

# Sztochasztikus csillapítás modellezése N-állapotú Markov-modellel műholdas földi mozgó rádiócsatornán

HÉDER BALÁZS, BITÓ JÁNOS

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Szélessávú Hírközlő Rendszerek Tanszék  
balazs@docs.mht.bme.hu

Lektorált

**Kulcsszavak:** többutas terjedés, csillapítás mérés, N-állapotú Markov-lánc modell, idősor generálás, első rendű statisztika, fading

A műholdas földi mozgó csatornán a hullámterjedést jelentősen befolyásolja az árnyékolás és a környezettől nagymértékben függő, több utas terjedésből származó fading. Az összeköttetések pontos méretezésének érdekében fontos ismerni a várható csillapítás éves statisztikáját. A bemutatott N-állapotú Markov modell segítségével az ilyen jellegű összeköttetéseken fellépő csillapítás első és másodrendű statisztikája megbecsülhető.

## 1. Bevezetés

Korábbi vizsgálataink során egy mikrohullámú összeköttetéseken fellépő csillapítás idősor generálására alkalmas N-állapotú Markov-lánc modell kidolgozásával foglalkoztunk [1]. A modell paraméterei tetszőleges rendelkezésre álló mért vételi jelszint adatokból meghatározhatók. A generált idősorok első és másodrendű statisztikai statisztikái jól közelítik a kiindulási adatsor megfelelő statisztikáit.

Módszerünk alkalmas a műholdas földi mozgó rádiócsatornán fellépő többutas terjedésből és árnyékolásból származó sztochasztikus csillapítás modellezésére is. Ennek bemutatására jelen cikkben a modell paramétereit műholdas földi mozgó rádiócsatornán mért adatsorokból határozzuk meg.

A műholdas földi mozgó rádiócsatorna karakterisztikájának vizsgálatára a DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Német Légi- és Űrközlekedési Központ) 1984 és 1987 között egy nagy kiterjedésű, különböző környezeteket magába foglaló mérési kampányt hajtott végre [2]. Munkánk során egy városi és egy autópálya környezetben végrehajtott mérések vételi jelszint eredményeit használtuk fel. Az összeköttetések paramétereit az 1. táblázatban foglaltuk össze.

Mindkét összeköttetés 1.54 GHz frekvencián üzemel, de a mérések körülményei különbözőek voltak. Az autópályán az összeköttetés egyik végpontjaként a mérést végző gépkocsi sebessége 60 km/h volt és a mérés 81.2 percig tartott.

A városi környezetben a gépkocsi 10 km/h sebességgel közlekedett a mérés 27.8 perces időtartama alatt. Az összeköttetések másik végpontja a 24° elevációs szög alatt látszó MARECS műhold volt.

1. Táblázat  
A DLR által elvégzett mérések paraméterei

## 2. Az N-állapotú Markov-lánc modell

Az N-állapotú Markov-lánc modellben minden állapot egy-egy csillapításszintet reprezentál 0.05 dB felbontással [1,3]. Az állapotok száma ennek megfelelően függ a generálandó adatsorban előforduló maximális csillapítás-tól. A modell sematikus vázlata az 1. ábrán látható.

Az állapotok számát  $N$ , az  $i$ . állapot valószínűségét  $z_i$ , míg az adott állapot által reprezentált csillapítást  $A_i$  jelöli. A  $z_i$  állapot valószínűségeket a  $\bar{z}$  állapot valószínűség-vektorba (1), a  $p_{ij}$  állapotátmeneti valószínűségeket pedig az állapotátmeneti valószínűség  $\bar{P}$  mátrixba rendezhetők (2).

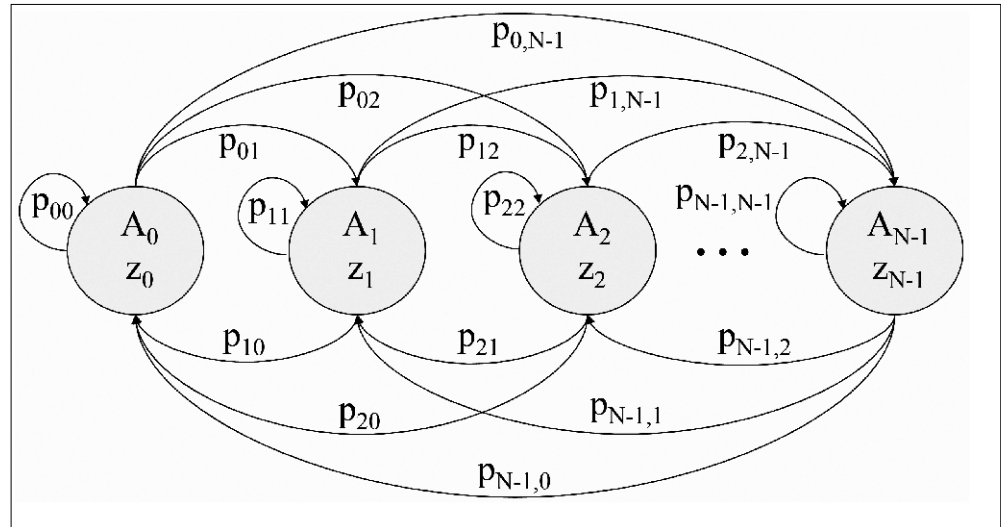
$$\bar{z} = [z_0, z_1, z_2, \dots, z_{N-1}] \quad (1)$$

$$\bar{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1,N-1} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ p_{N-1,1} & \dots & p_{N-1,N-2} & p_{N-1,N-1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

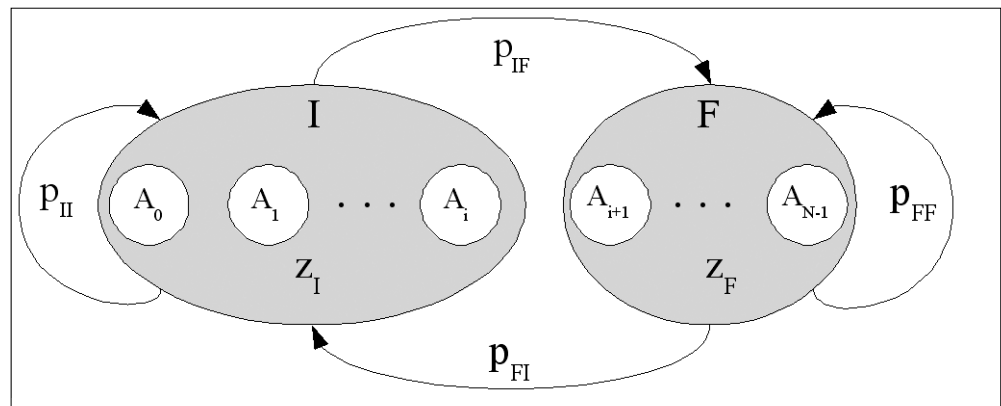
A szimulációs időegység (STU, Simulation Time Unit), ami megadja a két egymás után következő generált csillapításérték között eltelt időt az 1. táblázatnak megfelelően: 3,3 ms. A generált csillapítás idősor komplement eloszlásfüggvénye (CCDF, Complement Cumulative Dist-

Műhold neve	MARECS (d=39150 km)	
Elevációs szög	24°	
Frekvencia	1.54 GHz	
Mintavételi frekvencia	300.5 Hz	
Összeköttetés sorszama	13	14
Környezet	Városi	Autópálya
Mérési időintervallum	27.8 min	81.2 min
A földi jármű sebessége	10 km/h	60 km/h

1. ábra  
Az alkalmazott Markov-lánc  
modell tematikus ábrázolása  
[1]



2. ábra  
Az N-állapotú Markov-modell  
felosztása  
fading és inter-fading  
állapotokra  
[4]



tribution Function,  $P(A \geq A_i)$ ) közvetlenül meghatározható a modell paramétereiből (3) segítségével, ahol  $\bar{P}^T$  jelöli az állapotátmeneti mátrix transzponáltját.

$$P(A \geq A_i) = \sum_{j=1}^{N-1} z_j, \quad \bar{z} = \bar{P}^T \cdot \bar{z} \quad (3)$$

A generált csillapítás idősor fading időtartam-statisztikájának meghatározásához a modell állapotainak fading, illetve inter-fading csoportosítására van szükség. A fading állapot egy  $A_i$  csillapítás küszöb feletti szinteket reprezentáló állapotokat foglalja magában. Az így származtatott két állapotú Markov-modell látható a 2. ábrán. A származtatott kétállapotú Markov-modell  $z_F$  és  $z_I$  fading és inter-fading állapot valószínűsége, valamint a  $p_{IF}$ ,  $p_{FI}$ ,  $p_{FF}$  és  $p_{II}$  állapotátmeneti valószínűségei az (4-6) kifejezések segítségével határozhatóak meg [4].

$$z_I = \sum_{k=0}^i z_k, \quad z_F = \sum_{k=i+1}^{N-1} z_k \quad (4)$$

$$p_{IF} = \sum_{k=0}^i \sum_{m=i+1}^{N-1} \frac{z_k}{z_I} \cdot p_{km}, \quad p_{FI} = \sum_{k=i+1}^{N-1} \sum_{m=0}^i \frac{z_k}{z_F} \cdot p_{km} \quad (5)$$

$$p_{II} = 1 - p_{IF}, \quad p_{FF} = 1 - p_{FI} \quad (6)$$

A különböző csillapításszintekre és időtartamokra értelmezett fading időtartam valószínűségeket (7) segítségével számolhatók, ahol  $P_{fd}(A_i, t)$  megadja az  $A_i$  csillapításszinten értelmezett pontosan  $t$  másodpercig tartó fading valószínűségét.

$$P_{fd}(A_i, t) = p_{FF}^t \cdot p_{FI} \quad (7)$$

Megfelelő mennyiségű időtartamra kiszámolva  $P_{fd}(A_i, t)$ -t, a fading időtartam  $A_i$  csillapításszinten értelmezett komplementis eloszlásfüggvénye meghatározható.

### 3. A modell-paraméterek meghatározása

A modellt leíró állapot átmeneti valószínűségek a rendelkezésre álló mért csillapítás adatsorok fade slope statisztikájából határozhatóak meg. A fade slope mikrohullámú összeköttetések tervezésénél gyakran figyelembe vett másodrendű statisztika, egy bizonyos csillapításszinten értelmezve a fading meredekségéről (dB/s) ad információt (8-9) [1]. A fade slope mértékegysége dB/STU,  $t_n$  jelöli az n.-ik időpontot, míg  $A(t_n)$  az n.-ik időpontban mért csillapítás értéket.

$$\zeta_{[dB/STU]} = \frac{A(t_{n+1}) - A(t_{n-1})}{2} \quad \left| \quad A(t_n) = A_i \quad (8)$$

$$t_n = n \cdot STU, \quad n \in N \quad (9)$$

A fade slope műholdas földi mozgó rádiócsatornán különböző csillapításszintekre kiszámított feltételes sűrűségfüggvényei láthatóak a (következő oldali) 3. ábrán városi és autópálya környezetek (1. táblázat) esetére. A városi környezetben mért csillapítás adatsort a jellem-

zó többutas terjedés miatt bekövetkező jelentékeny Rayleigh-, valamint Rice-szórás következtében 1 másodperc hosszú mozgó ablak kellett átlagolni. A mérési adatsorban a feldolgozást követően negatív csillapítás szintek is előfordulnak, mert a 0 dB csillapítás szintnek az adatsor medián értékét választottuk. Emiatt a fade slope sűrűségfüggvénye negatív csillapítás szintre is kiszámítható.

Az autópálya környezetben mért adatsor feldolgozásakor elegendőnek bizonyult egy 165 ms hosszú mozgó ablakos átlagolás alkalmazása. Ez azzal magyarázható, hogy az autópálya környezetben mért adatsor jóval simább, mint a városi környezetben mért, hiszen az autópályák mellett ritkábbak a többutas terjedésért és az árnyékolásért felelős magas épületek, valamint más négykiterjedésű terepakadályok. Amint az a 3. ábrán is látható, a fade slope magasabb értékeket is elvesz, mint a városi környezet esetében.

A fade slope  $A_i$  csillapításszintre, mint feltételre vonatkoztatott feltételes valószínűségi sűrűségfüggvénye (Conditional Probability Density Function,  $P(\xi|A_i)$ ) jól közelíthető Gaussi-eloszlásokkal [1,4,5]. A Gaussi fade slope modellel a fade slope sűrűségfüggvénye (10) szerint számítható.

$$P(\xi|A_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_\xi(A_i)} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\xi}{\sigma_\xi(A_i)} \right)^2}, \quad (10)$$

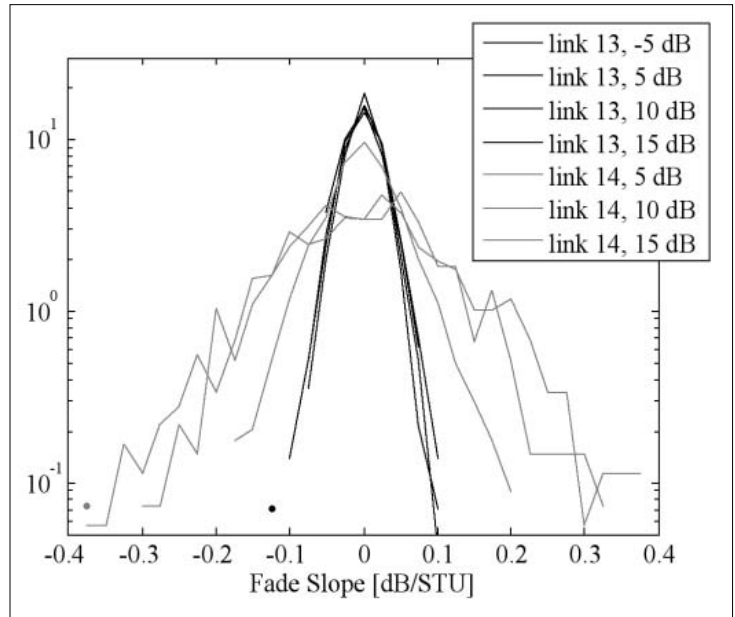
ahol  $A_i$  az  $i$ -ik a csillapítás szint dB-ben,  $\xi$  a fade slope dB/STU-ban.

A fade slope tulajdonságainak megfelelően a sűrűségfüggvény várható érték paramétere zérus. A csillapításszint függő  $\sigma_\xi(A_i)$  szórás egyszerű függvényekkel közelíthető mind a városi, mind az autópálya környezet esetében (11) [5].

Az  $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$  paraméterek értékeit a 2. táblázatban láthatjuk.

$$\sigma_\xi(A) \Big|_{\text{város}} = a \cdot A + b, \quad \sigma_\xi(A) \Big|_{\text{autópálya}} = \begin{cases} c \cdot A + d, & A^{[dB]} \leq -2,35 \\ e \cdot A + f, & -2,35 < A^{[dB]} < 0 \\ g \cdot A + h, & 0 \leq A^{[dB]} < 5 \\ i \cdot e^{(j \cdot A)}, & 5 \leq A^{[dB]} \end{cases} \quad (11)$$

A fade slope csillapítás szint függő  $P(\xi|A_i)$  sűrűségfüggvényeit (10) minden állapothoz tartozó  $A_i$  csillapításszintre meg kell határozni. Az állapot-átmeneti valószínűségeket ez után kiszámolhatjuk azt figyelembevéve, hogy  $p_{ij}$  megfeleltethető a  $P(\xi = (A_j - A_i) / 2 | A_i)$  valószínűség értéknek [5].

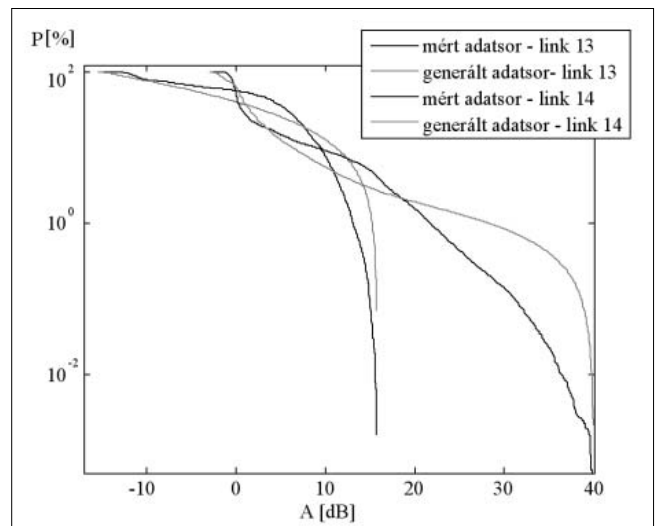


3. ábra  
A fade slope műholdas földi mozgó rádiócsatornán, különböző csillapításszintekre kiszámított, feltételes sűrűségfüggvénye városi (link 13) és autópálya (link 14) környezetek esetén

#### 4. Eredmények

Az N-állapotú Markov-modellel generált idősorok és a mért csillapítás adatsorok komplementis eloszlásfüggvényei a 4. ábrán láthatóak.

4. ábra  
A generált idősor, valamint és a mért csillapítás adatsor komplementis eloszlásfüggvénye városi (link 13) és autópálya (link 14) környezet esetén



2. Táblázat A Gaussi fade slope modell paraméterei

Környezet	Város (13-as link)		Autópálya (14-es link)							
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Érték	0.0003285	0.0234	0.06417	0.1973	0.001535	0.02005	0.006176	0.01151	0.02785	0.1008

Az ábrán  $P$  a valószínűséget,  $A$  a csillapítást jelöli. Megfigyelhető, hogy a generált idősor eloszlásfüggvénye mindkét összeköttetés esetében jól közelíti a mért adatsor eloszlásfüggvényét. A görbék közötti eltérés fő oka a fade slope statisztikájának közelítő számítása.

A mért adatsor, illetve a generált idősor esetében számított fading időtartam eloszlásfüggvényei az 5. ábrán látható különböző csillapítás szintekre kiszámolva. Az ábrán  $t$  az időt jelöli, míg  $P$  a valószínűséget. A műholdas földi mozgó rádiócsatornán a csatorna mobil jellege miatt a gyors fading dominál, ez figyelhető meg az ábrán is, a fellépő csillapítás fadingek általában 70 másodpercnél rövidebb időtartamúak. Mind a városi, mind az autópálya környezet esetében elmondható, hogy a fading időtartam közelítése rövid időtartamoknál nagyon jó, de 5 másodpercnél hosszabb időtartamoknál a közelítés romlik. Ez elsősorban azzal magyarázható, hogy a mért adatsorokban a hosszabb fadingek előfordulása ritka, így statisztikájuk pontosabb leírásához nagyobb mennyiségű mérési adatra lenne szükség.

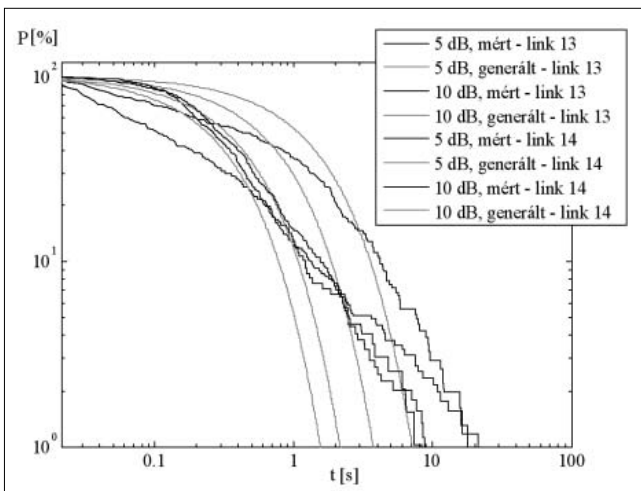
## 5. Összefoglalás

A bemutatott N-állapotú Markov-modell elsősorban a műholdas földi mozgó rádiócsatornán fellépő csillapítás idősorok generálására alkalmazható. A modell segítségével generált idősor képes a valóságos fading folyamat statisztikailag nagyon pontosan visszaadni. Az összeköttetések tervezésénél a fading tartalék megfelelő beállításához rendkívül fontos a várható csillapítás eloszlásfüggvényének ismerete. A generált csillapítás idősor első és másodrendű statisztikájával a műholdas földi mozgó rádiócsatorna első és másodrendű statisztikája jól közelíthető.

A modell paramétereit közvetlenül a mérési adatsorok fade slope statisztikájából határoztuk meg. A fade slope feltételes sűrűségfüggvényét Gaussi-eloszlás függvényel közelítettük.

### 5. ábra

Különböző csillapítás szintekre kiszámított fading-időtartam diagramok városi (link 13) és autópálya (link 14) környezet esetén



Összehasonlítottuk a generált idősorok és a mért adatsorok komplementis eloszlásfüggvényét és fading időtartam statisztikáját. Elmondható, hogy a generált idősorok első és másodrendű csillapítás statisztikája megfelelően jól közelíti a mért adatsorok megfelelő statisztikáit.

## Köszönetnyilvánítás

A cikk az IST FP6 SatNEx NoE európai uniós projekt és a Mobil Innovációs Központ támogatásával készült.

## Irodalom

- [1] Balázs Héder, Péter Horváth, János Bitó, „Attenuation Time Series Generation at 38 GHz with Time and State Discrete Markov Model”, IST Mobile Summit 2006, Myconos, Greece, CD Proceeding, June 2006.
- [2] E. Lutz, D. Cygan, M. Dippold, F. Dolansky, W. Papke, „The Land Mobile Satellite Communication Channel – Recording, Statistics and Channel Model”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 40, Nr.2, pp.375–386., May 1991.
- [3] L. Castanet, T. Deloues, J. Lemorton, „Channel Modeling Based on N-State Markov Chain for Satcom Systems Simulation”, Proc. 20th ICAP Conference, Exeter, UK, pp.119–122., April 2003.
- [4] Balázs Héder, János Bitó, „Second Order Statistics of Rain Attenuation Time Series Generated With N-State Markov Chain Model”, EuCAP 2006 Conference, Nice, France, CD Proceeding, November 2006.
- [5] Balázs Héder, László Csurgai, János Bitó, „Markov Modeling of First and Second Order Statistics of Land Mobile Satellite Fading”, Broadband Europe Conference, Geneva, Switzerland, CD Proceeding, December 2006.