

# Hírközlési üvegszálak amplitúdómodulációs sáv szélességéről

VESZELY GYULA

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék  
veszely@evt.bme.hu

Lektorált

**Kulcsszavak:** AM modulációs sáv szélesség, kromatikus diszperzió, harmadrendű diszperziós paraméter

Hírközlési üvegszálak csatornkapacitásának meghatározásában alapvető munkát végzett Marcuse. Eredményei impulzusátvitelre vonatkoznak, amikor a sáv szélesség bevezetése felesleges, mert a bitsebesség közvetlenül az impulzus kiszélesedés alapján számítható. Az általa levezetett közbenső formula azonban kiindulásul szolgálhat AM modulációs sáv szélesség meghatározásában is. Ennek alapján számítottak átviteli karakterisztikát, és pedig a lézer sok longitudinális módusának figyelembevételével. Az alábbiakban megmutatjuk, hogy egy módus esetén az átviteli karakterisztikából általános AM modulációs sáv szélesség formula vezethető le, amely speciális esetekben visszaadja az ismert eredményeket. Diagramot adunk a sáv szélességre, amely a harmadrendű diszperziós paraméter figyelembevételével készült.

## 1. Bevezetés

Napjainkban az analóg száloptikai összeköttetések egyre terjedő alkalmazásra találnak a mikrohullámú fotonikában. Ezen a területen belül különleges érdeklődés mutatkozik az úgynevezett *Radio-over-Fiber* (RoF) rendszerek iránt, amelyekben a száloptikai összeköttetések és a fotonikai komponensek kis veszteségét és egyéb speciális tulajdonságait használják ki rádiójelek átvitelére és szétosztására a feldolgozó csomópont és a távoli antenna között. Ezek az igények vezettek az AM modulációs sáv szélesség újbóli vizsgálatára.

Vizsgálataink az 1. ábrán látható rendszerre vonatkoznak. Itt a „lézer” ideális monokromatikus lézert jelent. A lézert először az  $a(t)$  stacionárius sztochasztikus időfüggvény, majd a hasznos információt hordozó  $\sqrt{s(t)}$  időfüggvény amplitúdóban modulálja. Keressük a  $z$  távolságban fellépő jelteljesítmény sokaságon vett átlagát.

## 2. A kimeneti jel meghatározása

Ebben a szakaszban vázlatosan ismertetjük [1] lépéseit a közbenső formuláig.

A lézerekre jellemző amplitúdó fluktuáció az alábbi időfüggvénnyel írható le:

$$\varphi_0(t) = a(t)e^{j\omega_0 t}, \quad (1)$$

ahol  $a(t)$  stacionárius sztochasztikus időfüggvény,  $\omega_0$  a névleges frekvencia.

Levezethető, hogy  $\varphi_0$  spektrumának autokorrelációs függvénye

$$\langle \Phi_0(\omega)\Phi_0^*(\omega') \rangle = 2\pi\Phi_{aa}(\omega_0 - \omega')\delta(\omega - \omega'), \quad (2)$$

ahol  $\Phi_{aa}$   $a(t)$  teljesítményspektruma, ezt a harangalakú görbe jól ismert a lézerek specifikációjából.  $\langle \rangle$  sokaságon vett átlagot jelöl. (2) azt jelenti, hogy a különböző frekvenciájú komponensek korrelálatlanok és erős-

ségüket a teljesítményspektrumban az  $\omega_0$  névleges lézerfrekvenciától vett távolságuk határozza meg.

A moduláló jel teljesítményét  $s(t)$ -vel, négyzetgyökének spektrumát  $S(\omega)$ -val fogjuk jelölni. Optikai rendszerekben általában teljesítménymodulációt alkalmaznak. Ennek megfelelően a modulált vivő teljesítmény-időfüggvénye

$$p(t) = s(t)p_0(t), \quad (3)$$

$$\text{ahol } p_0(t) = |\varphi_0(t)|^2.$$

Az átlagos jel a szál  $z$  hosszúságú szakaszának beutása után (a csillapítást zérusnak tekintjük):

$$\langle p(z, t) \rangle = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{aa} \quad (4)$$

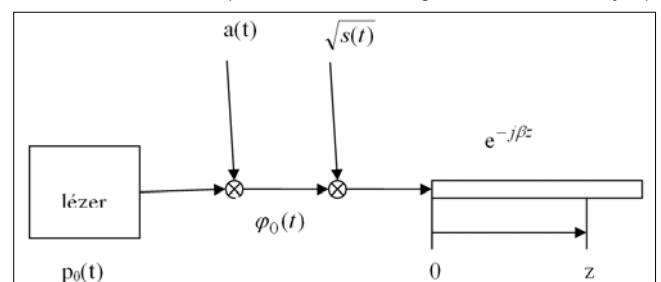
$$(\omega_0 - \omega'')S(\omega - \omega'')S^*(\omega' - \omega'')e^{j[(\omega - \omega')t - (\beta - \beta')z]} d\omega d\omega' d\omega''$$

ahol  $\beta$  a fázistényező az  $\omega$  helyen, illetve  $\beta'$  a fázistényező az  $\omega'$  helyen. A válasz időfüggvényt tehát a forrás amplitúdó-fluktuációja, a jel spektruma és a fázistényező frekvenciafüggése határozza meg.

Mint ahogy az  $\omega$  és  $\omega'$  szerinti integrálok egymás konjugáltjai, ez a kettős integrál (az integrálok előtt álló szorzótényezővel együtt) így is írható:

$$I(t, \omega'') = \left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega - \omega'')e^{-j\beta z} e^{j\omega t} d\omega \right|^2. \quad (5)$$

1. ábra A vizsgált rendszer blokk-sémája (a kábelt veszteségmentesnek tekintjük)



Az (5) szemléletes jelentése az alábbi:

$S(\omega - \omega'')$  a moduláló jel négyzetgyökének spektruma az  $\omega''$  köré helyezve. Ezt a spektrumot az  $e^{-j\beta(\omega)z}$  átviteli karakterisztika módosítja. Az integrál inverz Fourier-transzformáltat jelent, tehát  $I(t, \omega'')$  annak a  $z$  távolságban fellépő időfüggvénynek a négyzete, amelyet a moduláló jel négyzetgyöke spektrumának  $\omega''$  köré elhelyezett része hozott létre. A teljes kimeneti időfüggvény úgy adódik, hogy az összes  $\omega''$  köré elhelyezzük az  $S$  spektrumot és a létrejött időfüggvényeket összeadjuk.

Különösen szemléletes a helyzet, ha a lézer nulla vonalszélességű (monokromatikus). Ekkor

$$\Phi_{aa}(\omega_0 - \omega'') = P_0 \delta(\omega_0 - \omega'') = P_0 \delta(\omega'' - \omega_0),$$

ahol  $P_0$  a lézer összteljesítménye. Ilyenkor (4)-ben az  $\omega''$  szerinti integrál hatása az lesz, hogy (5)-ben  $\omega''$  helyett  $\omega_0$ -t kell írni, így

$$\langle p(z, t) \rangle = I(t, \omega_0), \quad (6)$$

vagyis a kimeneti időfüggvényt a lézer frekvenciája köré helyezett és az  $e^{-j\beta(\omega)z}$  átviteli karakterisztikával módosított bemeneti spektrum határozza meg.

Az analitikus kiértékelhetőség érdekében a fázistényezőt az  $\omega_0$  névleges vivőfrekvencián másodfokú Taylor-polinommal közelítjük.

$$\begin{aligned} \beta(\omega) &\approx \beta_0 + \dot{\beta}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \ddot{\beta}(\omega - \omega_0)^2, \\ \beta(\omega') &\approx \beta_0 + \dot{\beta}(\omega' - \omega_0) + \frac{1}{2} \ddot{\beta}(\omega' - \omega_0)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{Itt } \beta_0 = \beta(\omega_0), \quad \dot{\beta} = \left. \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right|_{\omega_0}, \quad \ddot{\beta} = \left. \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right|_{\omega_0}$$

(4) a Marcuse által nyert közbelső eredmény, melynek felhasználásával meghatározta az impulzus alakváltozását.

### 3. Átviteli karakterisztika meghatározása

Ugyancsak (4)-ből kiindulva [2]-ben meghatározták az AM modulációs frekvenciára vonatkozó átviteli karakterisztikát az alábbiak szerint.

Legyen az optikai vivőt amplitúdóban moduláló jel

$$s(t) = A(1 + m \cos \Omega t) = A + \frac{Am}{2} e^{j\Omega t} + \frac{Am}{2} e^{-j\Omega t}, \quad (8)$$

$$\text{azaz } \sqrt{s(t)} = \sqrt{A(1 + m \cos \Omega t)} \quad (9)$$

Ezt a periódikus jelet Fourier-sorba fejtjük:

$$\sqrt{s(t)} = \sqrt{A} \sum_{r=0}^{\infty} C_r \cos r\Omega t. \quad (10)$$

Ha az  $m$  modulációs index kicsi, akkor elegendő az alapharmonikust figyelembe venni:

$$\sqrt{s(t)} = \sqrt{A} \left( C_0 + \frac{C_1}{2} e^{j\Omega t} + \frac{C_1}{2} e^{-j\Omega t} \right). \quad (11)$$

Ennek spektruma (12):

$$S(\omega) = 2\pi \sqrt{A} \left[ C_0 \delta(\omega) + \frac{1}{2} C_1 \delta(\omega - \Omega) + \frac{1}{2} C_1 \delta(\omega + \Omega) \right]$$

A fluktuáció teljesítményspektrumát Lorentz-függvény szerintinek vesszük:

$$\Phi_{aa} = \frac{P_0}{\pi} \frac{w/2}{\omega^2 + (w/2)^2}, \quad (13)$$

ahol  $w$  a teljes félérték szélesség,  $P_0$  a forrás összteljesítménye. Fentiek behelyettesítésével (4) az alábbi eredményt adja:

$$\langle p(z, t) \rangle = 2P_0 A C_0 C_1 e^{-\frac{j\beta w \Omega z}{2}} \cos \frac{\ddot{\beta} \Omega^2 z}{2} \cos(\Omega t - \dot{\beta} \Omega z) \quad (14)$$

A  $\cos \Omega(t - \dot{\beta} z)$  azt jelenti, hogy a moduláló jel csoportsebességgel halad. Amplitúdója  $z$  függvényében változik a két szorzótényezőnek megfelelően.

Definiálhatunk egy, a moduláló frekvenciára vonatkozó amplitúdó-karakterisztikát:

$$H(\Omega) =$$

a csoportsebességgel haladó moduláló koszinusz amplitúdója a  $z$  helyen  
a moduláló koszinusz amplitúdója a nulla helyen

$$H(\Omega) = \frac{\langle p(z) \rangle}{A m} = \frac{2P_0 C_0 C_1}{m} e^{-\frac{j\beta w \Omega z}{2}} \left| \cos \frac{\ddot{\beta} \Omega^2 z}{2} \right|. \quad (15)$$

(15)-ben az exponenciális szorzó az optikai forrás véges vonalszélességének hatása ( $w=0$  esetén ez a tényező 1-et ad). A  $z_k = 2/(\ddot{\beta} w \Omega)$  távolságot, ahol ez a tényező  $e$ -ad részére csökken, koherenciahossznak nevezhetjük. A  $\cos$ -os szorzó viszont a két rf. oldalsáv elnyomását vagy fadingjét fejezi ki, amit az oldalsávok futásidő-különbsősége okoz. (Ez monokromatikus fényforrás esetén elemi úton is számítható [4].) A  $\cos$ -os szorzóra a térbeli periódushossz (hullámhossz) a jellemző. Ez az a  $z$  távolság, amire a  $\cos$  argumentuma  $2\pi$  lesz.

### 4. Új eredmények

A most következő részben e cikk írójának eredményeit foglaljuk össze.

Adott  $z$ -nél az exponenciális által definiált koherenciahosszat és a térbeli periódushossz negyedét (ekkor a  $\cos$  zérus) kell összehasonlítani.

$$\text{a.) Ha } \frac{2}{\ddot{\beta} w \Omega} \gg \frac{2}{\ddot{\beta} \Omega^2}, \text{ azaz } \frac{\Omega}{w} \gg \frac{\pi}{2},$$

tehát a moduláló frekvencia sokkal nagyobb a jelforrás spektrális szélességénél, akkor a  $\cos$  határozza meg a sáv szélességet. Félértékkel definiálva

$$\frac{\ddot{\beta} \Omega^2 z}{2} = \frac{\pi}{3}, \quad \Delta \Omega = \sqrt{\frac{2\pi}{3\ddot{\beta} z}}, \quad (16)$$

azaz a sáv szélesség a távolság négyzetgyökével csökken. (16) ismert eredmény, egy közelítő levezetése megtalálható például [4]-ban.

b.) Ha az egyenlőtlenségjel fordított, akkor az exponenciális szorzó határozza meg a sáv szélességet.

Félmaximummal definiálva

$$\frac{\ddot{\beta} w \Omega z}{2} = \ln 2, \quad \Delta \Omega = \frac{2 \ln 2}{\ddot{\beta} w z}, \quad (17)$$

azaz a sáv szélesség a távolsággal csökken.

(17) fizikailag nyilvánvaló, jól ismert eredmény, amely a futási idő frekvenciafüggésén alapul. Az optikai forrás minden frekvenciájú komponense más és más futási idővel szállítja a moduláló koszinuszt, ez az oka az amplitudó csökkenésének.

Általános esetben bevezetve a

$$K = \frac{\beta w^2 z}{2} \text{ and } x = \frac{\Delta\Omega}{w} \quad (18)$$

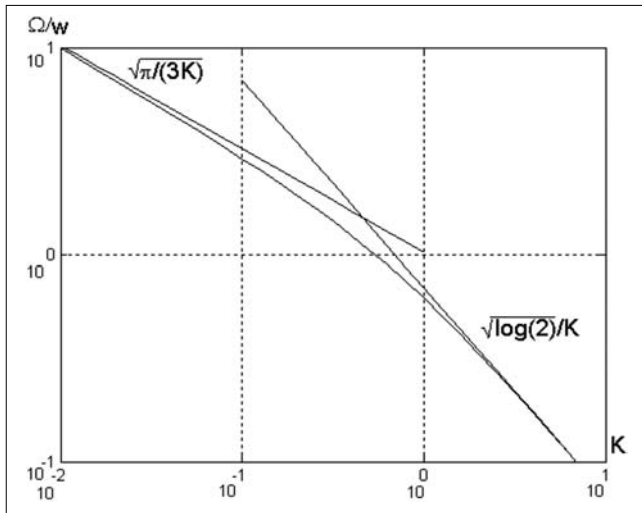
dimenziótlan mennyiségeket, (15) az alábbi transzcendens egyenletet adja a félmaximum sávszélességre:

$$e^{-Kx} |\cos Kx^2| = \frac{1}{2} \quad (19)$$

(19) megoldását a két aszimptotával a 2. ábrán mutatjuk be.

2. ábra

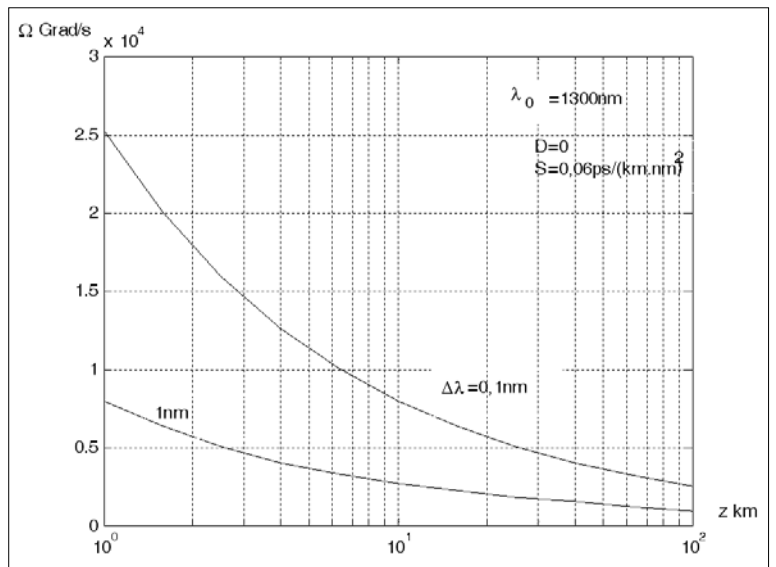
Az optikai forrás vonalszélességére normált AM modulációs sávszélesség a K paraméter függvényében



Az aszimptoták metszéspontját ( $K \approx 0,46$ ) úgy tekinthetjük, mint a két közelítés alkalmazhatósági határát. A maximális relatív hiba 26%.

A K számot, amely a kábel diszperziós együtthatójától, az optikai forrás vonalszélességétől és a kábel hosszától függ, rendszerparaméternek tekinthetjük. Az 1. táblázatban bemutatjuk a sávszélesség számítását kétféle lézer esetén. A névleges hullámhossz 1,5 μm, a kábelhossz 1 km.

A 3. ábrán a gyakorlatban kényelmesebben használható görbesereget mutatunk be.



4. ábra

AM modulációs sávszélesség Grad/s-ban a km-ben adott kábelhossz függvényében,  $\lambda_0 = 1,3 \mu\text{m}$ ,  $D=0$ ,  $S=0,060 \text{ ps}/(\text{km.nm}^2)$

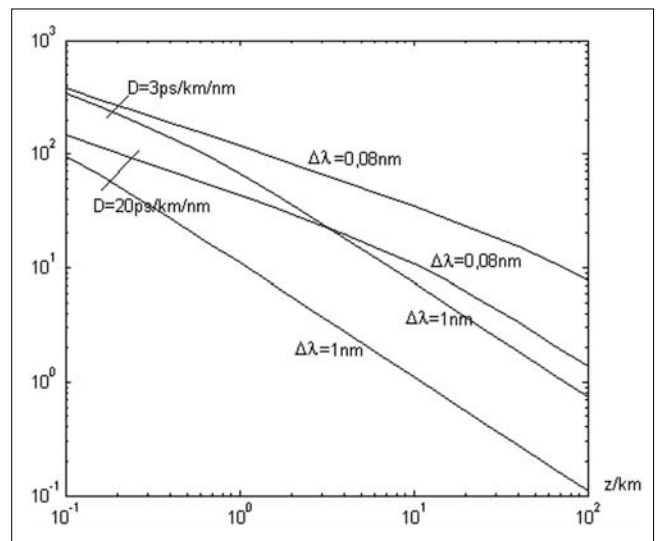
Érdekes, hogy az integrálás gaussi fluktuáció teljesítményspektrum esetén is elvégezhető.

Ekkor (19) helyett az alábbi egyenletet nyerjük:

$$e^{-K^2 x^2} \cos Kx^2 = \frac{1}{2} \quad (20)$$

A jobboldali aszimptota most is (17) formájú, de a számlálóban  $2\ln 2$  helyett  $2\sqrt{\ln 2}$  áll.

A fenti megfontolások érvényüket veszítik, ha a D másodrendű diszperziós paraméter zérus. Ekkor (17)-ben harmadfokú Taylor-polinomig kell elmennünk és ilyenkor (4) már nem integrálható ki analitikusan.



3. ábra

Az AM modulációs sávszélesség GHz-ben a km-ben mért kábelhossz függvényében.

A paraméterek a D kromatikus diszperziós együttható és a lézer  $\Delta\lambda$  vonalszélessége.

lézer	$\Delta\lambda$ /nm	w/Grad/s	D/ps/km/nm	$\beta$ /s <sup>2</sup> /m	K	$\Delta\Omega/w$	$\Delta\Omega$ /Grad/s
egy frekv.	0,08	67	20	$2,38 \cdot 10^{-26}$	0,054	4,09	274
standard	1	838	20	$2,38 \cdot 10^{-26}$	8,38	0,082	69,1

1. táblázat

A sávszélesség számítása kétféle lézer esetén

A numerikus integrálás eredményeként kapott modulációs sávszélességet a  $D=0$  legérdekesebb esetre balra, a 4. ábrán mutatjuk be. Ilyen extrém nagy sávszélesség a gyakorlatban nem lehetséges az egyéb (elsősorban polarizációs módus diszperzió) hatások miatt.

## 5. Összefoglalás

Egymódusú szálakra általános modulációs sávszélességformulát adtunk meg. Bevezettünk egy rendszerparamétert, amely a kromatikus diszperziós együtthatót, az optikai forrás vonalszélességét és a kábel hosszát tartalmazza. Ebből a vonalszélességre vonatkoztatott AM modulációs sávszélesség meghatározható.

### Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki Paksy Géza szerkesztő úrnak a gondolatébresztő megbeszélésekért.

### Irodalom

- [1] D. Marcuse, „Pulse distortion in single mode fibers”, Appl. Opt., Vol. 19., 1980. pp.1653–1660.
- [2] J. Capmany, A. Martínez, B. Ortega, D. Pastor, „Transfer function of analog fiber-optic systems driven by Fabry-Perot lasers”, Journal Opt. Soc. Am. B., Vol. 22., 2005. pp.2099–2106.
- [3] Gy. Veszely, „Transfer function of analog fiber-optic systems driven by Fabry-Perot lasers: comment”, Journal Opt. Soc. Am. B., Vol. 23., 2006. p.2018.
- [4] W. van Etten, J. van der Plaats, Fundamentals of Optical Fiber Communications, Prentice-Hall, 1991.

## Hírek

A **Magyar Telekom** üzleti stratégiájának szerves részévé vált az internettechnológiára és a szélessávra épülő szolgáltatások bővítése. A vállalat az IP-gerinchálózatának megújítása keretében **két Cisco CRS-1 típusú terabitroutert helyezett üzembe**, amelyek lehetővé teszik a hálózat megbízhatóságának jelentős növelését és a jövőben jelentkező kapacitásigények kiszolgálását. Az innovatív Cisco-eszközök fordulópontot jelentenek a cég technológiai fejlesztésében. Az egyedülálló router- és transzporttechnológiát a Magyar Telekom elsőként alkalmazza Magyarországon. A Cisco IP NGN (Cisco IP Next Generation Network, új generációs IP-hálózat) architektúrájának bevezetésével lehetőség nyílik az interneten túlmutató alkalmazások kiszolgálására és a távközlési infrastruktúra megújítására, az alkalmazások és előfizetők egyedi kezelésén alapuló szolgáltatások fejlesztésére és bevezetésére. Az IP NGN struktúra nyitott platformot kínál a szolgáltatások differenciálására: a videón/IPTV-n kívül integrált médiaszolgáltatások és értéknövelt szolgáltatások (pl. VoIP, interaktív játékok, a digitális tartalomhoz való hozzáférés: fénykép-könyvtár, on-demand filmek) is elérhetővé válnak. Mindemellett a vállalati felhasználók részéről egyre nő az igény még nagyobb rendelkezésre állást nyújtó virtuális magánhálózatok iránt (IP VPN), amelyek biztosítása csak az olyan kiesés nélküli működést garantáló – azaz működés közben frissíthető és szervizelhető – készülékekkel valósítható meg, mint a CRS-1.

Az **Oracle új világrekordot jelentett be** az SAP szabványos, kétrétegű értékesítési és disztribúciós (Sales and Distribution, SD) alkalmazás-sebességpróbáján négy- és nyolcprocesszoros hardverplatformokon az SAP ERP 2005 alkalmazással. Az új csúcs jól érzékelteti az Oracle IBM platformokon megvalósítandó nagy teljesítmény és méretezhetőség érdekében végzett munkáját. Az IBM p 570-es két kétmagos, 4,7 GHz órajelű POWER6 processzorra szerelt rendszeren működő AIX 5L 5.3 és SAP ERP 2005 platformon az Oracle Database 10g 2. változata 2035 felhasználót szolgált ki az SAP SD sebességpróbán, és ezzel világrekordot állított be a négymagos konfigurációk között. A 10g egy második világrekordot is felállított, nevezetesen hasonló hardverrendszerrel nyolcmagos konfiguráció esetén 4010 felhasználót szolgált ki az SAP SD-sebességpróbán. Ezen eredmények azt bizonyítják, hogy az Oracle Database 10g adatbázis-kezelő 2. változata a konfiguráció magjainak növelésével kiváló lineáris méretezhetőséget biztosít. Emellett a teszteredmények megerősítették a 10g eddig is meglévő elsőségét a teljesítmény és a méretezhetőség tekintetében, különös tekintettel az SAP alkalmazásokra, az IBM hardverrendszere pedig ismét bizonyította kiválóságát.