

# **Rádióhullámok terjedési sebességének direkt mérése**

**Dombi András**

Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar, Számítógépes Fizika szak, M1 évfolyam

Témavezetők:

**Dr. Néda Zoltán** egyetemi tanár

Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Elméleti fizika tanszék

**Dr. Tunyagi Artúr** posztdoktori kutató

Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar

XIII. Erdélyi Tudományos Diákköri Konferencia

Kolozsvár, 2010. május 14-16.

## **Kivonat**

Az elektromágneses hullámok terjedési sebessége légüres térben a fizika egyik legalapvetőbb állandója. Ezen értéknek a vonatkoztatási rendszerétől való függetlensége képezi a modern relativitáselmélet alapját. A rádióhullámok levegőben való nagy terjedési sebessége következtében ( $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m / s}$ ) és a detektáló, illetve kibocsátó berendezések viszonylag nagy reakcióideje miatt direkt módszerekkel ez az állandó nagyon nehezen mérhető. A manapság nagyon elterjedt és olcsó deciméteres hullámhosszú adó-vevő integrált chippek, amelyek a 439.75 ~ 929.27 MHz frekvenciatartományban (0.68 ~ 0.32 m -es hullámhossz) képesek adat küldésére és detektálásra, kiváló lehetőséget biztosítanak erre. A módszerünkkel tehát ezen rádióhullámok terjedési sebességét fogjuk mérni. A jelen dolgozatban egy általunk épített berendezést mutatok be, melynek segítségével lehetővé válik a rádióhullámok sebességének direkt megbecsülése. A módszer egyszerű: két adó-vevő berendezés közti kommunikációs idő precíz méréséből számítjuk ki a keresett értéket.

## Tartalomjegyzék

1. Bevezető.....	3
1.1 Ötlet.....	6
2. Adó-vevők .....	7
2.1 Az adó-vevő berendezés leírása.....	9
2.2 Mérések.....	10
2.3 Adatok feldolgozása.....	12
2.4 Eredmények .....	16
3. Következtetések .....	16
4. Szakirodalom .....	17

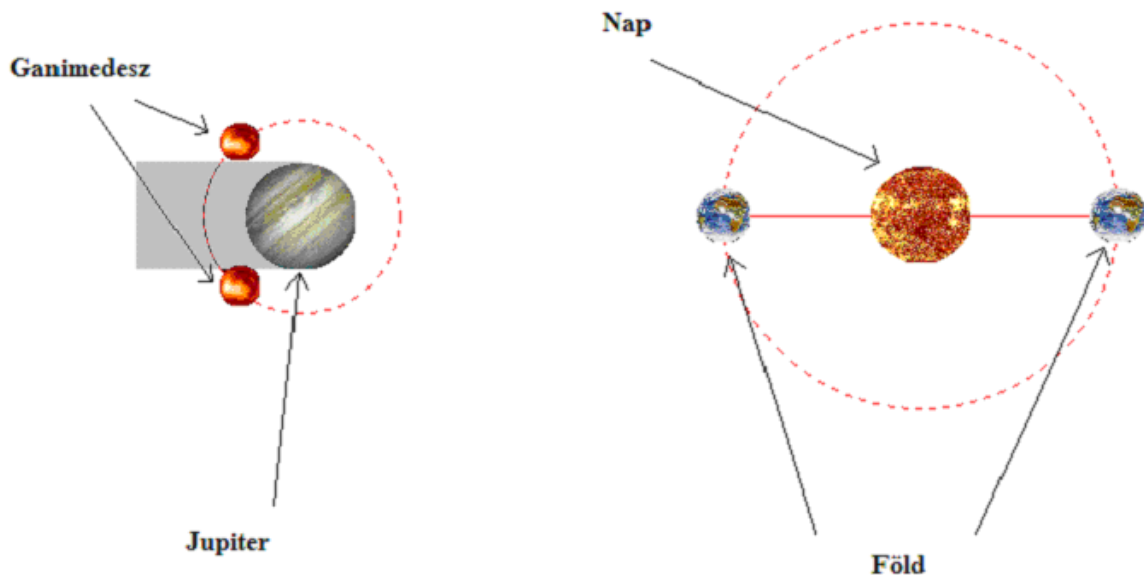
## 1. Bevezető

A fény terjedésének a megértése, illetve terjedési sebességének a mérése egy nagyon régi tudományos probléma. A fény sokféle anyagban terjed, és anyagtól függően a sebessége is különböző lehet. A fény légüres térben való terjedési sebessége viszont kitüntetett jelentőséggel bír. Ez nyilvánvalóvá válik a fizika több területén is, mint például a speciális relativitáselmélet keretein belül, ahol ennek értéke meghatározza a különböző tehetetlenségi vonatkoztatási rendszerekben mért koordináták közti kapcsolatot. Einstein speciális relativitáselmélete értelmében minden megfigyelőnek, minden körülmény közt a vákuumban terjedő fény sebességére ugyanazt az értéket kell kapnia, függetlenül a saját sebességétől. A fénysebesség tehát egy univerzális állandó [1], amely a fénysugarak levegőben való nagy terjedési sebességének következtében ( $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s) és a detektáló, illetve kibocsátó berendezések relatív lassú reakcióideje miatt direkt módszerekkel nagyon nehezen mérhető. A fénysebesség direkt módon való mérésével sajnos még egyetemen sem találkozunk, általában csak elhisszük, hogy a fény úgy terjed, és olyan gyorsan, ahogyan azt nekünk elmondják. Líceumi szinten pedig végképp szóba sem jöhet egy fénysebesség-mérési kísérlet. Ezen mennyiség mérése azonban lényeges ahhoz, hogy úgymond tapasztaljuk, és ne csak elhiggyük a fénysebesség nagy értékét [2]. Ezen okok miatt szerettünk volna egy olyan kísérletet tervezni, melynek keretein belül érzékeltetni és tapasztalni lehet a fénysebesség számbeli értékét, és ezt egy egyszerű berendezés és módszer segítségével akartuk megoldani. A jelen dolgozat keretében a mérésekre használt berendezést, a mérési módszerünket és a mérési eredményeket mutatom be. Fontos azonban már az elején hangsúlyozni, hogy itt nem egy olyan új módszert akarunk adni, amivel pontosabban vagy jobban lehet fénysebességet mérni, mint a már létező modern kísérletekkel, hanem egy egyszerű, könnyen megérthető és didaktikai szempontból hasznos módszert mutatunk be. Reméljük, hogy a módszerünk lényege középiskolás szinten is megérthető, és megismételhető akár líceumi laborokban is.

A történelem során több elképzelés is született a fény terjedésének mikéntjéről. Míg az ókori görög filozófusok szerint a fény pillanatszerűen terjed, vagyis egy tetszőleges távolság megtételéhez nincs szüksége a fénynek időre, addig a XVII. század

körül már kezdett teret hódítani az a nézet, miszerint a fény vákuumban való terjedési sebessége egy véges érték [3]. Az első feljegyzett fénysebesség-mérési kísérletet Galileo Galilei végezte. Segédjét egy közeli dombra küldte egy letakart lámpással. Amikor Galilei jelt adott a segédjének egy másik lámpással, annak viszonznia kellett a jeladást. A kísérlet eredményeként helyesen azt a következtetést vont le, hogy a fény terjedési ideje a két domb között jóval rövidebb az emberi reakcióidőnél.

Az első sikeres fénysebesség-meghatározás Olaf Röemer csillagász nevéhez fűződik, aki a Jupiter Ganimedesz holdjának fedési idejéről végzett megfigyeléseket. Mivel a Föld, a Jupiter és a Ganimedesz közelítőleg egy síkban keringenek, megtehetjük, hogy méréseinket abban a pillanatban kezdjük, amikor a Föld éppen a Jupiter és a Nap között van. A Ganimedesz kb. 7.155 nap eltelte után rendszeresen a Jupiter árnyékába lép. 25 egymást követő árnyékba lépés után lesz a Föld-Jupiter távolság maximális. Röemer elvárásai alapján a 26. árnyékba lépésnek  $25 \cdot 7.1115$  nap után kellett bekövetkeznie. Azonban a megfigyelései alapján 1200 másodpercnyi késést vett észre. Ezt helyesen a fény véges terjedési sebességének tulajdonította, és számításai szerint  $2.4 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  értéket kapott.



*1. ábra. Röemer kísérletének grafikus vázolata*

Földi körülmények között először Arman Fizau francia fizikus határozta meg a fény sebességét. Ő egy gyorsan forgó fogaskereket és egy tükörrendszert alkalmazott, és pontosabb eredményt kapott. Kísérlete alapján a fénysebesség  $3.14 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  [4].

A fénysebesség modern meghatározási módszerei kivétel nélkül indirekt módszerekre épülnek. Ezek a fény elektromágneseshullám-természetét használják fel. Az alábbi táblázatban megtalálhatjuk az elmúlt évezred fontosabb fénysebesség-mérési kísérleteinek eredményeit.

Évszám	Kísérletet végezte	Kísérleti módszer	Eredmény ( $10^8 \text{ m/s}$ )	Relatív hiba (%)
1600	Galileo	Lámpások	"Gyors"	
1676	Röemer	Jupiter holdja	2.14	28
1729	Bradley	Fényaberráció	3.08	2.70
1849	Fizeau	Fogaskerék	3.14	4.70
1879	Michelson	Forgó tükrök	2.9991	$400 \cdot 10^{-6}$
1879	Michelson	Forgó tükrök	2.99798	$18 \cdot 10^{-6}$
1950	Essen	Mikrohullámok	2.997925	$0.1 \cdot 10^{-6}$
1958	Froome	Interferométer	2.997925	$0.1 \cdot 10^{-6}$
1972	Evenson et al.	Lézer	2.997924574	$2 \cdot 10^{-9}$
1974	Blaney et. al	Lézer	2.99792459	$2 \cdot 10^{-9}$
1976	Woods et al.	Lézer	2.997924588	$3 \cdot 10^{-9}$

*1. táblázat. A fény terjedési sebességének az értékei, különböző kísérleteknél*

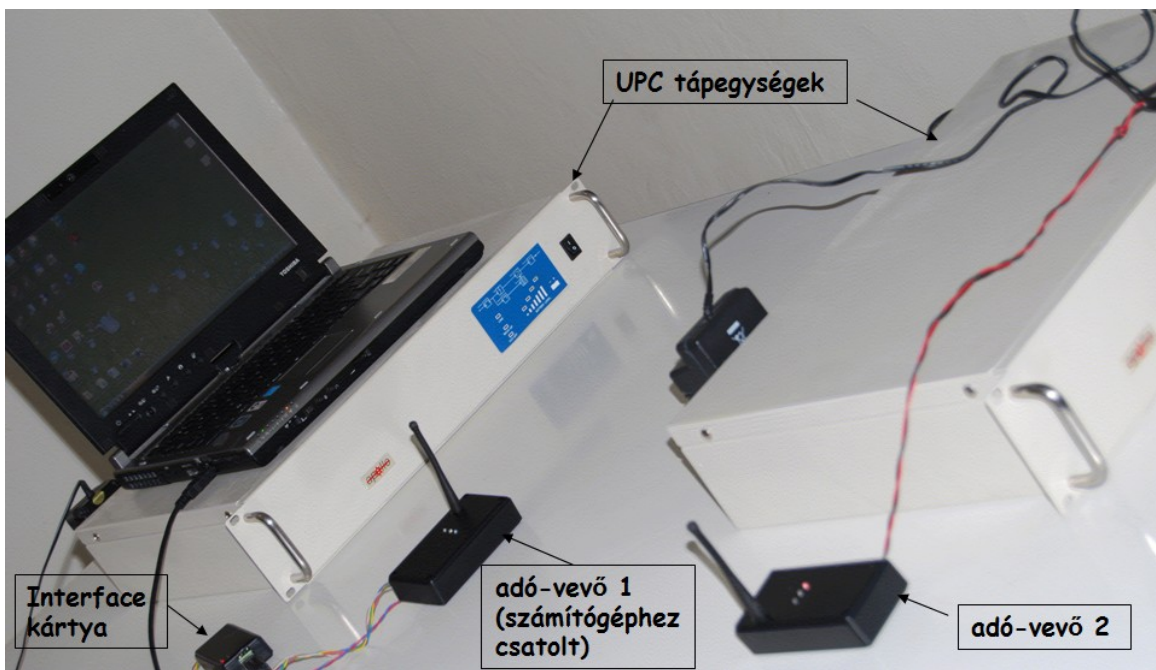
## 1.1 Ötlet

Fénysugarakkal dolgozni, ezeket nagy távolságra küldeni és ott detektálni nagyon bonyolult berendezéseket és körültekintő beállításokat igényel. Ismert tény azonban, hogy a fénysugarak elektromágneses hullámok, és minden elektromágneses hullám terjedési sebessége legüres térben ugyanaz a  $c$  állandó érték. Fénysugarak helyett

dolgozhatunk tehát könnyebben kezelhető más elektromágneses hullámokkal, például rádióhullámokkal. A manapság nagyon elterjedt és olcsó deciméteres hullámhosszú adó-vevő integrált chippek, amelyek a 439.75 ~ 929.27 MHz frekvenciatartományban (0.68 ~ 0.32 m-es hullámhossz) képesek adat küldésére és detektálásra, kiváló lehetőséget biztosítanak erre. A módszerünkkel tehát ezen rádióhullámok terjedési sebességét fogjuk mérni. Földi körülmények között légüres térben nem mérhetünk, ezért a levegőben való terjedési sebességet fogjuk meghatározni. Ez azonban nagyságrendileg nagyon jól megközelíti a légüres térbeli terjedési sebességet, és az ettől való különbség a méréseink hibahatárain belül van [5].

## 2. Adó-vevő készülék

Mérési berendezésünk fontos elemei a két Adó-Vevő (AV), amelyek közül az egyik egy számítógép USB-portjára van csatlakoztatva adapteren keresztül. Az AV-k fényképe a 2. ábrán látható.



*2. ábra. A méréshez használt két adó-vevő, ezeknek tápegységei illetve a notebook számítógéphez való csatlakozás.*

Mindkét AV működéséhez 12 V-os egyenáramú feszültségforrásra van szükség. Az

általunk épített AV berendezés egy-egy byte nagyságú adatsomag elküldésére, illetve ezen adatsomag detektálására képes. Másodpercenként 30-40 adatsomagot tudnak küldeni, illetve detektálni. A számítógéphez csatlakoztatott AV (jelöljük a továbbiakban ezt AV1-el) adatokat küld a másiknak (AV2). Amint AV2 ezt a jelet detektálja, válaszol AV1-nek. Ha AV1 választ kap az általa küldött jelre, a válaszig eltelt időt  $1/8 \mu s$  pontossággal meghatározza, és a mért értéket az adapteren keresztül a számítógépnek továbbítja, ami lementi ennek értékét [6]. Ha AV1 nem kap választ az általa küldött jelre, egy újabb adatsomagot küld. Az AV1 és AV2 segítségével tehát elvileg meg tudjuk mérni a kommunikálásra használt elektromágneses hullámok terjedési sebességét, ha ismerjük az AV1 és AV2 közti távolságot. A probléma azonban több okból kifolyólag nem ennyire egyszerű:

1. Az AV-k kis teljesítményűek, és maximálisan 2 km távolságon képesek kommunikálni egymással. A méréseket tehát aránylag kis távolságokon kell elvégezni, ezeken a távolságokon viszont az elektromágneses hullámok nagyon rövid (mikroszekundum nagyságrendű) idő alatt jutnak el az AV1-től az AV2-ig és vissza. Az  $1/8 \mu s$  időfelbontásunk éppen hogy elégséges a mérés elvégzéséhez. Jobb mérési eredmény érdekében nagyszámú átfutási időt fogunk mérni. Az AV-k egy adott helyzeténél kb. 10 percig gyűjtjük az átfutási idők értékét. Ez azt jelenti, hogy kb. 30 000 mérési eredményt tudunk majd feldolgozni egy adott távolság esetén.

2. Az általunk használt rádióhullámok hullámhossza aránylag kicsi, ezért a visszaverődési effektusok lényegesek lehetnek. Ennek elkerülése végett nyílt terepen kell mérnünk, ott viszont általában nem áll rendelkezésünkre elektromos hálózat az AV-k és a számítógép működtetéséhez. A megoldás az, hogy két feltöltött hálózati számítógép akkumulátort (UPS) viszünk magunkkal a kiválasztott mérési helyre. Számítógépnek meg hordozható notebook számítógépet használunk, amely saját akkumulátorral rendelkezik.

3. Mivel nyílt terepen mérünk, és az AV-k közti távolság *km* nagyságú lehet, problémát okoz ezen távolság pontos meghatározása is. Az AV-k közti távolság mérése a legegyszerűbben úgy lehetséges, hogy a manapság könnyen beszerezhető GPS helymeghatározó segítségével rögzítjük az AV1 és AV2 pontos koordinátáit, majd a koordináták ismeretében a Google Earth ingyenes program segítségével meghatározzuk a két földrajzi pont közti távolságot. Kis távolságok esetén (10-50m) a távolságot egy



mérőszalag segítségével direkt módon mérjük.

4. A legnagyobb probléma azonban abból adódik, hogy az AV-k közti kommunikációs idő nagy része nem az elektromágneses hullámok véges terjedési sebességéből származik, hanem az AV-n levő késésekből. Az AV-n az adatok kibocsátásához, illetve detektálásához szükséges idők nagyságrendekkel nagyobbak, mint a jel átfutásához szükséges idő. Egy adott távolságon való egyszerű mérésre tehát semmi reményünk nincs, marad a relatív mérések lehetősége. A relatív mérés azt takarja, hogy különböző távolságokon végezzük el a mérést, és az átfutási idők különbségeit tekintjük. Feltételezve, hogy a berendezéseinken levő késés átlaga minden távolság esetén ugyanaz, a jel átlagos átfutási értékeiből adódó különbségek a rádióhullámok véges terjedési sebességéből származnak.

## **2.1 Az adó-vevő berendezés leírása**

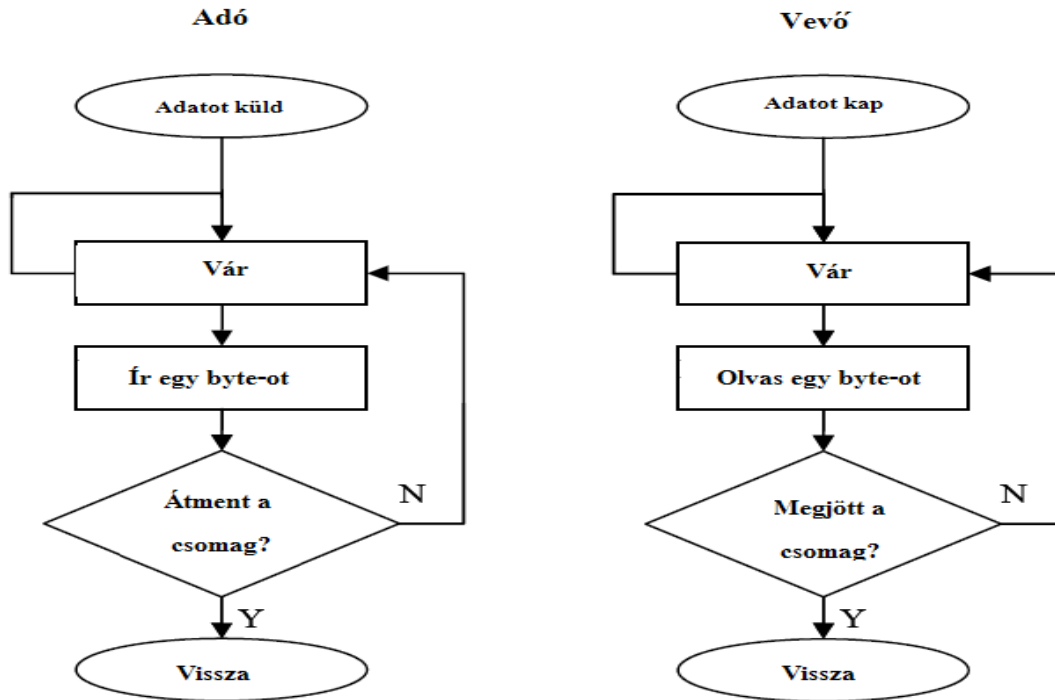
Az AV-k legfontosabb része az RFM12BP kódszámú integrált áramkör, melyet a HOPE Microelectronics cég gyárt. Ez mind adatküldésre, mind adatrögzítésre alkalmas, így az AV1 és az AV2-ben is ugyanez található.

Az RFM12BP egy olcsó ISM (industrial, scientific and medical) hullámhosszon működő adó-vevőként működtethető integrált áramkör. Három, jól megkülönböztethető hullámhosszon lehet működtetni, ezek a következők : 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz. Könnyen alkalmazható távirányításra, vezeték nélküli jeladásra és jelrögzítésre, illetve adatgyűjtésre [7].

A működési módot, vagyis azt, hogy melyik az adó és melyik a vevő, az áramkörön található mikrokontroller állapota határozza meg. A mikrokontroller beállításai alapján egyik AV master állapotban működik, míg a másik AV slave állapotban. Így a két AV master/slave kapcsolatban lesz egymással, ami azt jelenti, hogy az AV1, mely az adatokat küldi, a master szerepét fogja betölteni, míg az AV2, mely visszajelez minden kapott adatra, slave-ként működik.

Az AV-k egy C++ program segítségével működnek. Az AV1 adatot küld, és elindítja az órát. Ha az AV1 által elküldött adat megérkezik az AV2-höz, az válaszol egy 1 byte nagyságú adatcsomaggal. Amikor a visszajelzés elér az AV1-hez, az megállítja az

órát, kiírja az eltelt idő értékét egy file-ba, és újra adatot küld, újraindítva az órát is.

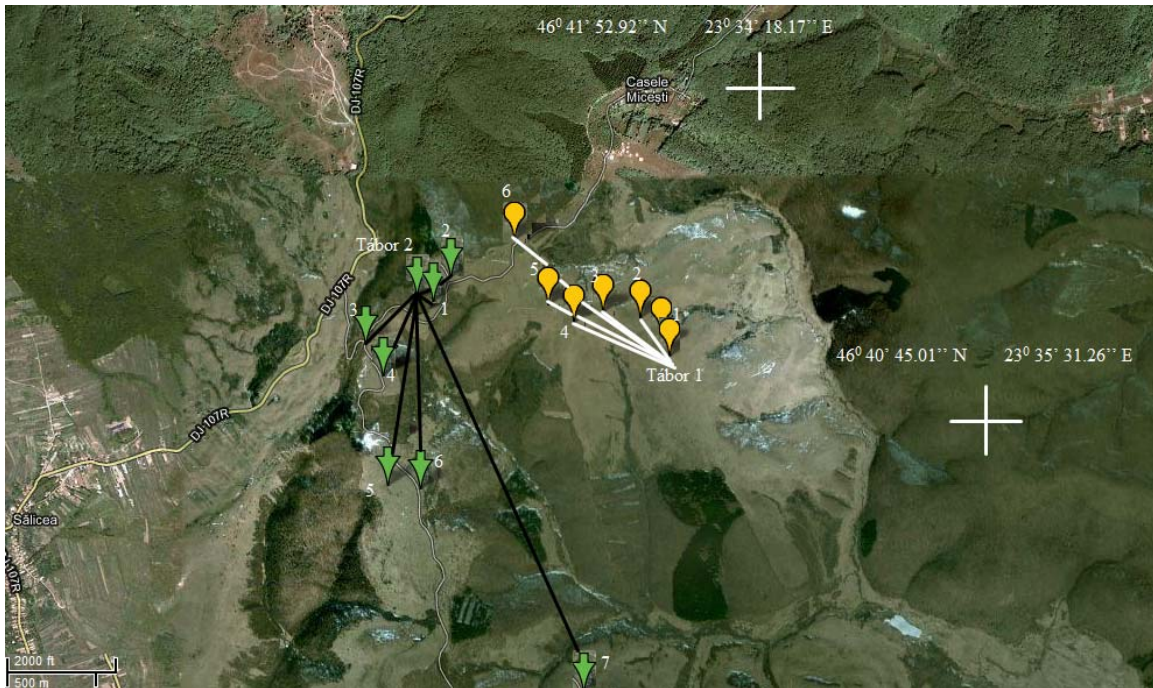


3. ábra. Adó-vevő elvi működése

## 2.2 Mérések

Méréseinknek megfelelő terepet a Kolozsvár közelében levő Bükk-erdő szélén és az Árpád-csúcs környékén levő nyílt legelő (mező) biztosított. Két különböző alkalommal mértünk ott, más-más pontok között. Mindkét alkalommal kiválasztottunk egy helyszínt a tábornak, amelytől látótávolságon belül, de aránylag messzire el lehetett jutni autóval. Minden helyszínen GPS segítségével rögzítettük a koordinátákat és a tengerszint feletti magasságot, az AV-k közti távolságot ezek segítségével utólag számoltuk ki. Egy helyen 5-6 alkalommal is leírtuk a koordinátákat, majd ezekből átlagokat számolva állapítottuk meg a pontos helyszínt. A két alkalommal használt mérési pontokat a 2. ábrán, a Google Earth képen szemléltetjük. A tábornál maradt az első adó-vevő (AV1), egy tápláló UPS-el és az adatrögzítéshez használt számítógép. Az AV2-t és a táplálásához szükséges adóvevőt autóval hordoztuk különböző távolságokra. A táborban és az autóban levő két csapat közti kommunikáció mobiltelefonokkal történt. A kiválasztott távolságokon kb. 15 percig kommunikáltunk az AV-eket, és gyűjtöttük az

átfutási időik értékeit.



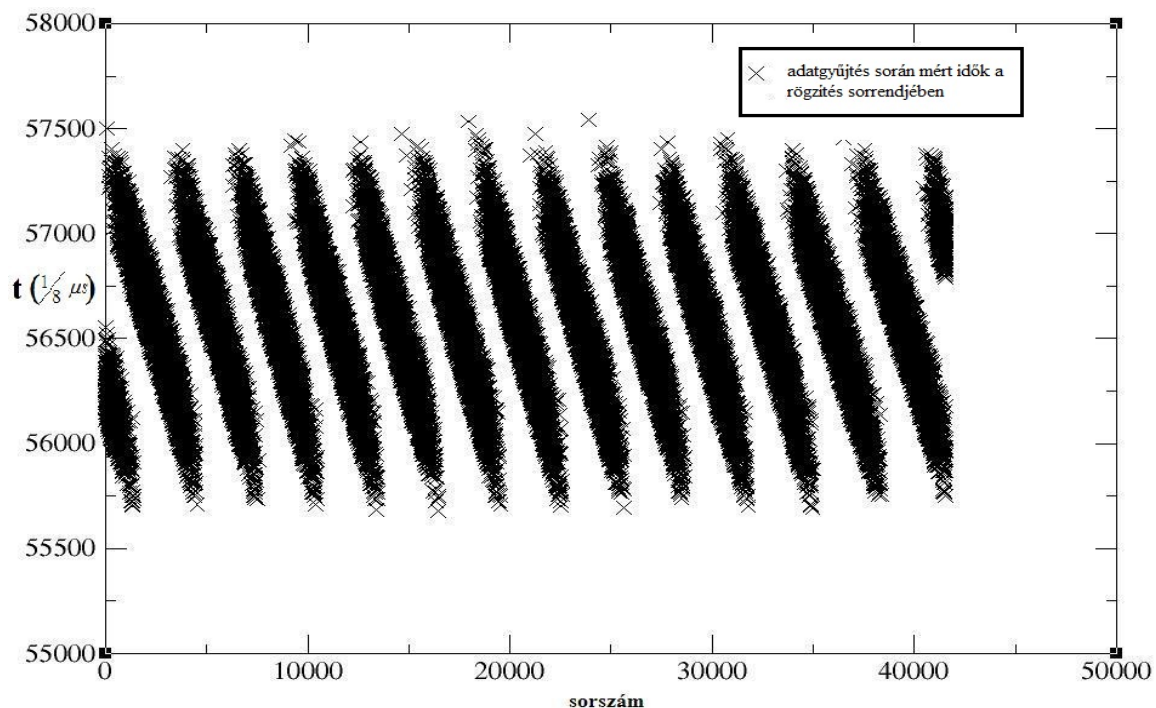
**4. ábra.** Google Earth térkép a méréseink helyszíneiről, zölddel az első mérés, sárgával a második mérés pontjait ábrázoltuk. Vonallal az adó-vevők közti légvonalban levő utat jelöltük.



**5. ábra.** Az AV-k mérés közben

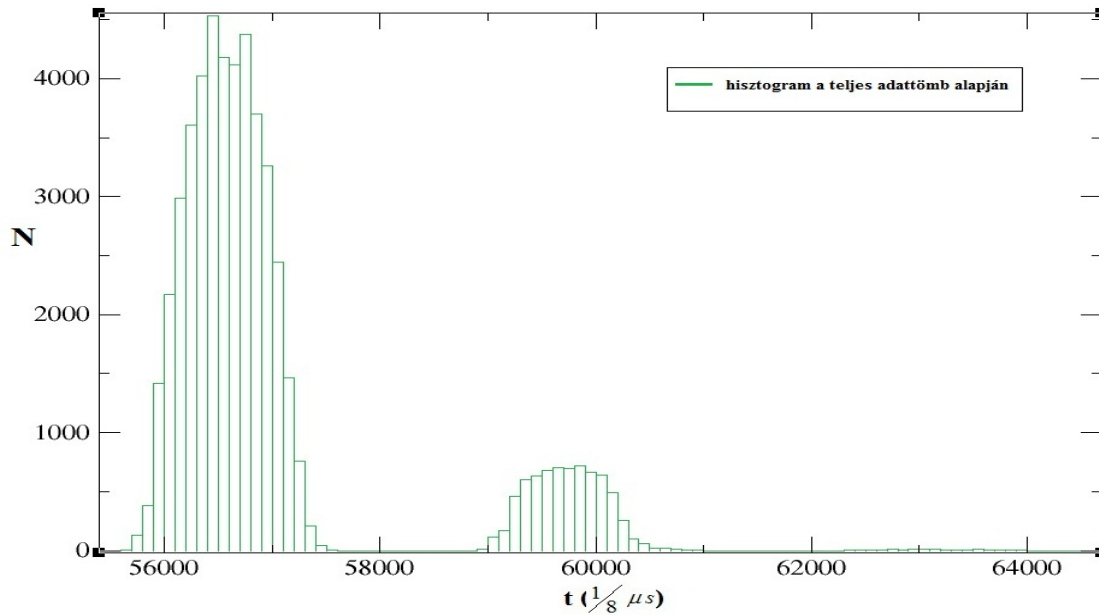
## 2.3 Adatok feldolgozása

A mérési adatok ábrázolásánál (6. ábra), két érdekességet lehet észrevenni. Egy periodicitás figyelhető meg a rögzített adatainkban, mely annak köszönhető, hogy mindkét adó-vevő készülékben van egy-egy kvarckristály, melyek fáziseltolódásban vannak egymáshoz képest, ezért a kettő egyidejű működése egy lebegés-szerű viselkedést eredményez.



**6. ábra** Az adatok rögzítése során fellépő periodicitás

A második megfigyelés az, hogy ha az átfutási időkből hisztogramot készítünk (7. ábra), látható, hogy három jól elkülöníthető csúcsunk van. Ezek a csúcsok azért jelennek meg, mert előfordulhat, hogy egy adatsomag elveszik, az időmérő óra nem indítódik újra a következő adatküldéskor, így az idő rögzítésél helytelen adat tárolódik. A második csúcs egy elveszett adat miatt, míg a harmadik csúcs két egymás után elveszett adat miatt jelenik meg. Könnyen kiszűrhetők a helytelen értékek azzal, hogy az  $58000 \cdot 1/8 \mu s$  -nál nagyobb értékeket elhagyjuk.

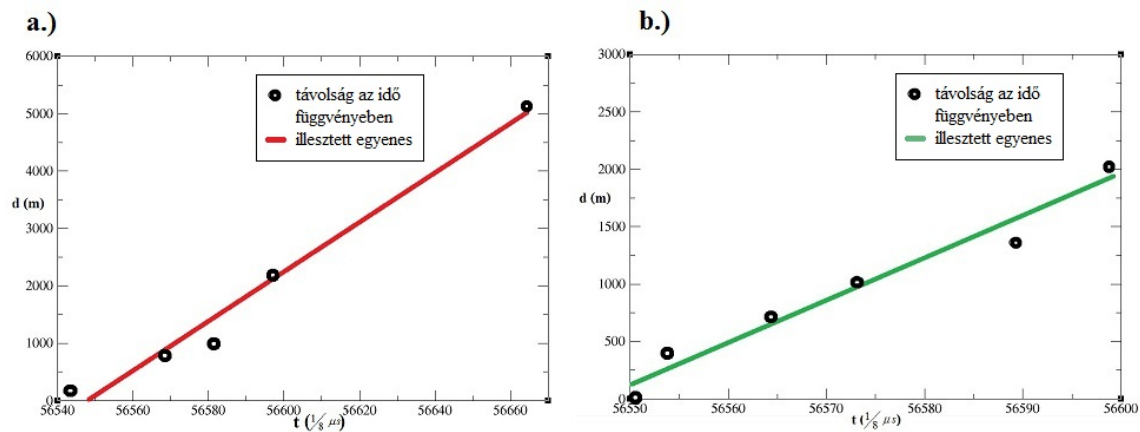


7. ábra Átfutási idők eloszlása egy teljes adattömbre

Az adatok feldolgozása három különböző módszerrel történt.

### Első módszer

A mérési eredmények feldolgozására a legegyszerűbb módszer az, hogy a különböző távolságokon mért adatokra egyszerű átlagot számolunk, így minden mérési távolságnak megfelel majd egy átlagos átfutási idő. A 3. ábrán ezen átlagidők függvényében az AV-közi távolságokat ábráztuk az első, illetve a második alkalommal végzett mérés esetén.



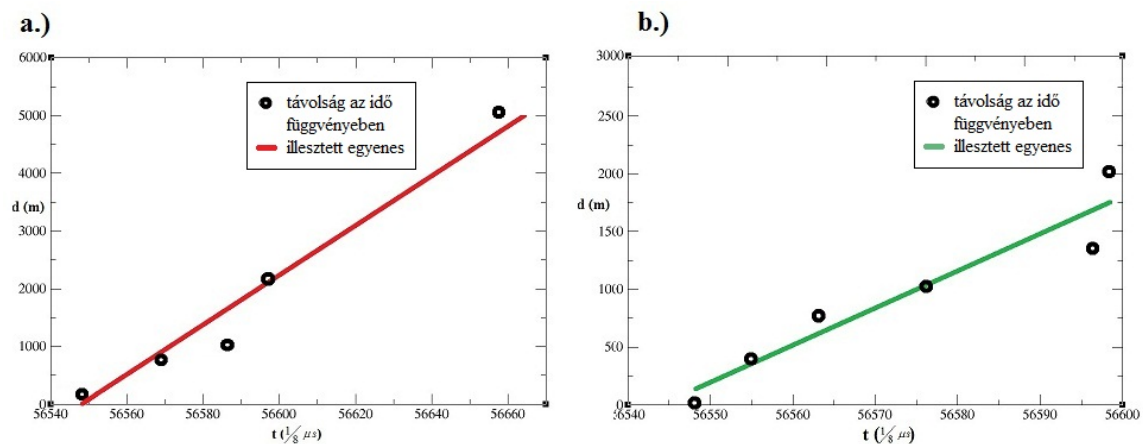
8. ábra. Mérési eredmények (adó-vevők közti távolság az átlagos átfutási idő függvényében, az első módszerrel) az első (a) és a második (b) mérése esetén.



A mérési pontokra mindkét esetben egyenest illesztünk, és ezen egyenes meredeksége megadja a keresett elektromágneses hullámok terjedési sebességét. Az illesztés során az (a) mérés esetén  $c_1 = 2.63 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , a (b) mérés esetén meg  $c_2 = 3.18 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  sebességet kaptunk. Ezeknek átlagát véve  $c = 2.905 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  érték adódik, ami 3%-nál kisebb relatív eltéréssel egyezik a légüres térben való terjedési sebesség elfogadott értékével.

### Második módszer

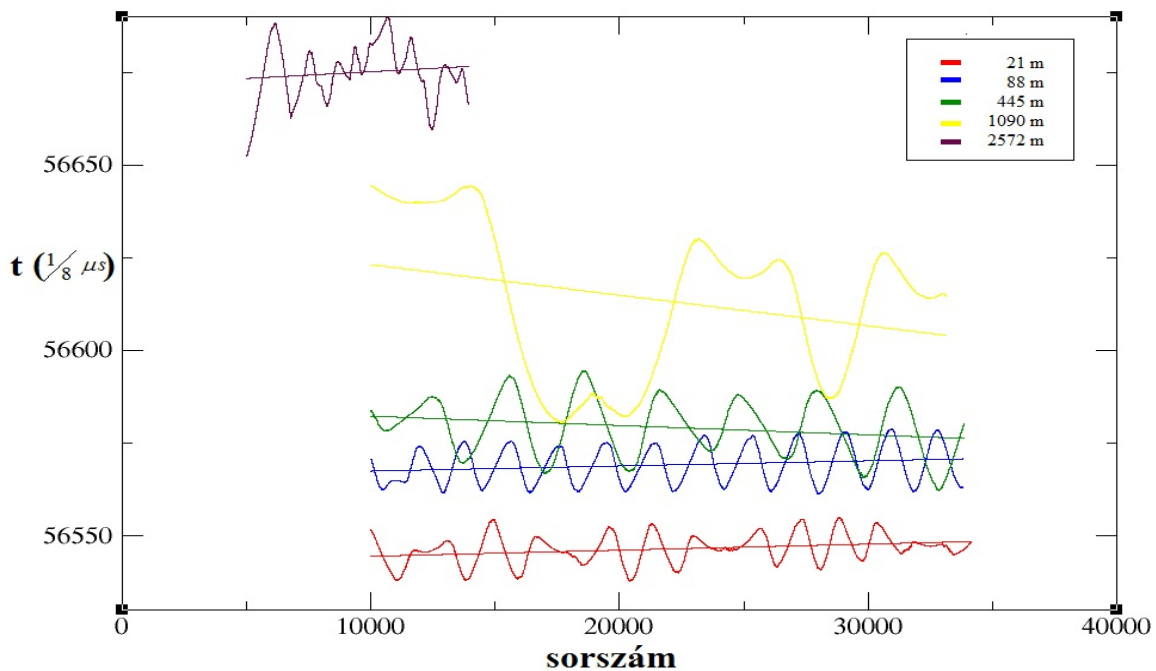
Ahogy az 6. ábrán is látható, nincs meg minden periódusunk teljes egészében. Az első periódusnak az eleje, az utolsónak meg a vége hiányzik. Ez elrontja az első módszernél alkalmazott átlagszámításunkat, és erősen befolyásolhatja a kapott átlagértékeket. Egy precízebb módszert kapunk, ha megszabadulunk a nem egész periódusoktól. Egyszerűen elhagyjuk tehát az adatsomagok elejét az első maximumig, és az adatsomag végét az utolsó minimumtól, és újra átlagot számolunk a megmaradt értékekre. Átlagszámítás után ábrázoljuk ebben az esetben is a kapott értékeket a távolságok függvényében. A mérési pontokra mindkét esetben egyenest illesztünk, és ezen egyenes meredeksége megadja a keresett elektromágneses hullámok terjedési sebességét.



**9. ábra.** Mérési eredmények (adó-vevők közti távolság az átlagos átfutási idő függvényében, a második módszerrel) az első (a) és a második (b) mérésünk alkalmával.

### Harmadik módszer:

Ennél a módszernél szintén átlagszámítást végzünk, de nem a teljes adattömbre. Egy 20000-es időablakkal végigmegyünk az adatainkon, és minden lépésben átlagot számolunk az ideiglenesen az ablakban lévő 20000 értékre. Minden mérési távolságra külön rögzítjük ezeket az átlagokat, majd ábrázoljuk őket. Ezután egyenként minden ábrához illesztünk egy egyenest, majd ezen egyenesek középpontjában található értékeket rögzítjük a neki megfelelő távolság függvényében. Ezután, akárcsak az előző módszernél, itt is a mérési távolságot ábrázoljuk az átlagos átfutási idő függvényében, majd a mérési pontokra egyenest illesztünk, és ezen egyenes meredeksége megadja a keresett elektromágneses hullámok terjedési sebességét.



*10. ábra. Egyenes illesztés a 20000-es ablak után kapott átlagolt adatokra ( második szabadtéri mérés)*

A 10. ábrán a harmadik módszer utolsó előtti lépése látható. Itt minden mérési távolság esetére fel vannak tüntetve azon pontok által alkotott görbék, amelyeket a 20000-es ablakkal való átlagszámolás után kaptunk. Ábrázolva vannak ugyanakkor a pontokhoz illesztett egyenesek is.

### 2.3 Eredmények

Mindhárom módszerrel, mindkét mérés esetén sikerült nagyságrendileg helyes adatokat kapni.

Módszer	Eredmény ( $10^8 \text{ m/s}$ )	Helyszín
átlagszámítás	2.63	Bükk, első alkalom
átlagszámítás 2	3.28	Bükk, első alkalom
20000-es ablak	2.91	Bükk, első alkalom
Átlagszámítás	3.18	Bükk, második alkalom
átlagszámítás 2	3.13	Bükk, második alkalom
20000-es ablak	3.12	Bükk, második alkalom

*2. táblázat Méréseink eredményei*

### 3. Következtetések

Amint a számításainkból látni lehet, mérési módszerünkkel jól megközelítettük az elektromágneses hullámok terjedési sebességének elfogadott értékét. Ha a fenti eredmények átlagát tekintjük, akkor az csak 2.82%-os relatív hibát jelent. Mérési módszerünk előnye, hogy könnyen megérthető és kezelhető, így akár líceumokban is bemutatatható. Egy viszonylag egyszerű készülékkel dolgoztunk, mely könnyen kezelhető és könnyen szállítható. A kísérlet érdekes, diákok által is elvégezhető, nem kíván különösen precíz beállításokat. Az adó-vevők birtokában bármely líceumi diákcsoport könnyen megismételheti, és ezáltal a diákok személyesen megtapasztalják és belátják a rádióhullámok terjedési sebességének a nagy értékét.

Berendezésünk emellett alkalmas lehet a különböző meteorológiai jelenségek (köd, csapadék, hőmérsékletváltozások, stb.) rádióhullámok sebességére gyakorolt hatásának kimutatására is. Továbbá arra is használható, hogy tanulmányozzuk egyes akadályok (dombok, falak, épületek, stb.) szerepét az elektromágneses hullámok terjedésében.



#### 4. Szakirodalom

1. David W. Hogg, 1997, "Special Relativity"
2. Néda Zoltán, Fénysebességmérés <http://www.phys.ubbcluj.ro/~zneda/ping.html>
3. Néda Zoltán, 2007, "A fényre szabott fizika"
4. H. Fizeau, 1851, "Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux"
5. Szász Ágota-Néda Zoltán, Fizika szemle, 2007/4
6. UNIVERSAL ISM BAND FSK TRANSCEIVER MODULE, <http://www.hoperf.com>
7. RFM12BP Transceiver Module Datasheet, <http://www.hoperf.com>