

Bolygóközi Internet

Dr. Huszák Árpád

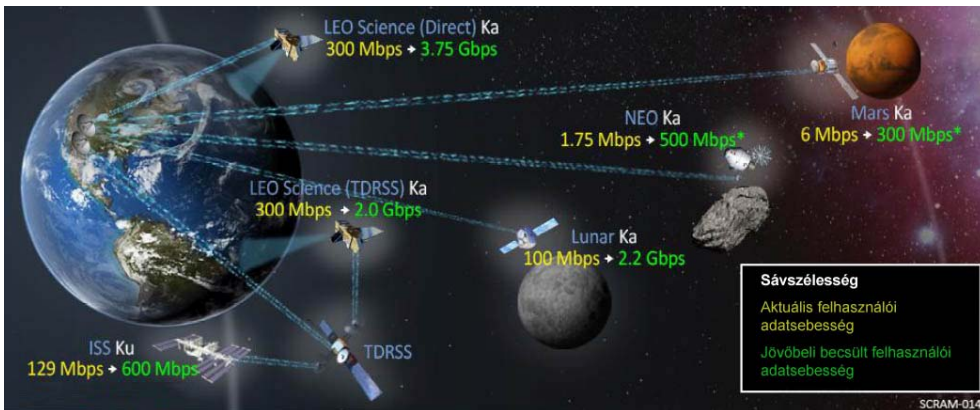
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Híradástechnikai Tanszék

Az elmúlt években sokat hallhattunk a jövő Internet elképzeléseiről, ahol az emberek, gépek, szenzorok sokasága kommunikál egymással. A sok milliárd eszközt tartalmazó hálózatban jelentősen eltérő körülmények és igények merülhetnek fel, a cél azonban továbbra is változatlan: üzenetet kell eljuttatni egyik eszközről a másikra. A környezettől függően természetesen más és más módszer lehet hatékony, hiszen jelentősen eltérő elvárásokat kell teljesíteni, ha élő beszélgetést, videót vagy adatokat akarunk eljuttatni egy adott eszközre otthonunkból, esetleg a sivatag közepéről, netán a tenger mélyéről vagy egy távoli bolygóról.

A mai távközlő hálózataink még többé-kevésbé függetlenek egymástól, azonban a tendencia jól láthatóan közelít egy közös all-IP (Internet Protokoll) alapú rendszer felé, amit az is mutat, hogy ma már bárki számára elérhető az IP alapú telefonálás (VoIP), IP alapú televíziózás (IPTV), élő videokonferencia-beszélgetés, web böngészés.

Az all-IP koncepció tovább terjeszkedik, így a jövő hálózatainak is az IP alapú csomagtovábbítás lesz az alapja, ami alól az űrkommunikációs sem kivétel. Az űrállomás és egyéb űreszközök között eddig előre egyeztetett időpontban, kiépített csatornán zajlott az adattovábbítás, amit egy teljes szakértői csoportnak kellett felügyelnie és manuálisan irányítani. A Földön használt módszereket természetesen nem lehet alkalmazni az Internet világűrbe történő kiterjesztése során, hiszen jelentősen eltérő környezethez kell alkalmazkodni. Az óriási késleltetések, égítetek takarása, energia-ellátás miatti kimaradások, mágneses és elektromos viharok megakaszthatják a kommunikációt. A hatékony modulációs technikának köszönhetően már ma is elfogadható sávszélességgel [1] tudjuk a Föld közelében keringő műholdakról és a Holdról továbbítani az adatokat, azonban az igény folyamatosan növekszik (

15. ábra).



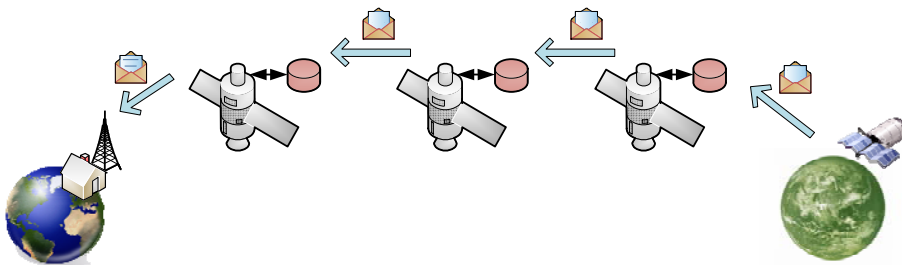
15. ábra *Felhasználói sebességek*

A mindenki által ismert Internet a TCP/IP szabványrendszer [2] használja, mely egy folyamatosan összekapcsolt hálózatot feltételez, ellentétben a világűrben megvalósítható hálózatokkal. A DTN (*Delay/Disruption-Tolerant Networking*) [3] késleltetés és megszakadtűrő hálózati architektúra heterogén hálózatok közötti kommunikációt képes kezelni, akkor is, ha a folyamatos összeköttetés nem biztosított. A DTN a TCP/IP továbbfejlesztett

változata, amelynek lényege, hogy nem feltételezi folyamatos kommunikációs csatorna meglétét a hálózati csomópontok között.

Az eredeti TCP/IP protokollrendszert azért kellett továbbfejleszteni, mert az elküldött adat sikertelen továbbítása esetén a küldő és fogadó számítógép kapcsolatban marad, és a küldő addig próbálkozik az újraküldéssel [4], amíg az információ minden eleme célba nem ér. Óriási távolságok, késleltetések és gyakori megszakadások esetén ez a módszer nem hatékony, hiszen az adatsomagot csak akkor lehet továbbítani, ha él a teljes kapcsolat a küldő és a vevő között. Könnyű elképzelni, hogy egy távoli bolygón lévő szonda adatai több lépésben, üreszköztől üreszköztre haladva jutnak el a vevőig, melyek között a kapcsolat nem lehet folyamatos a takarások és egyéb, a világűrben tapasztalható körülmények miatt. Érdemes tehát az adatokat láncszerűen továbbítani és minden csomópontban tárolni, mindaddig, amíg nem bizonyosodunk meg a sikeres továbbküldésről. Gyakori hibákra, megszakadásokra azonban nem csak a világűrben számíthatunk, hanem a Földön is, gondoljunk például a szenzorhálózatok szűkös energiaforrásaira vagy a járműhálózatok véletlenszerű mozgására.

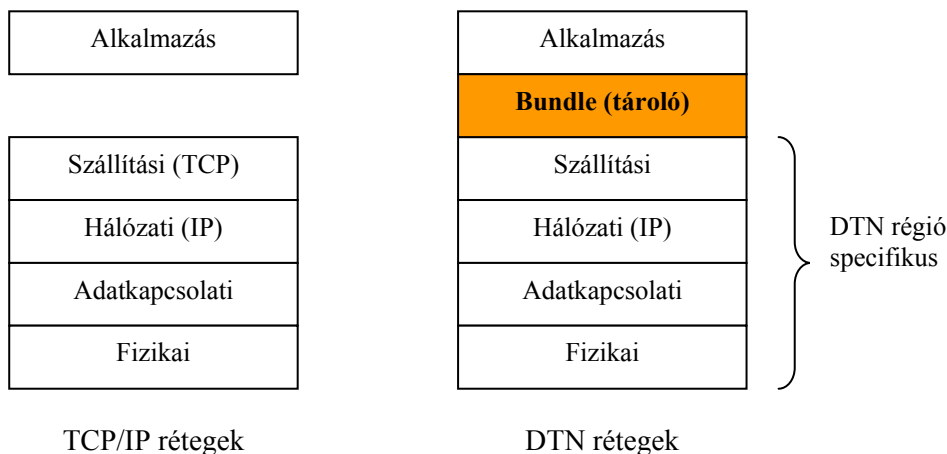
A DTN működését legjobban a „tárol és továbbít” elv írja le. A hagyományos TCP/IP működéssel ellentétben, ha a célútvonal nem található, az adatsomagok nem kerülnek eldobásra. A csomagokat az egyes hálózati csomópontok megőrzik, amíg nem tudnak biztonságosan kommunikálni a következő eszközzel, mely az adat továbbításában vesz részt.



16. ábra Tárol és továbbít elv

A közvetítő csomópont nem mindig tudhatja, hogy mikor lesz lehetősége az adatokat továbbküldeni, így akár hosszabb ideig is kénytelen azokat megőrizni. A tárolásra akkor is szükség lehet, ha jelentősen nagy eltérés mutatkozik a küldési és fogadási sebesség között, hiszen a beérkező adatok feltorlódnak a hálózati eszközben. Az alacsony küldési sebesség oka az is lehet, hogy a küldéshez sok energia kell, ha nagy távolságra kell továbbítani az adatokat, ami egy üreszköz szűkös energiaforrásai miatt nehézséget okozhat. A feltorlódtott adatot tárolni kell, amíg az adatsomagokat nem sikerül mind továbbítani és a nyugtázási válasz meg nem érkezik. Az űrkommunikációban jelentős megszakadások és szünetek jelentkezhetnek, ami a néhány perces tárolástól akár a több évig történő adatmegőrzésig terjedhet. Hosszú idejű és nagy adatmennyiségek tárolására akár merevlemezeket is használhatunk, hiszen azok energiaellátás nélkül is képesek megőrizni az adatokat.

A hagyományos TCP/IP nem tudja kezelni a hosszú megszakadásokat, ezért a DTN hálózati architektúra egy kiegészítő tároló funkcióval látta el a hagyományos TCP/IP rétegmodellt. A mai Internet megszületésekor, az 1970-as években definiálták a hálózati rétegeket [5], annak érdekében, hogy elkülönítsék és függetlenné tegyék a különböző hálózati feladatokat, funkciókat. Az új, tároló funkciókat megvalósító réteg (*bundle*) minden hálózati kilépőponthoz megjelenik, hogy kapcsolóként szolgálhasson a különböző hálózatok között. A bundle réteg képes elfedni az alsóbb rétegeket, így lehetőséget teremtve arra, hogy eltérő protokollokat használjunk egy-egy hálózatban (DTN régió). Eltérően működő kódolásra, modulációra, szállítási rétegbeli protokollra, stb. van szükség a vezetékes ethernet hálózatban [6], egy mobil 3G hálózatban [7] vagy a világűrben.



17. ábra TCP/IP és DTN rétegstruktúra

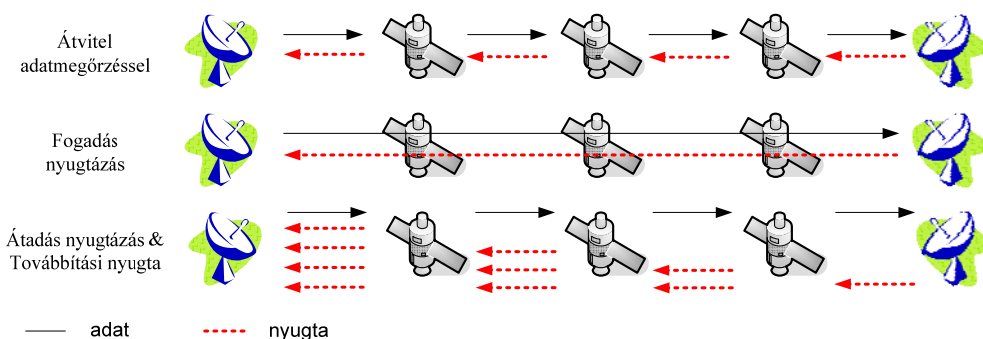
A DTN hálózatban három csomóponttípust különböztetünk meg: *host*, *router*, *gateway*. A *host* fogadja vagy küldi az adatokat, de nem továbbítja azokat. A *router* a régión belüli adattovábbításért felelős. A csomagokat a továbbküldés után nem kötelező tárolnia, de ha a régió jellemzői miatt szükség van tárolásra, akkor képes ezt megtenni. A *gateway* a régiók közötti átjárásért felelős, ezért itt szükség van tárolásra és szükség esetén protokollfordításra vagy átcsomagolásra is.

A hagyományos TCP/IP hálózatokban a sikeres vételt nyugták jelzik. Ha egy csomagra az időzítő lejártáig nem érkezik nyugta, akkor az elveszettnek tekintendő és újra kell küldeni. Az adatok a két végpont közötti teljes útvonalon megszakítás nélkül, azonnal végighaladnak, ezért végpont–végpont kommunikációról beszélhetünk. DTN esetén a *router* és *gateway* eszközök felfüggesztik a szállítási réteg protokolljait. Azzal, hogy ál-végpontként szerepelnek a kommunikációban, a végpont–végpont kapcsolat is megszakad. A nyugtázás minden eszköztől eszközig történő adatátadásnál megtörténik, így csomagvesztés esetén csak az adott szakaszon lehet szükség újraküldésre, nem pedig a teljes útvonalon. A hibamentes végpont–végpont adatátvitelért a szállítási réteg (pl. TCP – *Transmission Control Protocol* [4]) a felelős, a bundle réteg bevezetésével azonban a megbízhatóságért ez a réteg is felel. A hibamentes átvitelt a DTN-ben is nyugtákkal és újraküldéssel biztosítják. Hasonlóan a TCP-hez, ha nem érkezik nyugta, akkor újraküldésre kerül sor. Az eltérés a nyugtázási mechanizmusban és az újraküldési időzítő kezelésében van. Az időzítő értékét pl. a routing üzenetekhez csatolva terjesztik a hálózatban, vagy a küldő számolja ki a korábbi tapasztalatai alapján.

A DTN bundle rétege a következő szolgáltatásokat nyújtja:

- Átvitel adatmegőrzéssel (*Custody transfer*)
Az adatsomag következő eszköznek való átadása előtt a küldő egy üzenetben nyugta küldésére kéri a vevőt, hogy megbizonyosodjon a csatorna működéséről. Ha a beállított időzítő lejár, a kérést megismétli. A továbbküldés során a továbbító eszköz tárolja az adatokat a nyugta megérkezéséig és csomagvesztés esetén újraküldi.
- Fogadás nyugtázás (*Return receipt*)
Az üzenet címzettje nyugtát küld az adat eredeti küldőjének, amikor az adat megérkezett.
- Átadás nyugtázás (*Custody transfer notification*)
Az eszköz, amely vette a továbbküldendő csomagokat, visszaigazolja a vételt az eredeti küldőnek.

- Továbbítási nyugta (*Bundle Forwarding notification*)
A csomópont, amely továbbította a csomagokat, nyugtát küld a sikeres továbbításról az eredeti küldőnek.
- Prioritás (*Priority of delivery*)
 - o *Bulk* (alacsony prioritás)
 - o *Normal*
 - o *Expedited* (sürgősségi)
- Hitelesítés (*Authentication*)
Módszer a küldő azonosítására és a csomag hitelességének vizsgálatára.

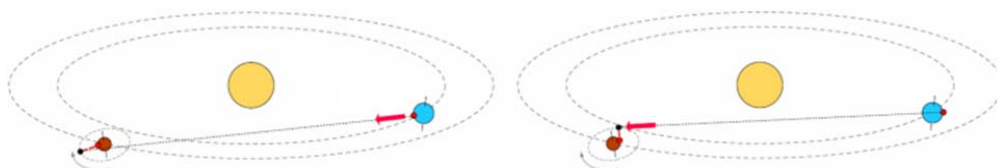


18. ábra DTN adattovábbítás és nyugtázás

Rendkívül nagy kihívást jelent DTN hálózatokban az útvonal kijelölése, vagyis hogy az adatsomagok milyen útvonalon érhetik el leggyorsabban a fogadó eszközt. Az útvonalválasztás (*routing*) nehézségét az adja, hogy az eszközök közötti kapcsolat folyamatosan változik, emiatt előfordulhat, hogy az elküldött adatsomagok pl. „zsákutcába” kerülnek és nem tudják elérni céljukat. Számos kérdésre kell választ adni egy küldő, illetve továbbító hálózati eszköznek. Mikor küldhet? Hova továbbítson? Mely csomagokat továbbítsa? Mely csomag törölhető?

Klasszikus esetben az útvonal kijelölésre kerül, majd az adatok csupán ezután kerülnek a hálózatba. DTN esetén ez nem működik, hiszen egy adott pillanatban nem biztos, hogy létezik út a küldő és vevő között. Az útvonalválasztó algoritmusok így csak valószínűségekkel számolhatnak a lehetséges útvonalak közül való választáskor. DTN esetén annak a lehetséges útnak a valószínűségét vizsgáljuk, mely létrejöhet a küldő és a fogadó között. Bolygóközi kommunikáció esetén szerencsére az égitestek pályája kiszámolható, így a várható kimaradások is többé-kevésbé jósolhatók. Érdekes lehetőséget mutat az

19. ábra, ahol a küldés pillanatában még nem jött létre a kapcsolat, azonban a nagy késleltetések miatt az adatsomag megérkezésekor a vevő már képes fogadni a számára küldött adatokat.



19. ábra Adatküldés rálátás nélkül

Az útvonalválasztó protokollokat két nagy csoportba sorolhatjuk: továbbítás alapú és többszörözés alapú. A továbbítás alapú módszereknél egy adott adatsomagból csupán egy van jelen a hálózatban és az lépésről lépésre közelít a vevő felé. A módszer előnye, hogy nincs erőforrás-pazarlás, nem kallódnak csomagok a vétel után, nincs szükség adminisztratív üzenetekre, hogy a hálózat elemei töröljék a számukra érdektelen csomagokat. Hátránya viszont, hogy lassú lehet. Optimális útvonalválasztás nem várható el, hiszen nem tudhatjuk, hogyan változik a hálózat topológiája. A másik lehetőség a többszörözés alapú adattovábbítás, ahol egy adott hálózati eszköz több irányba is elküldi ugyanazt az adatsomagot, melyek közül valamelyik csak odatalál a vevőhöz. A többszörözés alapú technikával nagyobb sebesség érhető el, azonban jelentős erőforrásigény adódik a csomagok feldolgozása, kezelése, illetve a nagyobb fogyasztás miatt. Az elárasztásos módszerek ráadásul sokszor nem skálázhatók.

A jövő bolygóközi hálózataiban is szükség van az eszközök címezésére, amire a mai Internetben az IP cím hivatott. Az új címezési módszerre az IPN (*InterPlanetary Network*) csoport [8] javaslata a következő hierarchiát ajánlja (

20. ábra).



20. ábra Címezési hierarchia

A késleltetés- és megszakadástűrő (DTN) hálózatok gyakorlati vizsgálata is megkezdődött már. A DTN hálózati architektúra részben világűrbeli első, valós körülmények között végzett tesztjében [9] egy valós üreszközzel és több szimulált csomóponttal történt a technológia vizsgálata. A tesztben tíz állomás alkotta a bolygóközi Internet hálózatot. A valós eszköz egy űrszonda volt, míg a másik kilenc eszközt (leszállóegységeket, bolygó körüli pályán keringő egységeket és felszíni küldetések műveleti központjait) a NASA Jet Propulsion laboratóriumában lévő számítógépek szimulálták. A NASA abban bíz, hogy a DTN-t számos küldetésben fel tudja használni, és egy jövőbeni Mars-expedíció kommunikációs alapjait is ez képezheti majd.

Japán kutatók [10] a Mars majdani új telepeseinek a földi Internethez való kapcsolódását vizsgálták. A Föld–Mars távolság 0,36–2,5 AU között változik (*Astronomical Unit*, csillagászati egység; 1 AU = 8,33 fényperc), emiatt a kommunikáció oda-vissza irányú késleltetése 6–42 perc lehet. Természetesen ez az érték nem elfogadható a Mars jövőbeli lakói számára, ezért a kutatók az Internet 2050-beli becsült adatmennyiségének tükrözését vizsgálták meg, mint lehetséges megoldást. Becslések szerint 1,47 Yottabyte ($1,47 \cdot 10^{24}$ byte) átvitelét kellene megoldania a Földről a Marsra, amit ha egy év alatt szeretnénk megtenni, akkor is 30,1 TBps sebességgel kellene továbbítani az adatokat. Ez az érték 2050-ben is valószínűleg elérhetetlen lesz, ezért csak az „alap” Internet adathalmazát (keresők által is elérhető tartalom) tükröznék a Marsra. A multimédiás tartalmak így nem kerülnének tárolásra a Marson, csupán a szöveges, vagy egyéb karakteres adatbázisok. Az „alap” Internet 2050-ben már egy év alatt, csupán 8 Gbps sebességgel átvihető lehetne. A módszerrel a Marson egy Internet-másolat jönne létre, melyet folyamatosan szinkronban kell tartani a földi Internettel.

A bolygóközi hálózat megteremtése rengeteg feladatot és kihívást szolgáltat a kutatók számára. Valószínűleg számos olyan probléma is felvetődik majd, melynek létezéséről ma még nem is tudunk. Az úton azonban elindultunk, az első lépések megtörténtek a világháló bolygóközi térbe való kiterjesztésére.

Irodalomjegyzék

- [1] T. McIntyre: Space Communication Rates At Multi-Gbps, L-3 Communication Systems – West, October 28, 2011
- [2] W.R. Stevens: *TCP/IP Illustrated*, Volume 1: The Protocols, Addison-Wesley (ISBN 0-201-63346-9), 1994
- [3] V. Cerf et al.: Delay-Tolerant Network Architecture, IETF RFC 4838, informational, April 2007
- [4] J. Postel: Transmission Control Protocol – DARPA Internet Program Protocol Specification, RFC 793, September 1981
- [5] M. A. Padlipsky: A Perspective on the Arpanet Reference Model, RFC 871, September 1982
- [6] IEEE 802.3-2008 IEEE Standard for Information Technology
- [7] H. Holma, A. Toskala: *WCDMA for UMTS*, Wiley (ISBN 978-0-471-72051-5), 2007
- [8] InterPlanetary Internet Special Interest Group, <http://www.ipnsig.org>
- [9] NASA Successfully Tests First Deep Space Internet, *NASA Press Release 08-298*, November 2008 (http://www.nasa.gov/home/hqnews/2008/nov/HQ_08-298_Deep_space_internet.html)
- [10] T. Iida, Y. Arimoto, Y. Suzuki: Earth-Mars communication system for future Mars human community: A story of high speed needs beyond explorations. *IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine*, Vol. 26(2), pp. 19–25, 2011