

Eredmények a többutas hálózati kommunikációs technológiák területén

Fejes Ferenc, Katona Róbert, Püsök Levente

Abstract—A többutas hálózati technológiák az elmúlt néhány évben nagyon aktív kutatási területté váltak. A jelenlegi hálózati technológiák nem minden esetben képesek kielégíteni a gyorsan növekvő igényeket. Az Internet alapvető működése örökölte azt a filozófiát, ami a több mint 30 éve, a hálózati és szállítási protokollok tervezése idején reális volt: a hálózati csomópontok egyetlen interfészt használva, egyetlen útvonalon kommunikálnak egymással. A mai környezetben ez már nem feltétlenül így van, rengeteg eszköz több hálózati interfésszel rendelkezik, több kijárata van az Internetre, ezzel megteremtve a lehetőséget, hogy akár egy kommunikációs viszonyon belül több útvonalon keresztül történjen meg az információcsere. Ebben a cikkben röviden áttekintjük napjaink legfontosabb adatkapcsolati és transzport rétegben működő többutas kommunikációt támogató megoldásait. Továbbá bemutatjuk a Debreceni Egyetem Informatikai Karán kifejlesztett MPT-GRE - Multipath Communication Library-t, ami egy hálózati rétegben működő többutas kommunikációt támogató eszköz. Korábbi publikációk eredményei azt mutatják, hogy az MPT alkalmas különböző hálózati interfészekben megvalósított kommunikációs útvonalak kapacitásának hatékony aggregációjára. A szoftver emellett alkalmas a több út redundáns módú használatára is. Ebben a cikkben az MPT ezen funkcionalitását vizsgáljuk: egy notebook Wi-Fi és 3G mobilinternet kapcsolatai között váltunk videóstream átvitel közben. Az eredmények azt mutatják, hogy a Wi-Fi interfész tervezett lekapcsolása esetén a videóstream továbbítás csomagvesztés mentesen kerül át a 3G interfészen felépített útvonalra, biztosítva ezzel folyamatos és akadásmentes kép és hang lejátszást a kliens oldalon.

Keywords—*multipath communication, IEEE 1905, MPTCP, GRE in UDP tunnel, vertical handover.*

I. BEVEZETŐ

Évről évre növekszik a végfelhasználók által generált internetes adatforgalom. A növekedés hátterében nagyrészt a gyors hálózati kapcsolattal (LTE) felszerelt mobiltelefonok állnak. Az LTE előfizetések száma 2013-ról 2014-re több mint duplájára nőtt, a mobil adatforgalom ugyan ezen időszakban a havi átlagos 1.5 exabyte-ról 2.5-re emelkedett és egyes előrejelzések szerint 2019-re ez a szám tovább növekszik majd egészen 24.3 exabyte-ra [1]. Az otthonokban is előállt egy olyan heterogén hálózati környezet, amelyet alkotó technológiák nem lettek felkészítve az új felhasználói igényekre (például az Ultra HD felbontású 3D-s videólejátszás, lakáson belüli tartalom streamelés, stb.). Ahhoz, hogy a megnövekedett igények hatékonyan kiszolgálhatók legyenek, az infrastruktúra fejlesztése mellett a már meglévőnek a hatékonyabb kihasználása is egyre fontosabbá válik. A hálózatokban jelenleg

is meglévő, de ki nem használt potenciál kiaknázását is célul tűzik ki az ún. többutas (multipath) hálózati megoldások. A végpontokon megjelenő több hálózati interfész integrációja koncepcionális lehetőséget nyit ezek együttes, párhuzamos használatára. A mobiltelefonok nagy része beépítve tartalmazza a 3G, LTE modemet és Wi-Fi kapcsolatra is alkalmas; ugyanez igaz egyes táblagépekre is. A notebookok hosszú ideje rendelkeznek Wi-Fi és RJ-45-ös vezetékes Ethernet kapcsolódási lehetőséggel, illetve USB 3G/LTE modem segítségével is kapcsolódhatnak a kommunikációs világhoz. Ezek a technológiák lehetővé teszik, hogy az internetre egyszerre több kijáratú ponton is csatlakozhassunk és egy távoli végpont több útvonalon is elérhető legyen. Az ilyen hálózati környezet több előnnyel is bír: felhasználható arra, hogy egy esetleges útvonal sérülés esetén egy másik útvonalon gyorsan tudjuk folytatni a kommunikációt, vagy több útvonalat szimultán használva azok sebességét aggregálni tudjuk, gyorsabb átviteli sebességet elérve, mint az egyes, különálló utak esetén. Az alkalmazási megoldás függ attól, hogy melyik OSI rétegben értelmezzük ezt a funkcionalitást. Adatkapcsolati rétegben a több út fogalma az otthonokban napjainkra előállt heterogén hálózati környezethez oly módon köthető, hogy az eszközök tipikusan több médiumon is képesek adatátvitelt megvalósítani. Ezt próbálja egységesíteni az IEEE 1905.1a szabvány [2], ami a hálózati réteg (layer 3) számára transzparens absztrakciós réteget definiál a heterogén adatkapcsolati alrétegek fölé. A megoldási mechanizmus vázát röviden áttekintjük a II. fejezetben. Transzport rétegben működő megoldás az MPTCP [3], amely képes a több útvonal hálózati kapacitásának az összegzésére és a közöttük történő gyors váltásra, úgy, hogy több TCP alfolyamot (TCP subflow) is felépít és ezek között hatékonyan osztja szét a továbbítandó adatcsomagokat (ld. III. fejezet). Koncepcionálisan hasonló célra, de a hálózati rétegben nyújt megoldást a Debreceni Egyetem Informatikai Karán kifejlesztett MPT-GRE - Multipath Communication Library (továbbiakban MPT) [4]. Ez a megoldás tetszőleges, akár heterogén verziójú (IPv4, IPv6) hálózati útvonalak fölött valósít meg GRE in UDP tunneling [5] eljárással adatátvitelt. A IV. fejezetben bemutatjuk ennek a technológiának a működési vázát és a többutas kommunikációs méréseink eredményeit. A munka folytatásának további lépéseire az V. fejezetben tekintünk előre.

II. IEEE 1905 ABSZTRAKCIÓS RÉTEG

A manapság kapható olcsó vezeték nélküli router-ek tipikusan fel vannak szerelve vezetékes Ethernet switch-el, így egy ilyen eszközt beüzemelve már két médium is rendelkezésre áll adattovábbításra, két különböző adatkapcsolati protokollt

Fejes F., Katona R. és Püsök L. a Debreceni Egyetem Informatikai Karának hallgatói,

e-mail: fejes@opmbx.org, robert.k@opmbx.org, pusok.levente@opmbx.org

Érkezett: 2015. 09. 16.

használva (vezeték nélküli IEEE 802.11 illetve a vezetékes IEEE 802.3 Ethernet valamelyik verziója). További lehetőség egy HomePlug [6] kompatibilis (IEEE 1901 Broadband Powerline Standard szabványt [7] támogató) eszköz beszerzése, ezzel már a ház villanyáram hálózatát is használhatjuk adattovábbításra. A powerline kommunikációs szabványt támogató eszközök alkalmazásával a csavart érpár hálózat kiépítési költségei megspórolhatók. Léteznek olyan AP-k (Access Point) is, amelyek a vezetékes Ethernethez nem csak egyszerű vezeték nélküli hozzáférést biztosítanak, hanem a lakás villamos hálózatán keresztül is megosztják azt, így a teljes lakás vezeték nélküli lefedettséghez elég még néhány további ilyen, villamos hálózatba csatlakoztatott AP és ezek közül elegendő egyikbe becsatlakoztatni a vezetékes Ethernetet. Elterjedt még a háztartásokban a koaxiális kábelezés a kábeltelevízió szolgáltatásoknak köszönhetően, valamint a televízió antennák elterjedt csatlakoztató médiumaként. Ennek a fizikai közegnek a hatékony kihasználására hozta létre a Multimedia over Coax Alliance (MoCA) [8] saját szabványát, ami verziótól függően eltérő (MoCA 1.1-nél 175 Mbps, MoCA 2.0-nál már 400 vagy 800 Mbps), de gyors és megbízható (MoCA 2.0 szabvány 100 millió adatsomagonként egyetlen hiba [9]). A szabvány célja a hatékony nagy felbontású otthoni média átvitel, legyen az TV adás, fényképek, videók, zenék átvitele mindezt nagyon alacsony késleltetéssel, hogy alkalmas legyen játékok nappaliba streamelésére is. A felsorolt technológiák jelen vannak a lakásokban, egy erősen heterogén hálózati környezetet alkotva. Ahhoz, hogy a médiumok kapacitásait kihasználjuk, rendelkezniünk kell a hozzájuk szükséges hardveres és szoftveres interfészekkel, ami sok esetben nem megvalósítható, például egy notebook vagy mobiltelefon hálózati interfészei utólagosan nem bővíthetők. A végfelhasználók számára további nehézségeket okoz, hogy minden technológia eltérő konfigurálási módszerrel rendelkezik. További probléma az is, hogy bár a technológiák együttes lakásbeli lefedettsége nagyon magas, külön-külön viszont egyik sem biztosít gyors és állandó minőségű hálózati elérést.

A probléma megoldására jött létre az IEEE 1905 munkacsoport [10], akik célul tűzték ki egy olyan szabványos megoldás létrehozását, amely kompatibilis a fentebb felsorolt technológiák mindegyikével és képes elfedni a felsőbb (layer 3) rétegek számára a köztük lévő különbségeket. A szab-

Hálózati			
IEEE 1905 Absztrakciós réteg			
MAC (IEEE 802.3)	MAC (IEEE 802.11)	MAC (IEEE 1901)	MAC (MoCA)
Fizikai (IEEE 802.3)	Fizikai (IEEE 802.11)	Fizikai (IEEE 1901)	Fizikai (MoCA)

Fig. 1: IEEE 1905 réteg architektúra

vány létrejött, aktuális verziója az IEEE 1905.1a-2014 [2] és több multipath megoldás jellemzőjét magában hordozza. Architektúrálisan az 1905.1 absztrakciós réteg (AL) a különböző fizikai és adatkapcsolati rétegek fölött foglal helyet és az LLC (Logical Link Control) számára egységes MAC-ként

(Medium Access Control) van jelen, elrejtve az alatta lévő heterogén hálózatot. Egyetlen EUI-48 MAC címet használ, az erre érkező és erről elküldött kereteket az AL-ben helyet foglaló továbbításért felelős entitás (forwarding entity) képezi le az alárendelt interfészekre. A protokoll képes felderíteni

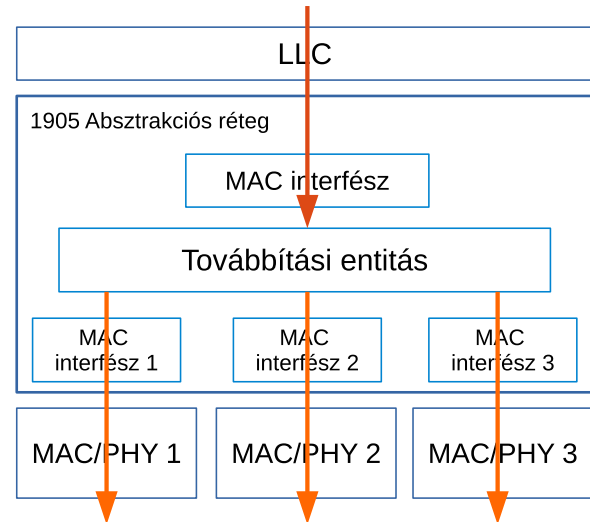


Fig. 2: IEEE 1905 kerettovábbítás vázlatos működése

a hálózati topológiát, a linkeken sebesség méréseket hajt végre, így találja meg a hálózat szűk keresztmetszeit és esetleges hibás konfigurációkat. A felderített hálózaton egy egészet lefedő ütközési tartományt hoz létre, az így kombinált hálózat jobban lefedi a lakást. A felhasználó számára egységes konfigurációt tesz lehetővé (egy gombnyomással beállítást minden IEEE 1905 kompatibilis eszköznek kötelezően implementálnia kell), elfedve a különböző technológiák eltérő, specifikus beállításait. A végpontok között megtalálható több útvonal közül választhat többféle költség alapján, előnyben részesítheti az alacsonyabb energiafogyasztású útvonalat, beállításától függően viszont egyszerűen választhatja a gyorsabb útvonalat is. Az útvonalak konkurens használatával a forgalmat feloszthatja közöttük, elérve így a teljes hálózat maximális átbocsájtóképességét, aggregálva a különböző útvonalakhoz tartozó linke sebességét. A forgalmat átirányíthatja másik útvonalra is, attól függően, hogy az aktuális útvonal hiába-aránya mekkora, kielégíti-e a QoS (Quality of Service) beállításokat. Kritikus tartalmakat duplikálva, több útvonalon is továbbíthat ezzel növelve az átvitel megbízhatóságát, ekkor a túloldal, ha valamelyik útvonalon megkapja a tartalmat, az esetleges máshonnan érkező duplikátumokat egyszerűen eldobja. Képes gyors váltást eszközölni abban az esetben, ha az aktuálisan használt link megszakad, ekkor a forgalmat átereli egy másik, még élő útvonalra, mindezt a felsőbb rétegek számára észrevétlen módon.

A protokoll hatékony működéséhez szükséges a bridge eszközök jelenléte a hálózatban. Az 1905.1 terminológiában ezek azok az eszközök, amelyek kettő vagy több médiumon is képesek adattovábbításra és alkalmasak a valamelyik hálózati interfészükön érkező kereteket egy másik interfészen tovább-

bítani. Egy televízió képes lehet bridge-ként működni MoCA és powerline közegek között, egy Wi-Fi router a vezetékes és vezeték nélküli Ethernet között továbbá a teljes lefedettséghez kell még egy eszköz ami a vezetékes Ethernet és a powerline között teremti meg az átjárást. Ebből a példából (feltéve hogy minden eszköz csak két médiumon képes kommunikációra) bármelyik bridge eszközt kihagyva nem jön létre egy teljes lefedést biztosító 1905.1 hálózat, hanem két diszjunkt és kisebb lefedettségű 1905.1 hálózat jön létre. Természetesen fontos kiemelni, hogy a lehető legjobb lefedettséghez minél több médiumon kommunikálni képes bridge eszközre van szükség. A szabvány még friss és bár ígéretes, a támogató eszközök elterjedése még a jövőben esedékes, amennyiben a piac vevő lesz a technológiára.

III. MPTCP

Az OSI protokoll hierarchia magasabb rétegében, a transzport rétegben működik a MultiPath Transmission Control Protocol (MPTCP). A protokoll az RFC 6824 [3] specifikálja részletesen, megtervezésekor [11] a kezdetektől fogva figyelembe vették a mai Internet jellemzőjét, miszerint két becsatlakoztatott eszköz között több lehetséges útvonal is jelen van. Ahhoz, hogy alkalmas legyen a jelenleg használt TCP leváltására, szükséges hogy visszafelé kompatibilis legyen vele, és működjön minden olyan környezetben, ahol a TCP is. Abban az esetben, ha valamelyik fél nem támogatja az MPTCP-t, a kapcsolat visszadegradálódik hagyományos TCP kapcsolatra. További nehézség, ha a különböző útvonalak különböző middlebox-okkal (NAT/PAT, tűzfal, proxy, stb.) vannak ellátva, amik módosítják a TCP fejléc mezőit, ezzel ellehetetlenítve a többutas kapcsolat felépülését még akkor is ha a hálózati erőforrások megengednék ezt [12]. A protokoll

Alkalmazás		
MPTCP		
TCP (alfolyam)	...	TCP (alfolyam)
Hálózati	...	Hálózati
Adatkapcsolati	...	Adatkapcsolati
Fizikai	...	Fizikai

Fig. 3: MPTCP réteg architektúra

létrehozásakor figyelembe kellett venni az erősen heterogén hálózati környezeteket ahol a TCP már jól működik. Szerverparkok több gigabites, redundáns útvonalait kell hatékonyan kihasználnia, de mobiltelefonos környezetben, nagyságrendileg eltérő késleltetéssel rendelkező Wi-Fi és 3G-s útvonalak közti gyors váltást és linkaggregációt is képesnek kell lennie megvalósítani. A protokollnak mára van Linux kernel implementációja [13], az Apple iOS is implementálta bizonyos alkalmazásaihoz és léteznek módosított kernelek bizonyos Android operációs rendszert használó telefonokhoz (valamint egyes nagyobb gyártók már implementálták saját telefonjaikhoz pl. Samsung Galaxy S6-os nyílt implementáció [14]). Az MPTCP torlódás szabályozási eljárásai, utankénti stratégiái olyanok

kell legyenek mint az egy utas hagyományos TCP stratégiái, annak érdekében, hogy ne boruljon fel az egyensúly olyan utakon, amiket egyidejűleg TCP is használ. Viszont másik oldalról, az algoritmus olyan kell legyen, hogy az utak között a lehető legnagyobb hatékonysággal ossza meg a forgalmat, abban az esetben ha valamelyik úton nagy torlódás jelenik meg se csoportosítsa át a forgalmat a kevésbé torlódott útvonalra, hogy esetleg ott okozzon torlódást. Az MPTCP aktuális kernel implementációja négy különböző torlódásvezérlési stratégiát tartalmaz [15], [16], [17], [18]. Ez is mutatja, hogy nincs általánosan érvényes, legjobb torlódásvezérlési algoritmus, helyzettől függ, hogy hol melyik a nyerő.

Mobilos környezetben, az utak eltérő technológiai eltérő átviteli karakterisztikákat mutatnak. A Wi-Fi útvonal például egy alapvetően gyors, de ingadozó minőségű átvitelt tesz lehetővé, a 3G mobilinternet egy viszonylag állandó, de magasabb késleltetésű utat ad, az LTE pedig a 3G-hez képest lényegesen kisebb késleltetésű és nagyobb sebességű kapcsolatot tesz lehetővé. Ebből adódóan a különböző utakon kiküldött csomagok felcserélődhetnek (tipikusan fel is cserélődnek, ezzel problémákat okozva a magasabb rétegek működési hatékonyságában [19]), így egy sorszámozási stratégia kidolgozására is szükség volt. Egyes middlebox-ok érzékenyek arra, ha a TCP sorszámozás nem sorban jönnek (megpróbálnak újraküldést kérni, eldobják őket) [12], emiatt nem használhatók a TCP álfolyamok utankénti (kihagyásos) sorszámozással a csomag sorrend kizárólagos meghatározására. Ebből az okból az MPTCP bevezet egy saját, második szintű sorszámozást is, ami segít meghatározni hogy a hagyományos TCP sorszámozás a teljes átküldendő adat sorban következő melyik bájtokat tartalmazza, innentől kezdve az álfolyamok sorszámai lehetnek folytonosak.

Több mérés is megerősíti, hogy az MPTCP nagyon jól veszi a valós környezetek akadályait. Datacenter-es mérések igazolják [20], hogy a redundáns útvonalakat a protokoll nagyon jól kihasználja és hatékony linkaggregációt tud végrehajtani ezeken. Egy mérés [21] szerint 6 darab, egyenként 10 gigabites kapcsolat sebességét sikeresen összegzi 51.8 Gbit/s-má, az első öt aktív útvonalig közel lineárisan, a hatodiknál már kisebb hatásfokkal. Más mérések [22] mobilos környezetben igazolják, hogy a Wi-Fi és 3G közötti váltás is nagyon jól lekezelhetővé válik transzport rétegben. Több működési mód is támogatott (mobil eszközök esetében lényeges az energiagazdaságosság is). A protokoll használhatja valamelyik útvonalat backup útvonalként, ezt explicit módon speciális TCP flaggel jelzi a túloldal felé, ilyen esetben mindaddig az „olcsóbb” interfészen folyik az adattovábbítás, amíg azon él a kapcsolat, a másik útvonalon csak a háromutas kézfogás zajlik le. Ez a váltás a sebességben megmutatkozik, hiszen az ablakméretet fel kell növelni a váltás után a másik úton. A másik, költségesebb módszer, hogy az adatátvitelt mindkét útvonalon folyik gyorsabb váltást tud eredményezni, hiszen az ablakméret már konvergált a másik útvonalon.

IV. MPT KOMMUNIKÁCIÓS KÖRNYEZET

Az MPT kommunikációs környezet architektúrája a „GRE in UDP” IETF draft [5] specifikációján alapszik. Az UDP

tunneling technológiát széles körben alkalmazzák különböző applikációs környezetekben. A GRE in UDP egységesíteni kívánja ezen tunneling technológiák protokoll stack-jét és PDU formátumát. Egy logikai tunnel interfészen a kommunikációs partnerek közvetlen szomszédként láthatják egymást, elfedve a tunnel interfész alatti hálózati infrastruktúrát. Az MPT ezt a gondolatot viszi tovább oly módon, hogy a tunnel interfész alatt lehetőséget nyújt több fizikai interfész alkalmazására és ezáltal többutas kommunikáció megvalósítására. Lehetővé teszi egy kommunikációs viszony esetén több út használatát, elkülönítve a kommunikációs viszony végpontjait az egyes hálózati interfészekről, a tényleges végpontnak magát a gépet tekintve. Az MPTCP-től több ponton is koncepcionális eltérés látható: az MPT működése a hálózati rétegben biztosított, így az alkalmazás tetszőleges transzport rétegbeli protokollt használhat. Az alkalmazások által a tunnel interfészen

Fig. 4: MPT réteg architektúra

Alkalmazás (tunnel)		
TCP/UDP (tunnel)		
IPv4 / IPv6 (tunnel)		
GRE in UDP		
UDP (fizikai)	...	UDP (fizikai)
IPv4/IPv6 (fizikai)	...	IPv4/IPv6 (fizikai)
Adatkapcsolati (fizikai)	...	Adatkapcsolati (fizikai)
Fizikai	...	Fizikai

keresztül küldött IP csomagokat az MPT szoftver „GRE in UDP” szegmensekbe csomagolja oly módon, hogy a fizikai továbbításhoz a rendelkezésre álló fizikai interfészeken megvalósított különböző útvonalakat használja. Ezáltal a tunnel interfészre érkező IP csomagok fizikai interfészekre történő dinamikus elosztása megvalósul, így biztosítva a többutas hálózati kommunikációt két végpont között. A tunnel interfész az alkalmazások számára ugyanúgy használható kommunikációra, mint egy fizikai interfész, legyen szó akár TCP, akár UDP protokollról. Megjegyzendő azonban, hogy a tunnel interfész alatt UDP protokoll működik, így ez a környezet önmagában nem biztosít újraküldési és forgalomszabályozási mechanizmusokat. Erre a célra az MPT szoftver egy kontroll interfészen keresztül biztosít csatlakozási és ezen keresztül forgalomszabályozási lehetőséget (pl. a tunnel forgalom elosztását a fizikai interfészek között).

Az MPT környezet az IPv4 és IPv6 protokollokat, illetve akár ezek kombinációját is támogatja a konfigurációban (például IPv6 használható a tunnel interfészen, és IPv4 a fizikai interfészeken, így az applikációk IPv6 protokollal kommunikálhatnak egymással egy IPv4-es infrastruktúra fölött). Az MPT környezet használatához szükség van az MPT szerver megfelelő konfigurációjára mindkét végponton (ld. [4]). Az MPT működési hatékonyságának vizsgálatára már számos kísérlet és publikáció született (ld. [23], [24], [25]), melyek azt bizonyítják, hogy az MPT hatékonyan képes az útkapacitások összegzésére. Ennek az aggregációs képességnek a maximumát vizsgálták a [26] cikkben.

Lehetőség van továbbá arra, hogy aktív kommunikációs

viszony során dinamikusan változtassuk az utak számát, meglevőket kapcsoljunk le illetve fel, vagy akár lehetőség szerint újakat adjunk hozzá. Ezen tulajdonságot kihasználva könnyedén megvalósítható egy hálózati topológia esetén a több útra épülő redundancia a csomagvesztések elkerülésére, kiváló példa ennek a funkciónak a hasznosságára vezeték nélküli utak esetén a layer 3 roaming (handover) megvalósítása. Ez a terület került vizsgálatra a [25] cikkben, terminálos (karakteres) felületű környezetben. Az elemzések azt mutatták, hogy a terminál kapcsolat folyamatosan fennálló Wi-Fi – 3G váltás esetén.

Ezt a munkát folytattuk, oly módon, hogy a Wi-Fi – 3G váltást egy (a kommunikációs késleltetésre érzékeny) videóstream átvitele közben vizsgáltuk. A vizsgálat során egy mindennaposnak mondható esetet reprodukáltunk: egy felhasználó egy notebookról csatlakozik egy videóstreamhez a helyi Wi-Fi hálózatot használva. A notebookon egy 3G hálózati interfész is található, aktív mobilinternet kapcsolattal. A felhasználó a videó fogadása közben valamilyen okból kénytelen lecsatlakozni a Wi-Fi hálózatról (pl. a bázisállomás hatótávján kívül kerül). A hagyományos egyutas kommunikációs környezetben ez a szituáció a videóstream leállításához vezetne, természetesen később a 3G kapcsolaton keresztül újraindulhat, de ehhez újra csatlakozni kell a videóstreamhez (intézz ekkor az operációs rendszer, akár a felhasználó) és új kommunikációs viszonyt kell létrehozni. Tehát ebben az esetben az adatvesztés és az ebből adódó problémák elkerülhetetlenek. Tanulmányunkkal azt vizsgáltuk, hogy az MPT szoftvercsomaggal megvalósított többutas kommunikációs környezetben ez a probléma hogyan orvosolható. A mérésekhez a következő tesztkörnyezetet állítottuk össze:

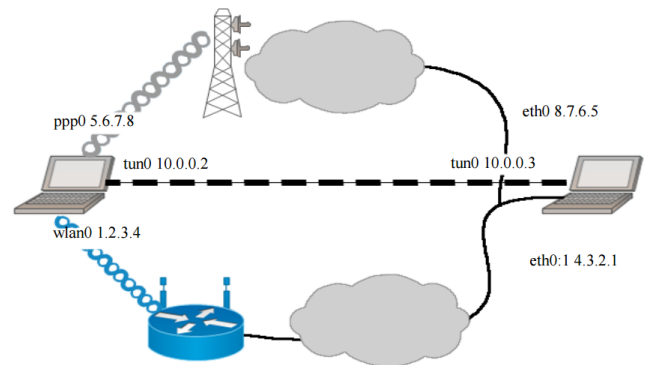


Fig. 5: A tesztekhez használt topológia

A videóstream funkcionalitást betöltő szerver (DELL Inspiron 3542 notebook: Intel Core i5-4210 (2700MHz) CPU, 8GB RAM (DDR3 1600MHz), 1000MB HDD (5400 RPM)) a Debreceni Egyetem Informatikai Karának épületében volt elhelyezve, a Gigabites hálózati interfészt használtuk mindkét út végpontjaként, két IP címet rendelve hozzá (az egyiket a fizikai interfészhez a másikat egy a fizikain létrehozott logikai interfészhez). A kliens számítógép (Intel Core i5-3210M (2500MHz) CPU, 8GB RAM (DDR3 1600MHz),

1000MB HDD (5400 RPM)) egy Wi-Fi és egy 3G interfészt használt, tehát két különböző internetszolgáltatón keresztül érte el a publikus világot. A tanulmány során két különböző működési környezetet vizsgáltunk: az egyik a Wi-Fi út tervezett lekapcsolása (pl. gyenge Wi-Fi jelszint esetén, még a kapcsolat megszakadása előtt), míg a másik a váratlan lekapcsolás, amely egy előre nem látható hálózati hibát hivatott szimulálni. Ez utóbbit a Wi-Fi bázisállomás internetkapcsolatának megszüntetésével értük el.

Mindkét működési környezetben TCP és UDP alapú RTP videóstreamelés működését is vizsgáltuk. Fontos kiemelni, hogy ezek a vizsgálatok a QoE-t (Quality of Experience) voltak hivatottak tesztelni. A méréseket több, független környezetben és többszöri alkalommal eltérő napszakokban is megismételtük. A 3G mobilinternetes út minden esetben a T-Mobile hálózaton keresztül valósult meg. A Wi-Fi út viszont a különböző helyszíneken eltérő paraméterekkel került megvalósításra: az első tesztkörnyezetben a Wi-Fi kapcsolat a Debreceni Egyetem Informatikai Karának épületén belül volt (egy hop távolságra a szervertől), így a késleltetések nagyon alacsonyak voltak és kis szórással rendelkeztek (8-12ms). A második tesztkörnyezetben az egyik hazai szolgáltató szélessávú elérését használtuk Debrecenen belül, Wi-Fi router-el megosztva. A harmadik tesztkörnyezet Budapesten került kiépítésre, egy munkakörnyezetben terhelt bérelt vonalas előfizetés Wi-Fi elérésén keresztül. A vizsgálataink minden helyszínen (azaz a Wi-Fi késleltetéstől függetlenül) homogén eredményeket mutattak: A tervezett leállás esetén egyik mérés esetén sem tapasztaltunk csomagvesztést. Ebben a környezetben a problémás szituáció a Wi-Fi interfész felkapcsolásakor jelentkezett, mivel ekkor (a Wi-Fi útvonal gyorsabb volta miatt) csomagsorrend átrendeződés volt tapasztalható. TCP alapú stream esetén a Wi-Fi út tervezett lekapcsolásával a streamben egyáltalán nem jelentkezett semmilyen probléma (sem kép vagy hanghiba, sem megszakadás). Az RTP stream esetén egy kicsivel rosszabb a helyzet, egy észrevehető képgörzés (képtorzulás) volt megfigyelhető a le- és a felkapcsoláskor is (melynek oka a 3G interfész lényegesen nagyobb késleltetése és alacsonyabb sebessége). Ez a képhiba rövid idő (néhány másodperc) alatt helyreállt. Váratlan leállás során az MPT szoftver keepalive mechanizmusa [27] érzékelte a kommunikáció megszakadását, ez minden esetben valamennyi időt igényel, ennek eredményeképpen a videóban képmegállás illetve hangkiesés volt tapasztalható, melynek mértékét a keepalive üzenetek gyakorisága befolyásolta.

V. JÖVŐBELI TERVEK

Az MPT rendszer továbbfejlesztéséhez kapcsolódóan a vizsgálataink során nyert tapasztalatok két fejlesztési területet jelölnek ki:

A méréseink azt mutatták, hogy az utak eltérő sebességéből és késleltetéséből adódó csomagátrendeződés problémákat okozhat (pl. képtorzulás) a csomagvesztés mentes környezetben is. A GRE in UDP fejrész sorszám mezőjét alkalmazva a vevő oldalon egy pufferezés kialakításával lehetőség nyílik a csomagok GRE sorszám szerinti sorbarendezésére, ezáltal biztosítva, hogy a tunnel interfész

sorrendhelyesen kapja meg a csomagokat abban az esetben is, ha a fizikai továbbítás során ez nem volt biztosított.

Az Android mobiltelefonos operációs rendszer 2015 második negyedévére a teljes piaci részesedés 82.8%-ával rendelkezett [28], ezzel magasan a legelterjedtebb a többi közül. A népszerűségét köszönheti a rengeteg rá elérhető alkalmazásnak. A Google jó fejlesztőeszközöket és jól dokumentált API-t (Application Programming Interface) ad a fejlesztők kezébe. A környezet rengeteg lehetőséget ad a rendszer hálózati programozása felé is. Az Android 5.1 operációs rendszer lehetőséget nyit a hálózati interfészek párhuzamos (együttes) használatára. Kísérleti tesztprogramjaink azt mutatják, hogy az itt rendelkezésre álló eszközök segítségével az MPT szoftver valamennyi funkcionális megvalósítható ezen a platformon, root jogosultság illetve kernelmódosítás nélkül is. Ezen kedvező feltételekre alapozva tervezzük a közeljövőben az MPT Android-os implementációját.

VI. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben áttekintettük az aktuális többutas kommunikációs technológiákat. Részletesen ismertettük az MPT környezetben végzett videóstream átvitelrel kapcsolatos kutatási eredményeinket. A tanulmányaink azt mutatják, hogy az MPT környezet jól alkalmazható Wi-Fi – 3G váltás (handover) esetén a problémamentes videóstream átvitel megvalósítására.

REFERENCES

- [1] "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014–2019," 2015.
- [2] "IEEE Standard for a Convergent Digital Home Network for Heterogeneous Technologies Amendment 1: Support of New MAC/PHYs and Enhancements," *IEEE Std 1905.1a-2014 (Amendment to IEEE Std 1905.1-2013)*, pp. 1–52, Feb 2015.
- [3] A. Ford, C. Raiciu, M. Handley, and O. Bonaventure, "TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses," Internet Requests for Comments, RFC Editor, RFC 6824, January 2013, <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6824.txt>. [Online]. Available: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6824.txt>
- [4] B. Almási, "MPT - Multipath Communication Library." [Online]. Available: <http://irh.inf.unideb.hu/user/almasi/new/index.php/projektek/19-mpt-library>
- [5] E. Crabbe, L. Yong, X. Xu, and T. Herbert, "GRE-in-UDP Encapsulation," Working Draft, IETF Secretariat, Internet-Draft draft-ietf-tsvwg-gre-in-udp-encap-07, July 2015, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-tsvwg-gre-in-udp-encap-07.txt>. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-tsvwg-gre-in-udp-encap-07>
- [6] "HomePlug Alliance." [Online]. Available: <http://www.homeplug.org/>
- [7] "IEEE Standard for a Convergent Digital Home Network for Heterogeneous Technologies Amendment 1: Support of New MAC/PHYs and Enhancements," *IEEE Std 1905.1a-2014 (Amendment to IEEE Std 1905.1-2013)*, pp. 1–52, Feb 2015.
- [8] "Multimedia over coax alliance." [Online]. Available: <http://www.mocalliance.org/>
- [9] "Multimedia over Coax Alliance, MoCA 2.0." [Online]. Available: <http://www.mocalliance.org/MoCA2/index.htm>
- [10] "IEEE Convergent Digital Home Network Working Group home page." [Online]. Available: <http://group.ieee.org/groups/1905/1/>

- [11] C. Raiciu, C. Paasch, S. Barre, A. Ford, M. Honda, F. Duchene, O. Bonaventure, and M. Handley, "How Hard Can It Be? Designing and Implementing a Deployable Multipath TCP," in *Proceedings of the 9th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation*, ser. NSDI'12. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2012, pp. 29–29. [Online]. Available: <http://inl.info.ucl.ac.be/publications/how-hard-can-it-be-designing-and-implementing-deployable-multipath-tcp>
- [12] M. Honda, Y. Nishida, C. Raiciu, A. Greenhalgh, M. Handley, and H. Tokuda, "Is It Still Possible to Extend TCP?" in *Proceedings of the 2011 ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference*, ser. IMC '11. New York, NY, USA: ACM, 2011, pp. 181–194. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2068816.2068834>
- [13] "Linux Kernel implementation of MultiPath TCP." [Online]. Available: <https://github.com/multipath-tcp/mptcp>
- [14] "Samsung Open Source Release Center, MPTCP enabled Galaxy S6 source code." [Online]. Available: <http://opensource.samsung.com/reception/receptionSub.do?method=sub&sub=F&searchValue=SM-G925S>
- [15] M. Xu, Y. Cao, and E. Dong, "Delay-based Congestion Control for MPTCP," Working Draft, IETF Secretariat, Internet-Draft draft-xu-mptcp-congestion-control-02, July 2015, <https://tools.ietf.org/html/draft-xu-mptcp-congestion-control-02>. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/draft-xu-mptcp-congestion-control-02>
- [16] A. Walid, Q. Peng, J. Hwang, and S. Low, "Balanced Linked Adaptation Congestion Control Algorithm for MPTCP," Working Draft, IETF Secretariat, Internet-Draft draft-walid-mptcp-congestion-control-03, July 2015, <https://tools.ietf.org/html/internet-drafts/draft-walid-mptcp-congestion-control-03>. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/draft-walid-mptcp-congestion-control-03>
- [17] R. Khalili, N. Gast, M. Popovic, and J.-Y. L. Boudec, "Opportunistic Linked-Increases Congestion Control Algorithm for MPTCP," Working Draft, IETF Secretariat, Internet-Draft draft-khalili-mptcp-congestion-control-05, July 2014, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-khalili-mptcp-congestion-control-05.txt>. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/draft-khalili-mptcp-congestion-control-05>
- [18] D. Wischik, C. Raiciu, A. Greenhalgh, and M. Handley, "Design, Implementation and Evaluation of Congestion Control for Multipath TCP," in *Proceedings of the 8th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation*, ser. NSDI'11. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2011, pp. 99–112. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1972457.1972468>
- [19] L. Eggert and G. Fairhurst, "Unicast UDP Usage Guidelines for Application Designers," Internet Requests for Comments, RFC Editor, BCP 145, November 2008, <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5405.txt>. [Online]. Available: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5405.txt>
- [20] C. Raiciu, S. Barre, C. Plunke, A. Greenhalgh, D. Wischik, and M. Handley, "Improving Datacenter Performance and Robustness with Multipath TCP," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 41, no. 4, pp. 266–277, Aug. 2011. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2043164.2018467>
- [21] C. Paasch, G. Detal, S. Barré, F. Duchéne, and O. Bonaventure, "The fastest TCP connection with MultiPath TCP," 2014. [Online]. Available: <http://multipath-tcp.org/pmwiki.php?n=Main.50Gbps>
- [22] C. Paasch, G. Detal, F. Duchene, C. Raiciu, and O. Bonaventure, "Exploring Mobile/WiFi Handover with Multipath TCP," in *Proceedings of the 2012 ACM SIGCOMM Workshop on Cellular Networks: Operations, Challenges, and Future Design*, ser. CellNet '12. New York, NY, USA: ACM, 2012, pp. 31–36. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2342468.2342476>
- [23] B. Almási and S. Szilágyi, "Investigating the Throughput Performance of the MPT Multipath Communication Library in IPv4 and IPv6," *Journal of Applied Research and Technology*, Submitted.
- [24] B. Almási and S. Szilágyi, "Multipath FTP and stream transmission analysis using the MPT software environment," *Int. J. of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 2, no. 11, pp. 4267–4272, 2013.
- [25] B. Almási, "A Solution for Changing the Communication Interfaces between WiFi and 3G without Packet Loss," *Proceedings of 37th International Conference on Telecommunication and Signal Processing, Berlin, Germany*, pp. 73–77, 2014.
- [26] G. Lencse and Á. Kovács, "Advanced Measurements of the Aggregation Capability of the MPT Network Layer Multipath Communication Library," *International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 41–48, 2015.
- [27] B. Almási, M. Kósa, F. Fejes, R. Katona, and L. Püsök, "MPT: a Solution for Eliminating the Effect of Network Breakdowns in case of HD Video Stream Transmission," 2015, Submitted.
- [28] "Smartphone OS Market Share, 2015 Q2," 2014. [Online]. Available: <http://www.idc.com/prodserv/smartphone-os-market-share.jsp>