

Járművek közti rádiókommunikáció és radar detekció szimulációs vizsgálata alagúti környezetben

Nagy Lajos, Szalay Zoltán

*Szélessávú Hírközlés és Villamosság-tan Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Budapest, 1111 HU, (e-mail: nagy@hvt.bme.hu)*

Absztrakt: A gépjármű közlekedési biztonság fejlesztésének egyik fontos eszköze az intelligens járműirányítási elv, melynek fontos része a járművek közti kommunikáció és a radar detekció. Ezek az önvezető gépjárművek fejlesztéséhez vezető technikai megoldások fontos elemei is. A nyílt pályán közlekedő járművekre hatékony megoldások léteznek más most is a kommunikációra és radar szenzorikára, azonban az alagutak, mint mesterséges csőtápvonalak jelentősen megváltoztatják az elektromágneses hullámok terjedési mechanizmusait, ezért ezen környezetben egyedi vizsgálatok szükségesek a szabad térben jól működő berendezések esetében is. A cikkben a rádiókommunikáció és radar detekciós hullámterjedési problémák lehetséges numerikus vizsgálatát mutatjuk be alagúton belüli környezetre. A numerikus analízis eredményeit mérésekkel hasonlítjuk össze és a radar méréseknél tapasztalható jelentős minőségromlást numerikus vizsgálattal igazoljuk.

1. BEVEZETÉS

A járműközlekedés biztonságának növelésére számos új eszközt és eljárást fejlesztettek és vezettek be, ezek közé tartozik a követési távolság betartását segítő rendszerek, az ütközésselhárító rendszerek és a legutóbbi időkben az autonóm járműfejlesztések. Ezen rendszerek mindegyike alkalmazza a radarberendezést, mint a beavatkozó rendszer érzékelőjét a távolság, sebesség és pozíció mérésére. A gépjármű radarok a fejlesztések nyomán extrém időjárású és környezeti körülmények között működőképeseek, azonban a környezeti objektumok jelentősen rontják a paramétereiket. Jelentős számú vizsgálat történt a radarok paramétereinek vizsgálatára az úttest felületének ill. lejtésének függvényében. (Schneider et. al., 2000)

További minőségromlást eredményeznek a detekciós környezetben elhelyezkedő objektumok is, de az úttest melletti falak ennél nagyobb mértékű romlást okozhatnak. Alagútban történt összehasonlító mérések (Young-Duk Kim et. al., 2016) eredményei szerint az alagútban elérhető detekciós távolság akár 20m-re is csökkenhet a szabadtéri 180-200m-hez képest nagy távolságú (long range) gépjármű radaroknál.

A cikkben először összefoglaljuk az (Young-Duk Kim et. al., 2016) alagútban végzett vizsgálatok eredményeit, azután megvizsgáljuk az alagútban terjedő elektromágneses hullámok csillapítását. Ezen eredmények közvetlenül felhasználhatóak a gépjárművek közötti kommunikációs összeköttetések minősítésére. A második részben numerikus analízis eredményeit mutatjuk be a radar berendezések minőségét jelentősen befolyásoló tényezők vizsgálatára.

2. ÖSSZEHASONLÍTÓ RADAR TESZTEK SZABAD TÉRBE ÉS ALAGÚTBAN

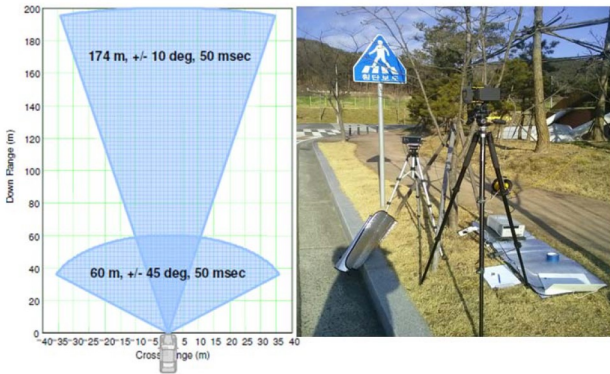
A (Young-Duk Kim et. al., 2016) radar tesztek során a Delphi Del-ESR berendezést használták. A radar fő paramétereit a következők. (1. ábra)

1. Táblázat Delphi Del-ESR fő paramétereit

Frekvenciasáv	76.5 +/- 0.5 GHz
Hatótávolság (long range)	200m
Hatótávolság (medium range)	60m
Antenna nyereség	20, 21 dB (long range) 16 dB (medium range)
Főnyaláb szélesség	Azimut 20 (30) fok Eleváció 4.2-4.75fok

Az összehasonlító vizsgálatok során nyílt útszakaszon ill. alagúton belül végeztek detekciós vizsgálatokat a távolság függvényében. (2. ábra)

A radart három magasságban (1,2 és 3m) és négy döntési szögben (0, -5, -10 és -15 fok) helyezték el.



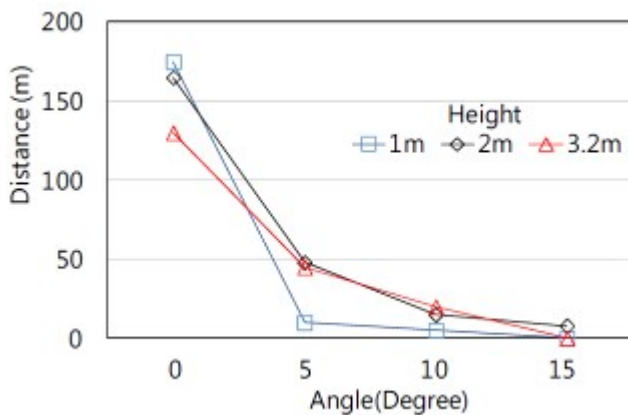
1. ábra. Mérési összeállítás és a radar nyalábjai



2. ábra. Mérési helyszínek (alagút, nyílt útszakasz)

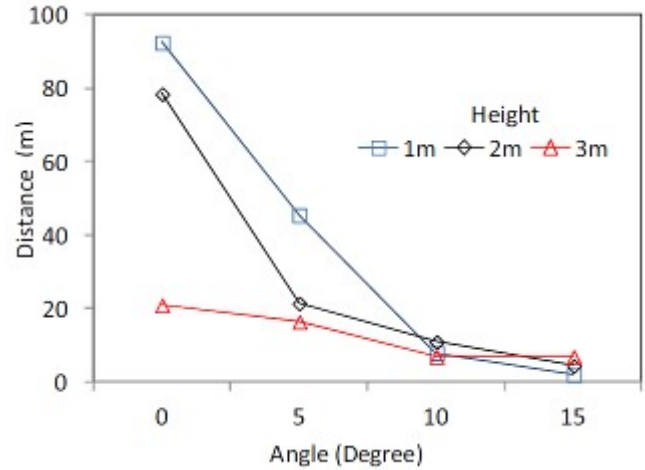
A gépjárművekre épített radarokat alapvetően 0.5-1m körüli magasságban helyezik el, azonban alagutakban a forgalom irányítására a 3-4m magasságú elhelyezés a magasabb járművek miatt indokolt. Ilyen esetben a döntési szög negatív.

A vizsgálat eredményei a két helyszínre a következők.



3. ábra. A radar detekciós paramétereit nyílt útszakaszra

A 3. ábrán jól látszik, hogy a radar detekciós paramétereit a magasságtól függetlenül állandó, vízszintes antenna főnyaláb esetén, a radar döntése esetén a detekciós távolság jelentősen csökken. Ennek fő oka az úttesten létrejövő szóródás következtében kialakuló többutas terjedés.



4. ábra. A radar detekciós paramétereit az alagútban

Az alagútban elvégzett vizsgálat minden esetre a detekciós távolság csökkenését mutatja. (4. ábra) A 3 méteres magasságban elhelyezett radar esetén a detekciós távolság radikálisan 20m-re csökken, de a gépjárművek jellegzetes 1m magasságában is jelentős a csökkenés 175m-ről 92m-re. A csökkenés okát két fő tényezőre vezethetjük vissza, ezek a hullámterjedési csillapítás, vagy a többutas terjedés miatti késleltetési idő szóródás (delay spread).

A továbbiakban numerikus szimulációs környezetet mutatunk be az alagúton belüli hullámterjedés vizsgálatára, azután kiszámítjuk az alagútra a hullámterjedési csillapítást és a késleltetési idő szóródást.

3. SUGÁRÚT KÖVETÉS MODELLE

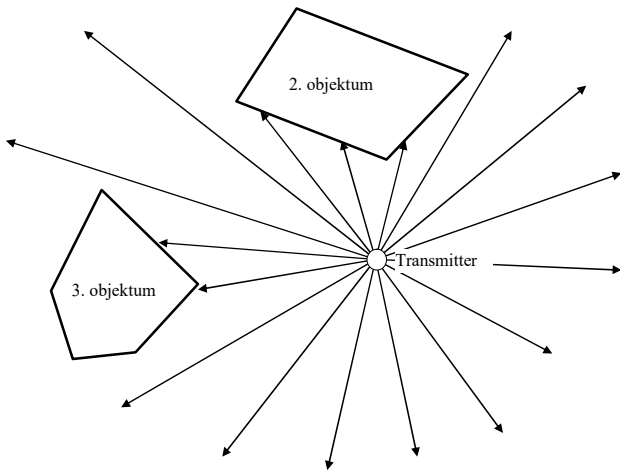
Az alagúton belüli hullámterjedési vizsgálat elvégzéséhez sugárút módszerén alapuló modellt alkalmaztunk, mely kombinálja a sugárutak követését az univerzális diffrakcióelmélettel. (D. Didascalou et. al., 2001) Négy fő terjedési modellt implementáltunk, ezek: szabadtéri terjedés, áthaladás közegen (transzmisszió), reflexió közegen és diffrakciós modell. A sugárút követés eljárása az adóantenna és a vizsgálandó megfigyelési pontok között határozza meg az egyenes vonalúnak tekintett elektromágneses hullámok terjedési útvonalait, megállapítjuk a lehetséges reflexiók, transzmissziós és diffrakciós szakaszokat, majd a diffrakciós mechanizmussal megvalósuló utakra UTD módszerrel értékeljük ki a komplex elektromágneses térerősséget

Elsőként a triviális terjedési útvonalat, a közvetlen átlátási modellt vizsgáljuk az adóantenna és a megfigyelési pont(ok) között. Ha nincs akadály, blokkolás ezen a szakaszon, akkor a szabadtéri terjedési modellt alkalmazzuk.

3.1 Sugárút követési eljárás

A sugarak kibocsájtás és reflexiójának módszerét (Shooting and Bouncing Ray - SBR) alkalmaztuk a 3 dimenziós alagút struktúráján belül megvalósuló hullámterjedési probléma megoldására. Az adóantennából kiindított sugarakat addig követjük, amíg az épület struktúra valamely falának ütközik.

Az 5. ábra azt az esetet mutatja be, melynél mindkét objektumon több ponton történik a követett sugarak reflexiója.



5. ábra. Sugar kibocsájtás módszere

Az alagút falainak ütköző sugarakra spekuláris reflexiós módszert alkalmazunk és tovább követjük, mintha a reflexiós pont mögött egy tükörkép adóantenna lett volna.

A maximálisan vizsgált reflexiók száma az analízisnél 3 volt.

A tovább követett sugarakra az eljárás azonos. A sugarak követését az algoritmus akkor fejezi be, ha eléri a maximális interakció (reflexió, áthatolás vagy diffrakció) számát vagy a követett sugár elektromos télerőssége a beállított télerősség küszöb alá csökken.

Tekintsük a sugarat, melyet az adóantennából (ϑ, φ) irányba indítunk el és N alkalommal reflektálódik a falakon a megfigyelési pontba érkezés előtt. Az elektromos télerősség erre a sugárra

$$E_{refl}(r, \lambda, \vartheta, \varphi) = \frac{\sqrt{60P_T G_T}}{r} F(\vartheta, \varphi) \cdot e^{-j\beta r} \prod_{n=1}^N R_n$$

ahol

R a Fresnel reflexiós tényező.

A Fresnel reflexiós tényező sík beeső és reflektált hullámra mind merőleges, mind pedig párhuzamos polarizációra analitikus összefüggéssel megadható.

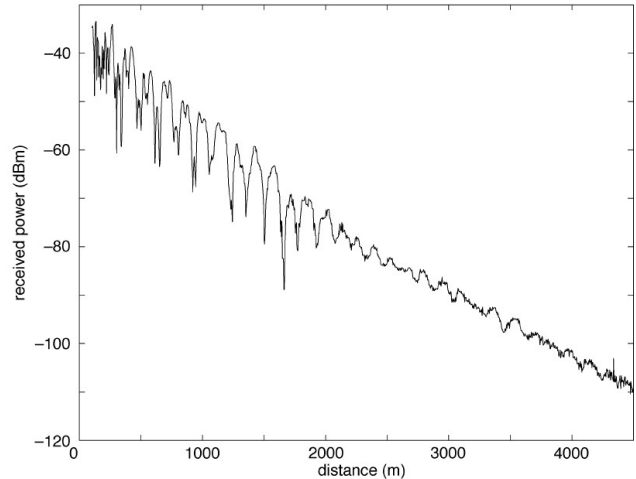
3.2 Diffrakció

A diffrakciós összefüggéseket a Fresnel-Kirchoff késél diffrakcióból kiindulva értelmezzük. A bemutatott vizsgálatnál diffrakciós terjedési út nem alakul ki, ez az alagútban belüli objektumok figyelembe vételekor jelentkezik, egy részletesebb vizsgálat esetén.

4. RÁDIÓS SZAKASZCSILLAPÍTÁS VIZSGÁLATA

Alagutakon belül az elektromágneses hullámok csillapításának becslése a radar alkalmazáson túl számos rádiókommunikációs feladat esetén felmerül, ezek például bányajáratokon belüli, földalatti vasúti kommunikáció, de a földfelszíni, keskeny utcákon történő mobil rádióhálózat tervezésénél is kezelendő probléma.

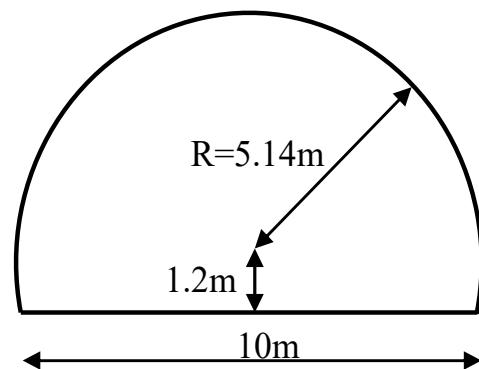
Általánosságban azt látjuk, hogy az alagút, mint csőtápvonal a szabadtéri csillapításnál kisebb csillapítást okoz a rádióhullámok terjedése során. A különböző keresztmetszetű alagutak csillapítás számos esetben vizsgálták a kommunikációs frekvenciák esetére. (Martine Liénard et. al., 2004)



6. ábra. Alagúton terjedő elektromágneses hullám csillapítása 2.45GHz-en

A vizsgálatokat beton falazattal határolt alagút modellre végeztük az alábbi keresztmetszetre (7. ábra). Az alagút egyenes kiterjedésű, de a numerikus számításokat tetszőleges görbült pályára el lehet végezni a 3. fejezetben ismertetett sugárút keresés módszerrel.

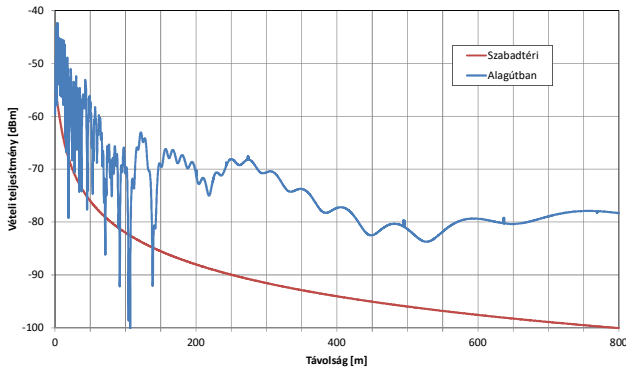
$$(F6.2)$$



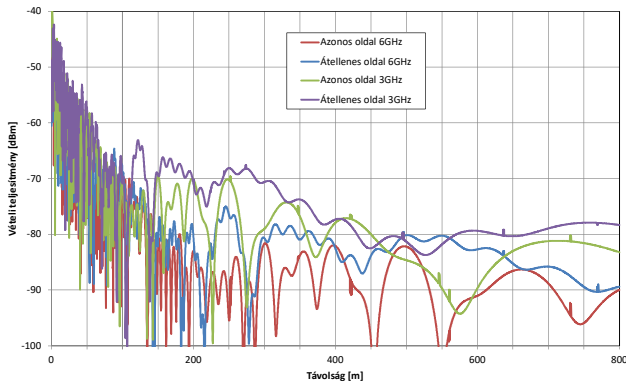
7. ábra. A vizsgálat során alkalmazott alagút keresztmetszete

A vizsgálatokat 3, 6 és 76.5 GHz-en végeztük, az első két frekvencián kapott eredmények a rádiós összeköttetések, a

harmadik a radar rendszerek vizsgálatok minősítéséhez adnak segítséget.



8. ábra. Rádiós szabadtéri és alagútbeli csillapítás összehasonlítása 3GHz-en (az adó és vevőantenna magassága 2m)

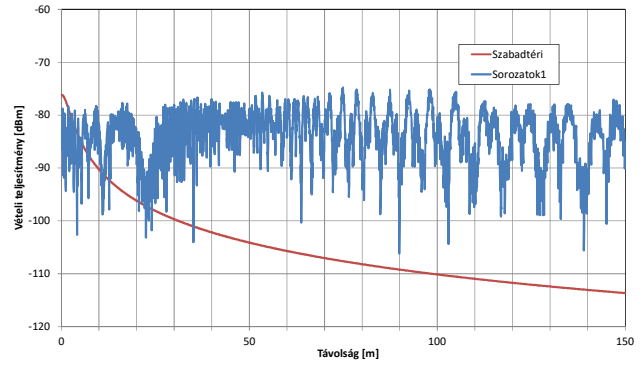


9. ábra. Rádiós alagútbeli csillapítás 3 és 6GHz-en, adó és vevőantenna az alagút azonos ill. átellenes sávjában (az adó és vevőantenna magassága 2m)

A 8. ábrán a legfontosabb következtetés, hogy a rádióhullámok csillapítása szabadtéri terjedéskor jelentősen nagyobb, mint az alagútbeli terjedés esetén. A csillapítás különbség 15-20dB körüli, tehát a rádióösszeköttetések egyik legfontosabb paramétere, a csillapítás mérleg szerint előnyösebb az alagútbeli terjedés.

3 és 6 GHz-en további összehasonlítást láthatunk az adó és vevőantennát azonos ill. átellenes oldalon elhelyezve. A 9. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a csillapítás a távolság függvényében nem tér el jelentősen, azonban az interferencia zónában (0-400m) a vett teljesítmény gyorsan változik a távolság függvényében. (fading)

A 76.5GHz-en elvégzett vizsgálat (10. ábra) a csillapítás hasonló viselkedését mutatja, mint az alacsonyabb frekvenciás vizsgálatok, azaz az alagútban történő terjedés csillapítása jelentősen kisebb (20-30dB eltérés), és a rövidebb hullámhossz miatt a vett teljesítmény változása a távolság növelésével sokkal gyorsabb.



10. ábra. Rádiós szabadtéri és alagútbeli csillapítás összehasonlítása 76.5 GHz-en (az adó és vevőantenna magassága 2m)

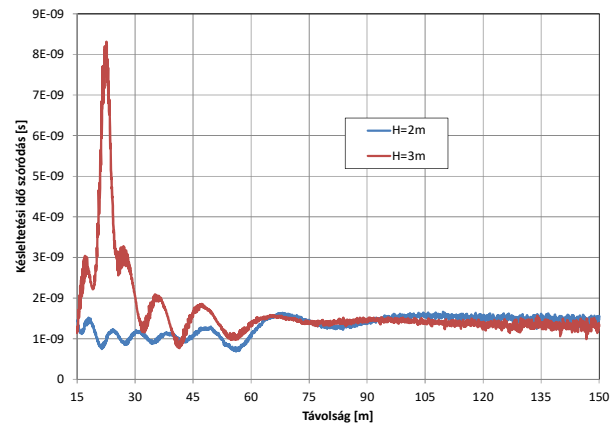
A csillapítás vizsgálata alapján nem indokolható az alagúti mérésnél jelentkező radar detekciós paraméterének romlása, ezért a továbbiakban megvizsgáljuk az egyes hullámösszetevők késleltetési idő eltérését az alagútban történő hullámterjedés esetére.

5. TÖBBUTAS TERJEDÉS VIZSGÁLATA

A sugárút követés módszerének eredményei közvetlen információt adnak a rádiócsatorna impulzusválaszában a többutas terjedés következtében bekövetkező késleltetési idő szóródásra, ami a szakaszcsillapításon túl a rádiócsatorna másik fontos jellemzője.

Az alagútbeli rádiócsatorna ezen vizsgálatát 2 és 3m magasságú irányított antenna modellel végeztük, melynek iránykarakterisztikája megfelel a Del-ESR radar 1. Táblázat belső főnyaláb paramétereknek.

A vevőantennákat 1m magasságban, az alagút azonos oldalán helyeztük el. A késleltetési idő szóródás eredményeit a 11. ábrán mutatjuk be.

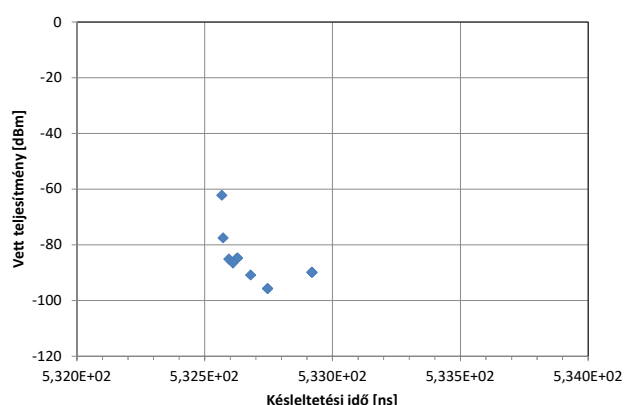


11. ábra. Késleltetési idő szóródás a távolság függvényében 2 és 3m magasságban elhelyezett adóantenna esetére

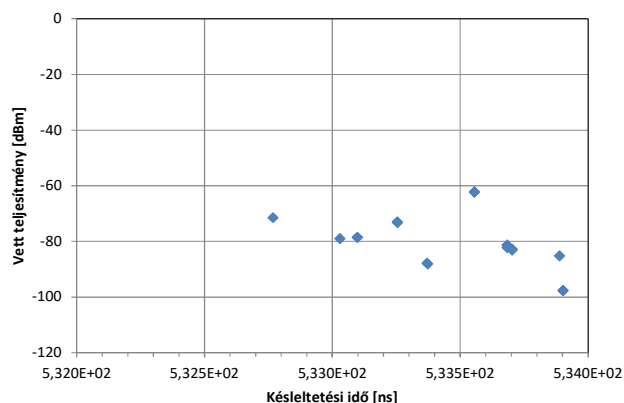
A 11. ábrán jól látszik, hogy a két eltérő magasságban elhelyezett adóantenna esetén az 1m magasságban elhelyezett vevőantenna pozíciókban a késleltetési idő szóródásban

jelentős eltérés lép fel. Az adóantennától 15-65m távolságtartományban a 2m magasságú adóantenna esetén a késleltetési idő szóródás 1.4ns alatt marad, ezzel szemben 3m adóantenna magasság esetén jelentős maximumok lépnek fel erős hullámzás mellett. 75m-nél nagyobb vevőantenna távolságok esetén a késleltetési idő szóródás lényegében független az adóantenna magasságától.

A késleltetési idő szóródásban jelentkező eltérések alapján az alagútban történt radar detekciós paraméterek romlása a többutas terjedés okozta késleltetési idő szóródás következménye. A távolságtartományokban jelentkező eltérések a mérésnél jelentkező detekciós távolságtartományt is megmagyarázzák.



12. ábra. Vett teljesítmény összetevők a beérkezési idő függvényében (H=2m radarantenna magasság, 80m céltárgy távolság)



13. ábra. Vett teljesítmény összetevők a beérkezési idő függvényében (H=3m radarantenna magasság, 80m céltárgy távolság)

A feltételezés igazolására céltárgy modellt helyeztünk el az alagútban és a radarnak megfelelő adó-, vevőantenna párral végeztünk számításokat. A terjedési utakból következő vett

teljesítmény összetevőket a beérkezési (késleltetési) idő függvényében a 12. és 13. ábrákon mutatjuk be.

A vett teljesítmény komponensek késleltetési idő vizsgálata azt mutatja, hogy jelentősen kisebb a beérkező komponensek időkülönbsége a H=2m radarantenna magasság esetén és a maximális összetevőhöz képest a további komponensek ennél több, mint 20dB-lel kisebbek. A H=3m radarantenna magasság esetén az egyes beérkező összetevők háromszoros időtartományra terülnek szét és nincs domináns komponens. A radar detekciónál bekövetkező eltérések alaposabb elemzéséhez a céltárgy detekciós algoritmust kellene tovább vizsgálni, de az előző eredmények már így is magyarázatot adnak a méréseknél tapasztalt eltérésekre.

Az alagútban magasan elhelyezett radarok alkalmazásának feltétele az előző vizsgálatok alapján a keskenyebb főnyalábú antennák alkalmazása, melyek esetén a többutas terjedés analízált problémái jelentősen csökkenthetők.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A cikkben megvizsgáltuk az alagúti környezetben kialakuló hullámterjedési sajátosságokat rádiókommunikációs összeköttetések ill. radar detekciós problémák esetére. A vizsgálatok szerint az alagút az elektromágneses hullám térerősségének gyors változását továbbá a késleltetési idő szóródás növekedését okozza. Az alagút csőtápvonalként működik, ezért a térerősség csúcserőssége nagy távolságban sem csökken jelentősen, ezért a radar detekciós paraméterének romlása elsősorban a többutas terjedés miatti késleltetési idő szóródás növekedés következménye.

IRODALOMJEGYZÉK

- R. Schneider, D. Didascalou, and W. Wiesbeck, "Impact of road surfaces on millimeter-wave propagation," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 49, no. 4, pp. 1314–1320, Jul. 2000.
- Young-Duk Kim, Guk-Jin Son, JunKwang Kim and WooYoung Jung, "Performance Comparison of Vehicular Radar System between On-Road and Tunnel Space", 2016 5th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics, Kumamoto, Japan
- D. Didascalou ; J. Maurer ; W. Wiesbeck, „Subway tunnel guided electromagnetic wave propagation at mobile communications frequencies”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume: 49, Issue: 11, Nov 2001
- Martine Liénard, Pierre Degauque, Pierre Laly, „Long-Range Radar Sensor for Application in Railway Tunnels”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 53, No. 3, May 2004