

# Zárt térben mozgó ultrahangforrás felhasználásával történő szobán belüli helymeghatározás

Márton Balázs

Mérnök Informatikus BSc

Témavezető:

Tihanyi Attila (PPKE-ITK)

2010

## Nyilatkozat

Alulírott Márton Balázs, a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai Karának hallgatója kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a diplomamunkában 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.

.....

**Márton Balázs**

# Tartalomjegyzék

## 1 Tartalom

## 2 Tartalomjegyzék

3	Tartalmi összefoglaló	4
4	Abstract	5
5	Bevezetés	6
6	Létező ultrahangos helymeghatározási módszerek	8
7	Beltéri helymeghatározó rendszerek tulajdonságai	11
7.1	Alapvető paraméterek	11
7.2	Adó, illetve vevő egységek száma egy rendszerben	11
7.3	A helymeghatározásban résztvevő eszközök szerepe	12
8	Ultrahanghullám terjedési tulajdonságai zárt térben	14
9	A megvalósítandó helymeghatározó rendszer specifikációja	18
9.1	Felépítés, peremfeltételek	18
9.2	A helymeghatározó rendszer tervezett működése	19
10	A feladathoz szükséges hardver eszközök bemutatása	22
10.1	Az adáshoz és a vételhez is használt mikrovezérlő, a PIC24FJ256GB108 rövid bemutatása	22
10.2	A programfejlesztést segítő eszközök	23
10.3	Ultrahangos jel kiadása	24
10.4	Hullámfront kialakítása	26
10.5	Soros kommunikáció kialakítása	30
10.6	Grafikus felület	32
11	Adó és vevő egység tesztelése az ultrahanghullám tulajdonságainak figyelembevételével	33
12	Távolságmérés	35
12.1	Relatív módszer	35
12.2	Abszolút módszer	39
12.3	A két módszer összehasonlítása	41
13	Helymeghatározás	43
13.1	Áttekintés	43
13.2	Vevő egységek elhelyezése	43
13.3	Helymeghatározás tesztelése	44
14	Összefoglalás	47
15	Ötletek a továbbfejlesztéshez	48
16	Köszönetnyilvánítás	49
17	Források	50

### 3 Tartalmi összefoglaló

Ebben a dolgozatban ultrahangos helymeghatározás kérdéssel foglalkoztam, beltéri környezetben.

Mivel szobán belül nem elérhető a népszerű GPS helymeghatározó rendszer, szükségessé válik más technológia igénybevétele. Ezek közül egy, az ultrahang segítségével történő helymeghatározás, melynek során távolságmérések sorozata után ívmetszés segítségével tudjuk egy eszköz helyét meghatározni. Távolságmérésre pedig egy ultrahang impulzus kiadása, majd vétele közötti időkülönbség alapján van lehetőség. Az eddig elkészült megoldásokat tanulmányozva, egy ilyen rendszertől elvárható, hogy lefedettsége legyen legalább 10 négyzetméter, pontossága pedig 5-8 centiméter. Az általam tervezett rendszer egy ultrahang adóval ellátott mozgó objektumból és legalább négy, a szobában fixen elhelyezett, egymással összeköttetésben álló vevőből áll. Hogy méréseket tudjak végezni, megterveztem, majd megvalósítottam a szükséges hardver eszközöket: egy hullámfront kialakítására alkalmas, öt hangszóróból álló, szabályozható irányú adó egységet, illetve egy változtatható erősítésű vevőt. A szobán belüli hullámjelenségek, legfőképpen a többutas terjedés figyelembevételével, olyan szoftvereket készítettem, amelyek alkalmasak voltak a távolságmérésre. Ennek megfelelően a mikrovezérlővel ellátott adó bizonyos időközönként adott ki impulzusokat, illetve az ugyancsak külön mikrokontrollerrel rendelkező vevőegységek detektálták az érkező jeleket. A távolságmérést két módszer szerint is megvalósítottam. Míg az egyik feltételezi az impulzus kiadás és vétel időpillanatának ismeretét, a másik a detektált impulzusok közt méri az időkülönbséget. Míg az utóbbi nem abszolút távolságmérési módszer (tehát mindig egy előző állapothoz képest határoz meg távolságot), az első módszer nem igényli az előző távolságot (de szinkronizációt igen). Tesztelve mindkettőt, arra a következtetésre jutottam, hogy az abszolút módszer pontosabb. Ezzel a távolságmérést milliméteres pontossággal tudtam megvalósítani. Helymeghatározáshoz ezeket a távolságszámításokat használtam fel. Négy távolságból meghatározva az adó helyét 1-1,5 centiméteres pontosságot tudtam elérni. Ez az eredmény a hasonló rendszerek paramétereit figyelembe véve teljesen kielégítő, hisz a tanulmányozott rendszerek közül legjobb esetben is csak 5-8 centiméteres[2] pontosságot tudtak elérni.

## 4 Abstract

In this thesis I studied the method of ultrasonic positioning in indoor environment.

Since the popular GPS positioning system is not available for indoor application I needed to look for another technology.

The method of positioning with the aid of ultrasound is one possible option. In this case after a series of distance measurements by means of trilateration it is possible to define the place of device. There is also a possibility for distance measurement considering the time difference between the ultrasonic burst transmission and its reception. Studying the solutions got till now we can expect of such a system that its coverage should be at least 10 square meters and its precision 5-8 centimeters. The system projected by me consists of a moving object – provided with an ultrasonic transmitter and at least four receivers communicating with each other - fixed in the room. To make measurements I had to project and realize the necessary hardware installation i.e. a transmitter with adjustable direction and consisting of five transducers which is suitable for make a wave front and also a receiver with variable amplification. Considering the indoor wave phenomena – mostly the multipath propagation I made softwares suitable for distance measurements. In this conformity the transmitter supplied with microcontroller generated impulses at periodical intervals and the receiver unit having also its own microcontroller was able to detect impulses. I realized the distance measurement according to two methods. While one of the methods supposes the knowledge of the moment of the impulse emission and reception, the other method measures the time interval between the impulses detected. While the latest is not an absolute distance measurement – consequently it determines a distance according to a previous state, the first method doesn't claim the previous distance, but wants synchronization. Testing both of them I found the absolute method more accurate. By means of this method I could realize the distance measurement with millimeter accuracy. For positioning I used these distance data to reach 1-1,5 centimeters accuracy when positioning the transmitter place from distance. This result – considering the parameters of similar systems – is absolutely satisfactory as the studied systems could reach 5-8 centimeters[2] accuracy at best.

## 5 Bevezetés

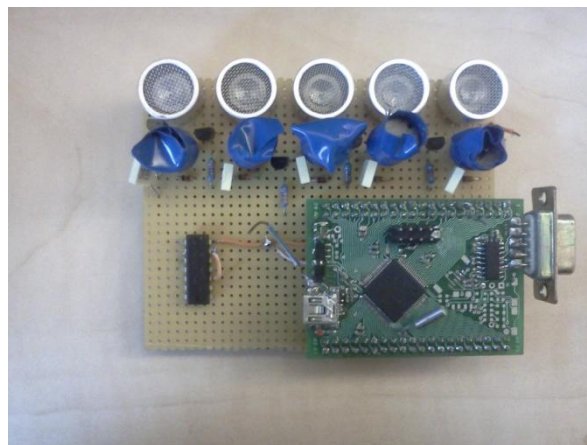
Hagyományosan navigációs, felügyeleti rendszerekben találkozhatunk helymeghatározással, azonban az elmúlt évtizedben már megjelent a mindennapokban is. A legjobban ismert helymeghatározás minden bizonnyal a GPS. Egyre gyakrabban találkozhatunk helymeghatározással a digitális mozgásrögzítés, sport, robotika, virtuális valóság vagy akár a biztonságtechnika területén is.[5] Egy ilyen rendszernek képesnek kell lenni meghatározni egy tárgy, egy élőlény, egy eszköz, vagy akár egy jármű helyét, kilométeres, méteres, de akár centiméteres pontossággal. Különböző technológiák fejlődtek ki, hogy kielégítsék e területek igényeit.

Hogy konkrét példát említsek, használható szobán belüli helymeghatározás beteg emberek megfigyelésére. Parkinson kóros betegek esetén előnyt jelent az illető mozgásának nyomon követése és rögzítése. Ezt később értékelve, következtetések vonhatóak le a beteg állapotával kapcsolatban, mind drasztikus, mind folyamatos változásokról. A rendszer által szolgáltatott adatok könnyen értelmezhetőek, nem igényelnek speciális eszközöket.[7] Egy másik alkalmazhatóságra például a virtuális valóság területén belül akadhatunk: beltérben bizonyos tárgyak, eszközök elmozdításával különböző hatásokat válthatunk ki. Tehát egy megfigyelendő objektum több pontjára is elhelyezve adó illetve vevő egységeket, annak saját tengelye körül való elmozdulásakor is információnk lesz az állapotáról. Nagy előnye ennek a rendszernek, hogy könnyen elhelyezhető az adott egység a megfelelő helyen: kicsi és könnyű.[15] A helymeghatározás egy gyakori alkalmazási területe még a mobilrobotok helyének pontos meghatározása. Napjainkban egyre több kutatási és fejlesztési tevékenység foglalkozik mobilrobotok mindennapi használatra való alkalmazhatóságával. Akármire is használunk egy robotot, majdnem mindig találkozunk azzal a problémával, hogy ismernünk kell a robot pontos helyét ahhoz, hogy az el tudja látni feladatát. Mivel beltérben nem tudjuk használni a hagyományos GPS technológiát, ezért egy olyan módszerre van szükség, ami beltéri körülmények közt megoldja a lokalizáció problémáját.

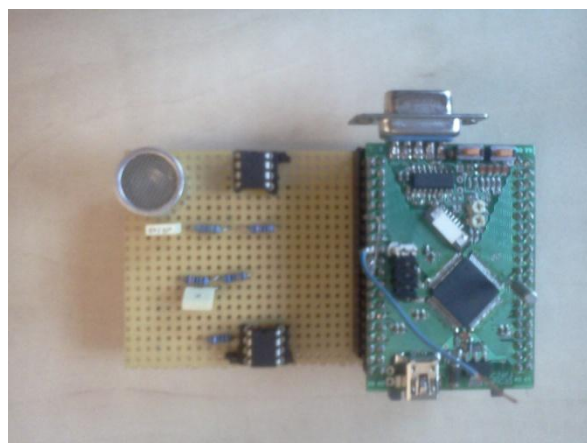
Ez a dolgozat a helymeghatározás egy speciális esetével, a szobán belüli helymeghatározással foglalkozik, nagy felbontású mérést lehetővé tevő, ultrahangos technológia segítségével.

Ennek kapcsán áttekintem először, hogy milyen megoldások születtek eddig ilyen célokra. Megvizsgálom, hogy melyek azok a tulajdonságok, amelyeket feltétlenül figyelembe kell venni beltéri helymeghatározás esetén. Lefedettségi, pontossági, eszközök száma: mind kulcsfontosságú paraméter egy ilyen rendszer esetén. Ezután röviden ismertetem az ultrahang hullámok terjedését zárt térben, illetve azokat a jelenségeket, amelyeket szem előtt kell tartani ezek kapcsán. A többutas terjedés, a csillapítás, a hőmérséklet mind befolyásoló tényezők

lehetnek egy ultrahangos rendszer esetén. Mielőtt rátérnék a szükséges hardver eszközök felépítésére és leírására, az említett szempontokat figyelembe véve megfogalmazok egy specifikációt, hogy mik legyenek a tulajdonságai és működési peremfeltételei a tervezett, illetve kipróbált rendszernek. Ezt követően tehát leírásra kerül az elkészült hardver eszközök felépítése, működése, melyek segítségével tesztelhető a tervezett rendszer. A helymeghatározás első lépéseként megvalósítandó távolságmérést két különböző módszer szerint is elvégeztem, ezeket ismertetem, majd összehasonlítom. E kettő közül az egyik abszolút, a másik relatív távolságmérési módszer. A pontosabbnak bizonyult abszolút módszer segítségével végzett helymeghatározás, és annak eredménye ismeretében összevetem az eredményt a hasonló céllal készült rendszerek eredményeivel. Az utolsó fejezetben pedig javaslatokat teszek arra, hogy milyen irányba lenne érdemes a munkát tovább folytatni.



1. ábra Elkészült adóegység



2. ábra Vevőegység

## 6 Létező ultrahangos helymeghatározási módszerek

Ebben a fejezetben ismertetem a fontosabb módszereket, amelyeknél ultrahang segítségével szobán belüli helymeghatározásra van lehetőség, majd csoportosítom különböző szempontok szerint a már létező megvalósításokat.

Hangjelek terjedési idejét gyakran használják távolságmérésre illetve helymeghatározásra megfelelő rendszerek esetén. Leggyakrabban az egy irányba történt terjedési időt használjuk fel. Ha adott  $t_1$  időben kerül egy jel kibocsátásra egy forrás által, és  $t_2$  időpillanatban érzékeli ezt egy vevő, akkor az abszolút távolság  $d$  (amit a jel megtett a forrástól a vevőig) arányos az időkülönbséggel ( $dt$ ). Ha egyenes úton terjedt a jel, az  $(e1)$  összefüggéssel kiszámolható a két eszköz közötti pontos távolság ( $c$  a terjedési sebességet jelöli).

$$d = c * dt \quad (e1)$$

Meg kell azonban jegyezni, hogy a  $t_1$  illetve  $t_2$  időpillanat meghatározása legtöbbször nem történhet közvetlenül, mivel a forrás és vevő tipikusan nem egy eszközön helyezkednek el. Tehát mindkét fél csak az egyik időpontot tudja, amiből még nem számolható távolság. Ennek áthidalására több megoldás is létezik.

Az egyik, hogy nem csak az egy irányban történő terjedési időt nézzük, hanem kiadva egy impulzust, a másik eszköz azt megkapva rögtön válaszként visszaküld egyet. Tehát ha egy eszközön akarjuk tudni mindkét időpillanatot, a jel kiadása és a válasz impulzus megérkezése között eltelt időt tudjuk mérni. Ez lesz a körbefordulási idő. [5]

Egy másik megoldás, hogy használunk egy szinkronizáló órajelet, melynek terjedése a közegben nagyságrendekkel gyorsabb kell, hogy legyen. Ilyenkor megint ismerni fogja a vevő eszköz mindkét  $t$  időpillanatot, hiszen a  $t_1$ -et a gyors jel megérkezése, míg  $t_2$ -t az ultrahang vétele adja.

Leggyakrabban ezt a módszert használják: nem tisztán ultrahangos helymeghatározással találkozhatunk, hanem valamilyen más technológiát is igénybe vevő megoldásokat láthatunk. Ezek közül legjellemzőbben rádiófrekvenciás jel és ultrahang jel együttes használatával van lehetőség helymeghatározásra. [9],[10],[11]

Ha ilyenrel találkozunk, mindig találunk egy rádió egységgel ellátott bázisállomást, amely arra szolgál, hogy szinkronizálja az órákat közte és a mozgó egységek között. Ez az egység a mérés elején szétkürtöl egy jelet, és erre a jelre mind a mozgó egységek, mind a bázisállomás elindítja a saját óráját. Ugyanekkor a bázisállomás kiadja az első ultrahang impulzust. Mivel a



mozgó egységek szinkronban vannak már a bázisállomással, tudják mérni a pontos terjedési időt. Ezen túl, a többi jel megfelelő időközönként, megfelelő sorrendben fog elindulni, így egyedileg azonosíthatóak lesznek a mozgó egységek számára.[9]

Több fajta konstrukció is létezik ultrahang és rádió jel együttes használatával történő helymeghatározásra.

A *Bat* nevű rendszerben az objektumok ultrahang jeladóval vannak ellátva, amelyek akkor adnak ki impulzust, ha egy központi egység erre utasítást ad, rádiójel kiadásával. Mivel a vevők is észlelik a rádiójel kiadását, ki tudják számolni az ultrahang terjedési idejét, és egy algoritmus segítségével a mozgó tárgy helyét képesek meghatározni.[10]

A *Cricket* helymeghatározó rendszer független, egymással nem összekötött, szinkronizáló jelet (*beacon*) kiadó egységekből áll, melyek el vannak helyezve mindenütt az épületben. Az egységek küldenek egy rádió jelet és ezzel egy időben ultrahang impulzust is. A kis, hallgatóknak nevezett eszközök, amik 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 függetlenül azonosíthatják magukat, elkerülve a centralizált rendszerek veszélyeit.[11]

Hasonló megközelítést használ az a rendszer, mely négy ultrahang adót alkalmaz, a plafon négy sarkában elhelyezve, melyeket egy központi egység vezérel. Ez az egység kiad egy rádió jelet, ezzel impulzus kiadására kényszeríti mind a négy adót, egymás után. Egy mobil vevő, ami össze van kötve egy kézi számítógéppel, érzékeli a jeleket és kiszámolja helyzetét 10-25 cm-es pontossággal.[19]

Ezeknek mindegyikéről elmondhatjuk, hogy arra az elvre épülnek, hogy a rádió jel terjedése levegőben nagyságrendekkel gyorsabb az ultrahangénál. Tehát egy rádiófrekvenciás jellel mindig szinkronizálni tudnak, jelezve azt, hogy mikor került kiadásra az ultrahang jel, és ettől az időtől számítva mérik azok érkezését. Mivel a hang terjedési ideje levegőben ismert és mérhető, a sebesség és az idő ismeretében a távolság könnyen meghatározható.

Hasonló felépítést mutat az alábbi megoldás is: a rendszer egy darab adóegységből áll, mely a mozgó objektumon van elhelyezve, illetve néhány vevőegységből, melyek ismert helyeken vannak rögzítve, a szoba plafonjának különböző pontjain. Az adóegység itt sem csak ultrahangos jeladóból áll, hanem képes egyszerre mind ultrahang, mind infravörös jelek kiadására. Hasonlóan, a vevőegységek is képesek mind ultrahang, mind infravörös jel vételére. Amikor az adóegység kiad néhány infravörös és ultrahang impulzust, a vevő egység az infravörös jelet szinte azonnal érzékeli, hiszen a fény terjedési ideje elhanyagolható ebben az

esetben. Ez a jel elindít egy számlálót a vevőben, amely addig fog számolni, míg az ultrahang jel meg nem érkezik. A számláló által rögzített érték arányos lesz az ultrahang terjedési idejével. Ebből pedig már könnyen kiszámolható a távolság, abból pedig az adóval ellátott objektum elhelyezkedése.[13]

## 7 Beltéri helymeghatározó rendszerek tulajdonságai

Az alábbiakban szeretném áttekinteni, hogy milyen tulajdonságokat, paramétereket kell figyelembe venni egy távolságmérésen alapuló, beltéri helymeghatározó rendszer esetén, majd az 9. fejezetben ezek alapján megfogalmazni az aktuális rendszer peremfeltételeit, specifikációját, architektúráját.

### 7.1 Alapvető paraméterek

Alapvetően fontos kérdés, hogy milyen fajta adatot szolgáltatunk az adott eszköz helyzetéről. A rendszer különböző fajta információkat is adhat a meghatározandó helyű objektumról. Ilyen lehet például emberek 2 dimenziós pozíciója, vagy távolság egyes eszközök közt, esetleg relatív elmozdulás (az előző pozícióhoz képest történt változás), vagy akár az elmozdulás iránya.

Szintén fontos paraméter a frissítési sebesség: milyen gyakorisággal adunk újabb mérési eredményt egy adott eszköz helyéről. Általában az egy másodpercnyi idő alatt történt frissítések számával jellemezzük.

A pontosságot leginkább úgy tudjuk definiálni, hogy megnézzük az eltérést a mért adat, a várt adat és a valódi pozíció között. A pontosság valamilyen szinten a rendszer megbízhatóságát is befolyásolja. Mivel a pontosság tulajdonképpen egy statisztikai változó, ezért átlagos pontosságról, illetve annak mediánjáról, esetleg küszöbindexszel kifejezett értékéről beszélünk.

Egy rendszer lefedettségén azt a beltéri területet értjük (négyzetméterben, vagy esetleg szobák számában), amit az adott rendszer képes lefedni. Ezen a területen a rendszernek a specifikált pontossággal kell működnie.

Azoknál a rendszereknél, amelyek telepről működnek, beszélhetünk akkumulátor élettartamról. Egy bizonyos minimális időt garantálni kell a megfelelő működés érdekében. [5]

### 7.2 Adó, illetve vevő egységek száma egy rendszerben

A rendszer architektúrája szempontjából talán a legfontosabb kérdés, hogy hány eszköz vegyen részt benne. Az alábbiakban áttekintem a lehetséges megoldásokat a fixen elhelyezett egységek, illetve mozgó egységek számának szempontjából.

Olyan rendszerekkel, melyek nem rendelkeznek fixen elhelyezett egységekkel, leginkább robotikai alkalmazások körében találkozhatunk: feltérképezik az őket körülvevő környezetet, és ha változást tapasztalnak, akkor a világról alkotott modelljüket frissítik. Ilyenkor mind a vevő, mind az adó a mobil roboton található, ami egyszerű távolságméréssel térképezi fel az akadályokat.

Abban az esetben, ha csak egy fixen elhelyezett egységgel dolgozunk, akusztikus modell kialakítására van szükségünk. Ilyenkor nem az egyenes úton terjedő jelek segítségével határozzuk meg pozíciót, hanem a reflektálódott jelekből tudunk következtetni helyzetünkre, három dimenzióban.

Ha két fixen elhelyezett egységünk van, kétdimenziós helymeghatározásra van lehetőségünk. Ezek a típusú rendszerek nem használhatók 3 dimenziós helymeghatározásra, hiszen ahhoz még egy fixen elhelyezett egységgel kell rendelkezniük.

Három, vagy annál nagyobb számú, fix állomás esetén egyenesen terjedő jelek segítségével van lehetőségünk nagy felbontású helymeghatározásra. Ahogy növeljük a fix eszközök számát, csökkenthetjük a mérési hibákból adódó pontatlanságokat.

A rendszerben részt vevő mozgó objektumok száma sem feltétlenül egy. Részt vehet benne több mozgó tárgy is, melyeknek száma mérés közben is változhat. Eltűnhetnek, vagy felbukkanhatnak új objektumok. Azonban ha nem csak egy van belőlük, akkor gondoskodnunk kell arról, hogy egyedileg megkülönböztethetők, azonosíthatóak legyenek.

### 7.3 A helymeghatározásban résztvevő eszközök szerepe

A résztvevő eszközök szerepük szerint többféleképpen lehetnek:

- Adóegységek: csak ultrahang adóval rendelkeznek, jel vételére nem képesek a mérés során.
- Vevőegységek: csak ultrahang vevővel vannak felszerelve.
- Adó- és vevőegységek: képesek mindkét feladat ellátására. Működhetnek egyszerre adóként és vevőként, de felvehetik külön-külön mind az adó, mind a vevő szerepét a mérés során.

A pozíció meghatározásának helye szerint újabb két csoportba tudjuk osztani a rendszereket. Első esetben a helymeghatározás magában a mobil egységben történik. Tehát a mozgó

objektumnak van szüksége arra az információra, hogy magát elhelyezze egy virtuális térképen. Ilyenkor a távolságmérési eredmények hozzá kell, hogy érkezzenek: tipikusan ilyenkor ő vevőként funkcionál, míg a fixen elhelyezettek adóként.

Második esetben a helymeghatározás magában az infrastruktúrában történik. Tehát nem a mozgó egységnek kell tudnia, hogy hol van, hanem nekünk kell tudnunk, hogy hol található egy adott mozgó objektum.

Abban az esetben, ha a mérési eredményre szüksége van a másik félnek is, akkor valamilyen egyéb vezeték nélküli kommunikációs csatornán eljuttathatjuk hozzá is az eredményt.[5]

## 8 Ultrahanghullám terjedési tulajdonságai zárt térben

Az ebben a fejezetben leírtak leginkább beltéri körülményekre vonatkoznak. Tehát a közvetítő közeg levegő, melynek hőmérséklete szobahőmérséklet, és a nyomás 1 atmoszféra körüli. Az ultrahang frekvenciáját pedig minden esetben 40 KHz-nek vesszük.

Levegőben a hang terjedési jellemzőit befolyásolja a hőmérséklet, a páratartalom, a légnyomás és a szén-dioxid koncentráció. Olyan környezetben, ahol a hőmérséklet szobahőmérséklet körüli, a legnagyobb pontosságbeli ingadozást a hőmérséklet okozza. Az, hogy a szoba valamely pontján egy adott időben mennyire változott a hőmérséklet, leginkább olyan tényezőktől függ, mint az ablakok, ajtók kinyitása, a fűtés vagy légkondicionálás használata. E tényezők miatt a távolság számolásakor figyelembe kell vennünk a hőmérsékletben történt változásokat.

Egy hanghullám a levegőben a megtett távolság növekedésével csillapodik. Ez két okra vezethető vissza: a szóródásra és a csillapodásból eredő elnyelődésre. Az első esetben a hangforrás által időegységenként kiadott energiaérték egyre nagyobb területen áramlik a távolság növekedésével. A legegyszerűbb példa erre a jelenségre talán egy pontforrás sugárzásának gömbi szétterjedése szabad térben, ahol a sugárzás által metszett felület a távolság növekedtével négyzetesen növekszik. Tehát a gömbi szétterjedés során az intenzitás  $\frac{1}{r^2}$ -esen csökken, ahol  $r$  a távolság. A második esetben az akusztikus energia egy része átalakul valamilyen más energiaformává. Mértékét  $dB/m$ -ben adhatjuk meg, és függ olyan tényezőktől, mint a hőmérséklet, a páratartalom, a nyomás és a hang frekvenciája. Minél magasabb a frekvencia, általában annál magasabb a  $dB/m$ -ben megadott érték. Szobahőmérsékleten ( $20\text{ }^{\circ}C$ ) ez az érték  $1,4 \frac{dB}{m}$ , 40 KHz-es frekvenciával számolva, de ez az érték a hőmérséklet emelkedésével növekszik.[15]

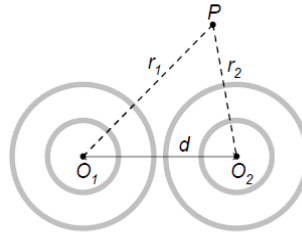
Ha a levegőben terjedő hanghullám egy szilárd határoló médiummal találkozik, megtörést és visszaverődést fogunk tapasztalni. Tehát ha egy hanghullám egy szilárd közeget határoló felülethez ér, egy megtört és egy visszavert hullám fog keletkezni. A megtört hullám behatol a szilárd médiumba, és legtöbb esetben nem tér vissza. Ahhoz, hogy egy határfelületen visszaverődés jöjjön létre, a két anyag egy jellegzetes tulajdonságában kell hogy különbség legyen, mégpedig az ún. akusztikus impedanciájában. Fontos jellemzője a visszaverődés jelenségének, hogy energiavesztéssel jár. Az elnyelt energia mértéke függ a beesés szögétől, a frekvenciától és az adott anyag tulajdonságaitól. Mivel a szobában található akadályok akusztikus ellenállása nagy ( $10^7$ ), míg a levegőé kicsi ( $10^2$ )[15], az energiavesztés

visszaverődéskor kicsinek vehető, tehát a visszavert hullám amplitúdója gyakorlatilag nem csökken.

Az elhajlás egy olyan hullámterjedési jelenség, mely egy akadály, vagy a közvetítő médium inhomogenitása miatt jön létre. Ezt a jelenséget sok esetben elhanyagolhatónak tekinthetjük. Ennek oka az, hogy relatíve kicsi a hullámhossz, ami jellemzi a geometriai akusztikát, így az elhajlott hullámok amplitúdója olyan kicsi, hogy zérusnak vehető.[15]

Ugyanúgy, ahogy a hallható frekvenciatartományon belül is, az akusztikus háttérzaj jelen van az ultrahangos tartományban is. A vevőegység a vett jelet ezzel a zajjal együtt érzékeli. Tételezzük fel, hogy a háttérzaj modellje az AWGN modell.[5] A zaj ráül a vevő által detektálni kívánt jelre. Egy szobában létrejövő háttérzaj függ a közelben lévő elektromos eszközök működésétől: monitorok, számítógépek, porszívók például okozhatnak ilyen zajt. Szerencsére egy helymeghatározó rendszer esetén a zajszint mérésekből meghatározható úgy, hogy a rendszer alkalmazkodjon az adott környezethez. Abból kifolyólag, hogy az akusztikus hullám csillapodik a távolság növekedésével, viszont az átlagos háttérzaj-szint állandó marad, a vett jel jel-zaj viszony értéke a távolság növekedésével csökkenni fog. Van egy távolság, amit a rendszer hatótávolságának nevezünk: ekkor a vett jel jel-zaj viszonya már elért egy küszöbértéket. Így a zaj egy felső határt szab tulajdonképpen a rendszernek. A zaj a vevő által detektált visszavert sugarak számát is korlátozza, mert minden, bizonyos távolságnál már nagyobb utat megtett visszavert jel nem lesz detektálható. Az AWGN zajon túl megjelenhet impulzus-zaj is. Ezt mechanikai jelenségek okozzák, például a tapsolás, a kulcsforgás, vagy a tárgyak ütközése. Általában nagyobb teljesítményű zajt keltenek, mint az AWGN zajok, de nem egyfolytában vannak jelen. Ez a fajta zavaró tényező megfelelő körülmények teremtésével elkerülhető. [5]

Ha a tér egy pontjában két hullám van jelen, akkor hatásuk ott valamilyen módon összegződik. A hullámok összeadódását interferenciának nevezzük. Ha a szuperpozíció elve érvényes, akkor adott helyen, a hullámok által okozott változás minden időpillanatban a két hullám által külön-külön okozott változások összege, vagyis a két hullámfüggvény egyszerűen összeadható.



3. ábra Szuperpozíció

Tegyük fel, hogy a 3. ábrán látható  $O_1$  és  $O_2$  forrásokban létrehozott két rezgés amplitúdója különböző, és köztük  $\phi$  fáziskülönbség van. Feltételezzük, hogy a vizsgált térrészben a hullámok amplitúdójának csökkenése még nem számottevő. Az interferencia eredményét egy tetszőlegesen választott  $P$  pontban számítjuk ki. Az amplitúdó értéke az (e2) összefüggés fennállása esetén lesz maximális, ekkor a két hullám által a találkozásukig megtett utak különbségét az (e3) reláció mutatja.

$$kr_1 - kr_2 + \phi = \pm n2\pi \quad (e2)$$

$$\Delta s_{max} = \pm n\lambda \left(\frac{\phi}{2\pi}\right) \lambda \quad (e3)$$

Hasonlóan belátható, hogy a minimális amplitúdó ( $A_1 - A_2$ ) azokon a helyeken jön létre, ahol a hullámok közötti útkülönbségre igaz az (e4) összefüggés.

$$\Delta s_{min} = \pm(2n + 1)\left(\frac{\lambda}{2}\right) - \left(\frac{\phi}{2\pi}\right)\lambda \quad (e4)$$

Ha a hullámok között nincs fáziskülönbség ( $\phi=0$ ), akkor a két feltétel egyszerűbben megfogalmazható: maximális amplitúdó ott jön létre, ahol a két hullám  $\Delta s$  útkülönbsége a hullámhossz egész számú többszöröse (e5); minimális amplitúdó pedig ott, ahol az útkülönbség a fél hullámhossz páratlan számú többszöröse (e6).

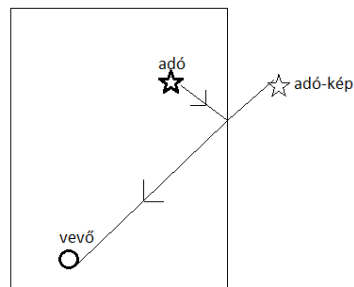
$$\Delta s_{max} = \pm n\lambda \quad (e5)$$

$$\Delta s_{min} = \frac{\pm(2n+1)\lambda}{2} \quad (e6)$$

A maximális és minimális intenzitású helyek - síkban terjedő hullámok esetén - egy-egy időben állandó helyzetű hiperbola-seregen helyezkednek el.[14]



Mivel a hangforrás által kiadott jel több úton is eljuthat a vevőig, a detektálás során közvetett terjedési utak is megjelenhetnek. Így a valódinál nagyobb távolságot is mérhetünk.



4. ábra Többutas terjedés

Tekintsük úgy, mintha a megtört, nem egyenesen érkező hullámok egy képzeletbeli hangforrásból jönnének, ami már a szoba falán kívül esik. A 4. ábra egy ilyen esetet szemléltet. Ennek alapján beszélhetünk elsőrendű, illetve többed rendű hullámokról, annak alapján, hogy hányszor törtek meg a szoba falán. Abban az esetben, ha biztosak lehetünk abban, hogy létezik egy direkt (közvetlen) úton érkezt jel is, annak megérkezése mindig előbb fog bekövetkezni, mint egy hosszabb úton terjedt jelé. Itt élünk azzal a feltételezéssel, hogy az egymást követő impulzussorozatok időben jól elkülönülnek, tehát a szimbólumok közötti áthallás mértéke minimális.[16]

## 9 A megvalósítandó helymeghatározó rendszer specifikációja

Ebben a fejezetben ismertetem az aktuális rendszer felépítését, működését és annak paramétereit.

### 9.1 Felépítés, peremfeltételek

Alapvetően egy olyan rendszer tervezése a cél, mely képes szobán belüli helymeghatározásra. Tehát egy ultrahang adóegységgel ellátott objektum, illetve egymással összeköttetésben álló vevőegységek alkotnak rendszert. A helymeghatározás a vevőegységek által szolgáltatott információk alapján egy központi modulban történne. Az egységek távolságadatokat szolgáltatnak, körülbelül fél másodpercenként. A távolságmérés tehát teljes egészében a vevőegységekben történik, míg a helymeghatározás a központi modulban. A vevő funkciójú eszközök számát tekintve minimálisan négy vevőegység alkalmazása a cél, a megfelelő pontosság elérése érdekében. Jelen esetben azt a kikötést tesszük, hogy adóval ellátott egységből, amelynek helyét meg szeretnénk határozni, csak egy vesz részt egyszerre a rendszerben. Továbbá feltesszük, hogy az adó egység csak adja, illetve a vevő egység csak veszi az ultrahang jeleket.

A rendszer lefedettsége jelen esetben egy közepes méretű szoba lenne, tehát körülbelül egy  $20 \text{ m}^2$  alapterületű helyiség. A szoba belső szerkezetére, felépítésére nem teszünk kikötést, de tekintjük egy átlagos tulajdonságokkal rendelkező szobának, ahol szobahőmérséklet van. Ilyen körülmények között, az eddig elkészült rendszereket alapul véve elvárható, hogy 6-8 centiméteres pontossággal képesek legyünk távolságot mérni, illetve helyet meghatározni.

Abban az esetben, ha nem biztosítható, hogy az ultrahang impulzusok között biztosan van direkt úton érkezett is, más módszerekre lenne szükség, hogy pontos távolságot tudjunk mérni csupán reflektált hullámokból. Ezért a jelen rendszer esetében élünk azzal a feltételezéssel, hogy mindig van a vett jelek között olyan, amely direkt úton érkezett. Ha nem tennénk ezt a kikötést, akkor olyan akusztikus modellt kellene felállítanunk a mérésnek helyet adó szobában, aminek segítségével megkülönböztethetnénk a különböző úton érkezett hullámokat és a modell segítségével meg tudnánk mondani a valódi távolságot csupán a reflektált jelekből.

Feltesszük továbbá, hogy az impulzuskiadások között eltelt idő akkora, hogy amikor új impulzust adunk ki, az előzőek már nem mérhetőek. Így könnyen elvárható az, hogy egy bizonyos idő eltelte után-, ami alatt már nem detektál a vevő jelet- az első, egy bizonyos

küszöbindexet meghaladó jel lesz a direkt jel. Ezeknek a pontos paramétereit a későbbiekben, mérési eredményekkel a látámasztva ismertetem.

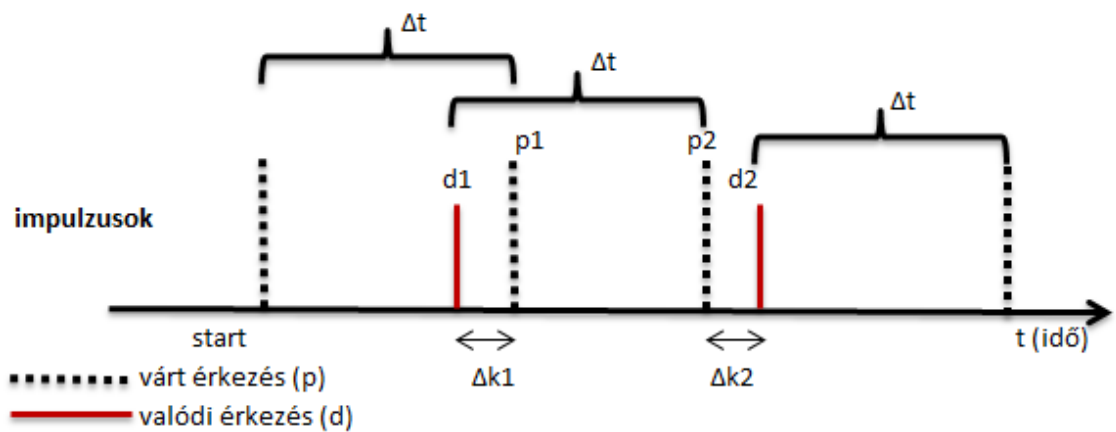
## 9.2 A helymeghatározó rendszer tervezett működése

Ahogy már korábban említettem, a helymeghatározás alapvetően távolságmérések sorozata után történne a központi egységben. Ahhoz, hogy le tudjuk mérni, hogy az ultrahang jel mennyi idő alatt ért az adótól a vevőig, a vevőnek tudnia kell, hogy az impulzus mikor került kiadásra. Erre, ahogyan az eddig elkészült, hasonló rendszerek is teszik, úgy van lehetőség, hogy valamilyen módon szinkronizáljuk az adót és a vevőt. Ez lehet bármilyen fajta összeköttetésen keresztül (vezeték nélküli, vagy akár vezetékes), lényege, hogy jelezni tudjuk a vevőnek azt az időpillanatot, amikor kiadjuk az impulzust. Ekkor az elindít egy számlálót, és akkor állítja le, ha detektálja a beérkezett jelet. Ebből számolható az az idő, ameddig terjedt a hang, és ebből tudunk távolságot meghatározni, amit eljuttatunk a központi egységbe. Ez utóbbi modul a különböző vevőktől érkező adatok alapján pedig a kibocsátás pontos helyét tudja meghatározni. Ez a konstrukció tehát abszolút távolság mérésére alkalmas. Ez azt jelenti, hogy nincs szükségünk semmilyen előző adatra ahhoz, hogy megmondjuk az éppen aktuális távolságot.

A fent említett konstrukció ultrahang jelen kívül valamilyen más jelet is használt. Ahhoz, hogy ugyanezen feladat megoldása lehetséges legyen csupán ultrahang jelek segítségével, illetve ne kelljen minden eszköznek egyben adónak és vevőnek lennie, más módszerre van szükség. A rádiófrekvenciás adó- illetve vevőegység viszonylag drága és sokat fogyaszt. Ezért merül fel az az igény, hogy használjunk kizárólag ultrahang jeleket. A fentebb említett módszer abszolút távolságokat használ fel a helymeghatározáshoz (de ezért nagy árat fizet, hisz mindenképp szükség van drágább technológiák igénybe vételére is). Ha azonban nem abszolút, hanem relatív távolságokat használunk, akkor ugyanezen feladat megoldása lehetségessé válik csupán ultrahangos technológia használatával.

Tehát egy másik lehetőség, hogy nem használunk szinkronizációt az adó és a vevő között (így nem állnak összeköttetésben egymással sem vezetékkel, sem vezeték nélkül). Ebben az esetben azonban csak relatív távolságot tudunk mérni. A mérés kezdetén tehát szükségünk lesz a kiindulási hely koordinátáira, pontosabban az adó és az egyes vevők távolságára. Ez a feltétel egy egyszerű kikötéssel biztosítható: mindig egy adott fix pontról indul a mérés, aminek távolságát tudjuk a vevőktől. Ezek ismeretében már lehetséges lesz a távolságmérés, a 5. ábrán is szemléltetett ötlet alapján: adott, fix időközönként adunk ki ultrahang

impulzusokat. Az impulzusok kiadásai között eltelt idő ismert ( $\Delta t$ ), így a kiinduló pozícióban, egyhelyben álló adótól minden vevő periodikusan fogja detektálni a jeleket. Ahogy az objektum elmozdul az adóval bármilyen irányba, a vevők közeledés esetén csökkentett ( $\Delta t - \Delta k1$ ), míg távolodás esetén növekedett ( $\Delta t + \Delta k2$ ) periódusidőt fognak mérni. Ennek oka, hogy a két impulzuskiadás között az adó egy közelebbi vagy távolabbi helyre fog kerülni. Amikor pedig újból kiadja az impulzust, akkor az gyorsabban illetve lassabban fog odaérni a vevőhöz, tehát lecsökken vagy megnő a mért periódusidő. Ha pedig tudjuk, hogy mennyi a periódusidő értéke ( $\Delta t$  - tehát hogy az adó milyen időközönként ad ki impulzusokat), akkor ennek az időnek és a vevő által mért periódusidőnek a különbségéből meg fogjuk tudni mondani azt, hogy mennyit mozdultunk el az előző mért ponthoz képest.



5. ábra Impulzusok között eltelt idő

Tehát szükségünk van mindig az előző távolságra, hisz mi csak mindig azt mérjük, hogy mennyi az elmozdulás az előzőhöz képest. Ennek következtében két dologgal is kell számolnunk. Egyrészt, ha hibásan állapítjuk meg egy ponton a távolságot, akkor a további mérésekre is kihatással lesz ez, tehát a hiba tovább fog terjedni és felhalmozódhat. A másik probléma, ami felmerül: ha egy adott periódusidő alatt csak nagyon kicsit mozdul el az adó (tehát a mérési hibahatár alatt), akkor nem fogjuk tudni eldönteni azt, hogy elmozdult-e, vagy helyben maradt az objektum. Azonban ha kikötjük, hogy minimálisan mekkora az adott tárgy sebessége, és ennek megfelelően választjuk meg a periódusidőt, akkor ez a probléma kiküszöbölhető. A periódusidőt minél kisebbre választjuk, annál kisebb lesz a kimérhető, időegység alatt történő elmozdulás nagysága. A frissítési idő megfelelő választásával egy reális, minimálisan mérhető sebességszűböt, valamint kielégítő frissítési sebességet kaphatunk.

E két módszer közül van mindkettőnek előnye és hátránya is. Míg az elsőől pontosabb eredményt várunk, felveti a szinkronizálás problémáját az eszközök között. A második módszerrel nem kell ugyan szinkronizációt végeznünk, de feltételeket kell szabnunk, és nem is kapunk olyan pontos eredményeket. Annak érdekében, hogy valós mérési eredmények alapján hasonlíthassuk össze a két módszert, a tervezett rendszernek mindkét eljárást ismernie kell.

## 10 A feladathoz szükséges hardver eszközök bemutatása

Ebben a fejezetben, a beltéri helymeghatározást végző rendszerhez szükséges hardver eszközöket ismertetem.

### 10.1 Az adáshoz és a vételhez is használt mikrovezérlő, a PIC24FJ256GB108 rövid bemutatása

A mikrovezérlő memória-szervezése Harvard architektúrájú. Ez azt jelenti, hogy a programmemória és az adatmemória elkülönül egymástól. A személyi számítógépben például nem így van, mert ott az operatív memória mind a végrehajtandó program utasításait, mind az adatokat is tartalmazza. Az előbbi felépítés azért kedvező, mert az adatainak hossza nem kell, hogy megegyezzen az utasítások hosszával. Ez a különbség teszi lehetővé, hogy a legtöbb utasítás csak 1 szóból álljon, ugyanis sok utasítás végrehajtásához operandusokra is szükség van.

Egy digitális rendszer a legtöbb esetben működéséhez órajelet igényel, amit egy oszcillátor áramkör állít elő. PIC vezérlők esetén különféle órajel-generálási megoldások közül választhatunk. Jelen feladathoz egy igen nagy pontosságú, *32768 Hz*-es kvarc oszcillátort választottunk.

Általánosan egy perifériális egység a működése során négy típusú jelet használ: bemenő adatok, kimenő adatok, vezérlőjelek, státuszjelek. Ebben a vezérlőben a legfontosabbak a következők:

*Kétállapotú ki-bemeneti egységek:* a vezérlő bináris adatokkal dolgozik, leglogikusabb, ha a külvilággal való kapcsolat is ilyen kétállapotú jelekkel valósul meg. A PIC gyártmányú mikrovezérlők esetén a bemeneti és kimeneti (I/O) vonalak mindegyike akár bemenet, akár kimenet is lehet, és ezt futáskor állítjuk be. Ezeknek az I/O vonalaknak a szerepét a memóriában néhány konfiguráló regiszter állítja be (a 0 érték/törölt bit jelzi, hogy a hozzátartozó vonal kimenet, az 1 érték/beállított bit pedig a bemeneti irányt jelöli).

*Időzítő/számláló egység :* Nagyon sok feladatnál van szükség időzítésre, illetve impulzusok számlálására. Ezt egy közös, egyszerre csak egyik módon használható modul valósítja meg, egy számláló áramkör. A léptető jel forrása vagy külső számlálás, vagy a belső órajel lehet. Egy előosztó alkalmazásával bővíthetjük az blokk mérési tartományát.

*A/D átalakító:* A bemeneten érkező analóg jelet alakítja át digitális adattá.

*PWM átalakító:* A megfelelő kimeneti lábbon nagy frekvenciával periodikusan ismétlődő, 0 és 1 jelszinttel szükséges arányban kitöltött szignált tudunk generálni. Ennek célja lehet – egy

további, integráló tag beiktatásával – pszeudo-analóg jel előállítás, vagy éppen a jelenlegi alkalmazásnál: az ultrahang adók fáziseltolós vezérlése.

*Soros periféria:* lehetővé teszi az egyes mikrovezérlők, illetve a mikrovezérlő és a személyi számítógép adat-kapcsolt összeköttetését (később még bővebben esik szó róla).[19][20]

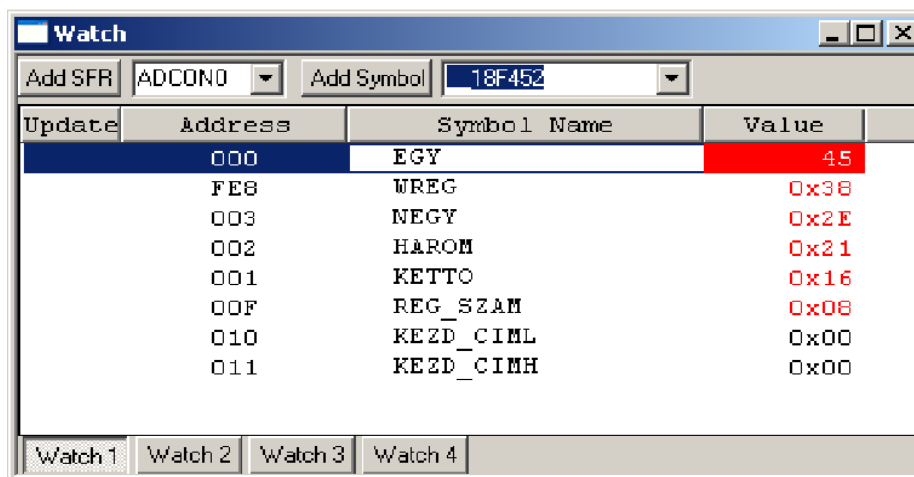
## 10.2 A programfejlesztést segítő eszközök

A forrásnyelvi program megírását egy speciális programmal, szövegszerkesztővel (text editor) végeztük el. Feladata, hogy segítségével szövegfájlokat hozzassunk létre, illetve a már meglévő szövegfájlokat módosíthassuk.

Szükségünk van még egy fordító és egy programozó egységre is. A programok írása C nyelven is lehetséges, majd a fordító előállítja a megfelelő alacsonyszintű gépi kódot belőle.

Hasznos eszköz még a lépésenkénti programvégrehajtás illetve töréspont beszúrásának lehetősége. Ha hibát keresünk valahol, célszerű nem az egész programot egyből lefuttatni, hanem csak lépésenként, utasításokként. Így könnyebbé válik a hiba helyének lokalizálása. Töréspontokat tudunk beszúrni valamelyik sorhoz, és akkor a program csak addig a pontig fut le, onnantól lépésenként nézhetjük a további futást. Hasznos eszköz szintén a fejlesztést segíteni hivatott watch eszköz. Segítségével kiválaszthatunk a programban előforduló változók közül bármennyit, és beállítva a lépésenkénti programfuttatást, utasításról utasításra megnézhetjük az általuk felvett értékeket.

Mindezeket a szolgáltatásokat tartalmazza az általunk is használt integrált fejlesztői környezet (IDE), az MPLAB.



6. ábra Watch, változók értékének nyomon követése

### 10.3 Ultrahangos jel kiadása

Az ultrahang hullámok mechanikai rezgések, melyek egy piezokristály elektromos feszültséggel való gerjesztése során jönnek létre rugalmas közegben és tipikus frekvenciatartományuk 0,1MHz és 50MHz között helyezkedik el.

Az ultrahang adó tehát egy olyan eszköz, mely energiát alakít át ultrahanggá, vagy olyan hanggá, ami az emberi fül számára már nem hallható. Mindezt a piezoelektromosság segítségével teszi, melynek során, bizonyos anyagokon elektromos feszültség hatására alakváltozás jön létre. Tehát abban az esetben, ha váltakozó árammal hajtjuk meg, azt a hatást érzjük el, hogy magas frekvencián fog rezegni, magas frekvenciájú hanghullámokat keltve.

Az általunk használt adófejek paraméterei a következők voltak:

Frekvencia: 40kHz,  $\pm 1$ kHz

Érzékenység: 5.0mV/Pa/1kHz

Kapacitás: 2,400pF

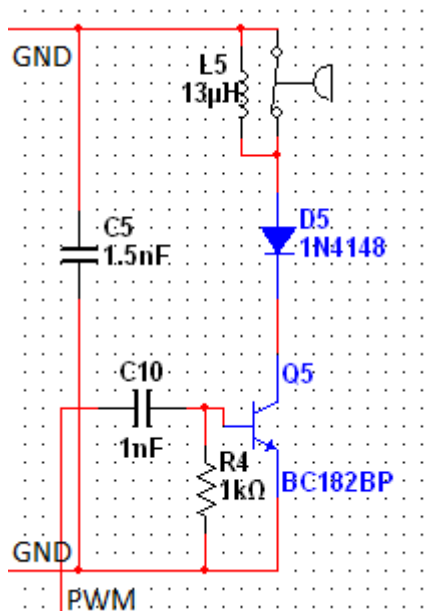
Input jel: 20VRMS Max.

Méretük:  $\varnothing$  16mm x 12mm

Ha a feszültségforrást közvetlenül az adófejre kapcsolnánk, nem tudnánk elég nagy adóteljesítményt elérni vele. Ezért szükségünk lesz egy olyan áramkörre, amely segít abban, hogy megnöveljük az eszköz adóteljesítményét. Ha használunk egy tranzisztort és egy rezgőkört is hozzá, akkor nagyban megnövelhetjük azt. Ezért az adóval párhuzamosan kötünk egy induktivitást, ezzel kialakítunk egy rezgőkört.

Mivel az általunk használt ultrahang-adó működési frekvenciája a specifikációjában leírtaknak megfelelően 40kHz, ahhoz, hogy minél nagyobb amplitúdóval tudjunk adni, célszerű, ha a gerjesztés frekvenciája és a lengőrendszer szabadlengéseinek frekvenciája közel van egymáshoz. Ilyen esetben a gerjesztés által a rendszerbe egy-egy kitérés alatt bevitt kis energiaadagok fokozatosan összegeződnek és nagy rezgés amplitúdót okoznak [20]. Ezért a rezgőkör induktivitását és kondenzátorát ennek megfelelően választottuk meg. A számolást elvégezve arra a megállapításra jutottunk, hogy a tekercs induktivitása 13 $\mu$ H körül, míg a kondenzátor kapacitása 1,5 nF kell hogy legyen. Oszilloszkóppal tudtuk ellenőrizni, hogy valóban így tudjuk a legnagyobb amplitúdót elérni a legjobb hatásfok érdekében. Ennek megfelelően, a hangszórót meghajtó áramkör az alábbi rajz szerint alakult. (7.ábra)





7. ábra Hangszórót meghajtó áramkör

Ezt az áramkört az általunk használt mikrovezérlő segítségével, váltakozó feszültséggel kell meghajtanunk. Erre egy egyszerű lehetőség lenne, ha kiválasztanánk a mikrokontroller egy lábát és kimenetre állítanánk, majd bizonyos ideig logikai egyesre állítanánk, majd ugyanennyi ideig negáltjára. Azonban a későbbiekre való tekintettel ennél egy kicsit kifinomultabb módszert alkalmaztunk.

A Pulzus Szélesség Moduláció (PWM) az impulzus alatti terület mértékébe kódolja a moduláló jel pillanatértékét, azaz mintáját. Az impulzus amplitúdója állandó, tehát a szélességet kell változtatni. Ezt akkor tudjuk például használni, amikor szükségünk van arra, hogy ne csak nullás és egyes szinten tudjunk jelet kiadni, hanem szabályozhassuk a kiadott jel teljesítményét. A használt mikrokontroller alkalmas PWM jel generálására és mivel nekünk skálázhatóság szempontjából megfelel, ezzel a módszerrel fogjuk az impulzusokat előállítani.

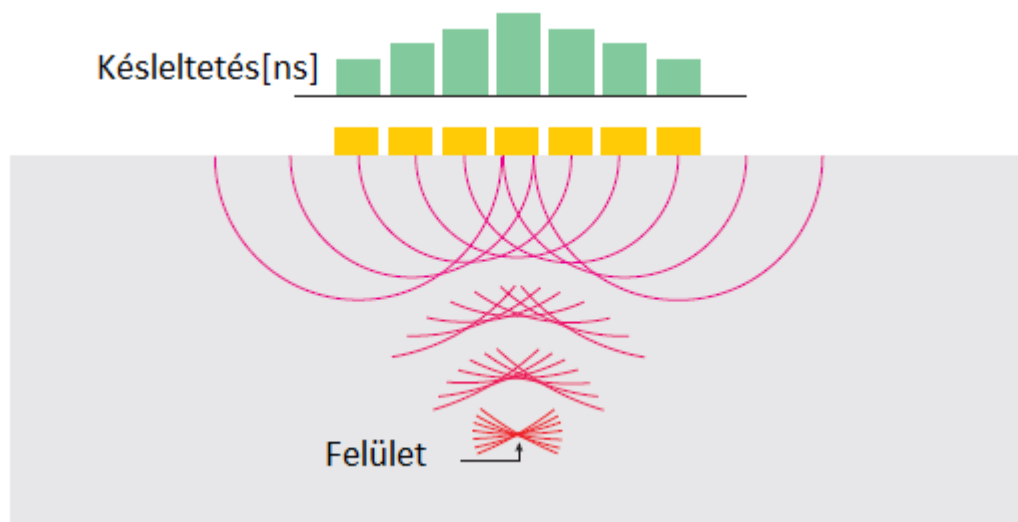
A mikrovezérlő OCx regisztere annak a beállítását szolgálja, hogy melyik lábon is szeretnénk majd az impulzust kiadni. Először ezt állítottuk be. Mivel nekünk egy 40 KHz-es jelre van szükségünk, a periódusidőt és a kitöltési tényezőt ennek megfelelően kellett megválasztanunk. A mikrovezérlő órajelét már előzetesen beállítva 32 MHz-re tudunk minden paramétert a beállításához. A megfelelő összefüggések szerint így a periódusidőt (OCxRS) 198-ra, míg a kitöltési tényezőt (OCxR) ötven százalékosnyira állítottuk.

Ennek eredményeképpen kaptunk egy 40 KHz-es, 50 % kitöltöttségű négyzetjelet, mely alkalmas az ultrahang adó optimális meghajtására.

## 10.4 Hullámfront kialakítása

Hagyományos ultrahang mérések során csupán egyetlen adófejet használnak, szerteágazó sugárzással. Ennek a fajta felépítésnek több hátránya is van. Limitált detekciós képességük révén a gyakorlatban, több szögben is elvégzik a mérést, növelve a találat valószínűségét. Tehát annak érdekében, hogy a keresés hatékonyságát növelni tudjuk, akár 60 fokos szögre elhelyezkedő objektumok eléréséhez egy újfajta konstrukcióra van szükségünk.

Abban az esetben, ha nem csupán egy adófejet használunk, hanem egymás mellett több sugárzót is elhelyezünk, akkor ezeknek a hullámfrontjai interferálódni fognak és egy együttes hullámfrontot fognak kialakítani. Lesznek olyan részek ahol a jelek felerősítik, illetve ahol gyengíteni fogják egymás hatását. Ahhoz, hogy a sugárnyaláb irányát szabályozni tudjuk, az egyes hangszórókat különböző fázisú jellel kell meghajtanunk. Ennek alapja az a konstruktív interferencia, melynek segítségével létrehozhatjuk a fókuszált sugárnyalábot. Feltételezzük, hogy a különböző hangszórók által kibocsátott jelek azonos közegben, tehát azonos sebességgel tudjanak terjedni, annak érdekében, hogy az interferencia valóban létrejöjjön. Az alábbi ábra szemlélteti a jelenséget.[16]



8. ábra Fázisvezérelt meghajtás

Annak függvényében, hogy milyen irányba kívánunk pásztázni, a meghajtó jeleknek időben eltoltnak kell lenniük. Ahhoz, hogy megmondjuk ennek mértékét, az alábbi számolásra lesz szükségünk:

Tekintsük az alábbi összefüggést:

$$x = d \cdot \sin \theta_s \quad (\text{e7})$$

Illetve:

$$\frac{360^\circ}{\Delta\varphi} = \frac{\lambda}{x} \quad (\text{e8})$$

ahol

- $\Delta\varphi$  a fáziseltolás két elem között,

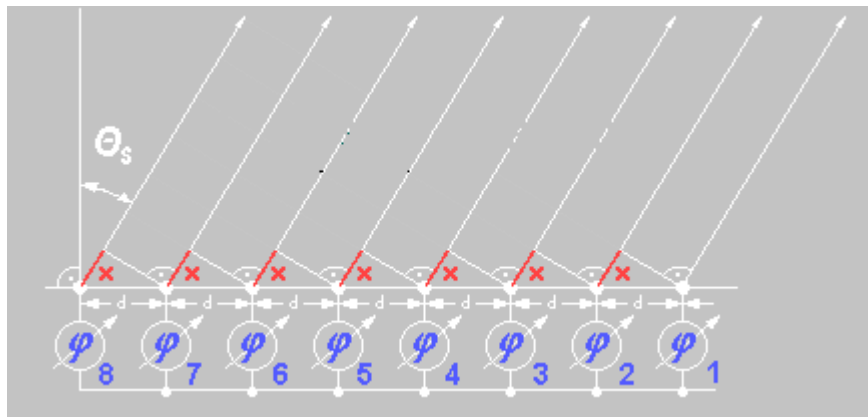
- $d$  a távolság a sugárzó elemek között

- $\theta_s$  a kívánt sugárzás iránya

Behelyettesítéssel az alábbi összefüggést kapjuk:

$$\Delta\varphi = 360^\circ \cdot d \cdot \frac{\sin \theta_s}{\lambda} \quad (\text{e9})$$

Ennek alapján azt a szöget, amivel el kell tolnunk az adókat meghajtó jeleket, a megfelelő szög elérése érdekében az adófejek egymástól mért távolsága és a hullámhossz segítségével számoljuk. Ezt illusztrálja a 9. ábra is [18].



9. ábra Fázisvezérlés

Ahhoz, hogy szemléletessé tegyük az ultrahang hullámok terjedését ilyen feltételek mellett, egy modellt használtunk. A szoftvert nem mi készítettük, de a megfelelő paraméterek állíthatóak voltak, így a modellezésre alkalmas volt. Beállítottuk a fáziseltérést az adófejek között, illetve az adófejek egymástól való távolságát és a hullám frekvenciáját. A használni kívánt értékek beállításával, láthatóvá vált, hogy valóban jó elképzelés szerint haladunk.

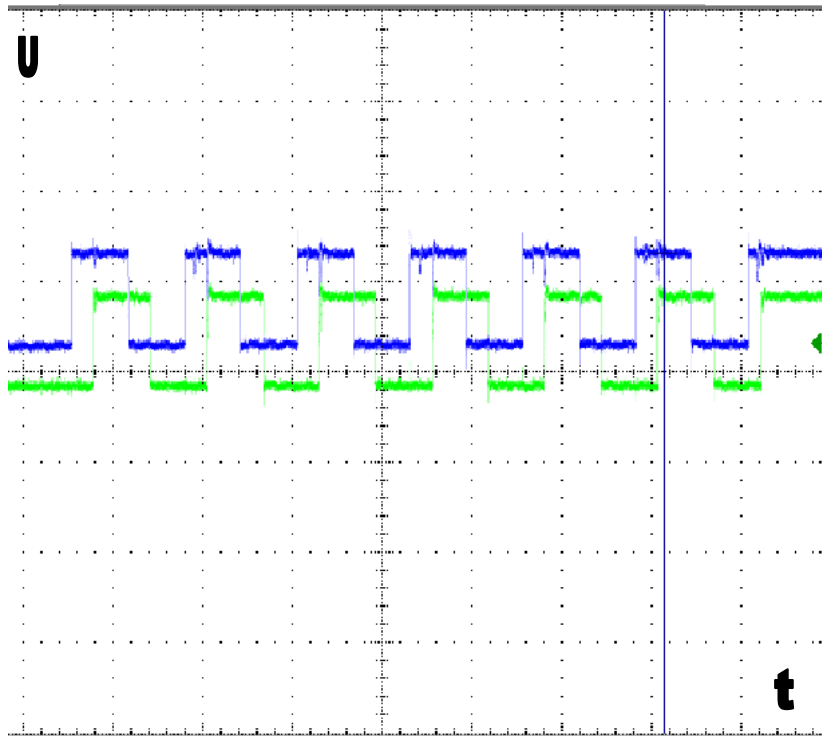
Ezeknek megfelelően egy olyan áramkört építettünk, ahol nem csupán egy adófejet használtunk fel, hanem öt hangszórót helyeztünk el egyvonalban. A köztük lévő távolságot ( $d$ ), a hullámhossz negyedére, azaz kettő centiméterre választottuk, és helyeztük el őket. Az áramkör többi része megegyezik az egy hangszórót meghajtóéval. Azonban ahhoz, hogy egyszerre meghajtsuk őket, újabb szoftveres megoldásokra lesz szükségünk: Az eddig egycsatornás PWM-et ki kell terjesztenünk öt csatornára és el kell érni valahogy, hogy fáziseltolást tudjunk létrehozni.

Ennek megfelelően a programkód a következőképpen alakul:

Nem csupán egy kimeneti csatornára lesz szükségünk, hanem minden egyes adófejnek külön szolgáltatjuk az impulzusokat. A fentiek mintájára itt is beállítjuk minden egyes csatornának (OC1, OC2, OC3, OC4, OC5) a megfelelő regisztereit. Azonban ha mindegyiknél ugyanazokat a periódusidő, kitöltési tényező beállításokat alkalmazzuk, akkor a jelek egy fázisban lesznek és a front irányát nem tudjuk szabályozni. Annak érdekében, hogy fáziseltolást tudjunk csinálni további gondolkodásra lesz szükség.

A pulzus szélesség modulációval meg tudjuk adni azt, hogy mennyi legyen a kitöltési tényező, tehát minden esetben egyszerre történik a jelek felfutása, de a lefutást szabályozni tudjuk. Ha inverziót alkalmazunk, akkor pedig a jelek lefutása történik egyszerre és a felfutást tudjuk szabályozni. Itt jöhet az a gondolatunk, hogyha ezek a felfutó élek adnák az órajelet, és minden egyes órajelre előjelváltást idéznének elő, akkor ugyan a jel frekvenciája a felére csökkenne, de kaphatnánk egy 50% kitöltöttségű impulzust, melynek fázisát szoftveres úton, egyszerűen a PWM kitöltési tényezőjének beállításával szabályozni tudnánk. Ehhez azonban egy újabb hardver eszközre volt szükségünk.

Az élvezérelt D-tároló a következőképpen működik: Az órajel alacsony szintről magas szintre váltásának pillanatában a D input lábán lévő adat bekerül a Q illetve Q negált kimeneti lábra, és egy órajelnyi ideig „késlelteti”, ezért is hívják D (Delay) tárolónak. Ha tehát a kimenet negáltját visszacsatoljuk a bemenetre (Q negáltat D-re), akkor elértük azt, hogy szoftveresen szabályozva fáziseltolást tudunk létrehozni. Mivel így a D-tárolóból kijövő jel frekvenciája fele lesz az órajel frekvenciájának, ezért azt úgy kell megválasztani, hogy duplája legyen a kívánt értéknek. Jelen esetben, ha 80 KHz frekvenciájú és 50% kitöltésű jellel vezéreljük a D-tárolót, annak kimenetén megkapjuk a nekünk megfelelő 40 KHz-es jelet, amivel az adófejeket meghajthatjuk. (10. ábra)



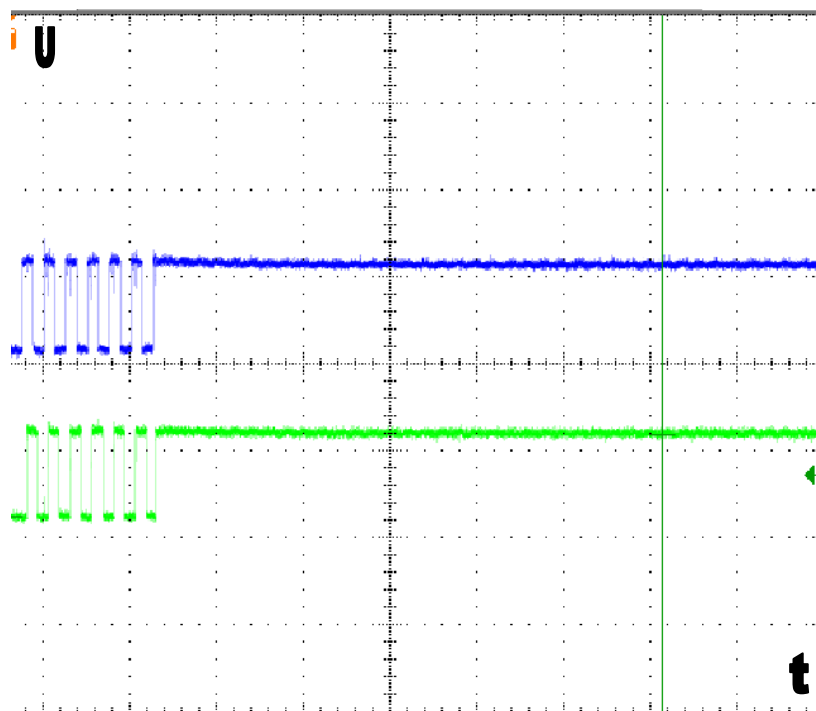
10. ábra Fáziseltolt PWM képe oszcilloszkópon

Programunkban biztosítunk öt olyan memóriaterületet, ahonnan minden pulzuskiadásakor beolvassuk annak az értékét, hogy a PWM-nek mennyi legyen a kitöltési tényezője, tehát, hogy milyen fázisú impulzust szeretnénk kiadni. Erre azért van szükség, hogy mindez a programon kívülről is szabályozható paraméter legyen.

Most már, hogy tudunk fáziseltolt impulzusokat kiadni, felmerül az igény, hogy ezek az impulzusok ne egyfolytában kerüljenek kiadásra, hanem burst-ok formájában. Tehát kis elemszámú impulzussorozat kiadása után csak némi késleltetés után következzen az újabb sorozat. Kísérleteink azt mutatták, hogy körülbelül 8-16 impulzusból álló sorozat lenne ideális, és a burst-ok közti eltelt idő annak érdekében, hogy jól tudjunk mérni, körülbelül 0,5 szekundumnynak választva ideális. Szoftveres megoldással mindezt a következőképpen értük el: A PWM csatornákon kijövő impulzusokat, egy bizonyos idő után leállítjuk. (Miután kiadtuk a kívánt elemszámú impulzussorozatot.) Ez a megfelelő regiszterek kinullázásával, alapértelmezettre állításával lehetséges. Miután mind az öt csatornán leállt az impulzuskiadás, egy órát (timert) alkalmazunk. A mikrovezérlőnk rendelkezik 5 timer modullal. Az első kivételével, mindegyik alkalmazható 16 illetve 32 bites változatban is. A konfiguráló regiszterek beállítása után, a PRx regiszterbe tudunk egy számot állítani és ha timer üzemmódban használjuk, akkor a beállított idő lejártá után interrupt (megszakítás) váltódik ki. (A timer az oszcillátort használja forrásként, és

annak frekvenciája felével pörög.) A program futása megszakad és végrehajtnak az interrupt függvényben megírt utasítássorozatok.

Első lépésként beállítunk egy 16 bites timert, annyi időre, hogy 6-8 impulzust tudjunk kiadni. Elindítjuk az órát és ugyanekkor elkezdjük kiadni az impulzusokat. Ahogy az óra lejár, a megszakítás kiváltódik és elugrik a futás arra az utasítássorozatra, ahol leállítjuk a PWM-et és ezzel egy időben „felhúzzunk” egy újabb timert, körülbelül 0,5s-nyi időre. Ameddig tehát az újabb interrupt nem váltódik ki, nem fogunk jelet kiadni (~0,5s), majd újból visszakapcsoljuk a PWM-et, és aktiváljuk a TON bit egyesre állításával az első órát. Ezzel a módszerrel el tudtuk érni azt, hogy nem egyfolytában adunk impulzussorozatot. (11. ábra)



11. ábra Ultrahang impulzus-sorozat (burst)

A rugalmasság miatt itt is úgy oldottuk meg, hogy a periódus-regiszter értékeket mindig egy mások által is módosítható memóriaterületről tölti be. Így állítani tudjuk az impulzusok számát egy sorozatban illetve a köztük eltelt időt kívülről is.

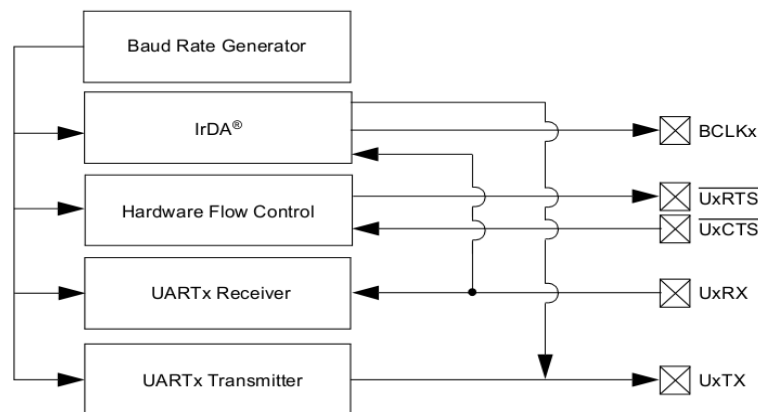
## 10.5 Soros kommunikáció kialakítása

Ahhoz, hogy mérés közben információcserét tudjunk megvalósítani eszközeinkkel, szükségünk van arra, hogy valamilyen felhasználói felülettel rendelkezzenek. Ehhez

most hordozható számítógépet fogunk használni, mellyel az összeköttetést soros porton keresztül oldjuk meg.

Az univerzális aszinkron adóvevő (UART) olyan eszköz, amely fordítást végez soros és párhuzamos interfészek között. Soros átvitelnél az UART a bájtokat aszinkron start-stop bitfolyammá alakítja át, amiket elektromos impulzusokkal továbbít. Az UART modul egyike a soros I/O moduloknak, amik rendelkezésre állnak a PIC24F eszközcsaládban. Az UART full-duplex, aszinkron kommunikációs csatorna, ami kommunikál a perifériás eszközökkel és személyi számítógépekkel, olyan protollokat használva, mint az RS-232, RS-485, LIN 1.2 és IrDA®.[21]

12. ábra A beépített UART modul[3]



A beépített UART modul (12. ábra) tartalmaz egy 16-bites „Baud Rate”(átviteli sebesség) generátort, az UxBRG regiszter pedig szabályozza a periódusát a szabadon-futó, 16-bites timernek. A következő egyenlet mutatja, hogy hogyan tudjuk kiszámolni az átviteli sebességet:

$$Baud\ Rate = \frac{FCY}{16} \cdot (UxBRG + 1) \quad (e10)$$

Illetve,

$$UxBRG = (FCY / 16 \cdot Baud\ Rate) - 1 \quad (e11)$$

ahol FCY az oszcillátor frekvenciája.

A megfelelő beállítások után azt kellett még elérnünk, hogy a fogadni kívánt adatfolyamot egy bufferben el tudjuk tárolni, míg feldolgozásra nem kerülnek. Tehát amikor megérkezik egy adat, az megszakítást vált ki, és nekünk ezt az adatot valahol el kell tárolnunk a feldolgozásig. Erre a feladatra egy cirkuláris buffert (ring buffer) alkalmaztunk. Ez egy olyan adatszerkezet, melynek egy előre meghatározott méretű memóriaterületet allokálunk, és a bejövő adatfolyamot szekvenciálisan, mint egy tömbben tároljuk el. Ha az a terület megtelik, nem lesz

képes újabb adatok tárolására. Ezentúl rendelkezik két mutatóval(head,tail) amik azt jelzik, hogy hol tart az adatok betöltése illetve kiolvasása. Mindig az ezek által mutatott helyre tesszük, illetve olvassuk ki a következő adatot. A kiolvasott adat helye mindig újból felszabadul és újabb adat eltárolására lesz képes ezért is nevezik cirkulárisnak.

Figyelniük kell arra, hogy megfelelő méretűre válasszuk meg a tömb méretét. Túl nagy memóriaterületet feleslegesen lefoglalni, hisz úgysem fogjuk kihasználni. Viszont ha túl kicsire választjuk, nagy lesz az adatvesztés, mivel megtelek, mielőtt új hely felszabadulna.

## 10.6 Grafikus felület

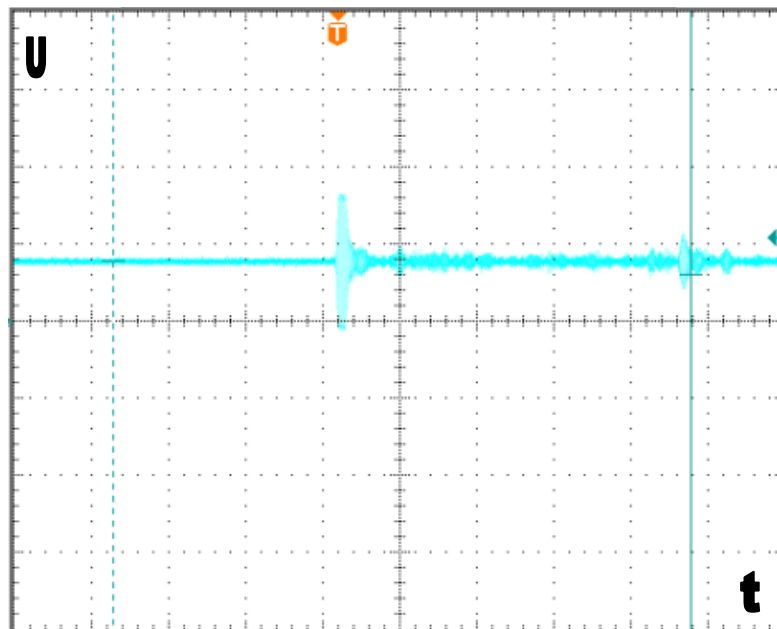
Grafikus felület készítésére azért volt szükség, hogy a mért adatokat reprezentatív módon meg tudjuk jeleníteni, grafikon formájában illetve, hogy a szabályozható paramétereket egyszerűen tudjuk változtatni. A külön programként funkcionáló felület LABview programban készült, mely beépített modult tartalmaz arra (VISA), hogy soros porton keresztül az adatkommunikáció zavartalan módon végbemehessen. Így szabályozni tudjuk a kiadandó impulzus paramétereit az adó egységben.



## 11 Adó és vevő egység tesztelése az ultrahanghullám tulajdonságainak figyelembevételével

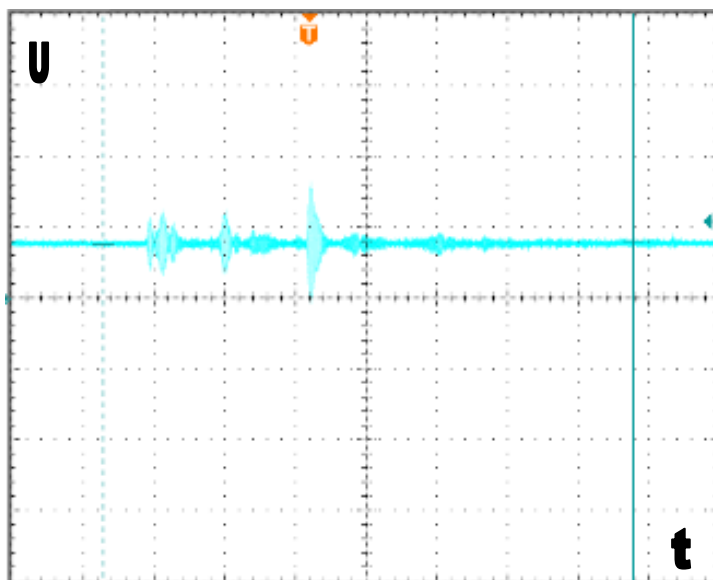
Mielőtt a távolságméréshez szükséges szoftverek elkészítéséhez kezdtem volna, méréseket végeztem az elkészült adó, illetve vevő egységgel.

Erre a célra, nyolc négyzetjel impulzussal hajtottam meg az adófejeket, és oszcilloszkópon néztem, hogy a vevőegységben milyen jelet lehet detektálni. Amikor nem volt akadály az adó és vevő között, ezt láttam az oszcilloszkópon (13. ábra):



13. ábra Vett ultrahang impulzus

Itt semmilyen akadály nem állt a kiadott impulzus útjában, a helyiségben lévő falról illetve bútorokról visszavert, több úton haladt jelek látszanak kisebb amplitúdóval, mivel a jelek nagy része direkt úton haladt, amelyek hosszabb úton érkeztek, azoknak e miatt nagyobb a csillapodásuk, mire a vevőhöz értek. Megállapítható, hogy az első, direkt jel megérkezésétől számolva kb. 24ms az az idő, ami alatt a jelek teljesen lecsillapodnak, tehát amennyi idő után már kiadhatjuk a következő impulzust.



14. ábra Többutas terjedés

Következő lépésben (14. ábra) úgy állítottam fel a mérést, hogy a jelek legnagyobb része csak visszaverődés után, nem közvetlen úton tudjon eljutni a vevőhöz. A plafon felé irányítottam az adófejeket, és egymás mellé helyeztem az asztalra az adót és a vevőt. Mivel mind az adófejek, mind a vevőfej függőlegesen álltak, a direkt hullám, csak minimális nagyságú volt, hiszen az adófejekből oldalirányba minimális jel indul. A 14. ábrán látszik, hogy a direkt hullám kisebb amplitúdójú, és először érkezik. A reflektálódott hullám amplitúdója nem csökkent, annak ellenére, hogy visszaverődött, hisz a szobában található akadályok akusztikus ellenállása nagy, míg a levegő kicsi, így az energiavesztés visszaverődéskor kicsi. Ha megfelelően állítjuk fel a mérést, tapasztalhatunk olyat, hogy egy későbbi időpillanatban detektált jel amplitúdója nagyobb, mint egy korábbié, tehát egy rövidebb úton, kisebb csillapítást szenvedőé. Ilyenkor több, más-más úton terjedt jel összegződéséből kaptunk egy nagyobb amplitúdójú jelet. Ezért egyáltalán nem biztos, hogy nekünk a mérés során mindig a legnagyobb amplitúdójú jelet kell keresnünk.

Abban az esetben tehát, ha két megtört hullám, amik nem direkt hullámok, egy időben érkeznek a vevőhöz, felerősíthetik egymást. Így fennállhat az az eset, hogy a legnagyobb amplitúdóval rendelkező jel valóban nem a közvetlen utat járta be. Ugyanakkor azt tudjuk, hogy az elsőnek detektált jel az, amelyik közvetlenül érkezett, tehát amelyik segítségével távolságot tudunk számolni. Így nem azt a jelet keressük, amelyiknek a legnagyobb az amplitúdója, hiszen ez nem biztos, hogy az, amelyikre szükségünk van, hanem azt, amelyiket először detektáltuk.

Ezek a kísérletek, mérések képet adtak arról, hogy milyen jelenségeket kell figyelembe vennünk, a vevő egység szoftverének készítése során.

## 12 Távolságmérés

Ahogy azt már korábban említettem a távolságmérést kétféleképpen is megvalósítom annak érdekében, hogy össze tudjam a két módszert hasonlítani.

A távolságméréshez szükséges hardver eszközök már rendelkezésre álltak: Egy öt fejfel ellátott ultrahang adóegység, melyet négyszögjel impulzusokkal meghajtva tudunk kimenő jelet generálni, illetve egy állítható erősítéssel rendelkező ultrahang vevő.

### 12.1 Relatív módszer

Első feladatnak azt tekintetem, hogy beállítsam az adót, hogy megfelelő periódusidővel adjon ki ultrahang impulzusokat. Első közelítésben, a periódusidőt 50 ms-ra választottam, tehát fél másodpercenként adunk ki ultrahang impulzusokat. Ez azért tűnt optimálisnak, hiszen ennyi idő alatt a vevő - egy reális sebességet feltételezve – elmozdulása nagyobb, mint amennyi a hibahatár lenne. Tehát fél szekundum alatt távolodik, illetve közeledik annyit, hogy az az idő, amivel hosszabb idő alatt vagy gyorsabban érkezik meg egy adott impulzus, egyértelműen, pontosan mérhető legyen. Ez a periódusidő azért is megfelelő, mert ennyi idő alatt az előző impulzust már egyáltalán nem fogjuk detektálni, a szimbólumok közti áthallás nem fogja zavarni a mérést.

Először a két impulzus közti eltelt időt, egy 16 bites timerrel számoltuk: Beállítottunk egy kívánt értéket egy regiszterbe (PRx), majd elindítottuk a számlálót. A PRx regiszter értéke minden egyes lépésben összehasonlításra került a számláló (TMRx) értékével. Egyezés esetén pedig kiváltódott egy megszakítás, ami jelezte, hogy eltelt a kívánt idő a két pulzuskiadás között. A 16 bites timerrel azonban maximum 65536-ot tudtunk számolni, ami 16 MHz-es frekvenciával számolva (a timert úgy állítottuk be, hogy az oszcillátor frekvenciájának felével működjön), csak 0,44 ms-ot jelent, tehát eddig maximum ennyi időt tudtunk várni két impulzuskiadás között. A használt mikrokontroller azonban támogatja azt a funkciót, hogy két 16 bites timert összefűzzünk és így kapjunk egy 32 biteset. Az adatlapban leírtaknak megfelelően elvégeztük a beállításokat. Most már nem csak egy regiszterbe, hanem két, egy magas és egy alacsony helyértékű regiszterbe kell beállítanunk a kívánt értéket. Ezzel a konstrukcióval, nemhogy 50 ms-ot, de már körülbelül ötpercnyi időt tudunk számolni.

Most, hogy van egy megfelelő időközönként impulzusokat kiadó adóegységünk, szükségünk van egy megfelelő szoftverre, ami irányítani fogja a vevőegységet.

Alapvető feladata az lenne, hogy mérje, minden egyes beérkezett impulzus közt az eltelt időt. Legyen képes megtalálni, hogy melyik a direkt úton érkezt impulzus, és mérni az azok közt i időkülönbséget. Ahogy egy vett impulzus a vártnál előbb, vagy a vártnál később érkezik, ennek mértékéből legyen képes kiszámolni és frissíteni a távolság adatot.

Először azt valósítottam meg, hogy legyen képes megtalálni azt az időpillanatot a szoftver, amikor a direkt jel megérkezik. Ehhez azt csináltam, hogy az erősítő modulból kijövő jelet a mikrokontroller egyik lábára kötöttem, majd ezt a lábat beállítottam bemenetnek, és írtam egy analóg-digitál konverziót megvalósító osztályt. A mikrovezérlő adatlapja szerint be kellett állítani azt, hogy melyik lábról vegye a jelet a konverzióhoz, illetve egy referenciafeszültséget, amit a tápfeszültségnek választottam. Beállítottam, hogy mintavételezés után automatikusan kezdje el a konverziót, illetve hogy mennyi mintát vegyen. Fontos volt azt is beállítani, hogy milyen időközönként végezzen digitális átalakítást, tehát milyen időközönként kapjak egy újabb értéket, ha egyfolytában végzem a lekérdezést. Az nem jó, ha túl gyakran veszek mintát, mert akkor az A/D konverter felbontásának következtében rengeteg redundáns adatot fogok kapni. Viszont az sem jó, ha túl ritkán, hiszen nem fogok elegendő információhoz jutni. Ezeket figyelembe véve úgy állítottam be a megfelelő biteket, hogy amennyi ideig egy burst, tehát nyolc impulzus megérkezik, impulzusonként hat, tehát összesen 48 mintavétel történik, folyamatos konverzió esetén. Az alábbi ábrán (15. ábra) egy tesztelés eredménye látszik, folyamatos konverziót végezve, éppen egy impulzus beérkezése esetén. Mivel ezeket az értékeket egy tömb adatszerkezetben helyeztem el, az első oszlopban annak indexei vannak feltüntetve. A második illetve harmadik oszlopban látszanak a konverzió eredményei, 0 és 1024 közötti tartományon.

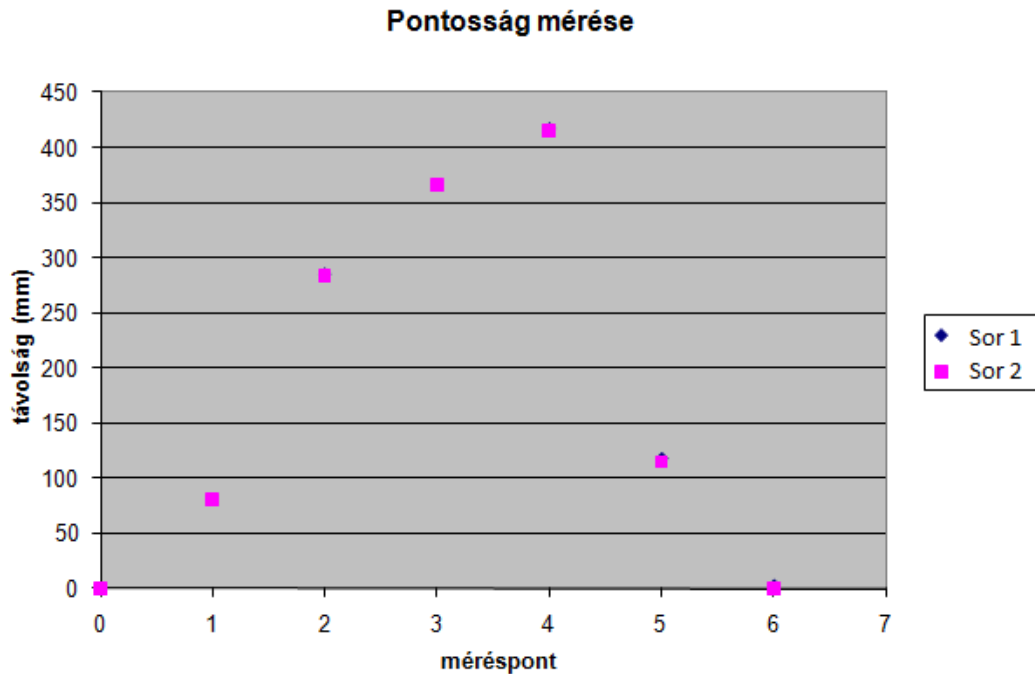
[99]	0x02BF	703
[100]	0x03FF	1023
[101]	0x03FF	1023
[102]	0x03FF	1023
[103]	0x0000	0
[104]	0x0000	0
[105]	0x0000	0
[106]	0x0001	1
[107]	0x03FF	1023
[108]	0x03FF	1023
[109]	0x03FF	1023
[110]	0x02DB	731
[111]	0x0000	0
[112]	0x0000	0
[113]	0x0000	0
[114]	0x031B	795
[115]	0x03FF	1023
[116]	0x03FF	1023
[117]	0x03FF	1023
[118]	0x0000	0
[119]	0x0000	0
[120]	0x0000	0
[121]	0x004E	78
[122]	0x03FF	1023
[123]	0x03FF	1023
[124]	0x03FF	1023
[125]	0x0185	389
[126]	0x0000	0
[127]	0x0000	0
[128]	0x0000	0

15. ábra A/D konverzió szemléltetése

Azt, hogy melyik a direkt úton érkezett jel, a következőképpen kerestem meg. Elkezdtem A/D konverziót végezni és ezt addig folytattam, ameddig nem találtam egy olyan szakaszt, ahol egy bizonyos ideig, nem volt semmilyen detektált jel. Tehát egy olyan részt kellett keresni a jelben, ahol a feszültségérték legalább egy bizonyos számú, egymást követő minta alapján egy küszöb alatt van. Így megtaláltam azt az időt, amikor már teljesen lecsillapodott az előző jel, de még nem érkezett meg a következő impulzus. Következő lépés az volt, hogy vártam arra, hogy megérkezzen a következő impulzus. Folyamatosan vettem mintát, és ezt addig folytattam, ameddig egy bizonyos értéket meg nem haladt a feszültség. Ekkor elindítottam egy 32 bites számlálót, aminek segítségével mértem a két impulzus közt eltelt időt. Mielőtt újból elkezdenék keresni a következő impulzust, biztosítanunk kell azt, hogy az előző impulzus már ne legyen mérhető, még a hosszabb úton, késve érkezett jelek sem. Ezért újból keresünk egy olyan szakaszt, ahol nem mérhető releváns feszültségkülönbség. Ha ez megvan, utána már várhatjuk a következő impulzust, melynek észlelésekor két dolgot is kell tennünk. Először ki kell olvasnunk a timer regiszterekben található értékeket. Mivel az eltelt idő két regiszterben van, egy magas illetve alacsony helyi értékűben, ebből egy darab számot kell képeznünk. Ez az érték fogja tárolni, a két impulzus közt eltelt időt. Mivel a számláló a mikrovezérlő órajelének frekvenciájának felére volt beállítva, ezért, hogy valós időt kapjunk, ezt még át kell számolnunk ms-ra. Ezután rögtön ki kell nulláznunk a számláló regisztereit, valamint újrainicializálnunk és újból elindítanunk, hiszen a következő impulzustávolságot, majd ennek segítségével fogjuk tudni mérni.

Ha ezeket a lépéseket periódusonként megcsináljuk, mindig kapni fogunk egy időértéket, ami az előző észlelt impulzus óta eltelt időt fogja jelenteni. Azt, hogy milyen időközönként kell impulzust kapnunk viszont tudjuk, tehát mindig vesszük ezzel az értékkel a különbségét, majd a hang terjedési sebességének segítségével ebből tudunk elmozdulást számolni. Egy változóban mindig számon tartjuk az aktuális távolságértéket, amit így minden egyes ciklusban frissítünk.

Ahhoz, hogy ki tudjam próbálni ezt a szoftvert, a következő egyszerű mérést végeztem. Az adó egységet elhelyeztem egy adott, fix helyre, majd a vevő egységet, amin ez a program futott elkezdtem távolabb vinni az adótól egy bizonyos pontig, majd ugyanezen az úton vissza oda, ahol eredetileg volt. Tehát a kezdeti pozíciója megegyezett a mérés végén felvett hellyel. A következő grafikonon (16.ábra) ábrázoltam az eredményeket.



16. ábra Mérési eredmény relatív módszerrel

A 16. ábrán látható, hogy a valóság és a mért adatok nem állnak messze egymástól: A sor1 pontjai jelölik a valódi távolságokat, míg a sor2 pontjai a mért távolságokat. A hiba olyan kicsi, hogy milliméteres nagyságrendbe esik. A kiindulási pozíció majdnem megegyezik az érkezési ponttal: Ha a kiindulási és érkezési pontot nullával jelöljük, akkor megérkezéskor nem a nulla pontba látjuk az adót, hanem a 3,1mm –es pontban. Elmondhatjuk, hogy egy méter megtételével 3.1 millimétert hibáztunk, ami kicsi hibát jelent. Azonban a probléma az, hogy ez a hiba kihatással lesz a további mérésekre is, tehát továbbterjed: Ha tehát a következő mérést kezdenénk, eleve egy hibás adatból indulnánk ki. Azonban még így is elmondhatjuk, hogy ennél sokkal nagyobb elmozdulásokat mérve, fenntartható egy tolerálható hibahatár. Azt a kísérletet végeztük el többször, hogy nem csupán egy métert tettünk meg, hanem hosszabb ideig folyamatosan mozgattuk az adót, összesen mindig öt métert megtéve, de a mérés végén visszavittük a kezdőállapotba. Azt tapasztaltuk, hogy a hiba átlagosan még így is csak 1,76 centiméter volt. Ez egy 0.3% -os relatív értékű, véletlen hibának számít. Elmondhatjuk tehát, hogy egy olyan módszert találtunk, ami valóban képes pontos távolságmérésre, de ki kell kötnünk, hogy az adó kezdeti pozícióját ismerjük, tehát a mérés kezdetekor rendelkezünk már egy távolságértékkel. Hatalmas előnye viszont a módszernek, hogy nem igényel semmiféle szinkronizációt mérés közben, illetve nem szükséges hozzá sem vezeték sem vezeték nélküli kapcsolat az adó és vevők között.

## 12.2 Abszolút módszer

Megvalósítottam úgy is a távolságmérést, hogy nem az elmozdulást mértem az előző ponthoz képest, hanem minden egyes vett impulzus esetén kiszámoltam a távolságot. Ehhez azonban arra volt szükség, hogy tudja a vevő, hogy mikor került kiadásra az ultrahang impulzus. Szükséges volt tehát egy szinkronizáció az adó és vevő között. Ez több módon is lehetséges, ahogy azt már korábban említettem, de most az egyszerűség kedvéért a rádiófrekvenciás szinkronizáló impulzust, egy vezetékes szinkronizációval szimuláltam. Mindkettő esetén ugyanis az ultrahang sebességéhez képest elhanyagolható gyorsasággal megérkezik a szinkronizáló jel a vevőhöz.

Úgy módosítottam az előző programot, hogy minden periódusban, amikor kiadom a vevővel az ultrahang jelet, ezzel egy időben kiadok egy másik impulzust is, csak ezt nem az adófejre, hanem egy olyan lábra irányítom, ami közvetlen összeköttetésben áll a vevő egyik lábával. Így amikor az adó kiad egy impulzust, a vevő rögtön tudni fogja, hogy el kell indítania egy számlálót, és várni mindaddig, amíg meg nem érkezik az ultrahang jel is. A vevőben két külön lábra tettem az impulzus kiadását jelző szinkronizáló jelet, illetve a detektált ultrahang jelet. Ennek függvényében a program az alábbiak szerint működik: Folyamatosan elkezd mintákat venni arról a lábról, ahonnan a szinkronizáló jelet várja. Annak elkerülése érdekében, hogy amikor elkezd mintát venni, éppen egy impulzus végét csípje el, először megvártam azt az időpillanatot, amikor éppen nincs bejövő jel. Ezután kezdtem várni a beérkező szinkronizáló impulzust. Így ahogy a referenciafeszültségnél magasabb értéket mértem, elindítottam egy 32 bites számlálót, hiszen ekkor került kiadásra az impulzus. Ekkor elkezdtem várni a másik lábon az ultrahang impulzus megérkezését. Ahogy egy küszöbértéknél nagyobb értéket mértem, az előzőekhez hasonló módon kiolvastam a számláló értékét. Kiszámoltam, hogy milyen összefüggés áll fenn a timer lépésközei és a valódi idő között. Ezt egy egyszerű oszcilloszkópos méréssel igazolni is tudtam. A megfelelő összefüggések használatával pedig meg tudtam mondani, hogy az adott helyről mennyi idő alatt érkezett meg az impulzus, tehát az

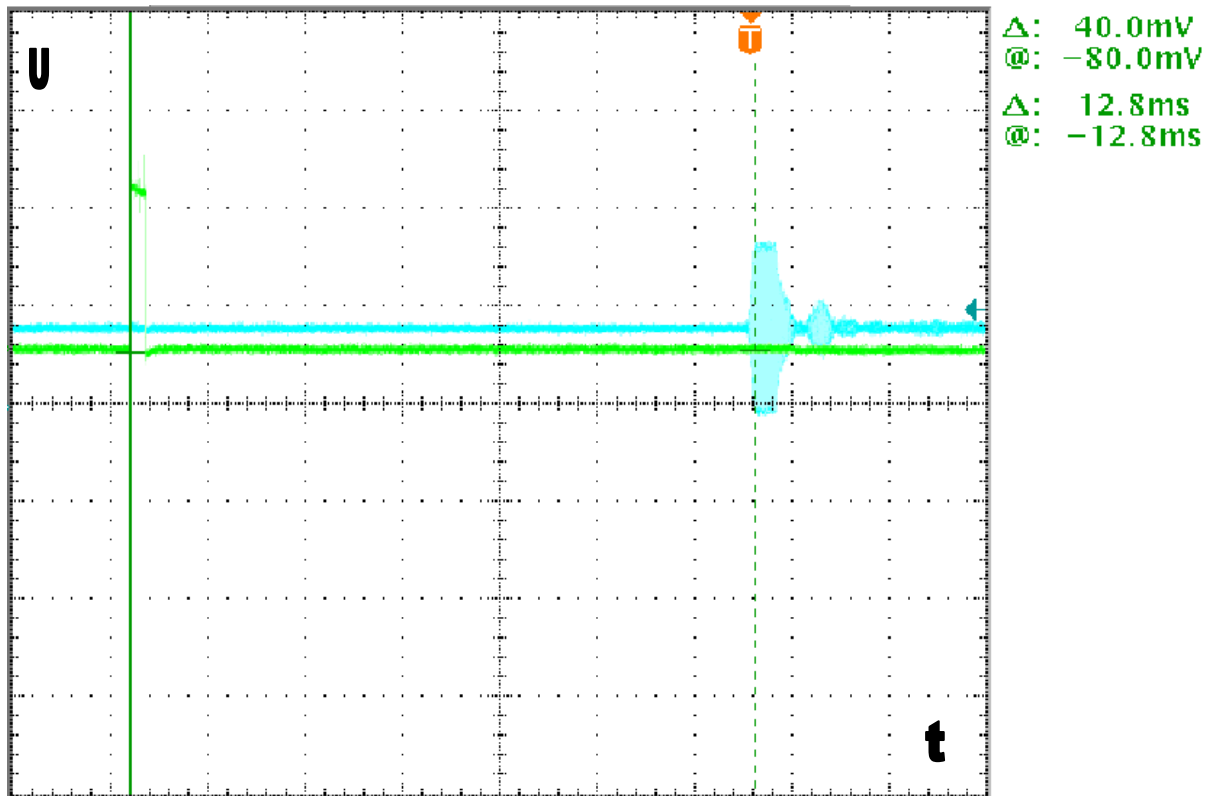
$$s = v * t \tag{e12}$$

összefüggést használva meg tudtam határozni a távolságot. Figyeltem arra, hogy két impulzus között megfelelő idő elteljen, tehát amikor a következő szinkronjel érkezik, az előző ultrahang impulzusból már ne legyen mérhető semmi. A szinkronizáló impulzus közel fénysebességgel tud haladni a vezetékben, így annak terjedési idejét nullának vettem jelen körülmények közt, és nagy felbontású oszcilloszkóppal sem tudtam kimutatni időkülönbséget annak kiadása és vétele között.

Tesztelve a szoftvert, arra a következtetésre jutottam, hogy milliméteres pontossággal meg tudtam állapítani a távolságot a két eszköz között. Oszcilloszkópon ellenőrizni tudtam a szoftver működésének pontosságát: Megjelenítettem egy csatornán a vett szinkronizáló impulzust és egy másik csatornán pedig a vett ultrahang impulzust. Nagy felbontást választva egy kurzor segítségével le tudtam mérni az időkülönbséget. Azt tapasztaltam, hogy teljesen pontosan működik a szoftver, mivel nem tudtam kimutatni semmilyen eltérést a mikrokontroller által mért adat és az oszcilloszkóp között. Fontosnak tartom azonban megjegyezni, hogy nem elhanyagolandó paraméter a hangsebesség értéke. Ahogy azt már korábban említettem, legnagyobb ingadozást jelen körülmények között a hőmérséklet változása okozhatja. Tehát ha nem megfelelően választom meg a hőmérsékletet, és ezáltal a hangsebesség értékét, eltéréseket fogok tapasztalni. Ha 20 °C-nak veszem a levegő hőmérsékletét, akkor 343.26 m/s-nak kell vennem a sebességet, míg 25 °C esetén 346.18 m/s-nak kell választanom. Ez a különbség már csupán öt méter távolság mérése esetén is körülbelül 4,1 cm hibát okozna, ami persze hőmérsékletkompenzációval javítható. Mérések során is azt tapasztaltam, hogy mindig oda kell figyelni a hőmérséklet pontos megválasztására.

Több mérést is végeztem a rendszer tesztelése céljából. A mért távolságadatokat soros porton keresztül jutattam el a vevő egységből egy számítógépre, ahol ezek a távolságadatok olvasható decimális formában, milliméteres felbontással könnyen értelmezhetőek voltak. Mivel a mérés felbontása, tehát a frissítési sebesség ~2/sec volt, ezért nem okozott gondot a mért adat soros porton való eljuttatása a számítógépre, hiszen annak kapacitása jóval meghaladja ezt az értéket. Egy egyszerű terminál felületen keresztül rögzíteni tudtam a mérési adatokat, hogy azok a mérés után is elérhetőek maradjanak. Több távolságból is végeztem mérést, az egészen közelitől, a távoliig. Mérés közben mindig figyeltem az oszcilloszkópot is ellenőrzés céljából. Az egészen távoli, ~6 méteres távolságban is ugyanolyan pontos eredményt tapasztaltam, mint a közelebbi mérések esetén: az oszcilloszkóphoz viszonyítva elhanyagolható mértékű eltérést tapasztaltam. A távolságot kézzel is lemértem, de ennek a mérésnek a pontossága nem olyan nagy felbontású, mintha az oszcilloszkópot nézném, hisz egy szobában csak mérőszalag segítségével tudtam ellenőrizni a tényleges távolságot. Elmondhatom tehát, hogy ezen mérések A-típusú, véletlen hibája minimális a hőmérsékletből adódó változásokat figyelembe véve. A 17. ábrán egy mérés eredménye látszik.





17. ábra Abszolút távolság mérése

Zöld színnel a szinkronizáló jel került megjelenítésre, míg kék színnel láthatjuk az azt 12,8ms-al követő ultrahang impulzust. Ha 343 m/s -nak vesszük a hang sebességét, akkor ez az idő 4390mm megtételére elegendő a hangnak. A szoftver 4392mm-t mutatott, ami elhanyagolható különbség.

### 12.3 A két módszer összehasonlítása

Ez utóbbi mérési módszer pontosabbnak bizonyult az azt megelőzőnél. Egy könnyen kiküszöbölhető, minimális nagyságú B-típusú [22] offset hibán kívül csak minimális nagyságú, 0.03%-os véletlen hibát tapasztaltam. Minden másodpercben két távolság meghatározása is történt, amelyek függetlenek voltak az azt megelőzőektől. Tehát egy esetleges hiba nem befolyásolta a későbbi mérések pontosságát. A szinkronizáló jel és a vett jel jól elkülönült egymástól, ahogy ez a 17. ábrán is látszik. Ennek következményeként könnyebb volt pontosan meghatározni a beérkezésük közt eltelt időt: a szoftver két külön csatornán kezelte a kétfajta jelet és ezáltal szoftveres úton is sokkal könnyebben

elkülöníthetők voltak. A pontosságon túl, előnyként beszélhetünk arról, hogy nem volt szükséges tudnunk a kezdeti távolságot: bármikor is kezdtünk távolságot mérni, mindig kaptunk egy pontos eredményt. Összességében elmondhatjuk, hogy abban az esetben, ha pontos információval rendelkezünk az ultrahang impulzus kiadásának, és annak detektálásának időpillanatáról, akkor nagyon pontos távolság-meghatározást tudunk végezni megfelelő eszközök esetén. Ez a módszer azonban felveti azt a problémát, hogy a kiadás időpillanata, amit csak az adó egység ismer, valamilyen módon el tudjon jutni a vevőhöz. Erre több megoldás is létezik. Ahogy az eddig elkészült távolságmérő rendszerek legtöbbje is teszi, valamilyen vezeték nélküli összeköttetés segítségével tudnánk szinkronizálni. Ugyanúgy, ahogy az általam is kipróbált esetben a szinkronizáló impulzus elhanyagolható idő alatt eljut a vevőhöz, így az már tudni fogja mind a kiadás, mind a vétel időpillanatát. Egy másik módszer, hogy megtudjuk a kiadás időpontját, hogy ultrahangos technológia segítségével eljuttatjuk a kiadás időpontját a vevőhöz. Ehhez arra van persze szükség, hogy tudjunk adatátvitelt csinálni két ultrahangos eszköz között.

Összehasonlítva a két fajta távolságmérés eredményét elmondhatjuk, hogy kisebb a véletlen hiba szinkronizáció esetén, de ennek ellenére az első módszer sem elvetendő, kielégítő eredményeket kaptam annak tesztelésekor is. Az adott előnyöket és hátrányokat figyelembe véve kell tehát döntenünk, hogy mikor melyik módszert használjuk.

## 13 Helymeghatározás

Ebben a fejezetben a már elkészült, távolságmérésre alkalmas rendszer segítségével helymeghatározási feladatot valósítok meg.

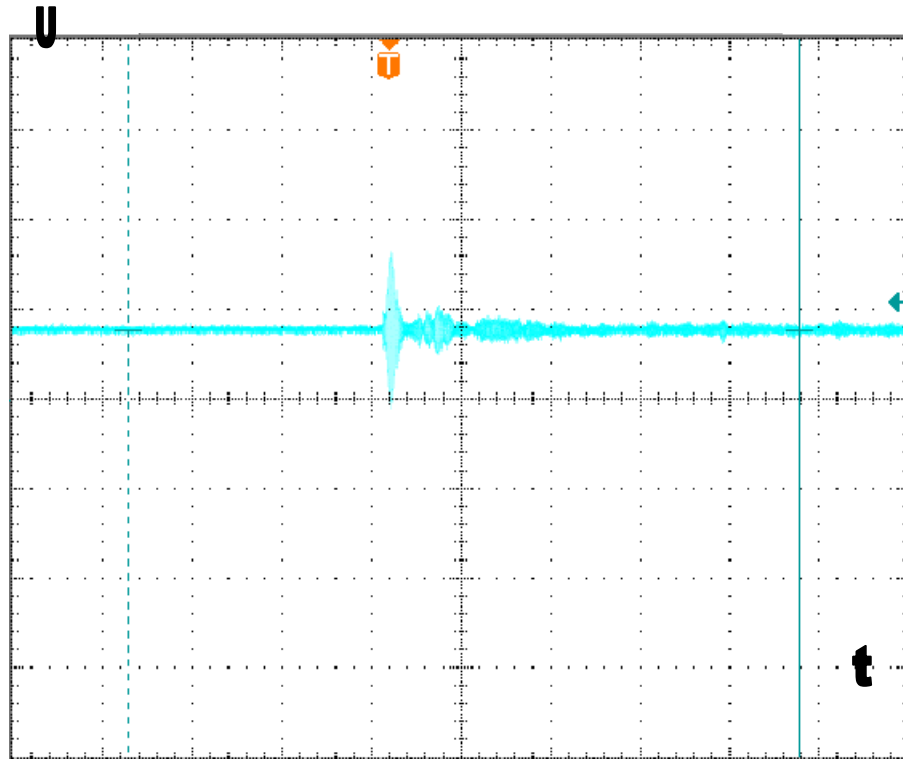
### 13.1 Áttekintés

Helymeghatározáshoz szükségünk van az vevők által szolgáltatott távolságadatokra. Ezeknek ismeretében, egy megfelelő algoritmus segítségével képesek leszünk helymeghatározást végezni. Tétélezzük most fel, hogy az adóegységgel ellátott objektum magasságát nem változtatja a mérés során. Ekkor minden vevő, amitől ismerjük a távolságát, meghatároz egy távolság sugarú kört, ami mentén kell hogy legyen az adóegység. Mivel a jelenlegi rendszer négy vevőegységet tartalmaz, ezért rendelkezni fogunk négy, ismert sugarú és ismert középpontú körrel. Ezeknek metszéspontja pedig meg fogja adni az adó pozíciójának koordinátáit. Abban az esetben viszont, ha a mért távolságok nem voltak pontosak, ezek a körök nem egy pontban fogják metszeni egymást. Lesznek olyan metszéspontok, amik a szoba falain túl esnének, ezeket a pontokat nem kell hogy figyelembe vegyük. Az így megmaradt metszéspontok pedig nem egy pontot, hanem területet, vagy területeket fognak meghatározni. Ekkor a legkisebb négyzetes hiba módszerének segítségével meg fogunk tudni határozni egy pontot, ami az adó feltételezett helye lesz.

### 13.2 Vevő egységek elhelyezése

Fontos szempont, hogy milyen irányba és hol legyenek elhelyezve a vevők. Ennek eldöntésére a következő mérést végeztem. Az adó egységet elhelyeztem egy fix helyre. A vevő egységet rákötöttem az oszcilloszkópra, majd elkezdtem vizsgálni, hogy különböző szögek esetén milyen vételi jelet tudok detektálni. Arra a meglepő eredményre jutottam, hogy amikor a vevő és az adó már 90 fokos szöget zárt be egymással, tehát az adó függőleges, a vevő pedig vízszintes irányba volt elhelyezve, igen jó vételi jelszintet mutatott az oszcilloszkóp. Ezt mutatja a 18. ábra. Abban az esetben, amikor már 180 fok volt az általuk bezárt szög, a vett jel amplitúdója a maximális értéknek több mint felére csökkent. Ez várható is volt, hisz ilyen nagy szögben nem várhatjuk el, hogy ugyanolyan vételi jelszintünk legyen. Azonban még ebben az esetben is, ha megfelelően állítjuk be a szoftverünket, kisebb távolságban ugyan, de tudunk távolságot meghatározni. De vegyük azt az esetet, hogy a vevőt a szoba egyik sarkába,

a talajjal 45 fokos szöget bezáró helyzetbe tesszük, az adót pedig a talajjal 90 fokos szögbe, tehát a plafon felé irányítjuk. Ekkor, a feltételezett szoba méreteit figyelembe véve, minden esetben egy, még az előzőeknél is jobb, állandó vételi szintet tudunk fenntartani. Ezen méréseket alapul véve, a vevők helyét nyugodtan választhatjuk a fallal 45 fokos szöget bezárva a szoba négy sarkába.



18. ábra Adó karakterisztikájának vizsgálata

### 13.3 Helymeghatározás tesztelése

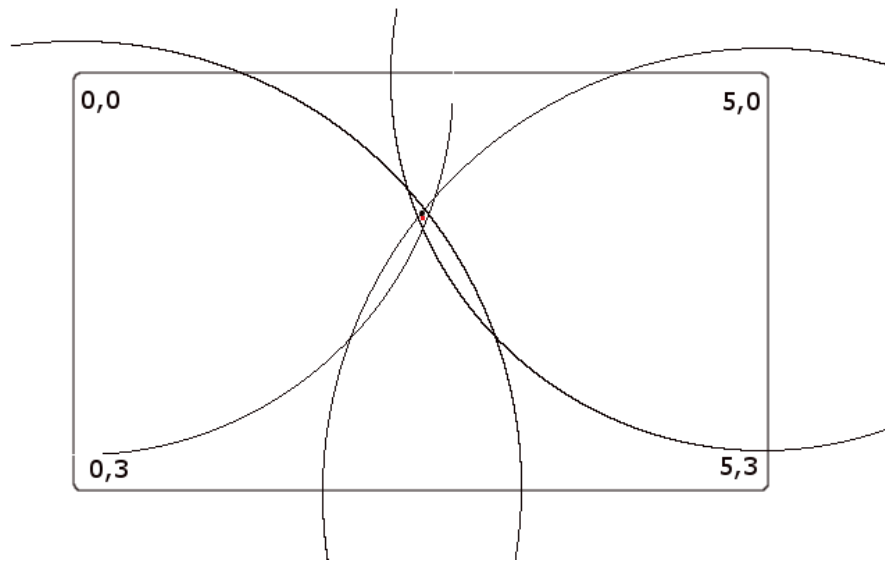
Annak igazolására, hogy az elkészített rendszer valóban alkalmas nemcsak távolság, hanem pozíció meghatározására is a következő mérést végeztem el többször. Az adó egységet elhelyeztem egy fix koordinátájú helyre valahol a szobában. Ezzel szimuláltam az adóval rendelkező objektum helyét, egy adott időpillanatban. Ezt követően a vevő egységet sorra, azokra a helyekre tettem, ahol a fixen elhelyezett vevők lennének.

Minden egyes helyen megmértem a köztük lévő távolságot az elkészített szoftver segítségével. Ezeket az eredményeket rögzítettem és a mérés végén ezek segítségével határoztam meg az adó helyét. Mivel az adó magasságát nem változtatja, ezért az ismert

távolság és a vevő talajtól mért távolsága alapján meghatároztam egy bizonyos sugarú kört, melynek mentén az adó található. Négy mérés után, négy körrel rendelkezem. Ismerve azoknak középpontjait, tehát a vevők koordinátáit, illetve a sugarukat, fel tudtam írni négy egyenletet (e13, e14, e15, e16). Ezek másodfokú egyenletek voltak, két ismeretlennel. Megkeresve ezeknek metszéspontjait, majd azok közül elhagyva azokat, melyeket nem kell figyelembe vennünk, kaptam egy területet. Ebből a területből pedig meghatároztam egy pontot, ami az adó feltételezett helyét mutatta.

Mivel a szinkronizálással végzett, abszolút távolságmérés pontosabb eredményeket adott, ezért a helymeghatározás alapjául szolgáló távolságokat ezzel a módszerrel határoztam meg. Az alábbiakban egy mérésen keresztül bemutatom a módszer lényegét.

Először a távolságadatokat összegyűjtöttem, majd felírtam a körök egyenletét.



19. ábra Távolság sugarú körök metszéspontja, valós és mért pozíciók

$$x^2 + y^2 = 2675^2 \quad (e13)$$

$$(x - 5000)^2 + y^2 = 2677^2 \quad (e14)$$

$$x^2 + (y - 3000)^2 = 3199^2 \quad (e15)$$

$$(x - 5000)^2 + (y - 3000)^2 = 3197^2 \quad (e16)$$

Az első két egyenletet megoldva (e13, e14) két metszéspontot is kaptam: (2498,9, -954,5), illetve (2498,9, 954,5). Az első metszéspont kívül esik a szoba területén, így egy pontunk marad.

A második két egyenletből (e15, e16), pedig a (2501.3, 1005.7) pont marad. Ezeken kívül kaptam még két értelmezhető metszéspontot az egyenletek megoldásából: (2486.3, 987), illetve (2513.2, 990,92).

Ebből az eredményekből is látható, hogy 1-2 milliméteres pontosságú, tehát ~0.03% relatív hibájú távolságmérések esetén 1-1,5 cm-es pontossággal, 0.25%-os relatív hibával tudunk helymeghatározást végezni. Ez az eredmény azonban kielégítő, a hasonló rendszerek pontosságát figyelembe véve. Míg az irodalomban megismert rendszerek legjobb esetben 3-4 cm-es pontosságot képesek elérni, az 1-1,5 cm-es pontosság teljesen kielégítő eredmény.

Több vevő esetén a vevőegységek közvetlen, vezetékes összeköttetésben állnának a központi egységgel, egy soros vonali kapcsolaton keresztül. Ott, egy megfelelő szoftver segítségével szinkronizálnánk a bejövő távolságokat. Ugyanezen szoftver egy már elkészült algoritmus segítségével meghatározza a metszéspontokat és ezekből pedig meghatároznánk az adó koordinátáit. Mivel az elvégzett mérések alapján elmondhattuk, hogy lehetséges helymeghatározás ezzel a módszerrel, így megfelelő szoftver segítségével a helymeghatározás is elvégezhető lenne a központi egységben.

## 14 Összefoglalás

Összességében elmondhatom, hogy sikerült megvalósítanom egy olyan rendszert, amely képes nagy pontosságú távolságmérésekre. Távolságot alapul véve lehetséges 1-1,5 centiméteres pontosságú helymeghatározás egy zárt helyiségben. A távolságmérést két lehetséges módszer szerint is megvalósítottam, e kettő közül az abszolút távolságmérésen alapuló módszer pontosabbnak bizonyult, ezért a helymeghatározás tesztlésekor ezt a távolságmérési módszert alkalmaztam. Az ezekhez szükséges hardver és szoftver eszközöket megvalósítottam, ezek a mérési eredményeket figyelembe véve megfelelőnek bizonyultak. A kítűzött feladatot tehát sikeresen elvégeztem. Megismertem a hasonló feladatot ellátó rendszerek felépítését, illetve azokat a tulajdonságokat, melyeket figyelembe kell venni egy ilyen rendszer tervezésekor. Ezek alapján megfogalmaztam egy specifikációt, melynek teljes mértékben sikerült megfelelnie az elkészült rendszernek, sőt a tervezett 5-8 centiméteres pontosság helyett, 1-1,5 centiméteres felbontású helymeghatározásra képes rendszert építettem, ami az eddig elkészült hasonló ultrahangos helymeghatározó rendszerekhez képest nagyon jó eredménynek számít.

## 15 Ötletek a továbbfejlesztéshez

A kitűzött feladatot sikerült megvalósítani, de ez nem jelenti azt, hogy nem lehetne további fejlesztéseket, pontosításokat adni a rendszerre. A továbbiakban tehát pár ötletet, javaslatot szeretnék adni, hogy az elkészült rendszerrel milyen irányba lehetne tovább dolgozni.

Elsőként talán a legkézenfekvőbb ötlet, hogy a távolságméréshez használt abszolút módszert olyan irányba fejlessük tovább, hogy ne legyen szükség semmilyenfajta összeköttetésre az adó és vevő egység között. Ennek ellenére a vevő egység ne csak a detektálás időpillanatát tudja, hanem ismerje a kiadás időpontját is. Ennek megoldásához a GPS adhat ötletet. Ott adott időközönként kiadásra kerül egy olyan jel, ami más információk mellett adatot hordoz az azt kiadó állomásról illetve a jel kiadásának időpontjáról. Ezek nem ultrahang jelek ugyan, de ugyanúgy hullám természetűek. Megfelelő algoritmus segítségével a kiadott jelbe kódolhatóak ezek az információk. Tehát ha az ultrahang impulzus hordozna információt annak kiadásáról, a vevő egységnek már rendelkezésre állna minden adat a távolság meghatározásához. Ennek elérése céljából tehát meg kell valósítani adatátvitelt két ultrahangos eszköz között, a megfelelő információ és kódelméleti eredmények használatával.

Egy másik ötlet, hogy használnánk egy olyan modellt, ami a megfelelő hullám-egyenletek felhasználásával leírja az ultrahang hullámokat illetve azoknak egymásra gyakorolt hatását egy adott környezetben. Így tudni fogjuk, hogy a mérésnek helyet adó terem különböző pontjain mekkora lesz a jelerősség, kalkulálva a tárgyról, és a falakról történő visszaverődésekkel. Ha tehát ennek a modellnek az eredményét figyelembe vennénk távolságméréskor, akkor a helymeghatározást pontosítani tudnánk, és olyan helyzetekben, amikor nagyobb mértékűek a zavaró hatások, mint például a többutas terjedés, tudnánk pontosabb távolságot mérni.

A harmadik kiindulópont a továbbfejlesztéshez az lenne, hogy a mérések során pontatlanabbnak bizonyuló, de szinkronizációt nem igénylő relatív távolságmérési módszert használnánk helymeghatározásra, de egy plusz lépést beiktatva. Ez pedig az lenne, hogy Kálmán-szűrő segítségével becsülnénk meg az adóval ellátott objektum helyét a mért távolságadatok felhasználásával, amely módszerrel pedig várhatóan csökkenthetnénk a relatív távolságmérésekből adódó pontatlanságot.

Ezen ötleteknél még jóval több irányba lehetne folytatni a munkát, de ezeket talán a legaktuálisabbnak a jelenlegi körülmények mellett, melyek megvalósítása esetén, egy robosztusabb, bizonyos esetekben még pontosabb rendszert kapnánk.



## 16 Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Tihanyi Attilának a feladat elkészítésében nyújtott mérhetetlen segítségéért, rendkívül értékes tanácsaiért és türelméért.

## 17 Források

- [1] A Simple Ultrasonic GPS System for Indoor Mobile Robot System using Kalman Filtering, International Joint Conference, Oct. 2006, pp.2915-2918
- [2] E.O. Dijk, K.V. Berkel, R.M. Aarts, E.V. Loenen, "Ultrasonic 3D Position Estimation Using a Single Base Station", Proc. EUSAI, 2003, pp.133-148.
- [3] Microchip Technology Inc., PIC24FJ256GB110 Family Data Sheet, 2009. ,  
[Online]. Elérhető: <http://www.microchip.com/>
- [4] E.D. Kaplan, Understanding GPS: Principles and Applications. Artech House, 1996.
- [5] Dijk, Esko O., Indoor Ultrasonic Position Estimation Using a Single Base Station, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2004.
- [6] Zimmerman, et al. "Experimental Development of an Indoor GPS Based sensing system for Robotic Applications", Navigation, winter 1996-1997, vol 43, No. 4, pp. 375-395.
- [7] Eric Dishmana, Maria C. Carrillob, Perspective on everyday technologies for Alzheimer's care: Research findings, directions, and challenges, Alzheimer's & Dementia 3 2007. pp. 227–234.
- [8] J.P. Rolland, Y. Baillot, A.A. Goon, A Survey of Tracking Technology for Virtual Environments, Barfield and Caudell, Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, 2001. Chapter 3.
- [9] Jan Dyre Bjercknes, et al., Low Cost Ultrasonic Positioning System for Mobile Robots, Bristol Robotics Laboratories, 2009.
- [10] Andy Ward, Alan Jones, Andy Hopper, A New Location Technique for the Active Office, IEEE Personal Communications, Vol. 4, No. 5, October 1997, pp. 42-47.
- [11] Nissanka B. Priyantha, et al., The Cricket location support system, Proceedings of the Sixth International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, Massachusetts, USA, August 2000.
- [12] Cliff Randell, Henk Muller, Low cost indoor positioning system, Proceedings of Ubicomp Ubiquitous Computing, Atlanta, Georgia, USA, September 2001., pp 42-48.
- [13] Saeed Shiry Ghidary et al., A new Home Robot Positioning System (HRPS) using IR switched multi ultrasonic sensors, Dept. of computer and systems engineering, Fac. of Engineering, Kobe University, 657-8501, Japan

- [14] Atomfizika tanszék, Hullámtani összefoglaló, egyetemi jegyzet, [Online].  
Elérhető: [http://www.fat.bme.hu/studentpub/Fizika%20K2A/interfer\\_bk.pdf](http://www.fat.bme.hu/studentpub/Fizika%20K2A/interfer_bk.pdf)
- [15] M.J. Crocker, Handbook of Acoustics, Wiley, 1998.
- [16] J. Allen and D. Berkley, Image method for efficiently simulating small-room acoustics, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 65(4), April 1979. pp. 943-950
- [17] Olympus, Fázisvezérlés leírás, [Online]. Elérhető:  
[www.olympusims.com/data/File/intro\\_pa/Intro\\_PA\\_Chap1.en.pdf](http://www.olympusims.com/data/File/intro_pa/Intro_PA_Chap1.en.pdf)
- [18] Christian Wolff, Phased array antennas, [Online]. Elérhető:  
<http://www.radartutorial.eu/06.antennas/an14.en.html>
- [19] Dr. Kónya László, PIC mikrovezérlők alkalmazástechnikája, ChipCad Elektronikai Kft. 2009.
- [20] Gurin Péter, Fizika jegyzet, [Online]. Elérhető: <http://info-bsc.netkey.hu/>
- [21] Vámos Sándor, Kommunikáció, [Online]. Elérhető: <http://ob121.com>
- [22] Les Kirkup, Bob Frenkel: An Introduction to uncertainty in measurement using the GUM  
Cambridge University Press, Cambridge, UK 2006, pp 233