

KÖZÚTI FORGALOMBECSLÉS MOBILTELEFON-HÁLÓZATI ESEMÉNYEK ALAPJÁN VÁROSI KÖRNYEZETBEN

DR. TETTAMANTI TAMÁS, DR. VARGA ISTVÁN, DR. GÁSPÁR PÉTER

1. BEVEZETŐ

A mobiltelefon-kommunikáció gyors növekedése újszerű kutatásokat indított el az elmúlt évtizedben. A mobiltelefonok hálózati jelzései értékes információként használhatók fel korszerű közlekedési alkalmazásokban. Az anonim rádiótelefonok (terminálok) helyváltoztatásának megfigyelésével lehetőség nyílik a forgalmi áramlatok, valamint azok útválasztásának meghatározására. A terminálok ilyenformán felfedett nyomai hatékonyan alkalmazhatók méréshez, forgalom-előrejelzéshez, irányításhoz, vagy egyéb alkalmazásokhoz a közúti közlekedés területén.

Ha egy mobiltelefon mozog különböző típusú jelzéseket generálhat a rádiófrekvencia alapú telekommunikáció működésének megfelelően. Ezek az események akár helyfüggő szolgáltatások kiszolgáló adataiként is szolgálhatnak [1]. E téma számos kutatási iránya mellett, kiemelkedő terület a rádiótelefon-hálózati adatok közúti közlekedésben való alkalmazhatósága. A hálózati adatok legnagyobb előnyét a könnyű elérhetőség jelenti, hiszen gyakorlatilag mindenki rendelkezik mobiltelefonnal. A hagyományos forgalomérzékelési technológiák (kamera, mágneses elvű detektorok, stb.) igen költségesek, és nem alkalmasak a hálózat teljeskörű mérésére. Ezzel szemben az összes, utazók által generált eseményt a telekommunikációs rendszert üzemeltető operátor automatikusan érzékeli a bázisállomásokon (adótorny) keresztül. Ezáltal a mobiltelefonok gyakorlatilag olyan detektorokként is felfoghatók, amelyek nem igényelnek addicionális infrastruktúrabővítést. Az ilyen adatok feldolgozása ugyanakkor megfelelő algoritmusok meglétét igényli.

Cikkünkben GSM mobiltelefon-hálózati események alapján útválasztás, célforgalmi mátrix és forgalmi áramlatok becslésének módszereit mutatjuk be városi közlekedési hálózatban.

2. MOBILTELEFON-HÁLÓZATI ESEMÉNYEK ALKALMAZÁSA A KÖZÚTI KÖZLEKEDÉSBEN

A következőkben - a témához kapcsolódóan - néhány érdekesebb kutatási eredményt ismertetünk a teljesség igénye nélkül.

A kutatások alapvetően két fő területre fókuszálnak. Egyrészt a legfontosabb forgalomtechnikai paraméterek (sebesség, utazási idő, forgalomnagyság, célforgalmi mátrix) mérési és becslési lehetőségeit vizsgálják. Másrészt, az intelligens közlekedési rendszerekben (ITS) való felhasználhatóság kutatása is cél (tipikusan navigációs rendszerek és szolgáltatások, incidens-detektálás, útdíj-szedés, utazási információszolgáltatás).

A forgalomtechnikai változók GSM hálózatban való mérésének egy irodalmi áttekintését publikálta [2]. Utazó mobiltelefon sebességbecslésére mutatott módszert [3] Kalman-szűrő felhasználásával [4]. [5] az utazási idő meghatározását vizsgálta autópályán mozgó terminálok alapján. [6] valós idejű technikát ismertetett autópálya forgalomnagyságának és forgalomsűrűségének mérésére. [7] és [8] mobiltelefonok követésére javasolt módszert az egymást követő - bázisállomások által kibocsátott - jelerősítések mérésével. Mobiltelefon alapú célforgalmi mátrix becslésére elsők között mutatott példát [9]. Hasonlóképpen [10] honnan-hová forgalmakat becsült Bostonban az eredményeket kikérdezéses adatokkal validálva. [11] és [12] pedig újszerű, rádiótelefon-hálózat alapú módszereket ismertettek ITS alkalmazásokhoz.

Ezen publikációk a lehetséges közlekedési alkalmazások nagy részét lefedik. Ugyanakkor olyan, városi környezetben használható útválasztást becsülő módszert nem ismertetnek, amely nem igényel összetett hullámterjedési és 3D-s környezeti modellezést. Ennek megfelelően cikkünkben olyan módszertant mutatunk be célforgalmi adatok becslésére, amely egy egyszerű, de hatékony mobiltelefon-hálózati modellezést alkalmaz.

3 HÁTTÉRISMERETEK

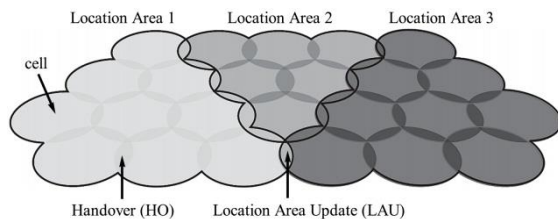
Ebben a fejezetben olyan háttérismereti alapokat foglalunk össze, amelyek a később bemutatandó módszerünk alapjait képezik.

3.1 HÁLÓZATI JELZÉSEK GSM RENDSZERBEN

A GSM kommunikációs hálózat bázisállomások által lefedett területi egységekből – cellákból – épül fel. Az adótornyok fő feladata a rádióhullám alapú kapcsolatot fenntartása a terminál és a hálózat között. Egy cella sugarának hossza antenna paramétereiktől és hullámterjedési feltételektől függ (néhány száz métertől több tíz kilométerig terjedhet). A cellák ún. Location Area-ba (LA) csoportosulnak (lásd 1. ábra).

Amikor egy utazó terminál áthalad a hálózaton különböző jelzéseket indukál a rendszerben. A leg-

gyakrabban előforduló jelzési események az ún. Handover (HO) és a Location Area Update (LAU), amelyeket a cellaváltás, ill. a LA-váltás hoznak létre (lásd 1. ábra). HO akkor keletkezik, amikor egy hívásban lévő telefon átirányításra kerül az adott cellából és csatornáról egy másik cellába, ill. csatornára. *Idle* mód (bekapcsolt telefon, de nincs hívásban) esetén LAU esemény generálódik, amennyiben a terminál átlép egy másik LA-ba.



1. ábra: A GSM hálózat felépítése

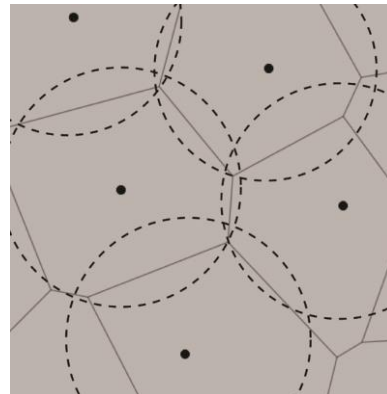
Mivel a HO/LAU hálózati jelzések automatikusan keletkeznek a rendszerben, nagy lehetőségek bújnak meg ezen adatok további hasznosításában. A lehetséges alkalmazásokat már széles körben kutatják (lásd 2. fejezet). A jelzési események felhasználásához első körben a megfelelő adatgyűjtés megvalósítása szükséges. Számos monitorozási módszer létezik, amelyeket [13] aktív, passzív, kliensoldali, szerveroldali, vagy harmadik fél által kínált megoldásokként osztályoz.

Természetesen az adatvédelmi kérdések vizsgálata és tisztázása elkerülhetetlen a mobiltelefon adatok gyűjtésekor. Fontos megjegyezni, hogy technológiai szempontból az adatvédelem teljes mértékben garantálható. A jogi kérdések ugyanakkor még tisztázatlanok. A kulcskérdés alapvetően az adatok hozzáférhetőségét jelenti [14]. A problémát a mobiltelefon jelzésekből származó információk hozzáférhetőségének egyértelmű jogi szabályozásával lehetne feloldani. Azt is fontos hozzátenni, hogy módszerünkben a jelzési események, mint aggregált adatok kerülnek felhasználásra, azaz alapvetően a tömeges forgalmi áramlatok, nem pedig az egyéni felhasználók mozgásának megismerése a cél.

3.2 VORONOI-DIAGRAM A GSM HÁLÓZAT MODELLEZÉSÉRE

A mobiltelefon-hálózat egy egyszerű modellezési módja a térinformatikában jól ismert Voronoi-tesszelláció [15], [16], amely alapján csupán az adótornyok koordinátái ismeretében megbecsülhetők a cellák által lefedett területek. A Voronoi-tesszelláció az adott kétdimenziós tér konvex sokszögekre való felosztását jelenti n generáló pont segítségével. A Voronoi-cella egy olyan sokszöget jelöl, amelynek az összes belső pontja közelebb van a saját generátor pontjához, mint az összes többi

generátor ponthoz. Ebben a koncepcióban pedig a bázisállomások szolgálnak a tesszelláció generátor pontjaiként (lásd 2. ábra).

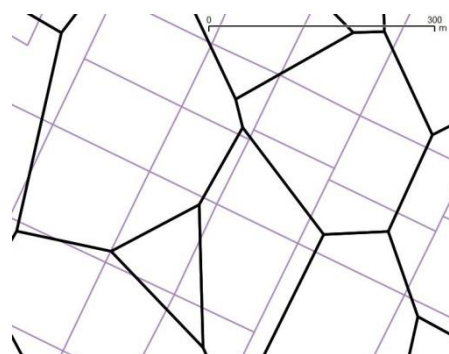


2. ábra: GSM-cellák, mint Voronoi-sokszögek

A Voronoi-diagram alkalmazásának legfőbb előnye az egyszerűségéből fakad. Ugyanakkor az, hogy minden antenna azonos térerősséggel van figyelembe véve, némi pontatlansághoz is vezethet. A pontosság javítására ajánlott módszereket [15] és [17]: a különböző jelerősségek figyelembevételével súlyozott Voronoi-diagram állítható elő.

4 ÚTVÁLASZTÁS BECSLÉSE MOBILTELEFON-HÁLÓZATI ESEMÉNYEKBŐL

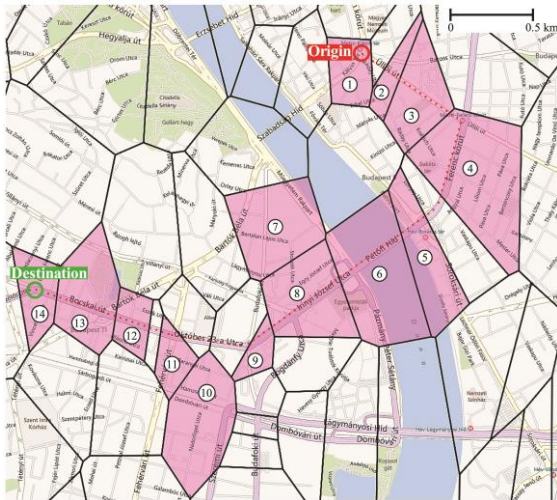
Amennyiben egy mozgó terminál HO/LAU jelzési adatai elérhetőek, a telefon által bejárt útvonal cellaszinten meghatározható. Az útválasztás azonban nem egyértelmű, különösen városi környezetben, ahol egy darab cella számos utcát és csomópontot is lefedhet egyszerre (lásd 3. ábra). Így a cellán belül több útvonal választása is szóba jöhet.



3. ábra: Voronoi-sokszögek Budapest belvárosában (V. ker.)

Az itt és a cikk további részében felhasznált bázisállomás adatok az OpenCellID projekt (www.opencellid.org) adatbázisából származnak. A Voronoi-tesszellációt (fekete vonalak) az egyik magyar mobilszolgáltató antennáira vonatkozóan végeztük el Quantum GIS szoftverrel (www.qgis.org).

A fenti probléma mellett további nehézségeket okozhat az események mérésének bizonytalansága. A változó hálózati jellemzők miatt ugyanis olyan HO események is generálódhatnak, amelyek egyáltalán nem segítik az útvonal meghatározást (pl. a terminál „pingpongozik” két cella között, holott egy irányban halad). Emiatt a mért eseményeket érdemes szűrni a felhasználhatóságuk szerint. Egy ilyen szűrt HO-szekvencia Voronoi cellákkal kifejezett nyomát mutatja az 4. ábra, ahol az *Origin* a kiindulási pontot, ill. a *Destination* pedig az utazás célját jelöli.



4. ábra: Egy utazó terminál Voronoi-cella sorozata

A tesztmérés során bejárt útvonalat a piros, pontozott vonal jelöli. A mérést a Nokia Siemens Networks Kft. szoftverével (Mobile Quality Analyzer) rögzítettük.

A következőkben az eddig leírt útvonalválasztási problémára javasolunk megoldást. Adott *O-D* (*Origin-Destination*) párra elvégzett közlekedési ráterheléssel az utazó útválasztása megbecsülhető a cellákon belül is. A terminál első és utolsó érintett Voronoi-celláit *O-D* zónákként értelmezzük. Mint ismeretes a ráterhelés a célforgalmi mátrix (*O-D* forgalmi igények) ismeretében végezhető el. Jelen esetben azzal a feltételezéssel élünk, hogy a mátrix rendelkezésre áll (a következő fejezetben részletesen lesz szó a célforgalmi mátrix előállításáról mobiltelefonos eseményekből). Ugyanakkor akár fiktív célforgalmi igény is alkalmazható, hiszen gyakorlatilag az utazási idő szerinti legrövidebb útvonalakat keressük adott *O-D* pár között. A következő lépés a ráterhelési algoritmus által megtalált utak közül az adott HO-szekvenciához kapcsolódó, legvalószínűbb útvonal kiválasztása. A cellákat $i = 1, 2, \dots, m$ és az útvonalakat $j = 1, 2, \dots, n$ indexeléssel jelöljük. Praktikus módszerként a cellák és a potenciális útvonalak közötti négyzetes távolság figyelembe

vételét javasoljuk. Ez gyakorlatilag a legrövidebb euklideszi távolságok ($d_{i,j}$) lemérését jelenti az i -edik cella súlypontja és a j -edik útvonal között úgy, hogy a súlypontból húzott mérő vonal merőleges legyen az útvonal érintőjére (lásd 5. ábra).



5. ábra: Legrövidebb távolság egy cella súlypontja és egy útvonal között

Minden j útvonalra vonatkozóan kiszámítható a négyzetes távolságok összege a következőképpen:

$$D_j = \sum_{i=1}^m d_{i,j}^2 \quad (1)$$

Ezzel tehát az érintett cellák és a kijelölt útvonalak közötti négyzetes eltérés számszerűsíthető. A legkisebb D_j kijelöli a mobiltelefon legvalószínűbb útvonalát, azaz a következő összefüggést kell alkalmaznunk:

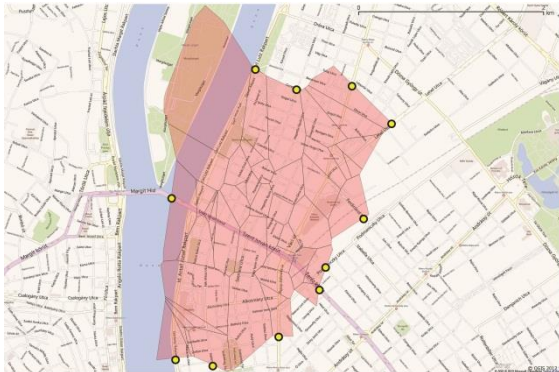
$$\min(D_j), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Ezzel gyakorlatilag kiválaszthatjuk azt az útvonalat, amely a legjobban illeszkedik a Voronoi-cellák súlypontjaira.

5 A KÖZÚTI FORGALOMMODELL ADAPTÁLÁSA A MOBILTELEFON-HÁLÓZATHOZ *O-D* MÁTRIX BECSLÉS CÉLJÁBÓL

Célforgalmi áramlatok meghatározásakor a klasszikus négylépéses közlekedési modellezésnek megfelelően először a hálózat fő csomópontjait kell meghatározni, amelyek a forgalom kiindulási- és célpontjaiként szolgálnak (*O-D* párok). Városi közlekedési hálózatban a forgalommodell könnyen adaptálható a mobiltelefon-hálózat cella szintű modelljéhez. A módszer lényege, hogy a célforgalmi csomópontokat az aktuális Location Area (LA) határoló celláiban definiáljuk. Erre azért van szükség, mert HO eseményt csak hívás közben generál a mobiltelefon. Ugyanakkor, idle módban LAU jelzést mindig szolgáltat a készülék, amikor egy LA határon keresztül halad. Így a Location Area mint területi egy-

ség jól felhasználható célforgalmi becslésre (lásd 6. ábra). Ebben a koncepcióban az utazás tehát a Location Area egyik peremétől a másik pereméig tartó helyváltoztatás.



6. ábra: Az egyik magyar mobilszolgáltató Location Area-ja Budapesten (~2,8 km²)

Városi környezetben a mobiltelefon-cellák sugara átlagosan 100-200 méter vagy kevesebb (természetesen a cellák nem mindig kör alakúak). A Location Area pedig néhány négyzetkilométer nagyságú. Így annak mérete alkalmas forgalombecslésre. Amennyiben egy egész város közlekedését tekintjük, a hálózat alhálózatokra bontható, amelynek építőelemei a Location Area-k.

A HO és LAU események LA határon történő aggregálásával előállítható az adott LA célforgalmi mátrixa. Természetesen csak megbízható jelzési eseménypárokat kell ekkor figyelembe venni. Azaz terminálonként egy belépő és egy kilépő esemény szükséges megfelelő mintavételezési időn belül. Ezzel a technikával a Location Area-n belüli mozgásokat (a terminál nem hagyja el az adott LA-t) elhanyagoljuk tekintettel arra, hogy ezen utazások száma nem jelentős az átmenő forgalomhoz viszonyítva.

A kiindulási- és a célpontokat tipikusan a jelentősebb utak és a határoló cellák metszéspontjában rögzíthetjük. A példának vett Location Area-ban 11 darab célforgalmi csomópont definiálható (lásd a sárga pontokat a 7. ábrán). A kisforgalmú mellékutak elhanyagolhatók a modellben.

A leírt módszerrel természetesen csak egy mobilszolgáltató Location Area-jára vonatkozóan hozunk létre $O-D$ adatokat. Emiatt a becsült utazási igényeket a telefonszolgáltatók piaci részesedésének arányában extrapolálni kell. Egy másik lehetőség pedig, hogy az összes operátortól gyűjtünk adatokat, és azokat együtt kezeljük.

Feltételezve, hogy a Voronoi-tesszelláció és a megfelelő célforgalmi pontok rendelkezésre állnak az

adott LA-ra vonatkozóan, a következő forgalombecslési módszert definiáljuk:

- 1) A Location Area határoló celláiban történő HO/LAU események aggregálása.
- 2) A jelzési események szűrése a pontosabb adatok kinyerése érdekében (lásd 4. fejezet).
- 3) A célforgalmi mátrix meghatározása a jelzési események alapján.
- 4) Forgalmi ráterhelés elvégzése a Location Area-ra vonatkozóan.

6 FORGALOMBECSLÉS KIBŐVÍTETT RÁTERHELÉSI ELJÁRÁSSAL

Az előző fejezetben egy olyan módszert ismertettünk, amely kizárólag a Location Area határan keletkező HO/LAU eseményeket használja fel a célforgalmi mátrix becsléséhez. Az így meghatározott $O-D$ mátrix alapján forgalmi ráterhelést végezhetünk, amely segítségével megkaphatjuk a hálózat útvonalainak forgalmát. Ugyanakkor a területen belül történő HO események is hatékonyan felhasználhatók, segítségével a forgalombecslés megbízhatósága tovább javítható. A Voronoi-tesszellációval (lásd 3.2 fejezet) leírt hálózat és az aggregált HO/LAU események alkalmazásával a mobiltelefonok utazási ideje meghatározható [18]. Napközben az átlagos híváshossz 2-3 perc [19], ám ez is elegendő ahhoz, hogy egyes útszakaszokról információt kapjunk.

A klasszikus egyensúlyi forgalmi ráterhelés [20] kiegészíthető az utazási idő adatokkal - amennyiben rendelkezésre állnak megfelelő mintavételezési időn belül. Az érintett útszakaszok teljesítményfüggvénye (t_a) bekorlátozható a mért átlagos utazási idővel. Ez azt jelenti gyakorlatilag, hogy a ráterhelés optimalizálási feladatában megfogalmazott peremfeltételeket kiegészítjük a következő korlátozással:

$$t_a^m(1 - \Delta_a) \leq t_a \leq t_a^m(1 + \Delta_a) \quad (3)$$

t_a^m az a élre (útszakaszra) vonatkozó, mért átlagos utazási idő. Δ_a pedig egy bizonytalansági tényező, amely empirikusan kalibrálható.

A módszer illusztrálásaként tekintsük ismételtén a 7. ábrát, amelyen egy olyan telefont szemléltetünk, amely M ponton haladt be a Location Area-ba, és N pontban hagyta el azt. A kiindulási pont és a célpont a LAU események alapján meghatározhatók. Emellett a sárgával jelölt cellákban HO eseményt is generált a terminál, amikor hívásban volt. A 4. fejezetben ismertetett technika segítségével a telefon legvalószínűbb útvonala meghatározható (kék vonal). Majd az utazási ideje is kiszámítható a sárga cellák által lefedett útvonalra vonatkozóan.



7. ábra: Egy fiktív utazás M-ből N pontba

Feltételezve, hogy a Voronoi-tesszelláció és a megfelelő célforgalmi pontok rendelkezésre állnak az adott LA-ra vonatkozóan, a fent bemutatott forgalombecslési módszer az alábbi algoritmikus lépésekben foglalható össze:

- 1) HO/LAU események aggregálása a Location Area-n belül.
- 2) A jelzési események szűrése a pontosabb adatok kinyerése érdekében (lásd 4. fejezet).
- 3) A célforgalmi mátrix meghatározása a jelzési események alapján.
- 4) Forgalmi ráterhelés elvégzése a Location Area-ra vonatkozóan.
- 5) A HO-szekvenciát generáló telefonok legvalószínűbb útvonalának meghatározása az előző lépésben elvégzett ráterhelés eredménye alapján (lásd 4. fejezet).
- 6) A HO-szekvenciát generáló telefonok átlagos utazási idejének szakaszonkénti meghatározása (t_a^m) a legvalószínűbb útvonalon.
- 7) Közlekedési ráterhelési probléma újbóli megoldása - az utazási időkre vonatkozó - addicionális korlátozások (3) bevonásával.

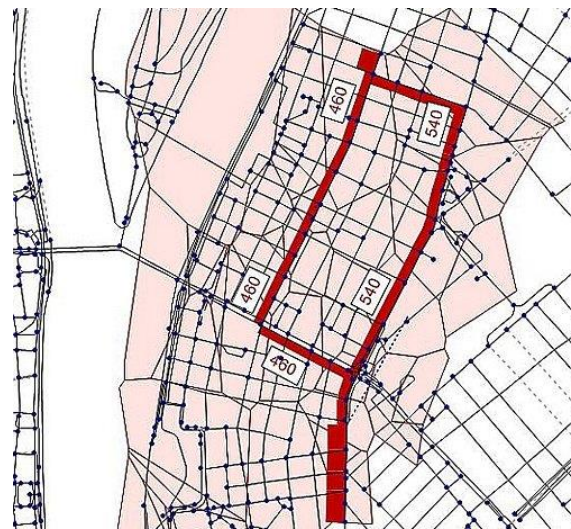
Illusztratív példaként két forgalmi ráterhelést hasonlítottunk össze. A szimulációban a *Bureau of Public Roads* által meghatározott teljesítményfüggvényt alkalmaztuk [21]:

$$t_a(q_a) = t_a^{free} \left(1 + \alpha \left(\frac{q_a}{q_a^{max}} \right)^\beta \right) \quad (4)$$

ahol q_a a szakasz forgalomnagysága, t_a^{free} a megengedett legnagyobb sebességhez tartozó utazási idő, α és β pedig modellparaméterek. A példához a VISUM szimulációs szoftver egyensúlyi ráterhelési algoritmusát használtuk (*Equilibrium Assignment*); egyszer t_a^m utazási idő nélkül, majd (3) korlátozás figyelembevételével. A szimulációban $t_a^m = 0,5t_a^{free}$ értéket állítottunk be. Ez gyakorlatilag annyit jelent, hogy a mozgó terminál utazási ideje a szabadáramlási esethez tartozó utazási idő fele volt. A mérés bizonytalanságát a $\Delta_\alpha = 0,2$ paraméterrel határoztuk meg, azaz a bekorlátozott teljesítményfüggvények esetében $\pm 20\%$ -os eltérés megengedett t_a^m -hoz képest a ráterhelés optimalizálási feladatában (lásd (3)). Az első és második ráterhelés eredményeit a 8. és 9. ábrák szemléltetik. A ráterhelés számszerű adatait a 1. táblázat mutatja. Jól megfigyelhető, hogy a mért utazási idő adat mennyire befolyásolja a ráterhelés végeredményét.

Ráterhelés	Útvonal száma	Forgalomnagyság (J/h)	Utazási idő (min:sec)	Sebesség (km/h)	Távolság (km)
t_a^m nélkül	1	460	9:13	20	2,1
	2	540	6:19	26	2,1
t_a^m figyelembevételével	1	325	10:8	18	2,1
	2	675	6:24	26	2,1

1. táblázat: A ráterhelés számszerű eredményei



8. ábra: Ráterhelés eredménye VISUM-ban (3) alkalmazása nélkül



9. ábra: Ráterhelés eredménye VISUM-ban (3) alkalmazásával

7 ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A cikkben a mobiltelefon-technológia nyújtotta adatok felhasználásával olyan újszerű technikákat ismertettünk, amelyek hatékonyan hozzájárulhatnak a városi közúti forgalom megbízható becsléséhez. A becslési módszertan analógiája alkalmazható testőleges vezeték nélküli hálózatban, pl. WI-FI, RFID, Bluetooth; ezen kívül potenciális bázisát jelentheti további korszerű ITS alkalmazásoknak. Az ismertetett módszerek alkalmazhatók statikusan – a múltbeli GSM jelzési adatokra építve –, de akár dinamikus módon is megfelelő mintavételi idő alkalmazásával.

Jövőbeli kutatásunk részét képezi annak vizsgálata, hogy miként lehet a mobiltelefon-hálózati eseményeket és a hagyományos keresztmetszeti (pl. hurokdetektoros) méréseket együttesen, hatékony forgalombecslésre felhasználni.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetet mondanak a TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0012: "Smarter Transport" - Kooperatív közlekedési rendszerek infokommunikációs támogatása - projekt (a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával). A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP-4.2.2.B-10/1--2010-0009 program támogatja. A kutatási munkát támogatta továbbá a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíja. Külön

köszönjük a Nokia Siemens Networks Kft. támogatását a tesztmérésekkel kapcsolatosan.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] A. Küpper. Location-based Services. John Wiley & Sons, 2005. ISBN 978-0470-09231-6.
- [2] N. Caceres, J.P. Wideberg, and F.G. Benitez. Review of traffic data estimations extracted from cellular networks. IET Intelligent Transport Systems, 2(3):179–192, 2008. doi: 10.1049/iet-its:20080003.
- [3] P.N. Pathirana, A.V. Savkin, N. Bulusu, and T. Plunkett. Speed control and policing in a cellular mobile network: Speednet. Computer Communications, 29(17):3633–3646, 2006. ISSN 0140-3664. doi: 10.1016/j.comcom.2006.06.006.
- [4] Luspay T., Tettamanti T., és Varga I. Forgalomirányítás, Közúti járműforgalom modellezése és irányítása. Typotex Kiadó, 2011.
- [5] J.L. Ygnace, C. Drane, Y.B. Yim, and R. de Lacvivier. Travel time estimation on the San Francisco Bay Area network using cellular phones as probes. Technical report, University of California, Berkeley, 2000.
- [6] V. Astarita, R.L. Bertini, S. d'Elia, and G. Guido. Motorway traffic parameter estimation from mobile phone counts. European Journal of Operational Research, 175(3):1435–1446, 2006. ISSN 0377-2217. doi: 10.1016/j.ejor.2005.02.020.
- [7] M. Hellebrandt, R. Mathar, and M. Scheibenbogen. Estimating position and velocity of mobiles in cellular radio networks. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 46(1): 65–71, 1997.
- [8] M. Hellebrandt and R. Mathar. Location tracking of mobiles in cellular radio networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 48:1558–1562, 1999.
- [9] J. White and I. Wells. Extracting origin destination information from mobile phone data. IEE Conference Publications, 2002(CP486):30–34, 2002. doi: 10.1049/cp:20020200.
- [10] F. Calabrese, G. Di Lorenzo, L. Liu, and C. Ratti. Estimating origin-destination flows using mobile phone location data. Pervasive Computing, IEEE, 10(4):36–44, 2011b. ISSN 1536-1268. doi: 10.1109/MPRV.2011.41
- [11] D. Valerio. Road traffic information from cellular network signaling. Technical Report

- FTW-TR-2009-003, Telecommunications Research Center Vienna, 2009.
- [12] F. Calabrese, M. Colonna, P. Lovisolo, D. Parata, and C. Ratti. Real-time urban monitoring using cell phones: A case study in Rome. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(1):141–151, 2011
 - [13] D. Valerio, A. D’Alconzo, F. Ricciato, and W. Wiedermann. Exploiting cellular networks for road traffic estimation: A survey and a research roadmap. *IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, pages 1–5, 2009.
 - [14] L. Ackerman, J. Kempf, and M. Toshio. Wireless location privacy: Law and policy in the U.S., EU and Japan. Technical report, DoCoMo USA Labs, 2003.
 - [15] A.-E. Baert and D. Semé. Voronoi mobile cellular networks: topological properties. In *Third International Symposium on Algorithms, Models and Tools for Parallel Computing on Heterogeneous Networks*, pages 29–35, 2004. doi: 10.1109/ISPDC.2004.58.
 - [16] J. Candia, M.C. González, P. Wang, T. Schoenharl, G. Madey, and A.-L. Barabási. Uncovering individual and collective human dynamics from mobile phone records. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 41(22):224015, 2008.
 - [17] J.N. Portela and M.S. Alencar. Cellular network as a multiplicatively weighted Voronoi diagram. In *IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pages 913-917, 2006.
 - [18] Á. Ludvig, T. Tettamanti, and I. Varga. Travel time estimation in urban road traffic networks based on radio signaling data. In *14th International Conference on Modern Information Technology in the Innovation Processes of Industrial Enterprises, MITIP*, pages 514–527, Budapest, 2012. ISBN 978-963-311-373-8.
 - [19] D. Willkomm, S. Machiraju, J. Bolot, and A. Wolisz. Primary user behavior in cellular networks and implications for dynamic spectrum access. *Communications Magazine*, IEEE, 47(3):88–95, 2009.
 - [20] J.G. Wardrop. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, 1-2(9):325–378, 1952.
 - [21] *Traffic Assignment Manual for Application with a Large, High Speed Computer*. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, Washington, U.S., 1964.