

# A fénysebesség mérése fényimpulzussal (haladó elektronika laborjegyzet)

2007. szept. Update 2012. szept.

## Bevezetés

A fénysebesség az egyik legalapvetőbb fizikai mennyiség. Minden elektromágneses hullám ilyen sebességgel terjed, rádióhullámoktól a gamma-fotonokig. Fontossága még ennél is sokkal szélesebb univerzalitásából ered: ez az időt és a teret összekötő relativitáselmélet alaplennysége, ilyen értelemben a „váltószám” az idő és a távolság között. A relativitáselmélet szerint semmilyen anyagi test vagy információ nem terjedhet a fénysebességnél gyorsabban, viszont a nagy energiás részecskék megközelítik ezt a határsebességet.

Jelen mérés célja a fénysebesség megmérése, adott esetben látható fényre. Hasonló elvű mérést már Galilei is végzett, konkrét eredmény nélkül. Az első használható számadatot Römer Olaf (1676, csillagászati) és Fizeau (1849, földi) mérései szolgáltatták. A modern időkben a fénysebességet 12 jegy pontossággal mérték meg, mígnem napjainkra olyan pontosan mérhető, hogy ennek segítségével definiáljuk a hosszegységet, a métert. A jelen mérésben használt egyszerű laboratóriumi eszközökkel természetesen nem célunk az ilyen nagy pontosság elérése.

Adott esetben a mérési elrendezés a lehető legegyszerűbb: egy gyors elektronikai áramkör kiad egy fényimpulzust, mely visszaverődik egy 9-25 m távolságban elhelyezett tükörről. A beérkező fényimpulzust egy hasonlóan gyors, érzékeny elektronika detektálja, az időkülönbséget közvetlenül mérjük.

## A mérés kivitelezése

A laboratóriumban kialakított mérőhelyen egymáshoz közel található a jeladó és a jeldetektor. A jeladó egy külső jelgenerátor által kiadott, kb. 40 ns szélességű négyszögimpulzust erősít fel, majd ezzel a jellel felvillant egy standard, piros, nagy fényerejű LED-et. Az elektronikus jelet oszcilloszkópon vizsgáljuk. A fényt egy lencse nyalábbá fókuszálja, majd függőlegesen felfelé sugározza. A fény útjába helyezett, 45 fokban álló tükör a fényt vízszintesbe fordítja, ami így eljuthat a laborterem tülfelébe, kb. 2 m magasságban. Itt lehajtható tükrök vannak, ami alapján kiválasztható a fény által befutott távolság. A visszavert fény az előbbi, 45 fokban döntött tükörről újra a mérőhelyre jut, és újabb lencsével fókuszálva a jeldetektorra esik. A fotodetektor jelét egy gyors elektronika erősíti és oszcilloszkópra vezeti.

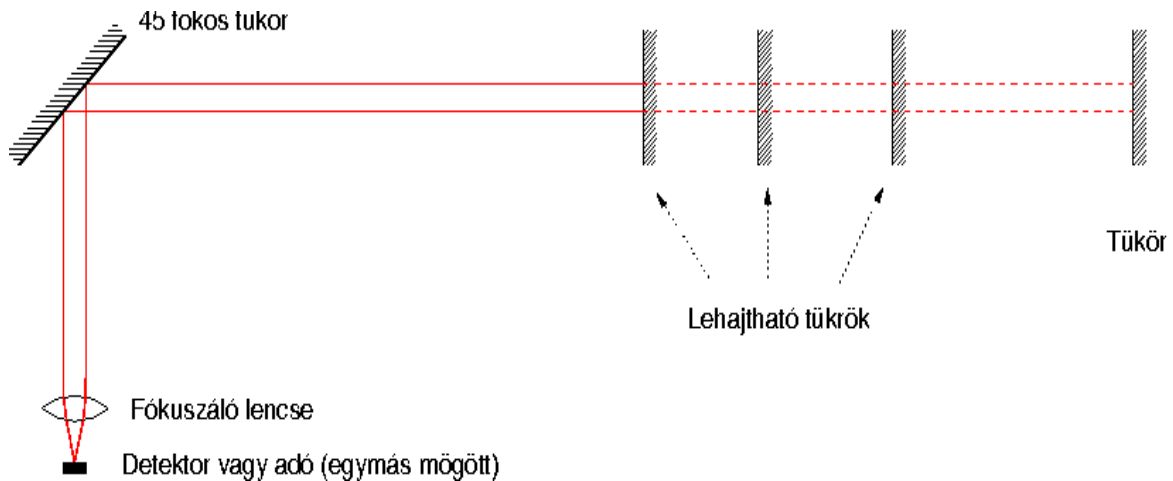
A mérés kivitelezésének két kritikus pontja van. Egyik a fény útjának beállítása, mely mérési feladat is: a fény útjának lépésről lépésre, tükörről tükrökre való követése, a lencsék állásának és fókuszának helyes megválasztása. A másik kritikus pont a két jel időkülönbségének mérése. Ez esetben figyelni kell arra, hogy az elektronikai áramkörök ne kapjanak túl nagy jelet (különben torzul a jel, a mérés pontatlanná válik), illetve hogy a jelgenerátor amplitúdója ne változzon mérés közben, ami a LED lomhasága miatt változtatja a jeladó késleltetését, és így pontatlanságot okoz.

## Az optikai rendszer

Az optikai rendszert az alábbi ábra szemlélteti. A fényjel útját fehér papírlappal, illetve a visszaverő tükör mögül nézve követhetjük az „odafele” úton. A visszavert fényt székre állva láthatjuk legjobban, illetve ha nagyjából jó helyre jut, már a mérőhelyen is, egy lencsével egy fehér papírlapra lefókuszálva a függőlegesen lefelé haladó fényt. A visszaverő tükrök csavarokkal történő

beállításával finomíthatjuk a beérkező fény helyét, hogy minél kényelmesebben mérhető legyen a detektorral.

A fény begyűjtése úgy a legoptimálisabb, ha a fotodetektor melletti fehér felületen van a fókuszpont, melyet ha beállítottunk, a fotodetektort egyszerűen beforgatunk a megfelelő helyre. Az optikai rendszer helyes beállítása akkor sikerült, ha az oszcilloszkópon megjelenik a detektált jel, elegendően nagy (legalább 0,5 V) amplitúdóval.

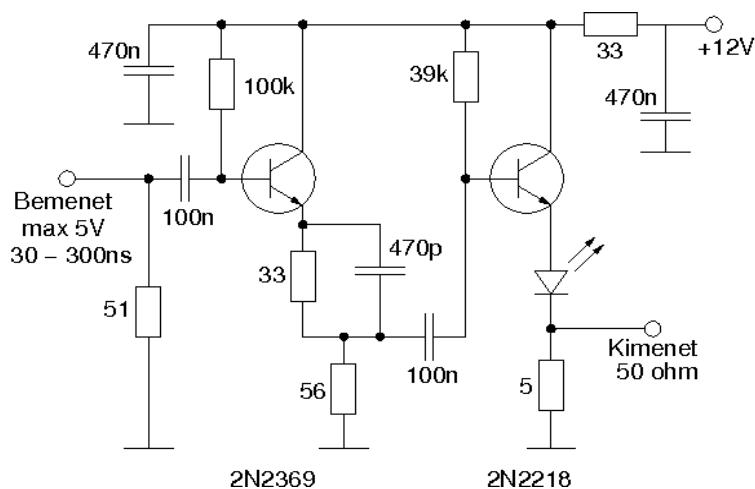


1. ábra: Az optikai rendszer oldalnézetből

Amennyiben a jel túl erős, csökkenthetjük természetesen a detektor fókuszából való részleges kitolással (esetleg kevésbé kényelmes az adó-LED fókuszából való kitolásával: ezáltal a sugárnyaláb szélesebb lesz, csökkentett intenzitással). A mérés során fontos lesz, hogy kontrollálni tudjuk a detektált fény intenzitását, a jelgenerátor amplitúdójának változtatása nélkül.

Annak érdekében hogy az elektronika saját késleltetését minél pontosabban mérjük, lehetőség van arra, hogy az adót és a vevőt egy rövid távolságon, két közvetlen felettük elhelyezett tükörrel kössük össze. Ezzel összesen 5 távolságon mérhetjük a teljes késleltetést.

## A jeladó elektronika



2. ábra: A jeladó elektronika

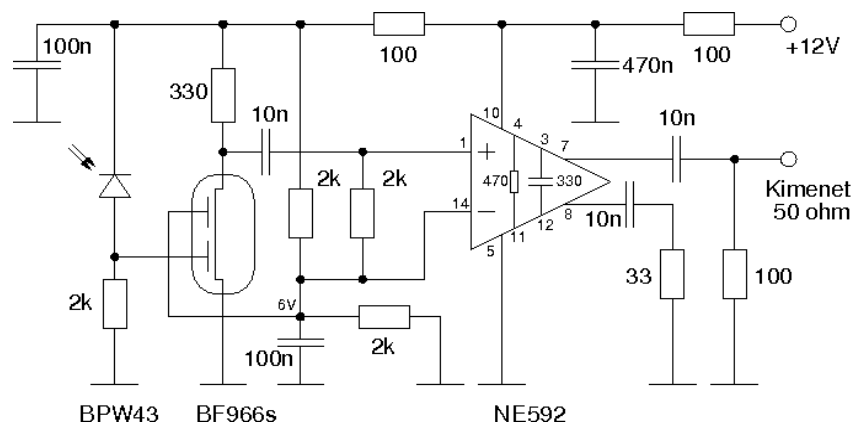
A jeladó elektronika kapcsolási rajza a 2. ábrán látható. A beérkező (jelgenerátorból

származó) jelet egy két fokozatú emitterkövető áramkör erősíti. A T1 (2N2369) tranzisztor emitterkörében levő ellenállás-kondenzátor kapcsolás a jel felfutását gyorsítja. A T2 (2N2218) emitterkörében található a fénykibocsátó LED, sorbakötve egy 5 ohmos ellenállással. Az utóbbi ellenálláson keletkező jelet vezetjük az oszcilloszkópra. Ennek alapján meghatározható a LED áramerőssége.

Az ábra alapján világos, hogy mind a beérkező jel felől nézve, mind az oszcilloszkópon 50 ohm ellenállás terheli a koaxiális kábeleken érkező jeleket. Ezek a kábeleken történő jelvisszaverődések elkerülése miatt fontos. Ha próbaképpen eltávolítjuk az 50 ohmos ellenállást (lezáró ellenállást) az oszcilloszkóp bemenetéről, drámai a jelminőség romlása.

## A jeldetektáló elektronika

A mérés kivitelezése szempontjából legkritikusabb a jeldetektáló elektronika felépítése. Az áramkörnek a fotodetektor gyenge, néhány mV-os jelét kell felerősítenie, megőrizve a jel gyors felfutását. Az elért, 15 ns alatti felfutási idő közelít az ultrarövid hullámú rádióhullámok időskálájához, ennek megfelelően a kapcsolás nagyon érzékeny a külső zavarokra. Fontos a megfelelő földelés, a masszív, apró elemekből álló felépítés, a felesleges hozzávezetések elkerülése. A jeldetektáló elektronika kapcsolási rajza a 3. ábrán látható.



3. ábra: A jeldetektáló elektronika felépítése

A fotodetektoron keletkező jelet (ez utóbbi egy záróirányban kötött dióda, melyen áram folyik fény hatására) egy FET (field effect transistor, tervezérelt tranzisztor) fogadja, mely azt nagyon kis zajjal erősíti. A következő fokozat jóval nagyobb erősítést ér el, egyetlen integrált áramköri tokban (NE 592-es, vagy UA733-as videoerősítő).

## A gyors elektronikus jelek méréséről

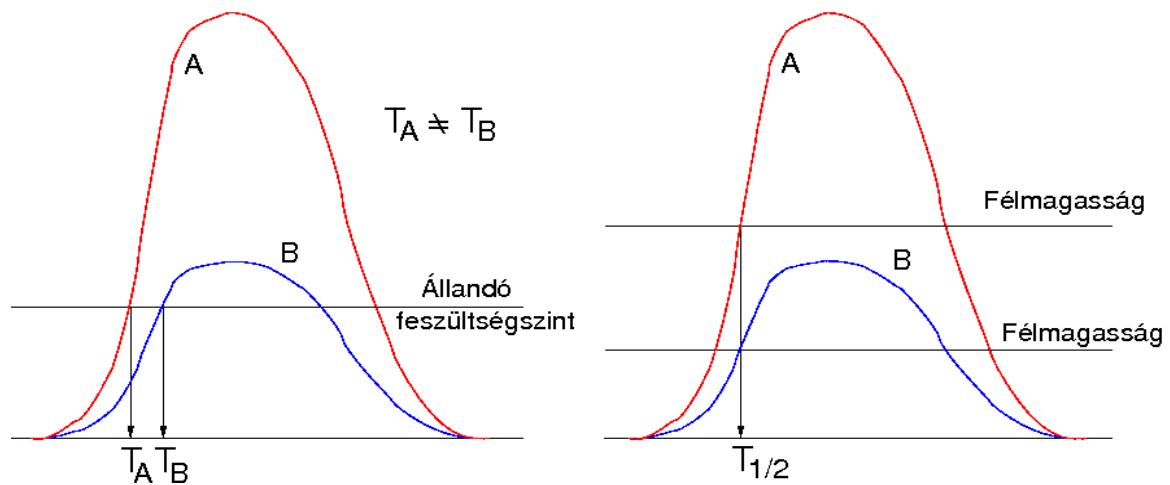
Egy elektronikai jel amplitúdóját úgy mérhetjük legpontosabban, ha megmérjük a maximumának a feszültségét: ez a nyilvánvaló dolog abból adódik, hogy a jel maximumánál a derivált értéke zérus, így a jel időbeni eltolódására nem érzékeny a feszültség. Ha egy elektronikai jel idejét szeretnénk mérni, akkor épp arra van szükség, hogy a jel gyorsan változzon: valamiképpen a jel felfutását, azaz egy nagy deriválttal rendelkező helyen mért feszültséget mérjük.

Legegyszerűbb azt az időpontot megmérni, amikor a jel elér egy bizonyos adott feszültségértéket. Ezt jeldiszkriminációnak nevezik. Problémája a módszernek, hogy amennyiben a jel amplitúdója változik, változik a diszkrimináció időpontja is.

Sokkal pontosabb módszer az, ha a jel egy adott relatív magasságánál, például a maximális

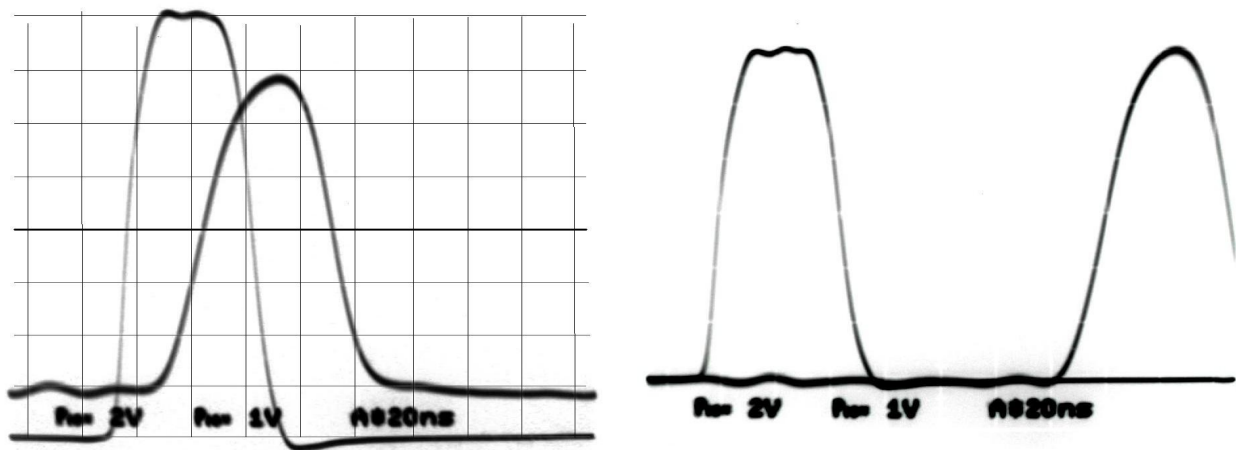
amplitúdó felénél elért feszültség időpontjával definiáljuk a jel idejét. Ezt az állandó arányú diszkrimináció módszerének (constant fraction discrimination) nevezik.

A módszert az alábbi ábra szemlélteti.



4.ábra: a jel idejének mérése állandó szintet elérve (bal oldalon) illetve a jel félmagasságában vett feszültségértékkel (jobb oldalon). Ez utóbbi nem függ a jel amplitúdójától, csak az alakjától

Az oszcilloszkópon látott jel segítségével könnyen mérhetjük ezt a félmagasságban mért időkülönbséget, ugyanis az oszcilloszkópon a felező tengely finoman van skálázva, a normál osztás egyötödére. Az alábbi ábra szemléltet két helyes oszcilloszkóp-képet.



5. ábra: A félmagasságban vett időkülönbségek kényelmes és pontos mérésének oszcillogramjai

## A mérés beállítása

A mérés beállítása során kövessük az alábbi lépéseket:

Adjunk 12 V-os tápfeszültséget a jeladóra, mely ekkor láthatóan világítani kezd. Kössük a jelgenerátor kimeneti jelét, kb **4V-os amplitúdójú, kb 30-40ns hosszúságú impulzusokat** a jeladó bemenetére, a jelgenerátor trigger kimenetét pedig az oszcilloszkóp külső bemenetére (external input). A jeladó kimeneti jelét kössük az oszcilloszkóp 1-es bemenetére, megfelelő 50 ohmos lezárással. Keressük meg az oszcilloszkópon az impulzusokat! Megfigyelhetők a 30-40 ns

hossúságú, kb. **1,6 V amplitúdójú jelek** (ez a fenti kapcsolási rajz alapján 320 mA maximális áramnak felel meg a LED-en keresztül). A jeleket esetlegesen úgy érdemes vizsgálni, hogy az oszcilloszkóp vízszintes skáláját 10-szeresen kinyújtjuk. Állítsuk be úgy az oszcilloszkópot, hogy **20 ns feleljen meg egy kockának** (pl. a 0.2 msec/osztás állásban, időben 10-szeresen kinyújtva), és így végezzük a további méréseket is. Ha ebbe a tartományba nem fér bele a kiadott és visszavert impulzus, váltsunk megfelelően időskálát.

Állítsuk be az optikai rendszert! Kövessük a fény útját a jeladótól az utolsó előtti tükörig egy fehér papírlappal, és a jeladó lencséjének illetve a LED helyének változtatásával irányítsuk a fényt a tükör közepére! A tükör mögül nézve jól látható, ha a jeladó helyesen van beállítva. A mérőhelynél keressük meg a visszavert fényt. Ezt tehetjük egyrészt közvetlenül, a távoli tükörről nézve, de leghatékonyabb a 45 fokos tükörről függőlegesen visszavert fényt egy lencsével lefókuszálni egy fehér papírlapra, és így megkeresni az optimális helyet. Arra a területre ahol a visszavert fény jól látszik, helyezük el a fénydetektort, és állítsuk be a lencse fókuszába.

Adjunk 12 V-os tápfeszültséget a jeldetektáló áramkörre! Az áramkör kimenetét kössük az oszcilloszkóp másik bemenetére, a megfelelő 50 ohmos lezárással. Helyes beállításkor meg kell jelenjen a detektált fény. Állítsuk be úgy az optikai rendszert (pl. a fókuszról való részleges kitolással) hogy a **fordetektor kimenetén kb. 0,6 V-os** (de legfeljebb 0,7 V) jel jelenjen meg! Ennél nagyobb jel esetén a detektált jel torzul, ami megzavarja a mérést!

Állítsuk be a közelebbi tükröket, hogy ezek egyszerű lehajtásával azonnal mérhető legyen az időkülönbség! Ezután lehet a tényleges mérésorozatot megkezdeni. Ügyeljünk arra, hogy a mérés során ne változzon a jeladó amplitúdója, illetve hogy a jeldetektor amplitúdója mindig 0.7 V alatt (optimálisan 0,6 V körül) maradjon.

## A mérés lépései

A fentiek alapján az egyes méréseket (az időkülönbség meghatározását az egyes tükörállásoknál) így érdemes végrehajtani:

Állítsuk úgy be az adóból érkező jelet a jelgenerátor amplitúdójának változtatásával (4V-os kimenő amplitúdó a jelgenerátorból, **a jeladóból visszajövő jel 1.6V-os**, azaz 300 mA áram a LED-en), hogy félmagassága az oszcilloszkóp képernyőjének középvonalára essen! A továbbiakban a jel amplitúdóját nem szabad változtatni!

Állítsuk be a vevőhöz tartozó lencsét, vízszintes irányban mozgatva, úgy, hogy a jel félmagassága az oszcilloszkóp képernyőjének középvonalára essen, amplitúdója pedig **0,6 V körüli** legyen! A lencse helyét változtathatjuk az egyes mérések között, hiszen ezzel csak a vett jel amplitúdója változik, amitől nem függ a félmagasság ideje (ld. a fenti gondolatmenetet)

Az oszcilloszkópon megjelenő képet a jobb leolvasás érdekében még változtathatjuk kétféleképpen: az egyes jeleket eltolhatjuk függőlegesen, hogy ezzel a félmagasság pontosabban essen a középvonalra, illetve együtt időben eltolhatjuk, hogy jobban lássuk a képet. Ez utóbbit nemcsak az oszcilloszkóp saját beállító gombjával tehetjük, hanem a jelgenerátor késleltetésének változtatásával is (delay gomb). Ezután minél pontosabban olvassuk le az időkülönbséget.

## A mérés kiértékelése

A mérés eredményeit értelmezhetjük úgy, hogy a mért időkülönbség két forrásból származik: egyik az elektronikai rendszer saját késleltetése, illetve másik a fény terjedése miatti időkésleltetés. Ez alapján a mért időkülönbség:

$$t = T_0 + 1/c x$$

ahol  $t$  a mért időkülönbség,  $x$  a teljes fényút,  $T_0$  az elektronika késleltetése,  $c$  pedig a keresett fénysebesség. Az adatpárok egy egyenesre illeszkednek tehát, melynek paramétereit ( $T_0$ ,  $c$ ) a gnuplot program segítségével határozhatjuk meg (pl. fenys.txt).

Első lépésként **írjuk egy szövegfile-ba az adatokat** a notepad vagy jegyzettömb program segítségével. Ezután indítsuk el a gnuplot programot, és ábrázoljuk az adatokat:

```
plot "fenys.txt"
```

Ezután illesszünk egyenest az adatokra:

```
fit T0+x/c "fenys.txt" via T0,c
```

A program megadja a legjobban illeszkedő  $T_0$  és  $c$  paraméter értékeket, a becsült hibával együtt. Ábrázoljuk együtt a mért adatokat és az illesztett egyenest:

```
plot "fenys.txt", T0+x/c
```

## Fénysebesség anyagban

Ismeretes hogy anyagban lecsökken a fény sebessége, az itteni és a vákuum-beli fénysebesség arányát nevezzük törésmutatónak. A mérőhelyen található egy fényvezető kábel, melynek időkésleltetését megmérve, meghatározhatjuk a benne levő üvegszál törésmutatóját. A kábelen mért időkésleltetés természetesen a

$$t = T_0 + n/c L$$

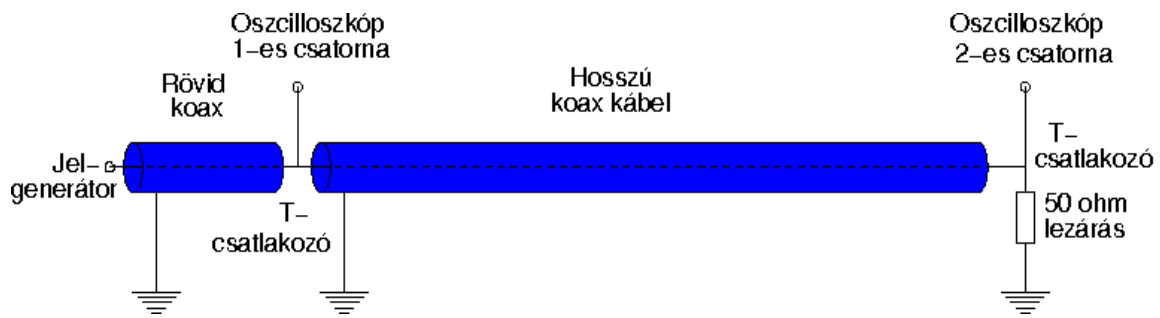
ahol a  $T_0$  az elektronikai rendszer saját, fent meghatározott késleltetése,  $c$  a már meghatározott vákuum-beli fénysebesség,  $t$  a mért késleltetés,  $n$  pedig a keresett törésmutató. A kábel  $L$  hossza 20,06 m.

Az üvegszál nagyon vékony, ugyanis ekkor jobbak a jelátviteli tulajdonságai. Ez a vastagság (50  $\mu\text{m}$ ) elegendő is akkor, ha félvezető lézerekkel használják normál adatátvitelre, ez utóbbiak nagyon kis felületre fókuszálható fényt bocsátanak ki. A jelen mérési összeállításban használt LED nem optimális a célra, ezért esetlegesen csak gyenge jelet kapunk, bár ettől még a mérés jól elvégezhető.

Az adó oldalán egy apró lencsével fókuszáljuk a LED fényét, hogy növekedjen a jel, ezt finoman be kell állítani. A vevő oldalán nincs fókuszálás (a fotodetektor felülete nagyobb, a fókuszálás nem segítene igazán). A fényt egy kis csővégnek a fotodetektorra való illesztésével visszük át (belenézve látszik a LED fénye). Vigyázzunk, hogy ezen az érzékeny részen ne sérüljön meg semmi, se a fénykábel csatlakozója, se a fotodetektor! A csővéget a „lelógatott” fénykábellel rögzítsük, hogy minél kisebb terhelés – csavarás érje a fotodetektort.

## Fénysebesség koaxiális kábelen

A fénysebesség anyagbeli megváltozását nem csak a fény esetén mérhetjük, hanem normál elektronikus jelekre is (azaz a fénynek megfelelő néhány száz nm hullámhosszú elektromágneses hullámokra, hanem néhány tíz méteres rádióhullámokra). A mérőhelyen található egy hosszú koaxiális kábel, melyen az időkésleltetést a 6. ábrán látható mérési összeállításban mérhetjük legegyszerűbben.



6. ábra. Időkésleltetés mérése koaxiális kábelben

A mért  $T_1$  időkéseletetés alapján meghatározható a kábelben mérhető  $c'$  fénysebesség:

$$c' = L / T_1$$

ahol  $L$  a kábel hossza, 19,2 m.

## Hullámok visszaverődése koaxiális kábelben, hullámellenállás mérése

A koaxiális vezetéken az elektromos jel (aránylag gyorsan változó, például néhány tíz ns hosszúságú) hullámként terjed. A vezetékre jellemző a feszültség és áram aránya, ez a **hullámellenállás** (nominálisan 50 ohm az itt használt vezetékekre). Ha a vezeték végére egy hullámellenállás értékű ellenállást kötünk, akkor a bemenet szempontjából olyan a rendszer mintha végtelen hosszú lenne. Ha nem a megfelelő ellenállás érték kerül a kábel végére (lezárás), akkor a jelek visszaverődnek.

A visszaverődést az adott vezeték elején mérhetjük, ott, ahol beküldjük a jelet: a visszavert jel időben eltolva, hasonló alakú feszültségként jelenik meg (ugyanazon a csatormán).

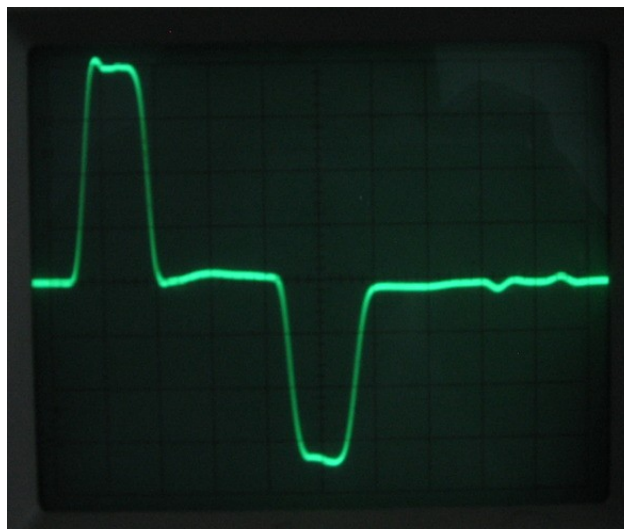
A feladat a hullámellenállás megmérése, illetve a visszavert jel amplitúdójának mérése a kábel végére elhelyezett ellenállás függvényében.

A visszavert amplitúdó elektrodinamikából jósolt értéke az  $R$  függvényében:

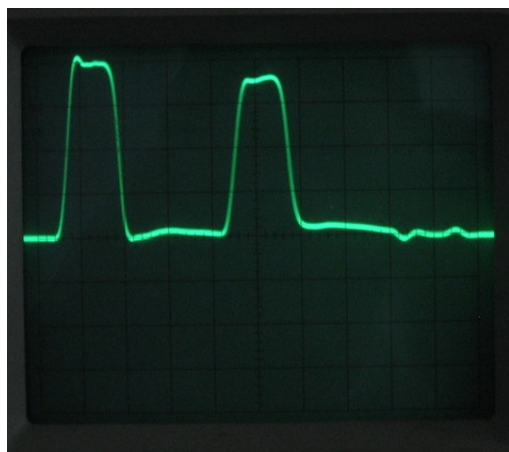
$$U_{\text{vissza}} / U_{\text{be}} = Q (R - R_0) / (R + R_0)$$

ahol  $Q$  a jel vesztesége a kábelben való terjedés miatt oda-vissza (értéke valamivel 1 alatti, meghatározható lesz a mérésből),  $R_0$  a hullámellenállás,  $R$  pedig az az ellenállás amit ténylegesen a kábel végére kötünk. Ha  $R = R_0$  lenne, a visszavert jel zérus.

Az alábbi ábra mutatja azt az esetet, amikor az R értéke zérus: ekkor egy jelentős, a képlet szerint  $-Q$  értékű, ellentétes fázisú visszaverődést kapunk.



Az alábbi ábra azt az esetet mutatja, amikor R nagyon nagy: ekkor a visszavert jel azonos előjelű, a képlet szerint  $+Q$  értékű.



R értéke változtatható, egy kis eszközzel fix értékeket állíthatunk be (néhány ellenállás soros eredőjeként, a kapcsolókat (jumpereket) zárva az adott ellenállás kiesik a láncból).

A mérést (ami tehát a visszavert és bemenő jel aránya, amit az oszcilloszkópon jól láthatunk) kb 40ns hosszúságú jellel végezzük, és az adott kábel tulajdonságai miatt az oszcilloszkópot úgy érdemes beállítani hogy egy osztás kb 50ns-nak feleljen meg (0.5 microsec/osztás, 10-szeres nagyítással).

A feszültségarányt úgy ábrázoljuk, hogy logaritmikusra választjuk az x skálát (set logscale x), így jobban látszik az eredmény. Érdemes 10, 33, 43, 51, 61, 84 és 220 ohm értékeknél mérni (legalább 6 pontban, a hullámellenállás értéke alatt és felett is – látható ahogy a visszavert jel amplitúdója



előjelet vált).

Az  $R_0$  és  $Q$  értékét gnuplot-ban való illesztéssel határozzuk meg!

## **Mérési feladatok**

1. Állítsa össze a mérés elemeit, állítsa be az optikai utat! Mérje meg az egyes tükrállásoknak megfelelő fényutat (beleszámítva a függőleges szakaszt is)!
2. Mérje meg az egyes tükrállásoknak megfelelő időkülönbséget a jeladó és a jeldetektor jelei között! Mérje meg az időkülönbséget akkor is, ha a detektort egy rövid fényútnak megfelelő tükrpár köti össze az adóval.
3. A mért adatok alapján a gnuplot program segítségével határozza meg a fénysebességet, illetve az elektronika saját késleltetését!
4. Mérje meg a fényvezető kábel üvegszálának törésmutatóját!
5. Mérje meg az elektronikus jelek terjedési sebességét a koaxiális kábelen!
6. Mérje meg a koaxiális vezeték visszavert és bemenő jelének amplitúdóját különböző lezáró ellenállás-értékek mellett! Az adatokból illesztéssel határozza meg a kábel hullámellenállását ( $R_0$ ) és veszteségét ( $Q$ )!