

# Műhold és beltéri környezet közötti rádiócsatorna szimulációs vizsgálata

FARKASVÖLGYI ANDREA, FARKAS LÓRÁNT, NAGY LAJOS

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék  
lajos.nagy@mht.bme.hu

Lektorált

**Kulcsszavak:** terjedési modell, polarizáció, sugár követés, műholdas kommunikáció

A cikkben a műhold és beltéri csatorna analízisére alkalmas szimulációs eljárást és annak eredményeit mutatjuk be. Elsődleges célunk a vett beltéri jel polarizációs állapotának pontos meghatározása. Eddigi vizsgálataink eredménye az, hogy a beltéri hullám polarizációs állapota alapvetően változik, amint az ablaktól egyre jobban eltávolodunk, a hatás másodlagos sugárzásként jelentkezik. Ismertetjük a komplex harmonikus tér polarizációs állapotának leírási módszerét, majd ennek felhasználásával a cikkben közöljük a szimuláció eredményeit. A kiterjesztett predikációs eljárás során módosított háromdimenziós sugárkövetési módszert alkalmaztunk. Részletesen foglalkozunk azzal a terjedési problémával, hogy milyen módon függ a beltéri hullám egyrészt a műhold elevációs szögétől, másrészt a műhold mozgásából adódó olyan csatornajellemzőktől, mint a Doppler-hatás és a késleltetés. Továbbá foglalkozni kívánunk a MIMO antenna rendszerek műholdas alkalmazhatóságával, tekintettel a beltérben jelentkező szóródási problémákra.

## 1. Bevezetés

A mobil műholdas rendszereket már jelenleg is alkalmazzák és előreláthatóan széles körben fognak tovább terjedni. A közvetlen beltéri alkalmazás a vezeték nélküli kommunikáció egyik kulcsproblémája, mely nélkül a műholdas rendszerek csak jelentős korlátozásokkal használhatóak a kommunikációs hálózatokban. A kommunikációs hálózatok felhasználói, előbb vagy utóbb kérik a szolgáltatásokat. Tehát véleményünk szerint igen hasznos lenne, egy jól kidolgozott módszer a beltérbe történő behatolás becslésére és a hullámok polarizációs állapotának jellemzésére.

A nagy távolságok következtében a műhold-föld közötti terjedési közeg igen jelentős csillapítású, de jól leírható. Amint azonban a hullám eléri az épületeket, jellemzői szignifikánsan változni fognak, ám általánosságban figyelembe kell venni, hogy magas házak közötti terjedés a síkhullámú polarizációt különböző mértékben elliptikussá változtatja.

Az épület erőteljes hatásai az először belépő hullámra: többszörös reflexió, transzmisszió a falakon való áthaladásakor, élek diffrakciója, valamint az épület anyagának inhomogenitása miatt. Az épületen belüli tér nagyon összetett, de továbbra is harmonikus, ezért vizsgálható. A továbbiakban ezek figyelembe vételével egy általános célú szimulációs módszert javasolunk a keskeny- és szélessávú műhold és beltér közötti csatorna jellemzőinek kiszámítására.

A cikkben első lépésként a beltéri hullámok polarimetrikus leírására és a következtetésekre koncentráltunk, figyelembe véve általános polarimetrikus karakterisztikáikat, elliptikus és lineárisan polarizált beeső hullám figyelembe vételével. Ez az első lépés tisztázni szeretné, hogy milyen típusú antenna szükséges beltéri vevők esetén és ezen antennák alkalmazása milyen ered-

ményekre vezet. A szimulációs rendszer ezen állapotában, a többszörös reflexiót és falon keresztüli transzmissziót veszi figyelembe és egy háromdimenziós sugárkövető eszközre épül. A következő lépés a diffrakció hatásának figyelembe vétele lesz.

## 2. Polarizáció

Minden harmonikus vektortér leírható polarizációs jellemzőivel. Általában azt mondhatjuk, hogy a polarizációt egy vektormező lokális tulajdonságaként úgy definiálhatjuk, mint egy görbét, melyet egy adott helytér-rősség-vektor végpontja leír. Az [1] szerint a kisugárzott hullám polarizációja „a kisugárzott elektromágneses hullám azon tulajdonsága, mely leírható az elektromágneses térvektor időben változó iránya és relatív nagysága együttesével.

Hivatkozva [2]-re, a polarizációt általában három kategóriába sorolhatjuk: lineáris, körös és elliptikus polarizáció, melyek közül a körös és a lineáris polarizáció az elliptikus polarizáció speciális fajtáiként kezelhetőek. A polarizáció általánosan – a lineáris polarizációt kivéve – lehet az óra járásának megfelelő, vagy ellentétes (jobb, illetve balforgású).

A polarizáció jelenségének leírása optikai és rádió hullámterjedés szempontjából jelentősen különbözik. Az antennaelméletben használják a horizontális és vertikális polarizáció fogalmát, melyek lineáris polarizációt jelentenek, a horizontális és vertikális sík irányában fekvő térerősség vektor végpontokkal. Valamint különbség van a jobb és balforgású polarizáció definíciójának esetében is [3].

Az irodalomban a hullámterjedés jellemzésére két tárgyalási mód létezik: az FSA-nak (Forward Scattering Alignment) és a BSA-nak (Backward Scattering Alignment)

nevezett módszerek. Az FSA a hullámterjedés polarizációs változásainak meghatározására alkalmas, a környező téren keresztül a megfigyelt célpontig és vissza. A tér polarimetrikus szóródási jellemzői egy Jones- vagy Müller-mátrixszal írhatók le. A BSA akkor alkalmazható, ha a vizsgált átvitel különböző polarizációjú antennák között történik, ahol az antennák között szóró objektum található. Ebben az esetben a Sinclair- és Kennaugh-mátrix alkalmas a polarizációs jellemzők leírására [5].

A polarizációnak két aspektusa létezik: egyrészt leírja a komplex harmonikus vektormező viselkedését, másrészt módot ad a különböző terjedési közegek szórás jellemzőinek leírására. Figyelembe vettük azonban, hogy a jellemzés során, a rádióhullámok terjedésének ezen tárgyalásánál nagyon fontos a precíz hullámterjedési modellek szerepe, mert a térerősségmérés során nem lehetséges a polarizáció teljes pontosságú mérése, mivel antennáink elektromos jellemzői, így iránykarakterisztikája is csak véges irányszög-felbontást tesz lehetővé.

A modellhez szükséges a polarizáció leírása, a komplex harmonikus vektortér definiálása és grafikus és numerikus reprezentációs készlet. Cikkünk következő szakasza erre a kérdéskörre világít rá.

### 3. A Stokes-paraméterek és a Poincare zóna

A Stokes-paraméterek és a Poincare-tér egy tetszőleges sík hullám polarizációs jellemezőit írja le [2,3].

A Stokes-paramétert a következőképpen definiáljuk:

$$\begin{aligned} s_0 &= a_1^2 + a_2^2 \\ s_1 &= a_1^2 - a_2^2 \\ s_2 &= 2a_1a_2 \cos \delta \\ s_3 &= 2a_1a_2 \sin \delta \end{aligned}$$

ahol

$a_1$  és  $a_2$  jelentik a térerősség két ortogonális vektor-komponensét, az egyik a vevő síkjában, míg a másik a vevő síkjára és a terjedés irányára merőleges sík.

A négy egyenlet csupán három független paramétert tartalmaz, ugyanis

$$s_0^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2.$$

A Stokes-paramétereket általában négyelemű vektor formájában írjuk fel, így

$$S = [s_0 \ s_1 \ s_2 \ s_3].$$

Lineáris horizontálisan polarizált síkhullámra tehát:

$$S = [1100]$$

Lineáris, 45 fokos szögben polarizált síkhullámra:

$$S = [1010]$$

Jobb forgású körösen polarizált síkhullámra:

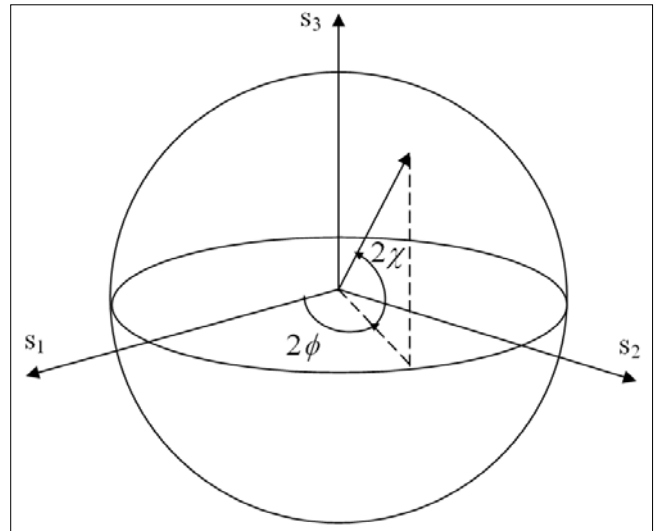
$$S = [1001]$$

Bal forgású körösen polarizált síkhullámra:

$$S = [100-1]$$

Polarizálatlan hullámra:

$$S = [1000]$$



1. ábra Stokes-paraméterek és Poincare-tér jellemzése

A hullám polarizációs állapotát a Poincare-térben poláris koordinátákkal is jellemezhetjük, mely ugyancsak három független paramétert jelent, ezeket  $\sqrt{s_0}, \chi, \phi$ -ként definiáljuk, ahol

$$\begin{aligned} \chi \\ \phi \end{aligned}$$

A kapcsolat közöttük és a Stokes-paraméterek között az alábbi formában írható fel és ábrázolható (1. ábra):

$$\begin{aligned} s_1 &= s_0 \cos 2\chi \cos 2\phi \\ s_2 &= s_0 \cos 2\chi \sin 2\phi \\ s_3 &= s_0 \sin 2\chi \end{aligned}$$

### 4. A polarizációs ellipszis eloszlása és a nagy féltengely iránya

A Poincare-tér nagyon jó vizuális megjelenítési lehetőséget ad egy hullám polarizációs állapotairól: egy adott intenzitású  $s_0$ , sík monokromatikus hullám minden lehetséges polarizációs állapotának megfelel a tér egy pontja és fordítva.

Mindamellet, hogy egy komplex beltéri környezetben nincs állandó térintenzitás és a hullámok sem tekinthetők monokromatikusnak, a kialakuló térerősség vektorra nem értelmezhető terjedési irány, így polarizációs sík sem. Tehát a Poincare-tér nem alkalmas arra, hogy megfelelően leírjon egy komplex harmonikus vektormezőt.

Egy másik közelítési eljárást [3] alkalmaztunk a részletes leírásra, feltételezve, hogy forrásos az elektromágneses tér, amely áthatol az épületen és reflektálódik, transzmissziót és diffrakciót szenved, mégis harmonikus marad. Ezért a tér minden pontjában felvesszünk egy harmonikus vektort,  $\mathbf{V}$ -t, mely egy háromdimenziós függvénye az adott pont térintenzitásának:

$$\begin{aligned} V_x(r,t) &= a_x(r) \cos(\omega t - \varphi_x(r)) \\ V_y(r,t) &= a_y(r) \cos(\omega t - \varphi_y(r)) \\ V_z(r,t) &= a_z(r) \cos(\omega t - \varphi_z(r)) \end{aligned}$$

ahol például

$$\varphi_x(r) = k \cdot r - \delta_x$$

és így tovább, a vektormező skalár komponenseinek kezdeti értékét adja meg.

Bevezetjük a következő vektorokat:  $p(r)$  és  $q(r)$ , melyek a helyzetvektor következő függvényei:

$$p_x(r) = a_x(r) \cos \varphi_x(r), p_y(r) = a_y(r) \cos \varphi_y(r)$$

$$p_z(r) = a_z(r) \cos \varphi_z(r), q_x(r) = a_x(r) \sin \varphi_x(r)$$

$$q_x(r) = a_y(r) \sin \varphi_y(r), q_z(r) = a_z(r) \sin \varphi_z(r)$$

Mellyekkel felírható:

$$V(r, t) = p(r) \cos \omega t + q(r) \sin \omega t$$

A  $p$  és  $q$  vektorok közötti kapcsolat szerint ezek a polarizációs ellipszis konjugált féltengelyei. Ha választunk két másik vektort,  $s(r)$  és  $u(r)$  a következőképpen:

$$s = p \cos \alpha + q \sin \alpha$$

$$u = p \sin \alpha + q \cos \alpha$$

és ehhez  $\alpha$ -t úgy választjuk meg, hogy  $s$  és  $u$  merőlegesek legyenek,

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2pq}{p^2 - q^2}$$

akkor  $s$  és  $u$  a polarizációs ellipszis fő- és melléktengelei lesznek.

Kifejezhetjük  $V$ -t  $s$  és  $u$  függvényében:

$$V = s \cos(\omega t - \alpha) + u \sin(\omega t - \alpha)$$

Mivel  $s$  és  $u$  merőlegesek egymásra, így egy új koordináta-rendszer választható  $x'$  és  $y'$  tengelyekkel,  $s$  és  $u$  mentén.

Az új koordináta-rendszerben a  $V$  vektortér komponensei a következőképpen adhatók meg:

$$V_{x'} = |s| \cos(\omega t - \alpha), V_{y'} = |u| \sin(\omega t - \alpha), V_z = 0$$

Melyből következik:

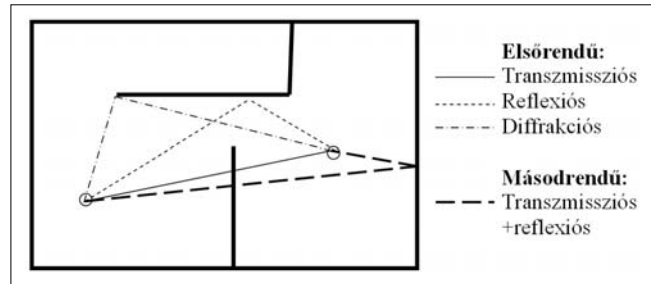
$$\frac{V_{x'}^2}{s^2} + \frac{V_{y'}^2}{u^2} = 1$$

tehát  $s = |s|$  és  $u = |u|$  lesznek egy ellipszis fő- és mellék-féltengelyei, melyek leírják a vektorteret ortogonális koordinátákban, melyeket ezek a vektorok definiálnak, tehát ez egy elliptikus polarizáció.

Általános esetben a polarizáció a tér minden pontján elliptikus, ám az ellipszis síkja, a tengelyek iránya és az ellipszis excentricitása változik. Könnyen belátható, amint  $\alpha$  változik,  $x'$  és  $y'$  is változik, valamint változik az ellipszis síkjának az iránya is.

Végeredményül a következő szemléletes értelmezést kívánjuk adni a polarizációs analízisre:

- a polarizációs ellipszis excentricitásának eloszlása megadja, hogy mennyire diffúz a tér, mely az épületen belül kialakul, figyelembe véve a különböző akadályokat és a különböző terjedési mechanizmusokat,
- az ellipszisek nagy féltengelyeinek kétdimenziós hisztogramja,  $\varphi$  és  $\theta$  eloszlása, mely a vevő antenna kívánatos elfordításáról ad információt.



2. ábra Sugárkövetés módszerének néhány lehetséges első és másodrendű összetevője

### 5. Szimulációs eredmények és analízis

Sugárkövetési eszközt alkalmazva [7,8], egy külső adó által (LEO műhold) az épületen belül előállított a rádióhullámok polarizációs jellemzőinek eloszlását szimuláltuk. Az egy- és többszörös reflexiókat és az objektumon keresztüli transzmissziókat vettük figyelembe, ám a diffrakciót és a falakon keletkező szóródást a modell egyelőre még nem tartalmazza.

Sugárkövetés (Ray Launching)	
<b>Jellemzők</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frekvenciatartománybeli módszer</li> <li>• Keskenysávú, szinuszos gerjesztés</li> </ul>
<b>Előny</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A feladat könnyen particionálható részfeladatra</li> </ul>
<b>Hátrány</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonyolult programozhatóság</li> <li>• Komplex (görbevonalú) geometria esetén a sugarak jelentős divergenciája</li> <li>• Az adatbázis felbontása szükséges független sokszögekre</li> </ul>

1. táblázat A sugárkövetés módszerének jellemzői

Az adó különböző polarizációjú hullámokat hoz létre, a 2,4 GHz-es frekvencián (ez a WARC'92-n LEO műholdak számára kijelölt downlink frekvencia sáv): a vizsgált polarizációk kör (jobb és balforgású) és lineáris.

A sugárkövetés elvű hullámterjedési modellek a teljes tartományú térmodellezés helyett a geometriai optikán alapulnak, a terjedő hullámokat véges térszögtartományokra bontva, az ezeken terjedő komponenseket függetlenül kezelve és a határfelületeket fellépő jelenségeket – reflexió, transzmisszió, diffrakció – érvényesítve a teljes megoldást ezen összetevők egyes vizsgálati pontokban kiszámított eredményeként állítják elő.

A sugárkövetés módszerét a gyakorlatban általában harmadrendű tetszőleges terjedési mechanizmus kombinációig terjesztik ki (a jelen szimulációnál hetedrendű kombinációt is figyelembe vettünk), vagy a követett hullámösszetevőt egy előzetesen megadott küszöbtererősség szint alá csökkenésig követik.

A továbbiakban alkalmazott sugárkövetés a sugár kibocsátás elvére épül, egy eredeti Luneberg-Klein [2] fejlesztés, nagyfrekvenciás közelítéssel kiegészítve, melyet geometriai optikának nevezünk.

A sugárkövetést esetünkben a következőképpen, fordított irányban alkalmaztuk: a hullámokat a beltéri vevő-

antenna irányából bocsátottuk ki, nyolc különböző szögben, mely irányokban a műholdról érkező jelek vehetők.

A hullámokat addig követtük, míg a falakon fellépő kölcsönhatási pontok egy adott számot el nem értek. Ez a szimulációkban hét volt. Csupán azokat a hullámokat vettük figyelembe, melyek a műhold irányába terjedtek, vagyis alapvetően egy síkhullámot, mert a valódi hullám, mely a műholdtól az épület felé terjed: síknak tekinthető, figyelembe véve a nagy távolságot a műhold és az épületek között.

Szimulációs eredményeinket a 3.-6. ábrákon mutatjuk be a különböző polarizációkra, az épületek belső terében, az ablakoktól különböző távolságokra, a műhold különböző elevációs szögeinek megfelelően.

Az ábrák a polarizációs karakterisztikák szimulációs eredményeit mutatják: az épület két különböző belső területére: az egyik, mely az ablakon keresztül közvetlen megvilágítást (hullámösszetevőt) kap, a másik kissé távolabb az ablaktól, mely már nincs közvetlenül megvilágítva, a karakterisztikákat alacsony elevációra vettük fel és két polarizáció esetére (kör, lineáris).

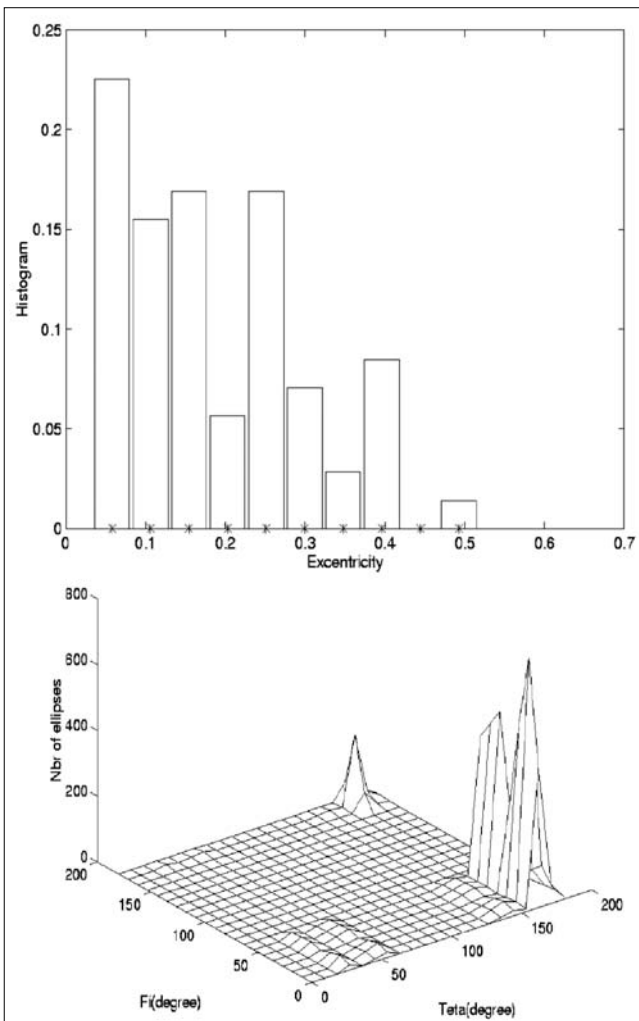
Magas eleváció esetén ( $45^\circ$  vagy afelett) az elsődleges behatolási mód az ablakon keresztüli diffrakció,

amint a kibocsátott hullám gyorsan reflektálódik a padló és a mennyezet között, erőteljes csillapítást szenved, ezért meglehetősen kis szintű jel érkezik meg a szoba hátsó régiójába, ezért ezekről a sugárzási szögekről, általános és megalapozott következtetést nem tudunk levonni. Figyelembe tudjuk venni az alacsony és közepes elevációs szögeket, noha itt is az alapvető behatolás az ablakon keresztül valósul meg.

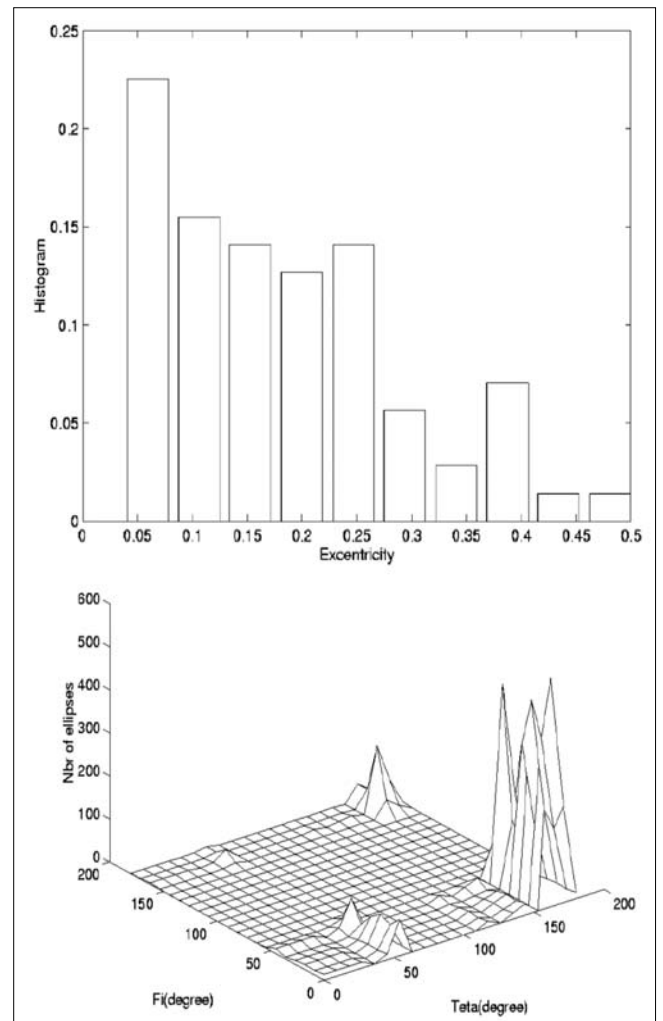
Az eredmények megmutatják, hogy a hullám tükröződő többutas reflexiót és transzmissziót szenved, megváltozik a polarizációs állapota, más szóval, a beeső síkhullám eredeti polarizációja csupán az ablak közelterében marad meg; másrésztől mindhárom vizsgált esetre, vagyis mikor a beeső hullám polarizációja lineáris, jobbforgású vagy balforgású körpolarizált, a helység távoli régióban a polarizációs ellipszis csaknem mindig szórt.

Vizsgálataink alapján tehát megállapíthatjuk, hogy nincs közvetlen kapcsolat a beeső hullám polarizációs állapota és a polarizációs ellipszis között az épület különböző pontjaiban. Azonban az eloszlásgörbéken megfigyelhető, hogy olyan szögnél csoportosulnak, mely szög alatt a hold látszik, vagy olyan iránynál mely egy reflexióval érhető el.

3. ábra  
 $25^\circ, 5^\circ$ , near zone, clockwise,  
 50% of points clockwise



4. ábra  
 $25^\circ, 5^\circ$ , near zone, counterclockwise,  
 48.5% of points clockwise



## 6. Szimulációs eredmények műhold és MIMO rendszer közötti csatornára

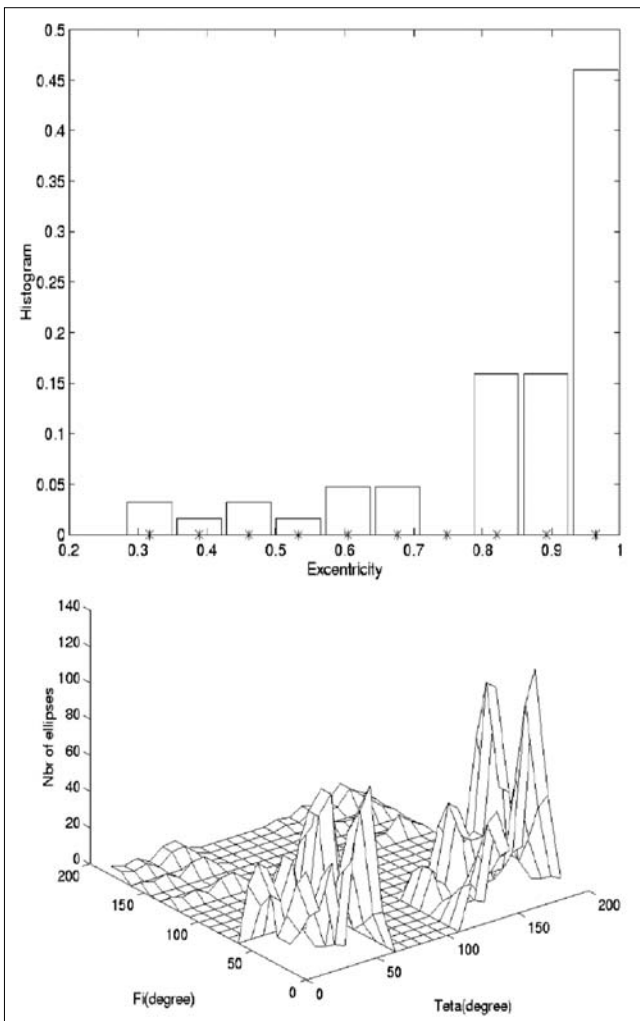
A szimuláció során azt vizsgáltuk, hogyan viselkedik egy MIMO-műhold csatorna, szórásos és nem szórásos környezetben.

A vevő oldalt egy háromelemű antennarendszer adta. Így a szimulált rendszer egy SIMO rendszer volt. Az antennákat a szimuláció során elforgattuk. Kezdetben a három vevőantenna egymással párhuzamos és a függőleges Z tengely irányába mutatnak (rotation angle  $0^\circ$ ). Ezután az antennákat kinyitottuk mint egy esernyőt, végállapotuk az X-Y síkon volt (rotation angle  $90^\circ$ ), ekkor egymással  $120^\circ$ -os szöget zártak be.

Szórásos környezet esetén egy olyan belső tér, ahol a tárgyak reflektálják, vagy szórják a műholdról beérkező hullámokat. A nem szórásos környezet egy referencia belső tér, ahol semmilyen zavarás nincs az adó és a vevő között.

A szimuláció eredményét a 7. ábra mutatja a következő oldalon. Folytonos vonal jelzi a szórásos környezet kapacitás változását, szaggatott vonal a tiszta, nem szórásos környezet kapacitás értékeit.

5. ábra  
25°, 5°, far zone, counterclockwise,  
45.1% of points clockwise



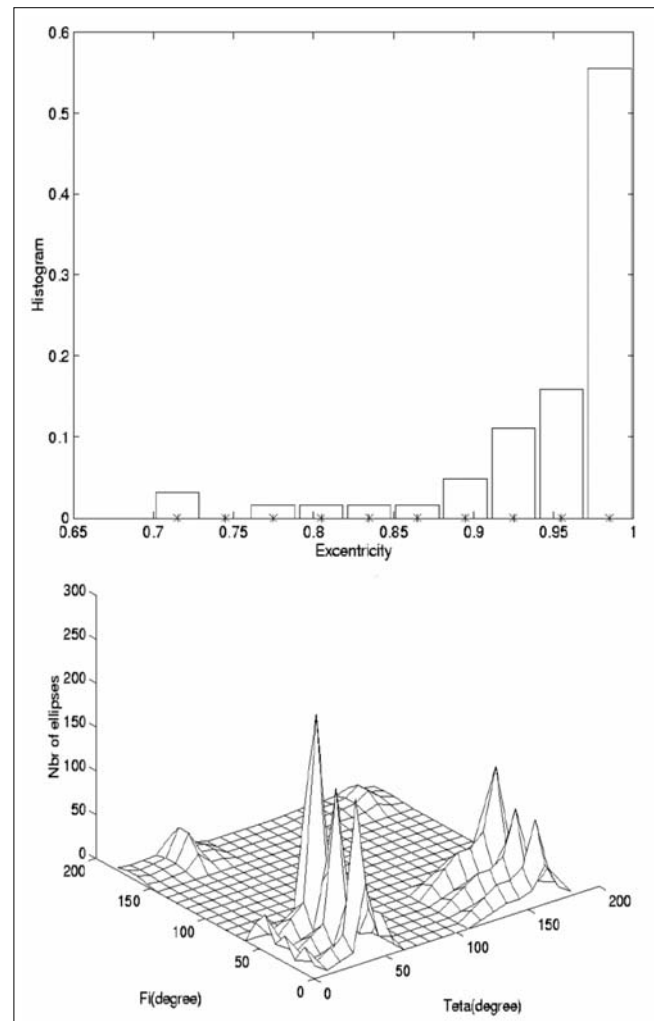
Függetlenül a mutual coupling hatásától (mely egyértelműen a vételi jelszint romlását okozza), látható hogy szórásos környezetben a csatorna kapacitása megközelítőleg egyenletes, míg „tiszta”, szórás nélküli környezet esetén a csatorna kapacitás a nullát éri el, merőleges adó/vevő antennák esetén. Tehát a szórásos környezet  $n \times m$ -es csatorna esetén kapacitásnövekedést okoz.

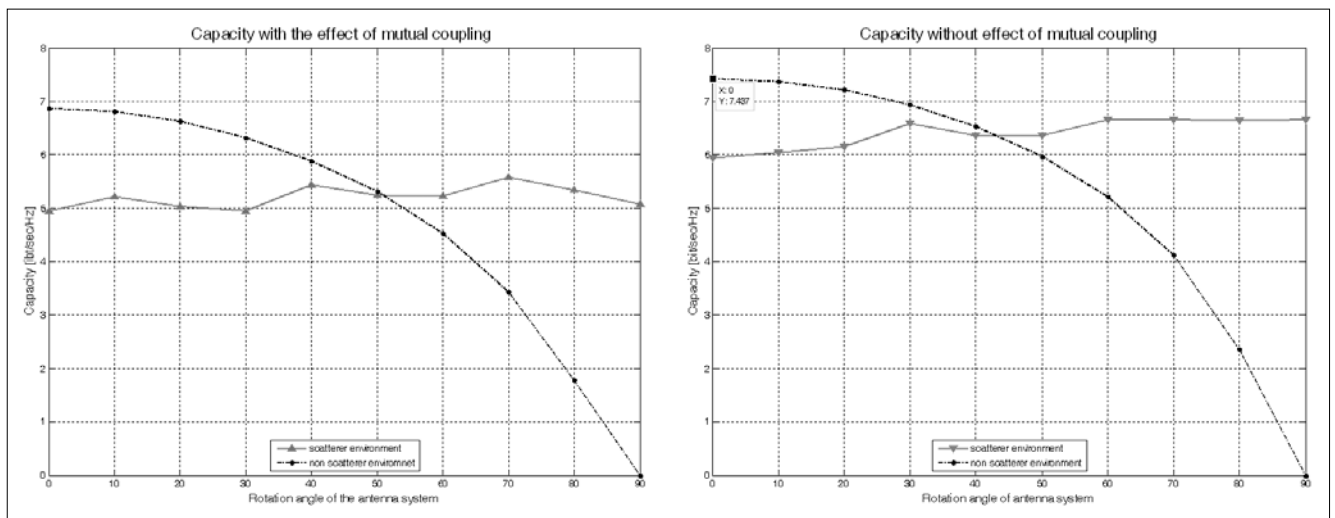
## 7. Összefoglalás

Munkánkban bemutattunk egy módszert a komplex harmonikus elektromágneses mező polarizációs állapotának leírására épület belterében, valamint egy grafikus reprezentációt, mely betekintést adott a rádióhullám komplex polarizációs jelenségére, többutas terjedésű környezet esetén, egy műhold -beltér közötti rádiócsatornás alkalmazásra.

Egy általános konklúzió az irodaépületekre, hogy a beeső síkhullám polarizációs állapotának nincs nagyobb hatása a komplex beltéri harmonikus mezőre. A hullám polarizációja nem marad meg az ablaktól távol eső ré-

6. ábra  
25°, 5°, far zone, linear,  
54.8% of points clockwise





7. ábra A kapacitás változása SIMO rendszerre, szórásos és nem szórásos környezetre

gióban. Más szóval a kör vagy lineárisan polarizált síkhullám létrehoz egy kör vagy lineárisan polarizált komplex harmonikus mezőt az épület belterében a behatolási ponthoz nagyon közel, egyébként a tér diffúz.

A következőkben tervezzük megvizsgálni a polarizációs ellipszis (azimuth és eleváció) beesésiszög-függését. A modellben vizsgálni kell a magasabb elevációs szögek esetén jelentkező ablakon keresztüli diffrakciót.

Továbbá, vizsgálni fogjuk a terjedés keskeny és szélessávú jellemzőit, a késleltetést, a Doppler-szóródást, és a szóró pontok eloszlásának hatását.

### Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket szeretnénk kifejezni a Mobil Innovációs Központnak (MIK) a cikk megírásához nyújtott támogatásáért.

### Irodalom

- [1] IEEE Standard 145-1983, IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas
- [2] C.E.Balanis, „Advanced Engineering, Electromagnetics”, Wiley&Sons, 1989, pp.154–173; 748–760.
- [3] M.Born, E.Wolf, „Principles of Optics”, Pergamon Press, 1975, pp.28–36.
- [4] Gary R.Olhoft, „Ground Penetrating Radar”, 1998. <http://www.g-p-r.com>
- [5] Z.H.Czyz, „Polarimetric Bistatic Scattering Transformations as seen from Two Different Points of View: Optical (Propagation) and Radar (Transmission) – The Poincaré Sphere Analysis”, U.R.S.I. General Assembly, 1999, p.359.
- [6] D.J. de Smet, „A Closer Look at Nulling Ellipsometry”, 1995. <http://www.tusc.net/~ddesmet>
- [7] Zoltán Sándor, Lajos Nagy, Zoltán Szabó, Tamás Csaba, „Propagation Modeling”, Microwave and Optics Conference (MIOP'97), Sindelfingen, Germany, 1997, pp.213–215.
- [8] Zoltán Sándor, Lajos Nagy, Zoltán Szabó, Tamás Csaba: „3D Ray-Launching and Moment Method for Indoor Radio Propagation Purposes”, The 8th Int. Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'97), Helsinki, Finland, 1997, Vol.1, pp.130–134.
- [9] Adrian K. Fung, „Microwave Scattering and Emission Models and their Applications”, Artech House, 1994, pp.14–26.
- [10] B.G Molnár, I. Frigyes et.al., „Characterization of the Satellite-to-Indoor Channel based on Narrow-Band Scalar Measurements”, PIMRC'97, Helsinki, Finland, Vol.3, pp.1015–1018.
- [11] Raymond L. Pickholz, „Communications by means of Low Earth Orbiting Satellites”, Modern Radio Science, Oxford University Press, 1996, pp.133–151.