

## HÁLÓZATI PING-PONG

– avagy a fény sebességének számítógépes mérése

Szász Ágota

Bolyai Farkas Elméleti Líceum,  
Marosvásárhely, Románia

Néda Zoltán

Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar,  
Kolozsvár, Románia

„Billió mérföldekről jött e fény, ...  
Terek sötétjén lankadatlanul,  
S ki tudja mennyi évezté már.”

Tóth Árpád: *Lélektől lélekig*

Az itt felvázolt téma ötletét az sugallta, hogy még a szűkebb fizikusi környezetünkben is csak nagyon kevesen láttak fénysebesség-mérési kísérletet. A legtöbbben elhisszük az eredményt, és megelégszünk annyival, hogy ez egy rettentően nagy sebesség, aminek mérése nehézkes. Érdeemes azonban elgondolkodnunk azon, hogy a fénysebesség egy nagyon fontos fizikai mennyiség, amelynek döntő szerepe van a modern fizika logikájának felépítésében, a tér és az idő fizikai értelmezésében. Ezen mennyiség mérése lényeges ahhoz, hogy fizikai gondolkodásunkat szilárd alapokra helyezzük. Célunk egy egyszerű, könnyen, olcsón (bizonyos esetekben ingyen) és bárhol elvégezhető, korszerű fénysebesség-mérési módszer leírása, amelyet a számítógépeknél használt „ping” utasítás felhasználásával lehet megvalósítani. Az ötlet egy korábban publikált dolgozaton alapszik [1], amelyben azt írtuk le, hogy hogyan lehet mérni a PING utasítás felhasználásával az elektromágneses jelek terjedési sebességét hálózati kábeleken. A bemutatásra szánt módszer elvi szempontból is érdekes, ugyanis megtanít arra, hogy a mérést befolyásoló zaj sok esetben hasznos, és hozzásegít ahhoz, hogy akár a mérőberendezésünk érzékenysége (felbontóképessége) által megengedett értéknél pontosabb eredményt kapjunk. Amit bemutatunk, ahhoz hasonló, mintha egy jól reprodukálható milliszekundumos időintervallumot „homokórával” mérnénk. Ez a mérést befolyásoló szekundumos nagyságrendű zaj felhasználásával lehetséges úgy, hogy a mérést sokszor megismételjük, és az eredményeket megfelelő módon statisztikailag feldolgozzuk.

Módszerünk pontatlanabb a modern lézeres technikáknál, nagy értéke viszont az, hogy iskolai feltételek mellett is szemléletesen alkalmazható. A fény vagy általában az elektromágneses hullámok sebességének mérése ezzel az érdekes és tanulságos laboratóriumi kísérlettel jó alkalmat ad a középiskolás diákok kutatásba való bevonására, és a mérési adatok statisztikus feldolgozásának a megismerésére. Sok érdekes és még kihasználatlan eredményt lehet kapni a mikrohullámok terjedésére, törésére, illetve visszaverődésére vonatkozóan is. Kétféle mérést fogunk bemutatni, fénykábeleken, illetve vezeték nélküli (wireless) hálózaton kapott eredményeket tárgyalva.

### Mi a „ping” és mit tud?

A ping a legtöbb operációs rendszerben (Windows, Linux, Unix) működő egyszerű utasítás, amellyel egy másik számítógép hálózati elérhetőségét tesztelik. A ping utasítás a következőképpen használható: *ping IP-szám (vagy számítógép Internet neve) [opciók]*.

A *ping 172.22.22.117 [opciók]* 64 byte-os csomagokat küld el a hálózaton keresztül a 172.22.22.117 IP-számmal rendelkező gépnek.

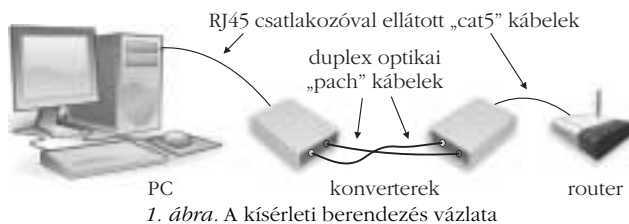
Ha a csomag megérkezik, a másik gép válaszol, és megjelenik, hogy mennyi a csomag kétirányú átfutási ideje a két számítógép között. Egy lehetséges válasz például: *64 bytes from 172.22.22.117: icmp\_seq=1 ttl=64 time=0.376 ms.*

A pinggel történő időmérés pontossága mikroszekundum a Linux operációs rendszer alatt és milliszekundum a Windows operációs rendszerben. Megemlítenéd, hogy Windows alatt létezik egy ingyenesen letölthető program (hrping [3]), amely szintén mikroszekundumos pontossággal méri az átfutási időt.

A ping utasítást rengeteg hasznos opcióval használhatjuk (egy teljes leírásra LINUX alatt használjuk a *man ping* utasítást). Néhány számunkra hasznos opciót a következő példával mutatunk be. A *ping 172.22.22.117 -c N -i dt -s w -p ff* típusú utasításban például *N*-nel megadjuk a küldött csomagok számát, *dt*-vel a küldések közti időintervallum, *w*-vel a csomag nagyságát (*s*-ban, illetve *byte*-ban kifejezve) és *ff*-fel a küldött csomag struktúráját. Számos más opció is létezik, amelyek segítségével majdnem mindent lehet állítani.

### Hogyan lehet „ping”-gel fénysebességet mérni?

A kísérlet során megmérjük a küldött jel oda-vissza útjának az átlagos időtartamát. Optikai szál vagy vezeték nélküli lokális hálózatot használunk számítógépről pingelve egy lokális routert (*1. ábra*). Különböző hosszúságú kábeleken (illetve távolságokon a vezeték nélküli hálózatok esetén) nagyon sok pingelést végzünk, és relatív méréseken keresztül próbáljuk a fény, illetve mikrohullámok sebességét megbe-



1. ábra. A kísérleti berendezés vázlatja

csülni. Mivel a fénykábelek és a vezeték nélküli hálózat esetén is aránylag kis távolságokon dolgozunk, a jel által a kábelekben megtett út oda-vissza ideje  $1 \mu\text{s}$  alatt van. Ezért, ha ideális számítógépekkel, hálózati kártyákkal és routerekkel dolgozánk, ilyen rövid távolságokon nem lenne kimutatható időkülönbség. Segít bennünket azonban a rendszerben levő zaj, ami a gépi válaszokhoz tartozó kis késleltetések sokaságából ered. A zaj véletlenszerűen tologatja a ping válaszok idejét, és az ennek megfelelő statisztikából sikerül megbecsülnünk a ping felbontóképességénél kisebb időintervallumokat is. Hogy jobban lássuk, hogyan is történik ez, tekintsünk egy konkrét példát. Tételezzük fel, hogy egy adott úthosszra a ping válasz  $10 \mu\text{s}$  lenne. Az idő legnagyobb része a hálózati kártyán és a routeren történő késleltetéseknek tulajdonítható, és csak egy nagyon kis rész (általában  $1 \mu\text{s}$ -nál jóval kisebb) az, ami az elektromágneses hullámok véges terjedési sebességéből ered. Mivel a véges terjedési sebességből adódó késés mindig rövidebb  $1 \mu\text{s}$ -nál (a ping felbontóképességénél), zaj hiányában mindig ugyanazt a  $10 \mu\text{s}$  értéket mérnénk, és ezáltal a véges terjedési sebességre nem tudnánk következtetni. A rendszerben levő zaj, ami szintén  $\mu\text{s}$  nagyságrendű, véletlenszerűen tologatja a mért értéket.

Ha elvégzünk 1000 pingelést ugyanolyan körülmények között, azt kaphatjuk, például, hogy 125 esetben  $9 \mu\text{s}$ , 500 esetben  $10 \mu\text{s}$ , 375 esetben meg  $11 \mu\text{s}$  a válaszidő. Feltételezve, hogy a zaj statisztikai tulajdonságai a kísérlet során változatlanok, a mérés arra fog utalni, hogy a zajos rendszerben a ping átlagos átfutási ideje

$$\frac{9 \cdot 125 + 10 \cdot 500 + 11 \cdot 375}{1000} = 10,25 \mu\text{s}.$$

2. ábra. Lokális hálózat optikai szálakkal



Ha feltételezzük, hogy a rendszerben levő zaj statisztikája nem változik a különböző úthosszak esetén, a mérés sokszori megismétlésével megbecsülhetővé válik a ping felbontása alatti időkülönbség is, és ezáltal mérhető az elektromágneses hullámok véges terjedési sebessége.

Rövid idő alatt nagyszámú pingelést végezhetünk (például 20 perc alatt akár 100 000 pinget) és ezáltal jó statisztikával akár  $50 \text{ ns}$  nagyságrendű időkülönbségeket is megbízhatóan fel lehet oldani. A pingek eloszlása a valóságban egy sokkal tágabb intervallumban történik, mint ahogy a fenti példán szemléltettük, de a módszer alkalmazhatósága ugyanaz marad.

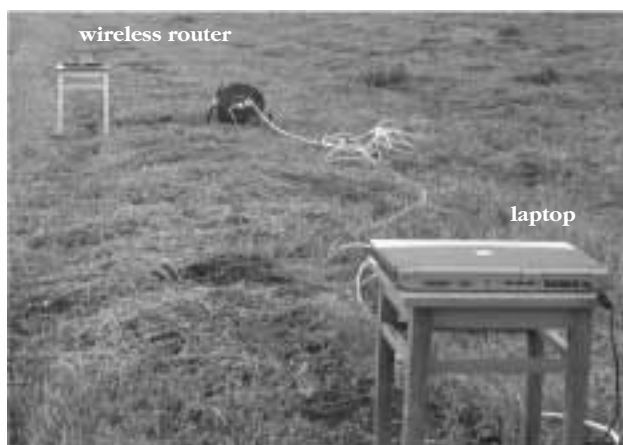
## Kísérleti berendezések

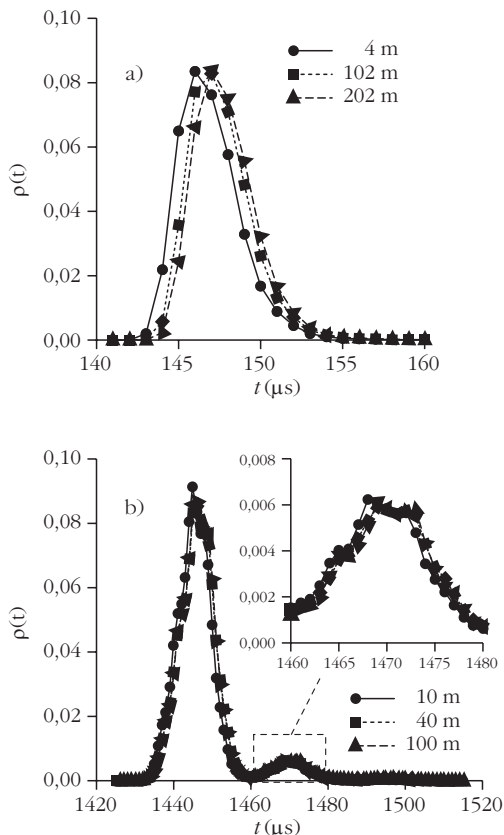
A kísérletek gyakorlati kivitelezéséhez egy LINUX operációs rendszer alatt működő PC-t és egy routert használtunk. Fénykábelekben (2. ábra), illetve vezeték nélküli hálózatokon mértünk (3. ábra). A LINUX operációs rendszer nagy előnye, hogy jól ellenőrizhető, mi történik a rendszerben, és a számítógép „lebutítható” annyira, hogy csak az alap operációs rendszer és a ping utasítás fusson a gépen. Ezáltal a különböző hosszúságú utakon történő mérésekre ugyanazon késleltetések és zajok jelennek meg. A ping utasítást ugyanakkor egy kicsit átírtuk, hogy a kimeneti adat csak a válaszidő legyen mikroszekundumban. A futtatható programunk letölthető a tanulmányunknak szentelt honlapról [4].

Fénykábelek esetén egymódusú, lépcsős indexű szálakat használtunk, amelynek a törésmutatóját a gyártó által kiadott dokumentumból vettük ( $1300 \text{ nm}$ -es infravörös fényre:  $n = 1,477$ ). Különböző hosszúságú szálakkal dolgoztunk (a. oda:  $2 \text{ m}$ , vissza  $2 \text{ m}$ ; b. oda:  $2 \text{ m}$ , vissza  $100 \text{ m}$ ; c. oda:  $2 \text{ m}$ , vissza  $200 \text{ m}$ ).

Vezeték nélküli (wireless) hálózatokon egy LINUX alatt futó EMACHINE M5305 (AMD Athlon 2400+) laptop számítógépet a PCMCIA PB6-2086 hálózati kártyával használtuk. A router egy SMC 2404WBR volt, és az általuk kialakított vezeték nélküli hálózat a standard  $802.11\text{b}$  protokoll alatt a  $2,4 \text{ GHz}$  mikrohullámok

3. ábra. Lokális vezeték nélküli hálózat





4. ábra. A ping válaszjelek időbeli eloszlásfüggvénye. A felső, a) ábrán a fénykábelek, az alsó, b) ábrán a vezeték nélküli hálózatok mérési eredményei láthatók.

tartományában működött. Hogy a mikrohullámok falakról történő visszaverődéseit kiküszöböljük, a méréseket egy mezőn végeztük el (3. ábra), a routert a számítógéptől 5, 10, és 50 m-re elhelyezve.

Mindkét mérés esetén minden távolságon legalább  $10^6$  számú ping válaszidejét mértük, és ezek statisztikájából próbáltuk meghatározni az elektromágneses hullámok terjedési sebességét. Az eredmények feldolgozásához többféle statisztikai módszert alkalmaztunk, helyhiány miatt itt csak a legegyszerűbbet ismertetjük. Ezen egyszerű módszer lényege az, hogy egy adott válaszidő intervallumban  $[t_{\min}, t_{\max}]$  meghatározzuk a mért pingek átlagos válaszidejét. Ennek a különböző úthosszakra történő változásából következtetünk az adott elektromágneses hullám terjedési sebességére.

## A mérési eredmények

Az optikai szálakban történő mérések sokkalta jobb és tisztább eredményt szolgáltattak, mint a vezeték nélküli hálózatokon mért értékek. A válaszidők egy nagyságrenddel kisebbek voltak, és ezek eloszlása is sokkalta „tisztább” volt fénykábelek esetén. Ezért hasonló statisztikai feldolgozással a fénykábelekben kapott értékek sokkal jobb fénysebességértéket szolgáltattak. Vezeték nélküli hálózatok esetén a ping válaszidők eloszlásának alakja változik annak függvé-

nyében is, hogy hol mérünk, és ezáltal milyen visszaverődések vannak. Habár a fénysebesség meghatározásának szempontjából ez hátrányt jelent, mégis előnyös lehet a mikrohullámok néhány terjedési tulajdonságának tanulmányozására.

A 4. ábrán szemléltetjük a válaszidők eloszlását a fénykábelekben és a vezeték nélküli hálózatokon való mérések esetén. Fénykábelek esetén a 4, 102 és 202 m-es oda-vissza utakra a válaszidők eloszlásfüggvényét (annak a valószínűségét, hogy egy adott válaszidőt mérjünk) pontokkal, négyzetekkel, illetve háromszögekkel ábráztuk (4.a ábra). A hisztogramból jól kivehető a különböző hosszúságú kábelekben mért eloszlások közötti eltolódások. A vezeték nélküli hálózatokban kapott válaszidők eloszlása a 10, 40 és 100 m-es oda-vissza távolságokra csak sokkal nagyobb nagyítás esetén megkülönböztethető (a 4.b ábrán levő kinagyított tartomány).

Fénykábelek esetén többféle  $[t_{\min}, t_{\max}]$  intervallumot tekintve, és összehasonlítva a 4, 102 és 202 m-es távolságokon kapott átlagos időkülönbségeket [4] a  $v \approx 2,07 \cdot 10^8$  m/s sebesség adódik a fény optikai szálbeli terjedési sebességére. Figyelembe véve az optikai szál törésmutatóját ( $n = 1,477$ ), a légüres térben mért fénysebességre  $c = 3,05 \cdot 10^8$  m/s-t kapunk ami 2%-osnál kisebb relatív hibával megközelíti a manapság elfogadott értéket!

Vezeték nélküli hálózatok esetén, amint már jeleztük, az eredmények jóval szerényebbek. Az adatokat hasonlóan feldolgozva, többféle  $[t_{\min}, t_{\max}]$  intervallumot tekintve [4], a mikrohullámok terjedési sebességére levegőben a  $c = 2,74 \cdot 10^8$  m/s átlagos értéket kaptuk.

## Összefoglalás

A számítógépeknél elterjedten használt „ping” utasítás segítségével olcsón és látványosan megbecsülhető az elektromágneses hullámok terjedési sebessége. Fénykábelek használva eredményeink 2 százalékos pontossággal, vezeték nélküli hálózatok esetében nagyságrendileg jól megközelítik a fénysebességre elfogadott értéket [2] ( $c \approx 299792,5$  km/s). A bemutatott módszer elvi szempontból is értékes lehet, ugyanis szépen illusztrálja, hogy a mérési pontosság növeléséhez hasznos lehet a zaj. Megfelelő statisztika mellett a zaj segítségével elérhető, hogy a berendezés felbontóképességénél jóval pontosabb méréseket végezzünk. Az általunk végzett kísérletek során kiderült, hogy az itt leírt módszer kitűnően alkalmas a mikrohullámok terjedési tulajdonságainak a vizsgálatára is.

## Irodalom

1. J. Lepak, M. Crescimanno, Speed of light measurement using ping. physics/0201053 és American Physical Society – Meeting Abstracts (2002) abstract B2.009.
2. T.G. Blaney, C.C. Bradley, G.J. Edwards, B.W. Jolliffe, D.J.E. Knight, W.R.C. Rowley, K.C. Shotton, P. T. Woods, *Nature* 251 (06 September 1974) 46
3. <http://www.cfos.de/ping/ping.htm>
4. <http://www.phys.ubbcluj.ro/~znedu/ping.html>