

# S Z A K D O L G O Z A T

## BELTÉRI ULTRAHANGOS TÁVOLSÁG-ÉS SZÖGMÉRÉSEN ALAPULÓ HELYMEGHATÁROZÁS SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA, BELTÉRI HANGTÉR- MODELL KIALAKÍTÁSÁVAL



**Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai Kar**

Készítette: **Tóth Róbert**

**mérnök informatikus BSc**

Konzulens: **Tihanyi Attila**

**(PPKE-ITK)**

**2011**

## NYILATKOZAT

Alulírott **Tóth Róbert**, a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai Karának hallgatója kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a szakdolgozatban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen a forrás megadásával megjelöltem. Ezt a Szakdolgozatot más szakon még nem nyújtottam be.

---

**Tóth Róbert**

# TARTALOMJEGYZÉK

|                                                                                           |                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| NYILATKOZAT .....                                                                         | <b>Hiba! A könyvjelző nem létezik.</b> |
| TARTALOMJEGYZÉK .....                                                                     | 1                                      |
| TARTALMI KIVONAT .....                                                                    | 5                                      |
| ABSTRACT .....                                                                            | 6                                      |
| 1. BEVEZETÉS .....                                                                        | 7                                      |
| 1.1. A feladat ismertetése, célkitűzés .....                                              | 7                                      |
| 1.2. A szakdolgozat felépítése .....                                                      | 8                                      |
| 2. ALAPFOGALMAK, MÉRÉSI MÓDSZEREK .....                                                   | 9                                      |
| 2.1. Az ultrahang fogalma, jellemzői .....                                                | 9                                      |
| 2.2. Az ultrahang hullámtani tulajdonságai .....                                          | 12                                     |
| 2.3. Irányított ultrahangnyaláb létrehozásának lehetőségei .....                          | 15                                     |
| 2.3.1. A nyalábolás fogalma .....                                                         | 15                                     |
| 2.3.2. Ultrahang-nyalábolók típusai .....                                                 | 16                                     |
| 2.3.3. Antennasorok főbb típusai .....                                                    | 17                                     |
| 2.4. Ultrahangos távolságmérés .....                                                      | 20                                     |
| 2.4.1. A távolságmérés alapjai .....                                                      | 20                                     |
| 2.5. Alapvető helymeghatározó módszerek .....                                             | 21                                     |
| 2.5.1. A helymeghatározás elvi módszerei .....                                            | 22                                     |
| 2.5.2. A háromszögeléses módszer [5] .....                                                | 22                                     |
| 2.5.3. Létező helymeghatározási rendszerek .....                                          | 24                                     |
| 2.5.4. A helymeghatározás lehetséges hibája .....                                         | 25                                     |
| 3. AZ ULTRAHANGTERJEDÉS MODELLEZÉSÉVEL FOGLALKOZÓ IRODALMAK ÁTTEKINTÉSE .....             | 26                                     |
| 3.1. Ultrahangterjedés-modellek .....                                                     | 26                                     |
| 3.1.1. Nem lineáris rendszerek közelítése .....                                           | 26                                     |
| 3.1.2. A Huygens hullámterjedési modell .....                                             | 27                                     |
| 3.1.3. A Transmission Line Matrix (TLM) módszer .....                                     | 28                                     |
| 3.2. Háromdimenziós hangtér-modell létrehozása az ultrahangsugárzó felhasználásával ..... | 29                                     |
| 3.2.1. Hangtér modellezése kétdimenziós nyaláboló alkalmazásával [25] .....               | 29                                     |
| 3.2.2. A TLM-módszer háromdimenziós kiterjesztése .....                                   | 31                                     |
| 3.3. Optimális hangtér-modell kiválasztása .....                                          | 32                                     |
| 4. SZÁMÍTÓGÉPES MODELL KIALAKÍTÁSA BELTÉRI HELYMEGHATÁROZÁSHOZ .....                      | 33                                     |
| 4.1. Kétdimenziós hangtér-modell létrehozása .....                                        | 33                                     |
| 4.1.1. A Lambda akusztikai szimulátor ismertetése [27] .....                              | 33                                     |
| 4.1.2. Hangtér-modell létrehozása szinuszos forrás felhasználásával .....                 | 35                                     |
| 4.2. Hangtér-modell kibővítése visszaverődési felületekkel .....                          | 38                                     |
| 4.2.1. Négyelemű antenasor modellezése .....                                              | 38                                     |
| 4.2.2. Négy vevőegység és egy adóegység elhelyezése .....                                 | 40                                     |
| 4.2.3. Korábbi helymeghatározási modell validálása a mért adatok alapján ....             | 41                                     |
| 4.2.4. Tapasztalatok a kétdimenziós modell használatával kapcsolatban .....               | 44                                     |

|        |                                                          |    |
|--------|----------------------------------------------------------|----|
| 4.3.   | A modell kiterjesztése három dimenzióra .....            | 45 |
| 4.4.   | Laboratóriumi eszközökkel végzett mérések .....          | 46 |
| 4.4.1. | A mérés során használt adóegység bemutatása .....        | 46 |
| 4.4.2. | Az alkalmazott vevőeszköz ismertetése .....              | 47 |
| 5.     | LABORATÓRIUMI MÉRÉSEK .....                              | 48 |
| 5.1.   | Laboratóriumi mérés előkészítése .....                   | 48 |
| 5.2.   | Ultrahangos mérés megvalósítása .....                    | 49 |
| 5.2.1. | Direkt hullámokkal végzett ultrahangos mérések .....     | 49 |
| 5.2.2. | Távolságmérés többutas terjedés esetén .....             | 50 |
| 5.3.   | Mérések eredmények összevetése a modell adatokkal.....   | 51 |
| 6.     | VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE.....                  | 53 |
| 6.1.   | Kiértékelés, a rendszer előnyei és hátrányai.....        | 53 |
| 6.2.   | Javaslatok a hátrányok kiküszöbölésére .....             | 53 |
| 7.     | ÖSSZEFOGLALÁS .....                                      | 54 |
| 8.     | KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS .....                                | 55 |
| 9.     | IRODALOMJEGYZÉK .....                                    | 56 |
| 10.    | MELLÉKLETEK ..... <b>Hiba! A könyvjelző nem létezik.</b> |    |

## TARTALMI KIVONAT

Ebben a dolgozatban egy, az egyetemünkön létrehozott, működő beltéri ultrahangos helymeghatározó rendszer számítógépes modellezésével foglalkoztam.

Helymeghatározásra jelenleg többféle eljárás, illetve mérési módszer létezik a világon (mint pl. GPS, RFID, stb.), de beltéri helymeghatározásra ezek csak korlátozottan használhatók. A technológia fejlődése során kiderült, hogy az ultrahang – az élet számos területét beleértve – beltéri helymeghatározásra is jól alkalmazható. Mivel az ultrahang terjedése egy nemlineáris jelenség, ezért annak valós modellezése csak közelítéssel megoldható módszerek segítségével lehetséges.

Feladatom egyik fontos része volt, hogy a kialakított számítógépes modell segítségével javítani és tökéletesíteni kellett a fizikailag már működő, de még nem tökéletes ultrahangos helymeghatározó rendszert. A számítógépes modellezés behozhatatlan előnye, hogy ezen a szinten sokkal kevesebb korlát létezik, és szinte megszámlálhatatlan variációs, ill. szimulációs lehetőséggel rendelkezik. A modellezés alapját az ultrahangterjedéssel, és hangtér-modellezéssel foglalkozó online és papír alapú szakirodalmak adták.

A feltárt irodalmak alapján választottam ki a feladat megoldása szempontjából optimális és megvalósítható hangtér-modellt, amely alkalmas arra, hogy egy zárt (beltéri) területet szimuláljon az adott helyiségre jellemző paraméterekkel.

Az optimális hangtér modellt először két dimenzióban kellett létrehozni úgy, hogy ugyanezen modellt később visszaverődési felületekkel is elláthassam. Ezt követően a kétdimenziós modellt kiterjesztettem háromdimenziósra, majd lefuttattam a szimulációs programot.

A háromdimenziós szimuláció során olyan komoly technikai problémákba és korlátokba ütköztem, amelyek megoldása már meghaladta a dolgozattal szemben felállított elvárásokat.

A laboratóriumi körülmények között létrehozott eszközökből származó mérési eredményeket összevettem és kiértékeltem, a megvalósított kétdimenziós modell mérési eredményeivel.

Az így kialakított modell már alkalmas volt arra, hogy az egyetemi ultrahangos helymeghatározó rendszer hibáit felfedezzem, és módosító javaslattal éljek a hátrányok kiküszöbölésére.

## **ABSTRACT**

# 1. BEVEZETÉS

## 1.1. *A feladat ismertetése, célkitűzés*

A dolgozat témájának kiválasztásánál fontos szempont volt, hogy lehetőség szerint számomra is érdekes, ugyanakkor szakmailag is megfelelő területet célozzak meg.

A kiválasztott feladat lényege, hogy egy, az egyetemünkön létrehozott, működő ultrahangos helymeghatározó rendszerhez, számítógépes modellt kell készítenem. E számítógépes modell segítségével javítani és tökéletesíteni kell a fizikailag már működő, de még nem tökéletes ultrahangos helymeghatározó rendszert. A számítógépes modellezés óriási előnye, hogy ezen a szinten sokkal kevesebb korlát létezik, és szinte megszámlálhatatlan variációs lehetőséggel rendelkezik. A modellezés alapját az ultrahangterjedéssel és hangtér-modellezéssel foglalkozó online és papír alapú irodalmak adták.

Első feladatomban az volt, hogy hazai és nemzetközi irodalmak alapján megismerkedjek a már meglévő ultrahangterjedés modellezésével foglalkozó technikákkal. A rendelkezésre álló irodalmak alapján ki kellett választanom a feladat megoldása szempontjából optimális és megvalósítható hangtér-modellt. További feladatomban volt, hogy az egyetem laboratóriumában kifejlesztett, ultrahangos beltéri helymeghatározó rendszer szimulálására alkalmas, számítógépes modellt alakítsak ki.

Célom, hogy az egyetemen korábban kialakított, beltéri ultrahangos helymeghatározó rendszerhez egy olyan számítógépes modellt alkossak, amely alkalmas arra, hogy egy zárt (beltéri) területet szimuláljon az adott helyiségre jellemző paraméterekkel. Célkitűzéseim között szerepelt, hogy az irodalmak által javasolt, optimális modellt két dimenzióban meg tudjam alkotni, valamint az, hogy ugyanezen modellt később visszaverődési felületekkel is ellássam. További célkitűzés, hogy a laboratóriumi körülmények között létrehozott eszközökből származó mérési eredményeket összevegyem és kiértékeljem a megvalósított modell mérési eredményeivel. Az így kialakított modell terveim szerint már alkalmas lehet arra, hogy az egyetemi ultrahangos helymeghatározó rendszer hibáit felfedezzem, és módosító javaslattal éljek a hátrányok kiküszöbölésére.

## **1.2. A szakdolgozat felépítése**

Dolgozatom első részében kifejttem az ultrahanggal és annak terjedésével kapcsolatos általános tudnivalókat illetve az alapfogalmakat, a felkutatott irodalmak felhasználásával. Ezek közé tartozik az ultrahang különböző felhasználási területei, az irányított ultrahangnyaláb létrehozásának lehetőségei, a meglévő ultrahangos távolságmérési módszerek, valamint az alapvető beltéri helymeghatározó módszerek.

A dolgozat második részében a nemzetközi irodalmakban fellelhető, ugyanakkor már megalkotott ultrahang-terjedési modelleket vizsgálom meg. A terjedési modellek mellett kitérek a háromdimenziós, ultrahangsugárzóval felhasználásával létrehozott hangtér-modellekre is. Az összegyűjtött információk és paraméterek alapján kiválasztom az egyetemi ultrahangos rendszer szempontjából optimális és összeérhető modellt.

A következő részben bemutatom az egyetemi beltéri ultrahangos egységhez készített, kétdimenziós hangtér-modellt. Ismertetem a modellhez használt szoftvereket és eszközöket, valamint az itt megadható paramétereket. A modellt tovább bővítettem visszaverődő felületekkel, kiegészítve a szoftver által nyújtott szimulációs lehetőségekkel. A fejezet végén kiterjesztem a meglévő modellt három dimenzióra is, mivel a természetben az ultrahang is három dimenzióban terjed.

A szakdolgozat utolsó részében a laboratóriumban végzett mérésekről és ezek kiértékeléséről lesz szó. Ezen belül ismertetem a valódi mérések előkészítését, azok végrehajtásának menetét, a mérési körülményeket és a kapott eredmények dokumentálását. A mérésekhez természetesen a egyetemi ultrahangos eszközöket használjuk fel beltéri helymeghatározás céljából. A dokumentált eredményeket összevetem a szimuláció során kapottakkal, majd azokat kiértékelem. Az eredmények alapján megállapítom az egyetemi ultrahangos rendszer előnyeit és hátrányait. Végezetül javaslatot teszek az esetleges hiányosságok kiküszöbölésére, a szükséges módosítások elvégzésére, javítva ezzel az ultrahangos helymeghatározó rendszer hatékonyságát és képességeit.

A dolgozat elkészítésénél a szemléletesebb bemutatás érdekében több ábrát és grafikont alkalmaztam. A téma jellege miatt viszonylag kevés magyar nyelvű irodalmat találtam, így elsősorban angol nyelvű irodalmakra kellett támaszkodnom.

## 2. ALAPFOGALMAK, MÉRÉSI MÓDSZEREK

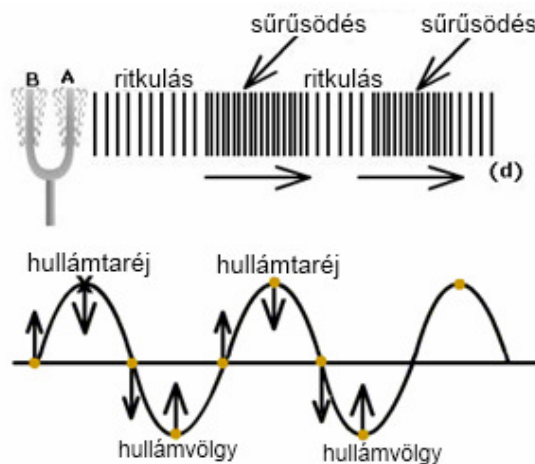
Az ultrahangtechnika felhasználása és széleskörű alkalmazás régóta foglalkoztatja a tudományos élet különböző területeit. Ahhoz, hogy megértsük és követni tudjuk a dolgozatban taglalt kifejezéseket, jellemzőket és mérési módszereket, szükség van bizonyos alapfogalmak ismertetésére.

### 2.1. Az ultrahang fogalma, jellemzői

Fizikai tanulmányainkból tudjuk, hogy a periodikus mozgások a környezetükben lévő közegekben nyomáshullámokat idéznek elő. Ha megnézzük például egy dugattyút működés közben, észrevehetjük, hogy a folyamatos mozgás következtében egyre több sűrűsödés jön létre, amely végighalad az adott közegben. Minél intenzívebb az adott mozgás, annál közelebb lesznek egymáshoz képest ezek a sűrűsödési pontok. [ [HYPERLINK \l "Phy" 1](#) ]

A hanghullámok hasonló módon magas és mély lökésekből állnak, amelyek egy adott közegen keresztül haladnak. Itt megkülönböztethetünk ún. magas nyomású (sűrűsödési) és alacsony nyomású (ritkulási) területeket. Magas nyomású területek ott alakulnak ki, ahol a részecskék össze vannak nyomva, míg az alacsony nyomású területek esetében ezek a részecskék egymástól távol, szétszórva helyezkednek el. A hang hullámhossza így kifejezhető két, egymást követő magas, illetve alacsony nyomású pont távolságaként. *1*] [ [HYPERLINK \l "Asb" 2](#) ]

A hang egy olyan longitudinális hullám, amely oda-vissza irányban oszcillál a hullám terjedésének irányában. Ezzel ellentétben a transzverzális hullámok a haladási irányára merőlegesen keltene rezgéseket. (1. ábra)



1. ábra: Longitudinális (felső kép) és transzverzális (alsó kép) hullámok terjedése

Az emberi fül által hallható hang frekvenciája 20 Hz-től 20 kHz-ig terjed. A 20 KHz feletti és 500 MHz alatti hangtartományt nevezzük ultrahangnak: ezeket a hangokat az emberi fül már nem képes érzékelni. Nagyobb frekvencia (ld. ultrahang) esetén a hang terjedése az elektromágneses hullámokéhoz, míg a visszaverődése a fénysugáréhoz hasonlítható. Felhasználásától függően az ultrahangnak más-más frekvenciája lehet, például orvosi alkalmazások esetén az 1 és 20 MHz közötti frekvenciák gyakoribbak. Az ultrahangos képalkotás során azonban csak 10 MHz körüli hullámokat használnak, mert a magasabb frekvenciájú hullámokat könnyebben elnyelik a szövetek. [2]

Mint minden más hullám esetében, az ultrahang hullámhossza a frekvencia növelésével arányosan csökken. Ez a jól ismert  $c = \lambda \cdot f$  összefüggés átrendezésével kapható meg:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

A fizika mai állása szerint a hang sebessége attól a közegtől függ, amelyben az terjed. A sebességet tehát nem az amplitúdó, frekvencia vagy a hullámhossz határozza meg, hanem valójában a közeg részecskéinek tömege, a közöttük lévő távolság és a köztük fellépő vonzóerő. Fontos tehát leszögezni, hogy ideális gázok esetében a sebességet csak a hőmérséklet befolyásolja, a páratartalom csak csekély hatást gyakorol. A levegőt jó közelítéssel ideális gáznak vehetjük, tehát a hőmérséklettől való függés ugyanúgy érvényes itt is. Ugyanakkor a hang a sűrűbb közegekben gyorsabban terjed, mint az összenyomható anyagokban. [3]

A hőmérséklettől való függést a következő összefüggés szemlélteti a legjobban. Egy adott hőmérséklet mellett a hang sebessége:

$$v = v_0 \sqrt{1 + \frac{T}{273,15^\circ\text{C}}}$$

ahol  $v_0$  a hangsebesség 0°C-os hőmérsékleten,  $T$  pedig a levegő hőmérséklete Celsius fokban mérve. A képletből az is látszik, hogy a hangnyomás nem befolyásolja a hangsebességet.

A következő táblázat a későbbi mérések szempontjából lényeges hangsebességeket tünteti fel: [3]

| Anyag / közeg | Ultrahang becsült sebessége (m/s) |
|---------------|-----------------------------------|
| Levegő (20°C) | 343                               |
| Levegő (0°C)  | 331                               |
| Acél          | 5800                              |
| Beton         | 3100                              |
| Üveg          | 5500                              |
| Fa (lágú)     | 3800                              |

2. ábra: Ultrahang-sebességek ismert közegekben

Az ultrahang két közeg találkozásánál (például csont és levegő vagy szövet és csont határán) erősebben verődik vissza. A visszavert jel erőssége összefüggésben áll azzal a beesési szöggel, amellyel a hullám a határfelületet bombázza. Minél merőlegesebb a beeső hullám, annál nagyobb a visszavert jel erőssége. Ez a jelenség jól megfigyelhető a nagyobb véredényekben, mint például a főütőérben és a nyaki ütőérnél.

Mivel a hang frekvenciája az egyes szöveteken történő terjedés során változatlan marad, egyedül a sebessége és a hullámhossza változik meg. Az ultrahang vákuumban egyáltalán nem terjed, és eléggé rosszul terjed gázokban. Ez azzal magyarázható, hogy gázok esetén a molekulák túlságosan távol esnek egymástól: ezért van az, hogy az ultrahangos felvételeken a tüdők nem kivehetők igazán. Az ultrahang ugyanakkor magzati felvételek készítésére kiválóan alkalmas, de ebben az esetben zselét kell helyezni a bőrre abból a célból, hogy legyen egy köztes közeg, amelyen keresztül terjedhetnek a hullámok. [4]

Az ultrahanghullámokat általában egy ún. transzducerrel (jelátalakítóval) hozzák létre. Ez egy olyan eszköz, amely a forrásból nyert energiát átalakítja egy másik formára és ezt továbbítja a cél felé; jelen esetben a jelátalakító egyszerre működik adóként és vevőként. (3. ábra)

Ultrahang esetében a jelátalakító az elektromos jeleket nagyfrekvenciájú hanggá alakítja át, míg a visszavert hullámokat visszaalakítja elektromos jelekké. Az így visszkapott elektromos jeleket fel lehet használni bel-és kültéri mérésre, valamint orvosi képalkotásra. [4] [5]

Az ultrahang előállítás szempontjából 3 fajta módot különböztetünk meg: **piezoelektromos**, **magnetostriktív** és **elektrosztatikus** elven működő jelátalakító eszközök.



**3. ábra: Magnetostriktív jelátalakító eszköz**

A piezoelektromossággal működő jelátalakító eszközök lényege, hogy a piezoelektromos anyagok (kristály, kerámia) nyomás illetve deformáció hatására vibrációba kezd, s ennek következtében ultrahang-hullámokat gerjeszt. Ezek az anyagok alkalmasak vevőként is, de az előző folyamattal ellentétben, a hang által keltett vibrációkból feszültség keletkezik.

A mérés során felhasznált ultrahang-keltő eszköz a magnetostriktív elvét követi.

A magnetostriktív mágneses anyagok elektromos mező hatására megváltoztatják a méretüket, amely jelenséget 1847-ben Joule fedezte fel. A magnetostriktív átalakító lényegében

mágneses és mechanikus átalakítást végez. [4] [5]

A jelátalakító megválasztásánál fontos szempont a vizsgálandó anyag mélysége, ugyanis minél magasabb az ultrahang frekvenciája, annál rosszabbul hatol be az anyagba. Ha pl. azt szeretnénk elérni, hogy az ultrahangnyaláb mélyebbre hatoljon be egy adott anyagba, ill. közegbe, akkor ehhez egy alacsonyabb frekvenciát kell használnunk, ami viszont a felbontás rovására megy. (A transzducerek típusaival a következő fejezetben foglalkozom részletesebben.)

Alapvetően minden ultrahangos rendszer a hanghullám visszaverődése alapján működik, legyen szó orvosi, vagy helymeghatározó rendszerről. A visszaverődés mértékét a két közeg impedanciája közötti különbség határozza meg (lásd levegő és szövet). Minden ultrahangos rendszer a visszavert hullámok amplitúdóját használja fel orvosi, lokalizációs és más mérések céljából. Míg az adók jobb esetben csak egyetlen jelet sugároznak ki, addig a vevőegység a visszavert hullámokat folyamatosan mintavételeznie kell. Azonban a mért amplitúdó függ a közeg vagy anyag mélységétől, mint azt előzőleg láthattuk, a különböző anyagok más-más mértékkel verik vissza a sugárzott hullámot. [2]

## **2.2. Az ultrahang hullámtani tulajdonságai**

A következő részben az ultrahangra jellemző, és a későbbi modellezés szempontjából fontos hullámtani tulajdonságok kerülnek ismertetésre.

**Reflexiós tényezőnek** (reflection coefficient) nevezzük a visszavert és a beeső hullám amplitúdójának hányadosát. Ha két közegről vagy anyagról beszélünk, akkor ez a tényező azt határozza meg, hogy mekkora eltérés van a két szomszédos közeg akusztikus impedanciájában. Minél nagyobb ez az eltérés, annál nagyobb mértékben történik visszaverődés a két közeg határán. A reflexiós tényezőt a következő összefüggésből számolhatjuk ki:

$$R = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

Bizonyos felületek nem csak egyenesen verik vissza a beérkező ultrahang-hullámokat, hanem azokat több irányba is szétszórják. Fontos tehát leszögezni, hogy a visszavert hullám amplitúdója nem csak a reflexiós tényezőtől, hanem a hullám visszaverődési irányától, valamint a visszaverődési felülettől is függ. A természetes (egyenletes felületű) anyagokkal ellentétben az egyenetlen felületek a hullámok csekély részét képesek visszaverni az adó/vevő felé, mert a felület nem tökéletesen merőleges a beeső hullámokra. [6]

**Hanggátlási foknak** (transmission coefficient) nevezzük azt a hányadost, melyet a beeső és az átvitt hullámok amplitúdójának hányadosából származtatunk. Mivel az energia-megmaradás alapján a teljes beeső hullám az átvitt és a reflektált hullámok összege, ezért a hanggátlási fokot legegyszerűbben az  $1 - R$  összefüggésből kaphatjuk meg.

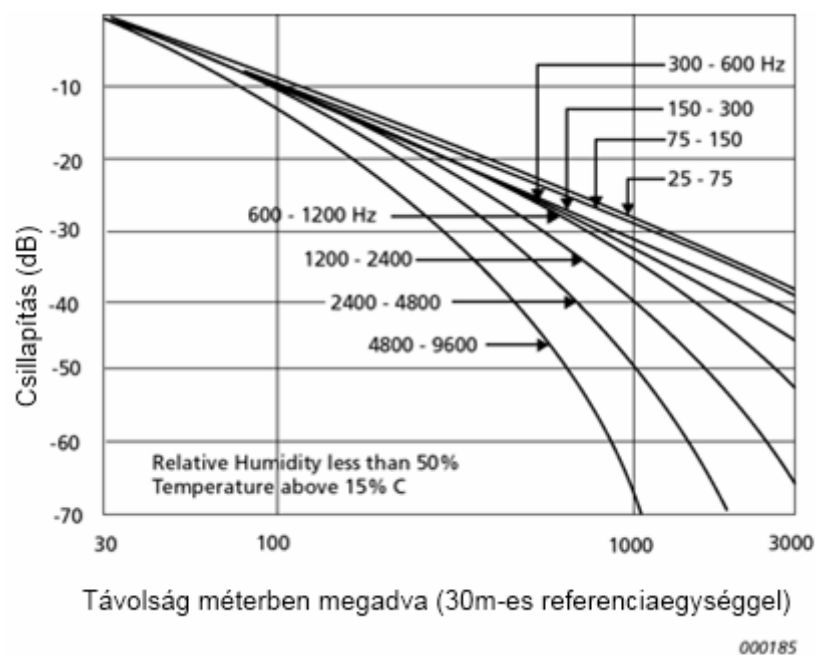
Az előzőekben említett két hányados nagymértékben függ a két szomszédos közeg **akusztikai impedanciájától** ( $Z$ ). Ez minden anyagra jellemző sajátos tulajdonság, melyet az adott közegben érvényes hangsebesség és az anyag sűrűségének szorzatából származtatjuk.

Az adott közeg (vagy anyag) akusztikus impedanciája:

$$Z = c \cdot \rho$$

A közeg akusztikai impedanciája nem csak a reflexió és transzmisszió tényezőinél játszik szerepet, hanem annak segítségével megállapítható a hangelnyelés adott közegen belül, valamint felhasználható ultrahangos transzducerek tervezésekor is. [7]

Az előzőekből következik, hogy az ultrahang-hullámok energiája a visszaverődések és szóródások miatt csökkenni fog. Ez az energiacsökkenés az egyenetlen felületek által keltett szóródások és elnyelésekből ered, melyeknek együttes hatása okozza a hullám lecsengését. Ezt az ultrahang-hullám **csillapításának** nevezzük. (4. ábra)

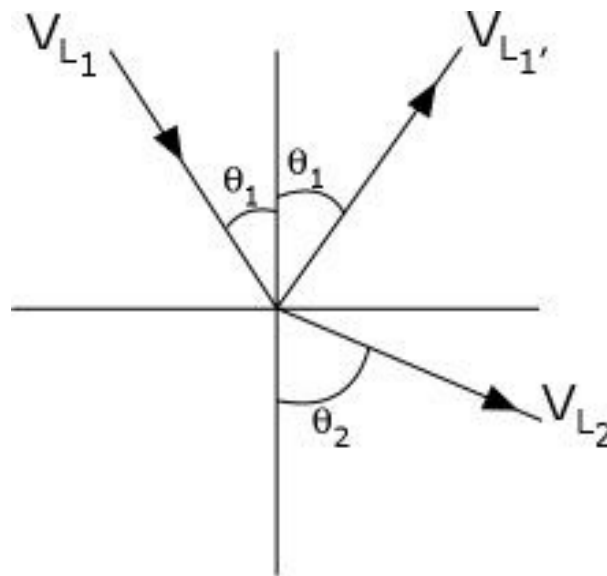


4. ábra: Hanghullám csillapítása a távolság függvényében

A lecsengő hullám amplitúdója az  $A = A_0 e^{-\alpha z}$  összefüggésből kapható meg, ahol:  $A_0$  a csillapítatlan amplitúdó,  $z$  a hullám által megtett út és  $\alpha$  pedig az ultrahangra jellemző csillapítási tényező. [8]

A csillapítás hozzávetőleg a teljes energiavesztés 10%-át kiteheti, ugyanakkor az ultrahanghullámok diffrakciót (hullámelhajlást) is elszenvednek, melynek következtében az eredeti hullámenergia kisebb része jut vissza a vevőegységhez. [2]

Amikor az ultrahang-hullám egy határfelületre ferde hajlásszöggel érkezik be, a hullám a visszaverődés mellett **elhajlást** (refrakciót) is elszenved. Ezt a jelenséget a két közegre jellemző hangsebesség közötti különbség okozza, vagyis a hang sebességét az adott közeg vagy anyag tulajdonságai (rugalmassági tényező és a sűrűség) határozza meg. (5. ábra)



5. ábra: Hullám elhajlása és visszaverődése két közeg határán

A hullámok sebességét és szögeit a Snell-törvénnyel írják le, vagyis: két közegre jellemző hullámsebességek hányadosa megegyezik a beesési és a törési szög hányadosával. Matematikai képlettel leírva: [9]

$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2}$$

A **felbontást** az ultrahangos képalkotás azon paraméterének tekintjük, amely a közeli határfelületek detektálását jellemzi, tehát minél jobb a felbontás, annál tisztább az ultrahangos képalkotás. Az ultrahangot alapvetően két típusú felbontással lehet jellemezni:

A **tengelyirányú (axiális) felbontás** azon minimálisan megkövetelt szeparációk száma, amely a jól elkülöníthető visszaverődések előállításához kell. Az optimális tengelyirányú felbontás általában rövid térbeli rezgésekkel érhető el, melyek csakis magas frekvenciákkal oldhatók meg. Ebből következik, hogy minél nagyobb a frekvencia, annál jobb lesz az ultrahang felbontása. [4]

Az **oldalirányú (laterális) felbontás** az előzőtől annyiban különbözik, hogy a minimális szeparációk merőlegesek a haladási irányra nézve, ezért a megfelelő laterális felbontás keskeny hangnyalábokkal érhető el. [4]

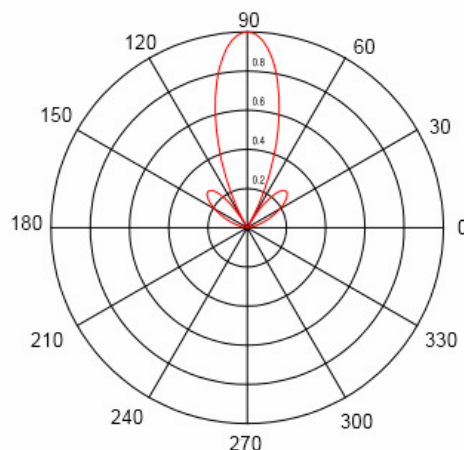
## 2.3. Irányított ultrahangnyaláb létrehozásának lehetőségei

Az ultrahangos méréstechnika és a képalkotás egyik legfontosabb feltétele, hogy az ultrahangnyalábot mindig a megfelelő területre tudjuk irányítani. A következő fejezetben az ultrahang-nyaláb irányítási módszerei kerülnek bővebb kifejtésre.

### 2.3.1. A nyalábolás fogalma

A valós idejű, ultrahangos orvosi képalkotó rendszerek már több mint 30 éve rendelkezésünkre állnak. A technikai eszközök és lehetőségek fejlődésével a felhasználói igények is egyre nőttek, így az idők folyamán a klinikai rendszerek architektúrája, valamint azok alapfunkciói folyamatos változáson mentek keresztül. Az ultrahang más felhasználási területeken (mint pl. robotok navigációja, szenzorhálózatok) történő elterjedésével szükségessé vált, hogy az ultrahangnyalábot egy megadott területre tudják irányítani. Az ultrahanghullám irányítását kizárólag a mellékfurkok elnyomásával és a főhurok erősítésével lehet megoldani. [10] Ezeket az eszközöket **nyalábolónak**, angol nevén „beamformer”-nek, a nyalábolókkal végzett tevékenységet pedig **nyalábolásnak** (beamforming) nevezik. Az ultrahangos orvosi képalkotó rendszerek és a modern robot navigációs eszközök alapvető részét képezi a nyaláboló modul.

A következő ábra azt mutatja, hogy miként lehet fáziskésleltetéssel ellátott jelátalakítókval egy nagyobb fő- és egy relatíve kisebb melléklobot előállítani. (6. ábra)



6. ábra: Antenna érzékenysége adott irányban

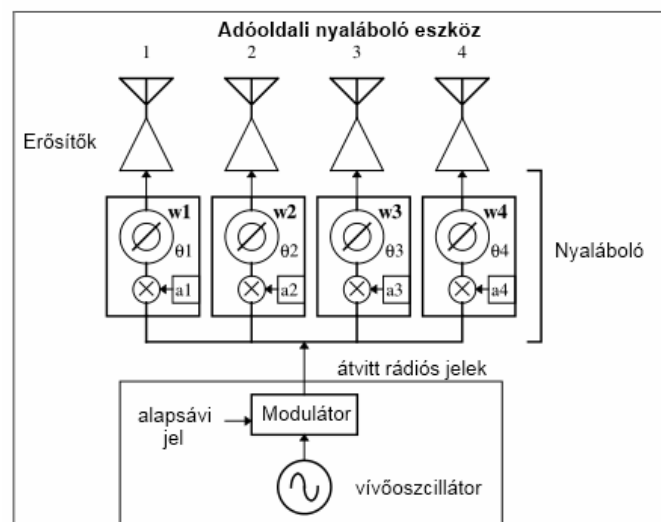
Vannak esetek, amikor egy sugárzóantenna egy adott irányba erősebben sugároz, mint a többibe. A kibocsátott hullámok térerősség-irány függvényét az antenna sugárzási mintájának nevezik, mely az adó és vevő oldal esetén megegyezik.

Az antenna minden egyes pontja különböző fázisú és amplitúdójú jeleket sugároz, ezek mind eltérő távolságokat tesznek meg a kihelyezett vevő felé. Ha a jelátalakítókat egymástól megfelelő távolságra helyezzük, és minden elemhez külön fázist és amplitúdót állítunk be, akkor létrejöhet egy számunkra hasznos hullámfront. Ez azt jelenti, hogy a jelátalakítók optimális elrendezésével elérhető az, hogy a jelenergia jelentős része csak egy irányban terjedjen. [11]

### 2.3.2. Ultrahang-nyalábolók típusai

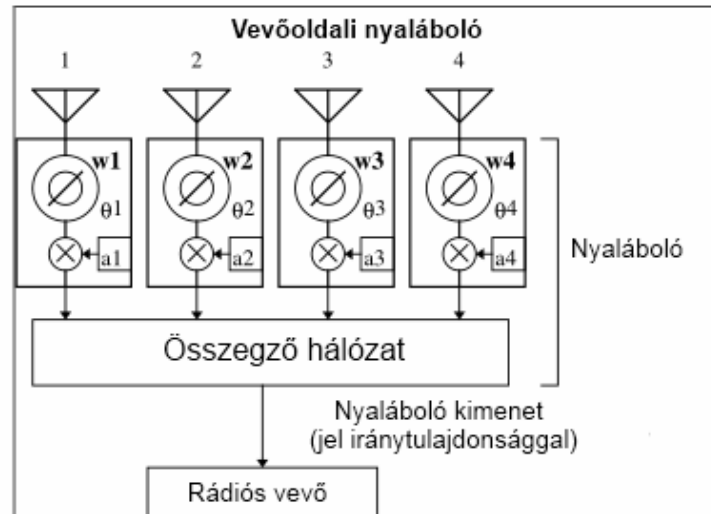
A nyalábolók különböző méretekben állnak rendelkezésre attól függően, hogy hány jelátalakítóval rendelkeznek, valamint attól, hogy ezek milyen elrendezésben vannak jelen a nyaláboló eszközben. A következőkben három fő nyaláboló típus kerül ismertetésre, az egyes antennaelrendezéseket a következő részben kívánom részletezni. Az első két technika esetében a relatív amplitúdót  $a_x$  és fázistolást  $\theta_x$  egy komplex konstans súly  $w_x$  reprezentálják, amelyek az alábbi ábrákon kerülnek bemutatásra.

A **transmit beamformer** (adóoldali nyaláboló) az említett komplex súlyt az átviteli jelre alkalmazza, tehát eltolja a jel fázisát és megváltoztatja az amplitúdóját. Ennek következtében a tér bizonyos pontjain azonos fázisban lévő jelek keletkeznek. A következő ábra a fentebb említett súlyösszegző hálózatot (7. ábra) reprezentálja. [12]



7. ábra: Adóoldali nyaláboló sematikus ábrája

A **receiver beamformer** (vevőoldali nyaláboló) a bejövő jelek komplex súlyait az egyes antennaelemekhez rendeli, ezután a súlyokat egy olyan jellé összegzi, hogy az egy megfelelő hullámfrontot képezzen. [12] Az alábbi ábra a vevőoldali összegzést mutatja be (8. ábra):



8. ábra: Vevőoldali nyaláboló sematikus ábrája

Az előzőekkel ellentétben a **digitális nyaláboló** eszközök az említett összegzést, fázistolást és amplitúdó-változtatást digitálisan végzi el, melyhez megfelelő DSP-k (digitális jelfeldolgozó processzor) és nyalábolásra kialakított chip-ek állnak rendelkezésünkre. Mivel a nyaláboló digitális technikával működik, szükség van az antennaelemekből induló jelek A/D konverterrel való digitalizálására. A rádiós jelek frekvenciája ultrahangos alkalmazások esetén 30 MHz felett van, és mivel ez direkt konverzióval elég költséges lenne, ezért a vevők ún. analóg RF átalakítókat használnak a frekvencia lekeveréséhez. [12]

### 2.3.3. Antennasorok főbb típusai

Minden olyan ultrahangos rendszerben, amelyben nyalábformáló technika található, különböző fázisú adók (transzducerek) vannak elhelyezve adott elrendezés szerint. Ahhoz, hogy az optimális nyalábformát elérjük, megfelelő elrendezésekre van szükség. Ezeket az elrendezéseket **antennasornak**, angol nevén „array”-nek nevezik.

A különböző elrendezésekben az antennasorok felelnek azért, hogy az ultrahang sugárzása egy kívánt irányba erősítve, a nem kívánt helyekre pedig csillapítva történjen. Az antennasor fogalma összenőtt a beamforming (mint technika) fogalmával, ugyanis a különböző elrendezések határozzák meg a nyalábolást. [11]

Az előző fejezetben kitértem a jelátalakító (transzducer) eszközökre, mint az ultrahangos rendszerek legfontosabb elemére. Attól függően, hogy az antennát milyen célra szeretnénk használni, a jelátalakítókat két fő csoportja lehet felosztani.

A **lineáris antennasorú transzducerek** (linear array transducers) elemei egymás mellett helyezkednek el. Ezekre az jellemző, hogy az elemek sugárzását egyszerre indítják el annak érdekében, minél nagyobb energiájú nyalábot érjenek el egy megadott irányban. [12]

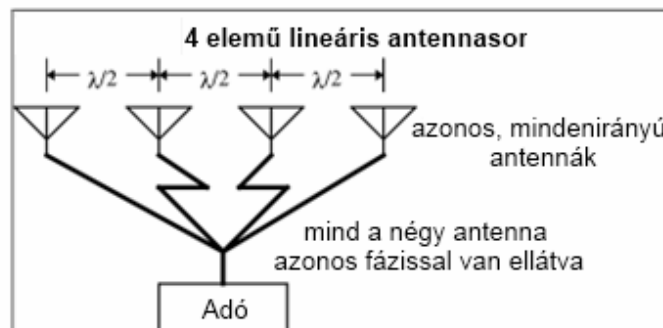
A **fázisvezérelt antennasorú transzducerek** (phased array transducers) esetében az egyes elemek fázistolóval vannak ellátva, és így különböző késleltetésekkel kezdenek el sugározni. Ha a késleltetéseket megfelelően változtatják, akkor egy meghatározott irányba konstruktív hullámfrontot lehet létrehozni.

A főlebeny jellemzően a növekvő fáziseltolás irányába fog mutatni, azonban ennek a kiterjesztése véges. A maximálisan elérhető fázis  $120^\circ$  ( $60^\circ$  balra és jobbra). [12]

A fázisvezérelt jelátalakítókat is megkülönböztetik aszerint, hogy azok miként befolyásolják a nyaláb irányát és viselkedését. Ezek alapján beszélhetünk **lineáris, síkbeli és frekvenciapásztázó** antennasorokról.

#### Lineáris antennasor (linear array): [12]

A lineáris elrendezésű antennasor esetében az egyes elemek azonos fázissal és amplitúdóval sugároznak. (9. ábra) Az ábra jól mutatja, hogy az egyes sugárzók között fél hullámhossznyi távolságot kell hagynunk. Amennyiben ez a távolság nagyobb, a karakterisztikában nagyobb mellékkebenyek jelennek meg. Ha azonban úgy választjuk meg az elemek számát, hogy közben megmaradjon a fél hullámhosszos távolság és az apertúra mérete is, akkor a főlebeny mérete fog csak nőni. A lineáris antennasor előnye, hogy egyszerű elrendezésről van szó, hátránya azonban, hogy csak egy síkban mérhető a sugarak elhajlása.



9. ábra: Lineáris antennasor sematikus ábrája

### **Síkbeli sor (planar array): [12]**

Az adóegység különböző fázisokban sugárzó elemekből épül fel, vagyis minden egyes elemhez tartozik egy fázistoló modul. Egyik nagy előnye ennek az elrendezésnek, hogy nem csak két síkban lehet terelni a nyalábot, hanem digitális nyalábolás is megvalósítható, azonban ez bonyolultabb elrendezést és fázistoló elemeket igényel.

### **Frekvencia-pásztázó sor (frequency scanning array): [13]**

a többfázisú antennák azon speciális fajtája, ahol a gerjesztő frekvencia-pásztázásával történik a hullám irányítása. Az általános elrendezés szerint a sugárzó elemeket egy rendszeren burkolt hullámvezető által kell táplálni. Ebből következik, hogy a frekvencia-pásztázó sor a soros táplálás egy speciális fajtája, valamint ez a sor a hullámvezetőkben történő terjedés tulajdonságán alapszik. Alapfrekvencia esetén két sugárzó elem közötti fáziskülönbség  $n \cdot 360^\circ$ . Ha megváltoztatjuk a frekvenciát, akkor a fő nyaláb és az antennára állított merőleges egyenes közötti szög megváltozik. A magasságot a következő elgondolás alapján határozza meg a rendszer: ha a továbbított frekvencia növekszik, akkor a nyaláb felfelé halad az antenna mentén, ha csökken, akkor pedig lefelé halad. Ahogy változtatjuk a frekvenciát, úgy változik meg a nyaláb tengelye, és a pásztázás elvégezhető a magasságra nézve is. Az ilyen típusú radarokat úgy tervezték, hogy azok képesek legyenek nyomon követni a továbbított frekvenciát és érzékelni a visszavert frekvenciákat, amelyek később felhasználhatóak háromdimenziós képalkotásra is.

Mivel többfázisú rendszerekről van szó, felmerülhet a kérdés, mekkora fázistolást szükséges alkalmazni az egyes elemeken ahhoz, hogy a megfelelő irányítást elérjük? Ehhez meg kell határoznunk két egymást követő elem konstans fázistolását, amelyet fázisemelkedésnek ( $\Delta\varphi$ ) hívnak.

Ezt az értéket a következő összefüggésből lehet levezetni:

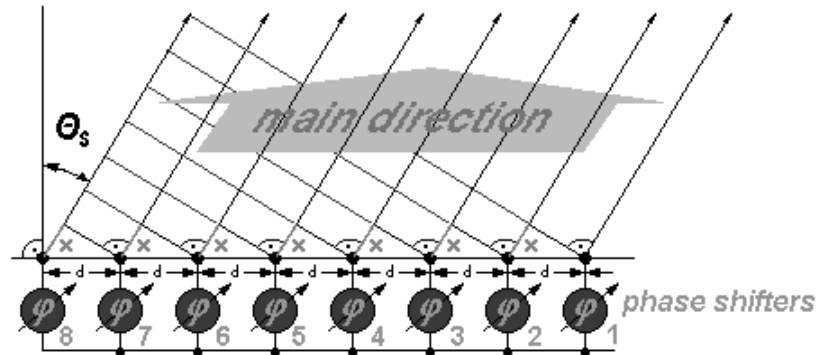
$x = d \cdot \sin \theta_s$ , ahol  $d$  két sugárzó közötti távolság,  $\theta_s$  pedig a nyaláb irányításának szöge.

$$\frac{360^\circ}{\Delta\varphi} = \frac{\lambda}{x}$$

Az első összefüggés behelyettesítése után a fázisemelkedés meghatározása a következő összefüggéssel fejezhető ki:

$$\Delta\varphi = \frac{360^\circ \cdot d \cdot \sin \theta_s}{\lambda}$$

A fenti összefüggések alapján tehát azt a szöget, amellyel el kell tolnunk az adókat meghajtó jeleket - a megfelelő  $\theta_s$  szög elérése érdekében - az adók egymástól mért távolsága és a hullámhossz segítségével határozzuk meg.



10. ábra: Páztázó antennasor elrendezése

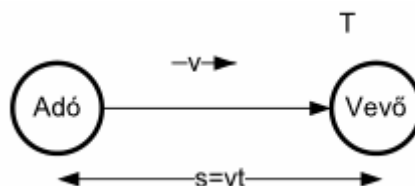
## 2.4. Ultrahangos távolságmérés

Ebben a fejezetben részletezésre kerül az ultrahangos távolságmérés alapvető összefüggései. Ezeket a későbbi szimulációs és valós mérések során fogjuk felhasználni a pozíció meghatározásához.

### 2.4.1. A távolságmérés alapjai

Az előző fejezetekben már részletesen ismertetésre került, hogy a hanghoz hasonlóan az ultrahang is visszaverődik két közeg határfelületéről. Ezen tulajdonságát a hangnak fel lehet használni távolságmérés céljára. A mérés azon alapszik, hogy a kibocsátott és visszavert ultrahang észlelése közötti időt mérjük meg. Az adóból elindítunk egy ultrahanghullámot, mely  $t$  idő múlva érkezik meg a vevőhöz. Mivel az ultrahang sebessége konstans hőmérséklet mellett állandó, terjedésének sebességét ismerjük (kb. 340 m/s), az eltelt időt pedig tudjuk elektronikusan mérni, így az adó és vevő közötti távolságot az ismert  $s = v \cdot t$  képlet alapján meghatározhatjuk.

Ez az elv képezi az ultrahangos távolságmérés alapját.

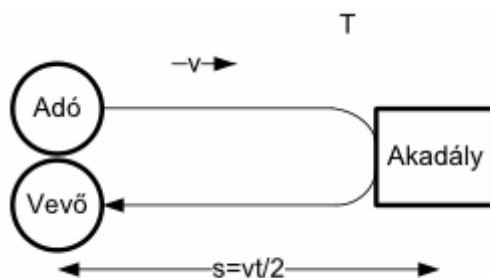


11. ábra: Ultrahangos távolságmérés külön vevő és adó felhasználásával

Ha a kibocsájtott ultrahang útjában valamilyen akadály áll, a távolságmérés módszere csak kis mértékben módosul, feltételezve, hogy az adó és a vevő egy síkban helyezkednek el. Mivel ebben az esetben a hullám az út kétszeresét teszi meg, ezért az előző képlet az alábbira fog módosulni:

$$s = \frac{v \cdot t}{2}$$

A következő ábra az akadályról visszaverődő ultrahangos távolságmérés elvét mutatja be:



12. ábra: Távolságmérés akadály beiktatásával

A fenti két távolságmérési módszer időmérésen alapszik. A mérés szempontjából ez az egyik legkritikusabb pont, ugyanis nem mindegy, milyen pontossággal állítjuk meg az időzítőt. Szintén figyelembe kell az előző fejezetben említett reflexiós tényezőt, hiszen ez határozza meg a jel intenzitását, valamint számolni kell azzal, hogy az átviteli csatorna zajt és a távolságfüggő amplitúdót ki kell küszöbölnünk. [5]

Az ultrahangos távolságmérés terén a technikai fejlődés folyamán számtalan megoldás született. Ezek közé tartozik pl. a BATSYS nevezetű ultrahangos helymeghatározó rendszer, ahol az ún. háromszögeléses algoritmust használják a céltárgy háromdimenziós koordinátáinak meghatározására. [14]

## 2.5. Alapvető helymeghatározó módszerek

A helymeghatározás problémájára rengeteg módszert dolgoztak ki az évek során. A legtöbb alkalmazás esetén azonban szükséges a helytudatos működés és az energiaspórolás. Léteznek GPS-es megoldások beltéri helymeghatározásra, azonban ezek a rendszerek elég drágák, tehát gazdaságtalanok. [15]

Vezeték nélküli hálózatok esetében a lokalizáció két fajta módon történhet: **referenciapontok** és **távolságmérés** segítségével. Szenzorhálózatok esetén általános probléma lehet az, hogy speciális hardver szükséges a pontos mérések eléréséhez, illetve meg kell gondolni, hogy

milyen topológiát választunk a referenciapontok kihelyezésekor. Fontos paraméternek számítanak a rendszer pontossága és precíziója, a szenzorhálózat költsége (időbeli és térbeli) és a fizikai korlátok (GPS beltéri alkalmazásra). Mivel az RFID alapú rendszerek sem előnyösek beltéri lokalizációhoz – a későbbi fejezetben erre külön kitérek –, ezért ebben a fejezetben inkább az ultrahangos helymeghatározó rendszereken lesz a hangsúly.

A helymeghatározás szempontjából két fajta technikát különböztethetünk meg.

**Centralizált lokalizáció** esetén a pozíciókat egy központi helyen számítatjuk ki a begyűjtött (globális) információk alapján. [15]

Az **elosztott lokalizációs technika** esetében a node-ok saját helyzetüket határozzák meg, a szomszédos elemekkel való kommunikáció felhasználásával. Ezen technikán belül meg kell említenünk a hatókör alapú (range) és hatókör nélküli megoldásokat. [15]

### 2.5.1. A helymeghatározás elvi módszerei

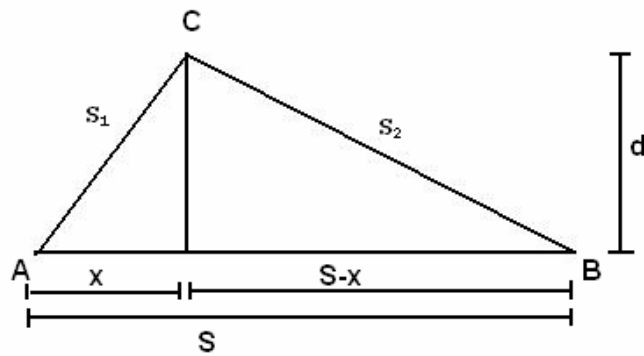
A valós idejű helymeghatározó rendszerek (RTLS – Real-time Locating Systems) olyan vezeték nélküli hálózatok, melyek egy jól definiált térben képesek közel valós idejű pozicionáláshoz. Az RTLS alapú helymeghatározás elvi módszereit az ISO/IEC 24730-2:2006 szabvány írja elő. A szabvány két módszert javasol RFID alapú, és négyet RTLS alapú lokalizációra. Néhány módszert kiemelnek az ajánlásból és részből más forrásból, a teljesség igénye nélkül: [16] [17]

- Helymeghatározás a háromszögelés elvével (Angle of Arrival - AoA)
- Leszármaztatott autonóm helymeghatározás (Dead Reckoning - DR)
- Helymeghatározás ívmetszéssel (Trilateration)
- Helymeghatározás elve az észlelt időkülönbség mérése alapján (Observed Time Difference – (OTD))
- Helymeghatározás terjedési idő méréssel (Time of Flight - ToF)
- Vételi jelerősségen alapuló helymeghatározás (Received Signal Strength Indication - RSSI)

A következő részben a beltéri mérésekhez kapcsolódó helymeghatározási algoritmusokból a háromszögeléses módszer kerül ismertetésre.

### 2.5.2. A háromszögeléses módszer [5]

A háromszögeléses módszer lényege, hogy meghatározzuk a távolságot. Ennek kiszámolásához szükségünk van két referenciapontra, itt A és B, valamint a két pont közötti távolságra.



13. ábra: A háromszögeléses módszer elve

A háromszögeléses módszer eredetileg az A és B csúcsoknál fekvő szögek ismeretében adja meg a meghatározandó távolságot. Beltéri helymeghatározás esetében viszont nem rendelkezünk ilyen információval, ezért az ábra alapján két Pitagorasz-egyenletet írhatunk fel:

$$S_1^2 = d^2 + x^2$$

$$S_2^2 = d^2 + (S - x)^2$$

A második egyenletet kifejtve:

$$S_2^2 = d^2 + S^2 - 2Sx + x^2$$

Ebben a kifejtett egyenletben megtalálható az első, ezt átírva megkapjuk:

$$S_2^2 = S_1^2 + S^2 - 2Sx$$

ezt x-re rendezve a következőt kapjuk:

$$x = \frac{S^2 + S_1^2 - S_2^2}{2S}$$

Végül ebből és az első egyenletből megkapjuk d-t:

$$d = \sqrt{S_1^2 - \left( \frac{S^2 + S_1^2 - S_2^2}{2S} \right)^2}$$

Ezzel a módszerrel tehát két ultrahang-jeladó segítségével meghatározható a vevőnek a két jeladóhoz viszonyított helyzete a teremben. Természetesen, ha például egy egység rendelkezik egyszerre adó és vevő berendezéssel is, akkor a környezetükben lévő tárgyaknak a hozzájuk viszonyított helyzete is meghatározható.

Ha tehát egy adott belső tér négy sarkában elhelyezünk adókat, illetve vevőket, akkor a teremben egy tetszőlegesen elhelyezett tárgy helyzetét e készülékek segítségével viszonylag pontosan meg lehet határozni háromszögeléses módszer segítségével. A termet felosztjuk négy háromszögre, amelyeknek alapjai a terem oldalfalai, az alappal szemközti csúcsban pedig a meghatározni kívánt tárgy helyezkedik el. A háromszögelési technikával meghatározhatjuk a tárgy négy faltól mért távolságait, amivel együtt a tárgy pontos helyzete is megállapítható.

### 2.5.3. Létező helymeghatározási rendszerek

A következő alfejezetben néhány piacon lévő helymeghatározási rendszer kerül részletezésre a teljesség igénye nélkül. Nyilvánvaló, hogy az alábbi felsorolt példákon kívül több ultrahang-alapú lokalizációs rendszer is forgalomba került az évek során. Ez a fejezet csupán egy betekintést kíván nyújtani a piacon kapható termékek terén.

Egy jól alkalmazható ultrahang alapú beltéri helymeghatározó rendszer a Sonitor Technologies által kifejlesztett **SONITOR RTLS** (rea-time locating system). A rendszer lényege, hogy a rádiósfrekvenciás azonosítás (RFID) helyett hordozható eszközökkel és fixen rögzített mikrofonokkal érik el a helymeghatározást. Mivel az ultrahang hullámok jobban elnyelődnek épületeken belül, ezért ez a rendszer jóval robosztusabb helymeghatározást biztosít, mint rádiófrekvencia elvén működő vetélytársai. [18]

Egy másik helymeghatározó módszer a **Bat** elnevezésű ultrahangos rendszer, ahol az egyes objektumok ultrahang jeladóval vannak ellátva. Ezek csak akkor adnak ki impulzust, ha egy központi egység erre utasítást ad egy rádiójel kiadásával. Mivel a vevők is észlelik a rádiójel kibocsátását, ki tudják számolni az ultrahang terjedési idejét, és egy algoritmus segítségével képesek a mozgó tárgy helyét meghatározni. [19]

Az előző rendszerekkel ellentétben a **Cricket** nevű helymeghatározó rendszer több, egymástól független, ún. beacon-öket kiadó egységekből áll, melyek az adott belső tér egész területén vannak elhelyezve. Az egységek küldenek egy rádió jelet és ezzel egy időben ultrahang impulzust is. A hallgatóknak nevezett eszközök, amelyek mozoghatnak, pedig következtetni tudnak saját helyükre, legjobb esetben 6 centiméteres pontossággal. A „beacon”-ök véletlen időközönként kerülnek kiadásra annak érdekében, hogy minimalizáljuk az ütközés valószínűségét. A hallgató egységek egymástól függetlenül azonosíthatják magukat, elkerülve a centralizált rendszerek veszélyeit. [20]

#### **2.5.4. A helymeghatározás lehetséges hibája**

Mint minden mérési módszernek, az ultrahangos helymeghatározás esetén is fennáll a hiba lehetősége.

A háromszögelés segítségével történő helymeghatározás hibája az ultrahang sebességének, a hőmérséklettől való függésen alapul, ugyanis mint azt korábban láttuk, a hang sebessége legnagyobb mértékben az adott közeg hőmérsékletétől függ. [5]

Ezen probléma kiküszöbölésére alkalmazható egy, az adó-vevő egységen elhelyezett termoszenzor, mely digitális formában adja meg a hőmérsékletet. Ha tehát a berendezésen az adatokat számoló egység számára egy eszköz a hőmérséklet-adatokat folyamatosan frissíti, az a megfelelő hullámterjedés-sebességgel számolva nagyobb pontossággal képes a távolság mérésére, ezáltal pontosabb helymeghatározás idézhető elő. [5]

### 3. AZ ULTRAHANGTERJEDÉS MODELLEZÉSÉVEL FOGLALKOZÓ IRODALMAK ÁTTEKINTÉSE

A következő fejezetekben ismertetésre kerülnek az ultrahanggal foglalkozó szakirodalmak által bemutatott terjedési modellek. Az egyes alfejezetekben szó esik létező kétdimenziós hangtér-modellekről, illetve a háromdimenziós kiterjesztéseiről. A fejezet végén, a felkutatott módszerek alapján kiválasztom az egyetemi helymeghatározó rendszer szempontjából optimális hangtér-modellt.

#### 3.1. *Ultrahangterjedés-modellek*

Az alábbi alfejezetek a már létező hangterjedési modelleket kívánják részletesen bemutatni, mind két-és három dimenzióban.

##### 3.1.1. Nem lineáris rendszerek közelítése

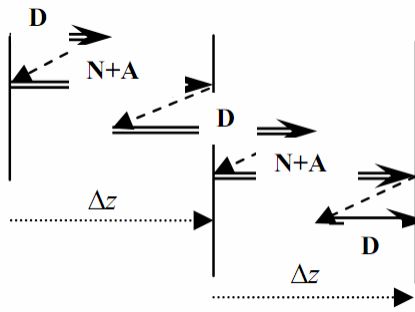
Az ultrahang terjedése egy nemlineáris jelenség, azonban lineáris közelítések is alkalmazhatóak a hullám modellezésére. A nemlineáris közegekben történő hanghullám-terjedést az ún. Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov (KZK) egyenlet írja le, amelynek megoldásait a nemlineáris akusztika során használják. Ha  $(z)$  a hullám haladási irányának tengelye,  $(x, y)$  pedig az erre merőleges sík, akkor a KZK egyenlet alakja: [21]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial \tau} = \frac{c_0}{2} \nabla_{\perp}^2 p + \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial \tau^3} + \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial \tau^2}$$

Az egyenlet tagjai a hangtér egyes jellemzői is egyben, ahol:

- $p$  az akusztikai nyomás,
- $c_0$  a legkisebb hangsebesség,
- $\delta$  a hang diffúziós tényezője,
- $\beta$  a nem linearitási tényező,  $\rho_0$  az ambiens sűrűség
- és  $\tau$  a késleltetett idő.

Az egyenlet jobb oldalának első tagja a hangtér diffrakciós tényezőjének parabolikus közelítése, második tagja a csillapítást írja le, míg a harmadik a nemlineáris jellegét reprezentálja a modellnek. E három fontos tulajdonságon alapul az ún. **operátor szétválasztás** (**operator splitting**) módszer, illetve ennek másodfokú párja (14. ábra).



**14. ábra: Másodrendű operátor szétválasztás. Az egyes operátorok jelölései: „D” a diffrakció, „N” a nem linearitás és „A” a csillapítás (attenuation) operátor.**

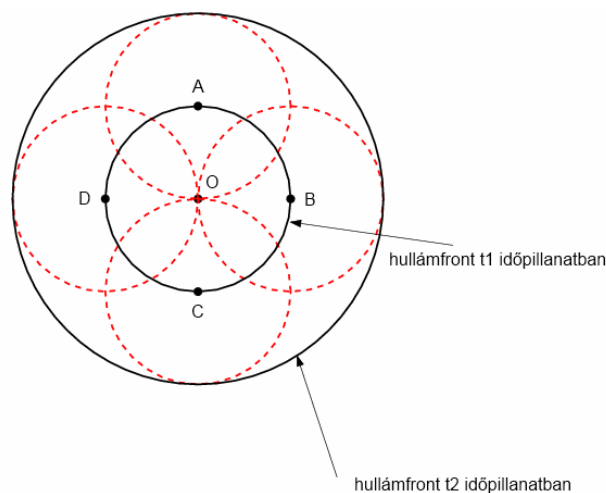
Az eljárás lényege, hogy a hangteret (nyomásteret) a bal oldali kifejezés segítségével apró lépésekben kiszámolják a **(z)** tengely mentén, feltéve, hogy a nyomásértékek a kezdősíkon adottak. Ezek után a fent említett három tényezőt külön-külön alkalmazzák a terjedési lépések felett, majd végül összegzik.

A modellezésre másodrendű operátor szétválasztás egy bizonyos terjedési sémát képvisel, amely nagyobb lépcsőket és gyorsabb számítási időt tesz lehetővé. [22]

### 3.1.2. A Huygens hullámterjedési modell

A Huygens-elv szerint a hullámfront minden egyes pontja egy gömbszerű pontforrást képvisel. Egy bizonyos **(t)** idő elteltével, a hullámfront új helyzetét a másodlagos pontforrások burkolója határozza meg. Az elvet a következő (15.) ábra szemlélteti: a 0. időpillanatban a középső pont (O) hullámot bocsát ki. Feltételezzük, hogy **(t<sub>1</sub>)** időpillanatban a hullámfront összes pontja

(A, B, C és D pontok) pontforrásként viselkedik, így **t<sub>2</sub>** időpontban ezen források burkolójából kialakul az új hullámfront. [23]



**15. ábra: A Huygens terjedési modell hullámfrontjai t2 időpillanatban**

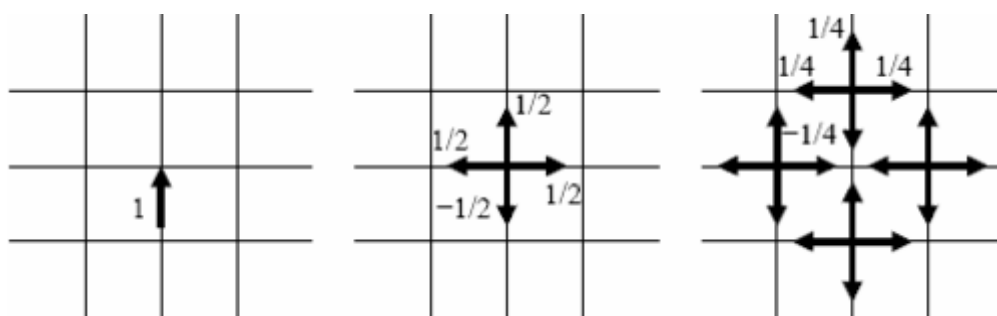
### 3.1.3. A Transmission Line Matrix (TLM) módszer

A korábban említett Huygens-féle hullámterjedési modellre alapul az akusztikus és elektromágneses hullámok szimulációja során használt **Transmission Line Matrix (TLM)** módszer.

Az eljárást először P. B. Johns ismertette 1974-ben, mint kétdimenziós módszer, majd ezt 1987-ben kiterjesztette három dimenzióra is. A TLM módszer egy diszkrét megközelítése a hullámegyenlet numerikus megoldásának. Az eljárás lényege, hogy a folytonos rendszert egy koncentrált elemekből álló rendszerrel helyettesítjük, azaz a megoldáshalmazt egy négyzet alakú hálóra („mesh”) bontjuk, és ezekkel reprezentáljuk a távvezetéseket.

A TLM módszert eleinte az elektromágneses hullámok (transmission line = távvezeték) terjedésének modellezésére használták. Az elektromágneses terek jellemzőinek Maxwell egyenletek alapján történő meghatározása nagyon bonyolult matematikai apparátust igényel.

A TLM módszer ezzel a sok időt igénylő számolással szemben egy gyorsabb, programozhatóbb alternatívát jelenít meg. A modell a teret diszkrét pontokra osztja („node”), s az egyes pontokat a tér három irányában távvezeték modulokkal köti össze. [23]



16. ábra: Hullámfront kialakulása a távvezetékben

Kihasználva a távvezetésekre vonatkozó egyenletek és az elektromágneses tér alapösszefüggései közötti analógiát, a modell térszámításra is használható. Így számos, de hasonló alakú differenciálegyenletet kell megoldani, ám azok megoldása algoritmizálhatóbb, s így számítógépes szimuláció segítségével a tér jellemzői közelítőleg meghatározhatók. [24]

Mivel a TLM a módszer a Huygens modellen alapszik, ezért ez alkalmazható minden olyan jelenségre, amely a Huygens hullámterjedési modell elveire épül. A TLM módszer tehát ultrahang-terjedés szimulációjára is alkalmazható, hiszen az ultrahang-és elektromágneses hullámok között hasonlóságok fedezhetőek fel. [23]

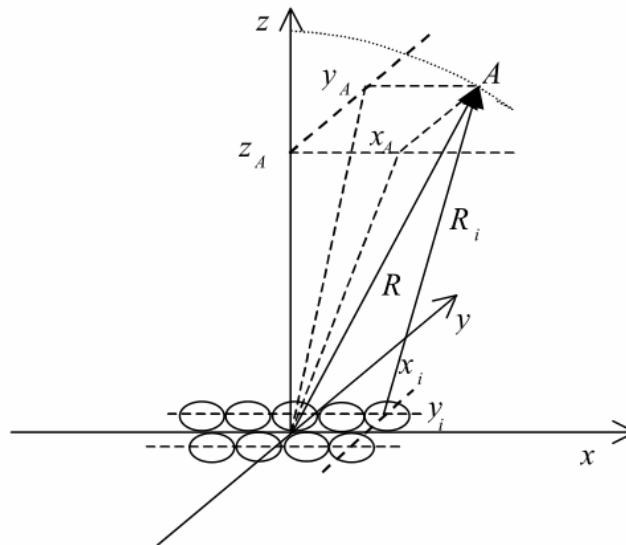
A rendszerre vonatkozó alapegyenletek a Kirchhoff-törvényekből számíthatók illetve egyszerűsíthetők. A kétdimenziós modell az ún. „négykapu” realizációt alkalmazza, vagyis a tér egyes pontjai négyzetrácsot alkotnak, és egy-egy pontban „négykapukat” helyezve, azok karakterisztikáját meghatározva tudjuk kiszámolni az adott pont térjellemzőit. [24]

### 3.2. Háromdimenziós hangtér-modell létrehozása az ultrahangszugárzó felhasználásával

A természetben az ultrahang terjedése három dimenzióban történik. Ennek következtében a kétdimenziós modellek kiterjesztése elengedhetetlen volt. Az alábbi fejezetben ismertetésre kerül két lehetőség háromdimenziós modell megalkotására.

#### 3.2.1. Hangtér modellezése kétdimenziós nyaláboló alkalmazásával

A különböző tömb geometriák és nyaláboló algoritmusok száma olyan nagy, hogy egyedül a számítógépes szimuláció nyújthat ésszerű megoldást. Továbbá tény, hogy néhány közülük csak az amplitúdó meghatározását teszi lehetővé. A következő akusztikai modell tetszőleges számú antennaelem alapján képes analizálni az adott antennasor által sugárzott hullámfrontot. A probléma geometriáját a következő ábra szemlélteti. Tegyük fel, hogy az antenna elemei az  $(x, y)$  síkban helyezkednek el, és minden egyes elem külön fázissal és amplitúdóval van meghajtva. [25]



17. ábra: A modell geometriai ábrázolása

Ebben a koordináta-rendszerben az „A” gömbfelszín az  $\alpha$  és  $\beta$  szögekkel és  $R$  távolsággal van reprezentálva, ahol az  $\alpha$  szög a  $(z)$  tengely és az  $R$  xz tengelyre állított vetülete között van. Az  $R$  mértéke az origó és A pont közötti távolság, béta pedig a yz sík szerint megfelelő szög. Az egyes antennaelemek és A pont közötti távolságok az alábbi képlettel adhatók meg: [25]

$$R_i = \sqrt{(x_A - x_i)^2 + (y_A - y_i)^2 + z_A^2}.$$

ahol  $(x_A, y_A, z_A)$  az „A” pont koordinátái három dimenzióban. A modell feltételezi, hogy az antennasor pontszerű elemekből épül fel, ám ezen elemek mindegyike rendelkezik egy olyan  $B(\gamma)$  irányítottági mintázattal, melyet egy nulladrendű Bessel függvény ír le.

Az „A” pontban mérhető,  $i$ -dik antenna által keltett nyomás mértéke az előbb említett irányítottág és a gömbhullám terjedéséből vezethető le: [25]

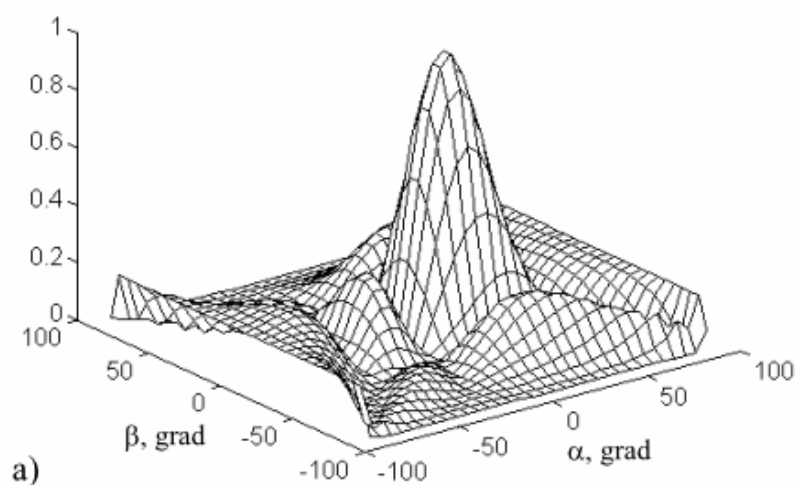
$$p_i(\alpha, \beta, R) = B(\gamma) \frac{A_{i0}}{R_i} \cos[\omega t - \varphi_1(R_i) - \varphi_2(t_i)]$$

A képletben szereplő együttható az  $R_i$  távolságban lévő amplitúdó,  $\varphi_1$  az  $R$  távolságban lévő fáziseltolás,  $\varphi_2$  pedig a nyaláboláshoz szükséges jel fáziseltolása.

Az antennasor által kiadott, teljes hullámfrontot az összes elem által sugárzott tér összegéből származtatható: [25]

$$p(\alpha, \beta, R) = B(\gamma) \sum_{i=1}^N \frac{A_{i0}}{R_i} \cos[\omega t - \varphi_1(R_i) - \varphi_2(t_i)]$$

Az algoritmus lefuttatásával a következő mintázatot érhetünk el téglalap elrendezésű antennák segítségével.



18. ábra: Végső mintázat négyzetes antennasor elrendezés esetén

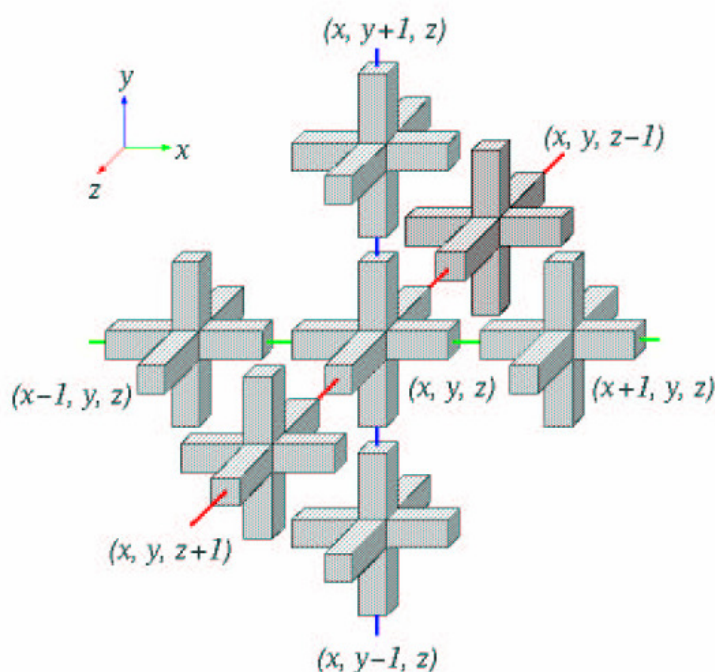
Ezen modell előnye, hogy ha megfelelően irányított nyalábbal dolgozunk, akkor annak mintázatát képesek vagyunk a fenti módszerrel meghatározni, azonban a visszaverődési felületekről nem tesz említést, tehát kevésbé alkalmas valós rendszerek modellezésére.

### 3.2.2. A TLM-módszer háromdimenziós kiterjesztése

Az előző fejezetekben szó esett a kétdimenziós TLM módszerről. Természetesen ez kiterjeszthető háromdimenziós modellé is, figyelembe véve a két dimenzióban megismert elveket.

Annak érdekében, hogy a kétdimenziós TLM módszert kiterjesszük három dimenzióra, az eredeti négyzetrácsot ki kell terjeszteni egy kocka alakú rácsszerkezetté, ahol az egyes „node”-ok mind a 6 közvetlen szomszédjukkal össze van kötve

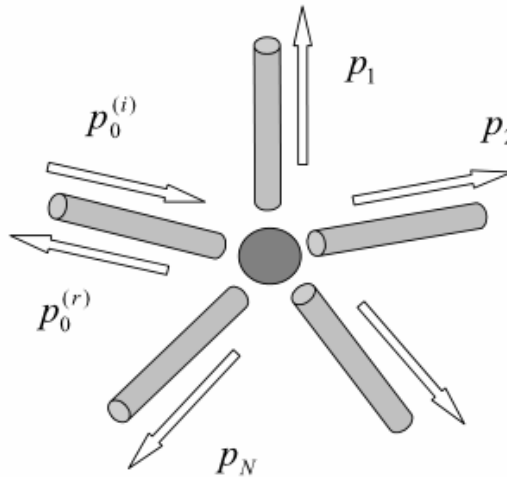
A TLM módszer esetén a háromdimenziós problémát „tizenkét-kapukból” álló rendszer modellezi. Ez azt jelenti, hogy jelen esetben az egyes „node”-oknak nem 4, hanem 6 szomszédja lesz, még hozzá térbeli elrendezésben. [24] (19. ábra)



19. ábra: A TLM hálózat node-jai háromdimenziós elrendezésben (kocka rácsszerkezet)

A „node” modelljét az határozza meg, hogy mely hullámot kívánjuk modellezni a TLM eljárással. Ez alapján megkülönböztethetünk vektoriális-és skalárhullámokat. Mivel az elektromágneses hullámok vektoriálisak, ezért a modellezésük elég komplex. A hanghullámok azonban skaláris hullámok, tehát lehetőség van arra, hogy egy skaláris TLM modellel reprezentáljuk. [23]

Könnyen belátható, hogy kétdimenziós párjához képest ez a TLM modell nagyobb számolási kapacitást igényel. Ennek minimalizálása végett létrehoztak egy tetraéder alakú, háromdimenziós elrendezést.(20. ábra).



20. ábra: Tetraéder alakú TLM rács, közepén a junction (csomóponti) node-dal

A modell lényege, hogy node-onként 6 helyett mindössze 4, egyenlő hosszúságú távvezetékot kapunk, melyek egy csomópontban („junction”) találkoznak. Az ábra jól szemlélteti azt is, hogy a csőtápvonalak mentén oda-vissza irányban lehetséges a terjedés. [26]

### 3.3. Optimális hangtér-modell kiválasztása

A rendelkezésemre álló, nemzetközi szakirodalmak alapján azt a következtetést vontam le, hogy az egyetemi ultrahangos helymeghatározó rendszert a TLM módszerrel érdemes modellezni.

A TLM módszer választása mellett többek között az alábbi érvek szólnak:

- egyszerű szoftveres implementációs lehetőség
- nyílt forráskódú, létező implementációk
- gazdag és színvonalas külföldi szakirodalom áll rendelkezésre
- adók, vevők és visszaverődési felületek variálhatósága
- a hullám parciális differenciálegyenletét egészen jól közelíti

A TLM módszer további előnye a többi (előző fejezetekben kifejtett) modellekkel szemben, hogy itt a teljes hangteret tudjuk kétdimenziós térben modellezni.

A kiválasztott modell egyedüli hátránya talán az, hogy háromdimenziós implementáció esetén a számítási igény megnőhet.

## 4. SZÁMÍTÓGÉPES MODELL KIALAKÍTÁSA BELTÉRI HELYMEGHATÁROZÁSHOZ

Az előző fejezetekben ismertetésre kerültek a hangtér-modell létrehozásának lehetőségei. A következő részben a kiválasztott TLM módszer segítségével modellezésre kerül az egyetemi mérésekre kialakított, helymeghatározás során használt belső tér.

### 4.1. *Kétdimenziós hangtér-modell létrehozása*

A hangtér modellezésére a TLM módszer egyik meglévő implementációját, az ún. Lambda nyílt forráskódú programot használtam fel. A mérés során kapott eredmények kiértékelésére az egyetem által biztosított MatLab környezet állt rendelkezésemre. A következőkben az előbb felsorolt eszközökkel történő beltéri szimulációk, és azok eredményeinek vizsgálata kerül ismertetésre.

#### 4.1.1. A Lambda akusztikai szimulátor ismertetése [27]

A beltéri modellezésére a **Lambda** nevű ingyenes, nyílt forráskódú, akusztikus szimulátort használtam fel. Ez a program többek közt lehetővé teszi, hogy egy előre megadott méretű síkban forrásokat, vevőket, falakat (vagy tereptárgyakat) helyezünk el. Előnye, hogy a már korábbi fejezetekben megismert alapfogalmakra építkezik, vagyis felhasználja az egyes közegek fizikai tulajdonságait, mint például a reflexiós tényezőt és a közegre jellemző hangsebességet.

A szimulációt (terem, tereptárgyak, források) „.m” kiterjesztésű MATLAB fájlban, valamint „.sce” kiterjesztésű SciLab fájlban célszerű megírni.

A szoftver a modellezni kívánt belső teret egy környezeti mátrixszal reprezentálja. A mátrix mérete megegyezik a hullámterjedés környezetének méretével, tehát végső soron egy  $m \times n$  mátrix elemeit kell változtatni. A környezeti mátrixban a 0-val jelölt értékek reprezentálják a levegőt, ahol a hullám terjed. Az [-1,1] közötti értékek a térben található reflexiós felületeket (tömör falakat és tereptárgyakat) reprezentálják. Az egyes értékek az első fejezetben megismert összefüggések alapján határozhatók meg. A szoftver egyik legnagyobb előnye, hogy az egyes források és a belső tér fontosabb paramétereit testre szabhatjuk.

A kész modell hosszabb ciklusokra is lefuttatható, ugyanakkor képet és videót is lehet készíteni a hullám terjedéséről.

A belső tér modell számos paraméterét tudjuk változtatni a szoftver segítségével.

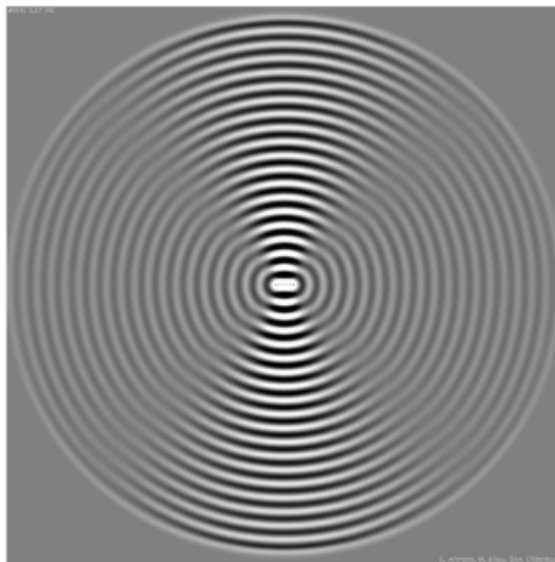
Ezen tulajdonságok közé a következők sorolhatók:

- modellezni kívánt terem nagysága node-okban megadva (x-y méretű mátrix)
- szimuláció futtatásának iterációja
- hangterjedés sebessége m/s-ban
- két node közötti távolság méterben
- a közeg sűrűsége  $\text{kg/m}^3$ -ben megadva
- terem mérete és a térben található objektumok reflexiók tényezői

A létrehozott térben elhelyezhetünk több forrást is. A mérések szempontjából ez azért lényeges, mert az egyetemi rendszeren belül több adó álló, frekvenciapásztázó adósort használunk.

A forrás(oka)t tekintve a következő paramétereket adhatjuk meg:

- forrás(ok) helye a fent említett „teremben” (x-y pozíció)
- forrás típusa hullámforma alapján (szinuszos, négyszögjel, delta impulzus)
- forrás nyomása Pascalban mérve
- forrás frekvenciája Hz-ben mérve
- forrás fáziseltolása fokban mérve



**21. ábra: Egyszerű szimuláció létrehozása antennasorok modellezésére**

A szimuláció fontos részét képezi a vevőegységek elhelyezése. A szoftver lehetőséget nyújt 10 000 darab vevőegység elhelyezésére. Természetesen a modellezés során nem lesz ennyi eszközre szükség, azonban a modellt átalakíthatjuk egy forrás több vevős rendszerre, és fordítva.

A szoftver a korábbi fejezetekben ismertetett TLM módszert alkalmazza a hullám terjedésének modellezéséhez. A TLM háló (mesh) „node”-jainak hangnyomását a program két összefüggés alapján számolja ki.

Az egyik módszer szabad térre értendő,

$$p_{ij}(k+1) = \frac{1}{2} \sum p_{adjacent\ nodes}(k) - p_{ij}(k-1)$$

míg a másik a határpontokra („boundary node”-okra) vonatkozik:

$$p_{ij}(k+1) = \frac{1}{2} \sum I_{ij}^{all\ dir}(k+1)$$

Az utóbbi esetben be kell vezetni ún. határhullámokat is, melyre két lehetőség adódik:

ha az irány a határoló felület felé mutat:

$$I_{ij}^{dir}(k+1) = p_{neighbor\ in\ dir}(k) - p_{ij}(k-1) + I_{ij}^{dir}(k-1)$$

máskülönben:

$$I_{ij}^{dir}(k+1) = rp_{ij}(k) - rI_{ij}^{dir}$$

Megjegyzendő, hogy a modell nagyobb frekvenciákon (pl.: mikrohullámok) a diszperzió miatt nem lesz teljesen pontos, mint ahogy ez a legtöbb „finite-difference” közelítés esetében is előfordul. A fenti hatás elkerülése végett legalább 10 node-ot kell alkalmaznunk hullámhosszonként.

#### 4.1.2. Hangtér-modell létrehozása szinuszos forrás felhasználásával

Ebben a szimulációs fázisban a falak és más visszaverődési felületek nem képezik a modell részét. A hanghullámok jelen esetben teljes elnyelődésnek vannak kitéve, így a térben azok elvileg a végtelenségig képesek terjedni. A hangtér előállításához természetesen szükséges az előző fejezetekben megismert paraméterek helyes beállítása. Ezeket egy különálló „M fájlban” adtam meg, amelyet a következő kódrészlet szemlélteti (22. ábra):

```

1 - FILENAME = 'szoba_elszo.sim';
2 - YSIZE=300; % set y-size of simulation environment in nodes
3 - XSIZE=500; % set x-size of simulation environment in nodes
4 - STEPS=10000; % set # of iterations
5 - C=343; % set sound propagation speed in m/s
6 - L=0.01; % set node distance (tube length) in m
7 - RHO=1.204; % set air density in kg/m^3

```

22. ábra: A modellezett tér akusztikai paraméterezése

A fenti ábráról leolvasható, hogy az olyan fontos adatok mellett, mint a hang terjedési sebessége és a levegő sűrűsége, szükségyszerű még további információkat is megadni a teremmel tulajdonságaival kapcsolatosan. Ezek közé tartozik az iterációs szám (meddig kívánjuk futtatni a szimulációt), valamint a node-ok közötti távolság is. Az „XSIZE” és „YSIZE” változók – melyek node-okban vannak kifejezve - a terem nagyságát reprezentálják, ahol 1 node hossza az „L” értékével egyezik meg. Az első szimuláció egy 300 nodex500 node nagyságú teremben készült, mely átszámolva méterbe nagyjából egy 3x5 méteres folyosónak felel meg. A folyosó elején egy 3 elemű lineáris antennasort, a végén pedig egy vevőegységet helyeztem el. Az antennasor elemeinek paramétereit az alábbi kódrészlet (23. ábra) tartalmazza:

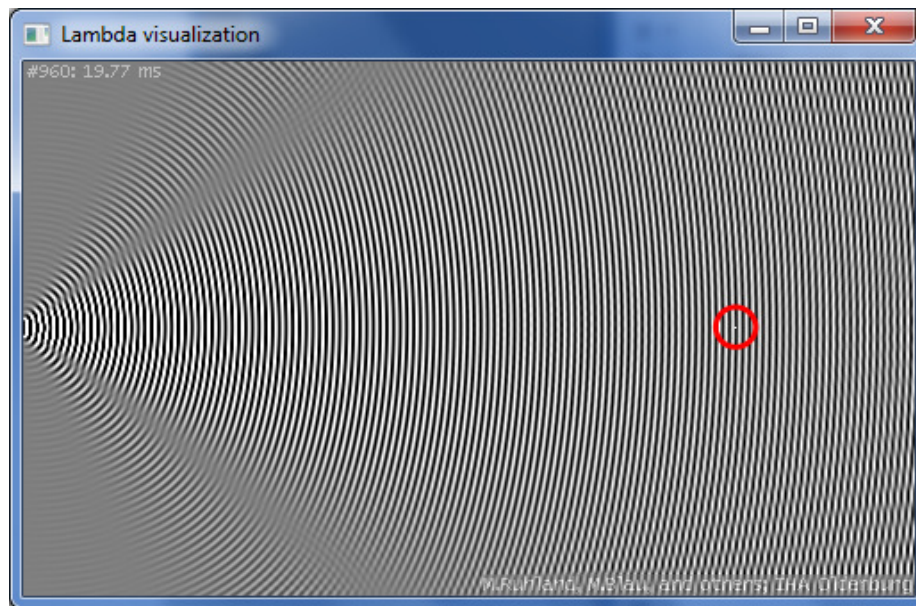
```

8 - ENVI=zeros(YSIZE,XSIZE); % create empty space
9 - ENVI(150,400) = -2; %place receiver node
10 - SOURCE1=[147 1 1 1 40000 0];
11 - SOURCE2=[149 1 1 1 40000 0];
12 - SOURCE3=[151 1 1 1 40000 0];
13 - SOURCE4=[153 1 1 1 40000 0];
14 - sources = [SOURCE1 SOURCE2 SOURCE3 SOURCE4];
15 - simFile = fopen(FILENAME,'w');
16 - fwrite(simFile,'LAMBDA SIM200','uchar');
17 - fwrite(simFile,'DEF','uchar');
18 - fwrite(simFile,[YSIZE XSIZE STEPS C L RHO],'double');
19 - fwrite(simFile,'ENV','uchar');
20 - fwrite(simFile,ENVI,'double');
21 - fwrite(simFile,'SRC','uchar');
22 - fwrite(simFile,floor(length(sources)./6),'double');
23 - fwrite(simFile,sources,'double');
24 - fclose(simFile);

```

23. ábra: Antennasorok paramétereit és vevőegység koordinátáinak inicializálása

A négy antenna azonos fázissal (0°) és amplitúdóval (1 Pa) vannak meghajtva, ugyanakkor a pozíciójuk úgy lett megválasztva, hogy azok egy irányított és egyben hasznos hullámfrontot képezzenek. Ez azért kedvezőbb megoldás a mindenirányú antennával szemben, mert később szimulációk során - például visszaverődési felületek alkalmazása esetén - kevesebb reflexióval kell számolnunk. A modelltől azt várjuk, hogy a korábbi fejezetekben felvázolt ultrahangnyalábólást valósítsa meg két dimenzióban. A szimulációt lefuttatva a következő eredményt kaptam: (24. ábra)



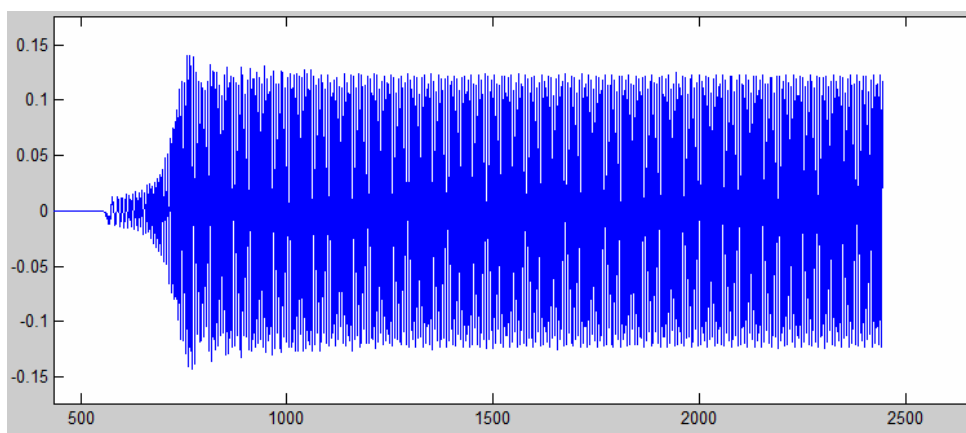
24. ábra: Szoba modellezése visszaverődési felületek nélkül, vastagon jelölve a forrást

A fenti ábrán jól látható, hogy a főlebeny mellett két melléklebeny jelent meg, azonban a többi irányban csak csekély mértékben terjed a hanghullám, ami nem befolyásolja a szimuláció kimenetelét. Az ábra bal felső sarkában megfigyelhető az iterációs szám, valamint a futási idő, mely értékek a vevőoldalon vett nyomásértékeknél játszanak szerepet a későbbiekben.

Ami számunkra a legfontosabb adat az a vevő által mért nyomásértékek. A kívánt adatokat a program egy bináris fájlba mentette le, ezt kellett visszaolvasni „MatLab” környezetben.

A nyomásértékek egy *double* típusú vektorban lettek lementve, melynek dimenziója megegyezik a szimuláció futási iterációjának számával. A vektor elemeit a „MatLab” eszközeivel könnyen fel lehet dolgozni, illetve meg lehet jeleníteni hullámalak formájában.

Az alábbi ábrán az első szimuláció során mért nyomásértékek láthatóak, az iteráció függvényében (25. ábra)



25. ábra: A vevőoldalon mért nyomásértékek (y tengely) az iteráció függvényében (x tengely)

A 25. ábráról egyértelműen leolvasható, hogy a hullám maximális értéke látszólag alacsonyabb, mint a forrás amplitúdója volt (1 Pa). A szemléletesebb mérési eredmények érdekében az alábbi összefüggés alapján átváltottam a mért nyomásértékeket: [28]

$$L_p = 20 \cdot \lg\left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}}\right) dB$$

A fenti képlettel kapcsolatban megjegyzendő, hogy a hangintenzitás nem egyenlő a mért hangnyomás mértékével, mivel mértékegységük is különbözik. A hangintenzitást egy adott területen mért hangteljesítmény ( $W/m^2$ ), míg a hangnyomásszintet egy ponton mérjük, és egy adott referenciaértékhez viszonyítjuk.

A logaritmus számlálójában lévő érték a mért nyomást, nevezője pedig a referencianyomást jelenti. Ez a referenciaérték kb.  $20\mu Pa$ , így ebből levezethető, hogy 1 Pa kb. 94 decibellel egyenlő. A számítási pontatlanságok elkerülése végett választottam ezt a magas nyomásértéket.

Maximumkereséssel megállapítottam, hogy a vevő által mért legmagasabb hangnyomás érték kb.  $0,1405 Pa$ . Alkalmazva a fenti képletet, kb. 77 dB-es hangnyomást kapunk, ami az eredeti 94 dB-hez képest 17 dB-es csillapítást jelent. Az adó és vevő közötti távolság 400 node (kb. 4 méter), tehát ekkora csillapítás még elfogadható.

## **4.2. Hangtér-modell kibővítése visszaverődési felületekkel**

Az előzőekben bemutatott szimuláció során kiderült, hogy az alkalmazott modell (visszaverődési felületek híján) nem igazán alkalmazható valós terek modellezéséhez, azonban a TLM módszer lehetőségeit nagyon jól szemléltette. A második szimuláció ugyanazon folyosón történik, mint az első szimuláció, azzal a különbséggel, hogy most visszaverődési felületek is részei lesznek a modellnek.

### **4.2.1. Négyelemű antennasor modellezése**

A második szimuláció során használt folyosó paraméterei egy az egyben megegyeznek az előző szimuláció során használttal. A folyosó falait tömör betonnak tételeztem fel, ennek megfelelően a reflexiós tényezőt azonosan 1-nek választottam (26. ábra). A valóságban a betonfalak kb. 99%-os visszaverő képességgel rendelkeznek, tehát tulajdonképpen eltekinthetünk az elnyelődéstől. A futtatandó kódrészlet annyiban változott meg, hogy a környezeti mátrixban a falakat reprezentáló reflexiós tényezők is szerepelnek.

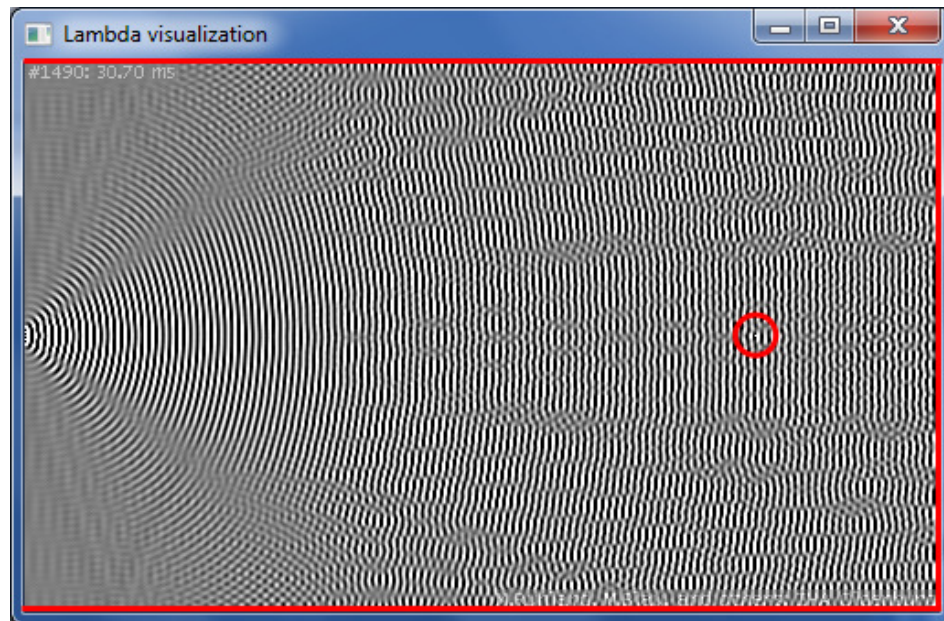
```

10 - ENVI(1,1:XSIZE)=1; %upper wall
11 - ENVI(YSIZE,1:XSIZE)=1; %lower wall
12 - ENVI(1:YSIZE,XSIZE)=1; % right border
13 % ENVI(1:YSIZE,1)=1; % left border

```

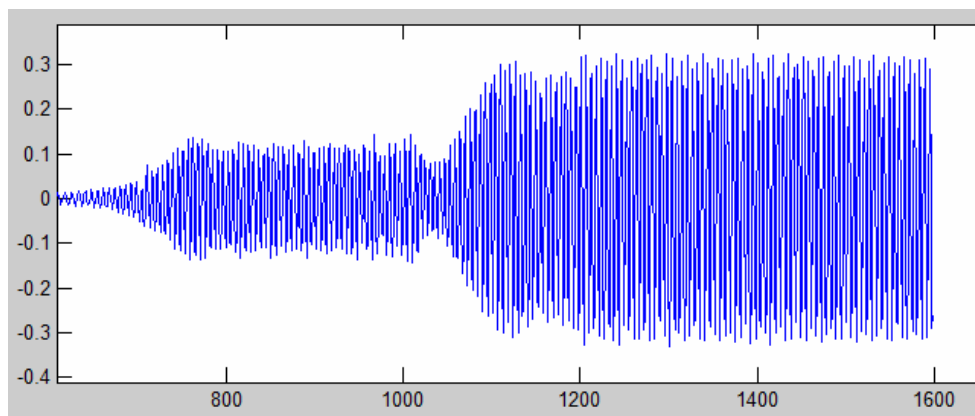
26. ábra: A folyosót reprezentáló mátrix 3 oldalának megváltoztatása

Az ily módon megváltoztatott modelltől azt várjuk, hogy a folyosón az interferenciák következtében egy állandó tér alakuljon ki. A modellt betöltöttem a szimulációs környezetbe, és futtatáskor a következőt kaptam (27. ábra):



27. ábra: Ugyanazon folyosó reflektív felületekkel (vastag vonallal jelölve a forrást)

Az első szimulációhoz képest megfigyelhető, hogy a reflexiók következtében egy idő után stationer hullámfront alakul ki a folyosó végében. Az ilyen típusú szimuláció a hangtér feltérképezésére, illetve egyszerű távolságmérésre is alkalmazható. A folyosón lévő vevőegységen mért adatok a következő ábrán láthatók (28. ábra):



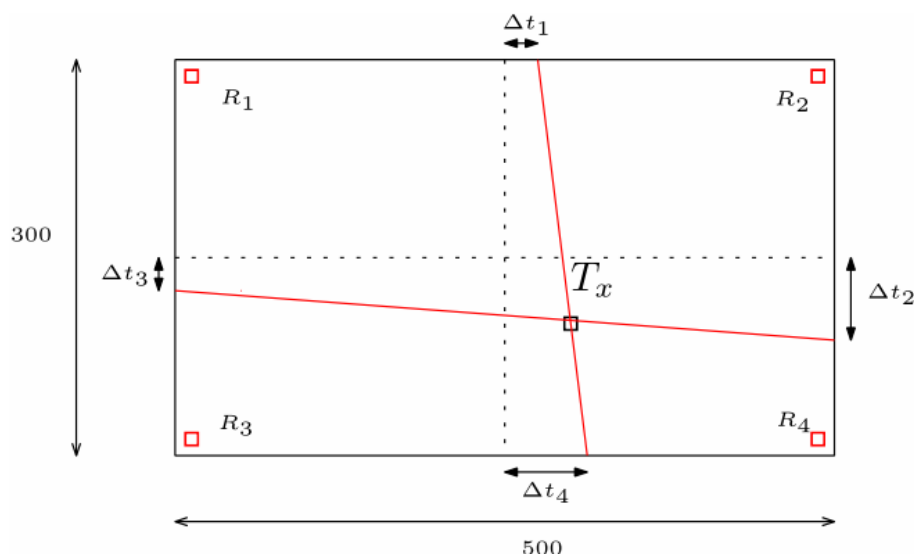
28. ábra: Mikrofon által vett nyomásértékek visszaverődési felületek esetében: x tengely az iterációk száma, y pedig a nyomásérték Pascal-ban

A 28. ábrán látható, hogy a 700-dik iteráció után érkezik az első hullám, ahol a mért hangnyomás kb. 0.1 Pa, ezt átszámolva kb. 74 dB nagyságú nyomásértéket kapunk. Az 1000-dik iteráció után azonban már az interferenciák által keltett hullámfrontot látjuk. Ez azt jelenti, hogy ha két megtört hullám előbb érkezik a vevőhöz, mint a direkt hullám, akkor a vevő ezen felerősített hullámokat fogja érzékelni.

#### 4.2.2. Négy vevőegység és egy adóegység elhelyezése

Mivel az egyetemi rendszert helymeghatározásra szeretnénk használni – ahol egy adóegység és több vevő elrendezéséről beszélünk - ezért az előző modellt ennek megfelelően kellett átalakítani. A szimulációs környezet lehetővé teszi, hogy véges mennyiségű mikrofont elhelyezzünk, modellezve ezzel a több mikrofonos elrendezést. Azt szeretnénk elérni, hogy 3 vagy több vevő felhasználásával minél pontosabban lehessen a hullámforrást lokalizálni. Ehhez az ún. „Time of Flight” alapú helymeghatározást használjuk fel, vagyis megmérjük a négy adón külön-külön érzékelt hullámok beérkezési idejét, és azok páronkénti különbségéből megállapítjuk a forrás (x) és (y) koordinátáit.

A lokalizáció elvét a következő ábra szemlélteti (29. ábra):

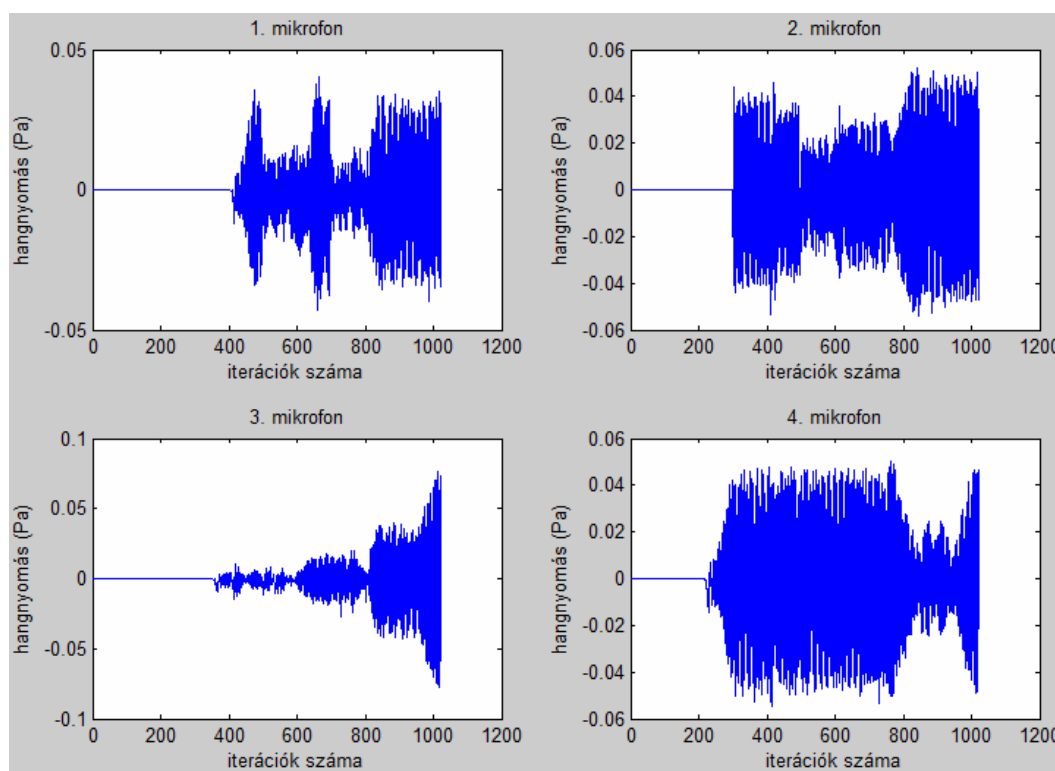


29. ábra: Időkülönbség alapú helymeghatározás elméleti rajza

Az ábra azt kívánja bemutatni, hogy a forrás pozícióját az egyes vevők mért időkülönbségek alapján meghatározható. A páronkénti időkülönbségekből ugyanis meghatározzák a vevőnek a középvonaltól való eltérését. Ha a fent látható módon összekötjük a vertikális és horizontális különbségi pontokat, akkor a két egyenes metszéspontja meghatározza a vevő koordinátáit. Kijelenthetjük tehát, hogy a modellezés egyik kritikus pontja a pontos időmérés, hiszen ez nagymértékben befolyásolja a mérési eredményeket.

A szimuláció során felhasznált folyosó mérete ugyanaz maradt, mint az előző szimulációban volt, e mellett elhelyeztem a tér négy sarkától 5 centiméterre egy-egy vevőegységet. A forrást a folyosó (200, 300) koordinátájú pontjába tettem (node-ban mérve),  $0^\circ$ -os fáziseltolással és 1 Pa nagyságú amplitúdóval. A visszaverődési felületek ugyanúgy 1-es reflexiós tényezővel rendelkeznek, tehát eltekintünk az elnyelődéstől.

A szimuláció lefuttatása után egy négy soros és az iterációnak számának megfelelő oszlopú mátrixot kaptam. A MatLab grafikonos eszközeit felhasználva négy darab ábrát kaptam, ennek eredménye az alábbi képen látható: (30. ábra)



30. ábra: A folyosó négy mikrofonja által mért nyomásértékek az iteráció függvényében

A fenti ábrán az eredeti kétdimenziós sorrendnek megfelelően vannak feltüntetve a kapott hangnyomások. A lokalizáció megvalósításához viszont minden egyes vevő esetén meg kell határozni a hanghullám beérkezésének idejét. Ehhez nyújtanak majd megoldást a következő fejezetben felvázolt helymeghatározási számítások.

#### 4.2.3. Korábbi helymeghatározási modell validálása a mért adatok alapján

Az előző fejezetben mért időértékeket felhasználtam Bruzsa Péter egyetemi hallgató által alkotott lokalizációs módszer validálásához. Az általa megkonstruált modellben a szoba négy

sarkában négy hullámforrás, a közepén pedig egy mikrofon található. [29] Az egységek elrendezése a két modellben ugyan azonosak, működésüket tekintve azonban pontosan ellentétes módon működnek. Az általam konstruált modellben történő számolásoknál tehát felhasználható a Bruzsa Péter által megkonstruált összefüggések.

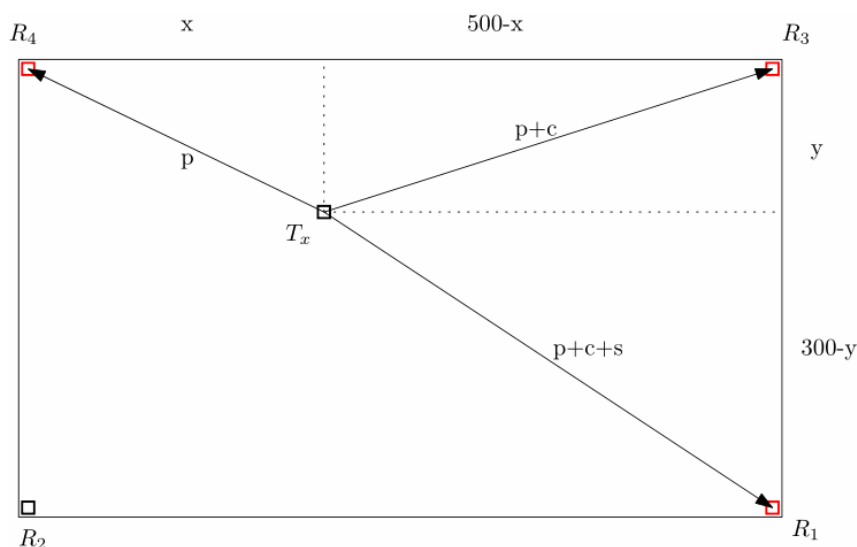
Az adóegység helyének meghatározásához szükség lesz az iterációk és az eltelt idő közötti átváltásra. Meghatároztam, hogy egy iteráció átlagosan 20.6 ns alatt fut le. Az ismert  $s = v \cdot t$  összefüggés alapján kiszámolható, hogy a hanghullám mekkora távolságot tesz meg a forrástól az egyes mikrofonokig.

Ezeket az alábbi táblázat foglalja össze:

| Vevőegység | Vételig eltelt iterációk | Vétel időpontja (ms) | Adótól a vevőig megtett távolság (node) |
|------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| 1.         | 401                      | 8.26                 | 283.31                                  |
| 2.         | 301                      | 6.20                 | 212.66                                  |
| 3.         | 360                      | 7.41                 | 254.16                                  |
| 4.         | 219                      | 4.51                 | 154.69                                  |

A táblázat alapján látható, hogy a 4. mikrofonhoz lesz a forrás közelebb, tehát az ehhez tartozó távolság felhasználható a számolás kiindulási pontjának, mely megegyezik az igazolandó modell referenciapontjával, azzal a különbséggel, hogy itt az átellenes sarokba került a pont.

Az alábbi ábra azt mutatja meg, hogy az igazolandó modell megfordításával (az egyes jelöléseket meghagyva) hogyan tudunk lokalizációt végrehajtani. (31. ábra)



31. ábra: Eddig használatos folyosó modellje elfordítva a referenciamodellnek megfelelően

Az ábráról leolvasható, hogy a két modell analóg egymással, csak itt az eredetileg ismeretlen paraméterek most ismertek, ezért az eredetivel azonos elnevezéseket használtam a számítások megkönnyítése érdekében.

A hullámforrás koordinátáit a már megismert összefüggések alapján határoztam meg, ehhez a 4. mikrofonhoz tartozó távolságot rendeltem a „ $p$ ” paraméterhez. Mivel azonban nem négyzet alakú folyosóról van szó, ezért ennek megfelelően kellett figyelembe venni a  $D$  paramétert.

A keresett ( $x$ ) koordináta a következő képlet alapján adható meg [29]:

$$x = \frac{D^2 - 2pc - c^2}{2D}$$

A hiányzó „ $c$ ” paramétert „ $T_4$ ” és „ $T_3$ ” adótól mért távolságainak különbségéből kapjuk meg, ez kb. 99.47 node. A képletben szereplő „ $D$ ” paraméter most a folyosó szélessége, vagyis 500 node. A megfelelő behelyettesítések után  $x$ -re a következőt kaptam:

$$x = \frac{500^2 - 2 \cdot 154.59 \cdot 99.47 - 99.47^2}{1000} \approx 209.35 \text{ ("node")}$$

Hasonló módon kapjuk meg ( $y$ ) koordinátát, azonban most  $D$ -t a folyosó hosszának (300) választjuk. A számoláshoz használandó összefüggés: [29]

$$y = \frac{D^2 - 2ps - 2cs - s^2}{2D}$$

Az ismeretlen  $s$  paramétert „ $T_1$ ” és „ $T_3$ ” adótól mért távolságainak különbségéből származtatható, ez kb. 29.15 node. Behelyettesítve az előző képletbe a következő adódik:

$$x = \frac{300^2 - 2 \cdot 154.59 \cdot 29.15 - 2 \cdot 99.47 \cdot 29.15 - 29.15^2}{600} \approx 123.89 \text{ ("node")}$$

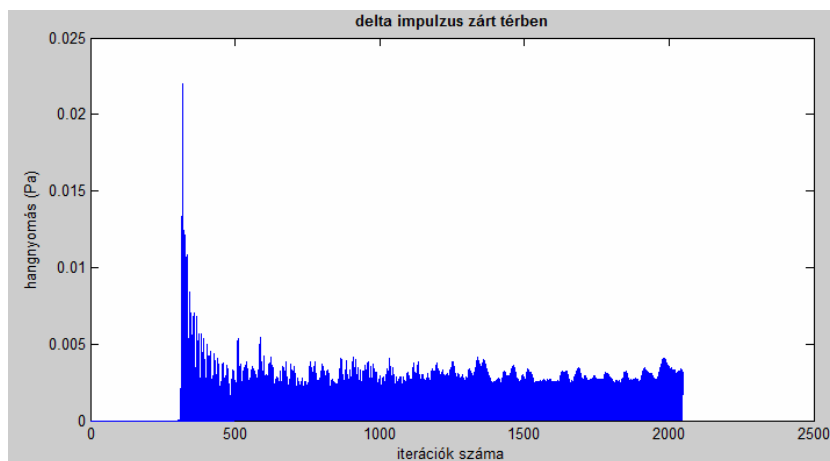
A fenti kiszámított két koordinátából és a folyosó dimenziói alapján a helyes koordináták a következőképp alakulnak:

$$(x', y') = (500 - 209.35, 300 - 123.89) = (290.65, 176.11)$$

A hullámforrás eredeti pozíciójához képest – ami eredetileg (300, 200) volt – ez egy elég jó közelítésnek számít. Megállapítható, hogy (x) irányban kb. 4%-os, míg (y) irányban nagyjából 12%-os a hiba. Ezekből az adatokból nagyon jól látszik, hogy a Bruzsa Péter-féle modell alkalmazható TLM alapú szimulációkra, valamint az, hogy mennyire fontos a precíz időmérés.

#### 4.2.4. Tapasztalatok a kétdimenziós modell használatával kapcsolatban

Az eddig elvégzett szimulációk alatt folyamatosan sugárzó, szinuszos jelalakú hullámokkal dolgoztam. Az egyetem helymeghatározó rendszere azonban burst-öket sugároz ki meghatározott intervallumonként, tehát nem a terem teljes feltérképezésére van optimalizálva. Ennek eléréséhez szükség volt a körsugárzó antenna változtatására, ezért a forrás hullámalakját impulzusszerű jelre állítottam át. A terem méretei az előző szimulációkhoz hasonlóan 3x5 méteres volt, a falak azonban most nagyon alacsony reflexiós tényezővel rendelkeztek, tehát elnyelődés is jelen volt a modellben. A szimuláció lefuttatásával azonban nem várt eredményeket kaptam. Ez alatt azt kell érteni, hogy a delta impulzus nem megfelelően volt implementálva, és bár a beérkezési idők ugyanúgy mérhetőek voltak, a hullám viselkedése és burkológörbéje rendellenes módon viselkedett. A jelenséget az alábbi ábra szemlélteti (32. ábra):



32. ábra: Kiadott impulzus lecsengése zárt térben

A burst-öket kibocsátó források esetén azt várjuk, hogy a kiadott impulzusok a reflexiók és más tényezők hatására lecsengjenek egy adott idő múlva. A fenti szimulációt nagyobb iterációkban történő lefuttatásakor azt tapasztaltam, hogy számábrázolási hiba miatt a mikrofon 0-nál nagyobb, de mérhető nyomásértékeket vett fel, vagyis a várt lecsengés nem következett be. Ez a jelenség falakkal körülvett térben különösen előnytelen, hiszen nem

igazán lehet megkülönböztetni a direkt hullámokat a reflektáltaktól, ezért a program ezen része javításra szorul.

Összességében elmondható, hogy a TLM elven működő modellek, valamint alkalmasak kétdimenziós hullámterjedés szimulálására. A forrás(ok) jelalakjának helyes implementálása kizárólag az adott TLM környezettől függ.

### **4.3. A modell kiterjesztése három dimenzióra**

A korábbi fejezetekben kidolgozott számítási algoritmus természetesen alkalmazható háromdimenziós terek esetén is. A különbség ott van, hogy eggyel több egyenlettel kell dolgoznunk, valamint három helyett négy darab vevőegységgel kell számolnunk. A Bruzsa Péter féle modellre hivatkozva kijelenthetjük, hogy az időkülönbségekből származtatott távolságkülönbségek egy-egy hiperboloidot fognak meghatározni. Ez azért van így, mert azon térbeli pontok, amelyeknek egy bázisállomás-pártól mért távolságkülönbsége állandó, egy hiperboloid mentén helyezkednek el. [29] Ez azt jelenti, hogy ha rendelkezésünkre áll egy megfelelő háromdimenziós TLM implementáció, akkor ez az algoritmus ugyanúgy alkalmazható, mint a kétdimenziós szimulációk esetében.

A korábbi fejezetekben (3.2.2) ismertetésre került a TLM háromdimenziós kiterjesztése. A nemzetközi irodalmak alapján meggyőződtem arról, hogy e modell implementálása korántsem olyan egyszerű feladat. Kétdimenziós párjával ellentétben olyan problémák merülnek fel, mint a megnövekedett szimulációs idő (megnőtt dimenzió miatt), a visszaverődési felületek kezelése és a nyomásértékek kinyerése.

Mivel a kiírt feladataim között szerepelt az is, hogy terjesszem ki a kiválasztott modellt három dimenzióra, a program forráskódjának felhasználásával megkíséreltem egy 100x100x100-as méretű terem szimulációját. Azt tapasztaltam, hogy a modell számolási igénye viszonylag kisméretű terem és rövid iteráció esetében is nagymértékben megnőtt. Ebből következik, hogy ha használható eredményt kívánunk elérni - főleg ha visszaverődési felületek is vannak -, akkor több iterációban kellene futtatni e háromdimenziós szimulációt. A rendkívül megnövekedett futási és számolási idő, valamint a hardveres kötöttségek e szimulációt nem tették lehetővé. Mivel ez a háromdimenziós modell az ezt megelőző kétdimenziós párjának kiterjesztése, a korábban tapasztalt, burst-tel kapcsolatos számábrázolási problémák (ld. 32. ábra) hosszabb iterációk múlva is jelentkeztek volna. Ezen a problémán az sem segítene, ha a számábrázolási tartományt *double*-ről kiterjesztenénk, sőt, ez még nagyobb számolási kapacitást igényelne. Ezt azt jelenti, hogy értékelhető eredményt kizárólag a szinuszos hullámmal történő szimuláció adott volna, viszont egy háromdimenziós terem teljes hangterének feltérképezése ilyen típusú forrással rengeteg erőforrást igényel.

A háromdimenziós TLM modellezés problémája azonban többféle módon is orvosolható.

Az időigényes számítások CNN architektúrájú processzorokkal felgyorsíthatók. Egy másik lehetséges megoldás a háromdimenziós TLM hálón való finomítás, vagyis kocka alakú háló helyett egy kevésbé összetett, például tetraéder alakú elrendezés implementálása. [26]

#### **4.4. Laboratóriumi eszközökkel végzett mérések**

Az előző fejezetekben megkonstruált modell megmutatta, hogyan lehet irányított nyalábú és körsugárzóval megvalósított ultrahang-terjedést szimulálni. A következő fejezetben bemutatásra kerülnek az egyetemi mérőlaborban használt ultrahangos eszközök, vagyis az adó-és vevőegységek. Az egyes alfejezetekben bemutatásra kerülnek a valós eszközökkel kivitelezett, direkt és reflektált hullámokkal végzett méréseket és azok eredményeit.

A mérések során az eredetileg Bruzsa Péter és Márton Balázs által megvalósított adó-és vevőegységek egy továbbfejlesztett változatát használtam fel.

##### **4.4.1. A mérés során használt adóegység bemutatása**

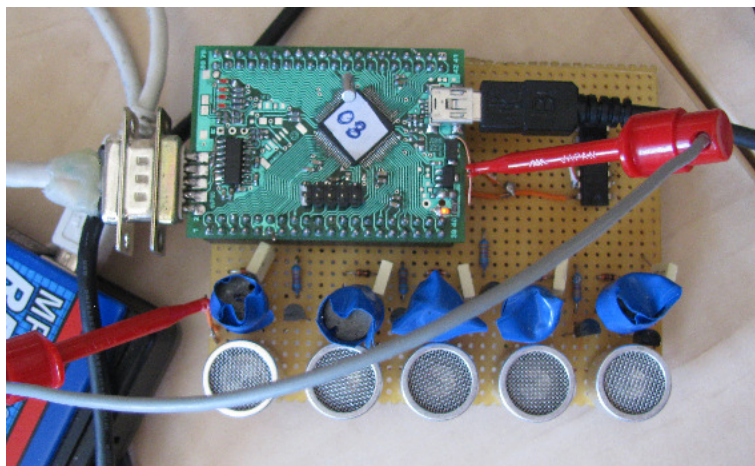
Az ultrahang kibocsátásához a korábban kialakított hangsugárzó egységeket használtam.

A modell szempontjából fontos elemnek a nyomtatott áramkörü lapon elhelyezett, 5 darab hangsugárzó (transzducer) antenna tekinthető. Ezek az elemek olyan fázissal és amplitúdóval vannak meghajtva, hogy az a korábbi fejezetekben megismert, ún. hasznos hullámfrontot alkossanak, ezáltal létrehozva egy irányított ultrahang-nyaláb. Az 5 darab hangsugárzót együttesen 60°-os szögben lehet irányítani, ez az irányítás a felállított modellben ugyanúgy megvalósíthatók.

Az általunk használt transzducerek a modell szempontjából fontosabb paraméterei a következők voltak: [30]

- Frekvencia: 40kHz,  $\pm 1$ kHz
- Érzékenység: 5.0mV/Pa/1kHz
- Kapacitás: 2,400pF
- Input jel: 20VRMS Max.
- Méretek:  $\varnothing$  16mm x 12mm

A szóban forgó eszköz a következő ábrán (33. ábra) látható működés közben:

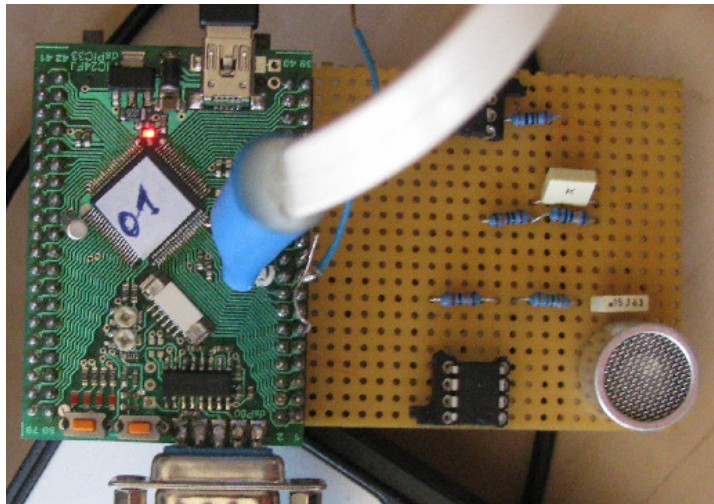


33. ábra: Ultrahangos adókészülék használat közben

A 33. ábra jól szemlélteti, hogy a hangforrást egy 5 elemből álló antennasor alkotja. A kiadott hullám jellegét tekintve fontos megemlíteni, hogy az eszköz ún. burst-öket sugároz. Ez azt jelenti, hogy az adóegység 500 $\mu$ s-ként egy 50 impulzusból álló, impulzusonként 40kHz-es jelet küld a vevő irányába.

#### 4.4.2. A felhasznált vevőeszköz ismertetése

A vevőegység (avagy mikrofon) egyetlen transzducerből épül fel. Ennek a vevőegységnek (közel vagy akár távolabb elhelyezve) képesek vagyunk a bemenő jelszintet valamint a jel időbeli megérkezését megfigyelni oszcilloszkóp segítségével. A vevőegység fontos paraméterei közé tartozik a vételi jelszint, valamint az erősítés mértéke. A kívánt bemeneti jelszint maximum 3 V, min. 2V lehet. A legnagyobb elérhető erősítés kb. 29 dB, a legkisebb pedig nagyjából 1.8 dB lehet. Ezekkel az értékekkel számolva a maximálisan mérhető távolságtartomány ideális esetben 10 méter, a minimális távolság pedig 1 méter körül van. [29]. A mikrofonként funkcionáló eszközt és annak csatlakoztatását az alábbi (34.) ábra szemlélteti:



34. ábra: Ultrahangos vevőegység soros csatlakoztatással

A fenti ábrán tisztán kivehető a soros porttal történő kommunikáció, ami a mért feszültségintek egy másik modulba történő küldéséért felelős. A modellezés szempontjából ez a funkció azonban nem szükséges, hiszen itt most arra vagyunk kíváncsiak, hogy az oszcilloszkópon látható, valós mérési eredmények mennyire hasonlíthatók össze a szimulációk során tapasztalt hullámalakkal.

## 5. LABORATÓRIUMI MÉRÉSEK

A következő részben a fenti ábrákon szemléltetett ultrahangos eszközökkel megvalósított mérések és azok eredményei kerülnek ismertetésre. A fejezet végén sor kerül a kapott mérési eredmények és a modell által nyújtott adatok összehasonlítására.

### 5.1. *Laboratóriumi mérés előkészítése*

Az ultrahangos távolságméréseket az egyetem mérőlaborjában végeztem több hallgatótársammal egyetemben. Az adó- és vevőegységek tápellátását a laborban található számítógépekkel oldottuk meg, USB-s csatlakozás felhasználásával. Kijelöltünk egy 5mx4m-es területet, ahol elhelyeztük az adó-és vevőegységeket. Az ultrahangos adók által kibocsátott és vevők által vett jeleket oszcilloszkóp segítségével vizsgáltam meg. A mérőeszköz kijelzőjének képét az oszcilloszkóphoz rendelt IP cím segítségével, a laborban üzembe helyezett számítógépen jelenítettem meg.

Kezdetnek az 1 adókészülekből és 1 mikrofonból álló helymeghatározó rendszert valósítottuk meg, hiszen az oszcilloszkóp helyhez kötöttsége miatt nem volt lehetőségünk egynél több vevőegységen történő feszültségmérés.

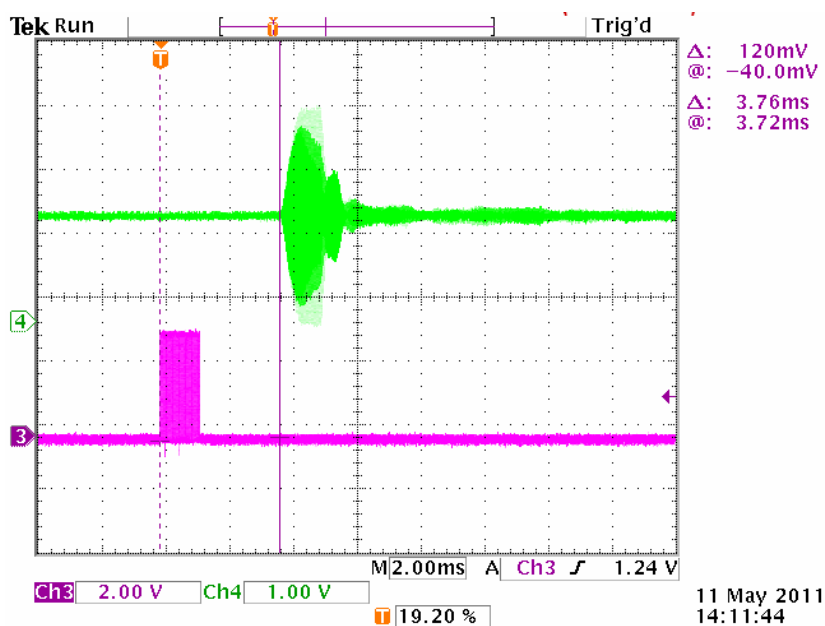
## 5.2. Ultrahangos mérés megvalósítása

A mérés előkészítése után következik a bemutatott eszközök által végzett ultrahangos mérések megvalósítása. A meglévő eszközökkel két fajta ultrahangos mérést valósítottunk meg, ezek értelemszerűen a direkt illetve a reflektált hullámok mérése volt. Mind a két mérés során a labor területén belül, előre meghatározott távolságú referenciapontokat jelöltünk ki, ezzel szemléltettük a vételi oldalon kapott távolságfüggő feszültség szinteket. A fejezet végén sor kerül a valós mérési eredmények modellel való összehasonlítására.

### 5.2.1. Direkt hullámokkal végzett ultrahangos mérések

Az első típusú mérést a két egység egymással szembe helyezésével végeztük. Ez azt jelenti, hogy az adó tökéletes rálátásban volt a vevőre, vagyis az ultrahang- hullám útjában semmilyen tereptárgy nem állt. Mint az már fentebb is említésre került, a mikrofont az adótól számítva 120cm-es inkrementumokban helyeztük el. A direkt hullámmal végzett kísérletekből egyet emelnék ki bemutatás céljából, még hozzá azt, ahol a két eszköz közti távolság 120 cm volt.

Az alábbi ábra (36. ábra) a reflexió nélkül mért beérkező jeleket mutatják. Az ábrákon zöld színnel van jelölve a beérkezett, lilával a kiadott jel.



35. ábra: Vevőegységen mért feszültség szint 120cm-es távolság esetén

Megfigyelhető, hogy a vett jelalaknak jól kivehető felfutása, csúcsértéke és lecsengése van. Ugyanakkor az is észrevehető, hogy a közepén lévő hullámformán kívül nincsen reflexióból adódó jel, a kisebb tüskék a zaj miatt keletkeztek. Ahhoz viszont, hogy távolságot tudjunk mérni,

szükség lesz a kiadott impulzus kezdete és a vett jel beérkezése között mért időkülönbségre. Ehhez az oszcilloszkópon található „trigger” funkciót használtam fel. A következő ábrán az adótól számított 480cm-re lévő vevőn beérkezett jel látható: (36. ábra)

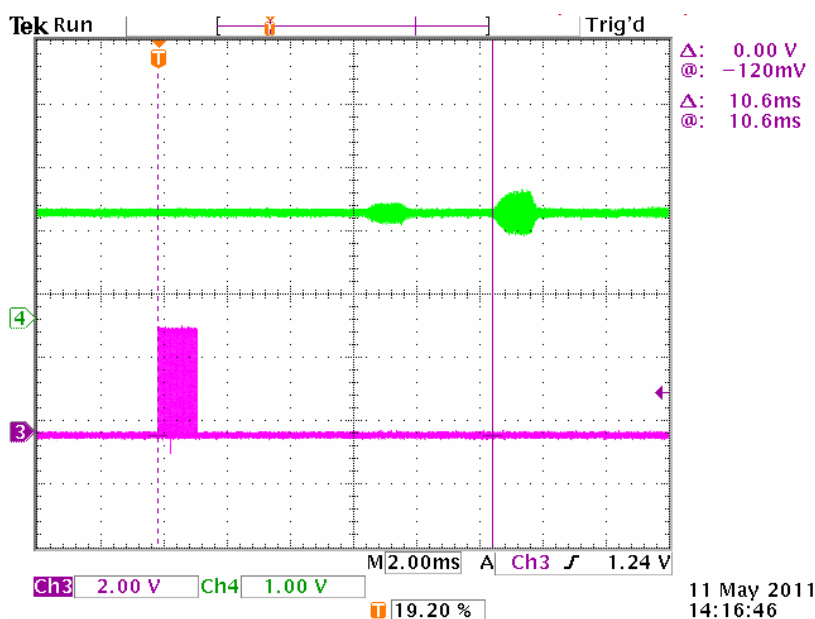
A kép jobb szélén látható, hogy az impulzus kiadása és a vevőoldalon történő beérkezés között kb. 3.76 ms az időkülönbség. A már jól ismert  $s = v \cdot t$  képletet felhasználva azt kapjuk, hogy a hullám által megtett út (343 m/s-os sebességgel számolva) nagyjából 129 cm, ez alapján megállapítható, hogy a mérés kb. 7 %-os hibával rendelkezik.

A többi referenciapont szerint történő mérések során a fenti jelenségek szintén tapasztalhatók voltak, vagyis relatíve kis hibaszázalékkal, a direkt hullámmal történő helymeghatározás közel pontos eredményt produkált.

### 5.2.2. Távolságmérés többutas terjedés esetén

A jelforrás és a mikrofon között eddig nem volt tereptárgy, tehát az adó-és vevőkészülékek szempontjából teljes rálátásról volt szó. A következő kísérletekben az ultrahang-hullám visszaverődésnek volt kitéve, vagyis az adókészüléket a fal felé fordítottuk, ezzel szimulálva a többutas terjedést.

A mikrofon által érzékelt direkt és reflektált hullámok az alábbi ábrán láthatók: (37. ábra)



36. ábra: Többutas terjedés vizsgálata, az adó-vevő távolság most 240 cm

Az előző ábrán tisztán látható, hogy a direkt hullám mellett megjelenik egy szignifikáns amplitúdójú reflektált hullám is. Ha a távolságmérést arra alapozzuk, hogy a vett jel maximumpontjában (csúcértékét) mérjük a beérkezés pillanatát, akkor a reflexiók miatt hibás távolságértéket kapunk. Ez annak tudható be, hogy a többutas terjedésből fakadóan a visszavert hullámok amplitúdójának összege nagyobb lehet, mint a direkt hullámé.

Ezt bizonyítva megvizsgáltam a reflektált hullám beérkezési idejét „trigger” segítségével, amely nagyjából 10.6 ms. A korábbi összefüggést alkalmazva az adó-vevő távolságra kb. 363 cm-et kapunk, ami majdnem 1 méteres eltérést jelent, tehát a hiba nagysága 44%.

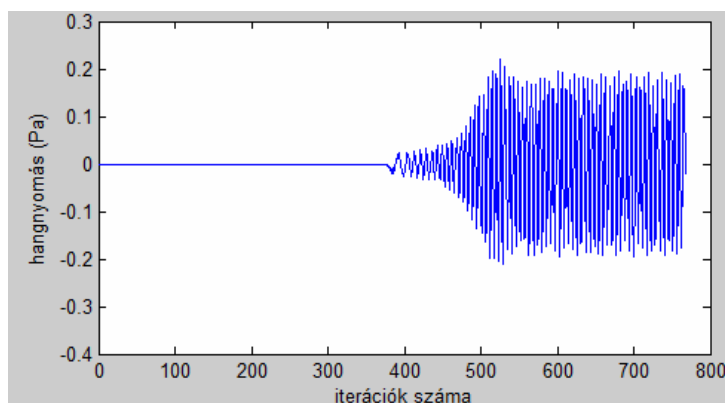
A többutas terjedésből adódó téves maximumértékeket a korábbi fejezetekben bemutatott, reflexiós hangtér-modellben már tapasztalhattuk.

A szóban forgó modellt tehát újfent felhasználtam a reflexiós mérés igazolása céljából. Megállapítottam, hogy a direkt hullám beérkezésének ideje kb. 11.94 ms, ebből a megtett út nagyjából 409.81 node, ami az eredeti 400-hoz képest egy nagyon jó eredmény. A beérkezett jel maximumánál azonban már szembetűnőbb a hiba, ugyanis a mért beérkezés idő 23.21ms, ebből 796.31 node a megtett út, amely majdnem a kétszerese a valódi megtett útnak.

### 5.3. *Mérési eredmények összevetése a modell adatokkal*

Az előző fejezetben a direkt-és reflektált hullámon alapuló távolságmérések kerültek részletezésre. A most következő összehasonlítást a valós mérési eredmények és egy újonnan létrehozott szimuláció között valósítottam meg, ahol az adó-vevő távolság 270cm volt.

A szimuláció paraméterei megegyeztek a laborban kialakított hangtér tulajdonságaival. Mivel a modellben csak folyamatosan sugárzó, azon belül is mindenirányú és irányított nyalábú adók elhelyezésére van lehetőség, ezért az új szimulációban az ultrahang-nyalábót a fal felé irányítottam, és ezt vettem össze a valós mérési eredményekkel. Az új szimuláció eredménye az alábbi ábrán látható: (37. ábra)

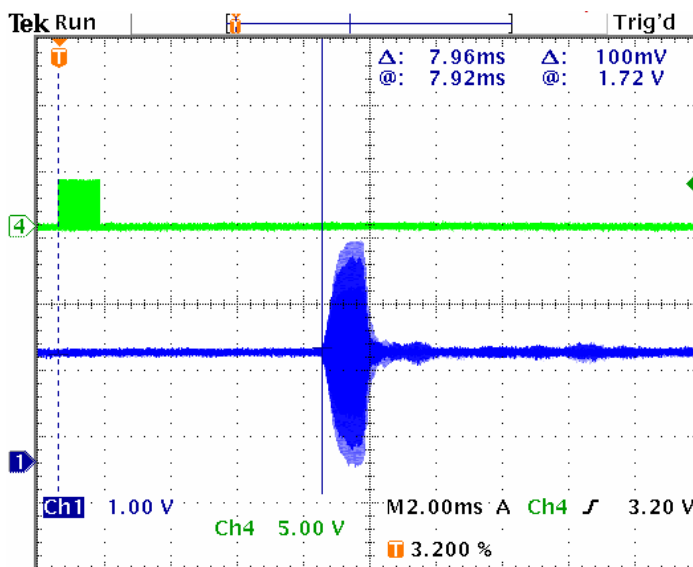


37. ábra: Többutas terjedés szimulációja antennasor használatával

Mivel a korábbi konstruált szimulációk kimutatták, hogy a körsugárzó gyakorlatilag a végtelenségig sugároz szinuszos jelet, ezért a mért nyomásértékeknek csak a csúcserőértéktől számított, néhány iterációját lehet összevetni a valódi eredményekkel. Ez azonban számunkra elegendő lesz, hiszen az modell által nyújtott folytonos jelalak első iterációjából már tudunk következtetéseket levonni a beérkezési és felfutási időre, valamint az amplitúdóra vonatkozóan.

A szimuláció során kapott jelalakból megállapítottam, hogy a jel felfutási ideje kb. 1ms és 2ms közé tehető. A már ismert „MatLab Data Cursor” segítségével megállapítottam, hogy a jel burkológörbéje kb. a 380. iterációnál kezdődik. Ha 2.06ns-mal számolunk, akkor nagyjából 7.82 ms lesz az eredeti impulzus és a beérkezés között eltelt idő.

A modell eredményeit egy új, tényleges méréssel vettem össze, melynek adatait az oszcilloszkóp triggerjének segítségével állapítottam meg. Az új mérés oszcilloszkópos képe az alábbi ábrán látható: (38. ábra)



38. ábra: Beérkező jel megérkezésének és felfutásának vizsgálata (zöld jelenti a kiadott, kék pedig a beérkezett jelet)

Az oszcilloszkóp időosztása alapján meghatároztam, hogy a maximális felfutási idő kb. 2ms, tehát ebben a tekintetben a modell lefedi a valódi mérési eredményeket. A képről az is leolvasható, hogy az időkülönbség megközelítőleg 7.96 ms, vagyis nem nagy eltérés tapasztalható a modellben látottakkal (7.82 ms). Ha mindkét esetben kiszámolnánk a terjedés útjának hosszát, akkor a két eredmény közt minimális különbségeket tapasztalnánk.

A 38. ábrán látható beérkezett jel tartalmazza a többutas terjedésből eredő hullámokat is. Ez a 37. ábrán lévő szimulációs eredményben nem látható, hiszen folyamatosan sugárzó forrás esetén a későbbi, többutas terjedésből származó hullámok „ráülnek” a jelre. Mivel az eltelt idő a felfutás a két mérés esetében közel azonos, és a kiszámolt távolságok is hasonlóak, ezért elmondható, hogy a szimuláció elég jól közelíti a valós ultrahangos mérést.

Mivel a modellel ellentétben a valódi mérésekben igen nehéz megállapítani a burkológörbe pontos kezdetét, ezért sávszűrő használata ajánlott, ezzel a mérések hibáját nagymértékben csökkenthetjük.

## 6. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

A modell elkészítés és a mérések megvalósítása után ismertetem a modell előnyeit és hátrányait, ugyanakkor szó esik az utóbbiak korrigálásáról, illetve a lehetséges továbbfejlesztésekről.

### 6.1. *Kiértékelés, a rendszer előnyei és hátrányai*

Elmondható, hogy a hangtér kétdimenziós modellje elkészült, az általa készített szimulációk a valós mérési eredményeket jól közelítik. Mind a modell, mind a valós mérések során megállapítható, hogy a kapott távolságok hibájának mértéke nagymértékben függ a precíz időméréstől és a környezeti viszonyoktól (levegő hőmérséklete és közeg sűrűsége). A felállított modell láthatóan jól alkalmazható olyan rendszerekben is, ahol egy-több arányban vannak jelen a mérési eszközök, ezt a korábbi fejezetek számolásai igazolták.

A kétdimenziós modellel kapcsolatos előnyök közé sorolható a TLM módszer egyszerű implementálása, a módszerben alkalmazott algoritmus gyors lefutása. A rendszer további előnyös tulajdonsága, hogy a hangteret jól lehet paraméterezni (hangsebesség, közeg tulajdonságai), valamint az, hogy a források és vevők tetszőleges pozícióba állíthatóak. A kétdimenziós modell

A rendszer hiányossága egyértelműen az impulzus alapú hangforrásban keresendő. Annak érdekében, hogy folyamatos helymeghatározást tudjunk szimulálni, elengedhetetlen a burst-ök kiadásának implementálása, azonban a rendszer jelenlegi állapota ezt nem teszi még lehetővé.

A rendszer ugyanakkor háromdimenziós modellezésre még nem áll készen, ezért ezen a területen további fejlesztések szükségesek.

### 6.2. *Javaslatok a hátrányok kiküszöbölésére*

Mint az kiderült, a modell hibái nem a TLM módszer működési elvéből, hanem annak implementációjából erednek. Ebből következik, hogy a nyílt forráskód továbbfejlesztése megoldást jelentene az implementációs problémákra. Ami mindenképp megvalósítandó a kiadott jel élettartamának állíthatósága (idő után engedje el a jelet), valamint ennek megfelelően implementált mintavételezése.

A háromdimenziós implementáció megkönnyítésére a számolási algoritmust többprocesszoros architektúrákon lehetne tesztelni. Erre jó példa a CNN architektúrájú processzor, valamint az ún. sejt automata (cellular automaton). További megoldást jelenthet a GPU-n (grafikus processzoron) történő számolás implementálása.

## 7. ÖSSZEFOGLALÁS

Mindent egybevetve, összességében elmondhatom, hogy a feladatkiírásban megfogalmazott és kitűzött célokat sikerült megvalósítanom. Az egyik ilyen célom volt, hogy az egyetemen korábban kialakított, beltéri ultrahangos helymeghatározó rendszerhez egy olyan számítógépes modellt alkossak, amely alkalmas arra, hogy egy zárt (beltéri) területet szimuláljon az adott helyiségre jellemző paraméterekkel. A modellalkotás fontos állomása volt, hogy a felkutatott és feltárt szakirodalmak által javasolt, optimális modellt két dimenzióban meg tudjam alkotni, majd az, hogy ugyanezen modellt később visszaverődési felületekkel is ellássam.

Nagyon nagy segítség volt számomra a számítógépes modellezés utolérhetetlen előnye, hogy ezen a szinten sokkal kevesebb korlát létezik, és szinte megszámlálhatatlan variációs, ill. szimulációs lehetőséggel rendelkezik.

További célkitűzésem volt, hogy a laboratóriumi körülmények között létrehozott eszközökből származó mérési eredményeket összevessem és kiértékeljem, a megvalósított kétdimenziós modell mérési eredményeivel. Az így kialakított modell már alkalmas volt arra, hogy az egyetemi ultrahangos helymeghatározó rendszer hibáit felfedezzem, és néhány módosító javaslattal éljek a hátrányok kiküszöbölésére.

Ugyanakkor azt is el kell mondanom, hogy a kétdimenziós modell háromdimenziósra történő kiterjesztése, majd a háromdimenziós szimuláció során olyan komoly technikai korlátokba ütköztem, amelyek megoldása már meghaladta a dolgozattal szemben felállított elvárásokat.

Mindazonáltal bizonyos, hogy a modell továbbfejlesztése a jelenleginél gyorsabb és robosztusabb helymeghatározó rendszert eredményez.

## 8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom **Tihanyi Attila** tanár úrnak, aki konzulensként egyrészt biztosította a szimulációhoz szükséges eszközöket, másrészt folyamatosan segített és támogatott a dolgozat megírásánál.

Szeretném továbbá megköszönni **Takács György** tanár úr segítségét is, aki a szimulációs program használatánál nyújtott segítséget, valamint értékes nemzetközi szakirodalom jegyzékkel támogatta a munkámat.

## 9. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Physics 24/7. Physics Tutorial: Ultrasound Physics. [Online].  
<http://www.physics247.com/physics-tutorial/ultrasound-physics.shtml>
- [2] Asbjørn Støylen. Basic ultrasound, echocardiography and Doppler for clinicians. [Online]. <http://folk.ntnu.no/stoylen/strainrate/Ultrasound/>
- [3] Sengpiel Berlin. Calculation of the Speed of Sound in Air and the effective Temperature. [Online]. <http://www.sengpielaudio.com/calculator-speedsound.htm>
- [4] VisualSonics. <http://www2.healthsci.tufts.edu/saif/Vevo2100/Ultrasound-Terminology.pdf>. [Online].  
<http://www2.healthsci.tufts.edu/saif/Vevo2100/Ultrasound-Terminology.pdf>
- [5] Bonera Krisztián. (2009) Ultrahangos távolság mérő berendezés gépjárművek számára.
- [6] NDT Education Resource Center. Reflection and Transmission Coefficients (Pressure). [Online]. <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/reflectiontransmission.htm>
- [7] NDT Education Resource Center. Acoustic Impedance. [Online].  
<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/acousticimpedance.htm>
- [8] NDT Education Resource Center. Attenuation of Sound Waves. [Online].  
<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/attenuation.htm>
- [9] NDT Education Resource Center. Refraction and Snell's Law. [Online].  
<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm>
- [10] Kai E. Thomenius, "Evolution of Ultrasound Beamformers," in *Ultrasonics Symposium, 1996. Proceedings., 1996 IEEE*, vol. II, 1996.
- [11] Andy Ganse. An Introduction to Beamforming. [Online].  
<http://staff.washington.edu/aganse/beamforming/beamforming.html>
- [12] Toby Haynes. (1998, March) A Primer on Digital Beamforming.
- [13] Christian Wolff. Radar Basics - Phased Array Antenna. [Online].  
<http://www.radartutorial.eu/06.antennas/an14.en.html>
- [14] Rákosi Bálint. Ultrahangos helymeghatározó rendszer (BATSY). [Online].  
<http://www.ikti.hu/download/publikaciok/batsy.pdf>
- [15] Vidács Attila. (2009) Lokalizáció és nyomkövetés, mobilitás. [Online].  
[www.tmit.bme.hu/dl70](http://www.tmit.bme.hu/dl70)
- [16] dr. Paller Gábor. Alapvető helymeghatározó módszerek. [Online].  
<http://pallergabor.uw.hu/hu/univ/loc/1-basicloc.pdf>

- [17] International Standardization for Organization. (2006) ISO/IEC 24730-2:2006. [Online].  
[http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csn=40508](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csn=40508)
- [18] Sonitor.com. (2009) [Online]. <http://sonitor.com/>
- [19] Andy Ward, Alan Jones, and Andy Hopper, "A New Location Technique for the Active Office," *IEEE Personal Communications*, vol. 4, no. 5, pp. 42-47, October 1997.
- [20] Nissanka B. Priyantha, "The Cricket location support system," in *Proceedings of the Sixth International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, 2000.
- [21] Anna Rozanova-Pierrat. (2006) Mathematical analysis of Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov (KZK) equation.
- [22] Shahram Mashouf. (2009) An Enhanced Numerical Model to Simulate Nonlinear Continuous Wave Ultrasound Propagation and the Resulting Temperature Response.
- [23] Mansour Ahmadian. (2001) Transmission Line Matrix (TLM) modelling of medical ultrasound. [Online]. <http://hdl.handle.net/1842/427>
- [24] Divényi Dániel. (2006) TLM módszer alkalmazása kétdimenziós probléma vizsgálatára.
- [25] L. Jakevičius, L. Mažeika R. Kažys, "Beamforming by means of 2D phased ultrasonic arrays," *Ultragarsas*, vol. I, no. 29, 1998.
- [26] Stanley J. Miklavcic and Johan Ericsson, "Practical implementation of the 3D tetrahedral TLM method and visualization of room acoustics," in *Conference on Digital Audio Effects*, Napoli, 2004.
- [27] Matthias Blau, "Teaching acoustics using IHA's open-source TLM-package Lambda," in *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, 2007.
- [28] Sengspiel Berlin. Conversion of sound units (levels). [Online].  
<http://www.sengspielaudio.com/calculator-soundlevel.htm>
- [29] Bruzsa Péter, "Beltéri helymeghatározó rendszer kialakítása ultrahangos távolságmérés alapján," Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai Kar, Budapest, 2010.
- [30] Márton Balázs, "Zárt térben mozgó ultrahangforrás felhasználásával történő szobán belüli helymeghatározás," Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai Kar, Budapest, 2010.