

Forgó légcsavaros eszközök észlelésére alkalmas akusztikai antennák működési elvei és műszaki paraméterei

Azonosító: Rez-1701-DronDet-M.1.3_Jelentes_190515

2019.05.15.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Akusztikai fókuszálás	3
2.1. A Delay and Sum nyálábformálás	3
2.1.1. Bevezetés	3
2.1.2. Időtartományban	3
2.1.3. Frekvenciatartományban	3
2.2. Mikrofon sorok	3
2.2.1. Állandó amplitúdójú mikrofon sorok	4
2.2.2. Változó amplitúdójú mikrofon sorok	7
2.3. Síkra kiterjesztés – mikrofontömbök	9
2.3.1. A térbeli láthatósági függvény és a 2D Fourier transzformáció	9
2.3.2. Folytonos síkbeli elrendezések	11
2.3.3. Diszkrét mikrofontömb hatása	11
2.3.4. Kereszt- és körelrendezések	13
2.3.5. Spirárelrendezések	15
3. Akusztikai kamerák	21
3.1. Akusztikai kamera rendszerek jellemzői	21
3.2. Komplet rendszerek	23
3.2.1. gfaitech, Németország	23
3.2.2. Norsonic, Norvégia	26
3.2.3. HEAD acoustics, Németország	28
3.2.4. OptiNav, USA	28
3.2.5. Brüel and Kjaer, Dánia	29
3.2.6. Sorama	30
3.2.7. BSWA-Tech	30
3.3. Az optimális akusztikai kamerarendszer	31
3.3.1. A javasolt rendszer	32
A. Függelék	33
A.1. A Dolph–Cebisev-sorok beavatkozó együtthatóinak számítása	33

1. fejezet

Bevezetés

Kutatási jelentésünkben a mikrofontömbök, más néven akusztikai kamerák működési elvét foglaljuk össze, megvizsgáljuk a kereskedelmi forgalomban kapható ilyen eszközök fő jellemzőit. Emellett megfogalmazzuk azokat a követelményeket, melyek a légszaváros pilótanélküli repülőeszközök akusztikai elven történő felderítéséhez és a szenzorrendszeren való együttműködéshez szükségesek. Végül javaslatot teszünk a beszerzendő érzékelők és jelfeldolgozó modulok kiválasztására az előbbi szempontok figyelembe vételével.

Jelentésünk 2. fejezetében a mikrofontömbös érzékelés elméletét mutatjuk be. A tárgyalás során először egy folytonos szakasz mentén vett érzékelőeloszlást vizsgálunk, majd megmutatjuk a térbeli diszkrétizálás és a véges számú érzékelő hatását. Tárgyalásunk rámutat, hogy ezekkel a feltételekkel ideális (végtelen nyereségű) akusztikai fókuszálás nem valósítható meg, az iránykarakterisztikát véges főnyalábszélesség és megjelenő melléknyalábok jellemzik. A melléknyalábok szintjének szabályozása érdekében változó amplitúdójú mikrofon sorokat alkalmazhatunk, melyeket szintén ebben a fejezetben részletezünk. A 2. fejezet második felében a kétdimenziós mikrofontömböket tárgyaljuk, melyek lehetővé teszik az irányérzékeny észlelést a teljes térben. Bemutatjuk a gyakorlatban jellemzőek alkalmazott kialakítások iránykarakterisztikáit, például rács, kereszt, kör és spirál elrendezéseket vizsgálunk.

A kutatási jelentés 3. fejezetében a kereskedelmi forgalomban kapható akusztikai kamera rendszereket és fontosabb jellemzőiket tekintjük át. Szem előtt tartva a projekt célkitűzéseit és a megvalósítandó feladat által megkövetelt tulajdonságokat, javaslatot adunk a beszerzendő eszköz kiválasztására.

2. fejezet

Akusztikai fókuszálás

2.1. A Delay and Sum nyalábformálás

2.1.1. Bevezetés

A Delay and Sum nyalábformálás alap gondolata az alábbi. Adott N mikrofon, melyek a tér különböző pontjaiban ugyanannak a hangforrásnak a jelét veszik. Mivel a mikrofonok különböző pozícióban vannak, a hangforrás jelét eltérő késleltetéssel veszik. A Delay and Sum nyalábformálás alapötlete az eltérő terjedési utakból adódó késleltetési különbségek kompenzálása mesterséges késleltetéssel, majd a bejövő jelek összegzése. Ezáltal a konstruktív interferencia kiemeli a tér adott irányából érkező hangot.

2.1.2. Időtartományban

Jelölje az n -edik mikrofon időfüggő hangnyomásjelét $p(t)$. A nyalábformálás során a mikrofonok jeleit erősítjük, az n . mikrofon jelét a b_n erősítési tényezővel, illetve késleltetjük, az n -edik mikrofon jelét τ_n idővel. A késleltetett és erősített mikrofonjeleket összeadjuk, ezzel adódik az $s(t)$ fókuszált jel:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N b_n p_n(t - \tau_n) \quad (2.1)$$

A b_n erősítési tényezőkre akkor lehet szükség, ha az egyes mikrofonokba ugyanaz a hangjel eltérő amplitúdóval érkezik, és a fókuszálás során ezt is kompenzálni szeretnénk. Ez az eset akkor jelentkezik, ha a forrás a mikrofonoktól kis távolságra helyezkedik el. Amennyiben a forrás távolsága nagy, az amplitúdókülönbségek elenyészővé válnak, és a b_n együtthatókat egységnyiinek tekinthetjük. Ez a végtelen távolságra való fókuszálás esete.

2.1.3. Frekvenciatartományban

A nyalábformálás alapösszefüggése frekvenciatartományban is felírható. Jelölje $P_n(\omega)$ az n . mikrofon bemeneti nyomásának komplex amplitúdóját ω frekvencián. Az n . mikrofonon alkalmazott késleltetés és erősítés összefogható a $B_n(\omega)$ komplex erősítésbe. Így a fókuszált $S(\omega)$ jel frekvenciatartományi alakja:

$$S(\omega) = \sum_{n=1}^N B_n(\omega) P_n(\omega), \quad B_n(\omega) = b_n e^{-i\omega\tau_n} \quad (2.2)$$

2.2. Mikrofonosorok

Mikrofonosorok alatt egyenes vonal mentén elhelyezett mikrofonokat értünk. A továbbiakban feltételezzük, hogy a mikrofonok az x tengely mentén helyezkednek el.

2.2.1. Állandó amplitúdójú mikrofonosorok

Ha a mikrofonosorra θ_s beesési szögű – az s index a forrásra (source) utal –, $P_0(\omega)$ amplitúdójú síkhullám érkezik, akkor a mikrofonosor x pozíciójában mérhető hangnyomás komplex csúcértéke

$$P(x, \omega) = P_0(\omega) e^{ikx \sin \theta_s} \quad (2.3)$$

ahol $k = \omega/c$ az akusztikus hullámszám, c pedig a hang terjedési sebessége. A formulában megjelenő $kx \sin \theta_s$ fázistolás az origóban beérkező jelhez képesti $x \sin \theta_s/c$ siettetésnek felel meg.

A tökéletesen konstruktív összegzés eléréséhez az x pozícióban beérkező jelet ugyanilyen mértékben kell késleltetnünk, vagyis a

$$B(x, \omega) = e^{-ikx \sin \theta_f} \quad (2.4)$$

beavatkozó függvénnyel kell szoroznunk a mikrofonosor jeleit, ahol optimális esetben $\theta_f = \theta_s$. Itt az f index a fókuszálásra utal. Mivel ez a beavatkozó jel egységnyi amplitúdójú, a mikrofonosorok ezen típusát állandó amplitúdójú mikrofonosoroknak hívjuk. Mivel továbbá a beavatkozó jel $-kx \sin \theta_f$ fázisa térben lineáris, az ilyen vezérlésű mikrofonosorokat progresszív fázisú soroknak hívjuk.

Azért érdemes megkülönböztetnünk a θ_s beesési és θ_f fókuszálási szöget, mert így meg tudjuk vizsgálni, hogy milyen jelet vesz a mikrofonosor, ha e két szög nem egyezik meg.

A továbbiakban feltételezzük, hogy a mikrofonok térben folytonosan és végtelen hosszon helyezkednek el, vagyis lefedik a teljes végtelen $x \in \mathbb{R}$ tengelyt. A fókuszált jelet ennek megfelelően szumma helyett az alábbi integrál adja meg:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(x, \omega) B(x, \omega) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} P(x, \omega) e^{-ikx \sin \theta_f} dx \quad (2.5)$$

A mikrofonosor iránykarakterisztikája

Vizsgáljuk meg, hogy a fenti, θ_f irányra fókuszáló összegzés alkalmazásával a különböző θ_s irányokból érkező síkhullámokat milyen erősséggel veszi a mikrofonosor. Ha a beeső síkhullám θ_s irányból érkezik, akkor $P(x, \omega) = P_0(\omega) e^{ikx \sin \theta_s}$, aminek értelmében a fókuszált jel

$$\begin{aligned} S(\omega, \theta_s, \theta_f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} P_0(\omega) e^{ikx \sin \theta_s} e^{-ikx \sin \theta_f} dx = P_0(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikx(\sin \theta_s - \sin \theta_f)} dx \\ &= 2\pi P_0(\omega) \delta(\sin \theta_s - \sin \theta_f), \end{aligned} \quad (2.6)$$

ahol δ a Dirac-delta függvény. A mikrofonosor $\Psi(\omega, \theta_s, \theta_f)$ iránykarakterisztikáját definiáljuk a fókuszált jel és a beeső síkhullám amplitúdójának hányadosaként:

$$\Psi(\omega, \theta_s, \theta_f) = \frac{S(\omega, \theta_s, \theta_f)}{P_0(\omega)} = 2\pi \delta(\sin \theta_f - \sin \theta_s) \quad (2.7)$$

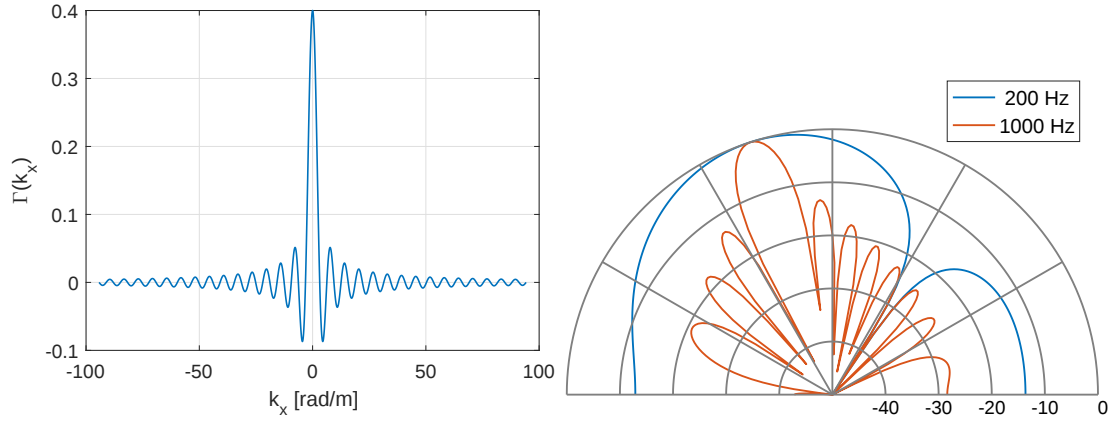
Ez az eredmény azt jelenti, hogy a végtelen, folytonos, progresszív fázistolású és állandó amplitúdójú mikrofonosor síkhullámok tökéletes fókuszálására képes. A $\sin \theta_f = \sin \theta_s$ irányban tökéletesen (végtelen erősséggel) kiemel, minden más irányban teljesen elnyom.

Ez a mikrofonosor természetesen több szempontból is praktikusán megvalósíthatatlan. Mind a térben végtelen kiterjedés, mind a térben folytonos elrendezés idealizáció. Ez a mikrofonosor továbbá akauzális vezérlésű, vagyis a mikrofonok egy részének jelét siettetni kell.

Az iránykarakterisztika és a Fourier-transzformáció kapcsolata

Írjuk fel ismét a (2.6) iránykarakterisztika-összefüggést úgy, hogy hagyjuk meg benne a $B(x, \omega)$ beavatkozó tagot általánosan, és vezessük be a $k_{x,s} = k \sin \theta_s$ jelölést:

$$S(\omega, \theta_s, \theta_f) = P_0(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikx \sin \theta_s} B(x, \omega) dx = P_0(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ik_{x,s} x} B(x, \omega) dx \quad (2.8)$$



2.1. ábra. Állandó amplitúdójú véges mikrofonosor láthatósági függvénye és iránykarakteristikája különböző frekvenciákon

A jobb oldalon a $B(x, \omega)$ beavatkozó függvény térbeli Fourier-transzformáltja szerepel, vagyis az iránykarakteristika megegyezik a beavatkozó függvény térből (x) hullámszám (k_x) tartományba való Fourier-transzformáltjával:

$$\Psi(\omega, \theta_s) = \mathcal{F}\{B(x, \omega); x \rightarrow k_{x,s}\}, \quad k_{x,s} = k \sin \theta_s. \quad (2.9)$$

A láthatósági függvény és a láthatósági tartomány

A fenti összefüggést célszerű közvetett formában megfogalmaznunk. Jelölje $\Gamma(k_x)$ láthatósági függvény a $\theta_f = 0$ fókuszálási irányhoz tartozó beavatkozó függvény Fourier-transzformáltját, vagyis

$$\Gamma(k_x) = \mathcal{F}\{B(x, \theta_f = 0); k_x\} = \int_{-\infty}^{+\infty} B(x, \theta_f = 0) e^{ik_x x} dx \quad (2.10)$$

A θ_f irány felé fókuszáló mikrofonosor θ_s irányszöghöz tartozó iránykarakteristikája a $\Gamma(k_x)$ láthatósági függvény $k_x = k(\sin \theta_s - \sin \theta_f)$ helyen való kiolvasásával kapható meg:

$$\Psi(\omega, \theta_s, \theta_f) = \Gamma(k(\sin \theta_s - \sin \theta_f)) \quad (2.11)$$

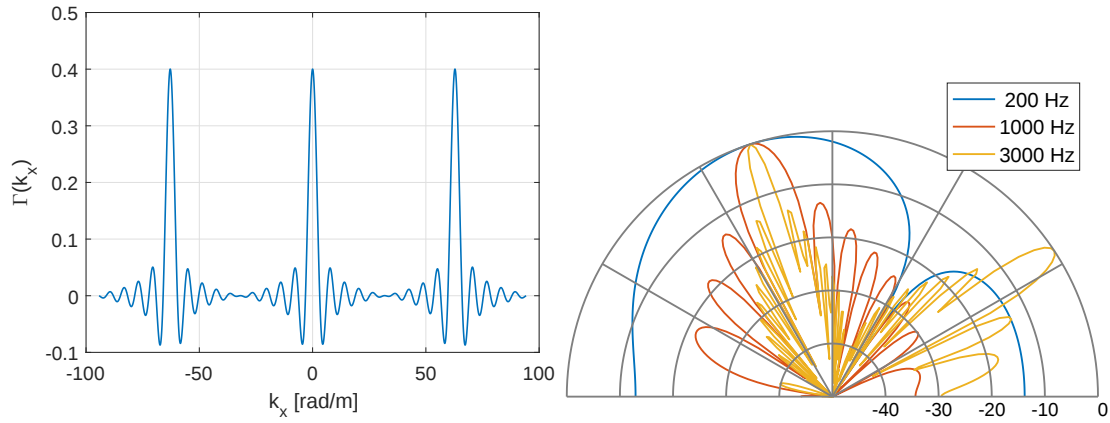
Ez a felismerés nagyban egyszerűsíti a véges és diszkrét mikrofonosorok elméletének tárgyalását.

Mivel mind a fókuszálási szög, mind a forrás irányszöge csak a $\pm\pi/2$ értékek közötti intervallumban mozoghat, látszik, hogy az aktuális iránykarakteristika meghatározásakor a $\Gamma(k_x)$ láthatósági függvény $-k \sin \theta_f$ körüli, $2k$ széles tartománya képeződik le az iránykarakteristikára. Ebből következik, hogy $\omega \rightarrow 0$ kis frekvencián a mikrofonosor iránykarakteristikája térben konstanshoz tart, míg nagy frekvencián megjelenik benne a beavatkozó függvény Fourier-transzformáltjának széles hullámszám-függése. Ez magyarázza a mikrofonosorok kisfrekvenciás gyenge fókuszálási tulajdonságát.

Véges mikrofonosor hatása

A véges mikrofonosor modelljében a mikrofonokat a $[-L; +L]$ folytonos intervallumra korlátozzuk. Ez matematikai szempontból azzal egyezik meg, hogy a beavatkozó függvényt beszorozzuk egy $w(x)$ négyszögablakkal, mely a kijelölt tartományon egységnyi, azon kívül pedig zérus értékű:

$$w(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq L \\ 0 & |x| > L \end{cases} \quad (2.12)$$



2.2. ábra. Állandó amplitúdójú véges diszkrét mikrofonosor láthatósági függvénye és iránykarakteristikája különböző frekvenciákon

A $\Gamma(k_x)$ láthatósági függvény meghatározásához a $w(x)$ függvény térbeli Fourier-transzformáltját kell képeznünk:

$$\Gamma(k_x) = \int_{-L}^L 1 \cdot e^{ik_x x} dx = \left[\frac{e^{ik_x x}}{ik_x} \right]_{-L}^L = \frac{e^{ik_x L}}{ik_x} - \frac{e^{-ik_x L}}{ik_x} = 2L \operatorname{sinc}(k_x L) \quad (2.13)$$

ahol $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$. Eredményünk szerint a véges, $2L$ szélességű mikrofonosor iránykarakteristikája

$$\Psi(\omega, \theta_s, \theta_f) = 2L \operatorname{sinc}(kL(\sin \theta_s - \sin \theta_f)) \quad (2.14)$$

A mikrofonosor főiránya az iránykarakterisztika maximumhelye: $\sin \theta_s = \sin \theta_f$.

A mikrofonosor főnyalábjának szélességét a főnyaláb -3 dB-es pontjainak szögtávolságával definiáljuk. A sinc függvény esetében ez a pont $\pm 0,444\pi$ értéknél van, aminek értelmében a főnyaláb θ_s^* határszögeinek egyenlete

$$|\sin \theta_s^* - \sin \theta_f| = 0,444 \frac{\lambda}{2L} \quad (2.15)$$

Nagy frekvencián és $\theta_f = 0$ fókuszálási irány esetében jó közelítés a

$$\theta_{\text{főnyaláb}} = 2\theta_s^* = 2 \sin^{-1} \frac{0,444\lambda}{2L} \approx 0,888 \frac{\lambda}{2L} \quad (2.16)$$

Amennyiben a frekvencia meghaladja azt a kritikus értéket, ahol

$$\frac{2L}{\lambda} > \frac{1}{1 + |\sin \theta_f|} \quad (2.17)$$

az iránykarakteristikában elnyomási irányok és azokon túl melléknyalábok jelennek meg. A melléknyalábok maximális erősségét a $|\operatorname{sinc}(k_x)|$ függvény lokális maximumai határozzák meg. Az első melléknyaláb erőssége $0,2172$, mely szerint a mikrofonosor melléknyaláb-elnyomása

$$20 \log_{10} \frac{1}{0,2172} = 13,3 \text{ dB} \quad (2.18)$$

Diszkrét mikrofonosorok hatása

Eddig feltételeztük, hogy mikrofonosorunk a hangot térben folytonosan veszi és dolgozza fel. A valós mikrofonosorok természetesen térben diszkrétek, vagyis a mikrofonok az x_n , $n = 1 \dots N$ pozíciókban helyezkednek el. Matematikai kezelhetősége miatt először abból az esetből indulunk ki, mikor $x_n = nd$, vagyis a mikrofonosor állandó osztásközű.

A térben diszkrét mikrofonosor matematikailag a beavatkozó függvény térbeli, d osztásközű mintavételezésével modellezhető. Mivel a $\Gamma(k_x)$ függvény a beavatkozó függvény térbeli Fourier-transzformáltja, ezért a beavatkozó függvény mintavételezése a láthatósági függvény Dirac-delta impulzussorozattal vett konvolúcióját eredményezi:

$$\Gamma_d(k_x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \Gamma\left(k_x - n\frac{2\pi}{d}\right) \quad (2.19)$$

vagyis a diszkrét sor iránykarakterisztikájában a folytonos sor iránykarakterisztikája $2\pi/d$ hullámszámmértékenként ismétlődik (belapolódik). Mivel láttuk, hogy az iránykarakterisztika a láthatósági függvény $2k$ széles szakaszáról képeződik le, kimondható a térbeli mintavételi tétel:

Ahhoz, hogy a mikrofonosor iránykarakterisztikájában ne jelenjenek meg a diszkretizálásból adódó ismétlődések, teljesülnie kell a

$$k < \frac{\pi}{d}, \quad d < \frac{\lambda}{2} \quad (2.20)$$

mintavételi feltételnek.

2.2.2. Változó amplitúdójú mikrofonosorok

Az állandó amplitúdójú progresszív fázisú mikrofonosor előnye a viszonylagosan jó szelektivitása (kis főirányszög), hátránya viszont a gyenge melléknyalábelnyomás. Változó amplitúdójú mikrofonosorok alkalmazásával a melléknyalábelnyomás jelentősen növelhető, erre mutat példákat a következő fejezet.

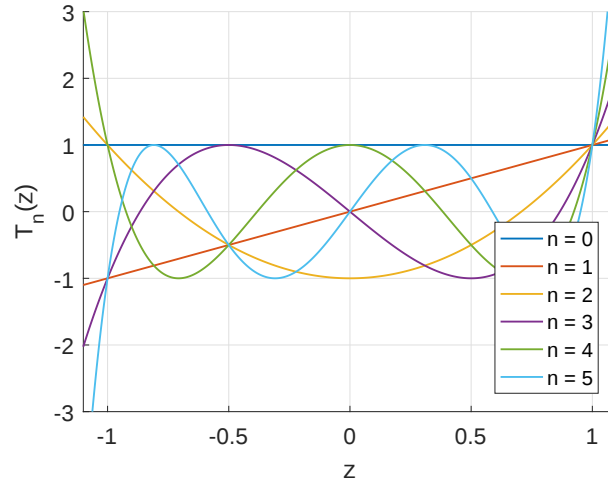
Binomiális mikrofonosor

Vegyünk egy állandó amplitúdójú, $2L$ széles folytonos mikrofonosort, és diszkretizáljuk térben $d = L$ távolság alkalmazásával. Eredményként két elemű azonos amplitúdójú mikrofonosort kapunk, melynek elemei (a szimmetriát megőrizendő) a $\pm L/2$ pozíciókban helyezkednek el. Korlátozzuk a frekvenciatartományt a mintavételi tétel szerint, vagyis $k < \pi/d = \pi/L$. Ebben az esetben a láthatósági függvény $2k < 2\pi/L$ széles szakaszát képezzük le az iránykarakterisztikára. A 2.1. ábrán látható, hogy amennyiben $\theta_f = 0$ irányba fókuszálunk, mikrofonosorunk iránykarakterisztikája nem tartalmaz nullhelyet, a főnyaláb beteríti a teljes $\pm\pi/2$ szögtartományt, így nincsenek melléknyalábjai sem.

A Fourier-transzformáció szorzás-konvolúció tétele szerint, ha a beavatkozó függvényt önmagával konvolváljuk, a láthatósági függvény négyzetét kapjuk. Általánosítva: a beavatkozó függvény n -szeres konvolúciójával a melléknyaláboktól mentes iránykarakterisztika N -edik hatványát képezhetjük, aminek eredményeként csökkenteni tudjuk a főnyaláb kúpszögét. Könnyen látható, hogy eredményként olyan N elemű, $d = L$ osztásközű mikrofonosort kapunk, melynek b_n erősítései az $[1; 1]$ sorozat önmagával vett konvolúciói, vagyis a Pascal-háromszög soraiban szereplő binomiális együtthatók:

$$\begin{aligned} N=2 & \quad 1 \quad 1 \\ N=3 & \quad 1 \quad 2 \quad 1 \\ N=4 & \quad 1 \quad 3 \quad 3 \quad 1 \\ N=5 & \quad 1 \quad 4 \quad 6 \quad 4 \quad 1 \\ N=6 & \quad 1 \quad 5 \quad 10 \quad 10 \quad 5 \quad 1 \end{aligned} \quad (2.21)$$

A binomiális mikrofonosor előnye tehát nagy melléknyaláb-elnyomása, hátránya viszont, hogy vezérléséhez a binomiális együtthatókat kell alkalmazni, melyek esetében a legnagyobb (középső) és legkisebb (szélső) együttható aránya a sor méretét növelve gyorsan tart a végtelenhez.



2.3. ábra. A Csebisev-polinomok $n = 0$ -tól 5-ig

Dolph–Csebisev-mikrofonsorok

A Csebisev-polinomokon alapuló Dolph–Csebisev-sorokat Dolph vezette be az 1950-es években. A Dolph–Csebisev-sorok olyan mikrofonsorok, melyek melléknyaláb-elnyomása – a főnyaláb térszögének növelése árán – tetszőleges nagyra növelhető, és melléknyalábjaik egyenletes ingadozásúak.

Csebisev-polinomok A T_n Csebisev-polinomok definíciója az alábbi:

$$T_n(z) = \cos(n \cos^{-1}(z)) \quad (2.22)$$

$|z| > 1$ esetekre a komplex $\cos^{-1}$ függvény alkalmazásával. A polinomok kifejezhetőek rekurzívan is:

$$T_0(z) = 1, \quad T_1(z) = z, \quad T_n(z) = 2zT_{n-1}(z) - T_{n-2}(z) \quad (2.23)$$

A 2.3. ábrán látható Csebisev-polinomok számunkra fontos tulajdonságai az alábbiak

- minden gyökük és lokális szélsőértékük a $|z| < 1$ tartományon van
- minden lokális szélsőértékük ± 1
- $|z| > 1$ értékek esetén tartanak a végtelenhez
- A páros indexű polinomok párosak, a páratlan indexűek páratlanok, vagyis a páros indexű polinomoknak csak a páros indexű tagjai különböznek nullától.

Első megközelítésben tegyük fel, hogy mikrofonsorunk elemszáma páratlan, $N = 2K + 1$, ahol K egész.

Amennyiben a beavatkozó függvény térben szimmetrikus, vagyis $B(x) = B(-x)$, – ahogy a binomiális sor esetében is látuk –, annak Fourier-transzformáltja valós lesz: $\Gamma(k_x) \in \mathbb{R}$. Diszkrét esetben a Fourier-transzformációt az alábbi alakban írhatjuk:

$$\Gamma(k_x) = \sum_{n=-K}^K B(nd)e^{ik_x nd} = \sum_{n=0}^K \bar{B}_n \cos(2nu), \quad u = \frac{k_x d}{2} \quad (2.24)$$

ahol $\bar{B}_0 = B(0)$, és $\bar{B}_n = 2B(nd)$, ha $n \neq 0$. Eredményünk szerint a szimmetrikus vezérlésű sorok láthatósági függvénye páros trigonometrikus polinom.

Mivel $\cos(2nu)$ egyértelműen kifejezhető $(\cos u)^2$ n -edfokú polinomjaként (pl. $\cos 2u = 2\cos^2 u - 1$), az iránykarakterisztika alternatív alakja

$$\Gamma(k_x) = \sum_{n=0}^K A_n (\cos u)^{2n}, \quad (2.25)$$

ahol az A_n együtthatók a $\bar{B}_n$ -ekből kölcsönösen egyértelműen számíthatók. Az átszámítás menetét lásd a az A.1 függelékben.

Vezessük be a z változót az alábbi definíció szerint:

$$\frac{z}{z_0} = \cos u = \cos \frac{k_x d}{2}, \quad z_0 > 1 \quad (2.26)$$

Ez a periodikus leképezés a teljes k_x hullámszámtartományt a $z \in [-z_0; z_0]$ szakaszra képezi le, úgy, hogy az iránykarakterisztika főirányának ($k_x = 0$) képe a $z = z_0$ érték lesz. Az új változóval felírt láthatósági függvény alakja

$$\Gamma(z) = \sum_{n=0}^K A_n \left(\frac{z}{z_0} \right)^{2n} = \sum_{n=0}^K C_n z^{2n}, \quad -z_0 \leq z \leq z_0 \quad (2.27)$$

ahol

$$C_n = A_n / z_0^{2n} \quad (2.28)$$

Kihasználva, hogy $\Gamma(z)$ z páros polinomja, éljünk a $\Gamma(z) = T_{2K}(z)$ választással. Ebben az esetben a főirány kiemelése $\Gamma(k_x = 0) = T_{2K}(z_0)$, amely kiemelés csak a $z_0 > 1$ megválasztásától függ, a melléknyalábok amplitúdója pedig egyenletesen egységnyi.

A Csebisev-sorok tervezésének lépései tehát az alábbiak:

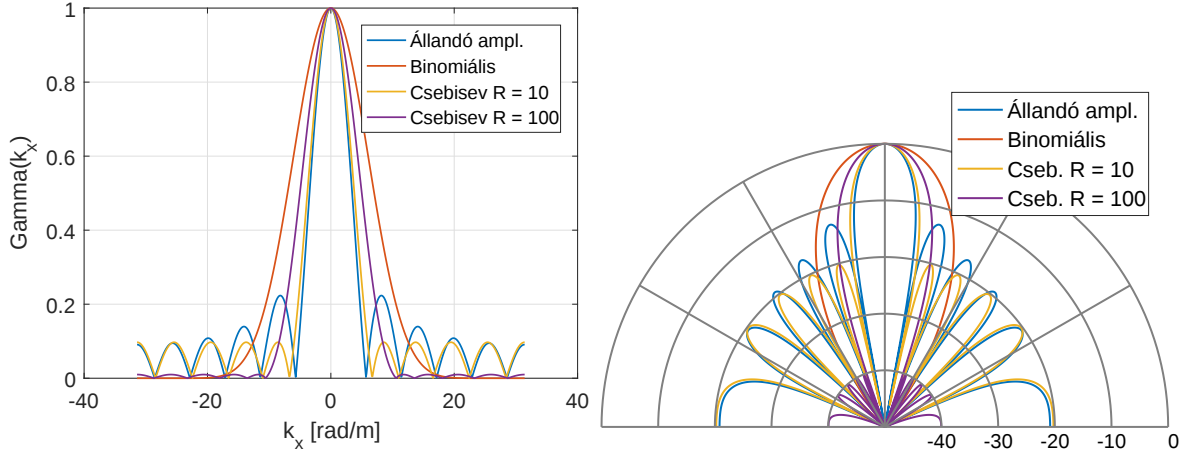
1. A mikrofon sor $N = 2K + 1$ elemszáma és az előírt $R > 1$ melléknyaláb-elnyomás alapján megválasztjuk a $2K = N - 1$ Csebisev-fokszámot és azt a $z_0 > 1$ értéket, ahol $T_{2K}(z_0) = R$.
2. A $T_{2K}(z)$ Csebisev-polinom zérustól különböző páros együtthatói adják a C_n értékeket, $n = 0 \dots K$.
3. Az A_n értékeket kifejezhetjük $A_n = C_n z_0^{2n}$ alakban.
4. Az A_n együtthatókból az A.1 függelékben ismertetett módon átszámoljuk a $\bar{B}_n$ együtthatókat, melyeket szimmetrikusan alkalmazunk.

2.3. Síkra kiterjesztés – mikrofontömbök

Ezidáig egydimenziós, vonalelrendezésű mikrofontömböket tárgyaltunk. Ezen elrendezések azonban a mikrofontömbre merőleges irányokból érkező hullámokkal szemben nem biztosítanak irányszelektivitást (az előző fejezetben tárgyalt iránykarakterisztikák hengerszimmetrikusak a mikrofontömb körül). A gyakorlatban ezért a mikrofonokat egy sík mentén helyezjük el, amely mikrofontömb a síkra tetszőleges térszög felől beeső síkhullámot különböző érzékenységgel képes rögzíteni.

2.3.1. A térbeli láthatósági függvény és a 2D Fourier transzformáció

Válasszuk meg a mikrofonelrendezés síkjának a $z = 0$ síkot! Hasonlóan a korábban vizsgált vonalmenti esethez, tételezzük fel, hogy képesek vagyunk rögzíteni a teljes, végtelen sík mentén



2.4. ábra. Négy különböző, állandó távolságú, progresszív fázistolású mikrofonosor összehasonlítása. Mindegyik mikrofonosor $N = 11$ elemű, és a mintavételi tétel által megszabott $k = \pi/d$ felső határfrekvencián van alkalmazva.

kialakuló mind térben, mind időben folytonos $P(x, y, \omega)$ hangnyomást. A mikrofontömb kimeneti (fókuszált) jele az egyes pontokban mért hangnyomás $B(x, y, \omega)$ beavatkozással súlyozott összegeként áll elő, amely a teoretikus folytonos esetben a

$$S(\omega) = \iint_{-\infty}^{\infty} B(x, y, \omega) \cdot P(x, y, \omega) dx dy \quad (2.29)$$

integrállá fajul.

Amennyiben a beeső hangnyomás egy $\theta_s = [\theta_s, \phi_s]^T$ irányból érkező $P_0(\omega)$ amplitúdójú síkhullám, a teljes hullámteret a

$$P(x, y, z, \omega) = P_0(\omega) e^{i(k_{x,s}x + k_{y,s}y + k_{z,s}z)} = P_0(\omega) e^{ik(\sin \theta_s \sin \phi_s x + \cos \theta_s \sin \phi_s y + \cos \phi_s z)} \quad (2.30)$$

kifejezés adja meg, és a fókuszált jel ($P(x, y, 0, \omega)$ helyettesítéssel)

$$\begin{aligned} S(\omega) &= P_0(\omega) \iint_{-\infty}^{\infty} B(x, y, \omega) \cdot e^{ik \sin \theta_s \sin \phi_s x} e^{ik \cos \theta_s \sin \phi_s y} dx dy = \\ &= P_0(\omega) \iint_{-\infty}^{\infty} B(x, y, \omega) \cdot e^{ik_{x,s}x} e^{ik_{y,s}y} dx dy \end{aligned} \quad (2.31)$$

alakban írható, ahol $k = \omega/c$ az akusztikai hullámszám. Az egyenlet jobb oldala a beavatkozó függvény 2D térbeli Fourier-transzformáltját írja le ($x \rightarrow k_{x,s}$ és $y \rightarrow k_{y,s}$), azaz a síkelrendezés láthatósági függvénye a

$$\Gamma(k_x, k_y) = \mathcal{F}\{B(x, y, \omega); k_x, k_y\} = \iint_{-\infty}^{+\infty} B(x, y, \theta_f = 0) e^{ik_x x} e^{ik_y y} dx dy \quad (2.32)$$

transzformációval kapható meg, míg a mikrofontömb térbeli iránykarakterisztikáját a láthatósági függvény

$$\Psi(\omega, \theta_s, \phi_s) = \Gamma(k \sin \theta_s \sin \phi_s, k \cos \theta_s \sin \phi_s) \quad (2.33)$$

szerinti kiolvasásával kaphatjuk meg.

Hasonlóan az egydimenziós esethez, a mikrofontömb $\theta_f = [\theta_f, \phi_f]^T$ fókuszálási iránya (azaz a főnyalábiránya) a beavatkozási függvény

$$B(x, y, \omega) = B_0(x, y, \omega) e^{-i(k_{x,f}x + k_{y,f}y)} = B_0(x, y, \omega) e^{-ik(\sin \theta_f \sin \phi_f x + \cos \theta_f \sin \phi_f y)} \quad (2.34)$$

alakú megválasztásával állítható. A következőkben az egyszerűség kedvéért az egyes síkelrendezések irányítottágát $\theta_f = [0, 0]^T$ (azaz a mikrofontömbre merőleges) főnyalábirány mellett vizsgáljuk.

2.3.2. Folytonos síkbeli elrendezések

A síkbeli mikrofonelrendezés két egyszerű elméleti példajaként vizsgáljuk egy téglalap, illetve körlap mentén elhelyezkedő folytonos mikrofoneloszlás irányítottságát.

Téglalap elrendezés Tegyük fel, hogy a mikrofonsokeaság egy L_x széles, L_y magas téglalap mentén helyezkedik el. Ez matematikailag az adott téglalap fölött egységnyi beavatkozási függvénynek felel meg, míg értéke a téglalapon kívül zérus. A mikrofontömb láthatósági függvénye a beavatkozási függvény 2D Fourier-transzformáltjaként kapható meg, amely a 2.2.1 fejezet alapján

$$\Gamma(k_x, k_z) = \int_{-L_y}^{L_y} \int_{-L_x}^{L_x} 1 \cdot e^{ik_x x} e^{ik_y y} dx dy = 4L_x L_y \text{sinc}(k_x L_x) \text{sinc}(k_y L_y) \quad (2.35)$$

alakban adható meg. Ez alapján a térbeli iránykarakterisztika

$$\Psi(\omega, \theta_s, \phi_s) = 4L_x L_y \text{sinc}(k L_x \sin \theta_s \sin \phi_s) \text{sinc}(k L_y \cos \theta_s \sin \phi_s). \quad (2.36)$$

Körlap elrendezés Hasonlóképp, ha adott egy R sugarú körlap mentén elhelyezett folytonos mikrofoneloszlás, annak beavatkozási függvénye

$$B(x, y) = \begin{cases} 1 & \sqrt{x^2 + y^2} \leq R, \\ 0 & \sqrt{x^2 + y^2} > R \end{cases} \quad (2.37)$$

alakú. A körszimmetrikus elrendezés miatt a 2D Fourier-transzformációt célszerű polár-koordinátás alakban elvégezni ($x = r \cdot \cos \varphi$, $y = r \cdot \sin \varphi$ helyettesítéssel), amely, levezetés nélkül a

$$\Gamma(k_x, k_z) = \int_0^R \int_0^{2\pi} 1 \cdot e^{ik_x r \cos \varphi} e^{ik_y r \sin \varphi} r d\varphi dr = 2 \frac{J_1 \left(R \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \right)}{R \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \quad (2.38)$$

alakban írható, ahol $J_1(\cdot)$ az elsőrendű Bessel-függvény. A megfelelő behelyettesítéssel és egyszerű trigonometrikus azonosság alkalmazásával az iránykarakterisztika alakjának

$$\Psi(\omega, \theta_s, \phi_s) = 2 \frac{J_1(kR \sin \phi_s)}{kR \sin \phi_s} \quad (2.39)$$

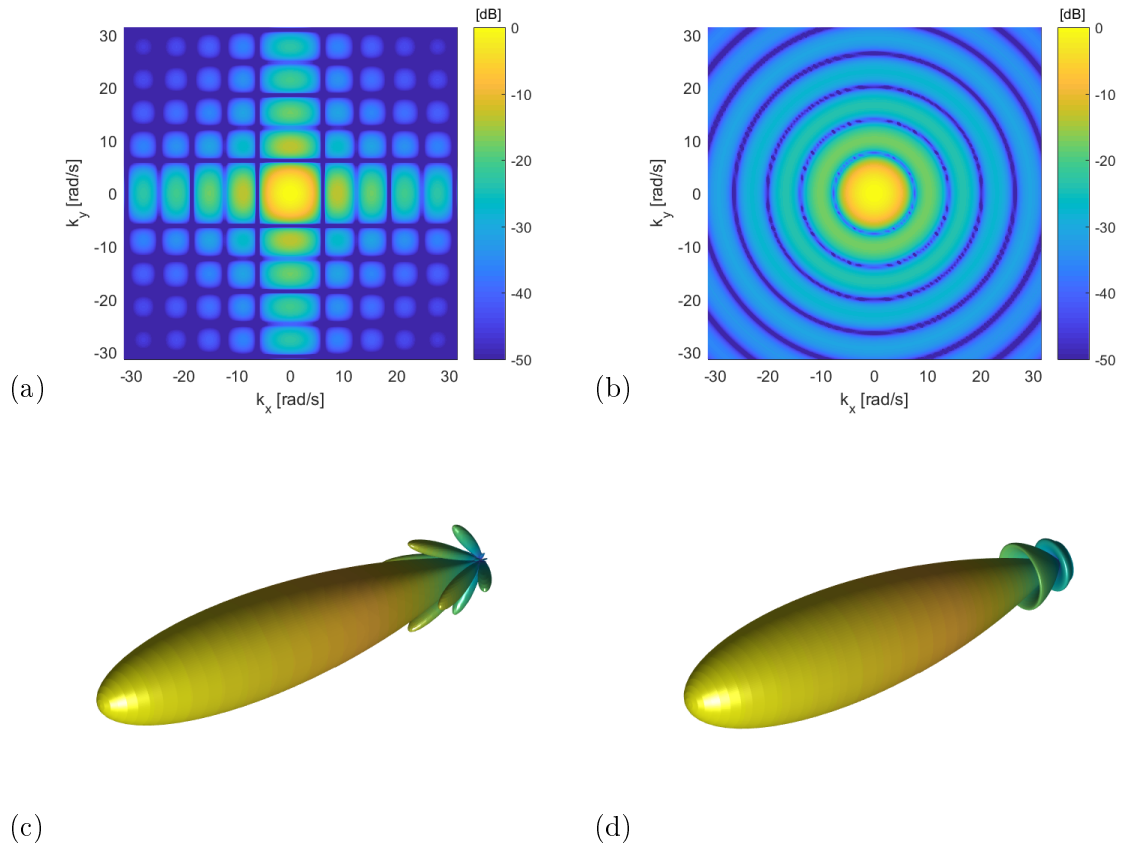
adódik.

A 2.5. ábra egyszerű, (kvázi-)folytonos négyzet- és körlap mikrofoneloszlások láthatósági függvényét és iránykarakterisztikáját mutatja be, azonos szélesség/sugar mellett. A jobb összehasonlíthatóság kedvéért az iránykarakterisztikákat a 2.6. ábra a $\theta = 0^\circ$, illetve a $\theta = 45^\circ$ síkokban ábrázolja.

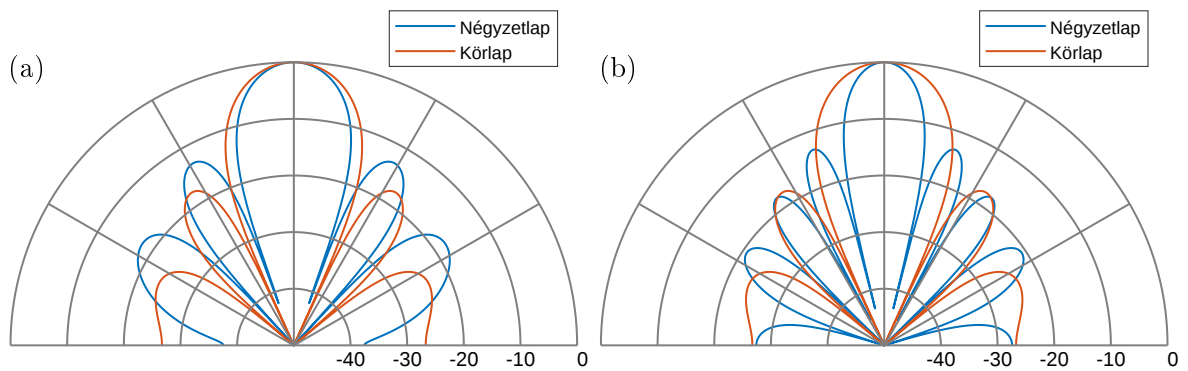
Megfigyelhető, hogy a négyzet alakú elrendezés esetén a főnyaláb szélesség már $\theta = 0^\circ$ esetén is kisebb a körlap alakú esetnél, azonban a körlap elrendezés melléknyaláb-elnyomása kb. 4 dB-lel nagyobb a négyzetesnél. A $\theta = 45^\circ$ síkban a nyálábszélesség a négyzetes eloszlás esetén tovább csökken, amely szélességet a négyzet átlójának hossza határozza meg.

2.3.3. Diszkrét mikrofontömb hatása

Az elméleti, folytonos mikrofoneloszlás diszkrétizálásának, azaz a véges számú mikrofon alkalmazásának hatása az előző fejezetben leírthoz hasonló módon a láthatósági függvény ismétlődését eredményezi, amely az iránykarakterisztikában nagy frekvenciákon erős oldalnyalábok megjelenéséhez vezet. Négyzetrácsos mintavételezés esetében ezek az ún. átlapolódási jelenségek egyszerűen



2.5. ábra. 0.5 m széles négyzet alakú és azonos átmérőjű ($R = 0.25$ m sugarú) kör alakú mikrofoneloszlás láthatósági függvénye (a–b) és iránykarakterisztikája (c–d) $f = 1$ kHz-en



2.6. ábra. 1 m széles négyzet alakú és azonos átmérőjű ($R = 0.5$ m sugarú) kör alakú mikrofoneloszlás iránykarakterisztikája $f = 1$ kHz-en a $\theta = 0^\circ$ (a), illetve a $\theta = 45^\circ$ (b) síkban.

leírhatók analitikusan: a mintavételezés hatására a $\Gamma(k_x, k_y)$ láthatósági függvény a mintavételi (horizontális, illetve vertikális) hullámszám egész számú többszörösein ismétlődik:

$$\Gamma_d(k_x, k_y) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \Gamma\left(k_x - m \frac{2\pi}{d_x}, k_y - n \frac{2\pi}{d_y}\right), \quad (2.40)$$

ahol d_x és d_y rendre a horizontális és vertikális mikrofontávolság.

A mikrofoneloszlás diszkretizálása négyzetrácsostól eltérő struktúrák esetén is a láthatósági függvény ismétlődéséhez, és így oldalnyalábok megjelenéséhez vezet, azonban általános esetben a mintavételi struktúra Fourier-transzformáltja, és így az átlapolódott láthatósági függvény ($\Gamma_d(k_x, k_y)$) nem áll rendelkezésre analitikusan. Ezeket az eseteket a továbbiakban pusztán numerikus számításokon keresztül vizsgáljuk. A szimuláció alapja a Dirac-delta függvény kiválasztó tulajdonsága ($\int \delta(x - x_0) f(x) dx = f(x_0)$). Ha a teljes mikrofontömböt a $[x_n, y_n]^T$ mikrofonpozíciókban elhelyezett Dirac-függvények összegeként modellezzük, azaz

$$B(x, y, \omega) = \sum_{n=1}^N \delta(x - x_n, y - y_n), \quad (2.41)$$

akkor a 2.32. integrál analitikusan kiértékelhető, és a láthatósági függvény, illetve az iránykarakterisztika

$$\Gamma(k_x, k_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \sum_{n=1}^N \delta(x - x_n, y - y_n) e^{ik_x x} e^{ik_y y} dx dy = \sum_{n=1}^N e^{ik_x x_n} e^{ik_y y_n} \quad (2.42)$$

$$\Psi(\omega, \theta_s, \phi_s) = \sum_{n=1}^N e^{ik \sin \theta_s \sin \phi_s x_n} e^{ik \cos \theta_s \sin \phi_s y_n} \quad (2.43)$$

alakban számítható numerikusan.

Az átlapolódás hatását a láthatósági függvényre és a $\theta = 0^\circ$ síkban mért iránykarakterisztikára a 2.7. ábra szemlélteti $f = c/d$ frekvencián, ahol d a négyzetrácsos mintavételi távolság, amely megegyezik körlap esetén a sugárirányú osztásközzel is. Ezzel a frekvenciaválasztással az iránykarakterisztika tartalmazza az első belapolódó csúcsokat is a láthatósági függvényből, amely csúcsok erős oldalnyalábokként jelentkeznek. Látható, hogy a körlap elrendezés előnye, hogy az iránykarakterisztika az átlapolódó oldalnyalábokat már csillapítva tartalmazza, míg négyzetes esetben azok a főnyaláb amplitúdójával vannak jelen.

2.3.4. Kereszt- és körelrendezések

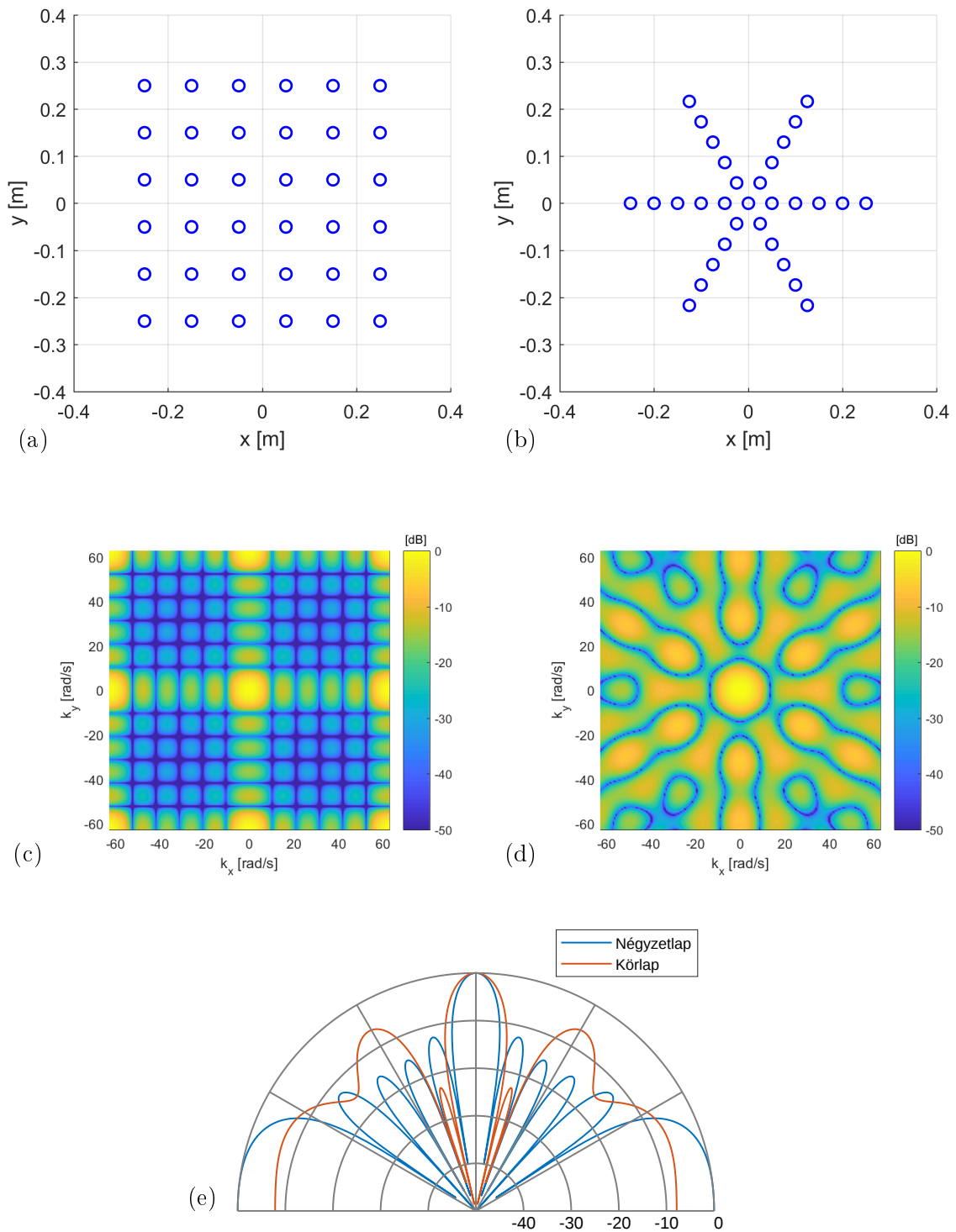
Az eddigiekben síkban kiterjedt mikrofonelrendezésekkel foglalkoztunk. A gyakorlatban általában a szükséges mikrofonok számának csökkentése érdekében azokat 2D kontúrok mentén helyezük el. Ezek közül a leggyakoribbak a kereszt, kör, illetve spirál mentén elhelyezett mikrofontömbök. Elsőként a kereszt, illetve kör mentén elhelyezett mikrofonosorokkal foglalkozunk, amelyek láthatósági függvényére folytonos esetben analitikus kifejezés is rendelkezésünkre áll.

Az egyszerű kereszt elrendezés, amely diszkrét esetben a 2.8. (a) ábrán látható, egyszerűen két egymásra merőleges vonalelrendezésként modellezhető. Ennek megfelelően az L_x horizontális és L_y vertikális hosszúságú folytonos keresztelrendezés láthatósági függvénye

$$\Gamma(k_x, k_y) = 2L (\text{sinc}(k_x L_x) + \text{sinc}(k_y L_y)) \quad (2.44)$$

alakú, míg az iránykarakterisztika

$$\Psi(\omega, \theta_s, \phi_s) = 2L (\text{sinc}(k \sin \theta_s \sin \phi_s L_x) + \text{sinc}(k \cos \theta_s \sin \phi_s L_y)). \quad (2.45)$$



2.7. ábra. Diszkrét négyzet alakú és azonos átmérőjű kör alakú mikrofoneloszlás geometriája (a–b) láthatósági függvénye (c–d) és iránykarakterisztikája (e) $f = 2\pi/c\Delta x$ -en

Levezetés nélkül, az R sugarú körvonal mentén elhelyezett folytonos mikrofonkontúr (amely diszkrét esetben a 2.8 (b) ábrán látható) láthatósági függvénye

$$\Gamma(k_x, k_y) = 2 \frac{J_0 \left(R \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \right)}{R \sqrt{k_x^2 + k_y^2}}, \quad (2.46)$$

ahol J_0 a nulladrendű Bessel-függvény, és iránykarakterisztikáját a

$$\Psi(\omega, \theta_s, \phi_s) = 2 \frac{J_0(kR \sin \phi_s)}{kR \sin \phi_s} \quad (2.47)$$

kifejezés adja meg.

A 2.8. ábra egy diszkrét, 24 elemből álló 1 m hosszú vonalelemekből létrehozott kereszt, illetve egy $R = 1\text{m}$ sugarú 24 elemből álló körelrendezés térbeli jellemzőit mutatja be. A láthatósági függvényből és az iránykarakterisztikákból látható, hogy a keresztelrendezés gyenge oldalnyaláb-elnomással rendelkezik a horizontális, illetve vertikális irányokból érkező hullámokkal szemben. Az ettől eltérő irányokra a keresztelrendezés irány szelektivitása javul, a melléknyaláb-elnomása kedvezőbb a körelrendezésnél. Ezzel szemben körelrendezés esetén a kapott iránykarakterisztika forgásszimmetrikus, egyenletes irány szelektivitást biztosít kisebb főnyaláb-szélesség mellett.

2.3.5. Spirárelrendezések

Az eddigiekben egyenletesen mintavételezett (pl. egyenletesen mintavett Descartes-, vagy polárkoordinátájú) mikrofoneloszlásokat tárgyaltunk, amely mintavételezés minden esetben a láthatósági függvény ismétlődéséhez, vagyis térbeli átlapolódáshoz vezet. A gyakorlatban az átlapolódási hatások minimalizálásának érdekében nem-egyenletes mintavételezési struktúrában helyezik el a mikrofontömb elemeit, amelyre a legelterjedtebb egy középpont körül spirál kontúr megfelelő mintavételezése. A következőkben néhány nem-egyenletesen mintavett spirárelrendezés kerül bemutatásra.

Az arkhimédészi spirál Az arkhimédészi spirál azon pontok mértani helye, melyeket egy rögzített ponttól állandó sebességgel távolodó és ugyanazon rögzített pont körül egyenletes szögsebességgel forgó pont pályája tartalmaz. A spirált meghatározza a kiindulási és végpontjának a középponttól vett távolsága (r_0 és $r_{\max}$), a spirál fordulatainak száma (η), illetve a mikrofonok száma (N). Az $n = 1, \dots, N$ mikrofon pozíciójának polárkoordinátái ezek alapján

$$\theta_n = \frac{(n-1)}{N-1} 2\pi\eta \quad (2.48)$$

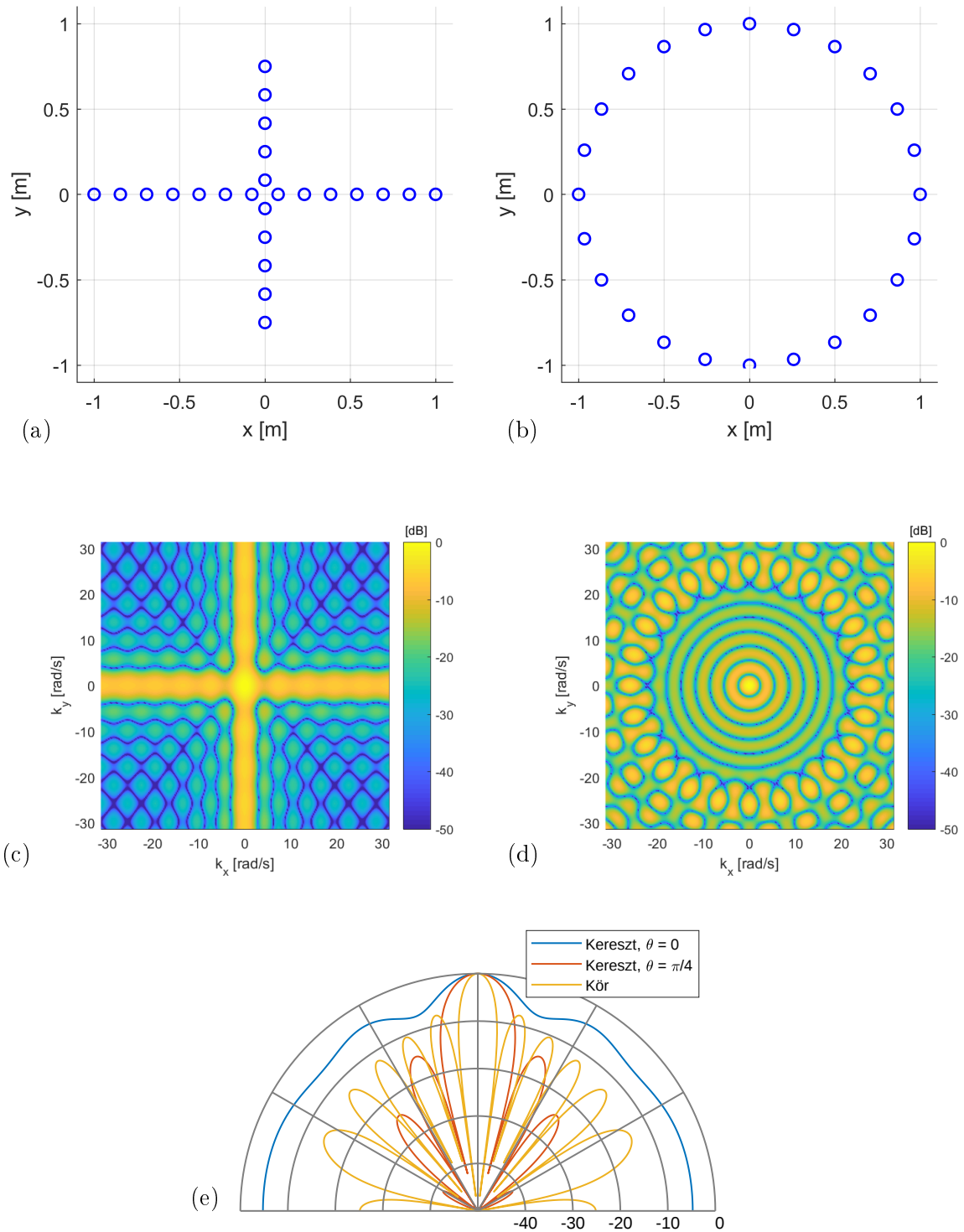
$$r_n = r_0 + \frac{r_{\max} - r_0}{2\pi\eta} \theta_n. \quad (2.49)$$

Az arkhimédészi spirál $N = 24$ pontra, $\eta = 3$ fordulat mellett a 2.10. ábrán látható.

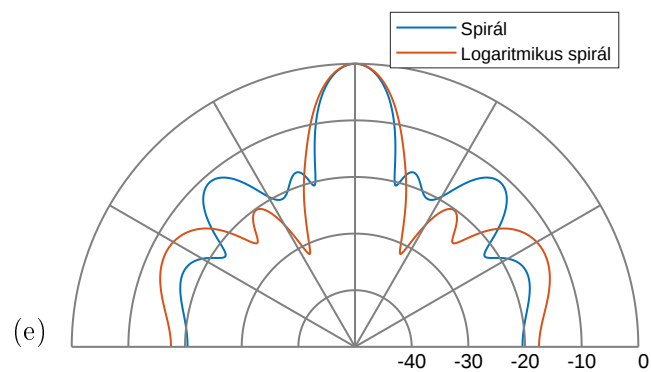
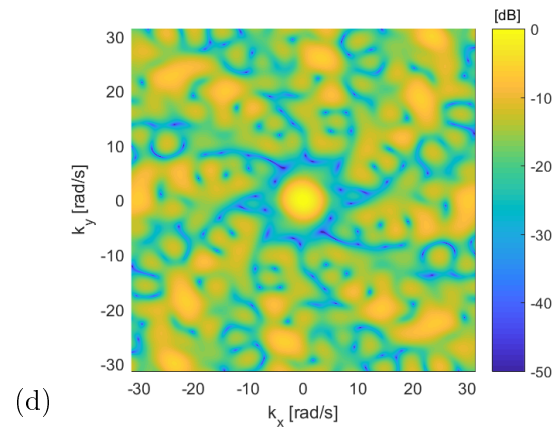
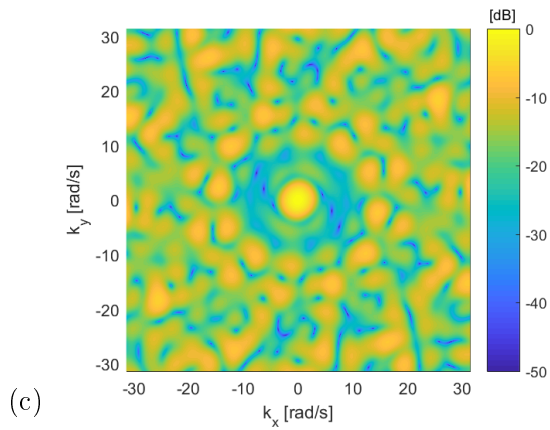
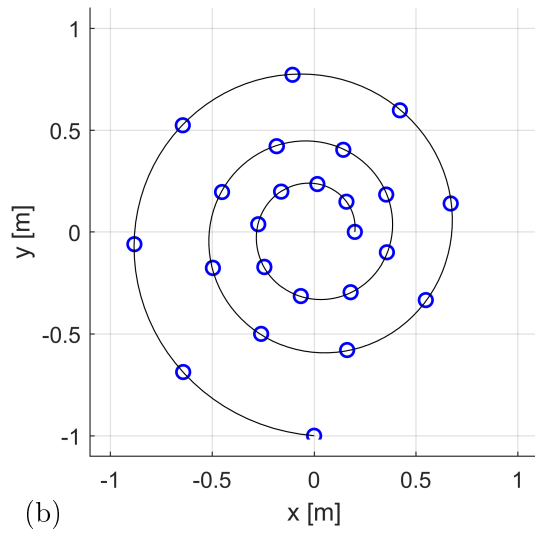
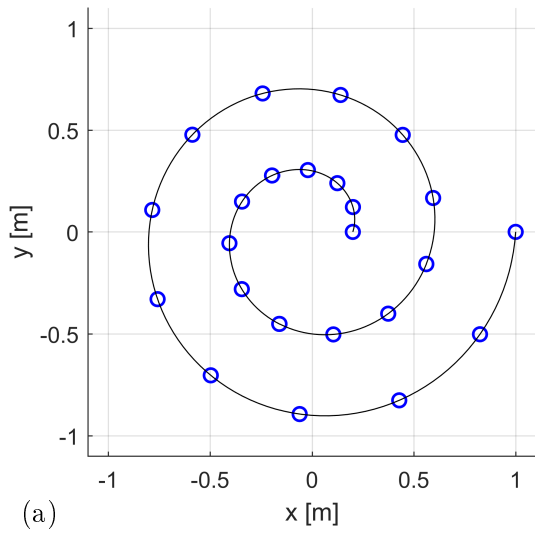
A logaritmikus spirál A logaritmikus spirál esetében a spirál sugara a szögelfordulás függvényében exponenciálisan nő. A spirál paraméterei az origótól vett maximális és minimális távolság (r_0 és $r_{\max}$), a spirál fordulatainak száma (η) és az összes mikrofonszám N mellett, egy horizontális és vertikális nyújtási paraméter, rendre ε_x és ε_y . Az egyszerűség kedvéért bevezethetjük az a és b segédváltozókat:

$$a = r_0 \left(\frac{N}{\varepsilon_x N + 1} \right), \quad (2.50)$$

$$b = \frac{1}{2\pi\eta} \ln \left(\frac{r_{\max}}{a \sqrt{(1 + \varepsilon_x)^2 \cos^2(2\pi\eta) + (1 + \varepsilon_y)^2 \sin^2(2\pi\eta)}} \right), \quad (2.51)$$



2.8. ábra. Diszkrét kereszt és kör alakú mikrofonelrendezések geometriája (a–b), láthatósági függvénye (c–d) és iránykarakteristikája (e) $f = 1$ kHz-en a $\theta = 0^\circ$ és $\theta = 45^\circ$ síkokban



2.9. ábra. Arkhimédészi és logaritmus spirál mikrofonelrendezések geometriája (a–b), látthatósági függvénye (c–d) és iránykarakteristikája (e) $f = 1$ kHz-en a $\theta = 0^\circ$ síkban

ahol a b paramétertől függ, hogy milyen gyorsan „tágul” a spirál és melyik irányba csavarodik. Speciális esetben, ha $b = 0$, a spirál a sugarú körré fajul. Ha a b paraméter végtelenhez tart, a spirál egyeneshez közelít.

Az $n = 1, \dots, N$ mikrofon pozíciójának Descartes-koordinátái ezek alapján

$$\theta_n = \frac{(n-1)}{N-1} 2\pi\eta \quad (2.52)$$

$$x_n = \left(\frac{n + \varepsilon_x N}{N} \right) a \cos(b\theta_n) e^{b\theta_n}, \quad (2.53)$$

$$y_n = \left(\frac{n + \varepsilon_y N}{N} \right) a \sin(b\theta_n) e^{b\theta_n}. \quad (2.54)$$

Az egyszerű arkhimédészi és logaritmikus spirálelrendezések geometriáját, illetve a hozzájuk tartozó láthatósági függvényeket és a horizontális síkban mért iránykarakteristikákat a 2.10. ábra mutatja be. A szimulációkat $N = 24$ mikrofonra, $r_{\max} = 1$ m, valamint $\frac{r_0}{r_{\max}} = 0.2$ -re végeztük el. Megfigyelhető, hogy a főnyaláb szélességét mindkét esetben a spirál maximális sugara határozza meg, amely a vizsgált esetekben megegyezik. A logaritmikus spirál azonban a spirál középpontjának közelében megnövelt mikrofonszámból eredően jobb melléknyaláb-elnyomást valósít meg.

A Dougherty-féle logaritmikus spirál A Dougherty-féle logaritmikus spirál a logaritmikus spirál elrendezésből származtatható, egyenlő ívhosszanként elhelyezett mikrofonokkal. A spirál paraméterei az origótól vett maximális és minimális távolság (r_0 és $r_{\max}$), a spirál érintőjének a sugárirányú vektorral (középpontból az adott pontba mutató vektorral) bezárt szöget (ν) és a mikrofonok száma (N). A spirál kumulált ívhossza az n . mikrofonpozícióban

$$l_n = \frac{n-1}{N-1} \cdot \frac{r_0 \sqrt{1 + \cot^2 \eta}}{\cot \eta} \left(\frac{r_{\max}}{r_0} - 1 \right) \quad (2.55)$$

alakban írható, amely összefüggést felhasználva a spirál mentén a mikrofonok pozíciójának a polárkoordinátái:

$$\theta_n = \frac{1}{\cot \eta} \ln \left(1 + l_n \frac{\cot \eta}{r_0 \sqrt{1 + \cot^2 \eta}} \right), \quad (2.56)$$

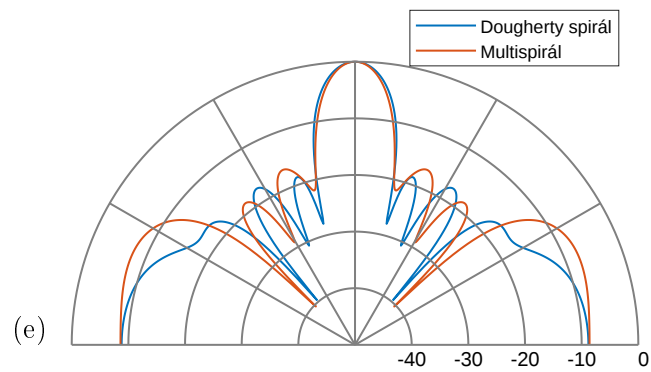
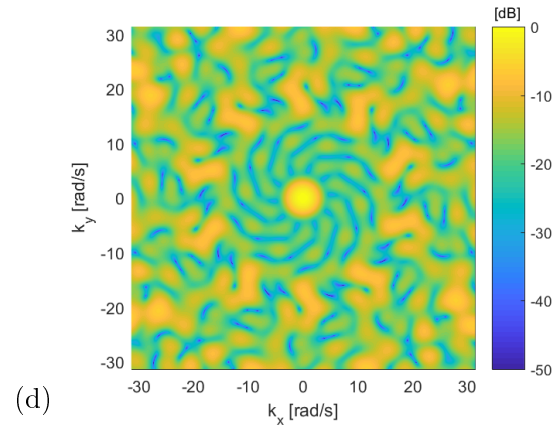
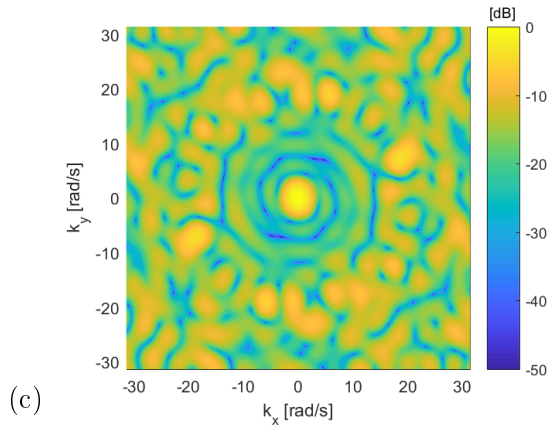
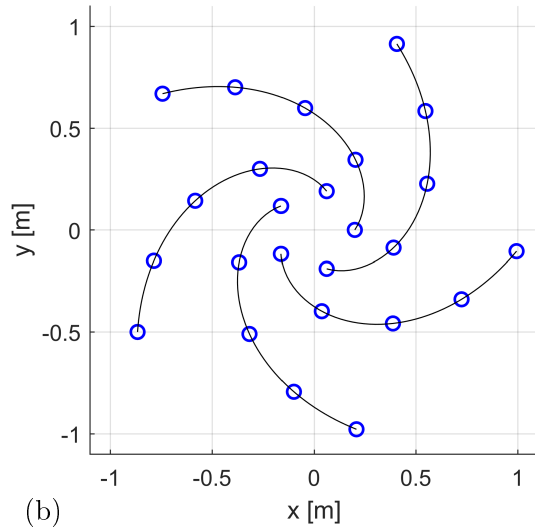
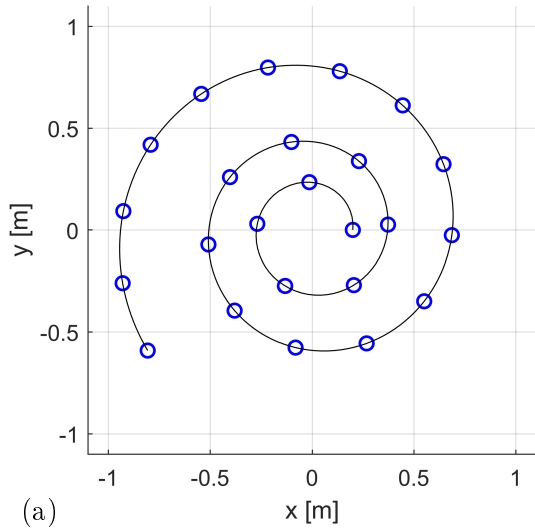
$$r_n = r_0 e^{\cot \eta \theta_n}. \quad (2.57)$$

Az elrendezést $N = 24$, $\nu = \frac{15\pi}{32}$, $r_{\max} = 1$ m és $r_0 = 0.2$ m mellett a 2.10 (a) ábra szemlélteti.

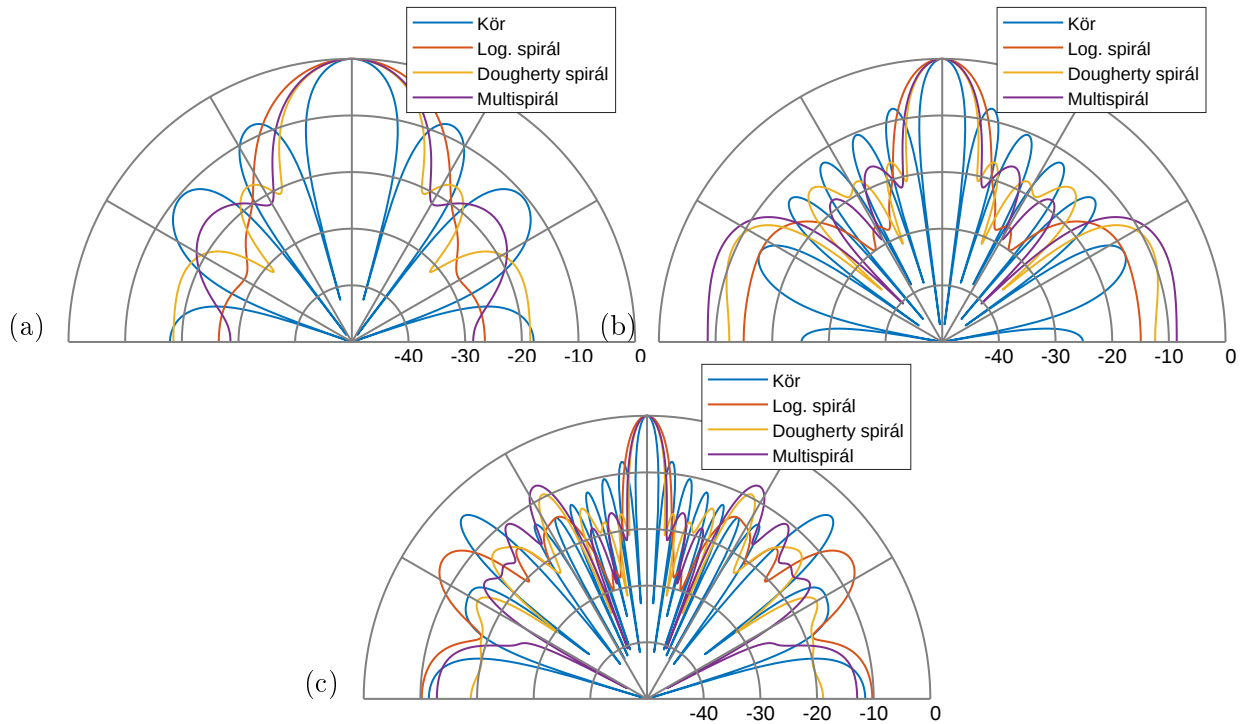
Multispirál elrendezés A multispirál M darab különálló spirálem együtteséből áll, az origó körül egyenlő szöggel elforgatva. Természetesen ezen spirálemek típusa tetszőleges lehet. Jelen esetben $N = 5$ mikrofonból álló Dougherty féle spirálemeket vizsgálunk, $\nu = \frac{5\pi}{16}$ mellett, amely elrendezést a 2.10 (b) ábra mutatja be. A spirálemek száma $M = 5$, így az összes mikrofon száma $N \cdot M = 25$.

Kör- és spirálelrendezések összehasonlítása Az eddig tárgyalt kör- és spirálelrendezések iránykarakteristikáját a 2.11. ábra hasonlítja össze különböző frekvenciákon. Megfigyelhető, hogy a legszűkebb főnyalábot a körelrendezés biztosítja, azonban a melléknyaláb-elnyomása is ennek az elrendezésnek a legkisebb. Ezen felül a térbeli átlapolódás hatására is ez az elrendezés a legérzékenyebb: a mikrofonok közti véges távolságból származó oldalnyalábok a 2 kHz-es iránykarakteristikában a főnyalábhöz képest ≈ -5 dB amplitúdóval jelennek meg.

A vizsgált esetek közül a logaritmikus spirál elrendezés melléknyaláb-elnyomása a legnagyobb, ugyanakkor ehhez tartozik a legszélesebb főnyaláb is, illetve a térbeli átlapolódási jelenségek ennek esetében is hangsúlyosan jelentkeznek.



2.10. ábra. Dougherty-féle logaritmikus és multispirál mikrofonelrendezések geometriája (a-b), láthatósági függvénye (c-d) és iránykarakteristikája (e) $f = 1$ kHz-en a $\theta = 0^\circ$ síkban



2.11. ábra. Spirál és körelrendezések iránykarakteristikája a horizontális síkban 500 Hz-en (a), 1 kHz-en (b) és 2 kHz-en (c).

A legjobb kompromisszumot a fenti elrendezések közül a Dougherty-féle elrendezés jelenti, amely a spirál elrendezések közül a legszűkebb melléknyalábot valósítja meg, míg a térbeli átlapolódás miatt megjelenő melléknyalábok is legalább 10 dB csillapítást szenvednek a főnyaláb amplitúdójához képest.

3. fejezet

Akusztikai kamerák

Az alábbi fejezetben a kereskedelmi forgalomban kapható, nyalábformálást alkalmazó mikrofonrendszereket mutatjuk be. Az elérhető rendszerek száma folyamatosan nő, a digitális mikrofonok elterjedésének köszönhetően a növekedés egyre intenzívebb. Az alábbi leírásban az ismertebb gyártók termékeire és a projekt célkitűzéséhez alkalmazható rendszerekre fókuszálunk.

A termékekről általánosságban elmondható, hogy három részből állnak: a mikrofontömbből, az adatgyűjtő-digitalizáló egységből és egy számítógépen futó szoftverből. Ezeken kívül természetesen több kiegészítő is elérhető a termékekhez, mint például mobil tápegység, állványok.

A fejezet második részében ismertetjük a projektcél szempontjából fontosabb tulajdonságokat és az ezek alapján optimálisnak ítélt eszközt.

3.1. Akusztikai kamera rendszerek jellemzői

Elektret- és MEMS mikrofonok

A kamerarendszerek egyik lehetséges csoportosítását az alkalmazott mikrofonok szerinti megkülönböztetés adhatja. Az egyik csoportba tartoznak az akusztikai mérés technikában elterjedt, negyed vagy fél collos átmérőjű prepolarizált elektretmikrofonokat, a másik csoportba pedig a MEMS technológián alapuló, miniatűr mikrofonokat alkalmazó rendszerek. A nagyobb múlttal rendelkező, patinásabb cégek jellemzően elektretmikrofonokat alkalmaznak, hiszen az ehhez tartozó technológia már kellően kiforrott, rendelkezésükre áll, továbbá a mikrofonok működési elve garantálja a jó jel-zaj-viszonyt, a nagy dinamikatartományt és a széles frekvenciatartományban lineáris átvitelt. Alkalmazási célunk szempontjából fontos megjegyezni, hogy a mikrofonok érzékenysége a hőmérséklet változásától csak kis mértékben függ, időjárásálló kivitelben a pára, eső és hó elleni védelem is biztosított, így akár tartós kültéri használatra, fixen telepített rendszer létesítésére is alkalmasak.

A MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) technológiával nagyon kis méretű mikrofonok is létrehozhatók, ennek köszönhetően a MEMS mikrofonokat elsősorban mobiltelefonokban és más kis méretű szórakoztatóelektronikai eszközökben használják. A MEMS mikrofonok között létezik analóg és digitális változat is. Az analóg változat – az elektretmikrofonhoz hasonlóan – analóg feszültség- (vagy töltés-) kimenettel rendelkezik, így működéséhez külön kondicionáló áramkör (erősítő) szükséges és az adatrögzítés előtt a jeleket digitalizálni kell. A digitális MEMS mikrofonok esetében a kondicionálás és digitalizálás a mikrofon tokozásán belül megtörténik, ezért az akusztikai kamera rendszer adatgyűjtő-digitalizáló egységből elhagyható az analóg-digitális átalakítás. Így az önmagukban is méretcsökkenést eredményező kisméretű mikrofonokkal további jelentős helymegtakarítás és költségcsökkentés érhető el. A digitális jelek összegyűjtése (nyalábolás, multiplexálás) FPGA csipen vagy DSP processzoron, lényegében szoftveres szinten elvégezhető, és a kamerarendszerből teljesen elhagyhatók a zavarérzékeny és költséges analóg áramkörök és átalakítók. A (szinte tisztán) szoftveres megvalósíthatóság és a MEMS mikrofonok

alacsony ára – mely a minőségi elektretmikrofonok árának tizede vagy még alacsonyabb – még tovább csökkentik a fejlesztési költségeket. Érthető módon egyre több digitális MEMS mikrofon alapú akusztikai kamera jelenik meg a piacon, ezekben az analóg rendszerekre jellemző 24–48 mikrofon helyett 64 vagy még több mikrofon kap helyet, áruk pedig az analóg rendszerek árának töredéke. A technológiának természetesen van hátránya is: a MEMS mikrofonok dinamikatarományja jóval kisebb, mint az elektretmikrofonoké és saját zajuk is magasabb, ehhez igazodva a digitális MEMS mikrofonok esetében a felbontás jellemzően 12–16 bit.

Kötött és szabad elrendezésű mikrofonok

Az akusztikai kamera rendszerek egy másik fontos tulajdonsága a rendszer flexibilitása, optimalizálhatósága. A rendszerek egy része fix mikrofonelrendezésű, ilyen például a Head Acoustics Visor nevű kamerája, amelyben a mikrofonok egy, a gyártó által meghatározott mintázatban helyezkednek el. Bár a könnyen használható termék kompakt és robusztus, nem lehetséges más mikrofonelrendezések vizsgálata, a projekt céljának megfelelően többféle elrendezés vizsgálata, kialakítása. A mikrofonok térbeli elhelyezkedése szempontjából a Visor kamerához hasonlóak a Norsonic kamerái (pl. a különböző méretű Nor848A kamerák) és a legtöbb digitális MEMS mikrofon alapú rendszer is. A fix elrendezés hátránya nem csak a mikrofonok által alkotott mintázatból (pl. kör, kereszt, spirál vagy véletlenszerű, síkban elrendezett vagy térbeli elrendezésű) adódó kötött, irányfüggő zavarérzékenység (point spread function), hanem a kamera térbeli kiterjedéséből adódó térbeli felbontás és a frekvenciafüggő nyalábszélesség rögzíthetősége, kötöttsége is. A szabadon elrendezhető mikrofonokkal tetszőleges, az alkalmazási célhoz optimalizált mikrofonmintázat alakítható ki, és a rendszer fizikai mérete is befolyásolható, ami fontos és előnyös tulajdonság egy fejlesztési projekt esetén.

Mikrofonok száma

A mikrofonok elrendezése mellett fontos szempont a rendszerben lévő mikrofonok száma is, hiszen ez is befolyásolja az elérhető térbeli felbontást és a frekvenciatartománybeli viselkedést. A kereskedelmi forgalomban kapható, elektretmikrofonokból álló rendszerek jellemzően 24–32–48 mikrofont tartalmaznak, míg a MEMS technológián alapuló rendszerek alapkiépítésében ennél több (64–128) mikrofon található. A fejlesztés szempontjából érdekes kérdés a mikrofonok számának növelhetősége, azaz a bővíthetőség. Az analóg rendszereknél a bővítés általában blokkokban történik: például 24 csatornás kondicionáló és digitalizáló egységekből és az ehhez kapcsolható 24 mikrofonos kötegekből álló blokkok köthetők össze, így 24, 48, 72 ... mikrofonos rendszer hozható létre. A rugalmas bővíthetőség csak szabadon elrendezhető (free-form) rendszerrel képzelhető el. A fix mikrofonelrendezésű elektretmikrofonos rendszerek általában az adott elrendezéshez tartozó célhardverrel rendelkeznek, ami kizárja a bővítés lehetőségét. A bővítés itt az önálló rendszerek számának növelésével és ezek párhuzamos működtetésével lehetséges, ami már a bekerülési költséget tekintve sem optimális megoldás a nehéz jelintegráció és az egyéb hátrányok, pl. az egységenként kötött irányérzékenység mellett. Az elektretmikrofonokból álló rendszerekkel szemben a MEMS-alapú rendszerek többnyire fix elrendezésűek. A digitális mikrofonokból álló eszközök alacsonyabb árának és a digitális jelvezetés adta egyszerűségnek köszönhetően már gyártói szinten is megjelent a több, párhuzamosan működő rendszer integrációjának ötlete, pl. a Norsonic Hextile-Multitile akusztikai kamera, amelyik az önállóan is elérhető és működő, fix elrendezésű mikrofonokat tartalmazó Hextile egységekből áll össze.

Hozzáférés az adatokhoz

Az akusztikai mérés technikában a mai napig előszeretettel készítenek olyan eszközöket, amelyek nem engedik hozzáférni a felhasználókat a nyers adatokhoz, az adatok csak a gyártó által nyújtott célszoftveren keresztül, feldolgozott formában érhetőek el. Akusztikai kamera esetében ez azt jelenti, hogy a szoftver csak a beépített (megvásárolt) fókuszáló algoritmussal előállított

intenzitáskép megjelenítésére, és az egyes pontokba fókuszálással kapott hangjelek rögzítésére és lejátszására képes, és nem – vagy csak külön megvásárolt licenz ellenében – lehetséges további algoritmusok kipróbálása vagy az egyes mikrofonok által felvett nyers, feldolgozatlan hangjelek exportálása. Néhány egyszerűbb, tisztán delay-and-sum algoritmust megvalósító eszközben a fókuszálás hardveres szinten megtörténik, ami kizárja a rendszer bővítésének és a nyers adatok elérésének lehetőségét is. A projekt cél szempontjából olyan kamerarendszerre van szükség, amelyből a nyers adatok kinyerhetőek, így azokon tetszőleges, saját fejlesztésű nyálábformáló és zajszűrő algoritmus is tesztelhető.

Beépített videokamera, egyéb szenzorok

Az akusztikai kamerák esetében fontos lehet, hogy az alkotott „hangkép” a kamera által látott területről készült fényképre vagy videofelvételre legyen illesztve. Ehhez olyan rendszerre van szükség, amelynek videokamera is része. A piacon elérhető eszközök többségében található videokamera, némelyikben több optikával ellátott, a térbeli távolságmérést is lehetővé tevő kamerarendszer van. A projekt során fejlesztendő többszenzoros detektor tartalmaz optikai eszközöket, ezért az akusztikai kamerával szemben nem követelmény, hogy az külön videokamerát is tartalmazzon. A fejlesztés során az algoritmusok és a működési mód vizualizálásához egy jó minőségű webkamera is elegendő, ennek képe néhány egyszerű kalibrációs lépéssel illeszthető a mikrofonok jeléből előállított akusztikai képre.

A termékek közül több tartalmaz hőmérséklet- és páratartalomérzékelőket is, melyek a környezeti zajmérésekhez nyújtanak kiegészítő információkat, a projekt cél szempontjából azonban feleslegesek.

3.2. Komplet rendszerek

3.2.1. gfai tech, Németország

A németországi *gfai tech GmbH*¹ a legnagyobb termékválasztékot nyújtó gyártó. A cég tájékoztatója szerint az ő termékük volt az első kereskedelmi forgalomban kapható akusztikai kamera rendszer, 2001-ben jelent meg a piacon. Az akusztikai kamera kifejezést is ők használták először a nyálábformálást alkalmazó rendszerre.

A gfai termékpalettája többféle koncepciójú mikrofontömböt és ezekhez tartozó adatgyűjtőt tartalmaz, az ezekből összeállított hardver a NoiseImage szoftverrel kiegészítve alkotja az akusztikai kamerát.

Mikrofontömbök

A gfai két évtizedes piaci jelenlétének köszönhetően mára számtalan különböző akusztikai kamerát fejlesztett ki, termékei között alapvetően három különféle mikrofontömbtípus található:

- kétdimenziós tömbök: a mikrofonok egy síkban helyezkednek el;
- háromdimenziós tömbök: a mikrofonok egy gömbfelület mentén helyezkednek el;
- kézben tartható tömbök: kétdimenziós, kis méretű tömbök.

Minden csoportban több termék található, ezek többnyire a mikrofonok elrendezésének mintázatában és méretükben (kiterjedésükben) térnek el egymástól, kiegészítve az egyes alkalmazási céloknak megfelelő praktikus funkciókkal (pl. összehajthatóság). A kínálatban található elektret-mikrofonokból és MEMS mikrofonokból álló rendszer.

A termékek elnevezése többnyire egyértelműen utal a mikrofontömb kialakítására (pl. Ring, Star, Sphere). Az elnevezésben általában két szám szerepel: az első szám a tömbben található

¹<http://www.acoustic-camera.com>

mikrofonok számát adja meg, a második a befoglaló geometriai alakzat jellemző méretét (pl. kör vagy gömb átmérőjét cm-ben). A névben szereplő *pro* az adatrögzítő hardverre utal: így jelölik az mcdRec felvevővel kompatibilis egyedeket. Korábban létezett egy dRec48C adatrögzítő is, az ezzel kompatibilis eszközöket *easy* szóval jelölték, de ezt mára kivették a palettáról, viszont a felvevőre utaló jelzőket megtartották. A fejlesztésekből az látható, hogy elhagyták a kis mikrofonszámú (24 mikrofonos) kamerákat.

A tömbök váza egyedi készítésű karbonszál as műanyag, ez biztosítja a mikrofonok állandó pozícióját. Egy tömböt leszámítva mindegyikben ugyanazt a stúdió-mikrofon típust használják. A tömbök középpontjában legalább egy ethernet vagy USB csatlakozású, fix fókuszú videokamera található.

A *kör alakú mikrofontömbök (ring arrays)* esetében a mikrofonok egy körgyűrű mentén helyezkednek el, a kamera akusztikailag transzparens. Az elérhető kör alakú tömbök: Ring32-35 AC Pro, Ring48-75 AC Pro, Ring72 AC Pro.

Az egyéb *kétdimenziós mikrofontömbök* esetében a mikrofonok véletlenszerűen, spirál alakban vagy más matematikai modellel leírható elrendezés mentén helyezkednek el, a tömbök kialakítása itt is transzparens. Az elérhető típusok: Fibonacci120 AC Pro és EVO AC pro (96–168 mikrofonnal elérhető), de ide sorolható a Star48 AC Pro nevű, csillag alakú, összecuskható mikrofontömb, melyet kifejezetten a nagy távolságból történő mérésekhez ajánlanak, mivel nyitott állapotban átmérője 3,4 m.

A *gömb alakú mikrofontömbök (sphere arrays)* esetében a mikrofonok egy gömbfelület mentén helyezkednek el, a kamera akusztikailag transzparens. A mikrofonok pozícióját egy vázszerkezet határozza meg. Az elérhető típusok Sphere48-35 AC Pro, Sphere120-60 AC Pro.

Fentiekén túl két fontos típust emelnénk ki. A *Mikado* fantázianevű kamera egy olyan könnyű, kézben tartható kamera, ami a többitől eltérően digitális MEMS mikrofonokat alkalmaz (96 mikrofont), és egy tablettel kiegészítve teljesen önálló mérőrendszerként tud funkcionálni. Az eszközhöz külön adatrögzítőt is kifejlesztettek (DMC402L data recorder).

Free form array

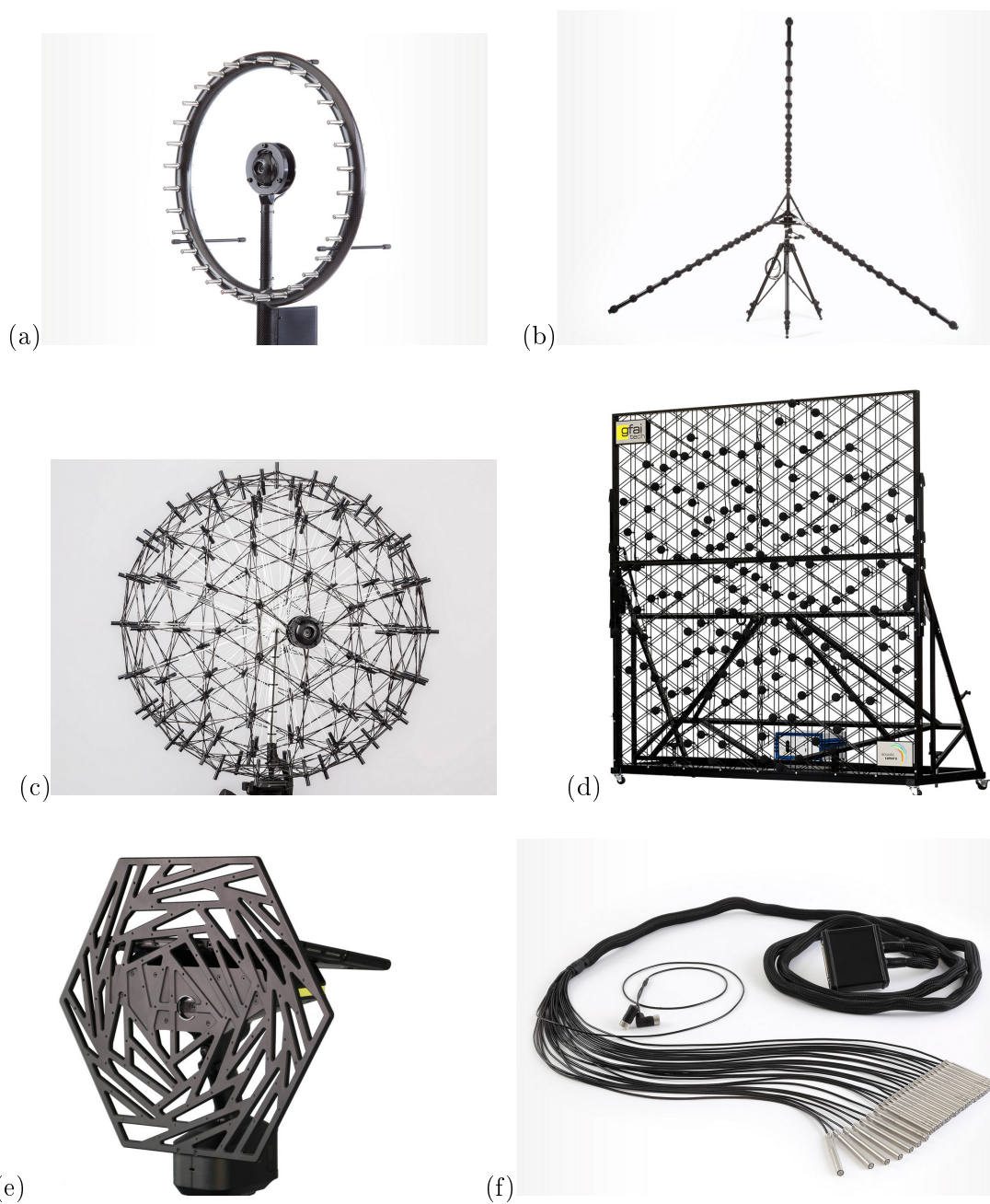
A másik típus a projekt szempontjából a legígéretesebb: ez egy 24 mikrofonból álló free form mikrofonköteg, ami a többi kamerában is használt elektretmikrofonból áll, ezek lengőkábelrel, közös csatlakozóval köthetők be az mcdRec adatrögzítőbe. A mikrofonokat így tetszőleges alakzatban el lehet helyezni, a térbeli alakzat módosításával az adott felhasználási célra optimalizált akusztikai kamera alakítható ki. A mikrofonkötegből több is rendelhető, így 24–48–72 vagy akár még több mikrofonból álló rendszer is kiépíthető.

Mivel ez a megoldás tűnik a gyártó termékei közül a projekt céljainak megfelelőnek, néhány egyéb adatot is megadunk. A mikrofonkábelek hossza 2,50 m, de megfelelő SymBus hosszabbító kábelrel a mikrofonok és az adatrögzítő közötti távolság akár 20 m is lehet. A mikrofonokban a Sennheiser 4211 típusú kapszulája található, ami egy negyedcollos elektretmikrofon. Frekvenciaátvittele 20 Hz–20 kHz közötti, átfogási tartománya 28–130 dBA (alapzaj és maximális jelszint), IP20 védelemmel, 0–45°C hőmérséklettartományban, akár 80% relatív páratartalom mellett is garantált működéssel.

A szabad alakzatú kamera esetében kiemelten fontos a mikrofonok pozíciójának ismerete, amihez a cég egy külön szoftver eszközt (ADECO) kínál. A szinkronizáció egy az adatrögzítőbe is bekötött impulzusgenerátor jele alapján történik, az elérhető térbeli pontosság 1,4 mm alatti.

A gfa termékeinek fontos tulajdonsága, hogy a nyers hangfájlokhoz Matlab program segítségével hozzáférhetünk, így ez fejlesztés szempontjából további fontos előnyt jelent.

A különböző tömbökre példa a 3.1. ábrán látható.



3.1. ábra. A gfai tech különböző mikrofontömbjei: Ring32-35 (a), Star48 (b), Sphere120-60 pro (c), EVO (d), Mikado (e), Free form bundle (f) – Forrás: <http://www.acoustic-camera.com>



3.2. ábra. A gfaitech professzionális adatgyűjtője: mcdRec adatgyűjtő – Forrás: <http://www.acoustic-camera.com>

Adatgyűjtők

Ahogy a fentiekben is írtuk, a mikrofontömbök többnyire az mcdRec professzionális adatgyűjtőhöz csatlakoztathatók, kivétel ez alól a digitális MEMS mikrofonokból álló Mikado, amihez külön adatgyűjtő készült (DMC402L data recorder). Az mcdRec adatgyűjtő a 3.2. ábrán látható, 10 collos rack méretű. Az adatgyűjtő mérőkártyákkal bővíthető a kívánt méretre. Az akusztikai kamera alkalmazáshoz 24 csatornás, 24 bites, differenciális bemenetű kártyát kínál a cég.

Az *mcdRec* legfeljebb 168 differenciális mikrofonbemenetre bővíthető, emellett 12 digitális bemeneti csatornával is rendelkezik. A számítógéphez 1 Gbit-es ethernet kapcsolattal köthető.

A felvételek hosszát az adatgyűjtők tárhelykapacitásán túl az akkumulátor kapacitása is korlátozza, de az eszközök hálózati tápellátásról is üzemeltethetők.

A NoiseImage szoftver

A NoiseImage szoftver plug-in koncepciójú: az alapmodul igény szerint bővíthető különböző funkciókkal (spektrumanalízis, közeltéri holográfia, szélescsatorna, hangminőség, teremakusztikai, stb. modulok). A grafikus felhasználói felületen idő- és frekvenciatartománybeli és fordulatszám-arányos megjelenítés is választható. A csatornákra szűrők kapcsolhatók, az analízis a képsík tetszőleges pontjára (virtuális forrásra) elvégezhető. A szoftver Windows operációs rendszeren fut.

3.2.2. Norsonic, Norvégia

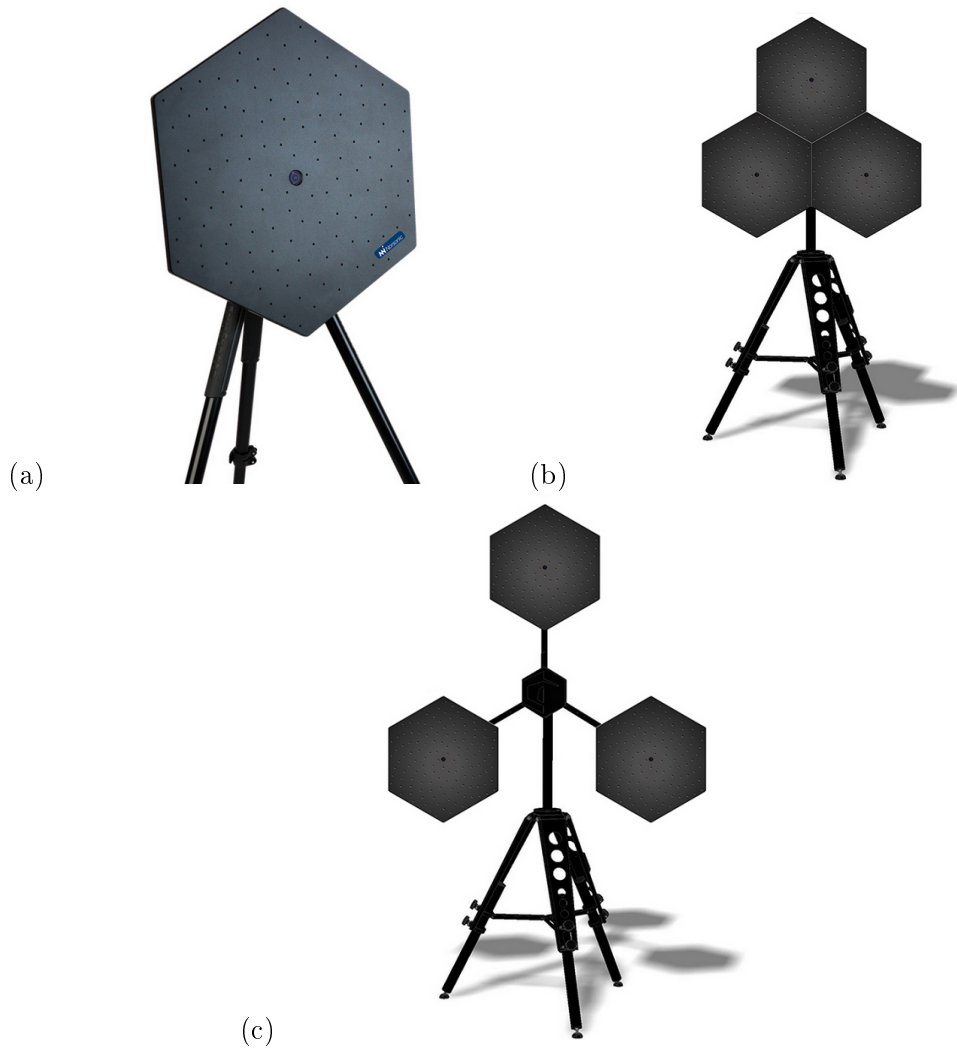
A *Norsonic* kameráinak hardver és szoftver platformját a Squarehead Technology² biztosítja. A cég fő profilja a biztonságtechnikai és felügyeleti (surveillance) célú mikrofontömb-rendszerek készítése, honlapjukon ezen rendszerekről bővebb információ csak regisztráció után érhetőek el.

A *Norsonic*³ cég két különböző koncepciójú akusztikai kamera rendszert gyárt. A fix elrendezésű, nem bővíthető, Nor848A típus háromféle méretben kapható. A 0,4 m átmérőjű 128, az 1,0 m átmérőjű 256, míg az 1,6 m átmérőjű 384 digitális MEMS mikrofont tartalmaz, az eszközök tömege rendre 2,4, 11 és 16 kg. A MEMS mikrofonok 16 bites 44,1 kHz mintavételi frekvenciájú digitális jelet szolgáltatnak. Az eszköz közepén egy 1600 × 1200 pixel felbontású videokamera található. Ezek az eszközök nem bővíthetőek, nem összehajthatóak, jellemzően zajforráslokalizációra használhatók.

A *Norsonic* másik rendszere egyszerűen az Acoustic Camera nevet kapta. Az eszköz alapját a Hextile nevű, kb. 41 × 48 cm kiterjedésű, hatszög alakú sík kameraelem képezi, amiben 128 darab digitális MEMS mikrofon kapott helyet. Érdekes ötlet, hogy három Hextile kamera rendszerbe köthető, ez a Multitile eszköz, a hatszögű elemek egymás mellett szorosan, és egymástól kissé eltolva is rögzíthetők – így az eredő rendszer mérete 83 × 84 cm illetve 126 × 121 cm. A kiterjesztett

²Squarehead Technology AS, Norvégia; <http://www.sqhead.com>

³<http://www.norsonic.no>



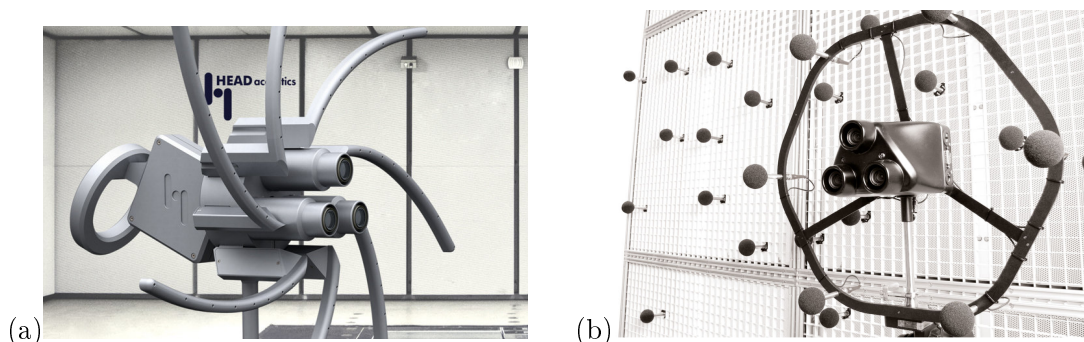
3.3. ábra. A Norsonic cég akusztikai kamerái: (a) Nor848A rendszer 0,4 és 1,0m méretű elemei, (b) Hextile elem, (c) Multitile kiépítés, (d) Multitile kiépítés low frequency módban – Forrás: <http://www.norsonic.com>

méretű Multitile rendszer méretéből következően különösen jó kisfrekvenciás irányérzékenységgel rendelkezik.

A kör alakú lapok karbonszálas műanyagból, a hatszögek alumíniumból készült, hangvisszaverő felületű táblák, ezek síkjában vannak elhelyezve a mikrofonok. A cég által kínált Multitile megoldásban akár több Hextile elem is összeköthető, az elemek számára a cég felső korlátot nem adott meg.

A rendszerhez saját szoftver tartozik, a számítógéphez USB csatlakozón keresztül kapcsolódik.

A nagyszámú mikrofonnak köszönhetően a melléknyalábok szintje alacsony, a fantomforrások kiszűrhetőek, a hangvisszaverő felület pedig a kamera mögül érkező jelek elnyomását növeli. A rendszer az összes mikrofon és a videokamera jelét rögzíti a számítógépen, így a valós idejű analízis mellett az off-line feldolgozás is lehetséges. A rendszer fordulatszám bemenettel is rendelkezik, így forgógépek zajanalízisére is használható. Grafikus felületen kiválasztható tetszőleges pontra fókuszálhatunk (tetszőleges pontba hallgathatunk bele), a jelet valós időben szűrhetjük a kívánt frekvenciatartományra. A jel spektruma keskenysávban (FFT), oktáv- és tercésávban is vizsgálható. A többi rendszerhez hasonlóan, a képalkotás itt is sík felületre korlátozódik, a képsík távolsága a szoftverben állítható.



3.4. ábra. A Head acoustics VISOR kamerafeje a videokamerákkal (a), a VISOR Flex rendszer (b) –
 Forrás: <http://www.head-acoustics.de>

3.2.3. HEAD acoustics, Németország

A *HEAD acoustics GmbH*⁴ cég a többcsatornás hangfelvétel és reprodukció területének egyik legismertebb szereplője. VISOR (Visualization of Sound Sources in Real Time) nevű akusztikai kamerájuk több érdekes megoldást tartalmaz.

A rendszer a 3.4. ábrán látható. A 80 cm átmérőjű kamerafej egy központi egységből és 7 levehető karból áll, így könnyen szállítható, szervizelhető. A karok mindegyike 8-8 mikrofont tartalmaz, a mikrofonok egy logaritmikus spirál mentén helyezkednek el, egy síkban. A karokra külön szélvédő szívacs is rendelhető (ez az opció a többi kameránál nem elérhető). A kamerafej egy speciális kábellel köthető az adatgyűjtő hardverbe, ami egy szabványos MADI (Multichannel Audio Digital Interface) kábellel (hangjelek számára), és egy ethernet kábellel (videojelek számára) csatlakoztatható a számítógéphez.

A VISOR-fejben három videokamera található (*MultipleEye technology*), ennek segítségével a hangforrás és a kamera közötti távolság meghatározható, így bármelyik forrásra fókuszálhatunk. Mivel a rendszer az összes kamera és mikrofons jelet rögzíti, a távolságmérés az utófeldolgozás során is elvégezhető. Az audio és video jelek a merevlemez kapacitásának függvényében, tetszőleges hosszán rögzíthetők. A mérésről pillanatképek, az egyes forráspozíciókban hallható hang, és videofelvétel is exportálható. A jel spektruma keskenysávban is vizsgálható, a hangjelet valós időben szűrhetjük a kívánt frekvenciatartományra. A szoftver hasznos tulajdonsága a folyamatos bufferelés (*FreezeBuffer*): az utolsó 10–25 másodperc eseményeit a rendszer mindig rögzíti, így a fontos zajeseményekről nem maradunk le, ez a felvétel azonnal visszajátszható, megjelenítését le is lassíthatjuk (slow motion) anélkül, hogy ez a hosszúidejű felvételt befolyásolná. A rendszerhez a fordulatszámjelen túl egy referenciajel is csatlakoztatható. Utóbbi egy kiegészítő érzékelőt (tipikusan egy mikrofons jelet), aminek segítségével további képtisztítás valósítható meg, a felvétel megszürithető: a program csak a referenciajellel koherens forrásokat mutatja, a többit kiszűri.

A VISOR mellett nemrég megjelent a VISOR Flex kamera is, ami megtartotta a VISOR hármas videokameráját, de a fix kiépítés helyett moduláris szerkezetű. A csatlakoztatható mikrofonok számára korlátot nem adnak meg, a leírás alapján több száz mikrofons is alkalmazható a megfelelő front-end adatgyűjtőkkel kiegészítve.

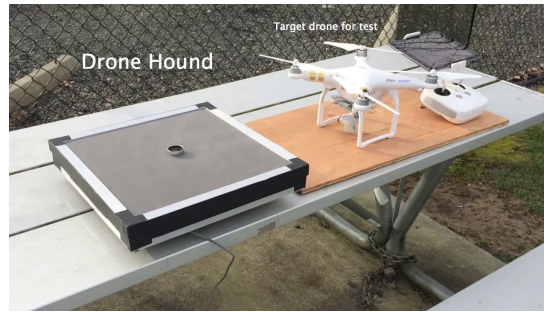
A HEAD acoustics cég termékeivel kapcsolatban a legnagyobb problémát az jelenti, hogy a rögzített nyers hangfájlokhoz nem lehet hozzáférni (2018-as információ), így a kamera bár tetszetős felépítésű, kizárólag a gyártó által készített szoftverrel működik együtt.

3.2.4. OptiNav, USA

Az *OptiNav*⁵ alapítója, Dr. Robert Dougherty, az akusztikai nyálábformálás fontos alakja. Cége projektünk szempontjából egy érdekes kamerarendszert forgalmaz, a Drone Hound nevű, ki-

⁴<http://www.head-acoustics.com/>, <http://www.head-visor.de>

⁵<http://www.optinav.com>



3.5. ábra. Az OptiNav Drone Hound nevű eszköze – Forrás: internet



3.6. ábra. A Brüel and Kjaer 30 mikrofonos akusztikai kamerája – Forrás: <http://www.bksv.com>

fejezetten drónok detektálására kifejlesztett eszközt. Sajnos – vélhetően szándékosan a találmány technikai megoldásait elrejtendő – a termékről a honlapon semmi érdemi információ nem érhető el. Ránézésre egy sík lapban elhelyezett, feltételezhetően MEMS mikrofonokból álló tömbből van szó, mely az OptiNav Beamforming szoftverrel alkot rendszert.

A Drone Hound a 3.5. ábrán látható.

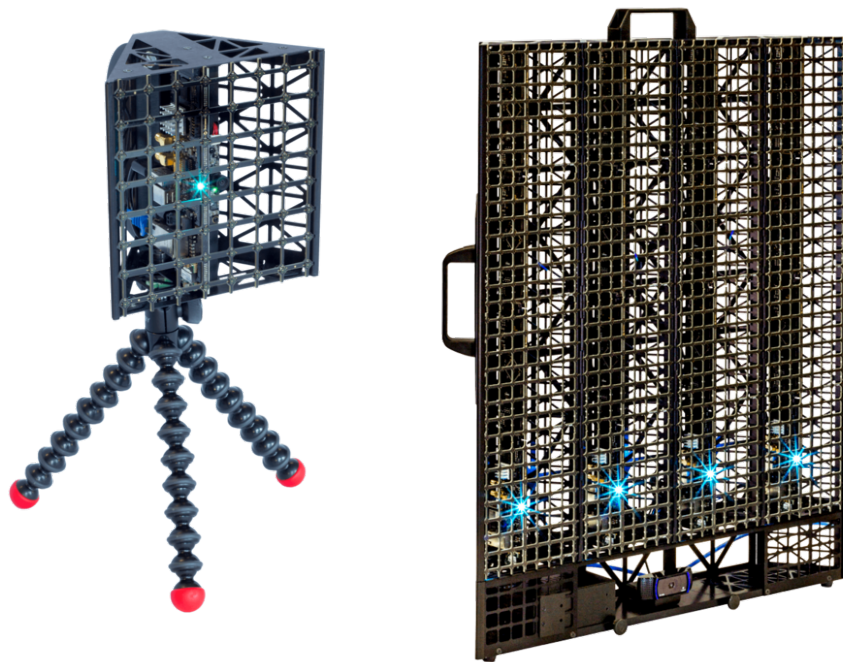
3.2.5. Brüel and Kjaer, Dánia

A *Brüel and Kjaer*⁶ az akusztikai mérés technika legismertebb cége, 1942 óta létezik. A B&K által kínált megoldás jelentősen eltér a korábbiakban bemutatottaktól, mivel a B&K terméke a cég széles spektrumú kínálatához illeszkedik, azokkal közös platformra épül. Ebből az is következik, hogy a rendszer zárt, az eszközhöz saját fejlesztésű modulok nem készíthetők, a rögzített hangfájlokhoz nem lehet hozzáférni.

A B&K legfrissebb terméke a hordozható, a 3.6 ábrán látható WA-1764-W-001 mikrofontömb, mely 30 darab magas minőségű elektretmikrofont (B&K 4959 típusút) tartalmaz. A mikrofonok véletlenszerűen helyezkednek el egy körfelület mentén, a körfelület hangáteresztő (vázszerkezetes) kialakítású, de kapható hozzá hangvisszaverő lemez feltét is. Az eszköz a B&K LAN-XI adatfeldolgozó hardverjéhez csatlakoztatható, ami számítógépről és okos eszközről is (Android és iOS rendszerűről egyaránt) vezérelhető.

A cég többféle tömböt is árul, melyek hasonló kialakításúak, csak a mikrofonok számában és a körfelület méretében különböznek. 18 mikrofontól 108 mikrofonig kínálnak megoldásokat, a legkisebb átmérő 0,4 m, a legnagyobb 1,1 m.

⁶<http://www.bksv.com>



3.7. ábra. A Sorama cég MEMS mikrofonokból épített akusztikai kamerái. (a) CAM64, (b) CAM1K –
Forrás: <http://www.sorama.eu>

3.2.6. Sorama

Az eindhoveni (Hollandia) székhelyű *Sorama*⁷ cég miniatűr MEMS mikrofonokból épített akusztikai kamerát. Kétféle termék érhető el, a Sorama CAM64 64 darab, a CAM1K pedig 1024 darab MEMS mikrofont tartalmaz. A termékekről a cég honlapján nem sok információ érhető el, a bemutatott mérési eredmények alapján egyszerű delay-and-sum elven működő rendszerről lehet szó. A kamerák a 3.7. ábrán láthatóak.

Az 1024 mikrofonos rendszer jól szemlélteti, hogy a digitális MEMS mikrofonok megjelenésével a csatornaszámban lényegében nincs felső korlát, így tetszőleges méretű mikrofontömbök hozhatók létre. Fontos azonban megjegyezni, hogy a MEMS mikrofonok dinamikatartománya messze elmarad az elektretmikrofonokétól, ezért nagy távolságú megfigyelésekre kevésbé alkalmasak.

3.2.7. BSWA-Tech

A pekingi székhelyű *BSWA Technology Co. Ltd*⁸ az akusztikai mérés technika viszonylag fiatal, de gyorsan fejlődő szereplője, széles és egyre bővülő termékpalettával. Termékeik között mikrofontömb is szerepel, a vonalelrendezésűtől kezdve a véletlen elrendezésű tömbig mindent gyártanak, a megrendelés függvényében, akár 256 mikrofonból. A tömb vázszerkezete rozsdamentes acélból vagy alumíniumból készül, CNC vágással. A 3.8. ábrán az SPS980 típusú, spirális mikrofontömbjük látható.

A tömbhöz jellemzően 1/4 collos, MPA416 vagy MPA466 típusú mikrofonjaikat használják, de az alacsony zajú alkalmazásokhoz az MPA231 és MPA261 mikrofonokat ajánlják. A megadott mikrofonok közül az MPA466 és MPA261 típusok TEDS (Transducer Electronic Data Sheet, IEEE-1451.4 szabvány) érzékelők: beépített kalibrációs lappal rendelkeznek. További használható mikrofonjuk az MPA436 típus, ennek érzékenysége kisebb, mint az MPA416 típusé.

⁷<http://www.sorama.eu>

⁸<http://www.bswa-tech.com>



3.8. ábra. A BSWA cég SPS980 típusú mikrofontömbje – Forrás: <http://www.bswa-tech.com>

3.3. Az optimális akusztikai kamerarendszer

A fentiekben áttekintettük a kereskedelmi forgalomban kapható fontosabb akusztikai kamerarendszereket. A termékek tulajdonságainak ismeretében megfogalmazhatók azok a szempontok, amelyek alapján a projekt céljára megfelelő eszköz kiválasztható.

A drón-detekció szempontjából fontos tulajdonságokat az alábbiakban adjuk meg.

Hozzáférhetőség

Mivel a projekt során a drónok detektálására optimalizált nyálábformálási algoritmust kell létrehozni, a kamerarendszer legfontosabb tulajdonsága a hozzáférhetőség: legyen lehetőség tetszőleges algoritmusok tesztelésére. Ehhez vagy olyan rendszert kell választani, ami megengedi külső, saját fejlesztésű modulok integrálását (ilyen rendszert nem találtunk), vagy olyat, amiben lehetőség van hozzáférni a mikrofonok által érzékelt és szinkronizáltan rögzített, nyers hangfájlokhoz. A nyers hangfájlokra saját fejlesztésű szoftverrel tetszőleges algoritmusok kipróbálhatók, az optimális algoritmus így kiválasztható.

Mikrofontípus

A digitális MEMS mikrofonokhoz képest az elektretmikrofonok használata jóval nehezebb a szükséges jelkondicionálás és digitalizálás miatt. Ennek ellenére fejlesztési fázisban az elektretmikrofonos rendszer tűnik célszerűbbnek, mivel ezek dinamikatartománya jóval magasabb, saját zajuk pedig alacsonyabb, így várhatóan jobb jel-zaj-viszony érhető el velük, mint a digitális mikrofonokkal, ami nagyobb detektálási hatékonyságot is jelent.

A piacon elérhető termékeket áttekintve azonban láttuk, hogy a MEMS mikrofonok kezelhetősége és olcsósága miatt tetszőleges számú mikrofont tartalmazó, kis méretű rendszerek építhetők, ezért foglalkozni kell ezek alkalmazási lehetőségeivel is. Meg kell vizsgálni, hogy a digitális MEMS mikrofonok alacsonyabb dinamikatartománya és magasabb saját zaja kompenzálható-e a lényegesen nagyobb számú mikrofonnal. A drón-detektorok gyártási költségeinek csökkentése érdekében is célszerű megvizsgálni a digitális mikrofonokra áttérés lehetőségét.

Bővíthetőség

A mikrofonok száma befolyásolja a kamerával elérhető térbeli felbontást és a frekvenciatartománybeli viselkedést (érzékenységet). Látható, hogy az alap kiépítésű rendszerek legkevesebb 24 mikrofont tartalmaznak, míg digitális MEMS mikrofonos rendszerek akár 1024 mikrofonból is állhatnak.

A térbeli felbontást és a lefedett frekvenciatartományt a mikrofontömb kiterjedése is meghatározza (lásd következő pont). Előzetes kutatásaink alapján úgy gondoljuk, megfelelően elhelyezett

24 mikrofonnal már kellő irányérzékenység valósítható meg, de olyan rendszert kell választani, amelyik szükség esetén további mikrofonokkal bővíthető.

Szabad elrendezés, kiterjedés

A mikrofontömb térbeli kiterjedése és a mikrofonok elrendezése (térbeli mintázata) a kamera-rendszer érzékenységet meghatározó fontos paraméter. A fejlesztés szempontjából ezért kizárólag a szabad elrendezésű rendszerek jönnek szóba.

3.3.1. A javasolt rendszer

A fentiek alapján kiválasztható a kereskedelmi forgalomban kapható rendszerek közül a projekt céljából optimális eszköz. Úgy gondoljuk, hogy a céloknak egyedül a gfai tech által gyártott free form mikrofontömb és a hozzá tartozó mcdRec adatrögzítő felel meg, mivel ez a rendszer:

- szabad hozzáférést biztosít a rögzített nyers hangfájlokhoz;
- elektretmikrofonokkal dolgozik;
- 24 mikrofonos csomagokban (bundle) bővíthető;
- a lengőkábeles mikrofonokkal tetszőleges mikrofonelrendezés kialakítható.

A. függelék

Függelék

A.1. A Dolph–Csebisev-sorok beavatkozó együtthatóinak számítása

A (2.24, 2.25) egyenletek szerint Dolph–Csebisev-sorok tervezésénél feladatunk a

$$\sum_{n=0}^K \bar{B}_n \cos(2nu) = \sum_{m=0}^K A_m (\cos u)^{2m} \quad (\text{A.1})$$

együttható-konverzió, ahol A_m -ek adottak, és $\bar{B}_n$ -eket keressük.

A $z = \cos u$ változó bevezetésével

$$\sum_{n=0}^K \bar{B}_n \cos(2n \cos^{-1}(z)) = \sum_{m=0}^K A_m z^{2m} \quad (\text{A.2})$$

A Csebisev-polinomok definícióját kihasználva

$$\sum_{n=0}^K \bar{B}_n T_{2n}(z) = \sum_{m=0}^K A_m z^{2m} \quad (\text{A.3})$$

vagyis feladatunk egy tetszőleges páros polinom (jobb oldal) páros Csebisev-polinomokkal (bal oldal) való kifejezése. Írjuk fel a bal oldali Csebisev-polinomokat együtthatóikkal:

$$T_{2n}(z) = \sum_{k=0}^n D_{2k}^{2n} z^{2k} \quad (\text{A.4})$$

Behelyettesítés után és a hatványfüggvények együtthatóinak külön-külön vett egyenlőségét megkövetelve az alábbi egyenletrendszer adódik:

$$\sum_{n=0}^K \bar{B}_n D_{2m}^{2n} = A_m, \quad m = 0, 1, \dots, K \quad (\text{A.5})$$

Megjegyezzük, hogy az egyenletrendszer együtthatómátrixa háromszögmátrix (a bal oldali szuma $n = m$ -től különbözik 0-tól), így a megoldás a legmagasabb $m = K$ együtthatótól induló közvetlen visszahelyettesítéssel gyorsan megkapható.