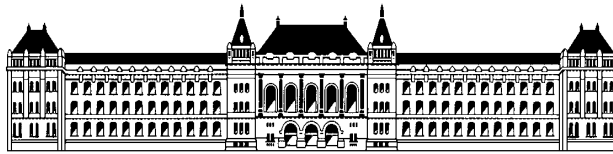


MÉRÉSI SEGÉDLET

# **OTDR - Optical Time Domain Reflectometer MÉRÉSHEZ**

**(OTDR)**

V2 épület VI.emelet 620.  
Fénytvázközlés Labor



**BUDAPESTI MŰSZAKI és GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**  
**VILLAMOSMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR**



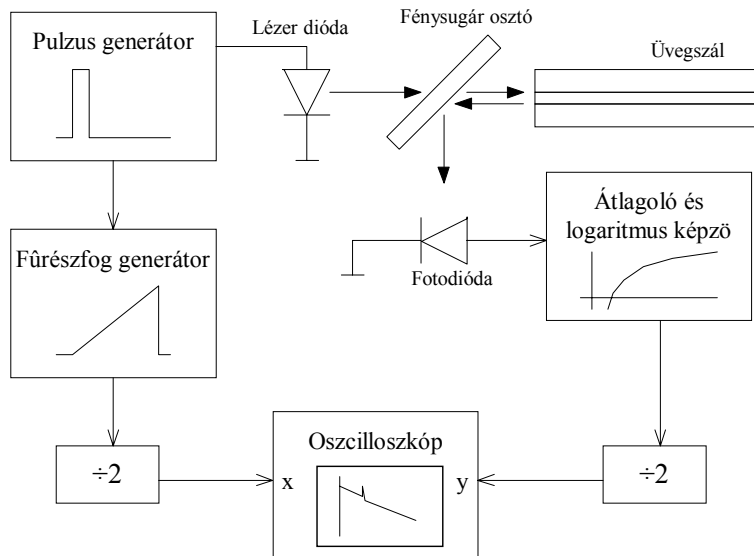
**Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék**  
**H-1111 Budapest, Goldmann György tér 3.**  
**V2 épület VI. emelet**  
**tel.: (+36 1) 463 15 59, fax : (+36 1) 463 32 89**

Készítette :  
**Zólogy Attila**

1997/2010

## Az OTDR felépítése és működése

Az OTDR az optikai kábelek legfontosabb vizsgálati eszköze. Alkalmas szálcsillapítás, csatlakozási csillapítás, kábel diszkontinuitások helyének és nagyságának pontos mérésére. Kellően rövid fényimpulzus keltésével az OTDR alkalmas lehet még multimódusú kábelek diszperziójának ( módusdiszperzió ) meghatározására is. Tipikus OTDR műszer felépítését mutatja az 1. ábra.



1. ábra. OTDR műszer elvi felépítése.

Az optikai reflektométer alapgondolata az, hogy rövid fényimpulzust bocsátunk ki és mérjük az esetleges visszaverődések miatt visszaérkező impulzusok beesési idejét, illetve az impulzusok nagyságát. A szokásos pulzusszélesség nanoszekundumtól mikroszekundumokig terjed, az impulzus teljesítménye 10 mW-ot is meghaladhatja. Az ismétlési frekvencia a kábelhossz függvénye, tipikusan 1 kHz-től 20 kHz-ig terjed, természetesen a hosszabb kábelek mérésekor kisebb. A kettővel való osztásra az oscilloszkóp bemenetein azért van szükség, mert a függőleges skála l úthossz csillapítását, a vízszintes skála pedig az l út hosszát mutatja, és nem oda vissza.

## A szálak csillapításának összetevői, jelentőségük az OTDR mérések szempontjából

A szálban haladó fény csillapodásának három oka van:

- abszorpció,
- a szál sugárzási vesztesége.
- Rayleigh szórás ( scattering ),

Az abszorpció a szál csillapításának 10-20 %-ért felelős. Legfőbb okozója az üvegszál anyagában lévő szennyező  $\text{OH}^-$  ionok jelenléte. A mai fejlett gyártástechnológiával számuk és így hatásuk is minimálisra csökkenthető. 1700 nm-nél nagyobb hullámhosszak esetén az alkalmazott üveg csillapítása hirtelen megnő, így az üvegszálak távközlésre alkalmazható optikai frekvenciák alsó határát ez jelenti. A gyakorlatban az 1300 nm-es illetve az 1550 nm-es hullámhosszakat alkalmazzák, az ott található csillapítási minimumok miatt. Az abszorpció nem hoz létre a szálban visszasugárzott teljesítményt a bemenet felé. Így ha csak ez a fizikai jelenség zajlana le a szálakban, akkor a szálcsillapítás megmérése OTDR technikával csak

úgy volna lehetséges, ha a mérendő szakasz végére egy ismert, kalibrált lezárást helyeznénk. Ebben az esetben az ismert lezárás reflexiójának mért értékéből lehetne csak az egész szakasz csillapítására következtetni, mert a szál többi pontjáról nem érkezne vissza jel, és csak a műszer saját zaját mérnénk. Valóságos OTDR mérésekben a később ismertetett Rayleigh szórás miatt a szál folyamatosan, minden pontból sugároz visszafelé, ezért az abszorpciós csillapítást a többi csillapítási tényező hatásával együtt mérjük. Azonban szerepe csak arra korlátozódik, hogy az oda- illetve a visszafelé haladó hullám csillapodását, kis mértékben megnöveli.

Sugárzási veszteség általában akkor lép fel, ha a szál geometriai paraméterei hirtelen megváltoznak, illetve a szál anyagába feszültség keletkezik gyártási hiba, vagy mechanikai behatás hatására ( pl. a szál elliptikus keresztmetszetű, erős meghajlítás stb. ). A sugárzási veszteség megfelelő technológiával gyártott és felszerelt szál esetén elhanyagolható, és az abszorcióhoz hasonlóan nem hoz létre visszasugárzott teljesítményt, így az OTDR mérések szempontjából az abszorciónál leírtak érvényesek rá. Egy esetleges nagy diszkontinuitás ( pl. éles hajlítás ), a hirtelen megnövekedett csillapítás miatt, kimutatható OTDR méréssel.

Az OTDR technika szempontjából legnagyobb jelentőséggel a Rayleigh szórás bír. A csillapítás értékének 80-90 % -ért felelős. Létrejöttének oka, hogy az üvegszál törésmutatójának mikroszkopikus egyenetlenségei diffrakciót okoznak, vagyis fényenergia bizonyos része minden irányba szétsugárzódik. A diffrakció mértéke akkor a legnagyobb, ha a fény hullámhossza összemérhető a mikroszkopikus egyenetlenségek nagyságával, így a szórás mértéke a hullámhossz növelésével csökken ( az abszorpciós minimumok mellett, ez az oka annak, hogy az alkalmazott optikai frekvenciák 850 nm-es hullámhosszról eltolódtak az 1300 nm-es illetve az 1550 nm-es tartományba ). A diffraktált fény egy része visszafelé terjed a szálon, ezt mérve fontos információkat kapunk. A következőkben a diffraktált, illetve a visszafelé haladó fény arányát számítjuk ki.

Tudjuk, hogy a szálban a fény intenzitása a következőképp változik a távolság függvényében:

$$P_t(z) = P_0 \left( 10^{\frac{-z\alpha}{10}} \right) \quad (1)$$

hol  $\alpha = \alpha_s + \alpha_a$ , azaz a szóródásból és az abszorpcióból eredő csillapítási együtthatók összege dB/km-ben.

A teljes szórt teljesítmény  $z$  távolságnál:

$$P_s(z) = \alpha_s \Delta z P_t(z) \quad (2)$$

Ahol:

$\Delta z$  az impulzus hossza a szálban,

$\alpha_s$  a szóródási csillapítás viszonyszám/km-ben [1/km] adott értéke. A szóródási csillapítás  $\alpha_s$  értéke [dB/km] -ben megadott értéke esetén a következő képlet használatos:  
 $\alpha_s' [1/km] = 0.23 \alpha_s [dB/km]$ .

Az impulzus hossza a szálban kifejezhető a csoportsebességgel:

$$\Delta z = w v_{gr} = w c / n_{gr} \approx w c / n \quad (3)$$

Ahol:

$w$  az impulzus időtartama,

$v_{gr}$  a csoportsebesség a szálban,  
 $n_{gr}$  a csoport törésmutató, amelyet most a normál törésmutatóval közelítünk (  $n$  ),  
 $c$  a fénysebesség vákuumban.

A kábel véges numerikus apertúrájának köszönhetően az összes szórt fénynek csak egy része,  $S$  hányada tud terjedni visszafelé a kábelben. Ez szintén csillapodik a visszaúton, majd eléri a kábel bemenetét, ahol a teljes visszaszórt ( backscattered ) teljesítmény:

$$P_{bs}(z) = S\alpha_s \Delta z P_0 \left( 10^{\frac{-2z\alpha}{10}} \right) \quad (4)$$

ahol:

$z = tv_{gr}/2$ , ahol  $t$  a impulzus kétutas terjedési ideje a mért kábel teljes hosszában

$S = (NA/n)^2 / 4.55$  egymódusú kábelnél

Ez alapján már könnyen meghatározható a kábel elejéről visszaérkező szórt teljesítmény, azaz amit  $t=0$  időpillanatban mérhetünk:

$$P_{bs}(0) = S\alpha_s \Delta z P_0 T_s \quad (5)$$

ahol  $T_s$  a fényosztó átvitele. Hasonlóképp a szál végéről, azaz  $L$  távolságból visszaérkező szórás-amplitúdó:

$$P_{bs}(L) = T_s S\alpha_s \Delta z P_0 \left( 10^{\frac{-2L\alpha}{10}} \right) \quad (6)$$

A visszaszórt teljesítmény tehát a távolsággal (azaz a mérésben idővel) arányos exponenciális csökkenést mutat. Számítsuk most ki a visszaszórt teljesítmény legnagyobb értékeit, 1550 nm és 1300 nm hullámhosszakon a ( 5 )-ös képlet segítségével (  $L=0$  ), néhány tipikus paraméter érték figyelembevételével ( 1. Táblázat ):

Hullámhossz	1300 nm	1550 nm
$\alpha = \alpha_s + \alpha_a$	0.4 dB/km = 1.092/km	0.2 dB/km = 1.046/km
$\alpha_s$	0.074/km	0.036/km
$w$	1 $\mu$ s	1 $\mu$ s
$n$	1.485	1.485
$NA$	0.1	0.1
$T_s$	1	1
$S$	$9.8 \cdot 10^{-4}$	$9.8 \cdot 10^{-4}$
$P_{bs}(0)/P_0$	-48.4 dB	-51.5 dB

1. táblázat

Ilyen kis szintű jelek mérésekor, mikor a jel teljesítménye közel van a vevő saját zajának a szintjéhez, vagyis a  $NEP$  ( noise equivalent power ) paraméteréhez, átlagolással szükséges javítani a jel-zaj viszonyt. Ezt végzi az 1. ábra átlagolója. Így a vevő zajra érzéketlenebbé válik és a  $NEP$  lecsökken:

$$NEP_{eff} = NEP/n^{1/2} \text{ lesz,} \quad (7)$$

ahol  $n$  az átlagolt minták száma.

### **A dinamika tartománya**

Az OTDR által megmérhető maximális kábelhossz a műszer legfontosabb paraméterének, a dinamika tartománynak a függvénye. Ennek definíciója:

$$\frac{P_{\max back}^{[dB]} - NEP_{eff}[dB]}{2} = \frac{P_{bs}(0) - NEP_{eff}[dB]}{2} \quad (8)$$

ahol a kettővel való osztás a csillapodás  $2z$  ( oda-vissza út ) szerinti függése miatt van.

Fontos szolgáltatása az OTDR-nek a szálhegesztések csillapításának analizálása. Bizonyítható, hogy egy 0.01 dB csillapítású hegesztés 0.05 dB pontossággal való megmérése csak a NEP-nél 8.2 dB-lel nagyobb vett jel esetén lehetséges.

### **A Fresnel reflexió hatása**

A szóródáson kívül egy másik reflexiós jelenség a Fresnel reflexió is igen fontos az OTDR mérések szempontjából.

A Fresnel reflexióról akkor beszélünk, ha az elektromágneses hullám különböző dielektromos állandóval rendelkező térrészek határán halad át. Ilyenkor a teljesítmény egy része reflektálódik, amit leggyakrabban Fresnel törvénye szerint írunk le. Ilyen reflexió jön létre az üvegszálak végeinél, csatlakozóknál, ahol a közeg tulajdonságai hirtelen megváltoznak ( pl. üveg-levegő átmenet ). A polírozott üvegszál végének teljesítmény reflexiós tényezője ( merőleges beesést feltételezve ) tipikusan 0.04, ami -14 dB logaritmikus skálában. Ha összehasonlítjuk ezt az értéket az 1. táblázatban kapott értékekkel ( kb.-50 dB ), akkor látható, hogy ez három nagyságrenddel nagyobb. Ez azt jelenti, hogy pl. egy üvegszál véget még olyan távolról is észreveszünk, amikor már az egyszerű Rayleigh szóródásból visszaérkező jel szintje jóval a zajküszöb (  $NEP_{eff}$  ) alatt van. Normál esetben a Fresnel reflexiós helyeken éles, kiugró csúcsok jelzik a törésmutató hirtelen változását ( pl. üvegszál be- illetve kimenet, csatlakozók ).

### **Csillapításmérés OTDR felhasználásával**

Az OTDR a ( 6 ) képletnek megfelelően képes a visszaérkezett jel szintjének hirtelen megváltozása esetén, szálban levő hirtelen csillapításugrások lokalizálására illetve az ugrás mértékének meghatározására. Így mérhető a szálhegesztések, csatlakozók helye és csillapítása. A csillapításugrás az OTDR képernyőjén egy lépcsőként jelenik meg, aminek a nagysága arányos a csillapítás mértékével. Olyan esetben amikor az adott helyen Fresnel reflexió is fellép ( pl. csatlakozónál az üveg-levegő-üveg átmenet ) akkor a lépcső előtt egy éles reflexiós csúcsot tapasztalunk.

Végül egy fontos dologra hívjuk fel a figyelmet. Az OTDR-rel való csillapításmérés gyökeresen különbözik a klasszikus 2 kapus esettől. Ennek okán előfordulhat, hogy a mért görbében pozitív irányú lépcsőt találunk, mintha a szál ott erősítene. Ilyen jelenség lép fel akkor, mikor a szál numerikus apertúrája megváltozik ( így  $S$  megváltozik ). A problémát megoldani csak úgy lehet, ha a szálát mindkét vége felől megmérjük, és a helyes csillapítás értéket a két mérés átlaga adja.

## **Az OTDR felbontása, holtzóna fogalma**

Az OTDR felbontása azon két reflektáló pont távolsága, melyeket a műszer még meg tud különböztetni. Ez nyilván a kibocsátott impulzus szélességétől függ, hiszen azok nem mosódhatnak össze. Képzeljünk el kettő, egymáshoz közeli reflektáló pontot és egy feljük haladó  $\Delta z$  hosszúságú fényimpulzust. Amikor az impulzus eléri az első reflexiós helyet teljesítményének egy bizonyos része reflektálódik. Ezen reflexió mindaddig tart amíg az impulzus áthalad a reflexiós ponton, vagyis az impulzus időtartamáig. Ez azt jelenti, hogy az egyes reflektáló pontról, a teljes impulzus áthaladása után, ugyancsak  $\Delta z$  hosszúságú *reflektált impulzus* halad visszafelé. Közben az impulzus nem reflektált része továbbhalad, és eléri a második reflexiós pontot is. Amennyiben a második pontról reflektált  $\Delta z$  hosszúságú impulzus eleje utoléri az első helyről reflektált impulzus végét, akkor a két impulzus nem megkülönböztethető, mert összemosódnak. Ekkor tehát a két reflexiós pont helye sem különböztethető meg. A felbontóképesség határa elméletileg, tehát az impulzus fizikai hosszának a fele ( $\Delta z/2$ ) a kétutas terjedés miatt. Az impulzusszélesség csökkentése javítja a felbontóképességet, azonban ekkor a jelteljesítmény is csökken (lásd 6. képlet), azaz a jó felbontóképesség kis dinamika tartományt eredményez. Megoldást a radartechnikában már régóta alkalmazott kódmodulációs eljárások jelenthetik, amelyekkel sikeres kísérleteket folytatnak.

A felbontóképességhez szorosan kapcsolódik a holtzóna fogalma. A műszer az impulzus kibocsátása közben nem tud pontosan mérni, hiszen a szálban éppen csak terjedni kezdő impulzus szélessége adás közben még folytonosan változik. Ezenkívül az üvegszál bemenetén fellépő Fresnel reflexió miatt, az adás időtartama alatt igen erős vett jelszint van, ami telítésközel állapotba viszi az OTDR vevőjét. Az adás lezajlása után a detektornak még bizonyos időre szüksége van, hogy pontos szinteket tudjon mérni (a műszer képernyőjén ez úgy figyelhető meg, hogy a reflexiós csúcs “szoknyája” elfedi a valóságos jeleket). Ezen időszak alatt legfeljebb csak olyan jeleket tud érzékelni, amelyek kiugranak a “szoknyából” (pl. egy reflexiós csúcs). A gyakorlatban a holtzóna a felbontóképesség többszöröse szokott lenni.

## **OTDR Mérések a BME-MHT fénytávközlés laborjában**

### **A MÉRÉS ESZKÖZEI:**

- HP 8146 optikai reflektometer (OTDR)
- 2 db 2 m-es, monomódusú patch cord
- 1 db 4 m-es monomódusú patch cord
- 6 km-es monomódusú hurok 3 km-es szakaszokból felépítve
- 18 km-es monomódusú hurok 3 km-es szakaszokból felépítve
- infrared szenzorkártya 1300 nm hullámhosszra

### **MÉRÉSI FELADATOK:**

- 1 Számolja ki a különböző impulzusszélességekhez tartozó holtzóna és felbontóképesség értékeket ( $w=10$  ns, 30 ns, 100 ns, 300 ns, 1  $\mu$ s és  $n_{gr} \approx 1.5$ ). A holtzóna számításánál vegye a felbontóképesség négyszeresét. Az eredményeket a 3. táblázatba írja be.
2. Az előző pontban kiszámított néhány értéket hasonlítsa össze a műszer beépített sugójában leírtakkal

3. Az 2. táblázat értékeit figyelembe véve számítsa ki a 1-es pontban megadott impulzus szélességekre, a visszavert fényteltjesítmény - kibocsátott fényteltjesítmény arányt ( $P_{bs}/P_{out}$ ) decibelben, a műszerhez kapcsolódó üvegszál bemenetének síkjában ( $Z = 0$ ) 1300 nm hullámhosszon. Az eredményeket a 3. táblázatba írja be. Elég csak egy impulzus szélességre ténylegesen kiszámolni, mert az impulzus szélességgel arányosan nő, vagy csökken (lásd az 5. képlet).

Ugyanezeket az értékeket számolja ki a másik hullámhosszra is. Hasonlítsa össze az eredményeket és kommentálja az eredményt

Hullámhossz	1300 nm	1550 nm
$\alpha$ [dB/km]	0.4	0.2
$\alpha_s$ [dB/km]	0.35	0.25
$\alpha_s^* [1/\text{km}] = 0.23 \alpha_s$ [dB/km]	0.0805	0.0575
$n$	1.485	1.485
$NA$	0.1	0.1
$T_s$	1	1
$S$	$9.8 \cdot 10^{-4}$	$9.8 \cdot 10^{-4}$

2. táblázat

4. Tételezzük fel, hogy a műszer szálba csatolt maximális kimenő fényteltjesítménye  $P_0 = 1 \text{ mW} = 0$  [dBm] valamint a  $NEP = -70$  [dBm]. Ezen értékeket írja be a 3. táblázat megfelelő rublikájába.

A eddig megadott és kiszámolt adatokból ( 2. táblázat ill. 3. Táblázat ) számolja ki a mérés dinamika tartalékát is ( $P_{din} [\text{dB}] = (P_0 [\text{dBm}] + P_{bs}(0)/P_0 [\text{dB}] - NEP [\text{dBm}]) / 2$ )

Ismételje meg a számítást  $n = 10000$  - es átlagolás esetére ( $NEP_{eff} = NEP / n^{0.5}$ ).

Hullámhossz	1300 nm					1550 nm				
$w (ns)$	10	30	100	300	1000	10	30	100	300	1000
felb. Képesség [m]										
holtzóna [m]										
$P_{bs}(0)/P_0$ [dB]										
$P_0$ [dBm]										
$NEP$ [dBm]										
$P_{din}$ [dB]										
$NEP_{eff}$ [dBm] n=10000										
$P_{din_{eff}}$ [dB] n=10000										
$L$ [m]										
$L_{eff}$ [m]										

3. táblázat

5. A dinamika tartalék értékének ismeretében számítsa ki a mérhető maximális szakaszhosszt a következő tényezők figyelembevételével:

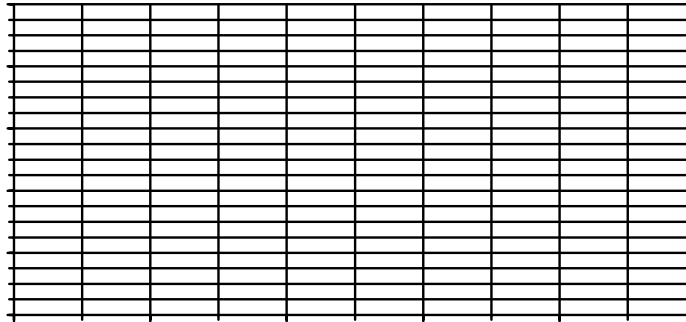
- a szál csillapítása ( Rayleigh szórás és abszorciós csillapítás együtt ) km-ként
- a szálhegesztések ill. visszahurkolások csillapítása ( átlagosan kb. 0.1 dB/km ).

Az eredményeket írja be a 3. táblázatba

Ismételje meg a számítást  $n = 10000$  - es átlagolás esetére ( $NEP_{eff} = NEP/n^{0.5}$ ).

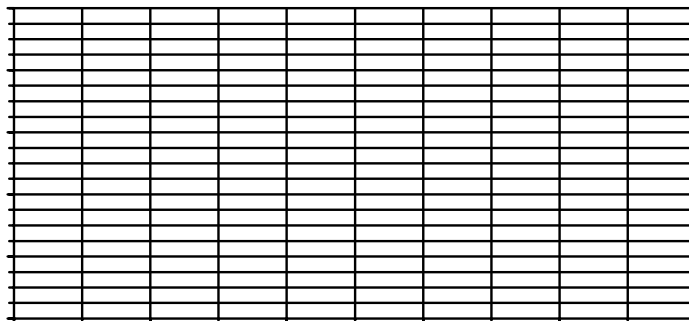
6. Kapcsolja be a műszert, ismerkedjen meg az alapvető funkciókkal, kezelőszervekkel. l.
7. Csatlakoztasson a műszer bemenetére egy 4 m hosszú patch cord szálát. A műszeren állítsa be a következő adatokat:
- hullámhossz:  $\lambda=1310$  nm
  - impulzushossz:  $w=10$  ns
  - startpozíció: 0 km
  - span: 2 km
  - átlagolási idő:  $n=5$  sec

Aktiválja lézert. Vigyázzon az üvegszál másik végébe belenézni tilos! Az infrared szenzorkártya segítségével ellenőrizze a szál végén, hogy a lézer világít-e. Markerek segítségével keresse meg, majd nagyítsa ki a szál végének megfelelő reflexiót és olvassa le a szál hosszát. Skálázza be a rácsot és rajzolja bele a képernyőn látott görbét. Írja oda a reflexiókhoz a távolságot és hogy mi az.

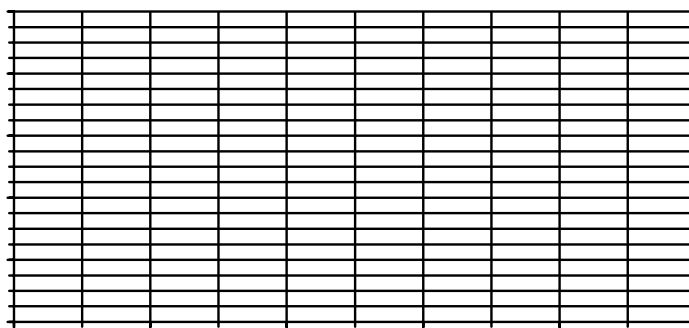


- 8. Tanulmányozza a labor falán elhelyezett tablón az egyetemek közötti optikai összeköttetés huzalozási rajzát. Kösse be a 7 km-es hurkot (hármás és négyes csatlakozó a fali fénykábel szekrényben), úgy hogy a hurok egyik vége szabadon maradjon. A műszeren állítsa be a következő adatokat:
    - hullámhossz:  $\lambda=1550$  nm
    - impulzushossz:  $w = 10$  ns
    - startpozíció: 0 km
    - span 7 km
    - átlagolási idő:  $n=5$  sec
- a) Aktiválja a lézert, majd keresse meg a domináns reflexiókat. A reflexiók helyének meghatározásával kövesse végig a fény útvonalát a 620-as labor, az R épület és a kertészeti egyetem között.
- b) Növelje meg az impulzus szélességet úgy, hogy a teljes 7 km-es szakaszon a zaj szintje fölé kerüljünk. Írja a rács fölé az impulzushossz határértékét. Rajzolja le a görbét. Írja bele a távolságokat és a beazonosított épületek neveit
- c) Határozza meg az egyes reflexiók helyeinél a csatlakozók csillapítását, illetve a szál kilométerenkénti csillapítását (valamelyik közbenső, reflexiók közti szakaszon mérve). Határozza meg a c) pont paramétereit 1300 nm-es hullámhosszon és hasonlítsa össze az eredményeket.





9. Ismételje meg a 8 pont méréseit a 18 km-es hurkon ( 9-es és 10-es csatlakozó ). Milyen furcsa jelenségeket tapasztal a fényimpulzus nyomon követése során?



#### **Ellenőrző kérdések:**

1. Adja meg a három optikai ablak hullámhosszát.
2. Mi a Rayleigh szórás jelenségének fizikai alapja?
3. Mi a Fresnel reflexió? Mekkora a tipikus értéke polírozott üvegszálnál?
4. Miként befolyásolja a mért szálcsillapítás értékét az abszorpciós csillapítás nagysága?
5. 1550 nm-en vagy 1300 nm-en lesz-e nagyobb a szálcsillapítás? Miért?
6. Milyen tényezőktől függ a felbontóképesség?
7. Mi a holtzóna fogalma?
8. Mikor léphet fel sugárzási veszteség?
9. Mi a dinamikatartomány definíciója?
10. Rajzolja fel az OTDR bloksémáját?

#### **Referenciák:**

- [1] Christian Hentschel "HP Fiber Optics Handbook", Hewlett Packard, Germany 1989, ISBN 3-9801677-0-4
- [2] Lajtha György, Szép Iván: "Fénytávközlő rendszerek és elemeik", Akadémiai kiadó, Budapest, 1987
- [3] Göran Einarsson: "Principles of Lightwave Communications", John Wiley&Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 1996