

Energiahatékony hálózati megoldások

SZILÁGYI LÁSZLÓ

Ericsson Magyarország Kft.
laszlo.szilagyi@ericsson.com

CINKLER TIBOR, CSERNÁTONY ZOLTÁN

BME Távközlési és Médiainformatikai Tanszék
{cinkler, csernatony}@tmit.bme.hu

Kulcsszavak: telekommunikáció, energiafelhasználás, hatékonyság

Napjainkban, a hatékony energiafelhasználás – annak gazdasági és környezetvédelmi aspektusai miatt – egyre nagyobb figyelmet kap mind az ipar, mind az alapkutatás részéről. A kommunikációs hálózatok méretének folyamatos növekedése, nagy erőforrás-túlméretezése és jelentős mértékű heterogenitása miatt az energiafogyasztás égetőbb problémát jelent, mint valaha.

A cikkben bemutatunk néhány fontosabb jelenlegi megoldást az energiahatékonyság növelésére, amelyeket a hálózatok különböző funkcionális egységei szerint külön tárgyaljuk. A felmerült problémák egy része az adott hálózati funkciótól független, így a javasolt megoldások egy része hasonló egymáshoz.

1. Bevezetés

A kommunikációs hálózatok robbanásszerű növekedésével, az energiafogyasztás jelentős gazdasági és környezeti tényezővé vált (üzemeltetési költségek, CO₂ kibocsátás stb.). A teljes CO₂ kibocsátás 2%-ért a telekommunikációs szektor a felelős, ezzel meghaladva a teljes légiközlekedés által generált mennyiséget [4]. Egy nemrégiben megjelent tanulmány [1] kimutatta, hogy az energiafogyasztás növekedése a nagy telekommunikációs rendszerekben Moore törvényének megfelelő tendenciát mutat. Az energiafogyasztás és az ezzel arányos hődisszipáció egyre kritikusabb tényezőjévé válik a kommunikációs hálózatok, szerverek és a hálózati komponensek üzemeltetésének egyaránt. Az energiatakarékos megoldások egyrészt csökkentik a szolgáltatók (operátorok) üzemeltetési költségeit (operational expenditure, OPEX), másrészt pedig a hatékonyabb energiafelhasználás a hődisszipációt is csökkenti, ami nagyobb megbízhatóságot eredményez [2,3].

Annak érdekében, hogy energiát takarítsunk meg napjaink és a jövő telekommunikációs hálózataiban, először is fel kell tárnunk a jelenlegi hálózatok energiafogyasztásának okait. A kevésbé hatékony energiafelhasználás oka lehet architektúrális (szoftver) valamint fizikai (hardver) eredetű. Az energiatakarékos szempontjából a hálózatok legfontosabb architektúrális jellemzője az *alacsony erőforrás-kihasználtság*. Míg a hálózatok nagy része csúcsidepre van méretezve, addig az idő nagy részében kapacitásuk (erősen) kihasználatlan marad a *túlméretezésből (overprovisioning)* fakadóan. A hálózati infrastruktúra kihasználtsága 33% a PSTN hálózatok, 15% az internet maghálózatai, 35% a magánhálózatok, valamint 1% a helyi hálózatok (LAN) esetében [4]. Mindemellett viszont az energiafelhasználás az éppen használaton kívüli (idle állapotú) hálózat esetében is jelentősnek mondható. A hálózati komponensek általános fi-

zikai tulajdonsága, hogy energiafogyasztásuk nem arányos a kihasználtságukkal, emiatt az energiaköltség a kapacitás függvénye, nem pedig az aktuális forgalomé. Ezen okokból kifolyólag az energiapazarlás igen jelentős lehet.

Általánosságban elmondható, hogy napjaink hálózatai meglehetősen statikusan konfiguráltak. (Sok esetben a konfiguráció a napi forgalmas órákra vonatkozó hisztogramok alapján történik.) Emiatt az energiatakarékos (is) biztosító hálózatmenedzsment-rendszereknek képesnek kell lenniük (az aktuális forgalomhoz alkalmazkodva) hálózat átviteli jellemzőinek/paramétereinek dinamikus hangolására. A hálózat éppen használaton kívüli elemeinek kikapcsolásával, az energiatakarékos szempont routoláskor történő figyelembevételével és a sáv szélesség dinamikus adaptálásával, betartva a szolgáltatásminőségi (Quality of Service) követelményeket, hatékonyabb energiafelhasználású hálózatot hozhatunk létre. Az energiafogyasztási szempontokat a hálózati protokollok tervezésekor is figyelembe kell venni. A hálózatok energiatakarékos menedzsmentjét (és üzemeltetését) a hálózat komponenseinek is támogatniuk kell.

A különböző processzorok és memóriák órajelének számítási igénynek megfelelő skálázása, a hálózati interfészek *átviteli sebességének hangolása (rate adaptation)*, valamint energiatakarékos tápegységek, merevlemezek és más hardverelemek alkalmazásai szükségesek ahhoz, hogy végeredményben környezetbarátabb és olcsóbban üzemeltethető eszközök készülhessenek.

Az átviteli sebesség hangolása nagyon fontos az energiatakarékos adatátvitel megvalósításában. A teljesítmény-adatsebesség függvény megadja egy adott adatsebességhez tartozó adóteljesítményt. A bithiba valószínűségét állandó értéken tartva, a legtöbb kódolási eljárás esetén, a szükséges teljesítmény konvex függvénye a sebességnek. A Jensen-féle egyenlőtlenség

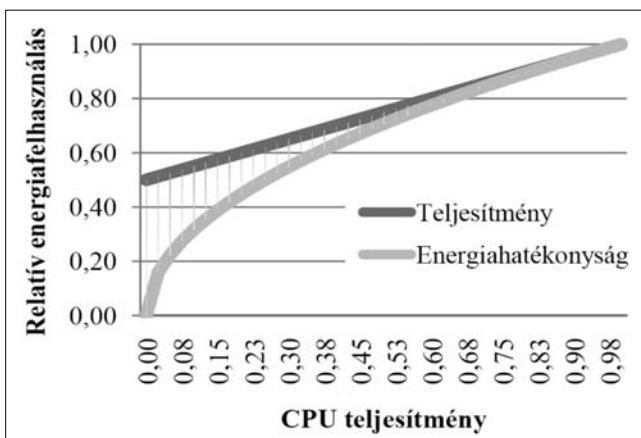
megállapítja, hogy az adatfolyam alacsonyabb sebességen és hosszabb időn keresztül történő továbbítása kisebb energiaköltséggel jár, mint a nagyobb sebességgel történő továbbítás [13].

A teljesítményfelvétel dinamikatartománya az egyik legfontosabb tulajdonsága a hálózat komponenseinek az energiatakarékosság szempontjából. Ez a tartomány a teljesítményfelvételek százalékos különbsége, az eszköz 0% és 100% relatív kihasználtsága mellett. Példaként az 1-2. ábrán egy-egy szerver teljesítmény-kihasználtság karakterisztikája látható, rendre 50%-os és 90%-os dinamikatartomány esetén. A tipikus kihasználtsági tartományt tekintve (10-50%), a második (korszerűbb) rendszerrel 50%-os energiamegtakarítást érhetünk el [17]. A hálózati eszközök beszállítóinak maximális dinamikatartomány elérésére kell törekedniük. Minél nagyobb a dinamikatartomány, annál kisebb a fogyasztás offszetje, azaz annál „inkább arányos” a rendszer a fogyasztás szempontjából (*energy-proportional computing*).

A fentieknek megfelelően, a hálózat komponensei a dinamikatartományuk korlátoltsága miatt teljes kihasználatlanság mellett is túl sok energiát fogyaszthatnak. Ilyen esetekben az átviteli sebesség hangolása mellett az adott komponens kikapcsolásával további energiamegtakarítást érhetünk el. Ennek azonban ára van, ami

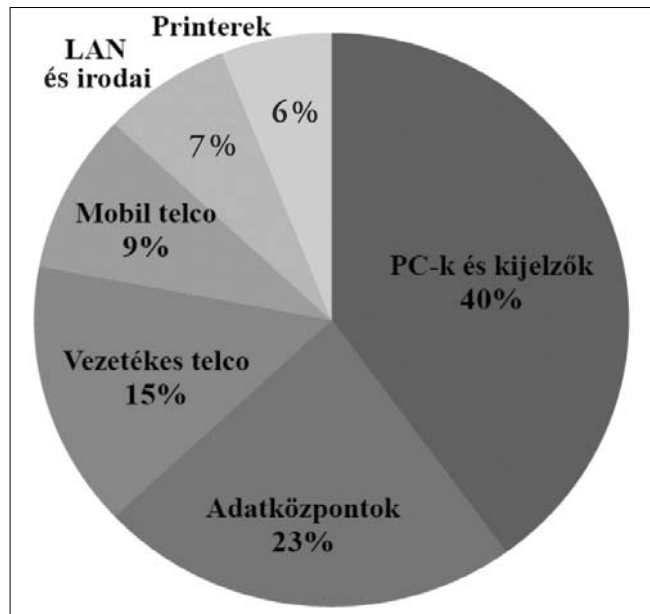
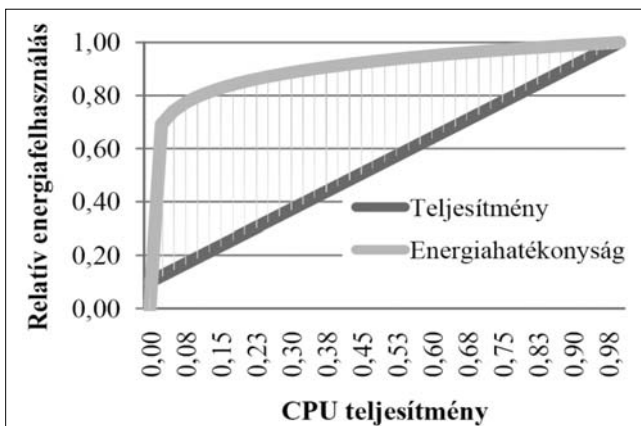
1. ábra

Egy tipikusnak mondható, 50% dinamikatartományú adatközpont relatív energiafelhasználása [17]



2. ábra

Egy 90% dinamikatartományú adatközpont relatív energiafelhasználása [17]



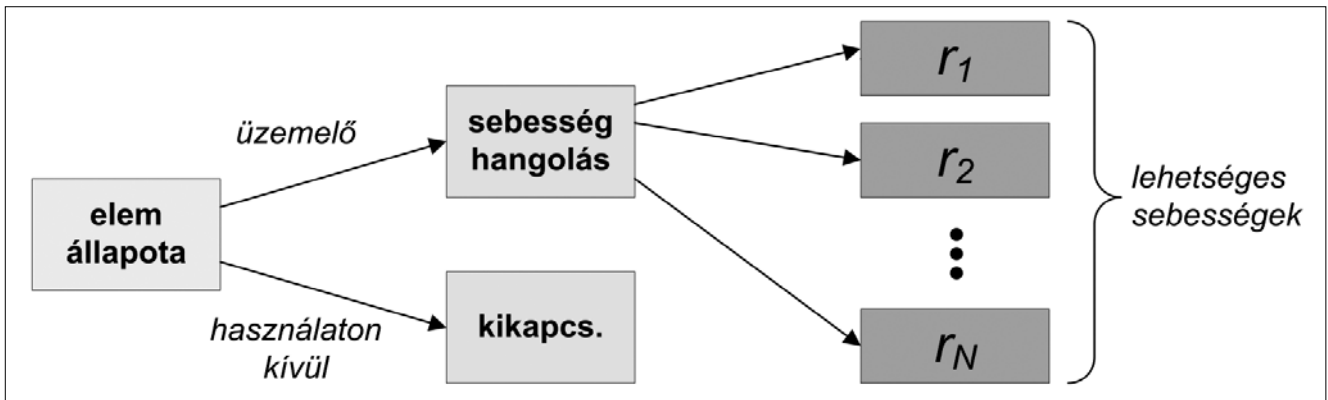
3. ábra

Funkcionális egységek becsült energiafogyasztása [20]

pedig nem más, mint a rendszer *megnövekedett késleltetése*, mivel egyfelől a visszakapcsolt komponenseknek idő kell az üzembeállításig, másfelől pedig a bekapcsoláskor magasabb a teljesítményfelvétel. Ezen okoknál fogva a túl gyakori ki-be kapcsolás nem gazdaságos. Összességében elmondható, hogy az egyik legnagyobb kihívás a megfelelő módszer megtalálása annak eldöntésére, hogy egy hálózat adott komponense mely időintervallumokban legyen kapcsolva, illetve azokon belül milyen sebességgel üzemeljenek. A hálózatüzemeltető rendszereknek/módszereknek (policy) manapság nagy kiterjedésű, nagymértékben heterogén hálózatokat kell kezelniük. A telekommunikációs hálózatok komplexitása miatt a hatékony vezérlés leginkább *automatikus, egymással együttműködő, elosztott rendszerekkel* lehetséges.

Az előbbieket mellett állandó kihívást jelent a hálózati eszközök hatékony hűtése is. Adatközpontok (data center) esetén a felhasznált energia körülbelül 50%-át a *hűtőrendszerek* üzemeltetése teszi ki, így csak a maradék 50% kerül felhasználásra a hűtött berendezések által [16,17]. A hűtőrendszerek hatékonyságának fokozása és alternatív hűtési eljárások alkalmazása nagymértékben mérsékelheti az üzemeltetési költségeket. Az alternatív energiaforrások (például nap- és szélenergia), illetve környezetbarátabb energiaforrások alkalmazásával a nehezebben elérhető hálózati csomópontok energiaellátása is megkönnyíthető.

A 3. ábrán a telekommunikációs ipar részeinek becsült fogyasztása látható. Cikkünk további fejezeteiben a telekommunikációs infrastruktúra funkcionális egységeit egymástól elkülönítve tárgyaljuk. Az energiatakarékosságot a telekommunikációs szolgáltató szemszögéből vizsgáljuk és elsősorban a hálózati infrastruktúrára koncentrálnunk. A személyi számítógépek, nyomtatók, mobiltelefonok és egyéb végfelhasználói berendezések energiafogyasztását nem tárgyaljuk.



4. ábra Ki-/bekapcsolást és sebességváltoztatást együttesen alkalmazó rendszer elem reprezentációja döntési fával

2. Maghálózatok

A telekommunikációs hálózatok adatátvitelének gerincét a maghálózatok jelentik. Mivel kihasználtságuk a nap folyamán változik, ezért méretezésük (tervezés) a csúcspontokra történik, emiatt azonban az idő nagy részében kihasználtságuk alacsony. Ennek következtében általában adódik lehetőség az energiahatékonyság növelésére.

Az alacsony erőforrás-kihasználás úgy is értelmezhető, hogy a QoS követelmények kielégítéséhez, a hálózati összeköttetéseknek vagy építőelemeknek nem szükséges minden pillanatban teljes sebességen üzemelniük. Ennek megfelelően *állítható sebességű* routerek, switchek és összeköttetések alkalmazásával energia takarítható meg [1,14,15]. Az esetben, amikor egy nagyobb teljesítményű hálózati összeköttetést több kisebb teljesítményű együttesen alkot, az átvitel sebesség (szükséges kapacitás) állítása a kisteljesítményű *vonalak ki-be kapcsolásával* is lehetséges (width control) [18]. A maghálózatok fontos tulajdonsága, hogy két csomópont között több út is lehetséges. Ez lehetővé teszi, hogy kis forgalmú időszakokban egyes összeköttetéseket, csomópontokat kikapcsoljunk, amivel végső soron jelentős energiát takaríthatunk meg. (Ennek viszont a kisebb rendelkezésreállás, azaz megbízhatóság az ára). A komponensek ki-/bekapcsolását és sebességük hangolását együttesen is alkalmazhatjuk [14].

A 4. ábrán egy rendszer elem ehhez hasonló vezérlését egyszerűsített módon, döntési fával illusztráltunk: a komponens bekapcsolt állapotában N számú különböző sebességen (r_1, r_2, \dots, r_N) üzemelhet.

Egy hagyományos módszer a hálózat dinamikus konfigurálását *napi forgalmi statisztikák* alapján végzi [1]. A nap egy óra hosszú konfigurálási periódusokra van osztva és a teljes rendszer, a minőségi követelmények és a minimális energiafogyasztás egy lineáris programozási feladatként vannak megfogalmazva. Megoldásként egy olyan napi működési profilt kaphatunk meg, amellyel – a minőségi követelmények teljesülése mellett – a felvett energia minimális. A hálózat aktuális állapotához való alkalmazkodás visszacsatolással pontosítható [22]: minél gyorsabb a visszacsatolás, a vezérlés annál hatékonyabb lehet.

3. Hozzáférési hálózatok

A telekommunikáció szegmensei közül a hozzáférési hálózatok tartalmaznak (fizikai) komponenseket a legnagyobb számban, ezért az átlagos alkotóelemenkénti fogyasztási értékek ezekben nagy számokkal szorzódnak. Következésképpen a hozzáférési hálózatok területe különös jelentőséggel bír, ugyanis nagyon jelentős energiamegtakarítás érhető el [11].

Napjainkban még mindig különféle *réz alapú technológiákat* alkalmaznak a legelterjedtebben vezetékesséves összeköttetések esetén. A sáv szélesség-igények folyamatos növekedése miatt ezen rendszerek energiafogyasztása egyre magasabb. Habár új technológiák (pl. VDSL2) segítségével magasabb átviteli sebesség érhető el, ezek jelentősen megnövelik az energiafelhasználást [21].

Jelenlegi tudásunk szerint a magas sáv szélesség igények, ésszerű energiafogyasztás mellett, különféle *optikai összeköttetések* (FTTx – Fiber To The x) alkalmazásával elégíthetőek ki. Azonban, mivel az optikai technológia bevezetése bizonyos beruházási költségekkel (CAPEX – Capital Expenditure) jár együtt, a technológiák közötti átállás folytonosan zajlik. Bizonyos energiahatékony módszerek, például *dinamikus spektrummenedzsment* (Dynamic Spectrum Management) [5], alkalmazásával azonban egy kevés idő nyerhető az optikai alapú technológiákra történő szükséges áttérés folyamatában.

A különféle rádiós összeköttetési technológiákat (2G, 3G stb.) alkalmazó mobil hálózatüzemeltetőknek nagy területeken, sok előfizetőt kell kiszolgálniuk [1]. Mivel emiatt sok bázisállomást szükséges üzemeltetni, a fogyasztás nagy mennyiségű energiát igényel. A mobil szélessávú alkalmazások gyors terjedése miatt az energiahatékonyság rádiós összeköttetési megoldások esetén is egyre fontosabb szerephez jut a jövőben. Ahogyan az 5. ábrán láthatjuk, a bázisállomások hozzájárulása a legjelentősebb az össz-energiafogyasztáshoz [23]. Emiatt a fejezet hátralévő részeiben a bázisállomásokra koncentrálnunk.

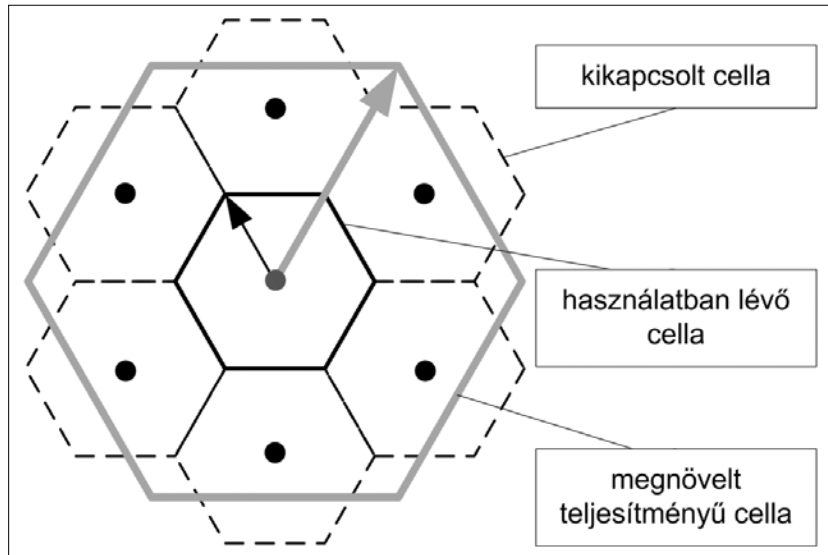
A rádiós hozzáférési hálózatok erőforrásait a *maximális forgalmi szint alapján* méretezik (túlméretezés), aminek következtében az ebből adódó alacsony kihasz-

náltság miatt sok energia vész kárba. A cellás rendszer bizonyos részein a forgalom szintje alapvetően két ok következtében csökkenhet: 1) a napon belüli tipikus ingadozás, illetve 2) az előfizetők cellák közötti mozgása miatt. Ezek miatt, a vonatkozó területeken, nagyobb erőforrás biztosítása szükséges a csúcsforgalmi időszakokban. Bizonyos időszakokban, bizonyos helyeken viszont számottevően csökken az erőforrásigény (például nappal a lakóövezetekben és éjszaka az üzleti negyedekben) [11].

További jelentős energia takarítható meg bizonyos alacsony kihasználtságú cellák kikapcsolásával. Ebben az esetben a kikapcsolt cella területén a rádiós lefedettsége a bekapcsolva maradt (szomszédos) cellák kismértékű teljesítménynövelésével biztosítható. Ezen módszer arra feltételezésre épít, miszerint a hálózatok a jellemző forgalmi igények alapján kerülnek méretezésre (ez nagyvárosi környezet esetén helytálló) így sok kis cella van jelen [11]. Tipikus cellás rendszerek esetén 25-30% mértékben csökkenthető az energiafelhasználás a cellák alacsony forgalmú időszakokban történő dinamikus kikapcsolásával [11,12]. A 6. ábrán szemléltetjük magát a módszert.

Az átviteli sebesség hangolása (rate adaptation) vezeték nélküli összeköttetések esetén is alkalmazható eljárás, a korszerű eszközök pedig támogatják is ezt a funkciót. Maga az adaptálás megvalósítható a teljesítményszint, szimbólumsebesség, kódolás és modulációs konstelláció változtatásával, valamint mindezen módszerek megfelelő együttes használatával.

A QoS követelmények kielégítése céljából a meglévő rendszerek dinamikusan tudják változtatni a teljesítmény/kódolási sémát a zaj szintjétől függően. Amennyiben nem szükséges nagy sávszélességet biztosítani, az esetben hosszabb ideig tartó, alacsonyabb teljesítményű átvitel is használható bizonyos alkalmazások esetén [13].

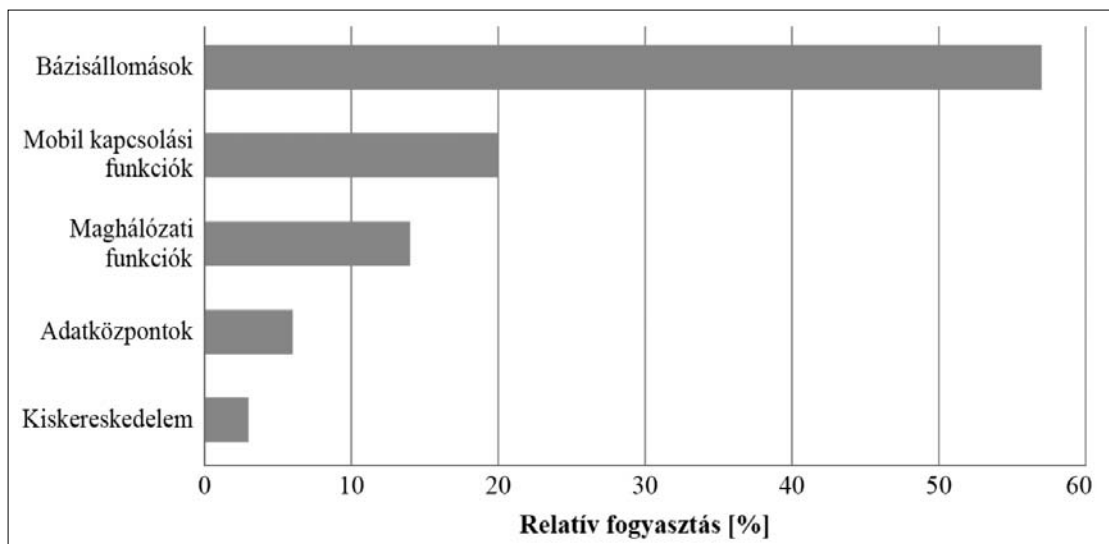


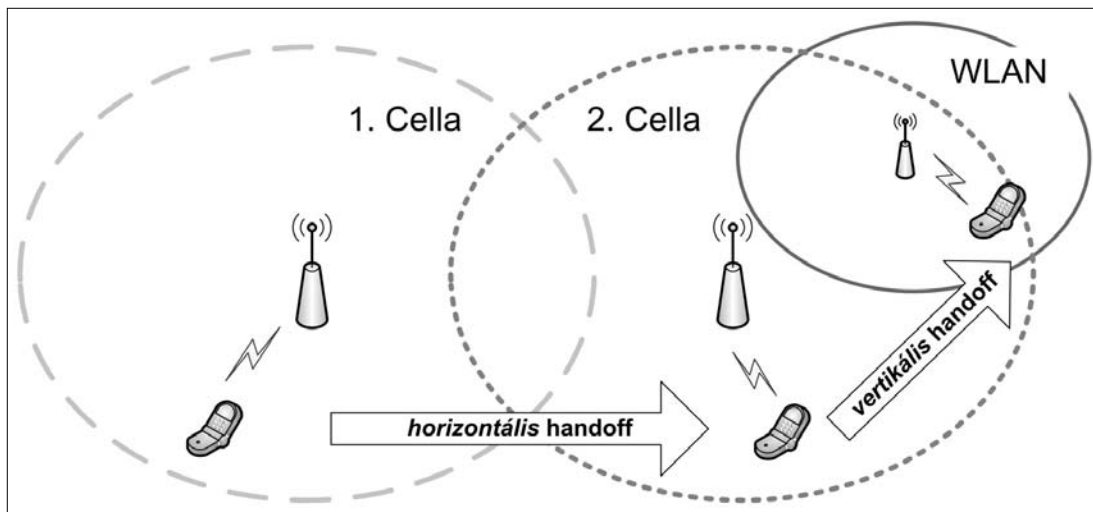
6. ábra
Dinamikus cellakikapcsolás mobil rendszerek esetén

A mobil felhasználó hozzáférési pont változtatására *handoff* (átadás) néven hivatkozunk. Kétféle *handoff*-ot különböztetünk meg: horizontális és vertikális. Sok esetben egy adott alkalmazás esetén többféle technológiájú hozzáférés is elérhető. Ilyen esetekben az alkalmazandó technológia kiválasztása történhet energiahatékonyasági szempontok figyelembevételével is. *Vertikális handoff* esetén két különböző hozzáférési technológia között történik váltás (pl. WLAN és cellás rendszer között) a legjobb minőségű csatlakozás biztosítása végett.

Ezzel szemben a *horizontális handoff* esetén ugyanazon „technológián belül” maradván, egy másik (pl. jobb jelminőségű) hozzáférési ponthoz történik a csatlakozás. Eredetileg a *handoff* mechanizmusok sok különböző tényezőt (QoS, Cost of Service stb.) igyekeztek figyelembe venni [6]. Nemrégiben közzétett tanulmányok olyan mód értéket környezetbarát hálózati működést, hogy az energiafogyasztást a *handoff* célfüggvényében vették figyelembe [7-10].

5. ábra
Energiafogyasztás megoszlása cellás rendszerekben [23]





7. ábra
Cellás rendszerek
és WLAN közötti
vertikális és
horizontális
handoff
illusztrálása

A 7. ábra egy két bázisállomás cellából és egy WLAN cellából álló rendszer esetén illusztrálja a horizontális és vertikális handoff-ot.

Már léteznek alternatív energiaforrásokat használó bázisállomások is [24]. Amellett, hogy ezen energiaforrások alkalmazása környezetbarátabb megoldást jelentenek, fontos látni, hogy ezáltal egyúttal függetleníteni is lehet a bázisállomásokat a villamos hálózatoktól.

4. Adatközpontok

A hálózati tartalomszolgáltatások nagy része adatközpontokból történik. Az adatintenzív szolgáltatások (cloud computing, videómegosztás, online közösségi hálók) utáni igény robbanásszerű növekedése miatt a nagy adatközpontok alkalmazása egyre jelentősebb. Manapság több ezer szervert tartalmazó hálózattá nőtték ki magukat (fogyasztási adatokat lásd a 3. ábrán). Ezen rendszerek a szükséges robusztusság, teljesítmény és megbízhatóság elérése érdekében speciális tervezési és vezérlési megközelítést igényelnek.

A 8. ábrán egy tipikus rendszer szerverei átlagos CPU kihasználtságának időbeli eloszlása látható [17]. Látható, hogy az idő nagy részében erős *kihasználatlanság* jellemző. Az 1. ábrán látható módon, egy szerver fogyasztása alacsony kihasználtság mellett is jelentős. A probléma a már említett teljesítmény dinamikaritásával van. A processzorok órajele manapság dinamikusan hangolhatóak, jóllehet ma már nem azok számítanak a legtöbbet fogyasztó komponenseknek. A merevlemez és a memóriamodulok is sokkal nehezebben menedzselhetőek energiatakarékossági szempontból.

Nagy kiterjedésű rendszerek egy-egy szerverének kikapcsolása nem megoldható, mivel általában az alkalmazások és adatok több szerver között osztoznak el. Egy-egy komponens kikapcsolása túl költséges, például egy merevlemez így megjelenő késleltetése nagyságrendileg ezerszeresére nő, a felpörgési energiafogyasztás miatt pedig az adott lemez csak több perces leállítás esetén kifizetődő, ami nagy rendszereknél igen ritkán fordul elő. A szerverek szintjén az energiatakaré-

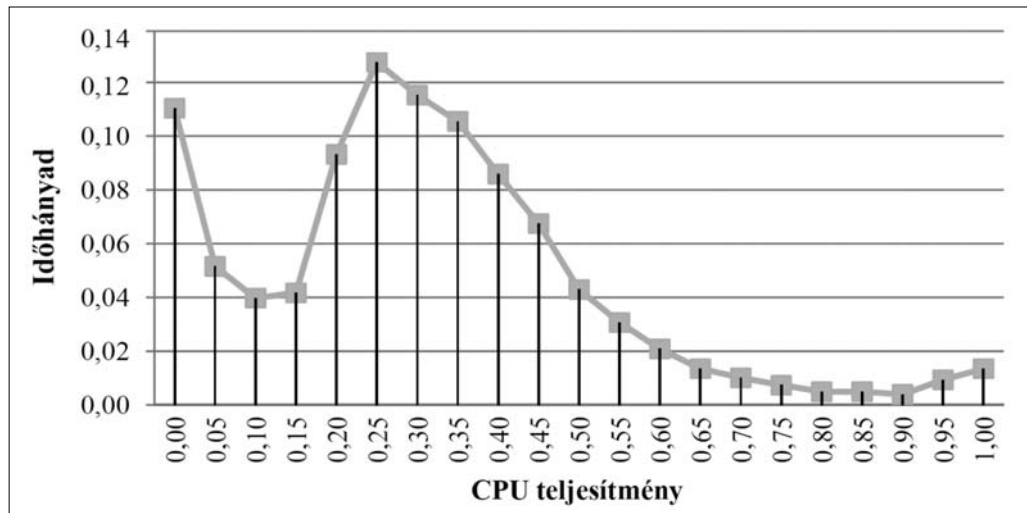
kosság a *kihasználtság növelésével*, valamint nagyobb teljesítmény dinamikaritományú berendezések alkalmazásával növelhető. A fentiek szerint, a 2. ábra karakterisztikájával rendelkező szerver átlagosan fele annyi energiát igényelne a működéshez, mint amely az 1. ábrán látható (manapság jellemző karakterisztikájú) eszköz.

Egy adatközpontban a szerverek mellett a *szerverek közötti összeköttetés* biztosítása is jelentős fogyasztást eredményez. Manapság jellemzően az Ethernetet használnak szerverek közötti összeköttetés létesítésére. Ahogy az összeköttetések sebessége nő, úgy válik energiafogyasztásuk is egyre jelentősebbé. Míg egy 1 Gb/s-os sebességű Ethernet összeköttetés csak kb. 1-2 W energiát fogyaszt, addig egy 10 Gb/s-os link már könnyedén átlépi a 10 W-os fogyasztást is.

A következő években az összeköttetések várhatóan átlépi a 40 vagy akár a 100 Gb/s-ot, emiatt a hálózati összeköttetések és switchek fogyasztásának kordában tartása alapvető fontossággal bír. Ugyanakkor azonban a helyzetet tovább rontja, hogy a vonalak – már amúgy is alacsony – kihasználtsága tovább csökken. A link *energiafogyasztása* a forgalom intenzitásától szinte *független*, emiatt a linkek energiagazdálkodás nélkül fogyasztásuk nagy részét üresjáratra szánják [18]. A már említett sebességszabályozással, alacsony energiaállapotokkal és linkszélesség-szabályozással az energiatakarékosság jelentősen fokozható. Ezen problémát a minőségi követelmények (QoS) figyelembevételével együtt megoldó algoritmusok már közlésre kerültek [18].

Az adatközpont energiafogyasztását a rendszer architektúrája is befolyásolja. A különböző architektúrák alkalmazása azt jelenti, hogy azonos számú szerverek esetén különböző számú linkekre és switchekre van szükség, különböző módon összekötve a szervereket. Az alkalmazott link- és switch-konfigurációk meghatározzák mind az áteresztőképességet, mind pedig magát az energiafogyasztást. Komplexebb struktúrák nagyobb áteresztőképességet, kisebb késleltetést és nagyobb hozzáférési sebességet biztosíthatnak, mindezt viszont nagyobb teljesítményfelvétellel. Egy adatközpont tervezőjének *kompromisszumot kell kötnie áteresztőképesség és teljesítményfelvétel között* [19].

8. ábra
CPU-teljesítményeloszlás
tipikus nagykiterjedésű
rendszer esetén [17]



A tervezést nehezíti, hogy a manapság legnépszerűbb architektúrák (Bcube, Dcell, Fat-tree, Balanced tree) a skálázhatóság szempontjából meglehetősen merevek, megnehezítve ezzel az egy adott követelményrendszerhez történő illesztést. Ezen oknál fogva sok rendszer szükségtelenül túlméretezett, emiatt pedig energiapazarló. A jövő architektúráinak finomabb skálázhatóságot kell biztosítaniuk, például több *aszimetriát* hordozva, ezzel könnyítve meg a tervezést és a hatékony üzemeltetést.

5. Összefoglalás

Cikkünkben a telekommunikációs hálózatok különböző funkcionális részeiben alkalmazott vezérlési és menedzsment-módszereket mutattunk be, amelyek alkalmazása révén jelentősen javítható a hálózatok energiahatékonyasága. Jelenlegi ismereteink alapján megállapítható, hogy a napjainkban jellemző nagy heterogenitású hálózatokban az egyik legnagyobb kihívást a különböző energiafelhasználású és technológiájú hálózati komponensek hatékony vezérlése és együttműködésének biztosítása jelenti. A bonyolultság és heterogenitás miatt égető fontosságú, hogy a központosított és elosztott vezérlés közti paradigmaváltás a gyakorlatban is mielőbb megvalósuljon. A jövő hálózati eszközeinek és architektúráinak tervezésekor a magasabb energiahatékonyság elérése érdekében szükséges lesz figyelembe venni a hálózati technológiák közti szorosabb menedzsment együttműködés technológia- és eszközszintű biztosítását.

A szerzőkről



SZILÁGYI LÁSZLÓ 2009-ben szerzett okleveles villamosmérnöki diplomát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME). Jelenleg szoftverfejlesztő az Ericsson Magyarország Kft.-nél. 2010-ben PhD ösztöndíjat nyert a BME Informatikai Doktori Iskolájába, ahol a Távközlési és Médiainformaticai Tanszékén 2010 szeptemberétől kezdve végzi kutatásait energiahatékony hálózati megoldások területén.



CINKLER TIBOR Villamosmérnöki oklevelét 1994-ben, majd PhD fokozatát 1999-ben szerezte a BME Távközlési és Médiainformaticai Tanszékén, ahol jelenleg egyetemi docens beosztásban dolgozik kutató, oktató és témavezetőként. Tudományos érdeklődése az útvonalválasztás, forgalomterelés, védelem, többesadás, hálózattervezés, méretezés és konfigurálás optimalizálására irányul elsősorban az alábbi hálózati technikák kapcsán: IP, Ethernet, MPLS, ngSDH, OTN és főként a heterogén GMPLS-vezérelt WDM-alapú többretegű hálózatok. Számos európai és magyar projektben vett részt vagy vezetete a BME részvételét és több nemzetközi konferencia tudományos és programbizottságának tagja, a budapesti Networks 2008 konferenciák egyik fő szervezője. Több mint 180 bírált publikáció társszerzője vagy szerzője. Több meghívott előadás, oktatás (tutorial) előadója. Négy szabadalom szerzője. Hat éven át a HTE Távközlési Szakosztályának elnöke, majd három évig a HTE Tudományos és Oktatási Bizottság elnöke és a Választmányának tagja volt.



CSERNÁTONY ZOLTÁN 2010-ben szerzett okleveles villamosmérnök diplomát (kiváló minősítéssel) a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME). Végzését követően PhD ösztöndíjat nyert a BME Informatikai Doktori Iskolájába, ahol a Távközlési és Médiainformaticai Tanszékén 2010 szeptemberétől kezdve végzi kutatásait többtörténelmi hálózatok skálázhatósági, útvonalválasztás-hatékonyasági és gazdasági vonatkozásainak témájában.

Irodalom

- [1] R. Bolla et al.: "Energy-Aware Performance Optimization for Next-Generation Green Network Equipment", ACM SIGCOMM Workshop on 'Programmable routers for extensible services of tomorrow', pp.49–54., 2009.
- [2] A. Qureshi, R. Weber, H. Balakrishnan, J. Guttag, B. Maggs: "Cutting the Electric Bill for Internet-Scale Systems", In: Proc. of the ACM SIGCOMM, Conference on Data communication, 2009.
- [3] A.M. Odlyzko: "Data networks are lightly utilized, and will stay that way", Review of Network Economics, 2 (No.3), pp. 210–237., September 2003.

- [4] Bruce Nordman:
“Energy Use and Savings in Communications”,
Keynote at the IEEE International Conference
on Communications (ICC), 2009.
- [5] J.M. Cioffi, H. Zou, A. Chowdhery, W. Lee,
S. Jagannathan:
“Greener Copper with
Dynamic Spectrum Management”,
GLOBECOMM, 2008.
- [6] A. Hasswa, N. Nasser, H. Hassanein:
“Generic Vertical Handoff Decision Function for
Heterogeneous Wireless Networks”,
IFIP Conf. on Wireless and Optical Communications,
pp.239–243., March 2005.
- [7] Y. Choi, S. Choi:
“Service Charge and Energy-Aware Vertical Handoff
in Integrated IEEE 802.16e/802.11 Networks”,
IEEE INFOCOM, 2007.
- [8] W.-H. Yang, Y.-C. Wang, Y.-C. Tseng, B.-S.P. Lin:
“An Energy-Efficient Handover Scheme with
Geographic Mobility Awareness
in WiMAX-WiFi Integrated Networks”,
WCNC, 2009.
- [9] S. Seo, J. Song:
“Energy-Efficient Vertical Handover Mechanism”,
IEICE Transactions on Communications,
Vol. E92-B, No.9, pp.2964–2966., September 2009.
- [10] H. Petander:
“Energy-aware network selection using
traffic estimation”,
In: Proc. of the 1st ACM Workshop on Mobile Internet
through Cellular Networks,
New York, NY, September 2009.
- [11] M.A. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo, M. Meo:
“Optimal Energy Savings
in Cellular Access Networks”,
IEEE International Conference on Communications
(ICC), Workshop on Green Communications, 2009.
- [12] M.A. Marsan, M. Meo:
“Energy Efficient Management of
two Cellular Access Networks”,
ACM SIGMETRICS Perf. Evaluation Review archive,
Vol. 37, Issue 4, March 2010.
- [13] M. A. Zafer, E. Modiano:
“A calculus approach to energy-efficient data
transmission with quality-of-service constraints”,
IEEE/ACM Transactions on Networking,
Vol. 17, Issue 3, pp.898–911., June 2009.
- [14] S. Nedeveschi, L. Popa, G. Iannaccone, S. Ratnasamy,
D. Wetherall:
“Reducing Network Energy Consumption
via Sleeping and Rate-Adaptation”,
In: Proc. of the 5th USENIX Symposium on Networked
Systems Design and Implementation, 2008.
- [15] R. Bolla, R. Bruschi, F. Davoli, A. Ranieri:
“Performance Constrained Power Consumption
Optimization in Distributed Network Equipment”,
In: Proc. of the 1st Int. Workshop on Green Com.,
IEEE Int. Conf. on Communications (ICC), 2009.
- [16] X. Fan, W.D. Weber, L.A. Barroso:
“Power Provisioning for a Warehouse-Sized Computer”,
In: Proc. of the ACM International Symposium on
Computer Architecture,
San Diego, CA, June 2007.
- [17] L.A. Barroso, U. Hölzle:
“The Case for Energy-Proportional Computing”,
IEEE Computer, 2007.
- [18] K. Kant:
“Power Control of High Speed Network Interconnects
in Data Centers”,
In: Proc. of the 28th IEEE International Conference
on Communications (ICC) Workshop, 2009.
- [19] L. Gyarmati, T.A. Trinh:
“How Can Architecture Help to Reduce Energy
Consumption in Data Center Networking?”,
In: Proc. of the ACM SIGCOMM, 2010.
- [20] R. Kumar, L. Mieritz:
“Conceptualizing ‘Green IT’ and data centre power
and cooling issues”,
Gartner Research Paper No. G00150322, (2007)
- [21] C. Bianco, F. Cucchietti, G. Griffa:
“Energy consumption trends in the Next Generation
Access Network – a Telco perspective”,
In: Proc. of the 29th International Telecommunications
Energy Conference (INTELEC 2007),
Rome, Italy, pp.737–742., September 2007.
- [22] A. Moursy, I. Ajbar, D. Perkins, M. Bayoumi:
“Empirical Model-based Adaptive Control of MANETs”,
IEEE INFOCOM Proceedings, Workshop on
Automated Network Management,
Phoenix, AZ, April 2008.
- [23] D. Zuckerman:
“Green Communications – Management Included”,
Keynote at the IEEE International Conference
on Communications (ICC), 2009.
- [24] U. Barth, P. Wong, D. Bourse:
“Key Challenges for Green Networking”,
Ercim News 79, p.13., October 2009.