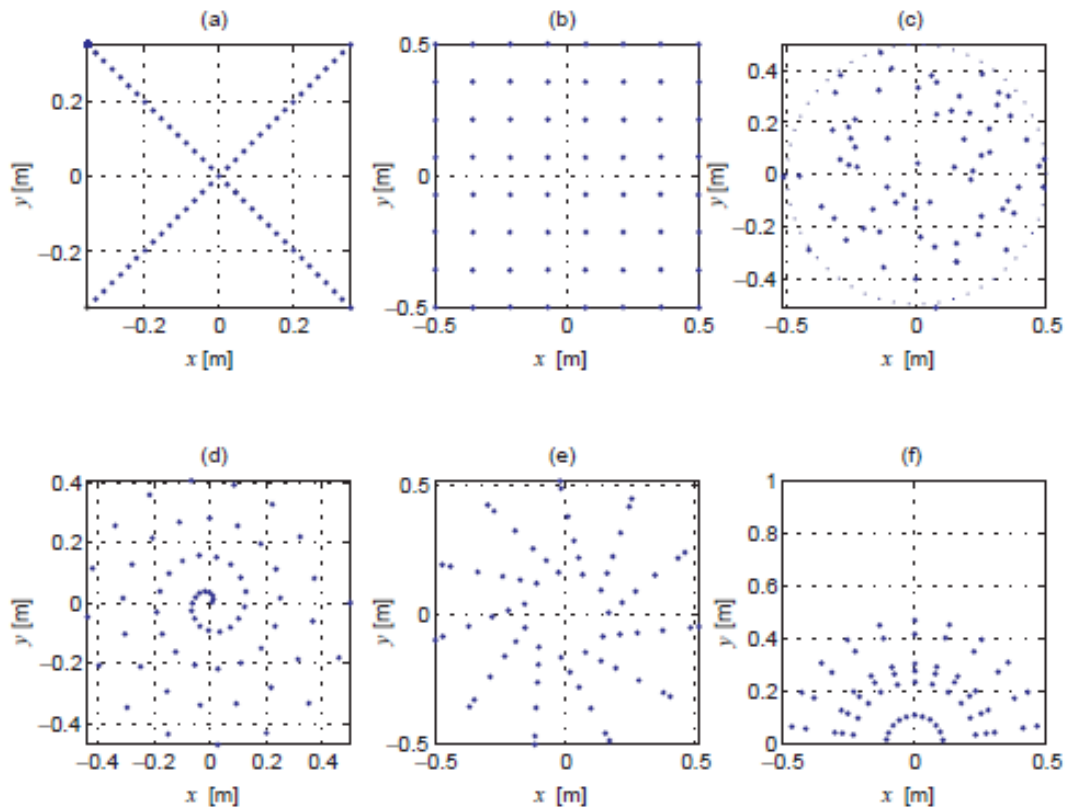


Obr. 2.8 Závislost jednotlivých vlastností pole

2.4.1 Design pole

Geometrie pole podstatně ovlivňuje vlastnosti mikrofonního pole. Geometrie pole definuje reakci na přijímací charakteristiku. Z přijímací charakteristiky lze získat hodnotu maximální úrovně vedlejších laloků MSL, která definuje schopnost potlačit fiktivní zdroje jako funkce frekvence. Toto umožňuje prozkoumat vlastnosti jednotlivých druhů geometrie mikrofonních polí. Opačným a větším problémem je, jak navrhnout pole s ohledem na požadovaný frekvenční rozsah a rozlišení.

Základním rozdělením designu mikrofonního pole je dělení na pravidelné a nepravidelné. Jednotlivé základní typy geometrie jsou viditelné na obr. 2.8.



Obr. 2.9 Příklady pravidelného a nepravidelného pole. **(a)** křížové pole, **(b)** mřížové pole, **(c)** optimalizované náhodné pole, **(d)** pole ve tvaru Archimédovi spirály, **(e)** optimalizované kruhové pole, **(f)** optimalizované půlkruhové pole [5]

Pravidelné pole

Nejzákladnějším příkladem pravidelného pole je tzv. uniformní lineární pole (dále označováno ULA). Toto pole je jednodimenzionální, lineární a s pravidelně umístěnými mikrofony. Ačkoliv všechna v praxi používaná pole jsou především rovinná, tak již zmíněné ULA pole je vhodné k popisu mnoha důležitých rysů pravidelného mikrofonního pole. ULA pole je již použito v kapitole 2.2 k popisu principu beamformingu. Souřadnice mikrofónů, x_m , ULA pole s rozestupy mikrofónů d a s počtem mikrofónů $M=2M_{1/2}+1$ může být zapsáno následujícím vztahem:

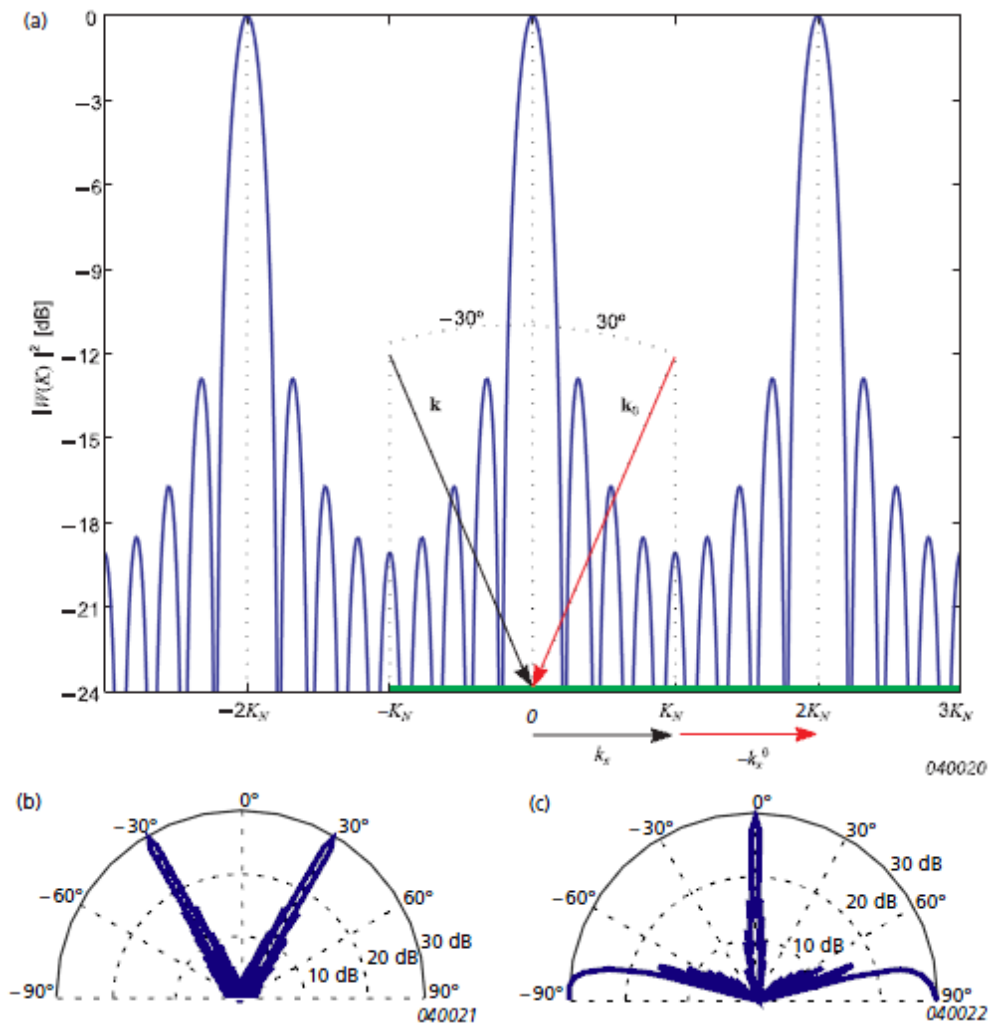
$$x_m = (m - M_{1/2})d, \quad m = 0, \dots, M - 1 \quad (2.24)$$

V případě jednotného stínování může být odpovídající přijímací charakteristika pole vyjádřena jako:

$$W(K) = \frac{\sin(MKd/2)}{\sin(Kd/2)} \quad (2.25)$$

Z této rovnice je zřejmé, že je periodickou funkcí K a perioda se rovná $2\pi/d$. Kromě hlavního laloku s vlnovým číslem $K=0$, vzor pole ULA vykazuje opakování hlavního laloku na pozicích $K=p(2\pi/d)$, $p=\pm 1, \pm 2, \dots$

Tento opakující se lalok, zobrazen na obr. 2.8 (a), se nazývá prostupující lalok.



Obr. 2.10 (a) Graf struktury vedlejších laloků v pravidelném poli s mřížovou konstrukcí, (b) Prostupující lalok při mimosovém dopadu, (c) Prostupující laloky v případě dopadu vlny v ose beamformery [5]

Pro dopad vlny ve směru osy beamformery při stejné frekvenci jako předešlý případ je výsledná směrová mapa zdrojů hluku ještě více matoucí, protože vedle hlavního laloku vznikají ještě dva prostupující laloky na pozicích $K_x=\pm 2K_N$. Tento případ je viditelný na obrázku 2.9 (c).

Mřížové pole

Přímočará realizace 2D pole s mřížovou konstrukcí je zobrazeno na obr. 2.8 (b). Rozložení mikrofonů je 8x8 s roztečí $d=1/7$ m, a tudíž nejvyšší snímatelná frekvence se rovná $f_{\max} \approx 1,2$ kHz. Maximální úroveň vedlejších laloků pro mřížové pole je zobrazena na obr. 2.11 jako funkce frekvence. Ostré odříznutí maximální frekvence je charakteristické pro pravidelné pole. Pokud je takovéto pole použito pro beamforming měřící vyšší frekvence než f_{\max} , mohou se na výsledné mapě vyskytnout prostupující laloky jako fiktivní zdroje.

Křížové pole

Výhodou této konstrukce pole oproti mřížové je možnost použití pro vyšší frekvence. Platí, že pokud chceme snímat vyšší frekvence pomocí mřížového pole, musíme snížit rozteč mikrofonů d . Pokud však chceme zachovat rozměr pole, musíme přidat další mikrofony, což je nákladné a výsledné pole může ztratit svoji akustickou transparentnost. S daným počtem mikrofonů a požadovaným rozměrem pole lze sestrojít pro snímání vyšších frekvencí pravidelné křížové pole, které je zobrazené na obr. 2.9 (a). Jedná se o kombinaci dvou polí typu ULA. Jestliže D je velikost pole a M je počet mikrofonů, rozteč mikrofonů odpovídá $D/(\sqrt{M}-1)$ pro mřížové pole a $2D(M-1)$ pro křížové pole. Tudíž maximální frekvence za stejných podmínek pro křížové pole je vyšší o násobek $(\sqrt{M}+1)/2$ než pro mřížové pole.

Přijímací charakteristika křížového pole obsahuje vysoké postraní laloky okolo směřů podél obou lineárních polí. V jiných směrech toto pole vedlejší laloky dobře potlačuje. Při použití mřížového pole pro beamforming mohou vyvýšeniny vystupující ze souřadnic každého zdroje konstruktivně narušit výslednou mapu vytvořením obrazů fiktivních zdrojů.

Algoritmus beamformingu křížového pole

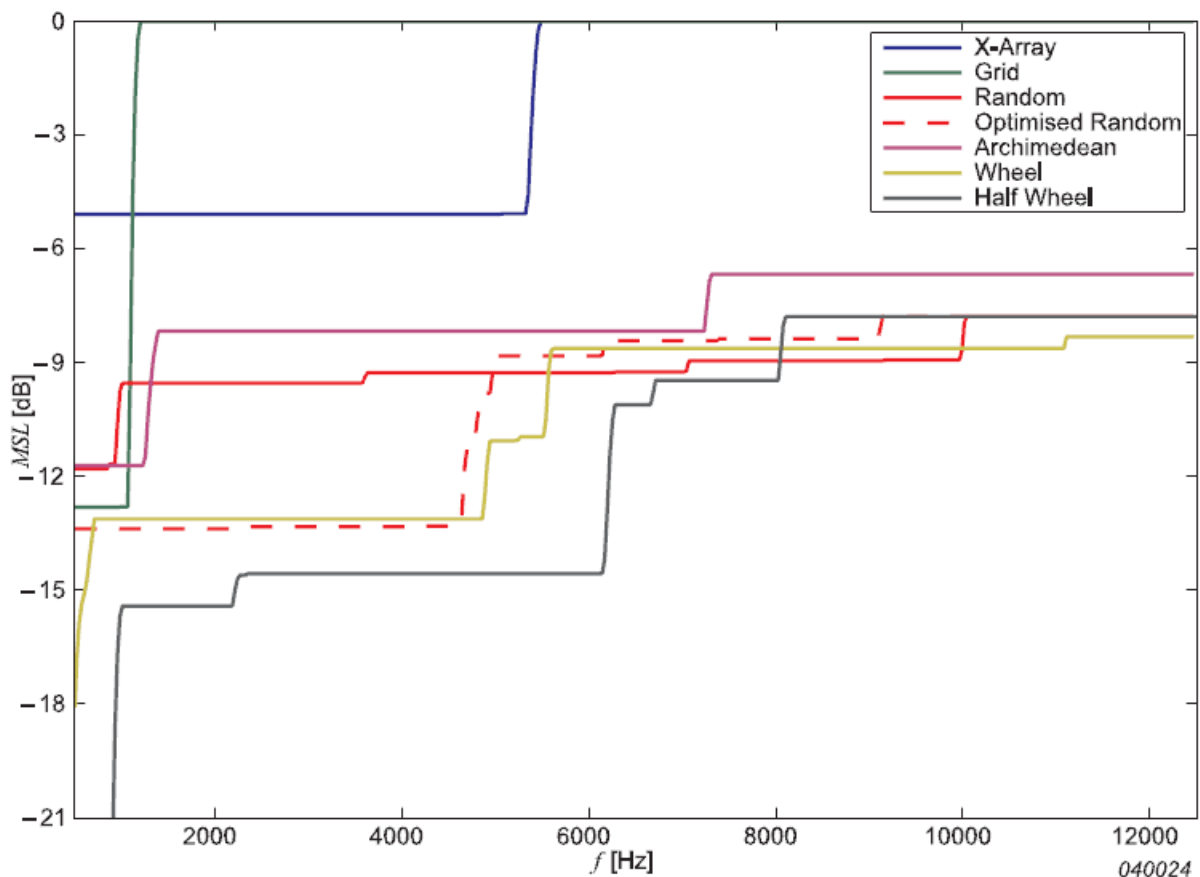
Problém fiktivních zdrojů, který je způsobený strukturou přijímací charakteristiky, může být do značné míry odstraněn zpracováním každého lineárního pole zvlášť a poté sloučením jednotlivých výsledků. Formálně je výsledná mapa zdrojů hluku získána geometrickým průměrem $B_{X-array}$ z výstupů jednotlivých větví $B_1(r, \omega)$, $B_2(r, \omega)$ ze dvou 1D polí, které jsou Hanningovsky váhovány :

$$B_{X-array}(r, \omega) = \sqrt{B_1(r, \omega)B_2(r, \omega)} \quad (2.26)$$

Při monitorování jednoho zdroje hluku jsou ve výsledné mapě dobře potlačeny vedlejší laloky. Při monitorování více zdrojů se nelze vzniku fiktivních zdrojů vyvarovat. Rozlišení je oproti standardnímu Delay-and-Sum nebo křížovému beamformingu sníženo z důvodu užití Hanningova váhování.

Nepravidelné pole

Hlavním nedostatkem pravidelného pole je již dříve popsáný problém s prostorovým aliasingem. Tento závažný problém spočívá ve vykreslování nežádoucích fiktivních zdrojů vedle skutečného zdroje do výsledné mapy. Tomuto problému se dá vyhnout použitím nepravidelného nebo náhodného snímacího pole. Pro tyto pole platí, že struktura vedlejších laloků se neprojevuje ostrým odříznutím při maximální frekvenci, jako je tomu u pravidelných polí. Místo ostrého nárůstu MSL jsou nepravidelná pole obecně charakteristická jeho postupným nárůstem viz. graf 2.2.



Obr. 2.11 Graf závislosti MSL na frekvenci u jednotlivých typů geometrie pole [5]

Obecně platí, že nepravidelná pole svými vlastnostmi překonávají již dříve popsané, pravidelné pole. Na druhou stranu je obtížné vyřešit problém, jak toto pole zkonstruovat k dosažení co nejlepšího výkonu. Z tohoto důvodu se při konstrukci nepravidelného pole pro určitý frekvenční rozsah postupuje z pravidla metodou pokus-omyl. Jednodušší situace nastává při vyšetřování výkonu parametrického nepravidelného pole, jako je například geometrie založená na soustředné logaritmické spirále nebo na Archimedově spirále. Pro tyto konstrukce platí, že rozsah jediného nebo několika parametrů může být testován systematicky.

V mnoha případech je velikost MSL funkcí příslušných konstrukčních parametrů, což se projevuje velmi nevyrovnaným chováním. Proto platí, že i tato metoda má své nedostatky.

Další nevýhodou nepravidelných polí je jejich komplikovaná konstrukce. Jak jejich konstrukce, tak i propojení jednotlivých snímačů se sběrnými, může být velice obtížné nebo časově zdlouhavé. Rovněž je zde problém s rozlišením pole při větší vzdálenosti pole od měřeného objektu. Pokud chceme zachovat vysoké rozlišení, musíme použít pole větších rozměrů, což má za následek použití více snímačů a tím i nárůst pořizovací ceny akustické kamery. Takto zkonstruovaná pole mohou dosahovat průměru i několika metrů.

Optimalizování pole

Alternativní přístup ke konstrukci nepravidelného pole žádaného výkonu a parametrů je numerická optimalizace geometrie pole. Pole může být optimalizováno pro daný frekvenční rozsah přizpůsobením souřadnic jednotlivých snímačů, čímž se sníží velikost MSL v konkrétním frekvenčním pásmu.

$$\text{snížení } MSL(K) \quad \text{pro } K < K_{\max} \quad (2.27)$$

Při procesu optimalizace souřadnic snímačů jsou určitá geometrická omezení. Přirozeně se nesmí jednotlivé snímače překrývat a dále, že jednotlivé souřadnice jsou omezeny oblastí pole danou rozměrem D. Rozměr D je například u kruhového pole jeho průměr a u mříže její délka hrany.

Jednoduchý příklad optimalizovaného planárního pole je náhodné pole. Obr. 2.9 (c) zobrazuje optimalizované náhodné pole použitím rovnice (2.27) s K_{\max} odpovídající $f_{\max}=5\text{kHz}$. Geometrie výsledného pole vypadá stále náhodně, avšak když porovnáme MSL před a po optimalizaci viz. obr. 2.11 zjistíme, že úroveň vedlejších laloků se snížila o několik dB pro frekvence okolo f_{\max} . Metoda optimalizace tedy představuje účinnou a dobře kontrolovatelnou metodu snížení úrovně vedlejších laloků v daném frekvenčním pásmu.

[5]

3 Praktická realizace

3.1 Stanovení cílů práce

Cílem práce je zkonstruovat vhodný držák pro mikrofony, který bude tvořit mikrofonní pole. Následně bude navržen algoritmus naprogramování kamery.

3.2 Konstrukce držáku

3.2.1 Dostupné součástky

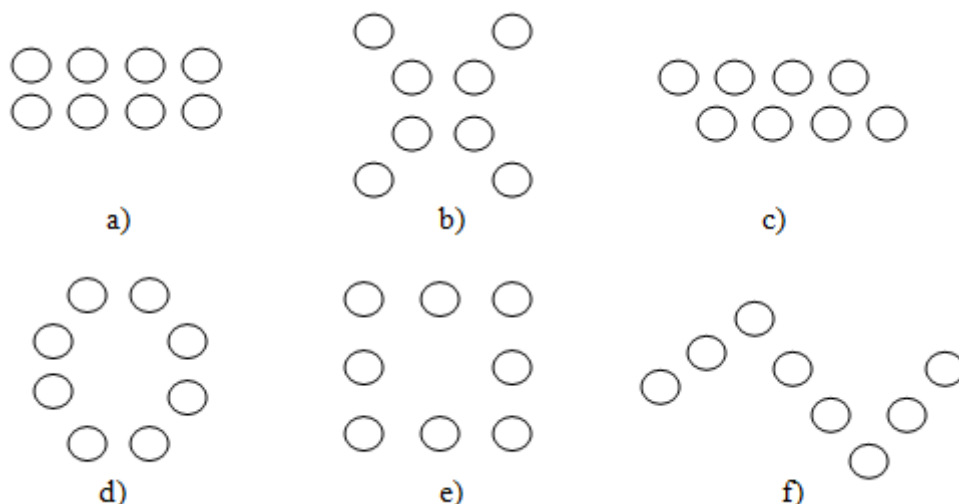
- 8 x mikrofon PCB PIEZOTRONICS typ 130E21
- 8 x propojovací kabel PCB PIEZOTRONICS typ 003
- 8 x konektor PCB PIEZOTRONICS typ EB
- 8 x konektor PCB PIEZOTRONICS typ AC
- 2 x měřicí modul (karta)

3.2.2 Požadavky na konstrukci

- mikrofony umístěné v jedné rovině
- konstrukce vhodná pro co nejvyšší výkon výsledné akustické kamery
- nízká hmotnost a mobilita
- koroziuvzdornost
- vhodný design

3.2.3 Nástin realizace

Z vlastností jednotlivých typů polí popsaných v kapitole 2.3.1 je zřejmé, že nejvhodnějším typem pole je pole nepravidelné. Nejsou však známé jednotlivé parametry a sofistikované postupy pro jeho konstrukci. V praxi se obvykle postupuje metodou pokus-omyl. Z tohoto důvodu jsme se rozhodli pro realizaci mřížky, ve které bude možnost jednotlivé mikrofony přemísťovat ve dvou osách. Tím bude docíleno odzkoušení jednotlivých geometrií, jak pravidelných tak i nepravidelných a následné vyhodnocení té nejvýhodnější. Je zřejmé, že pro konkrétní případy měření bude vhodnější odlišná geometrie pole. Některé typy geometrie jsou zobrazeny na obr. 3.1. Dalším kladem této konstrukce bude i možnost měnit rozteč mikrofonů a sledovat změnu rozlišovacích schopností akustické kamery.



Obr. 3.1 Příklady jednotlivých použitelných geometrií

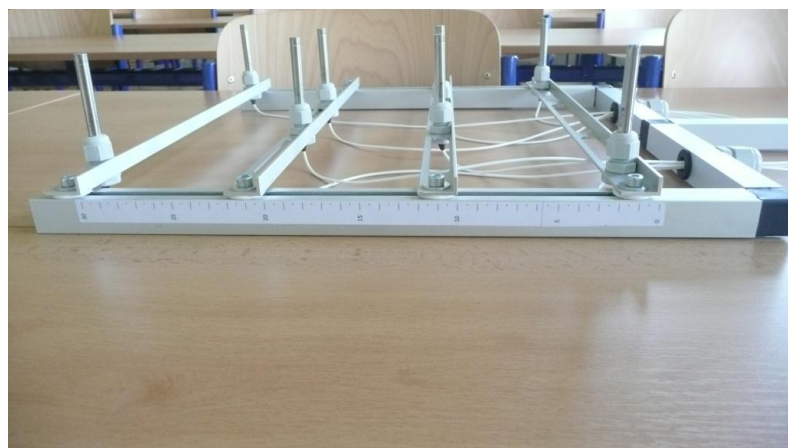
Použitým materiálem byla zvolena hliníková slitina. Tento materiál zaručuje především nízkou hmotnost a dobrou životnost.

Z důvodu manipulovatelnosti by měly být rozměry držáku co nejmenší. Rozměry jsou závislé především na rozteči mikrofonů a na použití jednotlivých mikrofonů. Z tohoto důvodu volíme maximální rozměry 380x380 mm, které zaručí maximální rozteč mikrofonů při jejich umístění v mříži 4x2 rovnou 100 mm.

Konstrukce se skládá z hliníkových normalizovaných profilů s eloxovou úpravou, které jsou pospojovány pomocí plastových stavebnicových elementů a šroubových spojů. Jednotlivé mikrofony jsou ke konstrukci uchyceny pomocí kabelových průchodek, které zaručují dostatečnou pevnost spojení a umožňují jak jednoduché posunutí jednotlivých mikrofonů v příčném směru, tak i jednoduchou demontáž. Konstrukce je opatřena dalšími dvěma kabelovými průchodkami většího průměru, které slouží k provlečení kabeláže. Funkce těchto průchodek je zabraňovat vytržení konektorů z mikrofonů při nevhodné manipulaci s akustickou kamerou. Na bočních stranách konstrukce jsou umístěna pravítka sloužící k rychlému přenastavení svislé rozteče jednotlivých posuvných příček.



Obr. 3.2 Sestava akustické kamery



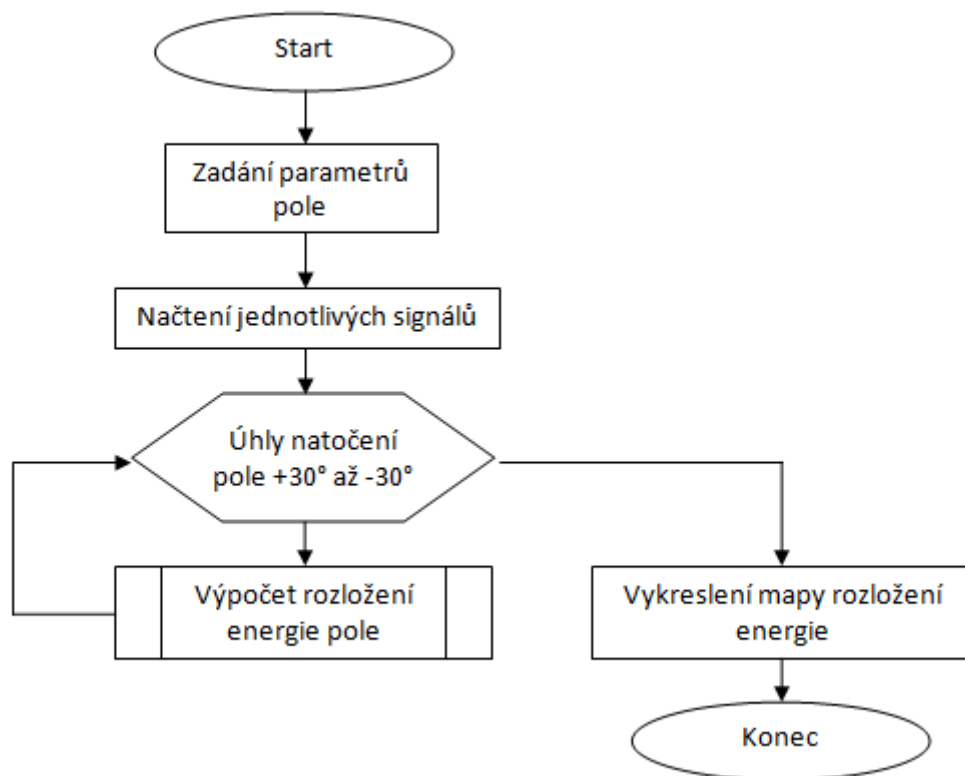
Obr. 3.3 Detail akustické kamery

3.3 Návrh algoritmu na zpracování mapového pole

Návrh algoritmu spočívá ve vypracování vývojového diagramu programu a nástin realizace samotného programu, který bude proveden pomocí programovacího prostředí LabVIEW. Samotný program není součástí této bakalářské práce.

Program je rozdělen do hlavního programu a podprogramu řešícím zpoždění jednotlivých signálů.

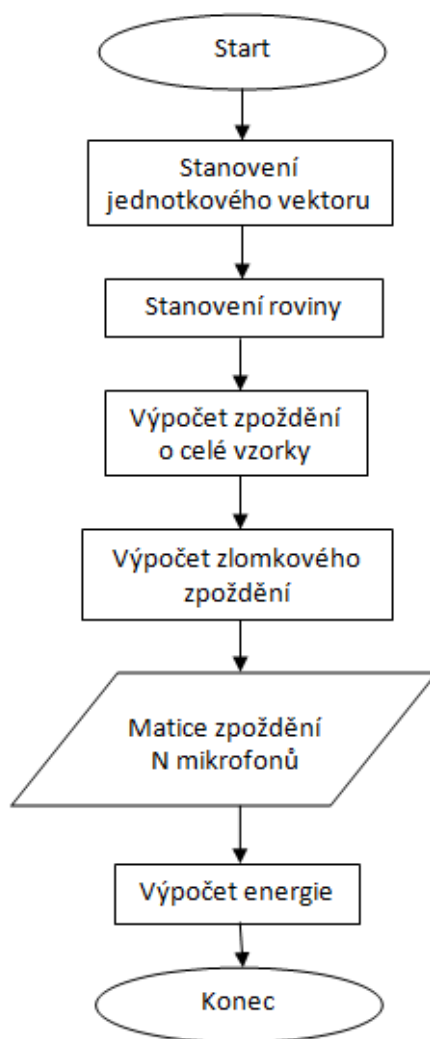
Na začátku algoritmu je nutné zadat parametry pole. Jedná se o souřadnice jednotlivých mikrofonů vůči zvolenému počátku souřadného systému. Následně budou načteny jednotlivé signály buď z disku, nebo z vyrovnávací paměti počítače. Poté bude pole snímat pomocí beamformingu všechny směry v rozptylu -30° až $+30^\circ$ při kroku 1° jak ve vertikálním směru, tak v horizontálním směru. Tento úhlový rozptyl závisí na optimální rozlišovací schopnosti pole popsané v kapitole 2.2.3. Pomocí podprogramu bude vypočtena energie jednotlivých směrů. Nakonec bude vykreslena výsledná mapa rozložení energie pole.



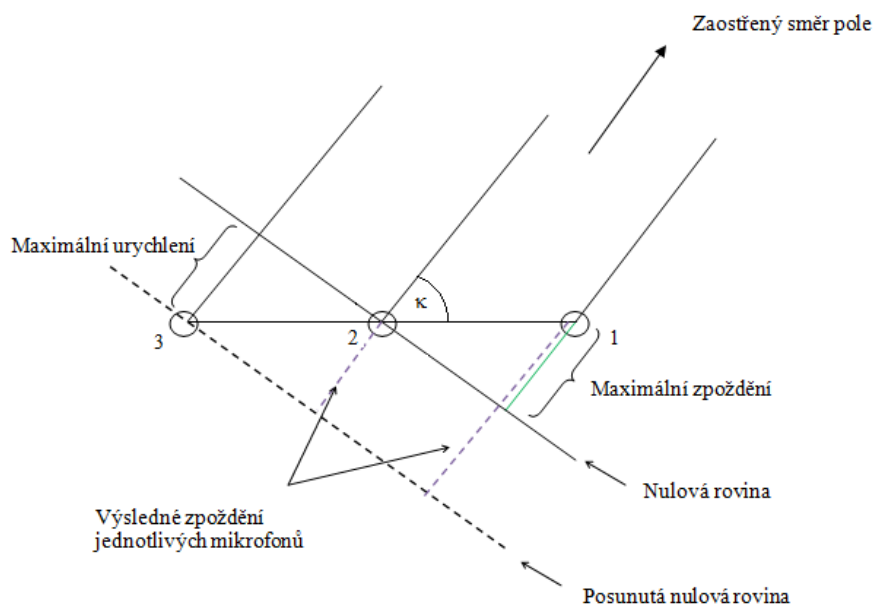
Obr. 3.4 Vývojový diagram hlavního programu

Podprogram vychází z metody DAS beamformingu, která je blíže popsána v kapitole 2.2.1. Podprogram začíná zadáním jednotkového vektoru aktuálně zaměřeného směru κ . Následuje určení roviny kolmé na zadaný jednotkový vektor a procházející námi zvoleným nulovým

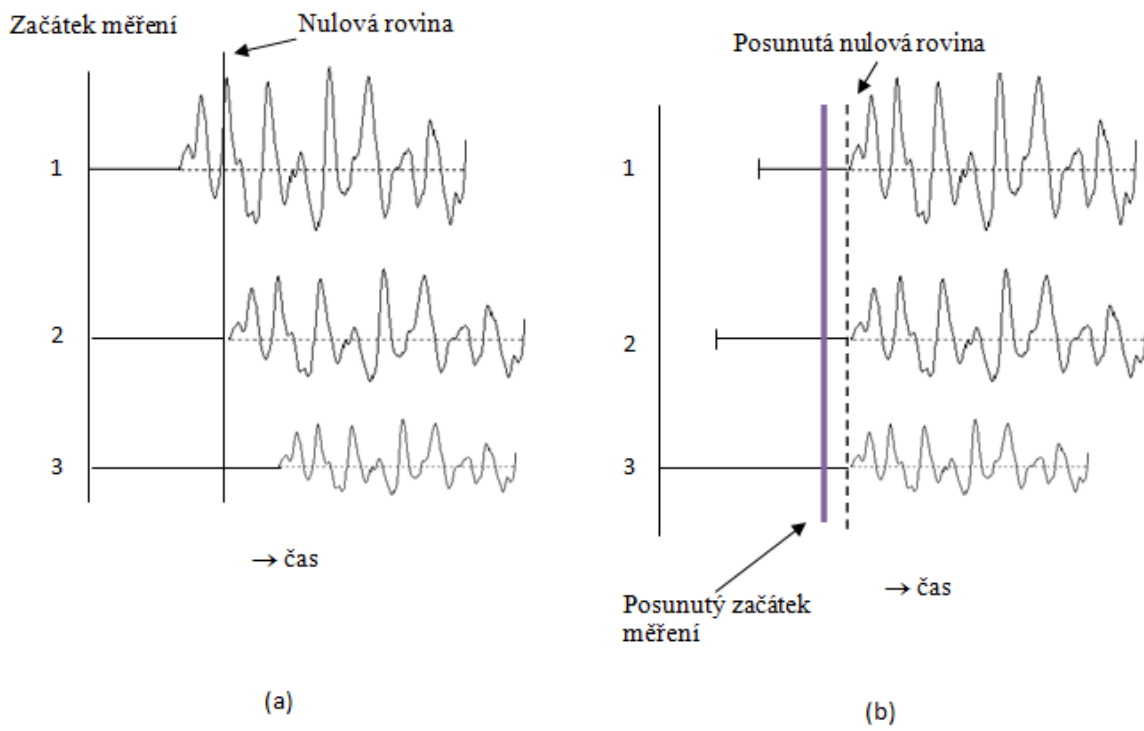
bodem pole. Volený jednotkový vektor je tedy normálovým vektorem této roviny. Následuje určení zpoždění jednotlivých signálů (v našem případě 8 při každém kroku natočení). Protože jednotlivé signály lze pouze zpožďovat a ne urychlovat, je nutné provést úpravu dle obr. 3.4. Jednotlivé mikrofony jsou očíslovány 1-3. Po zjištění maximálního urychlení je nulová rovina posunuta o tuto hodnotu tak, aby procházela souřadnicemi mikrofonu, jehož signál by musel být teoreticky nejvíce urychlen. Výsledné zpoždění jednotlivých signálů se poté rovná hodnotě zpoždění od nulové roviny pole rozšířenou o hodnotu maximálního urychlení signálu. Zpoždění jednotlivých mikrofonů je zobrazeno na obr. 3.5 (a). Upravené signály jsou viditelné na obr. 3.5 (b). Začátky jednotlivých signálů jsou vlivem jejich zpoždění posunuty do jedné roviny, čímž je zaručena směrová citlivost kamery.



Obr. 3.5 Vývojový diagram podprogramu zpoždění

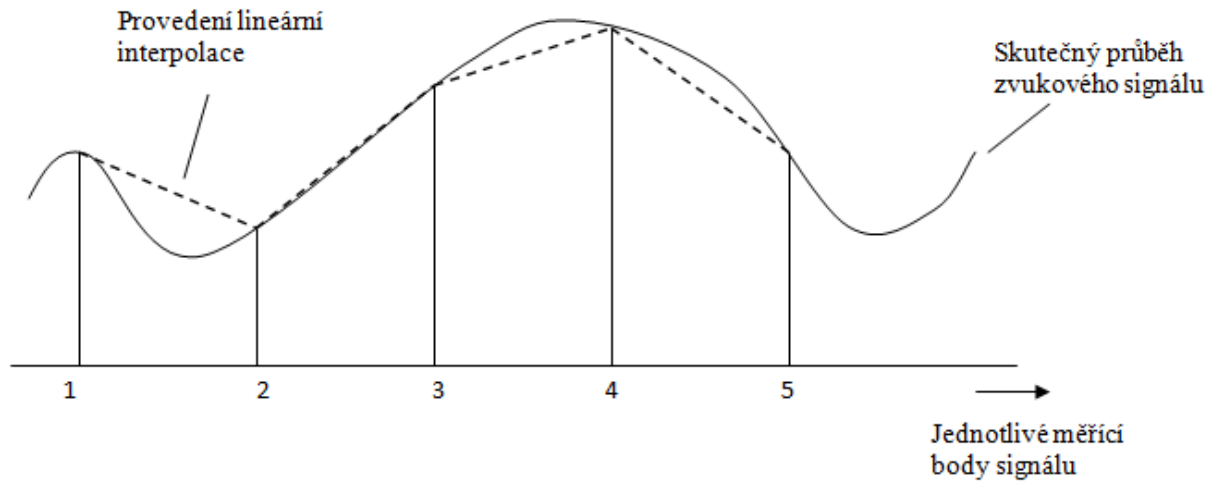


Obr. 3.6 Zpoždění signálu



Obr. 3.7 (a) Skutečný průběh akustického signálu. (b) Zpoždění jednotlivých signálů.

Hodnoty signálů určené pouze předchozí metodou jsou velice nepřesné, protože jsou určeny vzorkováním pouze po určitých inkrementech. Signál je tedy nutné zpřesnit některou interpolační funkcí. Pro náš případ byla vybrána lineární interpolace, která spočívá v přímkovém proložení jednotlivých sousedních vzorků. Princip metody je zobrazen na obr. 3.6.



Obr. 3.8 Lineární interpolace

Závěr

Tato bakalářská práce pojednává o problematice monitorování zvukových polí pomocí akustické kamery. Hlavním cílem bylo zpracovat teorii vybrané metody monitorování zvukových polí a na základě této teorie byl následně navržen design experimentální akustické kamery. Zvolená byla metoda beamformingu, která patří k nejpoužívanějším metodám pro aplikaci akustické kamery. Dalším cílem práce byl návrh algoritmu, který bude sloužit jako návod pro následné naprogramování experimentální akustické kamery v programovacím jazyce LabVIEW.

Práce pojednává, jak o sofistikovaných metodách používaných v dané problematice, tak i o nejnovějších technologiích a trendech v oboru, jako je například snímač Microflown vyvinutý nizozemskou společností Microflown Technologies, který v současnosti patří k nejcitlivějším a nejmenším snímačům akustických veličin. Samotná teorie beamformingu není v současnosti popsána v žádné česky psané odborné literatuře, takže bylo nutné čerpat ze zahraničních zdrojů, především z vědeckých článků společnosti Brüel & Kjær, která patří k průkopníkům této metody a poskytuje školení v dané oblasti.

Práce dále obsahuje zpracování vlastností jednotlivých geometrií mikrofonních polí. Na základě těchto vlastností byla navržena akustická kamera, která je specifická možností změny geometrie mikrofonního pole, což je docíleno možností posouvat mikrofony v osách x a y . Jedinou nevýhodou je fakt, že nelze použít geometrii nepravidelného pole, která by měla patřit k nejpřesnějším.

Na základě návrhu byla akustická kamera nad rámec zadání bakalářské práce vyrobena a sestavena. Samotná konstrukce splňuje všechny požadavky na mobilitu a zároveň zaručuje ochranu snímačů a kabeláže. Kamera obsahuje pouze osm mikrofonů, což zaručuje nepříliš přesné výsledky, ale k ověření metody beamformingu a experimentálnímu měření to zajisté dostačuje. Kamera dále není vybavena kamerou pro snímání reálného obrazu monitorované oblasti, ale není problém ji o tento prvek v budoucnosti dovybavit.

V závěrečné části práce je zpracován algoritmus naprogramování experimentální akustické kamery, kde jsou vytvořeny vývojové diagramy samotného programu se slovním a grafickým komentářem principu programu. Samotný program není součástí práce.

Přínosem práce je zajisté zkonstruování experimentální akustické kamery, která bude sloužit jako učební pomůcka na Katedře konstruování strojů Fakulty strojní na Západočeské univerzitě v Plzni.

Citovaná literatura

1. **Microflown Technologies.** *Sound & vibration.* [Online] 23. červen 2007. [Citace: 22. leden 2013.]
http://www.microflown.com/files/media/library/books/microflown_ebook/ebook_2_sound_and_vibration.pdf.
2. **Němeček, Pavel.** Akustická diagnostika. [Online] [Citace: 22. Listopad 2012.]
http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/technicka_diagnostika/In-TECH%20-%20Akusticka_diagnostika.pdf.
3. **Smetana, Ctirad.** *Hluk a vibrace.* Praha : Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
4. **Urartu Systems.** Near Field Acoustic Camera. [Online] [Citace: 5. Březen 2013.]
<http://www.urartusystems.ru/en/solutions/acoustic-microflown/near-field-acoustic-camera>.
5. **Brüel & Kjaer.** Technical review: Beamforming. [Online] 2004. [Citace: 21. leden 2013.]
<http://www.bksv.com/doc/bv0056.pdf>.
6. **Batel, Mehdi, a další.** Noise Source Location Techniques - Simple to Advanced Applications. [Online] 2003. [Citace: 21. Leden 2013.]
www.sandv.com/downloads/0303bate.pdf.
7. **Microflown Technologies.** *The Microflown.* [Online] 23. 6 2007. [Citace: 22. 1 2013.]
http://www.microflown.com/files/media/library/books/microflown_ebook/ebook_3_microflown.pdf.
8. **Ray, Elden F.** *Industrial noise series (Part IV) Modeling sound propagation.* [Dokument] 2010.
9. **Kreidl, Marcel a Šmíd, Radislav.** *Technická diagnostika.* Praha : BEN-technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-158-6.

Seznam obrázků



Obr. 1.1 Průběh akustického tlaku.....	11
Obr. 1.2 Typy akustických polí	14
Obr. 1.3 Typická konstrukce měřících mikrofonů Brüel & Kjær.....	16
Obr. 1.4 Sonda intenzity zvuku	17
Obr. 1.5 Mikroskopický snímek snímače Microflown.....	18
Obr. 1.6 Graf změny teploty	18
Obr. 2.1 Akustická kamera	20
Obr. 2.2 Příklad akustické mapy	20
Obr. 2.3 (a) Mikrofonní pole, rovinná vlna dopadající ze zaostřeného směru κ . (b) Typický směrový diagram citlivosti s hlavním lalokem v zaostřeném směru a nižšími vedlejšími laloky z jiných směrů.....	22
Obr. 2.4 Rovinná vlna dopadající z odlišného směru než je směr zaostření κ	23
Obr. 2.5 Princip superpozice pomocí Rayleighova kritéria	25
Obr. 2.6 Natočení beamformeru vůči dopadající vlně.....	26
Obr. 2.7 Graf porovnání rozlišení beamformeru ve směru osy a obecného směru	27
Obr. 2.8 Závislost jednotlivých vlastností pole	30
Obr. 2.9 Příklady pravidelného a nepravidelného pole. (a) křížové pole, (b) mřížové pole, (c) optimalizované náhodné pole, (d) pole ve tvaru Archimédovi spirály, (e) optimalizované kruhové pole, (f) optimalizované půlkruhové pole.....	31
Obr. 2.10 (a) Graf struktury vedlejších laloků v pravidelném poli s mřížovou konstrukcí, (b) Prostupující lalok při mimosovém dopadu, (c) Prostupující laloky v případě dopadu vlny v ose beamformeru.....	32
Obr. 2.11 Graf závislosti MSL na frekvenci u jednotlivých typů geometrie pole.....	34
Obr. 3.1 Příklady jednotlivých použitelných geometrií.....	37
Obr. 3.2 Sestava akustické kamery.....	38
Obr. 3.3 Detail akustické kamery	38
Obr. 3.4 Vývojový diagram hlavního programu	39
Obr. 3.5 Vývojový diagram podprogramu zpoždění	40
Obr. 3.6 Zpoždění signálu	41
Obr. 3.7 (a) Skutečný průběh akustického signálu. (b) Zpoždění jednotlivých signálů.	41
Obr. 3.8 Lineární interpolace.....	42


Seznam příloh


1. Specifikační listy použitého akustického vybavení


PŘÍLOHA č. 1

**Specifikační listy použitého akustického vybavení
(PCB Piezotronics)**

Model Number 130E21	ICP® ELECTRET ARRAY MICROPHONE		Revision C ECN #: 32938
Performance Nominal Microphone Diameter Frequency Response Characteristic (at 0° incidence) Frequency Response (±2 dB) Frequency Response (±5 dB) Phase Match (100 Hz to 5 kHz) Sensitivity (@ 250 Hz) Sensitivity (±3 dB) (@ 250 Hz) Inherent Noise (1/3 Octave @ 250Hz) Inherent Noise (A Weighted) Dynamic Range (3% Distortion Limit) TEDS Compliant	ENGLISH 1/4" Free-Field 20 to 10000 Hz 20 to 20000 Hz ±5 ° 45 mV/Pa -26.9 dB re 1 V/Pa <15 dB <30 dB >122 dB Yes	SI 1/4" Free-Field 20 to 10000 Hz 20 to 20000 Hz ±5 ° 45 mV/Pa -26.9 dB re 1 V/Pa <15 dB <30 dB >122 dB Yes	Optional Versions (Optional versions have identical specifications and accessories as listed for standard model except where noted below. More than one option maybe used.) T - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE P1451.4 Notes [1] Typical. [2] ± 3° from 100 Hz to 3 kHz typical [3] TEDS Capable Digital Memory and Communication, compliant with IEEE 1451.4 [4] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details. Supplied Accessories ACS-21 Calibration of Array Microphone (1)
Environmental Temperature Range (Operating) Temperature Effect on Output (-10 to +50 °C)	+14 to +122 °F <0.7 dB	-10 to +50 °C <0.7 dB	[1]
Electrical Excitation Voltage Constant Current Excitation Output Bias Voltage Output Impedance	18 to 30 VDC 2 to 20 mA 5.5 to 14 VDC <150 Ohm	18 to 30 VDC 2 to 20 mA 5.5 to 14 VDC <150 Ohm	
Physical Housing Material Electrical Connector (Output) Size (Diameter x Length) (overall) Weight	Stainless Steel 10-32 Coaxial Jack 0.28 in x 2.38 in 0.19 oz	Stainless Steel 10-32 Coaxial Jack 7.0 mm x 60.0 mm 5.4 gm	[1]
 [4]			
<p><i>All specifications are at room temperature unless otherwise specified.</i></p> <p>In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.</p> <p>ICP® is a registered trademark of PCB group, Inc.</p>			
Entered: LLH	Engineer: WDC	Sales: LLH	Spec Number:
Date: 05/20/2010	Date: 05/18/2010	Date: 05/20/2010	44438
		3425 Walden Avenue Depew, NY 14043 UNITED STATES Phone: 800-828-8840 Fax: 716-684-0987 E-mail: info@pcb.com Web site: www.pcb.com	

Model Number 003	STANDARD LOW NOISE COAXIAL CABLE		Revision B ECN #: 27379	
Performance Number of Conductors Cable Style	ENGLISH 1 Coaxial - Low Noise	SI 1 Coaxial - Low Noise	Optional Versions (Optional versions have identical specifications and accessories as listed for standard model except where noted below. More than one option maybe used.) Notes [1] Typical.	
Environmental Temperature Range Pull Strength	-320 to +500 °F 75 lb	-196 to +260 °C 330 N		
Electrical Impedance (±2 Ohm) Capacitance (±2 pF/ft) (conductor to conductor @ 70 °F (21 °C)) Insulation Resistance (@ 50 V @ 68 F) Noise Level (pk - pk)	50 Ohm 30 pF/ft >1 Tohm ≤3 mV	50 Ohm 90 pF/m >1 Tohm ≤3 mV		
Physical Cable Jacket Diameter Cable Jacket Material Cable Jacket Color Conductor Style Conductor Material	.079 in TFE Blue Solid Nickel Plated Copper Covered Steel	2.01 mm TFE Blue Solid Nickel Plated Copper Covered Steel	[1]	
Conductor Diameter (29 AWG) Insulation Material Over Conductor(s) Shield Type Over Conductor(s)	.011 in Extruded TFE Braid: 90% Minimum Coverage	.279 mm Extruded TFE Braid: 90% Minimum Coverage		
Shield Material Over Conductor(s) Low Noise Barrier Material (Over Conductor) Low Noise Barrier Material (Over Insulator)	Nickel Plated Wire Liquid Graphite Graphite Impregnated PTFE Tape	Nickel Plated Wire Liquid Graphite Graphite Impregnated PTFE Tape		
Bend Radius (minimum) Weight	1 in .1 oz/ft	25.4 mm 9.5 gm/m	[1]	
<p><i>All specifications are at room temperature unless otherwise specified.</i></p> <p>In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.</p> <p>ICP® is a registered trademark of PCB group, Inc.</p>				
Entered: GLB		Engineer: WDC	Sales: BAM	Spec Number:
Date: 09/24/2007		Date: 09/24/2007	Date: 09/24/2007	31605
 <p>3425 Walden Avenue Depew, NY 14043 UNITED STATES Phone: 800-828-8840 Fax: 716-684-0987 E-mail: info@pcb.com Web site: www.pcb.com</p>				

Model Number AC	CABLE CONNECTOR		Revision A ECN #: 31396										
Performance Connector Style Connector Style Connection Type Coupling Method (Locking) Environmental Temperature Range Electrical Impedance Insulation Resistance Physical Housing Material Finish Size (OD x Length) Weight	ENGLISH BNC Coaxial Plug (male pin) Bayonet -85 to 329 °F 50 Ohm 5 GOhm Brass Nickel Coated .57 in x 1.1 in 0.51 oz	SI BNC Coaxial Plug (male pin) Bayonet -65 to +165 °C 50 Ohm 5 GOhm Brass Nickel Coated 14 mm x 28 mm 14 gm	Optional Versions (Optional versions have identical specifications and accessories as listed for standard model except where noted below. More than one option maybe used.)										
<p><i>All specifications are at room temperature unless otherwise specified.</i></p> <p>In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.</p> <p>ICP® is a registered trademark of PCB group, Inc.</p>													
<table border="1"> <tr> <td>Entered: LLH</td> <td>Engineer: MJN</td> <td>Sales: JJM</td> <td>Approved: LLH</td> <td>Spec Number:</td> </tr> <tr> <td>Date: 09/21/2009</td> <td>Date: 09/14/2009</td> <td>Date: 09/14/2009</td> <td>Date: 09/21/2009</td> <td>31671</td> </tr> </table>		Entered: LLH	Engineer: MJN	Sales: JJM	Approved: LLH	Spec Number:	Date: 09/21/2009	Date: 09/14/2009	Date: 09/14/2009	Date: 09/21/2009	31671		
Entered: LLH	Engineer: MJN	Sales: JJM	Approved: LLH	Spec Number:									
Date: 09/21/2009	Date: 09/14/2009	Date: 09/14/2009	Date: 09/21/2009	31671									
		3425 Walden Avenue Depew, NY 14043 UNITED STATES Phone: 800-828-8840 Fax: 716-684-0987 E-mail: info@pcb.com Web site: www.pcb.com											

Model Number EB	CABLE CONNECTOR		Revision A ECN #: 29823	
Performance Connector Style Connection Type Coupling Method Coupling Thread Strain Relief Environmental Temperature Range Physical ROHS Compliant Size (OD x Length) Weight	ENGLISH Coaxial Plug (male pin) Threaded 10-32 female Molded Boot -320 to 500 °F No 0.25 in x 0.94 in 0.1 oz	SI Coaxial Plug (male pin) Threaded 10-32 female Molded Boot -196 to 260 °C No 6.4 mm x 24 mm 2 gm	Optional Versions (Optional versions have identical specifications and accessories as listed for standard model except where noted below. More than one option maybe used.)	
<p><i>All specifications are at room temperature unless otherwise specified.</i></p> <p>In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.</p> <p>ICP® is a registered trademark of PCB group, Inc.</p>				
Entered: LLH Date: 12/12/2008		Engineer: MJN Date: 12/10/2008		Sales: JJM Date: 12/10/2008
Approved: BAM Date: 12/12/2008			Spec Number: 32119	
			3425 Walden Avenue Depew, NY 14043 UNITED STATES Phone: 800-828-8840 Fax: 716-684-0987 E-mail: info@pcb.com Web site: www.pcb.com	

