

Nagy pontosságú IEEE 1588 (PTP) óraszinkronizációs protokoll implementációk fejlesztése és alkalmazása

Kovácsházy Tamás, Ferencz Bálint
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Budapest
khazy@mit.bme.hu, fernya@gmail.com

Kivonat— Az Internet világában az óraszinkronizáció fogalma összeforrt a Network Time Protocol (NTP) alkalmazásával. Ugyanakkor az NTP számos alkalmazásban nem képes elégséges pontosságot nyújtani, ilyenek például a pénzügyi műveletek, a mérés- és irányítástechnika, kiterjedt adatgyűjtő és hibakereső rendszerek vizsgálata, valamint ilyen az elosztott rendszerek teljesítmény optimalizálása is (pl. hibakeresés elosztott rendszerekben, szűk keresztmetszet keresése cloud computing alkalmazásokban, stb.). Ezért kifejlesztésre került az IEEE 1588 (Precision Time Protocol, PTP) óraszinkronizációs protokoll, és annak implementációi is megjelentek. A cikk és a hozzá kapcsolódó előadás az IEEE 1588 és annak implementációinak és alkalmazástechnikájának a megismertetésére vállalkozik Linux környezetben,

Kulcsszavak— Óraszinkronizáció, IEEE 1588, hardver támogatás, PTP, NTP, lokális hálózat, Linux

1. Bevezetés

A számítógép hálózatok megjelenésével egy időben problémaként merült fel a hálózatban résztvevő számítógépek (node-ok) lokális órájának pontatlansága, vagyis az, hogy azok a gyártási bizonytalanságok, eltérő környezeti hatások, és más okok miatt késnek vagy sietnek egymáshoz képest vagy akár egy globális referencia időhöz képest egy állandóan változó mértékben. Az Internet világában a probléma első megoldása a más területen is használt órabeállítást célozza meg a TIME (RFC 868) és DAYTIME (RFC 867) protokollokkal, vagyis egy hálózati üzenetváltás során az óráját beállítani készülő számítógép lekérdezi egy megadott számítógép referenciának tekintett óráját, és a lokális óráját arra az értékre állítja be (esetleg figyelembe véve a hálózati késleltetéseket és más hibaforrásokat is). Ennek a megoldásnak a nyilvánvaló hátránya az, hogy egyrészt a lokális óra a beállítás folyamán ugrásszerűen változik, akár visszafelé is, ezzel alapjaiban megsértve az idő szigorúan monoton, szakadásmentes növekedésének alapvető fizikai elvét, másrészt a lokális óra beállítása után az ismét a lokális óra hibáinak megfelelően egyre pontatlanul jár a következő beállításig. A TIME és DAYTIME protokollok megjelenése után 2 évvel (1985) egy sokkal jobb és azóta is széles körben használt megoldást adott a lokális órák pontatlanságából származó hibák kezelésére David L. Mills a Network Time Protocol (NTP) kidolgozásával [1]. Az NTP nem beállítja az órát hanem szinkronizálja azt. Vagyis a folytonosan monoton, szakadásmentes lokális idő biztosítására folyamatosan úgy módosítja a lokális óra járását, hogy az egy idő után kis hibával kövesse a megadott referencia órát, lényegében egy fáziszárt hurkot (Phased-locked loop, PLL) megvalósítva. A NTP referencia órái többnyire GPS vevőkkel érik el a globális referencia időt (UTC, Coordinated Universal Time), és azt egy órahierarchiában (stratum) osztják el azt. Az NTP a gyakorlati

tapasztalatok alapján 10-100 ms pontosságra képes az Interneten, és 10 ms alatti pontosságra lokális hálózatokban. Ez a pontosság sok alkalmazásban elégséges lenne, de sajnos az NTP egyáltalán nem nyújt garanciát a pontosságra. A számítógép hálózatok egyre szélesebb alkalmazásainak egy részében ez a pontosság, és a garanciák hiánya sem teszi lehetővé az NTP alkalmazását, valamint az alkalmazások egy jelentős részében nem csupán idő, hanem az egyes perifériák szinkron működése is előírás, aminek a biztosítására az NTP egyáltalán nem képes, nem lévén ilyen alacsony szintű hardver interfésze. Ez a felismerés vezetett el a IEEE 1588 Standard for A Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems (PTP) szabvány [2] kidolgozásához. Az IEEE 1588 az NTP-hoz hasonlóan a kommunikációs hálózatot használó (in-band) óraszinkronizációs protokoll, ellentétben más soros idő kód protokollokkal, mint például az IRIG Standard 200-04 [3].

2. IEEE 1588 ismertető

Az IEEE 1588 szabvány elsősorban a címének megfelelően hálózatos mérések (a hálózat tulajdonságait mérjük) és hálózati mérőrendszerek (elosztott mérőrendszerek fizikai rendszerek mérése) valamint hálózati irányítórendszerek (fizikai rendszerek elosztott irányítórendszerei) megvalósítása során felmerülő óraszinkronizációs problémák megoldása során használható fel. Az IEEE 1588 alkalmazási környezeteiben jellegzetesen 1 μ s alatti, sok esetben 100 ns alatti hibával kell a Föld tetszőleges pontján lévő olyan számítógépek óráit szinkronizálni, amelyeknek jellegzetesen csupán egyetlen Ethernet hálózati interfésze van a kommunikációra szolgáló hálózathoz. Ez 3-5 nagyságrenddel kisebb hiba, mint amit az NTP tud nyújtani. A cél elérésére az IEEE 1588 az NTP-hez hasonló rendszerarchitektúrával és alapvető működési elvekkel rendelkezik, viszont számos ponton jelentősen eltérő rész megoldásokat alkalmaz, a főbb eltérések az alábbiak:

- Az IEEE 1588 direkt módon csupán összefüggő lokális hálózatokban (Local Area Network, LAN) vállalja fel a probléma megoldását, például egy épületben, vagy egy telephelyen. A lokális hálózatok közötti időszinkronizációt GPS órákkal¹, vagy más referencia órákkal oldják meg, ezek szolgálnak a globális referencia óra lokális forrásaként, amelyet aztán a lokális hálózat az IEEE 1588 segítségével továbbít. Ezzel szemben az NTP a teljes Interneten keresztül felvállalja az óraszinkronizációt, ami lényegesen nagyobb bizonytalanságot jelent, elsősorban az Interneten tapasztalható nagy késleltetés ingadozás (jitter) és aszimmetrikus késleltetése miatt.
- Az IEEE 1588 egy egyszerű mester-szolga (master-slave) szinkronizációs protokoll, a mester óra automatikus kiválasztásával (Best Master Clock algoritmus).
- Az IEEE 1588 támogatja a mester és a solga óra közötti egyirányú késleltetés egyes komponenseinek mérését (pl. Follow Up message), ezzel csökkentve (elméletileg akár kiküszöbölve) az óraszinkronizáció pontosságát alapvetően befolyásoló aszimmetrikus késleltetésekből származó problémákat.
- Az IEEE 1588 a szigorúan monoton növekvő, szakadásmentes TAI-t (International Atomic Time) használja az idő továbbítására, míg az NTP UTC-t használ, amelyben a UTC szökőmásodpercek miatt ugrások vannak. Az IEEE 1588 kommunikáció során a UTC szökőmásodpercek aktuális értéke megadásra kerül, így lokálisan az idő megjelenítése során az figyelembe vehető.

¹ A globális időhöz kötése a rendszernek ajánlott, de lehetséges lokális referencia órát is használni egy LAN-on belül.

Az IEEE 1588-2008 (PTP Version 2, vagy PTPv2) az IEEE 1588 aktuális verziója. A legtöbb jelenleg elérhető termék ezt, a korábbi IEEE 1588-2002 verzióval nem kompatibilis verziót támogatja. Összefoglalva, az IEEE 1588-2008 legjellegzetesebb tulajdonságai az alábbiak:

- Hierarchikus mester-szolga architektúra az alábbi komponensekkel:
 - Grandmaster (a Best Master Clock) algoritmussal kiválasztva a mester órák közül,
 - Boundary clock (több interfésszel, lényegében felfelé szolgaként, lefelé mesterként viselkedve),
 - Ordinary clocks (mester és szolga órák),
 - Transparent clock (hálózati eszközök, elsősorban Ethernet kapcsolók, amelyek mérik és továbbítják a rajta keresztül továbbított IEEE 1588 üzenetek késleltetését az eszközön belül).
 - Kommunikációs csatornák (napjainkban Ethernet szinte kizárólagosan).
- Network transport:
 - IP (IPv4 és IPv6) és UDP beágyazás a 319-es (Event message) és 320-as (General message).portokon,
 - Ethernet beágyazás (Ethernet típus mező 0x88F7-re beállítva).
- Időbélyeg rögzítés a küldött és fogadott üzenetek esetén:
 - Szoftver időbélyeg rögzítés az eszközmeghajtóban vagy alkalmazásban, amely nagy bizonytalanságú az operációs rendszer és egyéb szoftver komponensek által okozott, valamint a magas szintű hardver (DMA, IT, stb.) miatti időbeli bizonytalanságok miatt,
 - Alacsony szintű (fizikai réteg, vagy MAC réteg alja) hardver időbélyegzés. Tipikusan a „Start of Frame” küldését vagy fogadását kell rögzíteni Ethernet esetén.

Ennek megfelelően egy IEEE 1588 alapú rendszerben egy vagy több GPS vevővel kiegészített mesteróra, tetszőleges számú szolga óra van összekötve egy Ethernet hálózattal. A szolga órák vagy tisztán szoftveres IEEE 1588 implementációt futtatnak, vagy HW támogatott IEEE 1588 megvalósítást. Maga az Ethernet hálózat vagy nem kompatibilis az IEEE 1588-cal, vagy az Ethernet kapcsolók Boundary vagy Transparent clock-ként működnek.

3. Az IEEE 1588 alacsony szintű interfésze

Az IEEE 1588 esetén egy jól meghatározott interfészen keresztül lehet a mester órák interfészét elérni, vagy az a szolga órákban az időinformációt a perifériák (rendszeróra, valódi fizikai perifériák, pl. I/O kártya, stb.) felé továbbítani. Az interfésznek az alábbi elemei vannak:

- Az aktuális idő továbbítására szolgáló kommunikációs felület, ez pl. GPS órák esetén többnyire egy aszinkron soros port (UART) NMEA formátumban átadott idővel, de pl. rendszeróra esetén lehet egy OS specifikus interfész is (UNIX adjtime),
- Pulse per second (PPS) jel az aktuális másodperc kezdetének jelzésére,
- Néhány eszköz szintén rendelkezik egy SYNCHRONIZED vagy LOCKED jellel, amivel az eszköz jelezheti, hogy egy adott, a specifikációjában rögzített hibánál jobban követi a globális időt.

Ennek megfelelően az IEEE 1588 felfogható egy virtuális vezetékként a mester óra referencia óra kimenete és a periféria mester óra bemenete között. Ezért a pontosságot is e két interfész PPS jelei között értelmezzük és mérjük, többnyire a két jelet oszcilloszkóppal vizsgálva. Alternatív mérési

lehetőség a IEEE 1588 megvalósítások által log-olt adatok felhasználása, de ezek PPS jel alapú validációja szükséges.

4. Az időbélyegzés megvalósítási részletei IEEE 1588 megvalósításokban

Az óraszinkronizációs protokollok közös problémája az erősen aszimmetrikus késleltetésű kommunikációs vonalakkól származó szinkronizációs hiba, amely az NTP-et is érinti. Az IEEE 1588 a probléma megoldására lehetővé teszi az egyirányú késleltetés egyes komponenseinek mérését és figyelembe vételét az óraszinkronizáció során. Az aszimmetrikus késleltetés fő forrásai a végpontok (mester és szolga), valamint a közöttük található aktív hálózati eszközök. Ennek megfelelően az IEEE 1588 képes nem csak szoftver, hanem hardver időbélyegekre alkalmazására, továbbítására és azok felhasználására is, ha azt a hardver és a szoftver is támogatja. Hardver időbélyeg alkalmazás esetén az alábbi problémák merülnek fel:

- Először is, ahhoz hardver időbélyegeket tudunk használni, a hálózati interfész kártyán lennie kell egy órának, amely értéke rögzítésre kerül az időbélyegben, amelynek értékét a hardver rögzíti Ethernet keret fogadása vagy küldése esetén. A legtöbb számítógépben ugyanakkor számos másik óra vagy órajel forrás is található, például az operációs rendszer rendszerórája, a hangkártya A/D és D/A órajele, vagy esetleg egy több hálózati interfésszel rendelkező hálózati eszközben a többi hálózati interfész órája. Ezeket az órákat lokálisan (a gépen belül) valamilyen alkalmas módszerrel szinkronizálni kell, vagy legalábbis alkalmas óra transzformációval egymásba átalakíthatóvá kell tenni (többnyire az órák formátuma is eltérő) a rendszer működéséhez. Ennek a problémának a megoldásához ad segítséget a Linux PTP Hardware Clock (PHC) alrendszer a 3.x Linux kernelekben (többnyire nem aktív, a kernelt újra kell fordítani az alkalmazásához), lehetővé téve az órák szinkronizálását és transzformációját.
- Az információt vevő oldalon a hardver időbélyegeket csatolhatók a vett információhoz egy közös adatstruktúrában, így azok eljuttatása a vevő oldali IEEE 1588-at megvalósító alkalmazáshoz (daemon) könnyen megoldható, és erre az információra csak a vevőnek is van szüksége. A Linux esetén a vevő oldali driver vagy hardver időbélyegekre támogatása hosszú évek óta része a kernelnek (SO_TIMESTAMP, SO_TIMESTAMPNS kernel opciók).
- Az információt küldő oldalon sajnos a helyzet teljesen más. A hardver időbélyeg csak akkor kerül rögzítésre a küldő oldalon, amikor a küldött információ a fizikai rétegben már adás közben van (Ethernet esetén elküldték a hardver a Start of Frame delimitert). És ezen kívül erre az időbélyegre az információt fogadó félnek van szüksége, így azt oda el kell juttatni. Az IEEE 1588 Linux alapú megvalósításában ez úgy történik, hogy az időbélyegre vissza kell juttatnunk a küldő oldali IEEE 1588 alkalmazásnak (erre a küldő UDP socket hibakezelő sorát használjuk), majd azt egy Follow Up üzenetben küldjük el a másik félnek. Ezt a folyamatot a küldő oldalon az SO_TIMESTAMPING socket opció valósítja meg a 2.6.30 Linux kernelektől, amihez hardver, driver és alkalmazás (IEEE 1588-at megvalósító daemon) támogatás is szükséges.

Jelenleg az x86-os (32 és 64 bites) Linux platformon a hardver időbélyegzés valamint a PHC alrendszer támogatása csak egyes Intel hálózati kártyák által került megvalósításra. A gyakorlatban az Intel i210 [4] általános célú és az Intel i340 [5] és i350 [6] szerverhálózati interfész kártyák alkalmazása javasolható, elsősorban az i210 és i350 kártyáké, mert azokon a PPS ki- és bemenet is

egyszerűen megvalósítható. A szükséges módosított eszközmeghajtók és a felhasználói programok (konfigurációs programok és daemon-ok) kifejlesztése valamint tesztelése viszont elkerülhetetlen ezen eszközök használatához.

Ugyanakkor egyelőre csak néhány Ethernet switch támogatja az IEEE 1588-at, vagyis képes boundary clock vagy transparent clock működésre. Például a vizsgálataink során rendelkezésre álló Cisco Industrial Ethernet 3000 kapcsoló vagy a szintén rendelkezésre álló TTech TTEthernet TTEdevelopment Switch 1 Gbit/s 12 Ports kapcsolók ilyenek. Szintén képes a hardver időbélyegyek alkalmazására a Meinberg LANTIME M600/GPS/PTP PTPv2 / IEEE 1588-2008 Grandmaster Clock mester óra, amelyet vizsgálataink során használtunk referencia óraként.

5. Nyílt forráskódú ingyenes IEEE 1588 megvalósítások Linux-ra

Linux alatt az alábbi, széles körben használt, nyílt forráskódú IEEE 1588 implementációk léteznek:

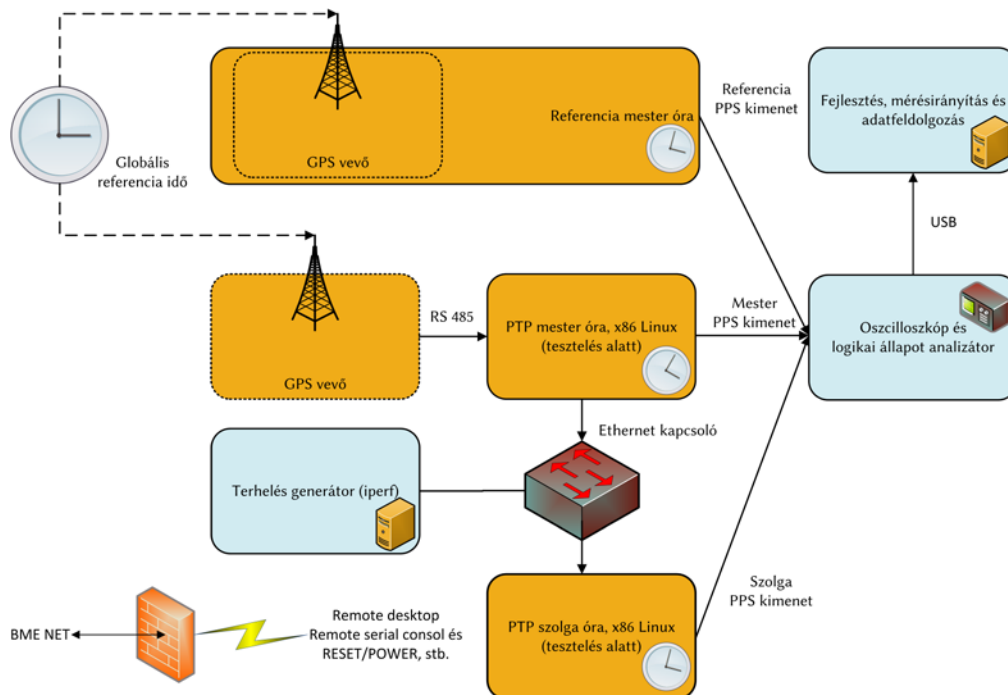
- PTPd, <http://ptpd.sourceforge.net/>
 - o PTP v1 és v2 támogatás külön forráskódban (a v2 egy elágazása a v1 kódnak),
 - o UDP beágyazást (IPv4/UDP) támogat csak,
 - o Több fejlesztő is készített hozzá patch-eket, mint például [7] és [8], amellyel és megfelelő hardver és driver támogatással képes hardver időbélyegzést is használni (SO_TIMESTAMPING felhasználásával), de ezek soha nem kerültek be a végleges szoftverbe.
- linuxptp, <https://sourceforge.net/projects/linuxptp/>
 - o Egy PTP v2 implementáció a PTPd-vel szerzett tapasztalatok alapján,
 - o Ethernet és UDP beágyazást is támogat (IPv4 és IPv6 felett),
 - o Boundary és Ordinary clock támogatás,
 - o Linux PTP Hardware Clock (PHC) alrendszer szükséges a használatához,
 - o Az SO_TIMESTAMPING támogatás nélkül nem használható,
 - o Tisztább, moduláris felépítés a fejlesztés gyorsítására.

Mindkét szoftver esetén szükséges a kitűzött nagypontosságú óraszinkronizációhoz a megfelelő verziójú Linux kernel, a driver támogatás, kiegészítő konfigurációs programok megvalósítása, valamint az implementáció bevizsgálása. 2013 elejéig fejlesztéseink eredményeképpen a PTPd IEEE 1588 v1 és v2 verziójához is elkészült egy x86-os Linux alatt használható a hardver időbélyegzést támogató verziója és a szükséges driver módosítások és finomítások, amely lehetővé teszi a rendszeróra szinkronizálást. PTPd-vel elért eredmények ennek megfelelően a rendszeróra vonatkoznak (a reziduális aszimmetrikus késleltetés nem mérhető hiba ebben az értékelésben), és az alkalmazott hardver elemektől függenek [9].

Új eredményeknek tekinthetők a linuxptp által használt PHC alrendszerrel kompatibilis módosított Intel IGB (Inter Gigabit server NIC driver) driverek kifejlesztése, amely lehetővé teszi a PPS jelek fogadását és előállítását. A szolga órákon PPS jeleket előállító driver és konfigurációs alkalmazások elkészültek, és azok nyilvánosságra is lettek hozva patch-ek formájában. A mester órák GPS és más referencia óra jeleinek fogadására képes Linux eszközmeghajtó és felhasználói szoftverek jelenleg fejlesztés alatt állnak.

6. Fejlesztési infrastruktúra

Az IEEE 1588 fejlesztések során kialakítottunk egy fejlesztési infrastruktúrát, amely lehetővé tette az összetett IEEE 1588 fejlesztőrendszer távoli elérését, menedzsmentjét, üzemeltetését, a mérések végzését műszerek (oszilloszkóp, logikai állapot analízátor) felhasználásával folyamatosan, és bárhol az Internet-ről. A komplett infrastruktúra egy szerver teremben került elhelyezésre a BME-MIT tanszék területén, fizikai hozzáférés a rendszerhez csak munkaidőben, szükség esetén, pl. meghibásodás, kábelezés, operációs rendszer installálás során volt lehetséges a fejlesztést végzők számára. Ennek megfelelően az eszközök vagy távolról voltak menedzselhetők (referencia mester óra WEB-es felületen vagy SSH-val, Ethernet kapcsolók, a mérésirányító és adatgyűjtő szerveren HP iLO menedzsment funkcionális), vagy azokat (pl. a fejlesztett IEEE 1588 megoldás komponenseket futtató PC-éket) egy saját fejlesztésű soros device szerverrel (Linux soros konzol távoli elérése) és remote I/O kártyával (RESET és POWER kapcsolók távoli elérése) azzá tettük. A fejlesztésre használt PC-ék távoli elérése különösen fontos volt, mivel a Linux eszközmeghajtó fejlesztése és tesztelése során gyakran volt szükség a számítógépek újraindítására, amit a távoli hozzáférést lehetővé tevő megoldás nélkül csak személyes jelenléttel tudtunk volna megoldani, ami nem volt biztosítható. A rendszer felépítése megfigyelhető az 1. ábrán.



1. ábra A fejlesztőrendszer felépítése

Az 1. ábrának megfelelően a teljes rendszerben meg kell oldani a GPS vevők elhelyezését is. A GPS vevők vagy azok antennáinak elhelyezésére a legalkalmasabb az épület teteje, de ha ez nem oldható meg, akkor Magyarországon az épület déli oldala javasolható, mivel így biztosítható a legnagyobb számú műhold biztonságos vétele. A GPS vevők vagy antennák kábeleinek késleltetésével kompenzálni kell a mester órák PPS jeleit is, erre a referencia mester óra felhasználói felületén lehetőség van, valamint a saját fejlesztésű mester órában a kompenzáció lehetőségét meg kell adni.

A PTP mester óra és a PTP szolga óra, valamint a mérésirányító és adatgyűjtő szerverben is az Intel i210 és i350 IEEE 1588 hardver támogatással rendelkező hálózati kártyái kerültek installálásra. Az

alkalmazott Ethernet kapcsoló a mérések során a Cisco Industrial Ethernet 3000 kapcsoló volt, amelynek Transparent Clock IEEE 1588-at támogató működési módját ki tudjuk kapcsolni, vagyis a rendszer fizikai újrakonfigurálása nélkül tudjuk a hálózatot IEEE 1588 támogatással vagy anélkül vizsgálni. Az oszcilloszkóp (PicoScope 5203) és a logikai állapot analízátor (GWINSTEK GLA-1016) USB buszon keresztül csatlakozik a mérésirányító és adatgyűjtő szerverhez, amire távoli asztal eléréssel belépve lehet mérni (vagy off-line módon adatot gyűjteni) az eszközök Windows-os felhasználói programjával. Hálózati és végpont terhelés generálására az iperf hálózati terhelés generátor szoftvert használtuk. Terheléses mérésnél mindig két mérést végeztünk, az egyikben a PTP szolgálat volt az iperf szerver, míg a másikban az iperf mérésben kliens szerepet játszott.

A fejlesztés során szintén felhasználásra került a VMWARE vSphere Hypervisor (ESXi), mivel a mérésirányítás és adatgyűjtés során használt szoftverek részben csak Windows környezetre (oszcilloszkóp és logikai állapot analízátor szoftvere), részben Linux környezetre voltak elérhetők, és külön gépet ezekre a feladatokra nem tudtunk allokálni (egyetlen géppel kellett megoldani ezt a feladatot). Mivel a rendelkezésre álló szerver támogatja a DirectPath I/O hardver virtualizációs megoldást is, így a mérésirányító és adatgyűjtő szerveren is tudtunk fejlesztés és tesztelést végezni egy külön virtuális gépben futtatva Linux-ot és PTPd-ét vagy linuxptp-t. A tapasztalatok alapján a továbbiakban tervezzük a virtualizációs technológiák és az IEEE 1588 működésének egymásra hatását vizsgálni (milyen pontosság érhető el különböző beállításokkal/módon virtualizált vendég operációs rendszerek esetén, milyen rendszerarchitektúra javasolható virtualizáció és IEEE 1588 együttes használata esetén).

7. Alkalmazási tapasztalatok

Az IEEE 1588 felhasználására óraszinkronizációs céllal alapvetően 3 tiszta rendszerkonfigurációban képzelhető el a rendszerkonfigurációra jellemző elvárható tulajdonságokkal.

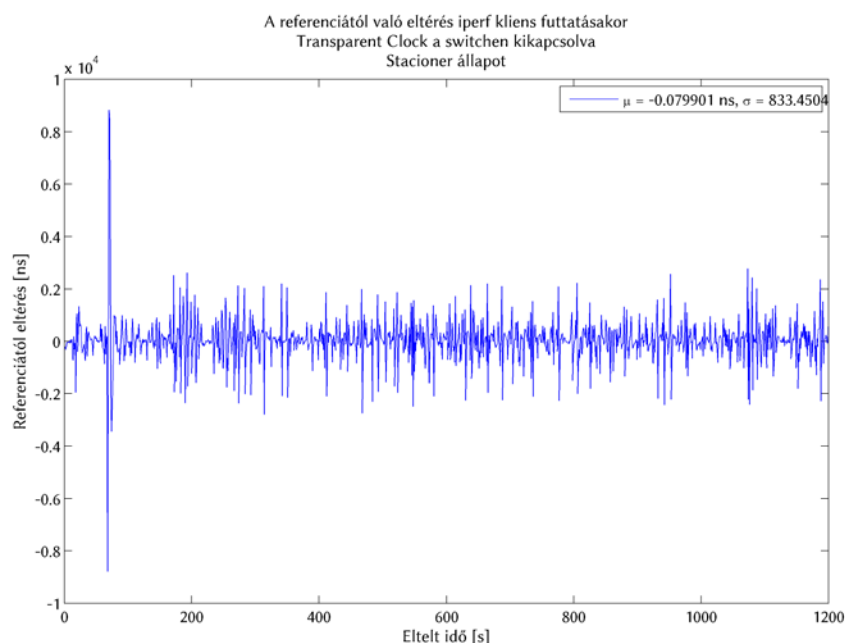
1. Tiszta szoftver IEEE 1588 implementáció a végpontokon, és IEEE 1588 támogatással nem rendelkező Ethernet kapcsolók alkalmazása (szoftver IEEE 1588 megoldás). Ebben az esetben PPS jelet sem képesek a szolgálat órák előállítani, lényegében a rendszeróra szinkronizálható az NTP-hez hasonlóan.
2. Hardver támogatott időbélyegzés (óraszinkronizáció) alkalmazása a végpontokon (mester és szolgálat órák), de nem IEEE 1588 kompatibilis Ethernet kapcsolók alkalmazása, esetleg IEEE 802.1q szerinti prioritási megoldással garantálva az IEEE 1588 keretek minimális késleltetéssel történő továbbítását (kevert IEEE 1588 implementáció).
3. Tiszta hardver támogatott IEEE 1588 alapú óraszinkronizáció, ahol a végpontok és minden Ethernet kapcsoló támogatja a szabványt hardver időbélyegzéssel (hardver IEEE 1588 megoldás).

Mind a három esetben feltételezzük, hogy a lokális mester órák GPS-szel szinkronizálódnak a globális időhöz.

A tiszta szoftver megoldás esetén a mester és szolgálat órák alkalmazás és operációs rendszer időzítése határozzák meg elsősorban az elérhető pontosságot (jellegzetesen nagyságrenddel nagyobbak, mint az Ethernet kapcsolók által okozott tipikus késleltetés). A pontosság ebben a konfigurációban méréseink szerint jellegzetesen 100 μ s alatt marad a hálózat és a mester és szolgálat gépek terhelésétől függetlenül (feltételezve az alapvető működőképesség fenntartását a terhelések esetén,

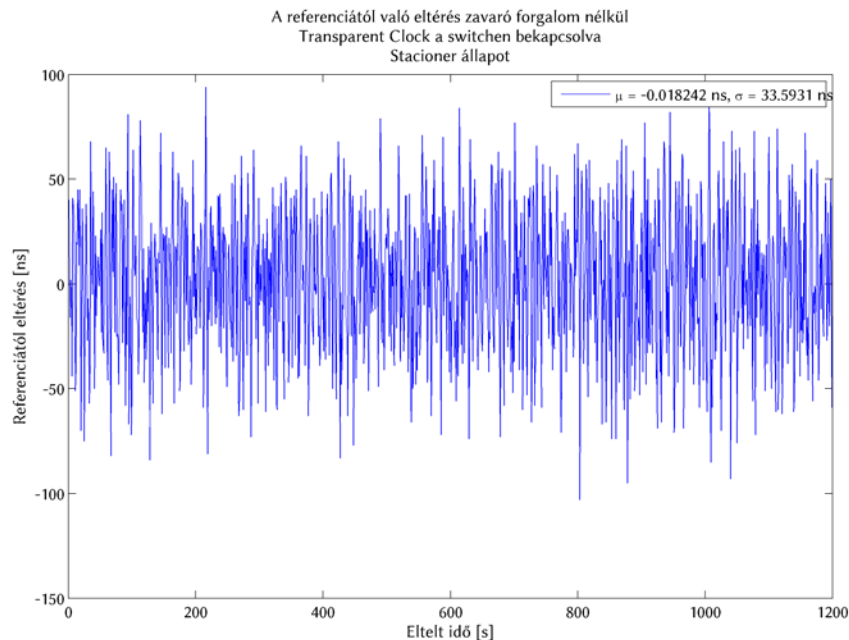
vagyis nincs túlterhelés a rendszerben), ami egy nagyságrenddel jobb a LAN-ban az NTP-vel elérhető pontosságnál, feltételezve, hogy egy GPS vagy más referencia óra alapú stratum 1 NTP szerver ebben az esetben is van a lokális hálózatban. Sajnos ebben a rendszerkonfigurációban nem lehet garanciákat adni a pontosságra, ezért ez a konfiguráció korlátozottan alkalmas mérés technika célokra, és véleményünk szerint biztosan nem alkalmazható irányítástechnika feladatok esetén.

A kevert IEEE 1588 implementációban a mester és szolga órák alkalmazási, operációs rendszer és hardver késleltetéseit mérjük és azokat kompenzáljuk, így azok nem okoznak szinkronizációs hibát. A szinkronizációs hiba elsődleges forrásai ebben a rendszerkonfigurációban az Ethernet kapcsolók által okozott késleltetések. Méréseink szerint terhelésmentes esetben a szinkronizációs hibák $15\ \mu\text{s}$ alatt maradnak egy köztes (a mester és szolga ugyan arra a kapcsolóra vannak csatlakoztatva) Ethernet kapcsoló esetén, de az aktuális terheléstől és hálózati topológiától ez az érték erősen függ. A tapasztalataink azt mutatják, hogy a kapcsolók tároló és továbbítás alapú működéséből eredő alapkésleltetés, valamint a kapcsoló kimeneti várakozási sorában várakozó keretek száma és mérete határozza meg az elérhető pontosságot a szinkronizáció során. A 802.1q szerinti mérések nem mutattak szignifikáns eltérést, ugyanis az alkalmazott terhelés véleményünk szerint nem volt képes az éppen adott terheléshez tartozó Ethernet keret küldése során úgy fogadni és a kimeneti sorba helyezni további terhelés kereteket, hogy azok meg tudják előzni az IEEE 1588 kereteket. Lényegében itt a szinkronizációs hiba az Ethernet kapcsoló késleltetése az IEEE 1588 keretekre vonatkozóan, egyben egy mérési eljárást is adva a kapcsoló késleltetésének mérésére. Egy ilyen futtatás jellegzetes eredménye látható a 2. ábrán, megmutatva, hogy terhelés hatására a szinkronizáció minősége leromlik ebben az esetben. Ez a konfiguráció elsősorban hálózati késleltetés mérések esetén alkalmazható, valamint kevésbé igényes mérés technika és irányítástechnika feladatok is megoldhatóak vele.



2. ábra Eltérés a referencia órától terhelés esetén standard (nem IEEE 1588 kompatibilis) Ethernet kapcsoló esetén. Az ábra elején tapasztalható tranziens az szolga gépen rövid ideig manuálisan futtatott iperf kliens hatására keletkezik.

A tiszta hardver támogatott megvalósítás esetén a szinkronizációs hiba méréseink szerint 150 ns alatt marad a rendszer erő terheléstől függetlenül, mint a rendszeróra, mint a PPS jel tekintetében. Egy ilyen jellegzetes futtatás eredménye látható a 3. ábrán, az iperf kliens futtatásának helye nem ismerhető fel, de az körülbelül a mérés kezdetétől számított 50-100 s környékén megtörtént.



3. ábra Eltérés a referencia órától terhelés esetén IEEE 1588 kompatibilis (transparent clock) Ethernet kapcsoló esetén. A terhelés hatása nem ismerhető fel az ábrán.

Sajnos a célként kitűzött 100 ns hiba még ebben az esetben sem érhető el biztosan. Ugyanakkor a rendszer további optimalizálásával véleményünk szerint a 100 ns alatti szinkronizációs hiba elvárás még az x86-os platformon is teljesíthető a hardver időbélyegegy alkalmazásának köszönhetően.

8. Összefoglalás

Az IEEE 1588 protokoll által nyújtott óraszinkronizáció pontossága erősen függ a használt rendszerkonfigurációtól. Garantáltan 1 μs vagy akár 100 ns (további fejlesztésekkel elérhető) alatti pontosság csak egy az IEEE 1588 protokollt teljesen támogató, hardver időbélyegzést végző rendszerben képzelhető el. Ekkor a pontosság 3-4 nagyságrenddel jobb az NTP által LAN környezetben nyújtottal, és ebben az esetben ezekre a hibákra még garancia is adhatók (azok terheléstől függetlenek, ha a terhelés nem jár teljes rendszerösszeomlással). Ha csak a végállomások alkalmaznak hardver támogatott időbélyegzést, akkor a pontosság még ebben az esetben is kb. 2 nagyságrenddel jobb az NTP-nél, de már függ a rendszert érő terheléstől. A tisztán szoftveres esetben az előny 1 nagyságrendre csökken az NTP-hez képest. Ennek megfelelően nagyobb pontossági igények esetén, valamint ha rendelkezésre áll lokális referencia mester óra (pl. GPS-szel szinkronizálva), akkor az IEEE 1588 alkalmazásával garantáltan nagyobb pontosság érhető el az NTP-hez képest még szoftveres esetben is, de igényes alkalmazásokban a teljes hardver időbélyegzés alkalmazása elkerülhetetlen.

9. Köszönetnyilvánítás

Köszönjük az Intel Corporation-nak, és azon belül is az Intel Magyarország Kft-nek hogy eszközökkel és terméktámogatási információkkal segítették az itt bemutatott fejlesztéseket.

Irodalmi hivatkozások

- [1] D. L. Mills, Computer Network Time Synchronization: the Network Time Protocol on Earth and in Space, Second Edition, New York: CRC Press, 2011.
- [2] P1588 Working Group, IEEE 1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, Piscataway, NJ, USA: IEEE Standards Association, 2008.
- [3] TeleCommunications Working Group of the Inter-Range Instrumentation Group, „IRIG standard 200-04 (PDF),” [Online]. Available: <https://wsnrc2vger.wsmr.army.mil/rcc/manuals/200-04/TT-45.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 3 3 2013].
- [4] Intel Corporation, "Intel® Ethernet Controller I210-IS," [Online]. Available: <http://ark.intel.com/products/64401>.
- [5] Intel Corporation, „Intel® Ethernet Server Adapter I340 Series,” [Online]. Available: <http://ark.intel.com/products/series/46839>.
- [6] Intel Corporation, „Intel® Ethernet Server Adapter I350 Series,” [Online]. Available: <http://ark.intel.com/products/series/59061>.
- [7] T. Kovács házy és B. Ferencz, „Hardware Assisted IEEE 1588 Clock Synchronization for Linux Based Network Embedded Systems,” *CARPATHIAN JOURNAL OF ELECTRONIC AND COMPUTER ENGINEERING*, %1. kötet4, pp. 59-64, 2011.
- [8] Ohly, Patrick and Lombard, David N and Stanton, Kevin B, „Hardware assisted precision time protocol. Design and case study,” in *Proceedings of LCI International Conference on High-Performance Clustered Computing*, Urbana, IL, USA, 2008.
- [9] Tamás Kovács házy, Bálint Ferencz, „Performance evaluation of PTPd, a IEEE 1588 implementation, on the x86 Linux platform for typical application scenarios,” in *Proceedings of the 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2012)*, Graz, Austria, 2012.