

Hálózattervezés és analízis

Jereb László^a, Sipos Attila^b

^aNYME Informatikai Intézet¹

^bMagyar Telekom PKI Távközlésfejlesztési Intézet

1. Általános motivációk és célkitűzések

A kommunikációs hálózatok tervezése és teljesítőképességi analízise az elmúlt két évtized egyik meghatározó tudományos kérdésévé vált. Jelentőségének gyors növekedésében számos tényező játszott szerepet:

- Világszerte gyors ütemben nőtt a közeli vagy távoli pontokra eljuttatni kívánt információ mennyisége, ezen belül az adatkommunikáció. Az új szolgáltatások azonban nemcsak mennyiségi változásokat hoztak, hanem a hálózatokban a korábbiaktól eltérő forgalmi tulajdonságokat is eredményeztek. A változások következtében már az egyedi forgalmak modellezése is a klasszikus eszközök továbbfejlesztését igényelte, a többféle forgalom jelenléte és a forgalom integrálása pedig – természetesen – tovább bonyolította a hálózatok forgalmi modellezését, méretezését és teljesítőképességi analízisét.
- A gyors igénynövekedés megkívánta olyan új kommunikációs hálózati technológiák kifejlesztését és alkalmazását, amelyek egyre hatékonyabban képesek az igényeket kiszolgálni, sőt képesek a további igények megjelenését is elősegíteni. A hálózatok méretezését bonyolítja azonban, hogy ezen technológiákat nem külön-külön, hanem együtt, komplex hálózati architektúrákban alkalmazzák.
- A sok és egyre fontosabb szolgáltatás következtében azonban mind kiszolgáltatottabbá válnak a felhasználók a bekövetkező meghibásodások hatásával szemben, ezért kiemelkedő jelentőségű fejlesztési szemponttá vált a hibatűrés, egyaránt felvetve a hibatűrő hálózatok tervezésének, valamint a tervezett vagy létrehozott hálózatok megbízhatósági analízisének igényét.

A kommunikációs hálózatok világszerte megfigyelt gyors fejlődése Magyarországon is jelentős hatást gyakorolt. A 80-as évek második felétől egymást követték a hálózatfejlesztési programok. A hálózatdigitalizálást, majd az optikai infrastruktúra megteremtését követően, a – privatizáció hatására is felgyorsult – fejlesztésekben meghatározóak voltak az új technológiai megoldások (SDH, ATM, IP, WDM, Ethernet, NGN). A változások sebességét jól mutatja az 1. táblázat, amely a Budapest és Tatabánya közötti kábellel illusztrálja a változások mennyiségét és minőségét (1986 és 2006 között az első 10 évben alig több mint kétszeres, a következő 10-ben kb. harmincszoros forgalomnövekedés és a korábbi homogén beszédforgalom sokszínűvé alakulása).

¹ A cikk eredményeinek döntő része a szerző BME Híradástechnikai Intézetben végzett munkáihoz köthetők.

	1986	1996	2006
Átviteli kapacitás (Mbit/s)	analóg	420	15150
Távbeszélő csat. egyenérték (db)	2700	5760	172460
átviteli közeg	koax kábel	optikai kábel	optikai kábel
technológia	analóg sokcsat. rendszer	PDH	SDH, WDM
multiplexálás	FDM	TDM	DWDM
jellemző forgalom	beszéd	beszéd	IP, adat
csatorna alapegység	4 kHz-es beszédcsat.	2Mbit/s PCM csatorna	1-10Gbit/s

1. táblázat: Átviteli rendszerek a Budapest-Tatabánya szakaszon

A fejlesztéseket támogató hazai számítógépes háttér megteremtésében fontos szerepet játszott a BME Híradástechnikai Tanszékének hálózattervezéssel foglalkozó csoportja és a Magyar Telekom PKI Távközlésfejlesztési Intézete. E munkákban alapvető cél volt olyan új tervezési és analízis módszerek és eljárások kidolgozása, amelyek

- képesek választ adni az új technológiák megjelenéséből, a szolgáltatások integrációjából és a komplex hálózati architektúrákból adódó kérdésekre,
- a feladatok megoldásában az ismert eredményeket nemzetközi együttműködésekben is továbbfejlesztik,
- számítógépes tervezési és analízis eszközök formájában meg is valósíthatók, és ezzel hatékonyan támogatják valóságos hálózatok tervezési és analízis feladatainak megoldását.

Jelen cikk az említett három témakör (teljesítményelemzés, tervezés, megbízhatósági elemzés) közül az utóbbi kettőre koncentrál, és összefoglalja azokat az eredményeket, amelyek egyrészt egy általános modellre alapozottan függetlenné teszik a tervezési és megbízhatósági-teljesítőképességi analízis folyamatokat a konkrét hálózati technológiáktól és megoldásoktól, másrészt az általános hálózatmodellhez illesztett statisztikai mintavételezés révén a hálózatok megbízhatósági analízise alkalmazhatóvá válik nagyméretű, nagyon sok elemet tartalmazó valós hálózatok esetén is.

2. Rétegelt modellre alapozott tervezési eljárás

A hálózattervezési háttértől azt várjuk el, hogy képes legyen támogatni

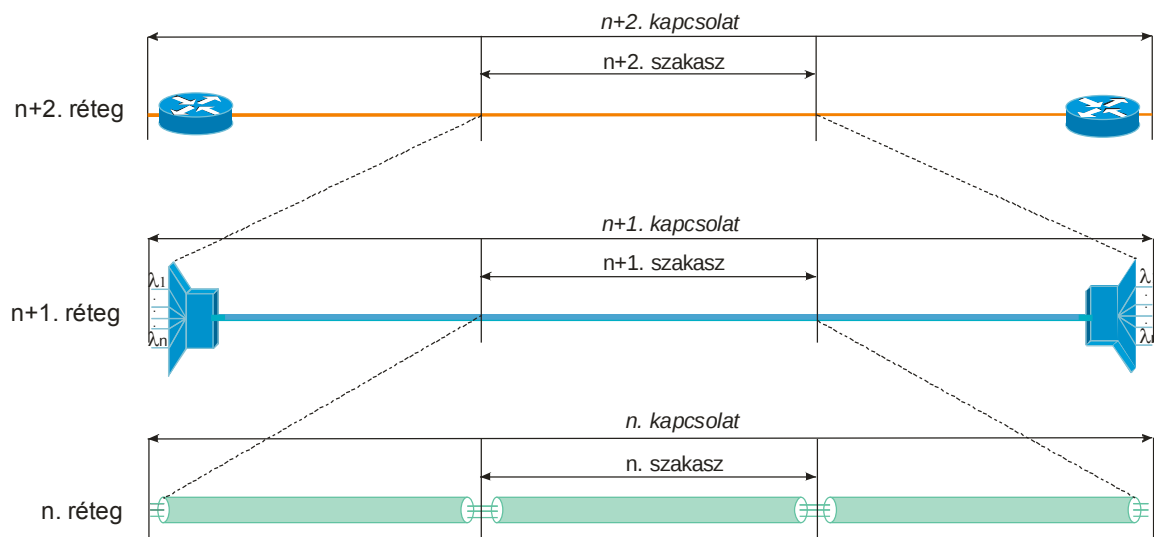
- összetett technológiai környezetben a hálózat leírását és az adott környezetben a hálózat méretezését, az alternatív technológiai megoldások és stratégiai fejlesztési változatok összehasonlítását,
- a létező hálózati erőforrások és azok aktuális felhasználtságának leírását, az erőforrások adta korlátok mellett a hálózat méretezését és a szükséges erőforrás-bővítések meghatározását (rövidtávú tervezés),
- hosszabb távú fejlesztésekhez a várható igények figyelembevételével a célszerű fejlesztési prioritások meghatározását (középtávú és távlati tervezés), valamint
- többszolgáltatásos környezetben, több technológia egyidejű alkalmazásán alapuló hibátűrő hálózati megoldások mellett, sok hálózatelemből álló nagy hálózatmodellek esetén is a hálózatok teljesítőképességi jellemzőinek előállítását.

A gyors technológiaváltások következtében a célok egy olyan háttérrel érhetők el, amely minden tervezési eljárást technológia-függetlenül specifikál, és csak a tervezési folyamatok paramétereiként kezeli az egyes technológiák különbözőségeit, ezért a rétegelt modellre alapozott tervezési megközelítés három egymáshoz szorosan kapcsolódó gondolatkörre épül, mégpedig

- az általános, technológia-független rétegelt modellre,
- a rétegelt hálózatmodell alapján értelmezett tervezési alaplépésekre és
- a tervezési alaplépésekből felépülő tervezési folyamatokra.

2.1. Rétegelt hálózati modell

Egy adott transzport technológián belül a rétegek szerinti partícionálása hosszabb ideje szokásos megoldás. Az egyes rétegek funkcionális jelentéssel bírnak és különböző logikai elemeket reprezentálnak. Az általunk kialakított módszer a rétegek szerinti hálózatléírást általánosítja úgy, hogy minden adott rétegbeli kapcsolat szakaszokra bomlik és az adott rétegbeli szakaszokat egy náluk alacsonyabb hierarchiájú réteg realizálja úgy, ahogyan azt az 1. ábra egy leegyszerűsített képen mutatja.



1. ábra: A rétegelt modell illusztrációja három réteggel

A rétegzett modell meghatározó elemei a következők:

- A rétegek felülről lefelé a logikai szintű forgalmi igényektől a kábelcsatornáig (N. ... 1. réteg) rendezettek úgy, hogy a rétegek kliens-szerver kapcsolatban vannak egymással. Két – nem feltétlenül szomszédos - réteg esetén a logikai szinthez közelebb álló réteg a kliens és a fizikaihoz közelebbi pedig a szerver.
- Egy rétegben a csomópontpárok közötti kliensigények szakaszait a szerverréteg egy kapcsolata realizálja, majd a szerverréteg kapcsolatát, mint klienst, az alatta elhe-

lyezkedő szerver réteg valósítja meg. A szerverréteg kapcsolatai kliensigények átviteli vagy forgalmi multiplexálását végzik kötött vagy kötetlen pozíciókkal.

- Mivel az egyes rétegek kapcsolatai rögzített kapacitásúak, mód van a technológia-specifikus méretek és költségek megadására. Az egyes kapcsolatok közvetlenül megfeleltethetők létező vagy tervezett összeköttetéseknek, ami lehetővé teszi a rövidtávú tervezés során az aktuális hálózati állapot közvetlen figyelembevételét is.

2.2. Tervezési alaplépések

Az általános modell alapján az optimalizálási folyamat csak a modelltől függ, és nem függ a konkrét hálózattól, illetve az alkalmazott hálózati technológiáktól. Minden rétegben a következő alapvető tervezési-méretezési funkciók értelmezhetők:

- a) **topológiai tervezés:** a feladat egy adott, jellegzetesen az 1. (fizikai) réteg gráfjának megtervezése valamely kliens igényréteg vagy igényrétegek ismeretében,
- b) **elvezetés-tervezés:** a feladat az n. rétegben értelmezett kliensigények elvezetési nyomvonalának meghatározása az általában több réteggel alatta lévő k. (gyakran az 1.) réteg gráfján,
- c) **szakaszpont elhelyezés:** a feladat az adott n. rétegbeli kliensigények számára az egy vagy több réteggel az n. réteg alatt elhelyezkedő k. rétegbeli szakaszpontok lehetséges helyének meghatározása,
- d) **nyalábolás:**
 - a feladat az n. rétegben értelmezett kliensigények elvezetési nyomvonalának meghatározása a jellegzetesen (n-1). rétegbeli szerverréteg gráfján, feltéve, hogy ismert az elvezetés az alacsonyabb k. (gyakran az 1.) réteg gráfján,
 - az elvezetési nyomvonal ebben az esetben valójában az n. rétegbeli igény szakaszainak meghatározását jelenti, ami egyúttal nyalábolással előállítja - más n. rétegbeli, nyomvonalukban legalább részben közös igényekkel együtt - az (n-1). rétegbeli kapcsolatokat,
- e) **szakaszolás:**
 - a feladat az n. rétegben értelmezett kliensigények elvezetési nyomvonalának meghatározása az alacsonyabb (sokszor (n-1).) rétegbeli szerverréteg gráfján az adott rétegre vonatkozó útvonalképzési vagy -választási szabályok figyelembevételével,
 - a funkció hasonlít a nyaláboláshoz, de ebben az esetben az igény alacsonyabb rétegbeli nyomvonala nem ismert (legfeljebb annak becsült költsége játszik szerepet a választásban),
 - a funkció alkalmazása gyakran forgalmi tervezési szakaszban történik, aminek következtében az alacsonyabb rétegbeli rendszerekre bontás egyúttal a forgalmi méretezési feladatokat is magába foglalja,

- f) **hozzárendelés:** a feladat az n . rétegben értelmezett kliensigény hozzárendelése a jellegzetesen $(n-1)$. rétegbeli szerverréteg kapcsolatának meghatározott pozíciójához, ahol a hozzárendelés egyaránt jelentheti:
- egy multiplex rendszer adott pozíciójához való hozzárendelést,
 - egy optikai szál optikai csatornájához való hozzárendelést hullámhossz konverzió alkalmazásával vagy anélkül,
- g) **berendezés-tervezés:** a feladat egy adott n . rétegbeli kapcsolat hozzárendelése valamely létező csomóponti berendezés létező vagy új portjához (jellegzetes rövidtávú tervezési feladat) vagy egy új berendezéshez és annak új portjához (jellegzetes középtávú tervezési feladat).

2.3. Tervezési folyamat

Az általános modell alapján egy-egy réteg tervezése során mód van arra, hogy a matematikai eszközökkel állítsunk elő optimális eredményeket. A teljes többrétegű hálózati kép méretezése során azonban a sokféle korlát együttes kezelése csak korlátozottan lehetséges, és helyette a rétegelt modellben értelmezett alapfunkciók alkalmazásával olyan tervezési folyamatokat értelmezhetünk, amelyek a rétegelt modellben természetes módon építhetők fel:

Bottom-Up tervezési folyamat:

- elvezetés-tervezés,
- nyálábolás-tervezés és hozzárendelés rétegről-rétegre,
- berendezés-tervezés.

A folyamat előnye, hogy hibátűrő hálózati megoldásoknál (pl. többutas elvezetéseknel) az elvezetések fizikai diszjunktsága biztosítható, a kapcsolatok kitöltöttsége - ezért a hálózat költsége - azonban gyakran nem optimális.

Top-Down tervezési folyamat:

- lehetséges szakaszpontok elhelyezése rétegenként,
- szakaszolás és hozzárendelés rétegről-rétegre,
- berendezés-tervezés.

A folyamat előnye, hogy a kapcsolatok kitöltöttsége jobban kézben tartható, az elvezetések fizikai diszjunktsága az alsóbb rétegekben azonban automatikusan nem biztosítható.

Iteratív tervezési folyamat:

- bottom-up vagy top-down tervezési folyamat elvégzése,
- előbbi esetben a gyenge kihasználtságú szerverkapcsolatok megszüntetése és a kliensigények más szerverkapcsolatokon való realizálása,
- utóbbi esetben a megbízhatósági követelményeknek eleget nem tevő kliensigények elvezetésének megszüntetése és azok követelményeknek eleget tevő új megvalósítása,
- berendezés-tervezés.

Az iterációs folyamat fontos eleme, hogy több réteg egyidejű kezelésével, de már csak a kliensigények egy részhalmazán történik az adott tervezési lépés.

3. Hálózatok megbízhatósági analízise

3.1. *Hálózatmegbízhatósági analízis előzmények*

A hálózatmegbízhatóság fogalma régóta foglalkoztatja a kutatókat. A jellemzőket tekintve alapvetően négy nagyobb csoportot különböztethetünk meg:

- **Összefüggőségi jellemzők:** A 80-as évek elejéig a hálózat megbízhatóságát a leíró gráf összefüggőségének mértékével jellemezték. Ugyanakkor az összefüggőségi jellemzők alapvetően csak az infrastruktúra minősítésére alkalmasak, ezért nem teszik lehetővé a hálózat degradációjának minősítését.
- **Maximális folyamaton alapuló kapacitásjellemzők:** A 80-as évek elejétől, olyan mérőszámokat értelmeztek, amelyek a hálózat megbízhatóságát az ideális állapothoz képesti várható relatív hálózati kapacitásként értelmezték. A módszer közvetlenül csak az adott kapacitásos gráf elvi képességeinek mérésére, és nem egy valóságos hálózat degradációjának minősítésére volt alkalmas.
- **Többtermékes folyamajellemzők:** A mérőszám ebben az esetben nem a lehetséges maximális folyamat, hanem a hibaállapotokban az egyidejűleg ténylegesen realizált folyamatok ideális hálózathoz viszonyított arányát vagy eloszlását méri. E mérőszámok lehetővé teszik a rendelkezésre álló erőforrások degradációjának minősítését, korlát azonban, hogy amennyiben ezen erőforrások véletlen forgalmat szolgálnak ki, a forgalom kielégítésének mértéke (pl. veszteség, késleltetés) közvetlenül nem értékelhető.
- **Teljesítőképességi jellemzők:** E széles értelmezésű teljesítménydegradáció lehetővé teszi a megbízhatóság fogalmának kiterjesztését forgalmi igényekre, illetve helyreállítási hibatűrő hálózatokra is. Előnye egyúttal, hogy a korábbi mérőszámok ezen értelmezés aloseteiként kezelhetők.

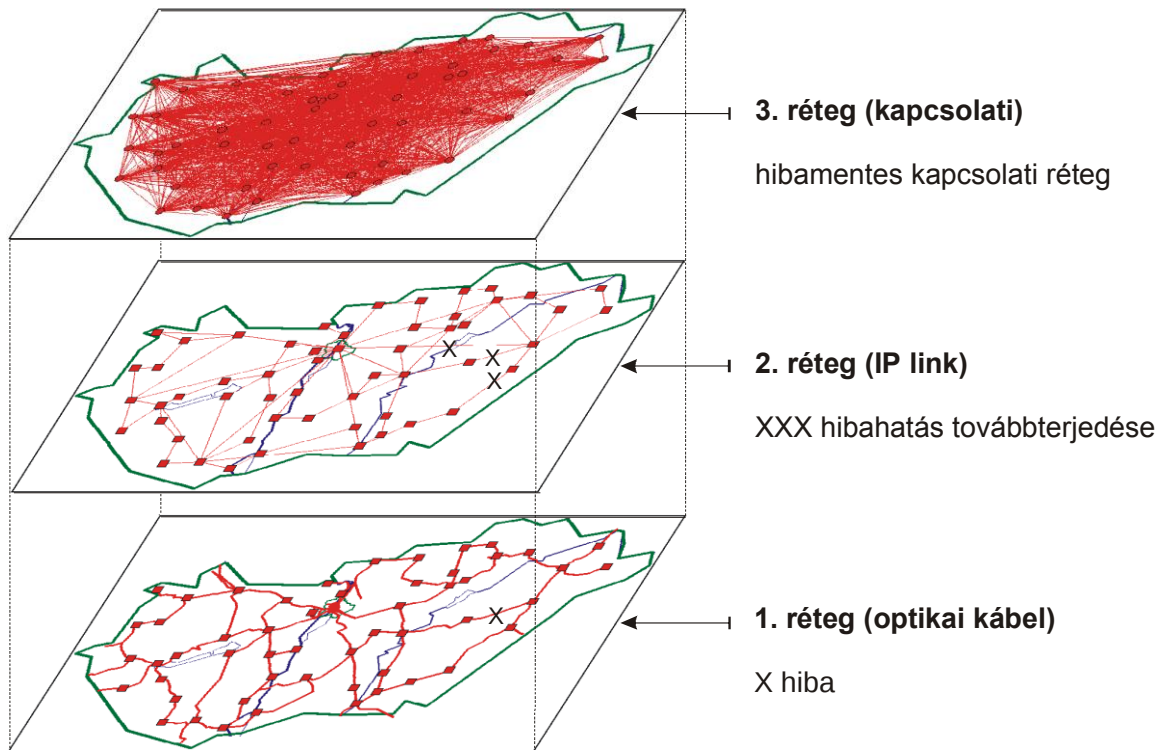
3.2. *Rétegelt hálózatmodellre alapozott teljesítőképességi analízis*

Mivel a mai komplex hálózati szolgáltatások megkövetelik a teljesítmény degradációjának jellemzését, a rétegelt hálózatmodellre alapozottan és ahhoz illeszkedően egy általános teljesítőképességi analízis folyamatot hozhatunk létre. A folyamat főbb elemeit -- egy leegyszerűsített háromszintű példán -- a 2. ábra illusztrálja. E rétegelt hálózatmodellre alapozott folyamatban a különböző elemek lehetséges meghibásodásai rétegről rétegre továbbterjednek a szerverrétegek felől a kliensrétegek felé azáltal, hogy

- a legalsó rétegben bekövetkezett kábelhibák (meghibásodott szerverkapcsolatok) megvalósíthatatlanná teszik az általuk realizált kliens kapcsolatokat,
- az adott rétegben vagy annak klienseiben aktivizálódnak a rétegben kialakított hibatűrési biztosító funkciók, amelyek megakadályozzák vagy megengedik a hibahatás továbbterjedését,

- az ábrán a 2. (a valóságban sokszor egy sokadik réteg) aktuális állapotában meghatározásra kerülnek az ábrán a 3. (a valóságban sokszor több kapcsolati réteg) megfelelő teljesítményjellemzői.

Az utóbbi lépésben meghatározó, hogy a legfelső réteg valamennyi – hibamentes állapotban létező – kapcsolata vizsgálatra kerül, és a bekövetkező meghibásodásoktól függetlenül megvalósítható kapcsolatok mennyisége jellemzi az alkalmazott hálózati technológiák és hibatűrő hatékonyságát, azaz a hálózat teljesítőképességét.



2. ábra: A teljesítőképességi analízis háromrétegű illusztrációja

A kialakított általános folyamat fontos jellemzője, hogy nyitott mind az alkalmazott hálózati technológiá(ka)t, mind az alkalmazott hibatűrő megoldásokat, mind pedig a hálózat teljesítőképességét mérő jellemzőket tekintve. Gyakorlatilag tetszés szerinti szimulációs vagy analízis eszköz csatlakoztatható hozzá, legfeljebb a rétegelt hálózatmodellben eredményként kapott meghibásodások utáni hálózati képet kell transzformálni az adott teljesítményelemző eszköz bemenetére.

3.3. Statisztikai mintavételezésre alapozott megbízhatósági analízis

A rétegelt hálózatmodellhez illeszkedő statisztikai mintavételezési eljárás kapcsolható a hálózatmegbízhatósági analízis folyamatba. A megoldás

- a hálózatok megbízhatósági jellemzőjét a teljes állapottérre érvényes teljesítményindex várható érték- vagy eloszlásbecslés előállításával származtatja,

- a rétegelt hálózatmodellre épülő analízis segítségével tervezett és megépített hálózatok vizsgálatát egyaránt lehetővé teszi, azaz közvetlenül is képes felhasználni a különböző hálózati berendezések megbízhatósági jellemzőit,
- a nagy állapottér kezelhetővé tétele érdekében mintavételezést használ,
- alapértelmezésben mintavételezési módszerként rétegezett mintavételezést (stratified sampling) használ,
- a rétegezett mintavételezés állapothalmazait (rétegeit) az egyhibás állapotok egyszerű csoportjaiból származtatja.

A megoldás technológia-független és első három lépése az alkalmazott statisztikai mintavételezési módszertől sem függ. A megoldás nyitottságát jól mutatja, hogy a kidolgozott kerethez illeszthetően számos nagyon hatékony további módszer is alkalmazása került.

4. Eredmények alkalmazása

Az ismertetett általános modell és tervezési alaplépések lehetőséget adtak arra, hogy az elmúlt 15 éves időszakban bevezetésre került kommunikációs technológiákra (SDH, ATM, IP, WDM) alapozott hálózatok tervezését széles körben támogatni lehessen, mind a bevezetés, mind pedig az azt követő továbbfejlesztések során.

Az értelmezett általános megoldás eredményeként a több technológiai réteget magukba foglaló komplex architektúráis megoldások ugyanúgy kezelhetővé váltak, mint az egyetlen technológiai rétegben alkalmazott multiplexálási rétegek, miközben az általános modell módot adott a különféle egy- vagy többretegű hibatűrő megoldások leírására és tervezésére is. A rétegelt hálózatmodell és a valós hálózati információkkal fennálló összhang előnye, hogy a hálózatok megbízhatósági analízise során a tényleges hálózati szerkezet, a hálózati gráf és a berendezéskészlet határozza meg a jellemzőket, így mind a létező hálózat, mind pedig az azon végrehajtott fejlesztések értékelhetők.

A gyakorlati alkalmazások eredményei konkrét szoftverfejlesztésekben és hálózati tervekben jelentek meg. A tervezési folyamatot 1995-96 óta folyamatosan alkalmazzuk az XPLANET tervezőrendszerben, az alkalmazás háttérét és eredményeit számos szoftverdokumentáció és tanulmány, valamint a Magyar Telekom hálózatában az XPLANET segítségével végrehajtott fejlesztések mutatják. A módszer első alkalmazását az SDH hálózatok távlati, majd rövidtávú tervezése jelentette. A több technológia együttes alkalmazása jelent meg az SDH feletti ATM átfedő hálózat tervezésében. A tervezési megközelítés újabb technológiai megoldásokra való kiterjesztésében a WDM hálózatokra való alkalmazás volt a meghatározó, amelynek keretében mind a hosszú, mind pedig a rövidtávú tervezésben megvalósításra kerültek a hullámhossz kiosztásra alkalmas hozzárendelési algoritmusok is. Végül az utóbbi néhány évben a meghatározó felhasználási irányt az IP és WDM hálózatok együttes tervezése és megbízhatósági analízise jelentette.