



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Járműkommunikációt kiszolgáló backhaul hálózat modellezése és elemzése

Készítette:

Lévay Mátyás

Konzulens:

Jakab Tivadar

címzetes docens

Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék

A TDK-ban ismertetett eredmények a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar Balatonfüredi Hallgatói Kutatócsoport szakmai közössége keretében jöttek létre a régió gazdasági fejlődésének elősegítése érdekében. Az eredmények létrehozása során figyelembe vettük a balatonfüredi központú Rendszertudományi Innovációs Klaszter által megfogalmazott célkitűzéseket, valamint a párhuzamosan megvalósuló EFOP 4.2.1-16-2017-00021 pályázat támogatásával elnyert „BME Balatonfüredi Tudáscentrum” térségfejlesztési terveit.

A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg (EFOP-3.6.2-16-2017-00013, Innovatív Informatikai és Infokommunikációs Megoldásokat Megalapozó Tematikus Kutatási Együttműködések).

1. Tartalomjegyzék

2.	Kivonat.....	3
3.	Abstract	4
	Modelling and analysis of the backhaul network in cooperative transportation systems	4
4.	Bevezető	5
5.	Járműkommunikációs hálózatok	5
	A járműkommunikációs hálózat általános hálózati képe	7
6.	Hálózatmegbízhatóság modellezése és elemzése.....	10
7.	V2I járműkommunikációs hálózat megbízhatósági modellezése.....	12
	Pont-pont szemlélettel készített modellek	12
	Adott területen nyújtott adatkapacitásra adható modellek	15
8.	Rendelkezésreállási számítás	16
	A kanonikus modellezés alapjai.....	16
	A vizsgált hálózati változatok	16
	A kanonikus modellezés alapjainak összefoglalása.....	18
	Egy gyakran előforduló, bonyolultabb struktúra kanonikus modellje	19
	Számítások.....	22
	A számítások eredményei	23
	Az eredmények értékelése	24
	A hálózati alapú modellezés alapjai	25
	Modellezési környezet — FlexPlanet	31
	A vizsgált hálózati változatok	33
10.	Számítások, eredmények.....	34
11.	Egyszerű útszakasz lefedettségének vizsgálata a markovi apparátussal	36
	Az eredmények.....	37
12.	Összefoglalás, következtetések.....	40
13.	Rövidítések jegyzéke	41
14.	Irodalomjegyzék	42
15.	Köszönetnyilvánítás.....	43

2. Kivonat

Napjaink egyik meghatározó tevékenysége a közúti utazás és szállítás, így érthető, hogy az újabb technikai-technológiai vívmányok ennek biztonságosabbá és hatékonyabbá tételének irányában is felhasználásra kerülnek. Egy ilyen elgondolás a járművek kommunikációja, egymással (V2V=Vehicle to Vehicle), az infrastruktúrával (V2I=Vehicle to Infrastructure), vagy akár egy központi hálózattal (V2N=Vehicle to Network). Ezekhez a kooperatív intelligens közlekedési rendszerekhez (az angol betűszóból C-ITS-ekhez) kommunikációs szolgáltatások kellene, amelyek megvalósítási változatait fontos értékelni a követelmények szempontjából. A folyamatosan alakuló alkalmazások jelenlegi fejlettségi szintje alapján azonban még nem lehet klasszikus értelemben vett részletes követelményeket meghatározni a szükséges hálózati szolgáltatásokra, ezért analitikus megközelítést alkalmazunk a lehetséges megoldások képességeinek összehasonlító elemzésére (például architektúrális változatok rendelkezésreállási számításait).

A dolgozat a szakirodalomban már meglévő és bevettnek számító rendelkezésreállási modelleket és módszereket adaptálja és terjeszti ki az RSU (út menti kommunikációs állomás)-távoli szerver pont-pont kapcsolatra, és az ONU(járműfedélzeten lévő állomás)-szerver kapcsolatra.

Erre alapozottan generikus modelleket alkalmazva lehetőség nyílik a backhaul hálózati megoldások különböző topológiai és architektúrális változatainak összehasonlító elemzésére és a kapcsolatok rendelkezésreállításának érzékenységvizsgálatára is. Ez utóbbiak alapján eldönthető, hogy melyek a kapcsolat kritikus elemei, mi határozza meg az elérhetőséget.

A kidolgozott modellek és módszerek gyakorlati alkalmazhatóságának illusztrálására a dolgozat bemutat egy hipotetikus esettanulmányt, mely a backhaul hálózat megvalósításának néhány lehetséges technológiai változatát elemzi és hasonlítja össze.

Az eredmények hozzájárulhatnak ahhoz, hogy a hálózati szolgáltatási követelmények definiálása után a backhaul hálózati architektúrát, topológiát célzottan lehessen tervezni, így redundáns elemek és erőforrások csak indokoltan kerülnek a választott megoldásokba.

3. Abstract

Modelling and analysis of the backhaul network in cooperative transportation systems

Nowadays transportation is one of the most commonly used services. That is the reason why the newest technological achievements make their way to this field, in order to improve the safety of the passengers and the efficiency of the transportation. One such an idea is the communication of vehicles (forming Cooperative Intelligent Transportation Systems/ C-ITS), ranging from vehicle-to-vehicle (V2V), vehicle-to-infrastructure (V2I), to vehicle-to-network (V2N) communication. To accomplish these, reliable communicational services are required.

Currently, the applications are in a development phase so the requirements of the services cannot be classically determined, so instead of that, we focus on analyzing the different architectural models based on e.g. availability calculations.

The main purpose of this work is to adapt and expand the well-known availability analysis models and methods to the RSU-remote application server and to the ONU- application server connections.

Based on generic models, we can carry out a comparative analysis of different architectural and topological options, and a sensitivity analysis on the connections between the terminal components of the network. Based on the achieved results, we can identify the critical points of the network service accessibility and these results enable a more coordinated approach of redundancy planning, to ensure that all redundant components are efficiently used.

In order to illustrate the practical applicability of the developed methods and models, we present a hypothetical case study which compares some architectural, topological and technological options of the vehicle communication backhaul network.

4. Bevezető

A közúti közlekedés és szállítás biztonságára és hatékonyságára vonatkozó fejlesztések már régóta fontos részét képezik a hálózati kutatásoknak, főleg mióta elkezdtek kialakulni a járműkommunikációs hálózatok. Előtte egyszerűbb módszerekkel igyekeztek növelni az utak átbecsátó képességét, vagy éppen az utazás gazdaságosságát és fenntarthatóságát.

A járműkommunikációs rendszerek megjelenése óta lehetőség nyílt bonyolultabb irányítási stratégiák alkalmazására, és akár az úton haladó (vagy éppen álló) szereplők közötti kommunikációra. Ezzel megszületett a C-ITS (= Cooperative Intelligent Transport Systems), avagy Kooperatív Intelligens Közlekedési Rendszerek fogalma. Ennek hasznossága egyszerűen látható, hiszen például ha egy hirtelen vészfékező kocsisor első autója automatikusan veszélyüzenetet tud küldeni a mögötte haladóknak, akkor akár emberi beavatkozás nélkül is meg tud állni a kocsisor, így elkerülve az autópályákon sajnos előforduló torlódásos baleseteket. Hasonló alkalmazásokkal a balesetmegelőzés, és a közlekedésirányítást támogató rendszerek is fejleszthetőek.

Az említett szolgáltatások jellegéből fakadóan nagyon fontos a szolgáltatás folytonossága, hiszen ha az egyik végpont valamiért nem képes kommunikálni (mondjuk megszakad a kapcsolat a szolgáltatást adó szerverrel), akkor pont a gyors reakcióidőt és a tájékozottságot veszítjük el, ami miatt készítjük a kommunikációs rendszert. Ennél fogva a hálózatot ebből a szempontból vizsgálom a dolgozatban, méghozzá véletlen hibák esetére.

Felmerül a kérdés, hogyan lehet a kiépítendő hálózatot jól modellezni, illetve milyen módszerekkel határozható meg a járműkommunikációs szolgáltatásokat támogató hálózati szolgáltatások rendelkezésreállása. Ennek megfelelően a dolgozat célkitűzése is ez, hogy hálózati modellekre és módszerekre alapozottan vizsgálja a szolgáltatások rendelkezésreállítását.

A továbbiakban röviden összefoglalom a járműkommunikációs hálózatok jellegzetességeit, és bemutatok pár hálózatmegbízhatósági modellt és elemzési módszert, ezeket röviden ismertetem és példával illusztrálom, illetve ezeket felhasználom a járműkommunikációs backhaul hálózat modellezésére és elemzésére.

5. Járműkommunikációs hálózatok

A C-ITS hálózatok a hagyományos ITS technológiák továbbfejlesztései, melyekben az információ áramlása már nem csak I2V (Infrastructure-to-Vehicle) módon, az infrastruktúra felől a jármű felé, hanem V2X (Vehicle-to-Everything) módon is, adatszórásos jelleggel, kétirányúan történik. Az utazás helyváltoztató jellege miatt a hálózat felhasználói végpontjai nem állandó helyen vannak, így a topológia is folyamatosan változik, a kiépülő kapcsolatok dinamikusak és adaptívak a résztvevők között.



B1. ábra: Kommunikáló felek és néhány alkalmazási lehetőség C-ITS rendszerekben (forrás [B1])

Erre sokszínű alkalmazások épülhetnek, de napjainkban a biztonságot növelők vannak túlsúlyban, illetve léteznek még a közlekedés hatékonyságát célzó alkalmazások is. Ezekről egy vázlatos áttekintést nyújt a következő felsorolás (B1. táblázat, [B3] alapján):

B1. táblázat C-ITS szolgáltatások áttekintése

Hazardous location notification	Az észlelt veszélyek bejelentésére szolgál
In-vehicle signage/speed limits	Az aktuálisan érvényes közlekedési jelzések (pl. sebességkorlátozások) kijelzése a vezetőnek
Road works warning	A közlekedésre hatással lévő munkavégzésekről nyújt információt
Emergency electronic brake light	Vészfékezés jelzésére szolgál, balesetmegelőzési céllal
Emergency vehicle approaching	Megkülönböztető jelzéssel közlekedő járművek érkezésére figyelmeztethető vele a sofőr
Slow or stationary vehicle(s)	Lassú, vagy álló járműre figyelmeztet. Célja a ráfutásos balesetek elkerülése
Traffic jam ahead warning	Forgalmi dugóhoz való közeledésre figyelmeztethető a vezető
Weather conditions	Az alkalmazás célja a járművezetők tájékoztatása a kritikus időjárási körülményekről

Probe vehicle data	A járművek forgalmi információinak kinyerésére alkalmas
Green light optimal speed advisory	A várakozási idők csökkentését célzó alkalmazás, a zöld jelzőlámpához érkezéshez szükséges optimális sebesség meghatározásához nyújt támogatást
Signal violation / intersection safety	Más jármű által, a közlekedési szabályok megszegése miatt veszélybe sodort járműveknek küldhető figyelmeztetés
Shockwave damping	A torlódásos forgalmi helyzetekben megjelenő fluktuációk optimalizációja a célja
Traffic signal priority request by designated vehicles	Prioritásos járművek zöldjelzés-kérését valósítja meg

A bemutatott szolgáltatások V2X kommunikáción alapulnak, és az ETSI ITS-G5, illetve a 3G és 4G szabványrendszerekkel valósíthatók meg. Míg a 3G és a 4G technikák a nagy hatótávolságú kommunikációt, addig az ITS-G5 a rövidtávú, ad-hoc hálózati technikára épülő kommunikációt valósítja meg.

Jelenleg az európai országok között a C-ITS rendszerekben a legnagyobb együttműködés a C-Roads Platform¹, aminek célja az épülő rendszerek európai szintű egységesítése, hogy minden úthasználó igénybe tudja majd venni a szolgáltatásaikat.

A járműkommunikációs hálózat általános hálózati képe

A járművek és az intelligens közlekedési rendszer infrastruktúra közti (V2I és I2V) kommunikációhoz (B2. ábra) az ad-hoc rádiós hálózat (VANET) fix telepítésű rádiós eszközökkel és azokat hálózatba, valamint a távoli C-ITS szolgáltatási intelligenciához kapcsoló backhaul hálózattal történő kiegészítését igényli.

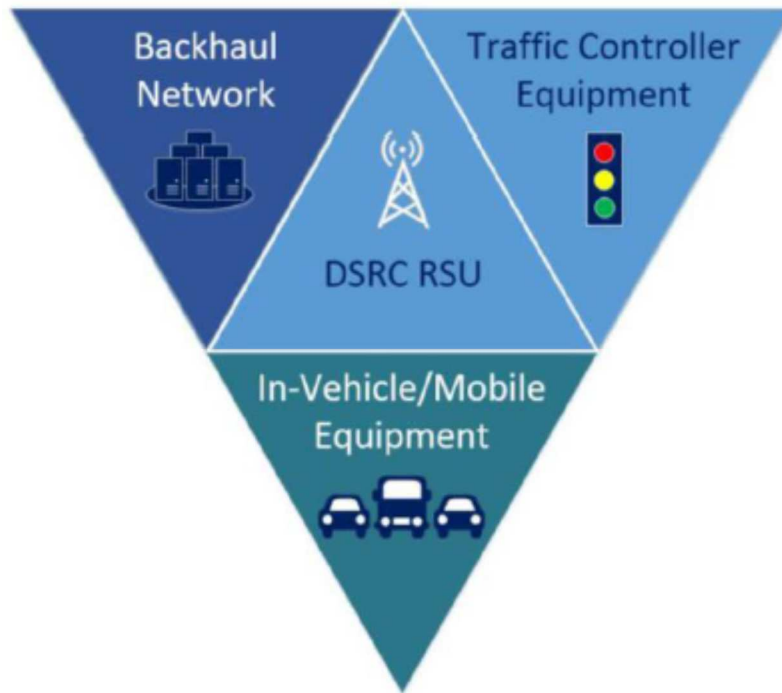


B2. ábra V2I és I2V járműkommunikációs nagyvárosi környezetben (forrás [B2])

Ebben az esetben a járművek fedélzeti egysége mellett fix telepítésű útmenti egységekre, valamint azok hálózati csatlakoztatására is szükség van. A B3. ábra a koncepciót illusztrálja, az ábrán szereplő

¹ <https://www.c-roads.eu/platform.html>

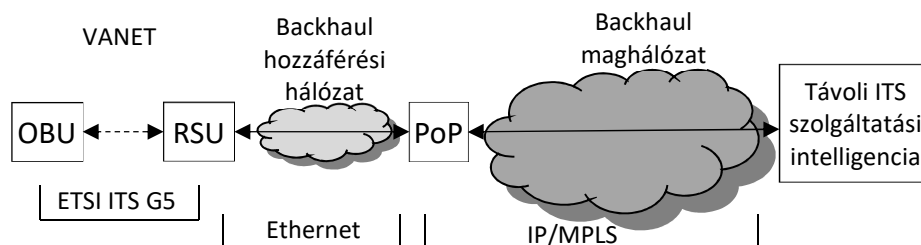
DSRC RSU a Dedicated Short Range Communication Road Side Unit, a hálózat fix telepítésű, útminti rádiós egysége.



B3. ábra Az RSU magas szintű koncepcionális szerepe a járműkommunikációs hálózatban (forrás [B2])

A B4. ábrán megfigyelhető a V2I/I2V hálózat hálózati képe. A rövidítések feloldása a következő:

- OBU (On Board Unit), ez a jármű fedélzeti kommunikációs rendszere,
- RSU (RoadSide Unit), ez az út mentén telepített állomás,
- Backhaul hozzáférési hálózat: ez a szegmens felelős a maghálózattal való összeköttetésért,
- PoP (Point of Presence), ez a backhaul hálózati szolgáltatások elérési pontja,
- backhaul maghálózat, ez biztosítja az összeköttetést a szerverrel,
- távoli intelligencia, ez a pont adja a C-ITS járműkommunikációs szolgáltatásokra épülő alkalmazások számítási hátterét, jellemzően szerver, vagy felhő alapú,
- VANET (Vehicle Ad-hoc NETwork), ez a V2X ad-hoc rádiókommunikációs hálózati szegmens (ETSI C-ITS G5).



B4. ábra A V2I/I2V járműkommunikációs hálózat általános szerkezete

A rövidítések feloldása alapján látható, hogy a három fő hálózati szegmens a VANET, a backhaul „access” (hozzáférési), és a backhaul „core” (maghálózati) része. A VANET tehát rövidtávú, rádiós összeköttetést jelent, az access rádiós vagy optikai linkeket alkalmaz, a core pedig a nagytávolságú összeköttetésért felelős, tipikusan optikai alapú hálózati megoldásokra alapozottan.

Az ETSI ITS két fő üzenettípust különböztet meg, ezek a CAM (Cooperative Awareness Message) [B4] és a DENM (Decentralized Environmental Notification Message) [B5]. A CAM üzenetek információt szolgáltatnak a küldő állomás jelenlétéről és állapotáról a közeli („egy hop távolságú”) állomásoknak, és a VANET hálózat ezen CAM üzenetek alapján szerveződik. A DENM üzenetek ezzel szemben a potenciálisan veszélyes körülmények közlésére szolgálnak, és közlik az észlelt esemény fajtáját, helyszínét, idejét és szavatosságát is. Ennek megfelelően a CAM üzenetek rendszeresek, szabványos ismétlési gyakorisággal, míg a DENM üzenetek a fennálló szituáció miatt keletkeznek, nem előre ütemezettek, és határozott földrajzi pozícióhoz kötött az általuk képviselt információ fontossága. Közös tulajdonságuk a broadcast jellegű üzenetszórás, amivel ez az RSU-OBU (és OBU-OBU) kommunikáció megvalósul a VANET-ben. Érdemes megfigyelni, hogy a hálózatnak ez a része nagyon gyorsan, akár pár másodperc alatt is sokat tud változni (gondoljunk csak 130 km/h-val haladó járművekre az autópályán), ezért a klasszikus pont-pont kommunikációs technikák szolgáltatásaira kifejlesztett elemzési módszerek erre a szakaszra nem minden szempontból adnak kielégítő pontosságú eredményt, a vizsgálathoz más megfontolások is lényegesek lesznek a későbbiekben.

A két üzenettípust szemléltetendő, a fenti táblázatban felsorolt alkalmazások közül DENM üzenettel oldható meg a „road works warning”, és a „collision warning”, míg tipikus CAM-et használó alkalmazás a „probe vehicle data”.

6. Hálózatmegbízhatóság modellezése és elemzése

Az alábbiakban áttekintő jelleggel röviden összefoglaljuk azokat a mértékek, modellek és módszereket, amelyeket a járműkommunikációs hálózatok szolgáltatások elemzése során különböző célokból alkalmaztunk [Moll], [JL1], [JL2], [JL3] és [JL4] alapján.

Ehhez először célszerű azt pontosan meghatározni, hogy vizsgálódásaink során mit, milyen célból végeztünk, mert ebből következően lehet a szükséges, alkalmas megbízhatósági jellemzőket, modelleket és módszereket megválasztani. Célunk járműkommunikációs szolgáltatásokat támogató backhaul hálózati szolgáltatások jellemzése véletlen hibák esetén. A hálózat javított, összetett, redundáns rendszer: kétállapotú elemek véletlen hibája, független meghibásodások, alapvetően elektronikus alkatrészekből felépülő komponensek alkotják. Az egyes hálózati szolgáltatások is kétállapotúak, önállóan rendelkezésreállításukkal, kiesési időarányukkal jellemezhetők.

Először, a teljes hálózat szintjén azt szeretnénk vizsgálni, hogy a különböző szerepű hálózati szegmensek (rádiós hálózat, backhaul hozzáférési és maghálózat) és hálózati állomások (PoP-ok) esetében hol lehet a szükséges redundanciák helye, és mi az alkalmazott redundanciák ésszerű mértéke. Ehhez a járműkommunikációs hálózat általános, generikus modelljéből indulunk ki — amely technológia- és protokollfüggetlen —, a redundanciasémákat a pont-pont szolgáltatások rendelkezésreállása alapján, egyszerű kanonikus modellben értékeljük ki.

Következő lépésként elsősorban a hozzáférési hálózati szegmensben alkalmazható megoldásokra fókuszálunk. Arra vagyunk kíváncsiak, hogy egyszerű, pont-pont optikai csatlakoztatási megoldások alapján hogyan teljesítenek a redundanciamentes és redundáns felfűzési architektúrák alapján az RSU-knak nyújtott hálózati szolgáltatások. Egy ilyen vizsgálat megbízhatósági hálózatmodellezés jellegű megközelítést igényel, és a pont-pont hálózati szolgáltatás jellemzésére a hálózatmegbízhatósági elemzésekben négy féle jellemző jöhet szóba [Moll].

A szolgáltatást jellemezhetjük a végpontjai közti összefüggőséggel: ez a gráfos értelemben tekintett összefüggőség, ami két pont közti független utak számát jelenti. Ez a jellemző a hálózat hibatűrő képességét írja le általában, de semmit nem mond az erőforrások (kapacitások) szerepéről.

Ha a hálózatelemek kapacitásjellemzőit is figyelembe szeretnénk venni, akkor a maximális folyam (max flow) értékét használhatjuk a hálózat jellemzésére. Ez, az összefüggőséghez hasonlóan, pontpáronként értelmezett. Ez az egyszerű összefüggőségi jellemzőnél többet mondhat a hálózatról, de jelentős korlátja, hogy a különböző pontpárok közti szolgáltatások kapacitásokért folyó versenyét nem kezeli.

A többtermékes folyam (multi-commodity flow) jellemző a mérték további finomítására szolgál, hátránya, hogy azokban az állapotokban, amelyekben a kapacitás szűkössége korlátozza a követelmények teljesítését, nem ad használható jellemzést.

Értelmezhető egy fentieket integráló hálózati teljesítményindex jellemző, ami lehet kapacitás jellegű, összefüggőség jellegű vagy forgalmi jellegű. Esetünkben az egyszerűbb, adott fix átviteli út alapján értelmezett forgalmi (pontosabban biztosítandó sáv szélesség) alapú jellemzőt választjuk, amely a szolgáltatásra értelmezett két állapot (jó: van átviteli út, rossz: nincs átviteli út) gyakorlatilag egy kiesési időarányt eredményez:

$$NPI = \frac{\sum_{y \in Y} Tel_j(y) * P(y)}{Tel_{jmax}}$$

ahol $Tel_j(\underline{y})$: a hálózat teljesítménye az \underline{y} állapotban, $P(\underline{y})$ pedig annak a valószínűsége, hogy a hálózat az \underline{y} állapotban van. Az így előállított mennyiség megmutatja, hogy mekkora a hálózat várható teljesítménye a maximális teljesítményhez képest. A $Tel_j(\underline{y})$ értelmezés esetünkben 1, ha a szolgáltatáshoz van működő átviteli út a végpontok között, és 0, ha nincs, $Tel_{j_{max}}$ értéke ebben az esetben értelemszerűen 1.

Egy ilyen jellegű elemzést hatékonyan egy olyan rétegelt hálózati modell támogat, amely lehetővé teszi mind a hibahatások terjedésének, mint a különböző rétegben lévő redundanciáknak a figyelembevételét [JL3]. Ilyen esetekben az elemzés korlátja lehet a nagy állapottér és az egyes állapotok kiértékelésének komplexitása (pl. IP hálózatban linkhibák esetén IGP adaptáció), ezért pontos számítások helyett determinisztikus vagy statisztikus becslési módszerek alkalmazására van szükség (Li-Silvester becslés, vagy Stratified Sampling) alkalmazhatóak [JL4]. A Li-Silvester-becslés lényege az, hogy az állapotteret két részhalmazra bontjuk, és az egyik részhalmazra (Y_0) elvégezzük a megszokott alapos vizsgálatot, a másikra pedig nem (Y_c). Ekkor az NPI-re lesz egy alsó és egy felső becslésünk, ha az Y_c állapotok teljesítményét hol 0-nak, hol 1-nek választjuk, majd ezt az Y_0 alapján kapott NPI-hez hozzáadjuk. Ha az Y_0 -ban az állapotok valószínűségeinek összege nagy, akkor a becslés pontos lesz, mert maximum $\pm P(Y_c)$ hibánk van. Elfajuló esetben minden állapot az Y_0 -ban van, ekkor viszont az eredeti „brute force” módszert kaptuk vissza.

Az eddigi megközelítésekben az RSU-ig terjedő pont-pont szolgáltatásokra koncentráltunk, ám a járműkommunikációs szolgáltatás felhasználója tipikusan mozgó felhasználó, aki adott útszakaszon haladva RSU-k sorozatán keresztül, vevőként és adóként is adatszórással kommunikál. Ahhoz, hogy egy ilyen felhasználónak nyújtott szolgáltatást értékelni lehessen véletlen hibák esetén, alkalmas jellemző lehet, hogy egy adott útszakaszon adott sebességgel haladva mennyi információ jut el hozzá. Ehhez annak meghatározása szükséges, hogy az adott útszakaszt kiszolgáló RSU-k különböző hibamintázatai milyen időarányal vannak jelen. Hibamintázaton ebben az esetben azt értjük, hogy például egy négy RSU-val kiszolgált útszakaszon a négy RSU közül négy, vagy különböző elrendezésekben négynél kevesebb RSU milyen időarányal szolgáltatóképes (egy RSU-t nem tekintünk szolgáltatóképesnek, ha hibás, vagy ha ugyan működőképes, de leszakadt a backhaul hálózatról).

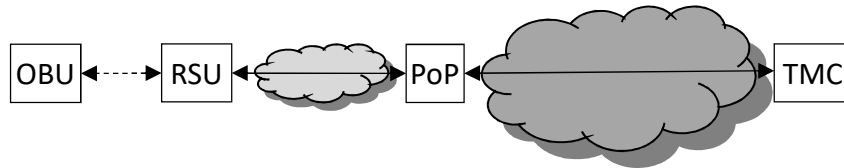
Ennek meghatározása két lépésben történhet, egyrészt a markovi apparátust alkalmazva, folytonos idejű Markov-lánc felépítése alapján meghatározható az állapotok stacioner eloszlása (valós működésű javított rendszer esetén ez létezik), majd az állapotokat a különböző hibaminták szerint csoportosíthatjuk.

7. V2I járműkommunikációs hálózat megbízhatósági modellezése

Az előző részben leírt megfontolások alapján felállítható többféle modell is a kommunikációs hálózatról, ezek a következők:

Pont-pont szemlélettel készített modellek

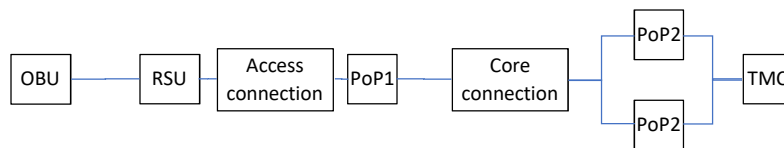
Az adott helyen tartózkodó járműre kielégítő pontosságú modell a bevettnek számító OBU-TMC pont-pont modell. Ennek vizsgálata a kanonikus elemzés módszerével történik. Ennek általános vázlata a következő (J1 ábra):



J1. ábra A V2I/I2V járműkommunikációs hálózat általános szerkezete

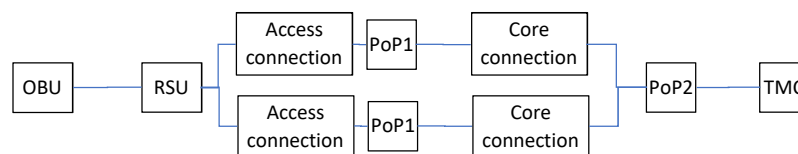
Ennek használatakor feltételezzük, hogy a jármű egy RSU hatósugarában tartózkodik, egyszeres rádiós lefedésű útszakaszon. Az ábrán csak felhőkkel jelölt linkek helyére különböző felépítésű hálózatokat helyettesítünk. A vizsgált topológiák a következők:

- Az access és a core hálózat csak egy-egy útvonalat biztosít, illetve a/2), ahol a backhaul core és a TMC közötti összeköttetés redundáns, hogy megerősítsük a közös szolgáltatási hely elérését (J2 ábra):



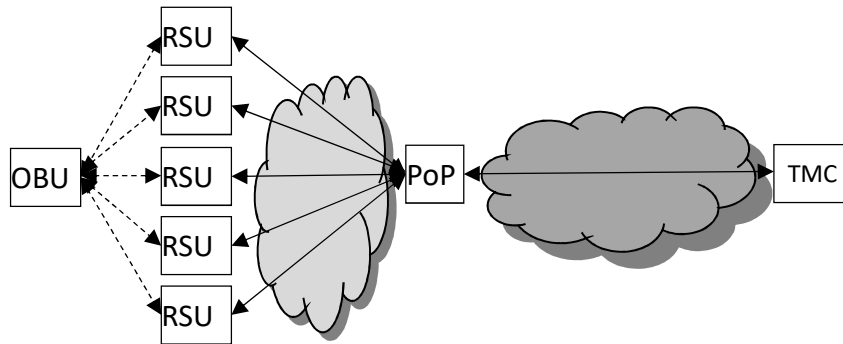
J2. ábra

- Az RSU-TMC hálózat teljes redundanciája, célja az RSU-k kétirányú csatlakoztatásával csökkenteni a kiesési időarányukat (J3 ábra).



J3. ábra

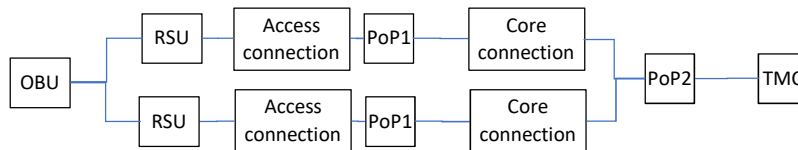
Felmerül a kérdés, hogy mindez hogyan változik, ha mozgó járművekre közelítve a modellt, egy adott területre nézett szolgáltatást vizsgálunk, de még mindig statikus közelítéssel. Erre szolgál a következő általános séma (J4 ábra):



J4. ábra

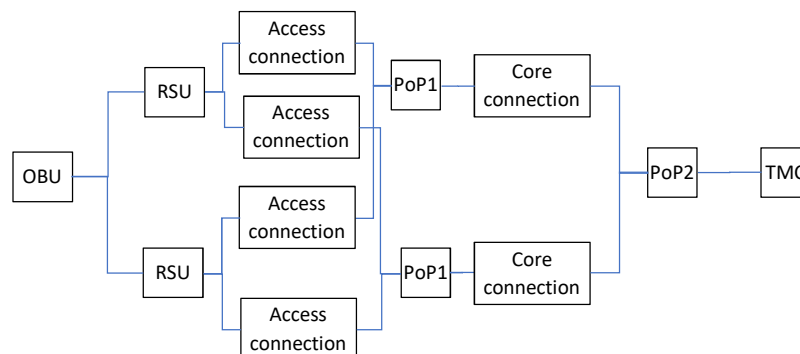
Ezzel lényegében egy többszörös rádiós lefedettséget modellezünk. A gyakorlati kialakítás alapján a kétszeres rádiós lefedettség lehet kivitelezhető, így a modellek is ehhez igazodnak:

- b/2) Teljes, egyszeres redundancia, kétszeres rádiós lefedettség. Ez elképzelhető úgy is, hogy az OBU két RSU területének a határán jár, vagy egy aktívan működő és egy backup RSU összehangolt működéseként is (J5 ábra).



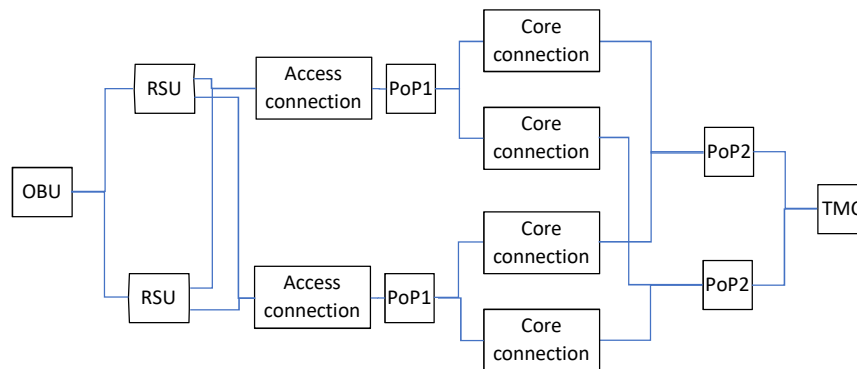
J5. ábra

- c) Az access connection minden RSU-t külön összeköt minden PoP1-el, hogy kisebb valószínűséggel szakadjanak le a működő RSU-k a működő hálózatról linkhibák miatt. Az ábrán az access hálózat négyszeres összefüggőségű, de érdemes megvizsgálni a kétszeres összefüggőségűt is, de úgy, hogy az RSU-k továbbra is csatlakoznak mindkettő access linkhez (J6 ábra).



J6. ábra

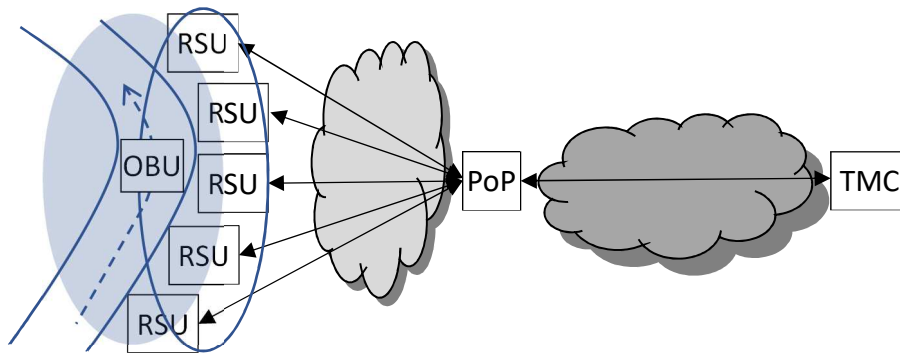
- d) A core hálózat is erősítésre került, illetve a TMC belsejében két szerver van már. Itt a core connection minden PoP1-et külön összeköt minden PoP2-vel, de érdemes a négyszeres és a (valószínűbb) kétszeres összefüggőséget itt is vizsgálni (J7 ábra).



J7. ábra

Adott területen nyújtott adatkapacitásra adható modellek

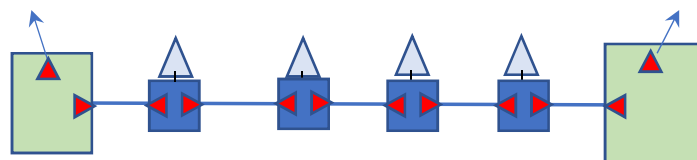
Ez az előző pontban vizsgálni kezdett haladó jármű problémájának jobb megközelítése. Adott egy út mellett több RSU, egy elhaladó OBU, és egy RSU-TMC backhaul hálózat (J8 ábra). Szeretnénk egy átlagos adatkapacitás jellegű mérőszámot adni a vizsgált útszakaszra, azonban ehhez szükségünk van az RSU-kból álló kiszolgáló rendszer stacioner állapotvalószínűség-eloszlására, és ebből tudunk majd kapacitás-valószínűségeloszlást konstruálni (minden állapothoz a működőképes RSU-k adatkapacitásának összegét rendeljük).



J8 ábra

Ehhez azonban szükségünk van a Markov-láncokra, és az ehhez kapcsolódó számítási apparátusra. Azért ezt a vizsgálati módszert választottuk, mert van több kétállapotú elemünk (az RSU-k, amikor működnek/nem működnek), és ezeket javítjuk is, illetve a hálózat adatkapacitását a működő RSU-k számának függvényében tudjuk megadni, és a Markov-lánc ezekre alkalmazható. A stacioner megoldás lényegében azt mondja meg, hogy a teljes idő mekkora részét töltjük az egyes állapotokban, míg az elemek meghibásodása és javítása a klasszikus mintapélda a markovi apparátushoz, születési és halálozási folyamatok néven.

A probléma jellegéből fakadóan látható, hogy nem a diszkrét, hanem a folytonos idejű láncokkal fogunk foglalkozni, azonban ez azt vonja maga után, hogy akkor használható egyszerűen a módszer, ha a javítási és a meghibásodási folyamatok is exponenciális eloszlásúak. A meghibásodások közelíthetők ezzel, mert a meghibásodás valószínűsége az eszközök élettartama során nem változik, az eloszlás memóriamentes. A javításokat szintén ezzel közelítjük, mert feltettük, hogy egymástól függetlenek. Ez a két közelítés nem idegen a szakirodalomtól, általában a meghibásodási és a javítási rátát λ -val és μ -vel jelölik. Ezek ismeretében felírhatjuk az úgynevezett rátamátrixot egy elemre, és ebből a Kronecker-összeg nevű művelet segítségével bővíthető a rátamátrix.



J9 ábra

A vizsgálatokhoz a J9 ábrán látható modellt fogom használni, ahol az adott útszakasz RSU-it a kék téglalapok szimbolizálják. A zöld téglalapok a PoP1-eket jelentik, és a hálózatnak ezt a részét (PoP1-TMC) ideálisnak tekintem ebben a modellben, mert azok viselkedését jól leírja az előző pontban ismertetett pont-pont összeköttetéses kanonikus vizsgálat. Az ábrán látható a dual-homing struktúra, aminek lényege az, hogy az RSU-k egy hiba esetén még nem, csak legalább két hiba miatt szakadnak le a hálózatról.

8. Rendelkezésreállási számítás

A kanonikus modellezés alapjai

Az elemzések sorában először arra a kérdésre keresem a választ, hogy egy általános szerkezetű V2I/I2V járműkommunikációs hálózat különböző szegmenseiben alkalmazott redundancia milyen mértékben képes javítani a szolgáltatások rendelkezésreállítását.

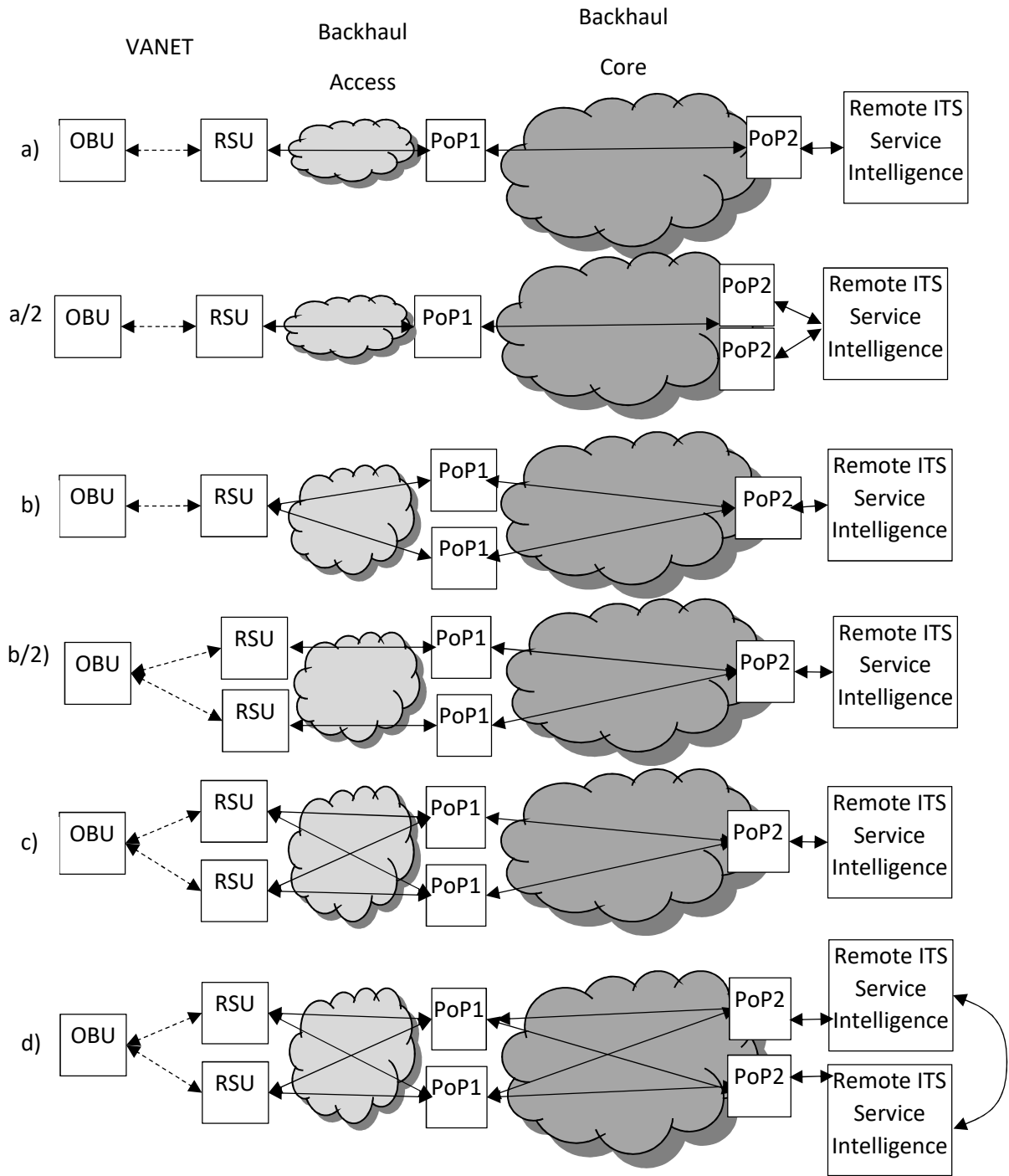
Ebből a célból generikus architektúrális modellek egyszerű módszerrel történő vizsgálatára, elemzésére a kanonikus modellezési módszert alkalmaztam. Az általános modellezési megközelítés, és az ehhez illeszkedően megválasztott paraméterek azt a kérdést is felvetik, hogy a paraméterek pontosságára mennyire érzékenyek az eredmények, vagy másként fogalmazva az eredményekből levonható következtetések mennyire tekinthetők általános érvényűnek.

A vizsgált hálózati változatok

A vizsgált változatok meghatározásakor a V2I/I2V járműkommunikációs ismertett hálózat általános szerkezetéből indultam ki. Referenciának ezt a redundanciamentes változatot tekintettem (K1.a ábra).

Ennek alapján a különböző hálózati szegmensekben és funkcionális egységekre alkalmazható redundanciasémákat specifikáltam:

- Az alapesetben képes kismértékű változtatás a járműkommunikációs szolgáltatások szempontjából meghatározó szerepű szolgáltatási intelligencia (Traffic Management Centre, alkalmazáserver) kétirányú hálózati csatlakoztatása (dual-homing), ami biztosítja, hogy a kapcsolódást adó PoP meghibásodása ne eredményezhesse a központi szerver leszakadását. Egy ilyen hiba a teljes hálózatban szünetelné meg a járműkommunikációs szolgáltatásokat (K1.a/2 ábra)
- Hasonló megfontolásokból, egy adott útszakaszt rádiósan lefedő RSU leszakadását eredményező hibával (RSU-t csatlakoztató hozzáférési hálózati összeköttetés hibája) szemben nyújt védelmet az RSU kétirányú csatlakoztatása. A megoldáshoz illeszkedően ez a két hozzáférési oldali PoP-on keresztüli kapcsolódást jelent, amihez a szerver oldali megoldást is célszerű illeszteni (K1.b ábra).
- Az RSU leszakadásához hasonló hatású az RSU meghibásodása, ami ellen az adott útszakasz redundáns rádiós lefedése nyújthat védelmet. Ebben az esetben az egy adott helyen lévő jármű OBU-ja két RSU hatókörében van. Ebben az esetben az RSU-k dual-homingja nem feltétlenül szükséges (K1.b/2 ábra).
- Az előző eset két változat kombinációja a redundáns rádiós lefedés két, egyenként két irányból csatlakoztatott RSU-val. (K1.c ábra).
- Az alkalmazott logikát követve (kétirányú csatlakoztatás, funkcióduplikálás) a minden szegmensében és funkciójában redundáns változat a gerinchálózati szegmensben is kétirányú csatlakoztatást alkalmaz, és a szerverfunkciót is duplikálja (feltételezve egy olyan megoldást, melyben a kieső szerver szerepét a tartalék zökkenőmentes át tudja venni).



K1. ábra A járműkommunikációs hálózat különböző szegmenseinek redundanciaopciói generikus modellben

A kanonikus modellezés alapjainak összefoglalása

A hálózat viselkedéséről egy fontos információt szolgáltat a rendelkezésreállítás, ezért megvizsgáltam a különböző topológiákat ebből a szempontból. Mielőtt azonban erre rátérnék, ismertetem az alapvető modellezési és számítási módszert és a fogalmakat.

A modellezés során a hálózati komponenseket egy gráf csúcsaivá tesszük, és két kiemelt pont között számoljuk ki a pont-pont rendelkezésreállást. A rendelkezésreállítás (Availability, A— a magyar nyelvű szakirodalom készenléti tényezőnek is nevezi) az üzemképes állapotban töltött idő és az összes megfigyelési idő hányadosa. Kiszámolhatjuk az $A = \text{MUT} / (\text{MUT} + \text{MDT})$ módon, ahol MUT a jó állapotban eltöltött időtartam várható értéke (Mean Up Time), az MDT pedig a rossz állapotban eltöltött időtartam hosszának várható értéke (Mean Down Time). A számításaink során felmerülő fontos fogalom még a kiesési időarány (Down Time Ratio, avagy DTR), ami a hibás időszakok aránya a teljes megfigyelési időhöz képest. Ebből következik, hogy $\text{DTR} = 1 - A$.

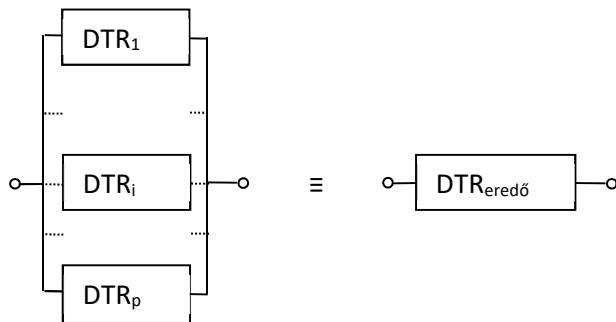
Feltételezzük, hogy a komponensek egymástól függetlenül, ugyanazzal az intenzitással hibásodhatnak meg, és egymástól függetlenül javíthatóak is. Ebből következően az összes komponens egy-egy DTR értékekkel jellemezhető.

A kanonikus modellezés három fontos számításra támaszkodik, két elem soros kapcsolatára, két elem párhuzamos kapcsolatára, illetve a teljes valószínűség tételére, amivel a soros-párhuzamos részekre közvetlenül nem bontható rendszerek kezelhetőek.



Könnyen belátható, hogy ez akkor működőképes, ha minden eleme az, tehát:

$$A_{\text{soros}} = 1 - \text{DTR}_{\text{soros}}, \text{ ahol } \text{DTR}_{\text{soros}} = 1 - \prod_{i=1}^s (1 - \text{DTR}_i)$$



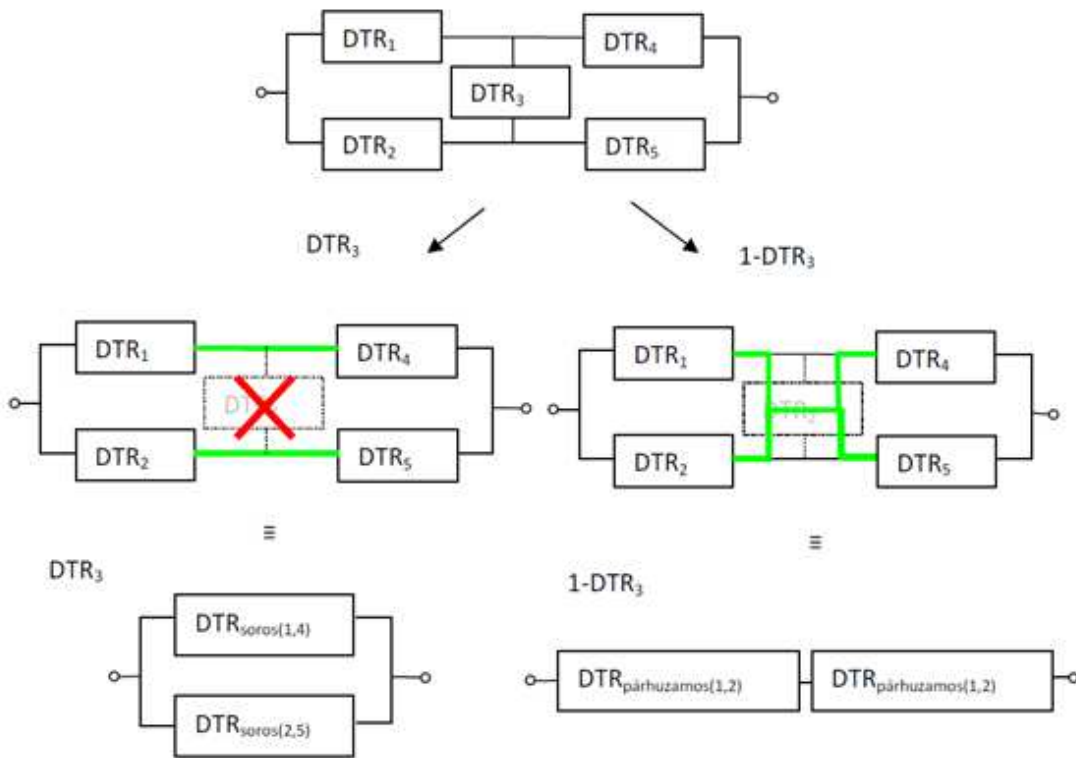
K3. ábra Párhuzamos rendszer modellje

Párhuzamos rendszer akkor működőképes, ha legalább egy eleme az, tehát:

$$A_{\text{párhuzamos}} = 1 - \text{DTR}_{\text{párhuzamos}}, \text{ ahol}$$

$$\text{DTR}_{\text{párhuzamos}} = \prod_{i=1}^p \text{DTR}_i$$

Az összetett rendszer felbontásához tekintsük a következő ábrát!



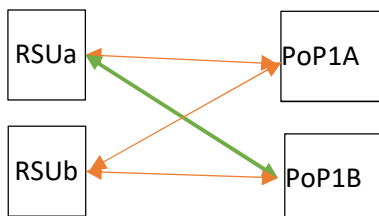
K4. ábra Az összetett rendszer felbontásának módszere

Az alapötlet az, hogy a „hídágban” lévő komponens két állapotának valószínűségét figyelembe véve, a teljes valószínűség tétele alapján helyettesíthető a modell két, már egyszerűbb modellel. Jó esetben ez már közvetlenül soros-párhuzamos részekre bontható, de ha nem, akkor ezt az eljárást rekurzívan alkalmazhatjuk tovább. Végül a K4. ábrán látható rendszer DTR-je:

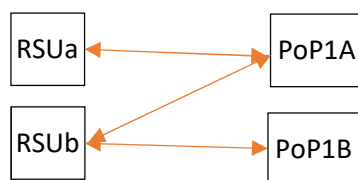
$$DTR_{eredő} = DTR_3 * [1 - (1 - DTR_1) * (1 - DTR_4)] * [1 - (1 - DTR_2) * (1 - DTR_5)] + (1 - DTR_3) * [1 - (1 - DTR_1 * DTR_2) * (1 - DTR_4 * DTR_5)]$$

Egy gyakran előforduló, bonyolultabb struktúra kanonikus modellje

A backhaul hálózat számítása során gyakrabban előforduló elem az K5. ábrán látható dual-homing-jellegű topológia. A most következő részben összefoglalom ennek felbontását a teljes valószínűség tételével.



K5. ábra

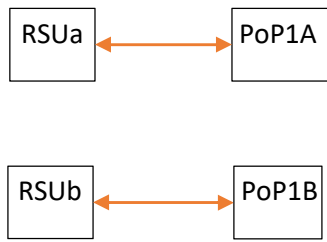


K6. ábra

Az K5. ábra zöld és sárga linkjei hálózati összeköttetések, ezek is meg tudnak hibásodni. A zöld link állapota alapján esetekre bontva két állapotba kerülhetünk, amikor a link jó, és amikor rossz. Kezdjük a rossz esettel.

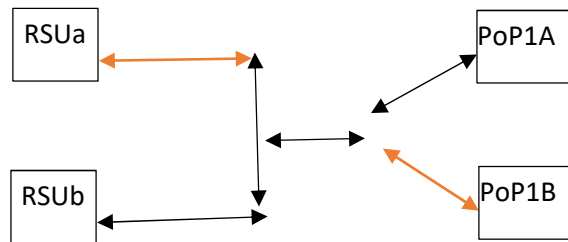
Itt (K6. ábra) a PoP1A és az RSU_b közötti link alapján két állapot lehetséges, ha elromlik a link, akkor az I. állapot (K7. ábra), ha jó, akkor a II. állapot (K8. ábra).

I. állapot



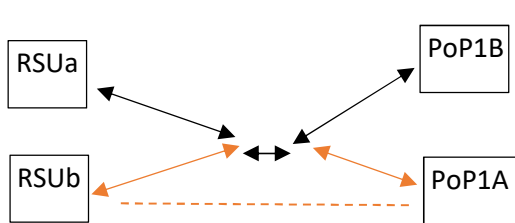
K7. ábra

II. állapot

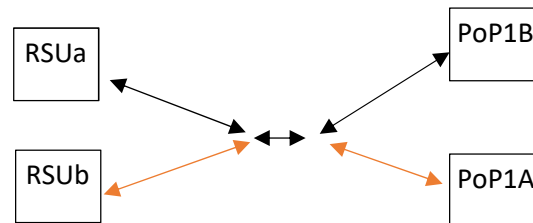


K8. ábra

Az egyik ággal végeztünk is a kezdeti feltételezéseinkből. Most az K5. ábrán a zöld élt működőnek feltételezve a következő elrendezés adódik (K9. ábra). Itt a szaggatott vonal felbontásával haladunk tovább (K10. ábra).



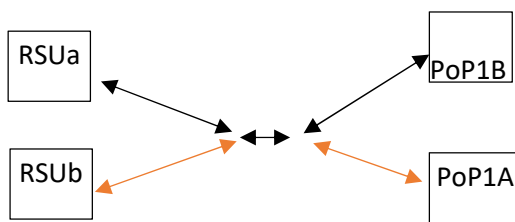
K9. ábra



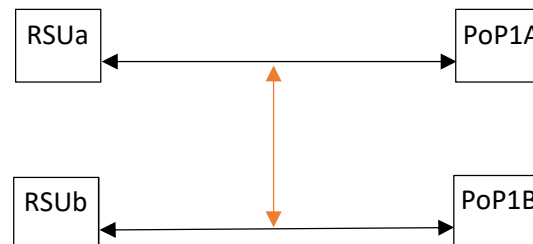
K10. ábra

Ha elromlik a link, akkor ezzel eljutottunk a III. esethez, ami nagyon hasonlít a II. állapothoz (K11. ábra). Ha pedig a linket működőnek feltételezzük, akkor a maradék két sárga link egymással párhuzamosan van a hídágban, és ezek összevonásával a fenti párhuzamos eset szerint, eljutunk a példában mutatott alapesethez (K12. ábra).

III. állapot



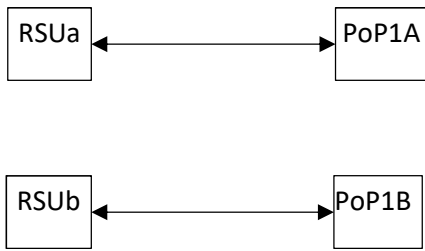
K11. ábra



K12. ábra

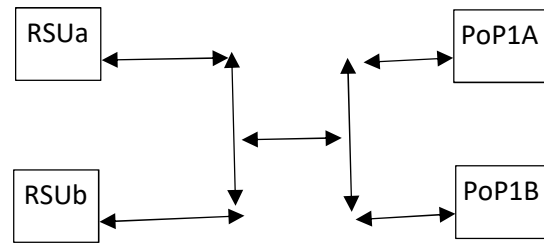
Ekkor a már ismert felbontás szerint a következő két eset adódik (K13. és K14. ábra).

IV. állapot



K13. ábra

V. állapot



K14. ábra

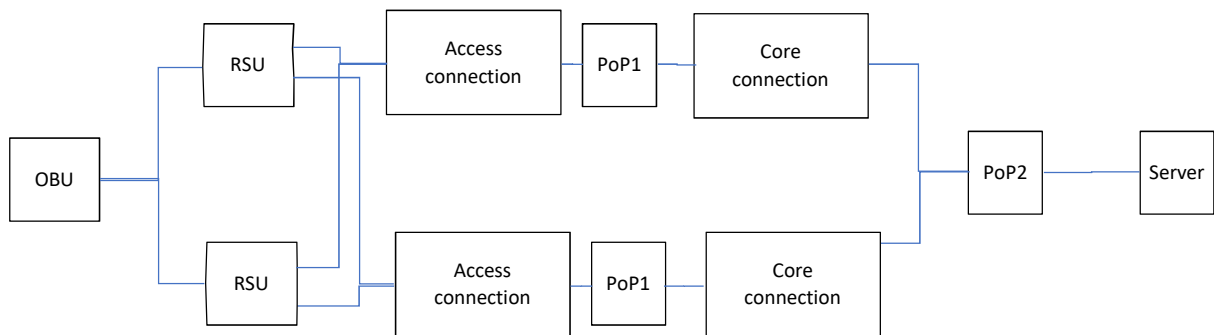
Számítások

A számítások során az K1. ábrán szereplő egyes elemek DTR paramétereit a következők voltak [K1] és [K2] alapján (K2. táblázat).

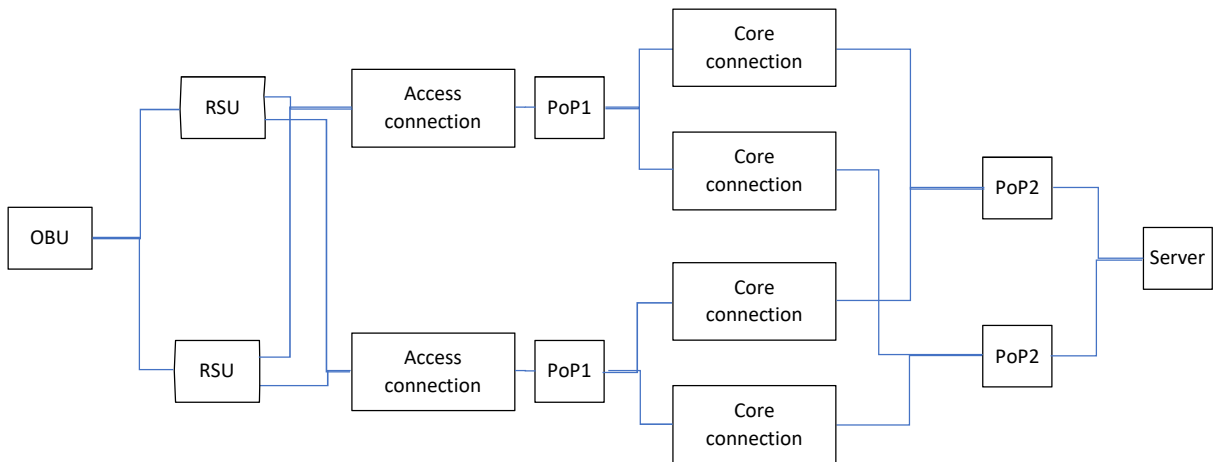
K2. táblázat Modellelemek DTR paramétereit

OBU	RSU	RSU-PoP1	PoP1	PoP1-PoP2	PoP2	PoP2-szerver	szerver
1,20E-04	6,00E-05	3,18E-04	2,49E-05	3,20E-04	1,58E-04	3,20E-04	1,93E-02

Amint az eredmények leírásából kiderül, az K1. ábrán látható c és a d esetnek egy-egy második változatát is figyelembe vettem, ugyanis az RSU-PoP1 közötti Access Network négyeszeres összefüggősége túlzónak bizonyult, és kétszeres összefüggőségű, de ugyanezen topológiájú hálózat a megfelelő technológiai alapon meg is valósítható.



K15. ábra A leírtak alapján a c) eset második variációja, innentől c/2) eset

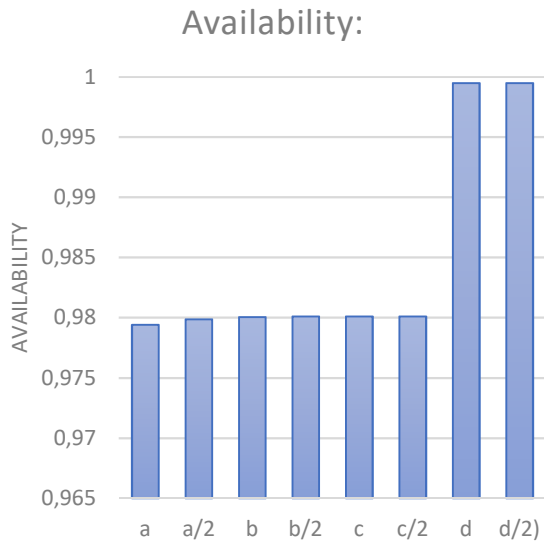


K16. ábra A d) eset második variációja, innentől d/2) eset

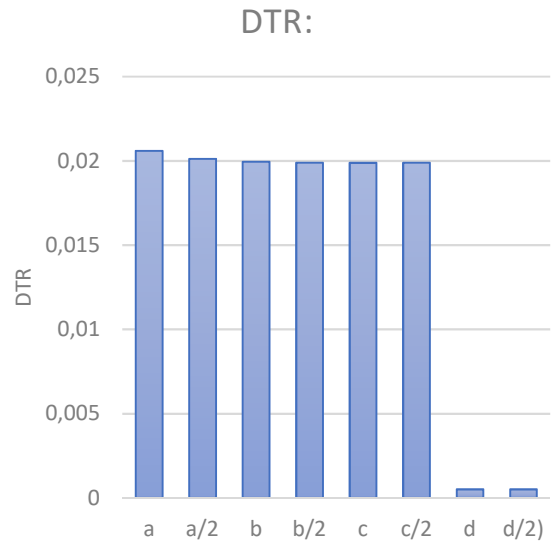
Az így megvalósuló topológia redundanciájának kiszámolása a már levezetett, hasonló felépítésű struktúrával nem oldható meg, de a megoldás gondolatmenete nagyon hasonló, csak ebben az esetben nem az Access Connection elemek mentén fejtettem ki a lehetőségeket a teljes valószínűség tételével, hanem az RSU-k mentén.

A számítások eredményei

A különböző topológiákra elvégezve a kanonikus modellezést, és a modellek kiértékelését a DTR paraméterekkel, a következő eredményre jutottam (K17. és K18. ábra):



K17. ábra A rendelkezésreállási adatsor

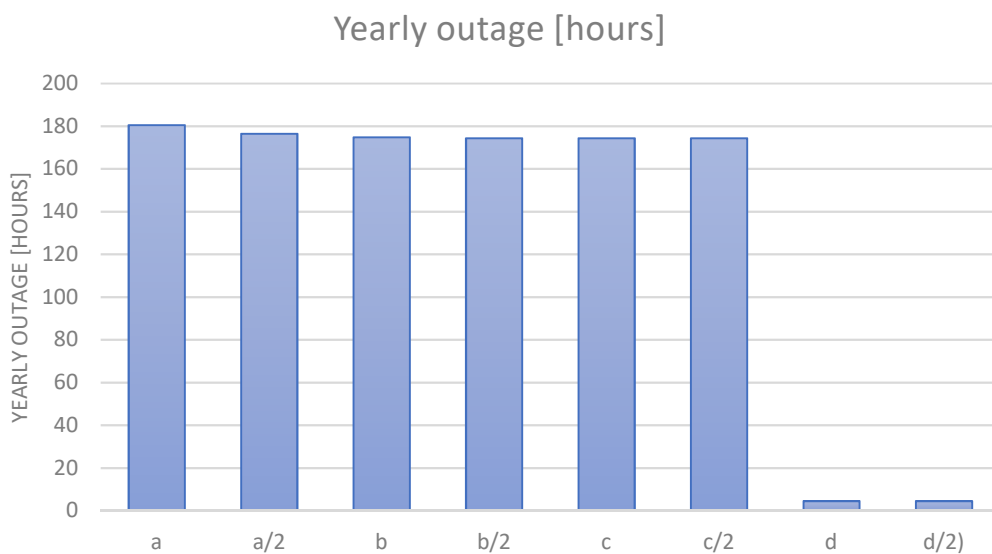


K18. ábra A kiesési időarányok

A számszerű értékek pedig a következők (K3. táblázat):

K3. táblázat A K11. és K12. ábra rendelkezésreállási és kiesési időarány számértékei

Topológia:	a	a/2	b	b/2	c	c/2	d	d/2)
A	9,79E-01	9,80E-01	9,80E-01	9,80E-01	9,80E-01	9,80E-01	9,99E-01	9,99E-01
DTR	2,06E-02	2,01E-02	1,99E-02	1,99E-02	1,99E-02	1,99E-02	5,11E-04	5,11E-04
Yearly outage [hours]	180,533	176,430	174,843	174,328	174,325	174,328	4,477	4,479

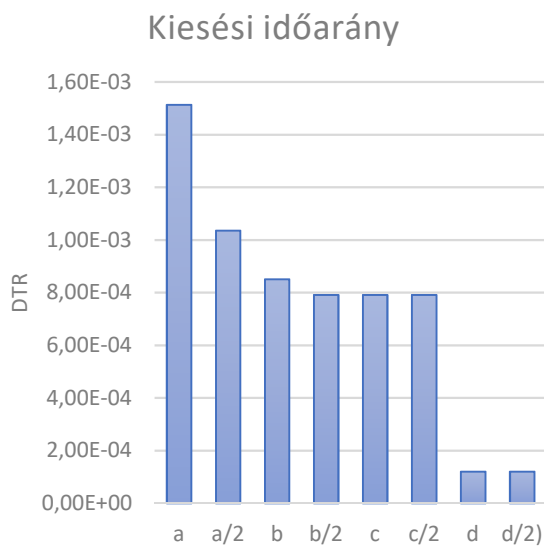


K19. ábra Az éves kiesési idő

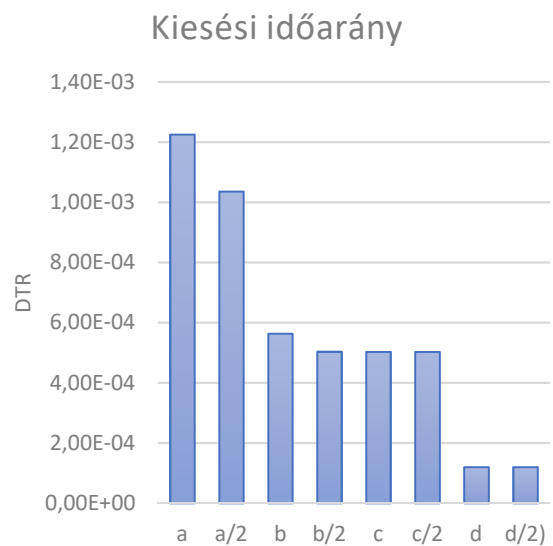
Az eredmények értékelése

A K17., a K18., és a K19. ábrán látható eredményekre tekintve drasztikus különbségnek lehetünk tanúi a d) topológiák, és a többi között, hiszen a d) és d/2) topológiák kiesési időaránya két nagyságrenddel jobb. Ennek a nagy különbségnek könnyen megtaláljuk az okát is, hiszen a hálózatot alkotó elemek DTR paraméterei közül a szerveré messze a legrosszabb, így a d) topológiák esetében fellelhető szerverredundancia erősen érezteti a hatását. Ezzel el is jutunk az első konklúzióhoz, miszerint egy nem, vagy csak kevésbé redundáns szerverhálózat esetén felesleges az OBU-PoP2 hálózat erősítése, mert a szerver gyakori kiesése megghiúsítja a sikeres kommunikációt.

Ennek alapján megvizsgáltam egy jobb szerverrel (vagy szerverhálózattal) is a topológiákat (ez a K20. ábrán látható eset), ahol a szerver DTR-je azonos nagyságrendű volt a többi elemével ($1,93E-04$). Itt azt tapasztaltam, hogy a b) és c), valamint variánsaik között nincs nagy eltérés, így valószínűleg nem éri meg az RSU-PoP1 hálózat b) esethez képesti további erősítése. A többi paraméter értékére vizsgálva a kiesési időket, azt tapasztaltam, hogy a legmarkánsabb változás akkor következne be, ha a PoP2-szerver összeköttetés DTR-je csökkenne tovább, hiszen ez a paraméter viszonylag nagy, és általában kevésbé redundáns. A K21. ábrán az értéke $3,2E-05$.



K20. ábra A megerősített szerver feltételező eset



K21. ábra PoP2-szerver erősített eset

9. Járműkommunikációs hálózati szolgáltatások elemzése hálózatmegbízhatósági modellel és módszerrel

Ebben a fejezetben azt mutatom be, hogy hálózatelemzési modellek és módszerek hogyan használhatók, ha V2I/I2V járműkommunikációs hálózat backhauljának, illetve egészének szolgáltatásait akarjuk elemezni. Példaként egy egyszerű optikai alapú hozzáférési megoldás redundanciamentes és redundáns változatát választottam. A hálózati alapú modellezés módszereit [H1], a mintapéldát [H2] alapján ismertetem, a FLEXPLANET modell létrehozásában az HIT AddICT labor tagjaitól kaptam jelentős segítséget.

A hálózati alapú modellezés alapjai

A tervezési célú hálózatmodellek a hálózat szerkezetének, működésének leírását meghatározó követelmények alapvetően az erőforrások kihasználtságának, a szabad erőforrások nyilvántartásának, illetve a hibahatások nyomkövetésének — egy fizikai erőforrás véletlen hibája mely szolgáltatásokat érinti — támogatásából származtathatók.

Egy ilyen modellben az egymásra épülő hálózati szolgáltatások és az őket kiszolgáló hálózati erőforrások viszonyrendszere jellegzetesen két csoportba sorolható:

- Szolgáltatás és szolgáltatás kliens-szerver viszonya — mely magasabb szintű („logikaibb”) szolgáltatás mely alacsonyabb szintű („fizikaibb”) szolgáltatás(ok)ra épül (IP-link - Ethernet link - optikai csatorna).
- Erőforrás és szolgáltatás „tartalmazási” viszonya — mely fizikai erőforrások (berendezés, részegység, fényvezető kábel, fényvezető szál) mely szolgáltatások megvalósításában játszanak szerepet.

A különböző szerkezetű hálózatok leírásának egységes modellezési keretét egy rétegelt szemléletű technológia-független, funkcionális alapmodell adja, amely a különböző multiplexálási módszerek általános jellemzőin alapszik, és többek között alkalmas — és a kutatásokban és a gyakorlati feladatok megoldásában is hatékonyan alkalmazott — a csomag alapú és optikai technológiák modellezésére is.

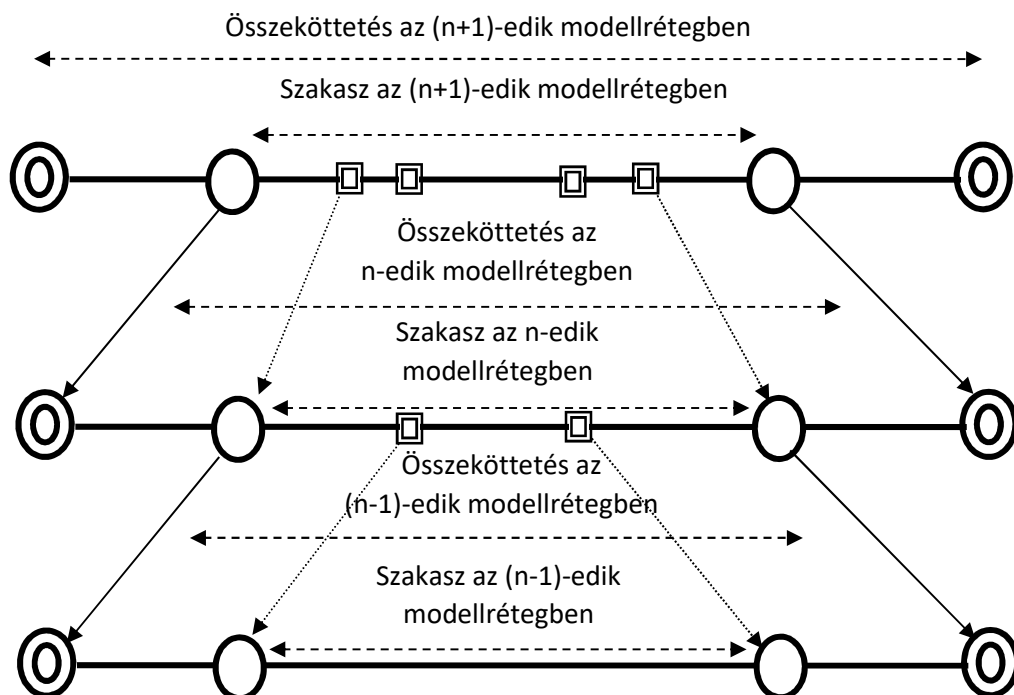
Egy ilyen modellben az összeköttetés jellegű hálózatelemek reprezentációjára egy rétegelt hierarchikus modell szolgál. A modellben a logikai és fizikai jellegű hálózatrétegek egymásra épülnek, kliens-szerver viszonyban vannak. Ezt a hierarchikus modellt az jellemzi, hogy egy adott réteg alulról nézve kliens, amely az alatt lévő réteg(ek) szolgáltatásait veszi igénybe, felülről nézve pedig szerver, amely a felette lévő réteg(eknek) szolgáltatásokat nyújt. A csomópontok modellezése ehhez a hierarchiához úgy illeszkedik, hogy egy adott csomópontra csak adott modellréteg(ek)ben illeszkedhetnek összeköttetések.

Egy egyszerű tipikus vezetékes átviteli hálózati rétegmodellt az átviteli rendszer, a kábel és a nyomvonal rétegei reprezentálnak. (Az átviteli rendszer önmaga is hierarchikus rétegszerkezetű lehet, egy fényvezetőkábel-réteg fölött megjelenhet egy fényvezető szál réteg, a nyomvonal réteg is tagolódhat a nyomvonal térképhű leírását támogató és ebből a tervezés számára csak a releváns információkat reprezentáló rétegekre, de a különböző technológiai rétegek további tagolására – pl., optikai hullámhossz-multiplexált rendszerben optikai csatorna (WDM OCh) szolgáltatás, optikai multiplex szakasz (OMS), optikai erősítő szakasz (OAS) – is számos példa adható).

A rétegmodell szempontjából a csomóponti rétegfunkciók is fontosak: egy adott rétegbeli szakaszoláshoz és aggregálásához az szükséges, hogy az adott csomópontban végződtetési funkció legyen, ennek hiányában a csomópont az adott rétegbeli rendszereket csak tranzitálhatja. (A H1. ábrán az egyes rétegekben a kettős körrel jelölt pontok végződtetési, a körrel jelöltek a közvetlen szerverréteg szakaszolási, a kettős négyzettel jelöltek a további szerverrétegek szakaszolási pontjait jelzik.)

Egy egyszerű példa a rétegmodell alkalmazásának szemléltetésére:

- Csomag alapú biztosítandó sávszélesség szolgáltatás IP hálózaton, kapcsolt Ethernet hálózaton, az Ethernet linkeket sötét szálal pont-pont optikai csatornák szállítják, amelyek fényvezető szálpárait fényvezető kábelek adják:
 - o A legfelső réteg legyen a pont-pont biztosítandó sávszélesség igény, amely a szolgáltatást nyújtó távoli router megfelelő portjai között értelmezett.
 - o Ezt — az IP logikai topológia egy adott állapotában meghatározott — a szomszédos közbülső routerek interfészei között értelmezett IP-link sorozaton megvalósuló út szállítja.
 - o Az egyes IP-linket a kapcsolt Ethernet hálózatban — a logikai topológia egy adott állapotában meghatározott — a szomszédos kapcsolók interfészei között értelmezett Ethernet linksorozaton megvalósuló út szállítja.
 - o Az egyes Ethernet linkeket sötét szálal pont-pont optikai csatorna szolgálja ki, amelyeket szakasról szakaszra fényvezető szálpár hordoz.
 - o Az optikai csatornák fényvezető szálpárai fényvezető kábelekbe rendezettek.



H1. ábra A hálózat modellezésének általános rétegszerkezete

A hálózati modell az alábbi alapvető fogalmakra épül:

Hálózati hely: Hálózati berendezések, fizikai vagy absztrakt funkciók helye, lehet távközlő állomás, gépterem, stb. Tipikus jellemzője a földrajzi hely azonosítása (koordináták, cím).

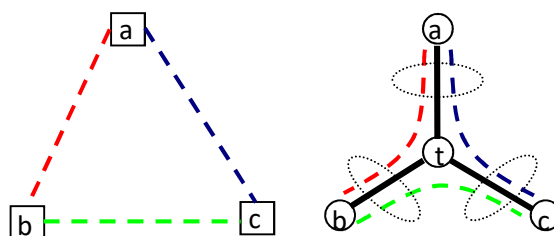
Hálózati berendezés, részegység: A hálózati funkciókat megvalósító berendezés (pl. router, switch, átviteli végberendezés), részegységek (pl. interfészártya, médiaátalakító), de passzív hálózatelemeket (pl. fényvezető kötéstálca, kábelrendező) is ebbe a modellkategóriába sorolunk.

Összeköttetés: Hálózati helyeket, berendezéseket összekapcsoló modellelem. Reprezentálhat logikai (pl. IP-link) és fizikai (Ethernet link, optikai csatorna, optikai átviteli rendszer, fényvezető szál, kábel, mikrohullámú link) összeköttetéseket. Tipikus jellemzője valamilyen kapacitásérték (pl. linksebesség/link sávszélesség, csatornaszám, stb.)

Átviteli kapacitásiqény (mennyiségi és minőségi jellemzők): A hálózati szolgáltatások által biztosítandó egyirányú vagy kétirányú sávszélesség szolgáltatás jellegétől függően két vagy több pont között, minőségi és védelmi előírások is vonatkozhatnak rá (pl. eNodeB és Evolved Mobil Core helyszín vagy berendezés között, stb.).² Csomag alapú hálózatok esetében biztosítandó sávszélesség-igénynek is nevezik.

Logikai topológia: A hálózat helyszínei/átviteli berendezései közti átviteli rendszerek alkotta szerkezet. A helyszínek/berendezések logikai topológia szerinti szomszédossága alapvetően azt határozza meg, hogy mely pontok között lehet közvetlen összeköttetést (egy átviteli szakaszos átviteli utat) létesíteni és melyek között több szakaszos. A logikai topológiának a kábeltopológiára illesztése pedig meghatározza az SRLG-független utak számát az egyes hálózati helyszínek/berendezések között.

SRLG: Közös kockázatú linkek csoportja (*Shared Risk Link Group*), olyan logikai vagy fizikai összeköttetések csoportja, melyek legalább egy közös hálózati erőforrás szolgáltatását veszik igénybe (a csoport meghatározásához tágabb értelemben hozzátartozik e csoportképző közösen használt erőforrásnak a megadása is).



H2. ábra Az SRLG értelmezése

A H2 ábra bal oldalán három átviteli rendszer, (a,b), (a,c) és (b,c), a jobb oldalán pedig egy kábeltopológia ugyanezen a, b, c pontok között (kiegészítve egy t nyomvonalai ponttal, ahol a kábelnyomvonalak elágaznak, de átviteli rendszer nem végződik). Az egyes átviteli rendszerek kábeltopológiára illesztését a színek illusztrálja. Ennek alapján az (a,b), (a,c) és (b,c) átviteli rendszerek – linkek – páronként egy-egy kábelszakasz alapján értelmezett SRLG-be tartoznak (pontosított ellipszisek), mert van közös kábelszakaszuk.

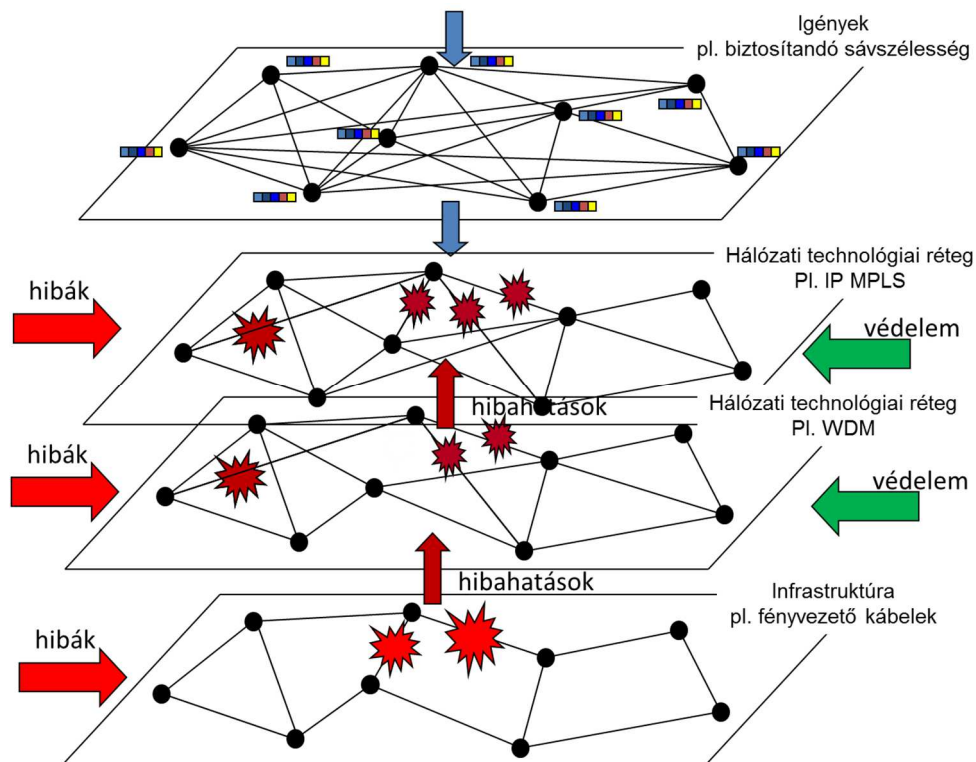
² **Megjegyzés:** Átviteli kapacitásiqényen nem a szomszédos átviteli berendezések közti átviteli rendszerek (linkek) kapacitását értjük, hanem az adott szolgáltatás végződtetési pontjai közti forgalom (adott minőségű kiszolgálásához) szükséges sávszélesség-igényt.

A logikai topológia és az átviteli kapacitásigények szerkezetének hasonlósága, illetve eltérése az átviteli utak szakaszszámát és a csomópontok tranzitterhelését befolyásolja számottevően. (Például optimálisan illeszkedik egymásra egy gyűrűs logikai topológia és egy olyan átviteli kapacitásigény minta, melyben csak a logikai topológián szomszédos pontok közt van átviteli kapacitásigény, mert egy ilyen esetben minden átviteli út egy szakaszos.)

Átviteli út: Egy pont-pont átviteli kapacitásigény kiszolgálása a hálózaton a logikai topológia szakaszainak egymás után illeszkedő, tipikusan hurokmentes sorozata.

Egy több technológiai rétegből felépülő hálózat esetében az egyes hálózati rétegek kliens-szerver viszonyban vannak egymással. Egy szerver szerepű rétegben bekövetkező hiba hatása továbbterjed kliensrétegeire, mivel a hiba a szerverréteg bizonyos szolgáltatásainak meghibásodását eredményezi (H3. ábra). Például egy fényvezető kábel szakadása (véletlen átvágás) megszünteti a kapcsolatot a szomszédos hálózati helyek között, és megszakítja a WDM hálózatban adott kábelszakasz által hordozott optikai hullámhossz-multiplex rendszereit, valamint az ezen hullámhossz-multiplex rendszerek által összefogott optikai csatornákat. A fényvezető kábel hibája az optikai csatornák megszakadásával továbbterjed az IP rétegre is: a közvetlenül összekötött routerek (ú.n. direkt routeolt IP hálózat) közti IP linkeket az Ethernet linkek, azokat pedig az optika csatornák szállítják. Az IP linkek megszakadása pedig a szolgáltatási rétegre terjed tovább.

Az egyes aktív technológiájú rétegekben preventív és reaktív védelmi mechanizmusok alkalmazhatók a hibák hatásának csökkentésére, kiküszöbölésére. Az optikai multiplex szakaszok vagy optikai csatornák 1+1 preventív (előre konfigurált) védelme, vagy az IP útvonalválasztás adaptivitásából következő reaktív (hiba hatására konfigurációt módosító) védelme az optikai csatornák (és így az általuk szállított Ethernet és IP linkek) megszakadását háríthatják el, illetve az IP szolgáltatások (pont-pont és pont-multipont kapcsolatok) megszűnését akadályozhatják meg.



H3. ábra Többrétegű hálózat hibamodelleje

A szolgáltatások rendelkezésreállításának modellezése, elemzése során – a modellben a fizikai felől a logikai felé haladva – rétegről rétegre az adott rétegben bekövetkezett hibákat, a rétegre áterjedő hibahatásokat és az alkalmazott védelmi mechanizmusokat kell kiértékelni az adott réteg által nyújtott szolgáltatások állapotának (működik/nem működik) meghatározásához (H2. ábra). Tipikusan a már ismertett teljesítményindex alapján számolható kiesési időarány a szolgáltatásokra alkalmazott jellemző.

Az állapottér mérete a függetlenül meghibásodó kétállapotú elemek számának exponenciális függvénye, azaz n db elem esetén a hibaállapotok száma: 2^n . A gyakorlatban nagy elemszám esetén nem mindig végezhető el az összegzés a teljes állapottérre. Ezért csak az állapottér egy részhalmazát tudjuk ténylegesen kiértékelni, a többi elhanyagolt állapotokra pedig becslésekkel, feltételezésekkel élhetünk. A probléma megoldására létezik egyszerű determinisztikus becslési módszer.

A determinisztikus módon alsó és felső becslést kaphatunk a relatív hiba várható értékére a következő módon – az irodalomban Li-Silvester módszerként számon tartott becslési módszer szerint – (H4. ábra):

Biztosan alsó becslést kapunk, ha az elhanyagolt állapotokban a teljesítmény értékét minimálisnak (0-nak) vesszük. Jelölje $Y_v \subset Y$ a ténylegesen kiértékelt hibaállapotokat, $Y_e = Y \setminus Y_v$ az elhanyagolt

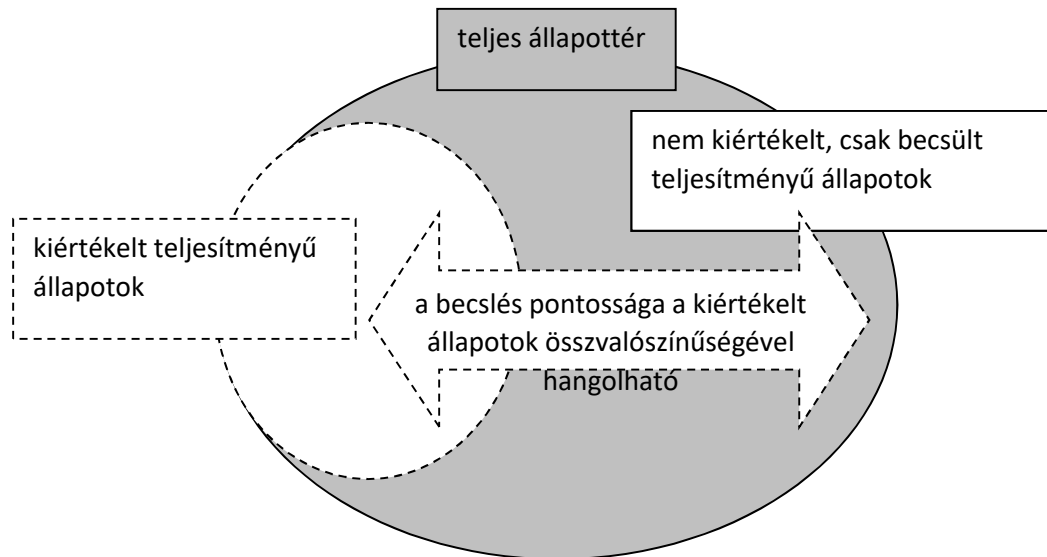
állapotokat. Ekkor az alsó becslés a következő összefüggéssel számítható:

$$H_{\min} = \sum_{\underline{y} \in Y_v} h(\underline{y}) \cdot p(\underline{y}) + \sum_{\underline{y} \in Y_e} 0 \cdot p(\underline{y}) = \sum_{\underline{y} \in Y_v} h(\underline{y}) \cdot p(\underline{y})$$

Biztosan felső becslést kapunk, ha az elhanyagolt állapotokban a maximális teljesítményértéket (1-et) tételezünk fel:

$$H_{\max} = \sum_{\underline{y} \in Y_v} h(\underline{y}) \cdot p(\underline{y}) + \sum_{\underline{y} \in Y_e} 1 \cdot p(\underline{y}) = \sum_{\underline{y} \in Y_v} h(\underline{y}) \cdot p(\underline{y}) + P_e$$

A képletben P_e az elhanyagolt állapotok összvalószínűségét jelenti: $P_e = \sum_{\underline{y} \in Y_e} p(\underline{y})$.



H4. ábra A determinisztikus becslés grafikus illusztrációja

Minél kisebb P_e értéke, annál szorosabb alsó és felső korlátot kapunk, hiszen a fentiek alapján:

$$H_{\max} = H_{\min} + P_e$$

A módszer a hálózati szolgáltatások DTR-jének becslésére a következők szerint alkalmazható:

$Tel_j(\underline{y}) = 1$, ha a szolgáltatás az \underline{y} hálózati állapotban működőképes (redundáns megvalósítás esetén üzemi vagy védelmi átviteli útjából legalább az egyik üzemképes), különben $Tel_j(\underline{y}) = 0$.

$p(\underline{y})$ - független meghibásodásokat feltételezve - az \underline{y} hálózati állapotban hibás hálózatelemek meghibásodási valószínűségének (illetve DTR-jének) összege.

A kiértékelendő hálózati állapotok halmaza ($Y_v \subset Y$) az elérni kívánt becslési pontosság alapján kiválasztható

- az elemzés műszaki tartalmát szem előtt tartva hibamélység (=az egyidejűen fennálló hibák száma) alapján,
- a valószínűségük szerint csökkenő sorrendbe rendezett hálózati állapotok az első K-t megjelölve.

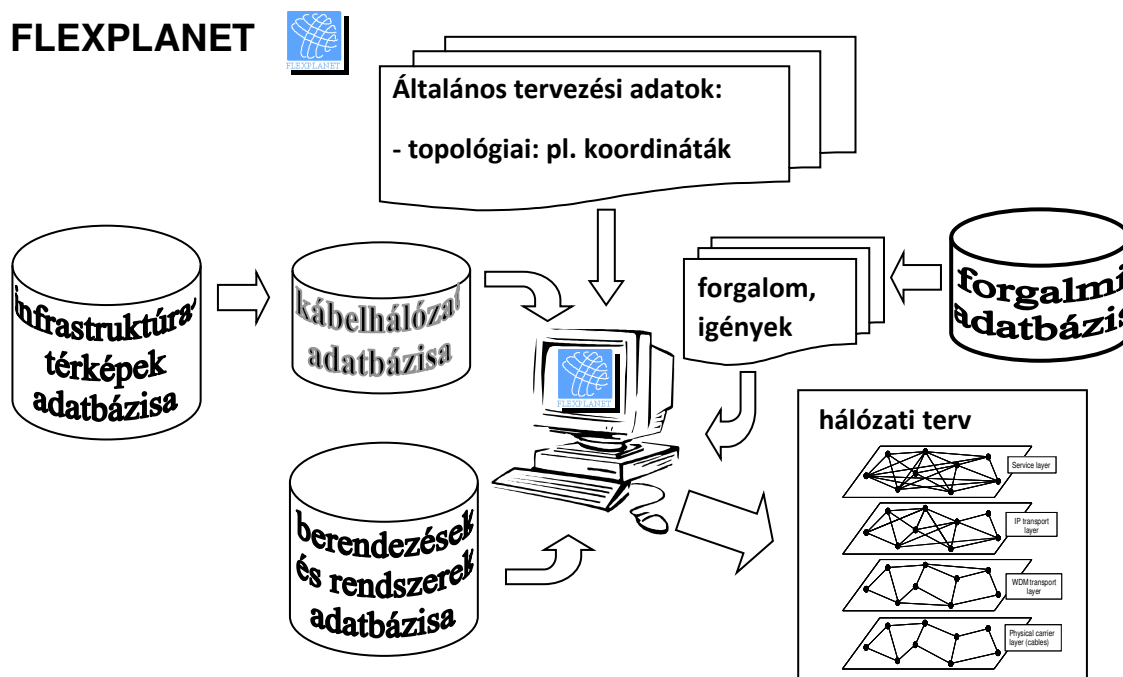
Ha az így ki nem értékelt hálózati állapotok összvalószínűsége magasabb, mint a megcélzott hibaküszöb, akkor a kiértékelt állapotok halmazát a fentiek alapján még ki nem jelölt legnagyobb valószínűségű állapotokkal kell a kívánt mértékben kiegészíteni.

A modellezési környezet a BME Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások tanszékén kifejlesztett FLEXPLANET tervezőrendszer, melynek gyakorlati alkalmazásokra és a Magyar Telekom hálózataira, meghatározott hálózattervezési és -elemzési feladataira adaptált változatát a MT PKI hálózattervező szakemberei napi feladataik elvégzése során használták. (A professzionális felhasználók számára biztosított rugalmas modellezési képességek korlátozott hibakezeléssel járnak, grafikus felületen és parancssor interfészen is elérhető tervező, elemző, listázó funkciók, a parancssoros változatok scriptelhetők is.)

A FLEXPLANET tervezőrendszer tudományosan megalapozott modelleket és módszereket nyújt a valós méretű és komplexitású hálózatok tervezéséhez. Alapja egy rétegelt szemléletű technológiafüggetlen hálózatmodell, és az arra épülő elemi tervezési és elemzési funkciókat támogató algorithmusok. Ezek különböző technológiájú hálózati rétegekkel, vagy többrétegű heterogén hálózatokkal kapcsolatos tervezési és elemzési feladatokra adaptálva tervezési folyamatokba szervezhetők.

A tervezőrendszer támogatja hálózatleíró modellek felépítését mind egyszerű hálózatleírások (elvi modellek), mind hálózat-nyilvántartási adatok és berendezés-konfigurációs információk (meglévő hálózatok részletes adatai) alapján. Az előbbi egyszerűbb eset stratégiai tervezési megközelítések esetén, az utóbbi pl. meglévő hálózat bővítésének, fejlesztésének előkészítése során használható jól.

A támogatott technológiák (SDH, IP, IP/MPLS, Ethernet, WDM) és tervezési feladatok (átviteli utak meghatározása, hálózatméretezés, topológia optimalizálás, hálózatátrendezés, hibahatás analízis, rendelkezésreállási analízis, QoS analízis) széles köre, valamint a grafikus megjelenítő felület (a hálózati ábrák vektorgrafikus exportjával) és a rugalmasan konfigurálható listás eredményszolgáltatás hatékony támogatást nyújtanak komplex hálózattervezési feladatok megoldásához és dokumentálásához. A tervezőrendszer általános áttekintését adja a H5. ábra.



H5. ábra A FLEXPLANET rendszer áttekintése

Jelenleg négy fő elem alkotja a rendszert:

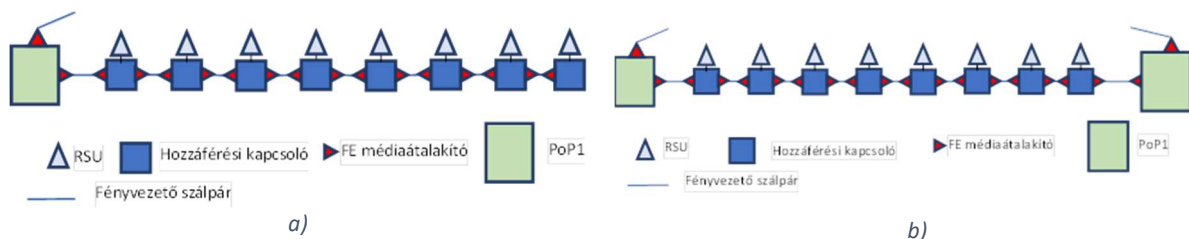
- **FlexFrame:** Adminisztrációs keretet ad a FLEXPLANET hálózati modellek kezeléséhez.
- **FlexPlanDraw:** Térképes megjelenítő program a FLEXPLANET hálózati modellekhez.
- **FPCom:** Parancssoros vezérlésű konzolprogram a FLEXPLANET hálózati modellek tervezéséhez, elemzéséhez, listázásához, stb.
- **FlexPlanet:** A tervezési lépéseket és folyamatokat kezeli, vagyis innen indíthatók a megvalósított tervezési és elemzési módszerek.

A vizsgált hálózati változatok

V2I/I2V járműkommunikációs hálózat elemzésre választott optikai felfűzés alapú hozzáférési megoldását [H2] alapján ismertetjük.

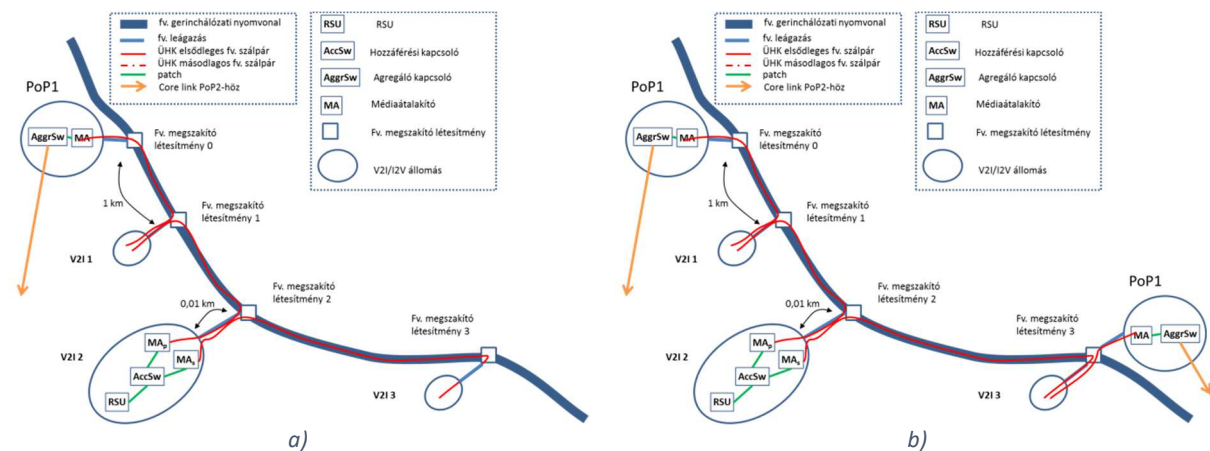
Az optikai felfűzés célja, hogy — például egy gyorsforgalmi út mentén elhelyezett — RSU-kat kapcsoljon a backhaul hálózat maghálózati szegmensének PoP-jához. Mivel egy RSU-nak tipikusan egyetlen FE vezetékes hálózati portja van, ezért a felfűzéshez szükséges két port biztosítására hozzáférési kapcsolók, a fényvezető infrastruktúrán történő csatlakoztatáshoz médiaátalakítók szükségesek (H6. ábra).

A felfűzés megvalósítható redundanciamentesen (H6.a ábra), ebben az esetben az RSU-lánc egy irányból csatlakozik a backhaul maghálózathoz, míg a lánc kétirányú csatlakoztatása bizonyos fokú hibátűrést is biztosít (H6.b ábra).



H6. ábra Lineáris felfűzésű (L2 Daisy Chain) optikai architektúra kétirányú hálózati csatlakoztatással

Ezt a hozzáférési megoldást az alábbi hálózati elrendezésben modellezzük (H7. a és b ábra).



H7. ábra Az elemzett hálózat elrendezések

Az adott útszakaszt 4 RSU szolgálja ki, amelyek az út mentén telepített fényvezetőn csatlakoznak a PoP1 helyszín(ek)hez. A RSU állomások közül az ábra csak a V2I2 állomás szerkezetét részletezi, a többi, ezzel azonos állomási rendszertechnikájúét nem.

A két hálózati elrendezésre egyenként két elemzést végeztünk. Mindkét elemzés pont-pont szemléletű:

- az egyik távoli C-ITS szerver és az egyes RSU-k közti pont-pont backhaul hálózati szolgáltatásokat értékeli, a PoP1-PoP2 ábrán fel nem tüntetett, de a kiértékelési modellben szereplő kapcsolatot tipikus szolgáltatói hálózati nagy távolságú összeköttetés kiesési időarány értékkel figyelembe véve,

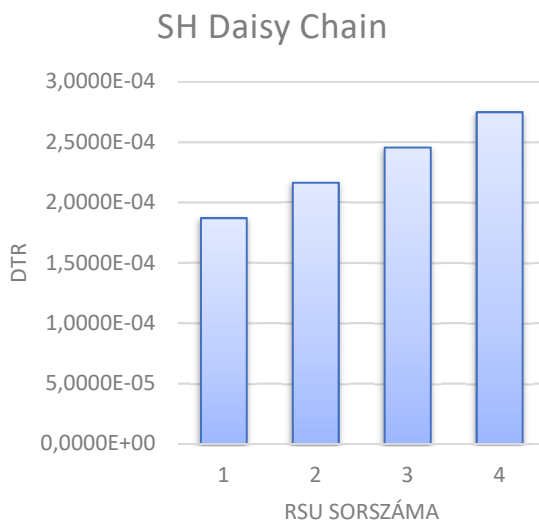
- a másik elemzés egy OBU-t is figyelembe vesz a modellben, mely OBU mindegyik RSU-hoz kapcsolódónak feltételezett, és így az OBU közti pont-pont backhaul hálózati szolgáltatásokat értékeli. Ez egy durva közelítése az mozgó — vagy akár álló — OBU-n keresztül elérhető szolgáltatásnak, mert az OBU összes RSU-hoz kapcsolódása azt jelentené, hogy a vizsgált útszakaszt minden egyes OBU önállóan is ki tudná szolgálni, azaz a szakasz rádiós lefedése erősen redundáns. Ez nem egy gyakorlatias megfontolásokon alapuló modellelrendezés, mindössze annak illusztrálása, hogy járműkommunikációs hálózatok teljes szolgáltatásának elemzése esetén pont-pont szemléletű modelleknek komoly korlátai vannak.

10. Számítások, eredmények

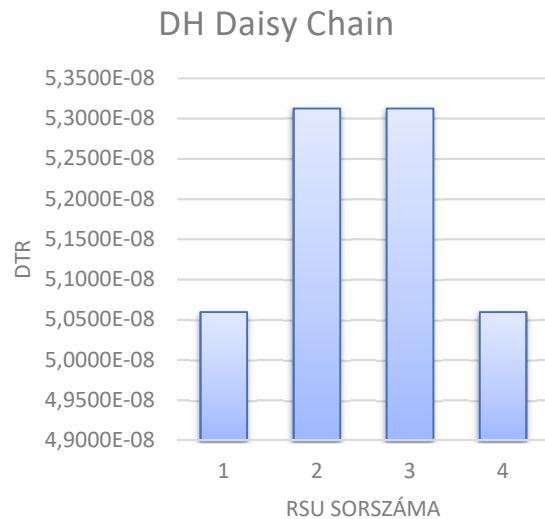
A modellezés során [H2] alapján választott paraméterek értékei a következők (H8. táblázat):

H8. táblázat A számításokban használt DTR értékek

Hozzáférési kapcsoló	Médiaátalakító	Aggregáló kapcsoló	Fényvezető kábelszakasz 1 km
2,34E-05	7,58E-07	1,58E-04	2,73E-06



H9. ábra



H10. ábra

Az egyes RSU-kat csatlakoztató backhaul szolgáltatások kiesési időaránya a topológia alapján várható tendenciákat mutatja. A redundanciamentes hálózatra (H7.a ábra) a PoP1-től távolodva az RSU-k csatlakoztatása enyhén romló jellemzőjű, de nagyságrenden belüliek a differenciák (H9. ábra).

A redundáns hálózatra (H7.b ábra) a topológia szimmetriája jellemző, ami az eredményekben is megmutatkozik: a PoP-okkal szomszédos RSU-k, illetve a két középső RSU csatlakoztatási jellemzője megegyezik.

H11. táblázat Az OBU-srv összeköttetés DTR értékei

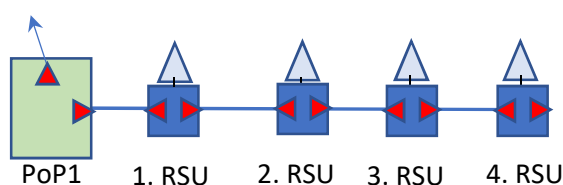
SH Daisy Chain	DH Daisy Chain
1,8704E-04	2,5599E-15

Az RSU-kon keresztül csatlakozó OBU a redundanciamentes esetben gyakorlatilag nem kap jobb szolgáltatást, mint egyetlen RSU (az OBU-ket ideálisnak tekintettük), míg a redundáns esetben megmutatkozik a több nagyságrendes javulás. Ne feledjük azonban, hogy ez utóbbi eredmény erősen félrevezető, hiszen nincs szó redundáns rádiós lefedésről, az ezt mutató hatás a modell „hibája”, vagy inkább alkalmazhatóságának korlátja.

11. Egyszerű útszakasz lefedettségének vizsgálata a markovi apparátussal

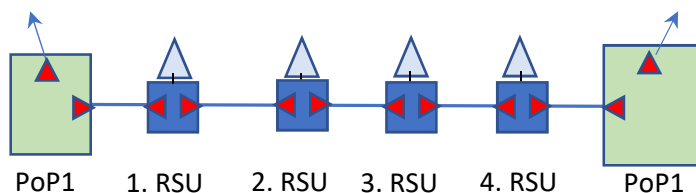
Ebben a fejezetben a megvizsgált probléma a következő:

Adott egy útszakasz, amit a M1. ábrán látható módon 4 RSU fed le. Kíváncsiak vagyunk arra, hogy az egyes RSU-k hatáskörében az idő mekkora hányadában van összeköttetés a hálózattal (PoP1, a mögöttes hálózatot most ideálisnak tekintjük), és arra, hogy az adott útszakaszon adott sebességgel történő áthaladás esetén összesen mekkora adatkapacitásra számíthatunk átlagosan. Ezeket a szempontokat figyelembe véve a M2. ábrán látható esetet is megvizsgáljuk, és összehasonlítjuk a kettőt. Mind a probléma, mind az alkalmazott modell egyszerűsített, célja annak illusztrálása, hogy ez a modellezési megközelítés további érdemi információkat képes szolgáltatni a járműkommunikációs szolgáltatás működéséről.



M1. ábra Single-Homed eset

A modelljeinkben a PoP1-ek, a linkek, és az RSU állomások (hozzáférési kapcsolók médiaátalakítóikkal) szerepelnek, így 9 és 11 elemű a két modell. Az irányonkénti médiaátalakítók modellezési értelemben a link részei a fényvezető kábelszakasszal együtt. Magukat az RSU-kat ideálisnak tekintjük. Ez nem tűnik soknak, de már ennyi is meghaladja az egyszerűen áttekinthető méretet (lévén a megoldásvektor így 512, illetve 2048 elemű), így alkalmazunk egy Li-Silvester-beclést, miszerint csak 2 hibamélységig elemezzük ki a hálózatot, az ennél nagyobb hibamélységekre úgy tekintjük, hogy a teljes adatkapacitása nulla. A valóságban még ekkor is működhetnek RSU-k, így az itt kiszámolt eset a „worst case”, ennél csak jobb lehetnek a pontosan meghatározott értékek.



M2. ábra Dual-Homed eset

Minden modellemhez rendelnünk kell egy λ és μ meghibásodási és javítási intenzitást, ez alapján lesz az eredményünk valóság-hű. A meghibásodási és a javítási intenzitásokat a már említett MTBF (Mean Time Between Failures) és MTTR (Mean Time To Repair) alapján számoltuk, λ és μ ezek reciprokai, az elektronikus berendezések esetében a gyakorlatban alkalmazott exponenciális eloszlások alapján. MTTR-t a kábelszakaszok esetére 12 órának választottuk, minden másra 6 órának, az MBTF-ek meghatározására pedig rendelkezésünkre álltak irodalmi adatok [M1].

Első lépésként létre kellett hoznunk a modellek rátamatrixait, melyek egy elemre az elem λ és μ jellemzőiből, és azok -1 -szereséből állnak, és ehhez a Kronecker-összeg (ennek realizálását a Kronecker-szorzat felhasználásával készítettem el) művelettel tudtuk hozzávenni az újabb elemek rátamatrixait. Ezeket mindkét modellhez meghatároztam, majd a folytonos idejű Markov-lánc

stacionárius megoldásából kifejeztem a valószínűségeloszlást, és a kiegészítő feltétellel frissítve ezt megoldottam. A meghibásodás nélküli, és a pontosan egy, illetve két hibát megvalósító állapotokat kigyűjtöttem a megoldásvektorból, és a komplementer valószínűség vált a Li-Silvester-becslésünk hibatagjává. Ezeket a számolásokat MATLAB segítségével hajtottam végre.

Az eredmények

Az eredményeket először táblázatos formában szemléltetem:

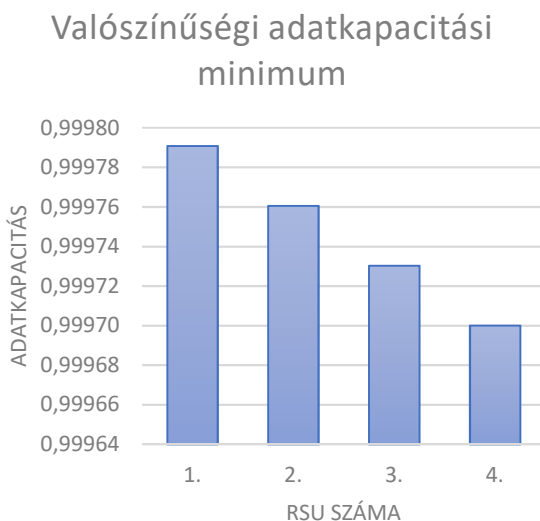
M3. A redundanciamentes eset megoldásai

RSU-mintázat	valószínűség
1111	9,9970E-01
1110	3,0292E-05
1100	3,0293E-05
1000	3,0294E-05
0000	1,8716E-04
Li-Silvester hibatag	1,1095E-12

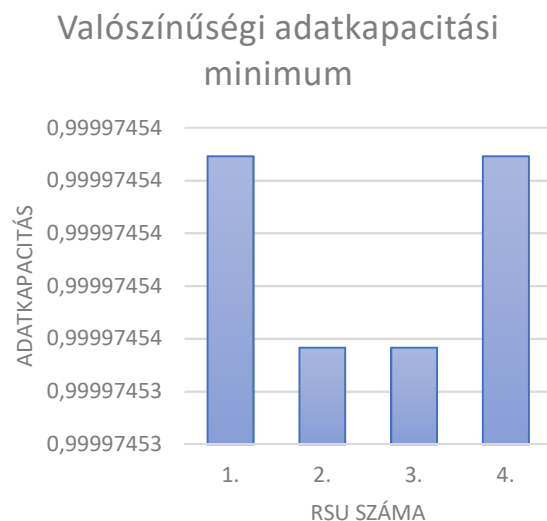
M4. A redundáns eset megoldásai

RSU-mintázat	valószínűség
1111	9,9990E-01
1110	2,4845E-05
1101	2,4840E-05
1011	2,4840E-05
0111	2,4845E-05
1100	5,6693E-09
1001	8,8802E-10
0011	5,6693E-09
1000	1,1368E-08
0001	1,1368E-08
0000	3,5023E-08
Li-Silvester hibatag:	5,4142E-12

Ezek után a különböző RSU-k által szolgáltatott adatkapacitást szeretném szemléltetni:



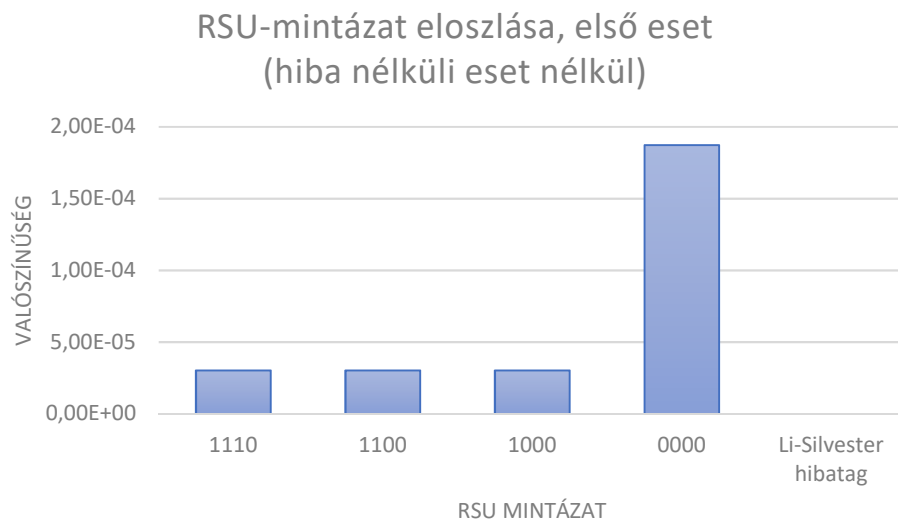
M5. ábra A területek lefedettsége az első megoldásban



M5. ábra A területek lefedettsége a második megoldásban

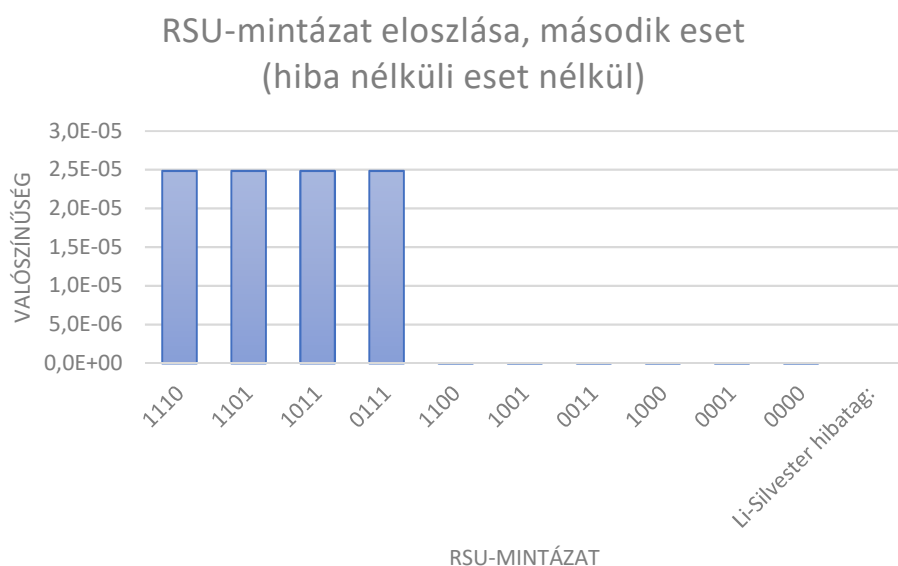
Ez a várakozásainkat alátámasztja, a „Single-homed” esetben (M1. ábra) a PoP1-hez legközelebbi terület lefedettsége a legmagasabb, a „Dual-homed” esetben (M2. ábra) pedig a lánc közepén lévő területek a leggyengébben lefedettek. Egy RSU adatkapacitására 2 Mbps értékkel számoltam, a szakirodalom [M1] alapján, de az ábrákon a relatív adatkapacitást jelenítettem meg, ahol az egy RSU maximális adatkapacitása az egység.

A lehetséges mintázatok bekövetkezésének az esélyeit is kiszámoltam és ábrázoltam. A most következő ábrákhoz fontos tudni, hogy az RSU mintázatban az 1 a működőképes állapotot, a 0 a nem elérhető, vagy rossz állapotot jelöli, továbbá egyik grafikonnak sem része a teljesen működőképes eset, mert akkor a különböző hibaminták között nem jól látható a reláció. Ezek az értékek a fenti (M3. és M4. táblázatban) szerepelnek.



M7. ábra

Érdekes megfigyelni (és első pillantásra meghökkentő is), hogy a 0000 eset valószínűbb, mint bármelyik másik. Belegondolva azonban kiderül, hogy ez 3 elem közül bármelyik meghibásodásából következhet be, míg a többi rendre 2-2 elem meghibásodásából (lásd az M1. ábrát).



M8. ábra

Az M2. ábra szerinti megoldásnál szemmel látható a különbség az egy és a két hibás esetek bekövetkezésének valószínűsége között, ez abból adódik, hogy míg az egy RSU leszakadása bekövetkezhet az RSU elromlásával is, addig két RSU leszakadása már csak két egyidejű hiba esetén lehetséges a dual-homed struktúra miatt. Ez az eltérés közel négy nagyságrend, és a hibatag még ennél közel ugyanennyivel kisebb, és így az ábrán már nem is látszik.

További adatokkal kiegészítve (RSU-k távolsága, jármű sebessége, adott járműsebesség mellett elérhető adatkapacitás, stb.) a modell eredményei jól felhasználhatók az adott szakaszon adott sebességgel haladó jármű számára elérhető adatkapacitás meghatározására, valamint a DENM üzenetekben számára elérhető információ mennyiségére. Ennek segítségével a DENM üzenetküldési stratégiák paraméterei (ismétlési ráta egy RSU-n, ismétlés egy adott szakasz néhány egymással szomszédos RSU-ján) megalapozottan hangolhatók.

12. Összefoglalás, következtetések

A TDK dolgozatban tehát bemutattam a téma fontosságát egy-két aktuális fejleménnyel a jelenleg is folyó kutatások területéről, elvégeztem a járműkommunikációs rendszerek ismertetését, és célul tűztem ki a hálózatmegbízhatóság modellezését és elemzését. Mind a modellezésre, mind az elemzésre mutattam különböző lehetőségeket, illetve a kanonikus elemzési módszert, a hálózatmodellezési módszert, a markovi apparátus használatát példán is bemutattam, amely példák életszerű adatokkal dolgoztak, így akár egyszerű esettanulmányoknak is tekinthetők.

A Markov-féle módszerrel vizsgált területi adatkapacitásos modell alkalmas a téma további bővítésére, a bemutatott konkrét változat némely paraméterekkel kiegészítve már kézzelfogható adatokat szolgáltat a területi lefedettség viselkedéséről például egy adott (tervezett) autópálya szakasz esetében.

A bemutatott apparátus alkalmas az új infrastrukturális elemek tervezésére, a lehetséges topológiák összehasonlító elemzésére. A bemutatott példák alapján a hálózati redundanciák tudatosan tervezhetők, annak érdekében, hogy a jövőbeli alkalmazások számára egyértelműen meghatározott jellemzőket nyújtsanak.

A kanonikus vizsgálatban a vizsgált paraméterkészlet mellett megállapítottam, hogy egy sztenderd kiépítésű szerver lehet a szolgáltatási infrastruktúra kritikus pontja, így annak az erősítését mindenképpen célszerű elvégezni a járműkommunikációs szolgáltatás rendelkezésre állása növelésének érdekében. Másodsorban a legnagyobb befolyással a szerverhelyszín csatlakoztatása, a PoP2-szerver kapcsolat minősége volt a szolgáltatásra, így érdemes fontolóra venni redundanciájának növelését a rendszerek tervezése során.

A dolgozat új eredménye a mozgó felhasználót az ad-hoc hálózati adatszórással, fix rádiós egységről elérő távoli szerver nyújtotta szolgáltatás modellezése. A Markov-lánccal adott modell segítségével az út melletti egységekhez tartozó területek járműkommunikációs szolgáltatással lefedettségének számítására, az adott sebességgel mozgó felhasználóhoz eljuttatható adatmennyiség számításának megalapozására adtunk egy megbízható módszert (ami alsó becsléssel dolgozik), nem számottevő hibával. A redundanciamentes és a redundáns csatlakoztatási megoldások is összemérhető ebben a modellben, és ez alapján érdemesnek látszik a redundáns, dual-homing eset támogatása, mert értékelhetően jobb a relatív adatkapacitási értéke, és ez a kanonikus modell elemzési eredményei alapján az alkalmazási gyakorlatban is mérlegelendő szempont.

13. Rövidítések jegyzéke

Rövidítés	Feloldása
5G	5th Generation (Mobile Technology)
WDM	Wavelength Division Multiplexing
DEMUX	demultiplexer
FE	Fast Ethernet
GE	Gigabit Ethernet
ITS	Intelligent Transport Systems
L2	Layer 2
LoS	Line of Sight
MUX	multiplexer
OBU	On-Board Unit
P2P	point to point
PON	Passive Optical Network
PoP	Point of Presence
PPS	Packet Per Second
RSU	Road Side Unit
SFP	Small Form-factor Pluggable
SRLG	Shared Risk Link Group
TMC	Traffic Management Centre
VANET	Vehicle Ad-hoc NETWORK

14. Irodalomjegyzék

- [B1] Korea IT Times <http://3smarket-info.blogspot.com/2014/03/2015rmb-1000.html> (letöltés: 2019. 09. 25. 08:08)
- [B2] An Overview of USDOT Connected Vehicle Roadside Unit Research Activities, US Dept. Of Transportation, May 2017 Publication Number: FHWA-JPO-17-433,
- [B3] C-ITS Platform Final Report Phase II, September 2017
- [B4] Intelligent Transport Systems (ITS);Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, ETSI TS 102 637-2 V1.2.1, 2011.03., https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/10263702/01.02.01_60/ts_10263702v010201p.pdf
- [B5] Intelligent Transport Systems (ITS);Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service , ETSI TS 102 637-3 V1.1.1, 2010.09., https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/10263703/01.01.01_60/ts_10263703v010101p.pdf
- [Moll] Ulrich Moll Network Reliability Measures and Their Application to Transmission Network Planning. In proc. of Networks'96, pp.315-320, 1996.
- [JL1] Network reliability: models, measures and analysis, in Proceedings of the 6th IFIP Workshop on Performance Modeling and Evaluation of ATM Networks, 1998, Ilkley, Anglia, Vol. 2, pp.1-10
- [JL2] Efficient Reliability Modeling and Analysis of Telecommunication Networks, In: Proceedings of the 6th International Conference on Telecommunication Systems, Modelling and Analysis, Nashville (TN), Amerikai Egyesült Államok (1998) pp. 236-241.
- [JL3] L. Jereb, F. Unghváry, T. Jakab, "A Methodology for Reliability Analysis of Multi-Layer Communication Networks", Optical Networks Magazine, 2 (2001), pp. 42-51.
- [JL4] L. Jereb, T. Jakab, F. Unghváry, "Availability Analysis of Multi-Layer Optical Networks", Optical, Networks Magazine, March/April 2002., pp. 84-94.
- [K1] dr Bokor László, Jakab Tivadar, M9 okosúti infrastruktúra HLD előtervezése, BME HIT tanulmány, 2018.
- [K2] Tuan Anh Nguyen et al, Reliability and Availability Evaluation for Cloud Data Center Networks Using Hierarchical Models, IEEE Access Vol 7 2019, DOI 10.1109/ACCESS.2019.2891282, pp. 9273-9313
- [H1] Bajor Péter, Izsó Tamás, Jakab Tivadar, Szandi Lajos, Zsóka Zoltán és Varga György, GSM-R rendszer hálózati elemeinek megbízhatósági modellezése, minőségi mutatói, összekapcsolása és nyilvántartása, Megbízhatósági modellezés, Zárótanulmány, BME HIT 2013.
- [H2] dr Bokor László, Jakab Tivadar, M9 okosúti infrastruktúra HLD előtervezése, BME HIT tanulmány, 2018.
- [M1] dr Bokor László, Jakab Tivadar, M9 okosúti infrastruktúra HLD előtervezése, BME HIT tanulmány, 2018.

15. Köszönetnyilvánítás

A dolgozat elkészítésében a *Hálózati rendszerek és Szolgáltatások Tanszék AddICT Laboratóriumának*, valamint a *Járműkommunikációs Laboratóriumának* munkatársai is segítettek, nekik szeretnék köszönetet mondani, a dolgozatomban található hasznos szakmai tartalom jelentős része az ő érdemük, a hibákért én felelek. Szeretném megköszönni

Bajor Péternek a FLEXPLANET hálózatmodellező eszköz hatékony felhasználását nagymértékben segítő támogatást. Az általa kidolgozott modellezési szoftvertámogatásra és mintapéldákra alapozottan, konzulensem közreműködésével készültek a hálózatos szemléletű elemzési modellek.

dr Horváth Gábornak a markovi modellezéssel és annak alkalmazásával kapcsolatos konzultációkat és hasznos tanácsokat.

dr Bokor Lászlónak és *Varga Nándornak* a járműkommunikációs hálózatokkal és az ETSI ITS G5 ajánlásokkal kapcsolatos szakmai támogatást, konzultációkat.