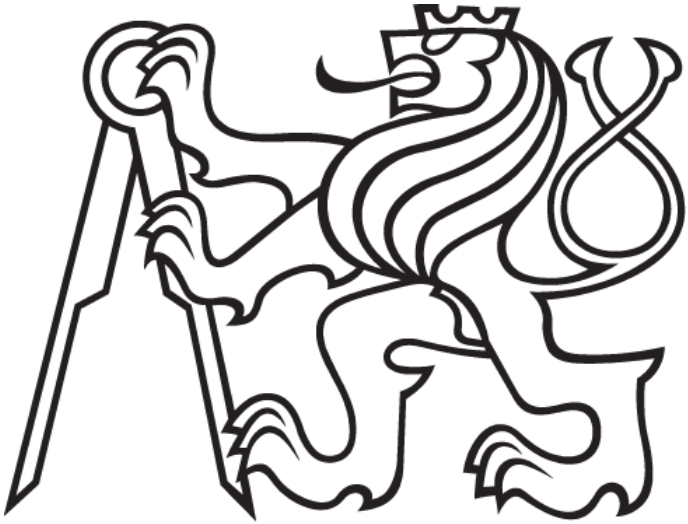
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Ing. Michal Pravda

MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ PŘESNOSTI SYNCHRONIZACE ČASU V PAKETOVÝCH SÍTÍCH

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: (2601V013) Telekomunikační technika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, srpen 2015

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na katedře telekomunikační techniky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Michal Pravda
Katedra telekomunikační techniky, FEL, ČVUT v Praze
Technická 2, Praha 6, 166 27

Školitel: Doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.
Katedra telekomunikační techniky, FEL, ČVUT v Praze
Technická 2, Praha 6, 166 27

Oponenti: .....

.....

.....

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v …… hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Telekomunikační technika v zasedací místnosti č ..... Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

……..
předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Telekomunikační technika
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

Obsah

1 Anotace 1
2 Současný stav řešené problematiky 1
3 Cíle dizertační práce 5
4 Návrh a simulace synchronizačního algoritmu 5
4.1 Model synchronizačních obvodů - aktuální stav 5
4.2 Návrh na zlepšení synchronizace 7
4.2.1 Simulace a výsledky vylepšené synchronizace 9
5 Závěr 14
6 Literatura 16
8 Publikace doktoranda 18
8.1 Publikace vztahující se k tématu disertační práce 18
8.2 Publikace nevztahující se k tématu disertační práce 19
8.3 Funkční vzorky 20
8.4 Projekty 20
9 Abstract 21

1 ANOTACE

Disertační práce se zabývá možnostmi zlepšení přesnosti synchronizace času v paketových sítích a následného přesného generování taktu ze synchronizovaného zařízení. Cílem práce bylo prostudování možností synchronizace v paketových sítích a nalezení možností, které zlepší časovou synchronizaci jednotlivých zařízení a zvýší přesnost generovaného taktu na straně klienta.

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část je zaměřena na měření a analýzu přesnosti synchronizace času v reálné síti. Při měření byla využívána zařízení s podporou Precision Time Protokolu (PTP). Vlastnosti sítě a přenosové parametry byly měněny pomocí síťového emulátoru a v závislosti na změně docházelo i ke změně výsledné přesnosti synchronizace času. Druhá část se zabývá možnostmi vylepšení přesnosti synchronizace času. Strana klienta byla rozšířena o druhé lokální hodiny H2, které umožňují pomalejší dolaďování a zvyšují tak výslednou přesnost synchronizace času klienta. Návrh klienta byl proveden univerzálně, aby mohl být použit buď pro NTP nebo PTP protokol. Při simulacích jednotlivých navržených algoritmů byly použity stejné podmínky, jako při měření v reálném prostředí a výsledky byly následně porovnávány. Výsledná přesnost synchronizace času při simulaci metody s navrženým vylepšením dosahovala lepších výsledků než při měření v reálné síti.

Výsledky simulací uvedené v této práci ukazují, že navržená metoda vylepšení klienta dosahuje vyšší přesnosti synchronizace času. V případě porovnání lokálních hodin H1 a H2 na straně klienta zjistíme, že kolísání hodin H2 je vždy nižší než hodin H1 za stejných vstupních podmínek. Toto chování je správné a bylo cílem této práce.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Paketové sítě jsou nejrychleji se rozvíjejícím typem sítí v současnosti. Přenosy přes paketové sítě jsou dnes využívané i v páteřních sítích, kde dříve byly využívané jiné technologie. Ethernet je nejznámějším zástupcem paketových sítí. Ještě před rokem 2000 se Ethernet [1] stal dominantní technologií pro drátové lokální sítě (LAN). Dnes je Ethernet definován i pro optické vlákno, kde je dosahováno rychlosti desítek Gbit/s. V závislosti na rozšiřování paketových sítí do průmyslové oblasti se vzájemná synchronizace zařízení stává požadovanou funkčností jednotlivých zařízení. Proto je synchronizace v paketových sítích velice diskutovaným problémem [2].

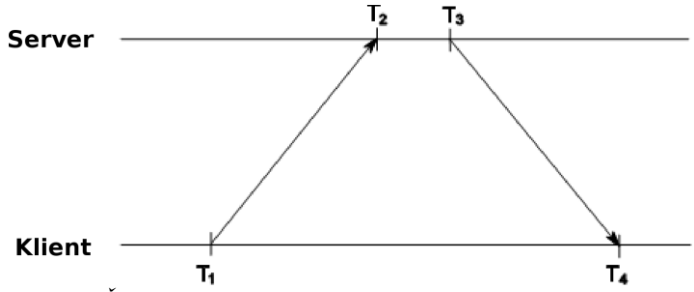
Práce se zaměřuje na synchronizaci a distribuci času v paketových sítích a následné generování přesného taktu. Network Time Protocol (NTP), Simple Network Time Protocol (SNTP) a relativně nový IEEE-1588 Precision Time Protocol (PTP) patří mezi nejrozšířenější synchronizační protokoly. Network Time Protocol [3] patří mezi nejznámější protokoly a je využíván k synchronizaci času počítačů přes Internet. SNTP [4] je zjednodušený synchronizační protokol vycházející z NTP, který má horší přesnost synchronizace. Nejnovější synchronizační protokol popisuje standard IEEE 1588 a je také známý jako PTP (Precision Time Protocol). První návrh standardu byl vydán v roce 2002, ale v roce 2008 byla vydána druhá revize tohoto dokumentu [5]. Hlavním rozdílem mezi NTP a PTP protokolem jsou možnosti jejich implementace. Zatímco NTP dovoluje pouze softwarovou implementaci, PTP protokol umožňuje jak softwarovou, tak hardwarovou implementaci. Hardwarová implementace umožňuje přesnější určení času přijetí či odeslání paketu, čímž se zvyšuje výsledná přesnost synchronizace [6].

Časová synchronizace v paketových sítích

Mezi nejznámější protokoly patří Network Time Protocol (NTP) a Precision Time Protocol (PTP). NTP je velice populární a široce rozšířený hlavně v počítačových sítích, kde se používá k synchronizaci času počítačů a jednotlivých síťových zařízení. Přesnost NTP protokolu je v řádu jednotek až desítek milisekund. PTP protokol je dnes nejpřesnějším protokolem pro synchronizaci času přes paketové sítě. Jeho přesnost při hardwarové podpoře je v řádu desítek nanosekund. NTP protokol využívá podobných principů jako PTP, nicméně hlavní důvod lepší přesnosti synchronizace u PTP je přesné určení příchodu časové značky na úrovní síťové karty, to ale vyžaduje hardwarovou implementaci protokolu. Tato vlastnost speciální hardwarové podpory může být jasnou nevýhodou oproti NTP.

Výpočet korekce času

Jednotlivé protokoly jsou založen na výměně časových zpráv mezi jednotlivými zařízeními, kterými můžou být jak servery, tak počítače či jiná síťová zařízení [3]. Jednotlivé časové značky jsou přenášeny v jednotlivých paketech. Časová značka je číslo, které udává datum a čas. Například při synchronizaci času v případě NTP pošle klient dotaz na NTP server, který doplní svou lokální časovou značku a pošle ji zpět klientovi. Jeden klient se může dotazovat současně několik NTP serverů a podle vestavěného algoritmu vybere ten nejvhodnější. Výsledná časová korekce lokálních hodin je následně vypočítávána ze všech časových značek zobrazených na následujícím ilustračním obrázku (Obr. 1).



Obr. 1 Časové značky při komunikaci klienta se serverem

Začátek komunikace zahajuje klient, který vyšle žádost ve formě NTP paketu, který obsahuje první časovou značku T_1 (čas odeslání požadavku). Poté co server přijme tuto zprávu, vygeneruje časovou značku T_2, která reprezentuje čas přijetí NTP paketu. Následně server požadavek zpracuje a posílá zpět NTP paket, do kterého těsně před odesláním doplní časovou značku T_3. Posledním krokem je přijetí paketu klientem v čase T_4.

Z těchto čtyřech časových značek je vypočítáno zpoždění sítě Δs a odchylka času serveru a klienta (offset) o.

$$\Delta s = \frac{\big((T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)\big)}{2}$$

Výpočet síťového zpoždění předpokládá, že zpoždění ve směru od klienta k serveru je stejné jako ve směru od serveru ke klientovi. Přesně jsme schopni určit jen celkové zpoždění tam i zpět $(T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)$.

Rozdíl času serveru a klienta vyjadřuje, o kolik se má čas klienta upravit, aby odpovídal času serveru. Následující rovnice prezentuje ideální případ, kdy čas klienta je přesně zasynchronizován s časem serveru.

$$T_4 = T_3 + \Delta s$$

V případě, že klient není zasynchronizován, musí se k času klienta přičíst korekce o, která čas klienta upraví. Výsledný výpočet hodnoty korekce po úpravách je uveden ve vztahu \ref{eq:NTPkomunikace3}.

$$T_4 + o = T_3 + \Delta s$$

$$o = \frac{(T_2 - T_1 + T_3 - T_4)}{2}$$

Porovnání jednotlivých protokolů

Všechny protokoly, kromě synchronního Ethernetu, jsou používány v prostředí internetu a jejich zprávy se přenášejí po paketových sítích. Hlavním problémem paketových sítí je proměnné zpoždění, které je dáno architekturou paketové sítě a nelze ho předvídat. Každé zařízení, které je vloženo do přenosové cesty, přidává k celkovému zpoždění určitou malou část a jednotlivé protokoly se snaží toto zpoždění změřit a korigovat.

Protokol NTP je jeden z nejstarších protokolů, který se stále vyvíjí a dokáže konkurovat i novým protokolům. Jeho hlavní výhodou je dostupnost po celém internetu. Přesnost tohoto protokolu není příliš vysoká. Mnohem lépe je na tom PTP protokol podle standartu IEEE 1588, který poskytuje mnohem větší přesnost. Přesnost tohoto protokolu je udávaná v řádu desítek nanosekund při hardwarové implementaci [7] a okolo jedné mikrosekundy při softwarové implementaci [8]. PTP protokol ve své hardwarové verzi využívá ke své synchronizaci jednotlivá zařízení s podporou tohoto protokolu, a proto není zatížen zpožděním jiných síťových prvků, které by se v síti neměli vyskytovat.

Zhodnocení současného stavu

Synchronizace času pomocí paketových sítí je stále velice diskutovaným problémem. Princip časové synchronizace byl poprvé vymyšlen a použit před více než 20 roky u NTP protokolu. Mnoho zařízení vyžaduje stále větší přesnost synchronizace času, která ovlivňuje generování taktu jak pro vnitřní obvody zařízení, tak i jako externí zdroj pro další zařízení, a proto jsou synchronizační protokoly stále vylepšovány. PTP protokol (standard IEEE1588) je nyní nejpřesnějším protokolem pro synchronizaci času v lokálních sítích. Jeho nevýhodou je nutnost použití jednotlivých zařízení s podporou tohoto protokolu, což vyžaduje finanční investice. Přesnost PTP protokolu je v řádu desítek nanosekund. Dalším protokolem, který se dnes hojně využívá k synchronizaci času v počítačích, je protokol NTP. Přesnost NTP protokolu je v řádu jednotek milisekund. Přesnost časové synchronizace závisí na mnoha faktorech, které byly popsány v předešlých kapitolách. Hlavními faktory jsou rozptyl zpoždění v jednotlivých směrech při přenosu paketů a přesné určení času příchodu a odchodu paketu.

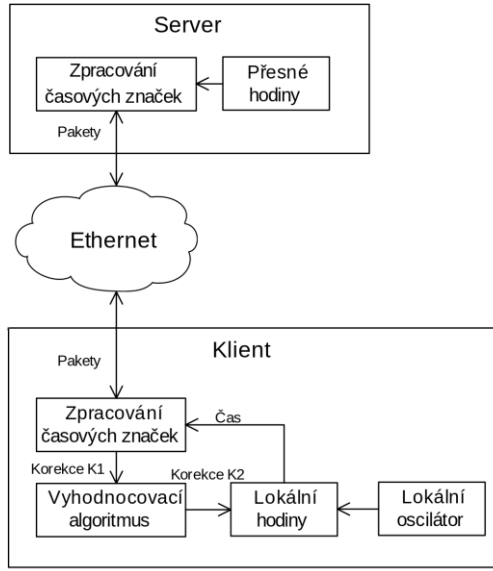
Díky jednotlivým měřením a prostudovaným článkům [8], [9], [6], [7], [10] byly zjištěny jednotlivé parametry, které nejvíce ovlivňují výslednou přesnost. Následující část práce se zaměřuje na možnosti vylepšení synchronizačního algoritmu. Nabízí se několik různých možností, které budou analyzovány a pomocí simulací ověřeny.

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

- Analýza a měření vlivu velikosti zpoždění sítě na přesnost synchronizace.
- Sestavení modelu a vytvoření simulačního programu, který bude provádět synchronizaci času klienta a reflektovat aktuální stav a funkci synchronizačního algoritmu.
- Snížení vlivu kolísání zpoždění na přesnost synchronizace a zvýšení přesnosti synchronizace času a generování taktu klienta.
- Sestavení modelu a vytvoření simulačního programu s vylepšenou synchronizací, který bude provádět synchronizaci času klienta a bude obsahovat vylepšení a rozšíření synchronizačního algoritmu.

4 NÁVRH A SIMULACE SYNCHRONIZAČNÍHO ALGORITMU

4.1 Model synchronizačních obvodů - aktuální stav



Obr. 2 Blokové schéma synchronizace času

Úkolem první části je vytvoření simulačního programu, který bude odpovídat reálnému chování synchronizačních protokolů v síti. Vstupní parametry, které budeme zadávat, budou ovlivňovat jednotlivé vlastnosti Ethernet sítě. Přes tuto síť bude probíhat komunikace meze klientem a serverem. Základní blokové schéma, které zobrazuje strukturu serveru a klienta je zobrazen na obrázku 2.

Strana serveru (hlavního poskytovatele času) je poměrně jednoduchá. Ať už se jedná o NTP server nebo PTP server, základem je přesný čas, který musí splňovat určitou přesnost a stabilitu. Tento čas je předáván do jednotky „Zpracování časových značek“, která se stará o komunikaci s klienty a poskytuje jim přesný čas. Přenos paketů probíhá přes paketovou síť. Dnes je nejvíce rozšířena síť Ethernet. Zde může být zastoupen různý počet zařízení, což záleží na vzdálenosti mezi serverem a klientem. U PTP se předpokládá vzdálenost mnohem menší s adekvátním hardwarovým vybavením.

V případě klienta je situace složitější, protože na straně klienta musí být prováděno vyhodnocení, zda vypočtená korekce času je správná a o kolik se má upravit čas klienta. Po každém příjmu synchronizačního paketu je vypočítán časový rozdíl klienta a serveru podle vzorců uvedených v kapitole 2 a tento výsledek je dále zpracováván vyhodnocovacím algoritmem, který určí výslednou korekci hodin klienta. Dále klient obsahuje už jen hodiny, které jsou řízeny lokálním oscilátorem.

Vyhodnocovací algoritmus klienta

Při vyhodnocení jednotlivých časových rozdílů serveru a klienta a určení výsledné korekce klienta je nutné určit průměrnou hodnotu, která se musí co nejvíce blížit přesné korekci hodin.

Jako vyhodnocovací algoritmus byl použit FIR filtr (Finite Impulse Response) s řádem 10. Jako vstupní hodnoty pro filtr jsou použity časové korekce K1 vypočítané z přijatých paketů. Výchozí parametry algoritmu pro vyhodnocování časové korekce byly stanoveny experimentálně. Při návrhu jsem zvolil dolní propust s mezním kmitočtem propustného pásma 0,03 Hz a vzorkovacím kmitočtem 1 Hz.

Bylo provedeno několik simulací s různými vstupními podmínkami. Vstupní veličiny definují chování Ethernetu. Při každé simulaci nastavujeme střední hodnotu zpoždění paketu v síti a dále k této hodnotě přičítáme určitý rozptyl. Byla provedena simulace a následně i měření s emulátorem sítě pro střední hodnotu zpoždění 3 ms a 10 ms a s rozptylem 1, 2 a 3 ms. Výsledky simulací jsou uvedeny v tabulce 1.

Zpoždění sítě		Výsledná přesnost synchronizace			
Střední hodnota [s]	Rozptyl	Střední hodnota [s]	Směrodatná odchylka [s]	Min [s]	Max [s]
3e-3	1e-3	5,5e-6	3,5e-4	-1,3e-3	1,5e-3
3e-3	2e-3	9,5e-6	6,6e-4	-2,3e-3	2,4e-3
3e-3	3e-3	-6,8e-6	9,2e-4	-3,3e-3	3,6e-3
1e-2	1e-3	2,6e-6	3,4e-4	-1,2e-3	1,2e-3
1e-2	2e-3	5,1e-6	6,9e-4	-2,3e-3	2,5e-3
1e-2	3e-3	9,9e-6	1,1e-3	-3,8e-3	3,7e-3

Tab. 1 Výsledky simulací při různých podmínkách nastavení sítě

Statistické hodnoty byly vypočítány až po stabilizaci hodin klienta. Vliv změny střední hodnoty zpoždění paketů v simulované síti na výslednou přesnost synchronizace je zanedbatelný. Hlavním faktorem, který má vliv na přesnost synchronizace času klienta, je proměnlivé zpoždění paketů v jednotlivých směrech přenosu. **Čím větší rozptyl zpoždění, tím horší přesnost synchronizace času klienta.**

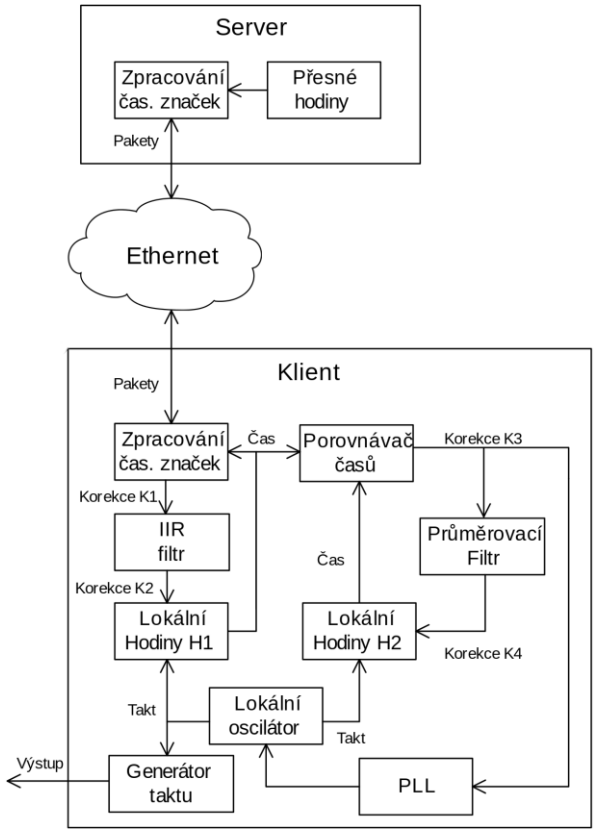
4.2 Návrh na zlepšení synchronizace

Cílem této kapitoly je navrhnout vylepšený synchronizační algoritmus tak, aby došlo ke zvýšení přesnost času na straně klienta. Jednou z metod je využití optimalizovaného filtru, aby byla přesnější korekce času klienta. Další možností je využití několika hodin na straně klienta, které se budou vzájemně dolaďovat. Bylo navrženo rozšíření standardního blokového schématu uvedeného na obrázku 2 a nové blokové schéma je uvedeno na obrázku 3.

Z blokového schématu je patrné značné rozšíření strany klienta. Došlo k přidání druhých lokálních hodin označených jako H2 a k nim příslušejících obvodů. Smyčka lokálních hodin H1 zůstala stejná jako u základního stavu. Při hledání vhodného filtru je potřeba se zabývat stabilitou celého obvodu. Stabilita a jednotlivá rizika jsou popsána v disertační práci. Stabilita filtru samo o sobě neznamená, že celý systém bude stabilní. Celý systém je potřeba řešit jako systém se zpožděním a jedním z hlavních požadavků je minimalizace zpoždění. Závěrem bylo nahrazení FIR filtru IIR filtrem, který dosahoval lepších výsledků. Byl použit IIR filtr typu dolní propust řádu 4 s mezním kmitočtem propustného pásma 0,03 Hz a vzorkovacím kmitočtem 1 Hz.

Za účelem vyšší přesnosti synchronizace času je výsledný čas hodin H1 porovnáván s časem hodin H2. Čas lokálních hodin H2 je zpřesňován pomocí

korekcí K4, které jsou vypočítávány s menší frekvencí než v případě hodin H1, které jsou řízeny korekcí K2. O určení výsledné korekce K4 se stará průměrovací filtr, který shromažďuje časové rozdíly jednotlivých hodin H1 a H2 (Korekce K3).



Obr. 3 Rozšířené blokové schéma synchronizace času

Další a zároveň poslední smyčka se stará o dolaďování lokálního oscilátoru a v blokovém schématu je označena jako PLL. Pokud lokální oscilátor není zcela přesný, bude se čas klienta a serveru postupně rozcházet a výsledné korekce jednotlivých hodin budou stále kladné či záporné. Stabilita lokálního oscilátoru je velice důležitá i v případě využití taktovacího signálu pro další zařízení a vytvoření přesného generátoru taktu. Fázová smyčka lokálního oscilátoru má za úkol určit výslednou nepřesnost z korekcí K3 a

doladit lokální oscilátor na co nejpřesnější hodnotu z pohledu dlouhodobé stability.

4.2.1 Simulace a výsledky vylepšené synchronizace

V této části je uvedeno vylepšení výsledné synchronizace času v podobě přidaných dalších hodin. Účelem hodin H2 je zamezit velkému kolísání přesnosti času, a proto bude řízení probíhat mnohem pomaleji než je tomu v případě prvních hodin. Jak je uvedeno v blokovém schématu principu synchronizace (Obr. 3), jsou druhé hodiny nastavovány a dolaďovány z prvních hodin.

Díky využití IIR filtru dochází u lokálních hodin H1 k mnohem přesnější synchronizaci času za stejných vstupních podmínek. Stejně jako hodiny H1 jsou i hodiny H2 řízeny stejným taktem. Během simulace jsem zvolil takt 1 MHz (perioda 1 μs), který jsem také definovaným způsobem na počátku znepřesnil (typicky řádově odchylka 2 Hz) a analyzoval jsem správnou funkci dolaďování oscilátoru.

Hodiny H2 se chovají stejně jako hodiny H1. Úprava času hodin je prováděna pomocí korekce K4, která vychází z průměrovacího filtru. Samozřejmě na začátku jsou hodiny H2 nastaveny přímo z hodin H1 a to po dostatečném ustálení času hodin H1. Výsledný čas hodin H2 a hodin H1 je porovnáván v bloku nazvaným jako Porovnávač časů. Výsledkem je rozdíl časů hodin H1 a H2. Tento rozdíl je dále propagován jako korekce K3, která vstupuje do průměrovacího filtru a také do fázového závěsu, který řídí dolaďování oscilátoru.

Průměrovací filtr

Průměrovací filtr slouží k ukládání hodnot jednotlivých korekcí K3 a po získání dostatečného počtu hodnot určí výslednou korekci K4 pro hodiny H2. Jelikož je potřeba získat korekci jednou za určité delší období, nebylo možné použít žádný standardní filtr, protože stupeň filtru by byl extrémně veliký. Také by docházelo ke korekci při každé vstupní hodnotě, což je nežádoucí. Pro průměrovací filtr zavedeme obecnou veličinu δ (delta), která bude určovat počet průměrovaných vzorků. Tato δ také určuje dobu, za kterou jsou hodiny korigovány. Průměrovací filtr provádí prostý průměr hodnot, který vypočítá jednu hodnotu z δ předchozích hodnot. Hlavním cílem je zamezit nežádoucím výchylkám, které můžou negativně ovlivnit přesnost času hodin H2. Na základě provedených simulací s různou hodnotou δ, byla jako optimální hodnota zvolna hodnota 50. V případě větší hodnoty δ je potřeba si uvědomit, že tato hodnota má vliv na rychlost úpravy času hodin H2. Čím větší počet

průměrovaných hodnot, tím delší bude čas potřebný k přesnému doladění hodin z chybného počátečního stavu. Proto je vhodné zachovat hodnotu δ v mezích stanovených následujícím vztahem:

$$30 \leq \delta \leq 100$$

V závislosti na velikosti rozdílu času hodin H1 a H2 bylo zvoleno odstupňování velikostí jednotlivých výsledných korekcí K4. Samotný průměr $\bar{x}$ rozdílu časů H1 a H2 získaných z počtu hodnot δ nelze přímo použít jako korekci K4. Důvodem je neměnící se čas hodin H2, které se korigují jednou za delší časový úsek daný hodnotou δ. Proto je korekce K4 určována podle následujících vztahů:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{\delta} H1_i - H2_i}{\delta}$$

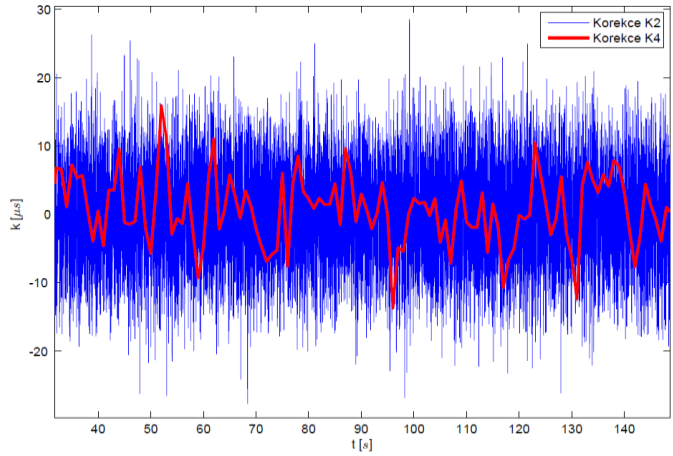
Výsledná korekce K4 je pro jednotlivé případy vypočítána takto:

$$\text{Pokud } \bar{x} > 5\ \mu s \text{ nebo } \bar{x} < -5\ \mu s \text{ tak } K4 = \frac{\bar{x}}{\delta} * 10$$

$$\text{Pokud } 5\ \mu s \geq \bar{x} > 2\ \mu s \text{ nebo } -5\ \mu s \leq \bar{x} < -2\ \mu s \text{ tak } K4 = \frac{\bar{x}}{\delta} * 4$$

$$\text{Pokud } 2\ \mu s \geq \bar{x} > 1\ \mu s \text{ nebo } -2\ \mu s \leq \bar{x} < -1\ \mu s \text{ tak } K4 = \frac{\bar{x}}{\delta} * 2$$

$$\text{Pokud } 1\ \mu s \geq \bar{x} \geq -1\ \mu s \text{ tak } K4 = \frac{\bar{x}}{\delta}$$



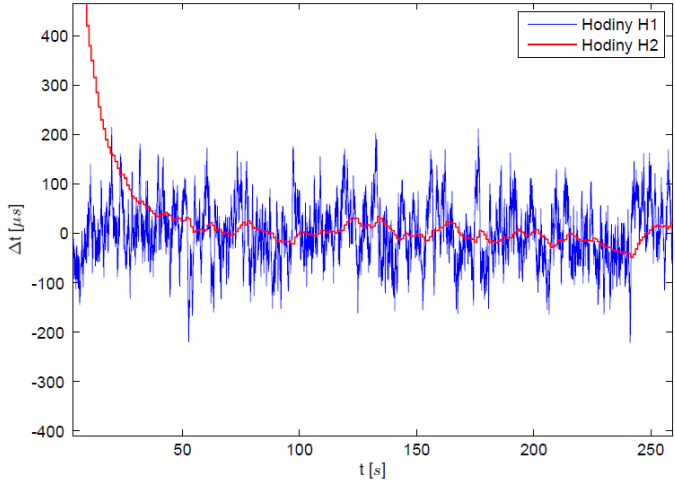
Obr. 4 Výsledné korekce K4 a K2 při střední hodnotě zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms

Skutečné hodnoty jednotlivých korekcí K4 jsou uvedeny na následujícím obrázku (Obr. 4) společně s korekcemi K2, které jsou určovány IIR filtrem.

Při porovnání je výsledná velikost korekce K4 menší a pozvolnější, což bylo hlavním cílem. To výrazným způsobem ovlivní výslednou přesnost hodin H2.

Výsledná přesnost hodin H2

Hodiny H2 jsou řízeny stejným lokálním oscilátorem jako hodiny H1, ale čas hodin H2 je upravován a zpřesňován pomocí korekcí. Tyto korekce jsou přičítány k času hodin H2 a postupně dochází ke zpřesňování času H2 tak, aby se co nejvíce blížil času serveru. Po stabilizaci je maximální rozdíl času mezi hodinami H2 a serverem okolo 50 µs. Když si hodiny H1 a H2 dáme do stejného grafu, ukáže se nám výsledný efekt zpřesnění času. Toto porovnání je uvedeno na následujícím obrázku (Obr. 5).



Obr. 5 Rozdíl času serveru a času hodin H1 a H2 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms

Modrá křivka reprezentuje rozdíl času hodin H1 a serveru, červená křivka ukazuje rozdíl času hodin H2 a serveru. Na začátku je čas hodiny H2 úmyslně posunut a je zde vidět postupné zpřesnění času hodin H2. Hodiny H1 jsou samozřejmě v tomhle ohledu rychlejší, protože jsou řízeny z přijatých paketů a IIR filtru, jak už bylo zmíněno dříve. Výsledný průběh rozdílu času hodin H2 a serveru je vyrovnaný a přesnější. Výsledky simulace potvrdily předpoklad chování celého systému. Pokud porovnáme maximální odchylky

časů hodin H1 a H2 oproti serveru (H1 max okolo 200 µs a H2 max okolo 50 µs), tak se výsledná přesnost zlepšila 4x. Přesnost v řádu desítek mikrosekund při průměrném zpoždění sítě 3 ms a rozptylem paketů 1 ms je velice dobrá.

Všechny výsledky, které byly v této podkapitole uvedeny, byly simulovány za stejných podmínek nastavení sítě. Jedná se o případ, kdy střední hodnota zpoždění sítě byla nastavena na 3 ms a rozptyl tohoto zpoždění byl 1 ms. Z toho vyplývá, že zpoždění jedním směrem bylo generováno v rozmezí od 2 ms do 4 ms. Simulace byly prováděny i pro ostatní hodnoty zpoždění, stejně jako při simulaci aktuálního stavu, abychom mohli jednotlivé výsledky porovnat. Následující tabulky Tab. 2 a Tab. 3 zobrazují výsledky přesnosti času klienta oproti času serveru pro jednotlivé simulace.

Zpoždění sítě		Výsledná přesnost synchronizace hodin H1			
Střední hodnota [s]	Rozptyl	Střední hodnota [s]	Směrodatná odchylka [s]	Min [s]	Max [s]
3e-3	1e-3	4,2e-6	6,4e-5	-2,2e-4	2,2e-4
3e-3	2e-3	8,6e-6	1,2e-4	-4,4e-4	4,6e-4
3e-3	3e-3	1,2e-5	1,6e-4	-6,3e-4	6,4e-4
1e-2	1e-3	-7,9e-6	5,8e-5	-2,2e-4	1,8e-4
1e-2	2e-3	7,2e-6	1,2e-4	-4,3e-4	4,1e-4
1e-2	3e-3	1,1e-5	1,8e-4	-6,5e-4	6,1e-4

Tab. 2 Výsledky přesnosti synchronizace hodin H1 při různých podmínkách nastavení sítě

Tabulka 2 zobrazuje výslednou přesnost času hodin H1 pro jednotlivé varianty simulací. Rozdíl výsledných hodnot oproti tabulce 1, kde při simulacích byl použit jiný filtr, je znatelný. Podle vypočítaných statistických hodnot přináší použití IIR filtru zlepšení přesnosti synchronizace času o necelý jeden řád.

Zpoždění sítě		Výsledná přesnost synchronizace hodin H2			
Střední hodnota [s]	Rozptyl	Střední hodnota [s]	Směrodatná odchylka [s]	Min [s]	Max [s]
3e-3	1e-3	3,8e-6	1,8e-5	-4,8e-5	4,6e-5
3e-3	2e-3	8,8e-6	3,2e-5	-8,3e-5	9,2e-5
3e-3	3e-3	8,5e-6	4,2e-5	-1,1e-4	1,1e-4
1e-2	1e-3	-5,2e-6	2,1e-5	-3,4e-5	7,2e-5
1e-2	2e-3	1,2e-5	3,1e-5	-5,2e-5	8,6e-5
1e-2	3e-3	2,2e-5	4,3e-5	-7,1e-5	1,1e-4

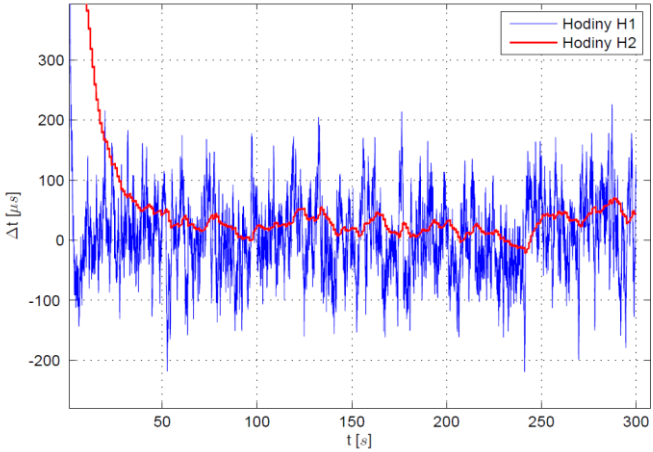
Tab. 3 Výsledky přesnosti synchronizace hodin H2 při různých podmínkách nastavení sítě

V případě porovnání přesnosti hodin H1 a H2 na straně klienta je vidět rozdíl přibližně o jeden řád. Hodiny H2 vykazují vyšší stabilitu, která již byla ukázána na obrázku 9, kde je zobrazeno porovnání přesnosti synchronizace času hodin H1 a H2. Výsledky simulací potvrdily předpoklad, kdy výsledná přesnost času hodin H2 dosahuje nejvyšších hodnot. Střední hodnota zpoždění nemá zásadní vliv na výslednou přesnost synchronizace, což je názorně vidět i v tabulkách.

Lokální oscilátor a jeho dolaďování

Dalším důležitým bodem, který byl řešen v rámci disertační práce, je stabilizace a doladění lokálního oscilátoru, který řídí jak hodiny H1 tak i hodiny H2. V případě jednotlivých zařízení a výrobků se stabilita použitých oscilátorů značně liší. Kvalitativně vyšší třída zařízení využívá lepších oscilátorů, což je ale vykoupeno vyšší cenou celého zařízení a i u těchto zařízení je potřeba určité dolaďování daného oscilátoru (nucená synchronizace).

Simulace je realizována s oscilátorem o frekvenci 1 MHz. Během simulace je řízení oscilátoru zjednodušeno a blok PLL se také chová jako průměrovací filtr. Provádí se dlouhodobé vyhodnocování korekce K3, která udává rozdíl hodin H1 a H2 a následně dochází k výpočtu průměru těchto dat. Na začátku simulace byla nepřesnost lokálního oscilátoru nastavena na +2 Hz. Tato nepřesnost způsobí předbíhání hodin, což zapříčiní převážně kladnou korekci, která je zobrazena na následujícím obrázku (Obr. 6).



Obr. 6 Rozdíl času serveru a času hodin H1 a H2 při chybě lokálního oscilátoru o 2 Hz v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylem 1 ms

Z tohoto obrázku je patrné, že výsledné korekce hodin H2 (červená křivka) je převážně nad hodnotou 0, čemuž odpovídá i střední hodnota 26 µs (Tab. 4). Tato hodnota se významně liší oproti hodnotě 3,8 µs, kdy bylo dolaďování oscilátoru funkční. Doladění oscilátoru má významný vliv na celkovou přesnost synchronizace a to zejména na rozdíl střední hodnoty času klienta oproti času serveru.

Zpoždění sítě			Výsledná přesnost synchronizace hodin H2			
Střední hodnota [s]	Rozptyl	Dolaď. oscilátoru	Střední hodnota [s]	Směrodatná odchylka [s]	Min [s]	Max [s]
3e-3	1e-3	ne	2,6e-5	1,7e-5	-2,2e-5	7,1e-5
3e-3	1e-3	ano	3,8e-6	1,8e-5	-4,8e-5	4,6e-5
3e-3	2e-3	ne	2,9e-5	2,6e-5	-2,3e-5	9,9e-5
3e-3	2e-3	ano	8,8e-6	3,2e-5	-8,3e-5	9,2e-5

Tab. 4 Výsledky přesnosti synchronizace hodin H2 v závislosti na doladění oscilátoru

5 ZÁVĚR

Hlavním tématem této disertační práce je synchronizace času v paketových sítích, a to zejména možnosti rozšíření a vylepšení stávajících metod synchronizace času a jejich algoritmů. V rámci disertační práce bylo postupováno systematicky od základní analýzy problému přes jednotlivá měření parametrů sítě až po modelování synchronizace času, návrhy na zlepšení činnosti algoritmu synchronizace času a prokázání jeho účinnosti. Práce byla rozdělena do jednotlivých částí podle následujících cílů.

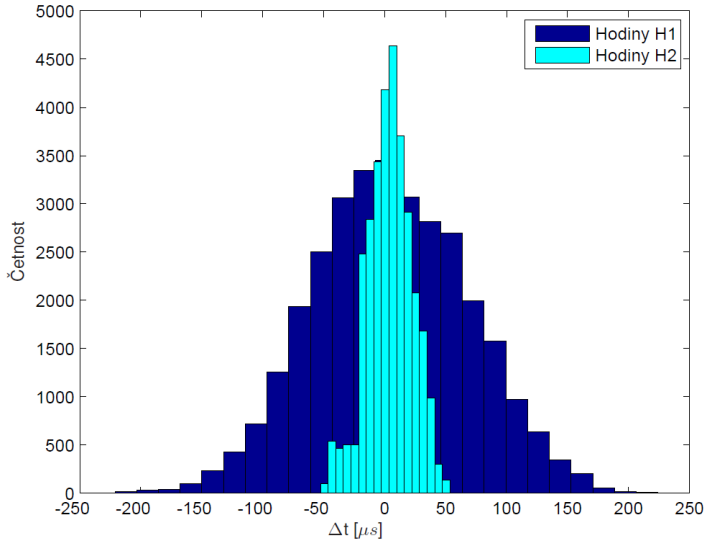
Splněné cíle disertační práce:

- Analýza a měření vlivu velikosti zpoždění sítě na přesnost synchronizace
- Simulační program s aktuálním stavem a funkcí synchronizačního algoritmu
- Snížení vlivu kolísání zpoždění na přesnost synchronizace a zvýšení přesnosti synchronizace
- Vytvoření simulačního programu s vylepšenou synchronizací

Hlavním cílem bylo prozkoumat možnosti vylepšení přesnosti synchronizace hodin na straně klienta s návazností na generování přesného

taktu klientem. Bylo postupně vytvořeno a testováno několik postupů, které vedly k vytvoření konceptu využívajícího dvou lokálních hodin. Popis a řešení problému je detailně rozebráno v kapitole 4.2 a hlavní blokové schéma systému na straně klienta je uvedeno na obrázku 6.

Hlavní princip vylepšení spočívá v přidání druhých lokálních hodin H2, které jsou dolaďovány smyčkou s průměrováním odchylky času, a dále zavedení zpětné vazby na doladění lokálního oscilátoru, který udává takt pro lokální hodiny H1, H2 a zároveň slouží pro generování externího taktu pro případná další zařízení. Výsledky simulací jsou uvedeny v kapitole 4.2.1. Porovnání přesností vnitřních hodin H1 a H2 je názorně zobrazeno na následujícím obrázku (Obr. 7).



Obr. 7 Histogram četností rozdílu času serveru a času hodin H1 a H2 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms

V případě porovnání přesnosti hodin H1 a H2 na straně klienta je patrný rozdíl přibližně o jeden řád, přičemž hodiny H2 vykazují vyšší stabilitu (Obr. 7). Výsledky simulací potvrdily předpoklad, že výsledná přesnost času hodin H2 dosahuje vyšší stability oproti hodinám H1. Jak už bylo řečeno dříve, střední hodnota zpoždění nemá zásadní vliv na výslednou přesnost synchronizace, což je názorně vidět jak v tabulkách 2 a 3, tak i v případě porovnání předchozích obrázků.

Další vliv na výslednou přesnost synchronizace má stabilita a dolaďování lokálního oscilátoru. Lokální oscilátor udává takt pro lokální hodiny H1, H2 a pro generátor externího taktu. Doladění oscilátoru má významný vliv na celkovou přesnost synchronizace.

6 LITERATURA

[1] *IEEE 802.3, Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications*, 2005.

[2] S. Bregni. *Synchronization of Digital telecommunications Networks. Wiley*, 2002.

[3] *RFC 1305, Network Time Protocol (Version 3)*, 1992.

[4] *RFC 2030, Simple Network Time Protocol (SNTP) Version 4*, 1996.

[5] *IEEE 1588, Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*, 2008.

[6] T. Neagoe, V. Cristea, and L. Banica. Ntp versus ptp in computer networks clock synchronization. In *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on*, volume 1, pages 317 –362, july 2006.

[7] H. Weibel. High precision clock synchronization according to ieee 1588 implementation and performance issues. Dostupný z WWW: http://www.engineering.zhaw.ch/fileadmin/user upload/engineering/ _Institute_und_Zentren/INES/Documents/IEE1588/embedded_World_ 05_Contribution_final_02.pdf, 2005.

[8] T. Kovacshazy and B. Ferencz. Performance evaluation of ptpd, a ieee 1588 implementation, on the x86 linux platform for typical application scenarios. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International*, pages 2548 –2552, may 2012.

[9] J. Han and D. Jeong. A practical implementation of ieee 1588-2008 transparent clock for distributed measurement and control systems. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 59(2):433–439, 2010.

[10] D. Fontanelli and D. Macii. Accurate time synchronization in ptp-based industrial networks with long linear paths. In *Precision Clock*

Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS), 2010 International IEEE Symposium on, pages 97–102, Sept 2010.

8 PUBLIKACE DOKTORANDA

Spoluautorský podíl je u všech publikací stejný.

8.1 Publikace vztahující se k tématu disertační práce

Publikace v recenzovaných časopisech

[A11] Pravda, M. - Vodrážka, J. Designing of Method for Improving Synchronization Accuracy in Packet Networks In: *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS).* 2013, vol. 3, p. 244-249. Available from WWW: <http://iasir.net/IJETCASpapers/IJETCAS12-378.pdf> ISSN 2279-0055. Podíl doktoranda 50%

[A12] Pravda, M. - Lafata, P. - Vodrážka, J. Time Synchronization in Packet Networks and Influence of Network Devices on Synchronization Accuracy In: *Elektrorevue.* 2010, vol. 13, no. 2010/84, p. 84-1-84-6. Available from WWW:<http://www.elektrorevue.cz/en/articles/analogue-technics/105/time-synchronization-in-packet-networks-and-influence-of-network-devices-on-synchronization-accuracy/> ISSN 1213-1539. Podíl doktoranda 33%

[A13] Pravda, M. Protokoly k synchronizaci času pro paketovou síť In: *Access server.* 2008, roč. 6., č. 2008100001, s. 1-6. Dostupný z WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008100001> ISSN 1214-9675. Podíl doktoranda 100%

[A14] Pravda, M. Synchronizační jednotka pro paketovou síť In: *Access server.* 2008, roč. 6., č. 2008100004, s. 1-5. Dostupný z WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008100004> ISSN 1214-9675. Podíl doktoranda 100%

Publikace ve sbornících konferencí evidovaných ve Web of science

[A15] Pravda, M. - Lafata, P. - Vodrážka, J. Precise Time Protocol in Ethernet over SDH Network In: *34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing.* Brno: VUT v Brně, FEKT, 2011, p. 170-174. ISBN 978-1-4577-1409-2. Podíl doktoranda 33%

[A16] Pravda, M. - Vodrážka, J. - Lafata, P. Simulations and Measurements of Packet Network Synchronization by Precision Time Protocol In: *35th International Conference Telecommunications and Signal Processing.*

Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012, art. no. 0203, p. 116-120. ISBN 978-1-4673-1118-2. Podíl doktoranda 33%

[A17] Pravda, M. - Kocur, Z. Time Synchronization through Network Time Protocol and Improvement of Its Accuracy In*: TSP - 32nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing.* Budapest: Asszisztencia Szervező Kft., 2009, ISBN 978-963-06-7716-5. Podíl doktoranda 50%

[A18] Pravda, M. - Lafata, P. - Vodrážka, J. Precision Clock Synchronization Protocol and Its Implementation into Laboratory Ethernet Network In: *TSP 2010 - 33rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing.* Budapest: Asszisztencia Szervező Kft., 2010, p. 286-291. ISBN 978-963-88981-0-4. Podíl doktoranda 33%

Publikace ve sbornících mezinárodních konferencí

[A19] Kocur, Z. - Pravda, M. - Vodrážka, J. Enhancement Ethernet Network Emulator In: *Digital Technologies* 2009. Žilina: TU v Žilině, 2009, vol. 1, ISBN 978-80-554-0150-8. Podíl doktoranda 33%

Ostatní publikace

[A20] Pravda, M. Transmission of Synchronization across Packet Network. In: *Workshop 2010.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, p. 132-133. ISBN 978-80-01-04513-8. Podíl doktoranda 100%

8.2 Publikace nevztahující se k tématu disertační práce

Skripta

[A21] Lafata, P. - Hampl, P. - Pravda, M. Digitální technika 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2011. 164 s. ISBN 978-80-01-04914-3. Podíl doktoranda 33%

Publikace ve sbornících konferencí evidovaných ve Web of science

[A22] Lafata, P. - Pravda, M. Analyzing and Modeling of Far-End Crosstalk in Twisted Multi-Pair Metallic Cables In: *2011 International Conference on Applied Electronics.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011, p. 223-226. ISSN 1803-7232. ISBN 978-80-7043-987-6. Podíl doktoranda 50%

[A23] Pravda, M. - Zavrtálek, J. - Nemčík, M. Voice Transmission Quality Testing and the Design of Measuring Unit In: *TSP 2010 - 33rd International Conference on Telecommunications and Signal*

Processing. Budapest: Asszisztencia Szervező Kft., 2010, p. 397-401. ISBN 978-963-88981-0-4. Podíl doktoranda 33%

[A24] Pravda, M. - Nemčík, M. Voice Transmission Quality Tester In: *Applied Electronic 2010.* Pilsen: University of West Bohemia, 2010, p. 277-280. ISSN 1803-7232. ISBN 978-80-7043-865-7. Podíl doktoranda 50%

Ostatní publikace

[A25] Nemčík, M. - Pravda, M. - Vodrážka, J. Měřič kvality přenosu řeči In: *Access server*. 2010, roč. 8, č. 1, s. 1-4. Dostupný z WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010010001> ISSN 1214-9675. Podíl doktoranda 33%

8.3 Funkční vzorky

[A26] Pravda, M. Synchronizační jednotka pro paketovou síť [Funkční vzorek]. 2008. Vlastník: STROM telecom s.r.o. Podíl doktoranda 100%

[A27] Nemčík, M. - Pravda, M. Měřič kvality přenosu řeči [Funkční vzorek]. 2009. Vlastník: ČVUT FEL Podíl doktoranda 50%

[A28] Pravda, M. - Vodrážka, J. - Zavrtálek, J. Měřič kvality hovoru (VTQ tester) [Funkční vzorek]. 2010. Vlastník: ČVUT FEL Podíl doktoranda 33%

8.4 Projekty

[A29] Interní grant ČVUT CTU0904113 - Pravda, M. Přenos synchronizace přes paketovou síť Fakulta elektrotechnická, katedra telekomunikační techniky, 2009

[A30] Interní grant ČVUT SGS10/182/OHK3/2T/13 - Pravda, M. Metody měření kvality přenosu řeči v různých typech sítí a možné způsoby synchronizace Fakulta elektrotechnická, katedra telekomunikační techniky, 2010

[A31] FRVŠ Projekt G1 830 - Pravda, M. Implementace nových technologií a pomůcek do laboratorní výuky předmětu Přenosové systémy Fakulta elektrotechnická, katedra telekomunikační techniky, 2010

[A32] FRVŠ Projekt G1 2211 - Pravda, M. Vytvoření nových výukových materiálů a pomůcek do laboratorní výuky předmětu Digitální technika Fakulta elektrotechnická, katedra telekomunikační techniky, 2011

9 ABSTRACT

This doctoral thesis deals with the possibilities of improving accuracy of time synchronization over packet networks and the subsequent accurate pulse generation. The goal of this paper is to analyze the options of synchronization in packet networks, and also to design and simulate a possible method for increasing device synchronization and accuracy of pulse generated on the side of the client.

The work is divided into two main parts. The first part is focused on the analysis and measurement of synchronization accuracy in a real packet network. Measurement was performed using the Precision Time Protocol (PTP). Network transmission parameters were changed using a network emulator and depending on the change resulting synchronization accuracy varied. The second part deals with methods for improving accuracy of clock synchronization. An additional source of a local H2 clock is used on the client's side to improve synchronization accuracy. Client design was made to be very versatile, therefore it can be used for NTP as well as PTP protocol. The proposed methods were simulated under the same conditions as the previous measurements and the results were compared. The resulting synchronization accuracy was better in the simulation than in the real network.

The simulation results presented in this paper indicate that the proposed method of client improvement achieves higher accuracy of time synchronization. When comparing the results of the local H1 and H2 clocks on the client's side, it is apparent that the variation of the H2 is always smaller than that of the H1 under identical input conditions. This behavior proves to be correct which is the aim of this work.