

PTP Tester

Základní vlastnosti a měřené parametry

Implementace protokolu PTP do obecné paketové sítě není triviální a je nutné ověřit vlastnosti takové synchronizace. Existující způsoby vyhodnocují pouze druhotné projevy, protože neměří chování sítě, ale schopnost zařízení slave se synchronizovat na zařízení master. Tento způsob není přesným ukazatelem, protože je ovlivněn mnoha vedlejšími ději. Jedním z těchto dějů je například regulační algoritmus zařízení slave.

PTP Tester slouží k měření časových parametrů sítě přímým sledováním jednotlivých paketů a doby trvání jejich přenosu. Přímě měření zaručuje přesnější vyhodnocení vlastností sítě a změření dalších parametrů, které není možné změřit pouhým sledováním chování zařízení slave.

Zpoždění přenosové cesty

Základní vyhodnocovaný parametr je zpoždění přenosové cesty, neboli doba, za kterou paket přejde ze zařízení A do zařízení B. Z tohoto zpoždění se dále vypočítávají jednotlivé parametry (metriky) přenosové cesty.

Packet Delay Variation

PDV je rozdíl zpoždění paketu a zpoždění předchozího paketu v závislosti na čase případně první a druhá derivace těchto hodnot. Pro synchronizaci je důležitá co nejmenší hodnota PDV. Pokud zpoždění paketů stále konstantní, lze jej jednoduše změřit a kompenzovat.

Asymetrie

Asymetrie určuje rozdíl zpoždění ve stejný čas, ale v opačných směrech komunikační cesty. Asymetrii lze měřit pouze zařízením, které má svázanu informaci o čase z obou koncových bodů ještě jiným synchronizačním kanálem, který asymetrii nemá, nebo je známa a je konstantní. Ve speciálních případech lze asymetrii odhadnout z jiných dílčích měření sítě, které jsou ale mimo normu IEEE 1588. Obecné PTP hodiny nejsou schopny asymetrii detekovat a budou tedy posunuty od zařízení master úměrně s velikostí asymetrie.

Ostatní pokročilejší metriky

Mezi ostatní metriky patří například maximum time interval error (MTIE) a time deviation (TDEV), které lze vyhodnocovat z naměřených dat offline pomocí programu v PC.

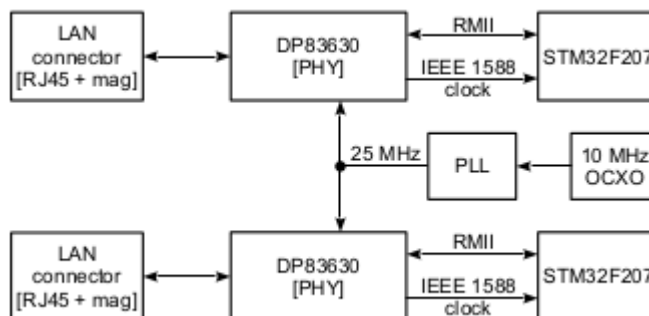
Použití naměřených dat

Naměřená data z testeru mohou být použita pro určení vhodnosti dané sítě pro použití s protokolem pro synchronizaci času. Z naměřených dat lze určit, jaké synchronizace může být dosaženo v použité síti.

Každé slave zařízení provádí filtraci a regulaci vnitřních hodin. Naměřená data mohou být použita pro nastavení filtru a regulátoru v těchto zařízeních.

Lokální PTP tester

Popis funkce



Obrázek 1. Blokové schéma lokálního testeru

Na obrázku je ukázána základní koncepce měřicího zařízení. Hlavní součástí je integrovaný obvod Ethernetové fyzické vrstvy (PHY) DP83630 od firmy Texas Instruments. Obvod umožňuje získávání časových značek příchozích a odchozích paketů a díky tomu je možné dosáhnout vysoké přesnosti těchto časových značek v tomto případě 8 ns. Pro správnou funkci musí být oba porty využívat synchronizovanou časovou stupnici. Tato stupnice nemusí být globální, jak jsou UTC nebo GPS, ale pro případné distribuované měření je to velice vhodné. Naměřené data jdou předzpracována v každém mikrokontroléru, odeslána po sériovém portu a uložena na SD kartu.

Modulárnost celého zařízení je podporována volbou součástek. Díky tomu, že veškerá přesná měření jsou provedena přímo v obvodu PHY, nejsme limitováni použitým mikrokontrolérem, který musí podporovat pouze RMI/MII rozhraní. V naší implementaci používáme mikrokontrolér STM32F207, na kterém běží operační systém reálného času FreeRTOS.

Zařízení se skládá ze dvou procesorových modulů. Jeden modul slouží k simulaci PTP master zařízení a druhý k simulaci PTP slave. Oba ale běží na společném hodinovém signálu 25 MHz a synchronizují se pomocí vzájemného přenosu PPS pulzu. Tímto způsobem je zaručena shodná časová stupnice na obou zařízeních a přesnost měření 8 ns.

Díky lokální časové stupnici jsou oba moduly plně synchronizovány a je možné měřit například i asymetrii časového zpoždění měřené sítě.

Kalibrace

Ke kalibraci našeho zařízení bylo zapotřebí změřit zpoždění sítě se známými parametry. Rozhodli jsme se použít různě dlouhé UTP kabely. Zpoždění jsme měřili pomocí čítače SR620 a porovnávali ji s hodnotou naměřenou pomocí lokálního PTP testeru.

Pomocí lineární interpolace byla naměřená data zpracována a bylo určeno zpoždění obvodu PHY, které bylo změřeno jako 210,5 ns. V následujících měřeních byla tato hodnota použita pro korekci výsledků.

Tabulka: Kalibrace pomocí UTP kabelů

#	1	2	3	4	5
Cat	Cat 5	Cat 5	Cat 5e	Cat 5e	Cat 5e
Typ	UTP	UTP	S/UTP	S/UTP	S/UTP
Délka [m]	1	10	1	5	50
Naměřené zpoždění čítač [ns]	5.0	44.3	5.6	22.4	236.1
Naměřené zpoždění PTP tester [ns]	216	256	216	232	448
Korigované měření PTP tester [ns]	6	46	6	22	238

Z naměřených výsledků je zřejmé, že hodnoty odpovídají referenčnímu měření pomocí čítače. Drobné odchylky odpovídají rozlišovací schopnosti PHY.

Testovací měření

Testovací měření bylo provedeno pomocí několika LAN switchů. Byly použity obyčejné switche určené pro domácí použití a průmyslový switch s podporou IEEE 1588.

Obyčejný switch TP-LINK TL-SF1008P, který obsahuje chipset RTL8309G od firmy Realtek byl testován 78 tisíci výměnami paketů při rychlosti 1 výměna za sekundu.

Tabulka: TL-SF1008P

Směr	Průměr	Směrodatná odchylka	Min - Průměr	Max - Průměr
A → B	9851 ns	126 ns	-267 ns	237 ns
B → A	9764 ns	126 ns	-268 ns	236 ns

Jako průmyslový switch byl použit Hirschmann MS20, který obsahuje podporu protokolu IEEE 1588. Switch byl proměřen v režimu bez podpory a v režimu “end to end transparent clock” (E2E TC).

Tabulka: MS20 bez korekcí

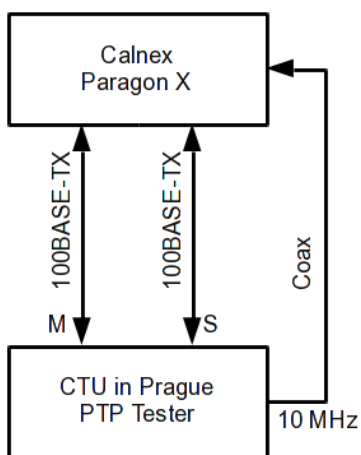
Směr	Průměr	Směrodatná odchyłka	Min - Průměr	Max - Průměr
A → B	13475 ns	294 ns	-549 ns	595 ns
B → A	13475 ns	293 ns	-549 ns	555 ns

Tabulka: MS20 v režimu E2E TC

Směr	Průměr	Směrodatná odchyłka	Min - Průměr	Max - Průměr
A → B	12 ns	7 ns	-14 ns	14 ns
B → A	12 ns	7 ns	-14 ns	13 ns

Ověření funkce ve firmě Calnex

Calnex Paragon-X je zařízení, které umí simulovat zpoždění v síti Ethernet. Zařízení může vložit konstantní časové zpoždění, generovat předem definované profily, nebo přehrávat naměřené profily zpoždění sítě, pro laboratorní testování. Jedná se tedy o inverzní zařízení k našemu testeru.



Obrázek 2. Test Paragonu X

Zařízení byla propojena pomocí dvou UTP kabelů a pro komunikaci byla použita rychlost 100 MBit. Calnex Paragon-X simuloval zpoždění v síti a PTP tester tato zpoždění měřil. Pro lepší reprezentaci výsledků byla zařízení propojena pomocí hodinového signálu 10 MHz. Byla provedena série testů na vyhodnocení přesnosti jednotlivých zařízení.

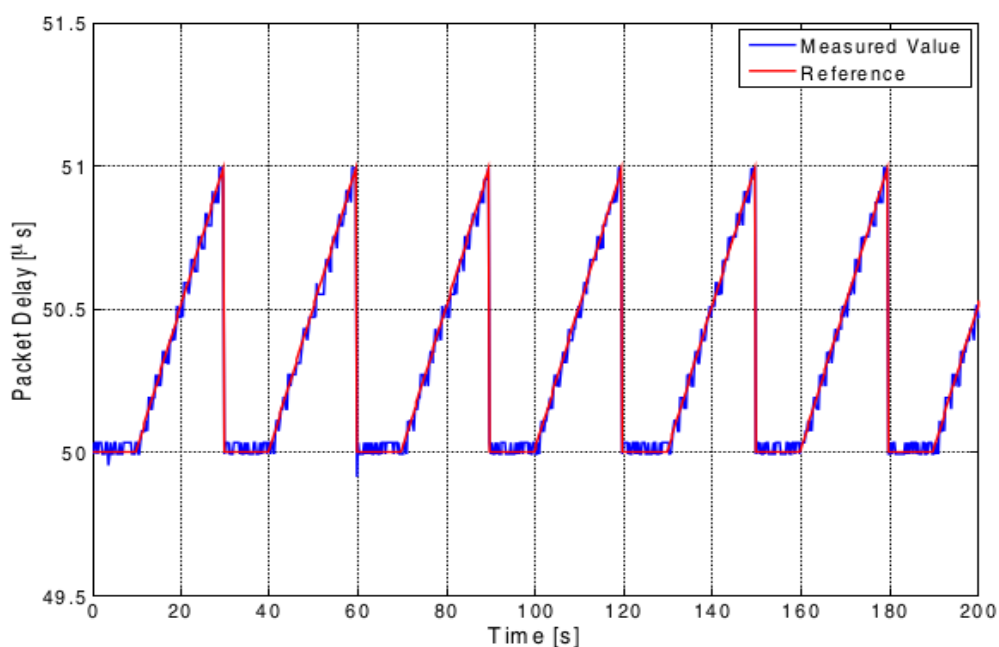
Kalibrace propojovacích kabelů:

Propojovací kabely byly použity 2 o stejné délce. Každý přidával 14 ns k měřenému času a tato odchylka byla ve výpočtech kompenzována odečtením 28 ns od všech naměřených výsledků.

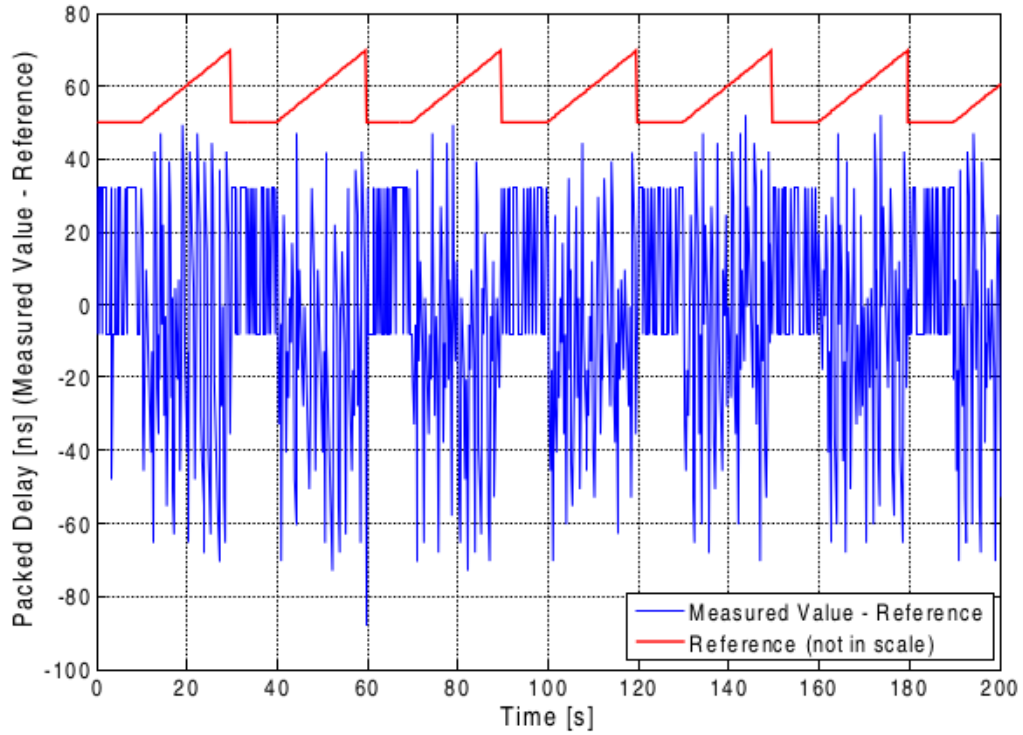
Testy konstantního zpoždění:

Configured delay	Measured delay offset				Mean Asymmetry [ns]
	Mean M->S [ns]	STD M->S [ns]	Mean S->M [ns]	STD S->M [ns]	
Transparent Mode	5504	20	5447	20	57
0.5 ms	3564	20	3508	20	56
1.5 ms	3566	20	3510	20	56
10 ms	3568	20	3511	20	57

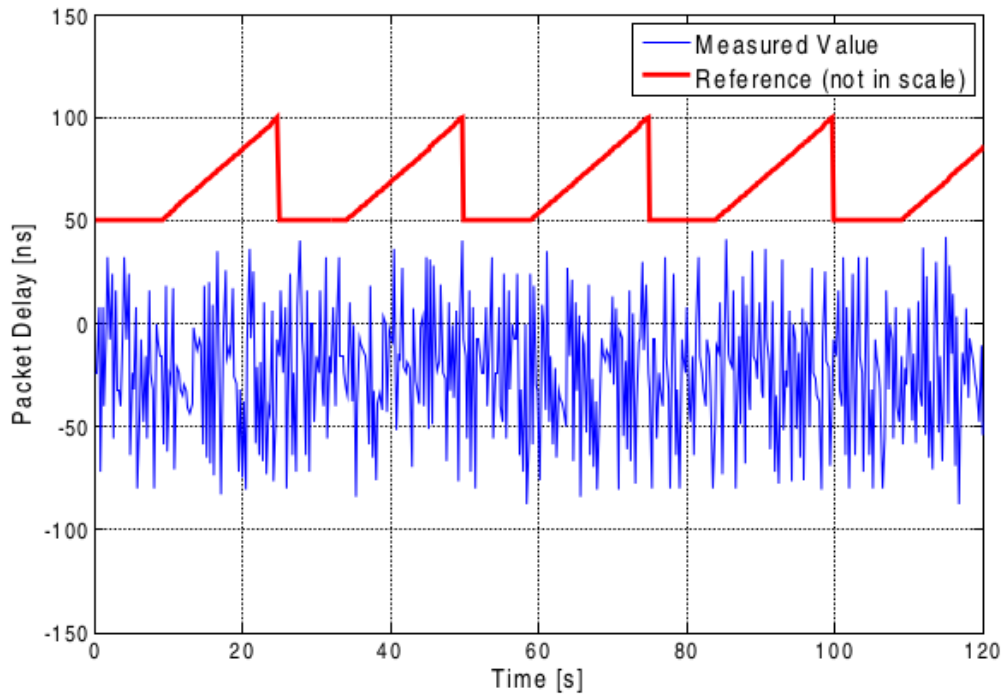
Testy profilů variabilního zpoždění:



Obrázek 3. Pila 1 µs - Porovnání naměřené hodnoty a zadaného průběhu



Obrázek 4. Pila 1 μs - Porovnání rozdílu naměřené hodnoty vzhledem k referenčnímu průběhu zpoždění

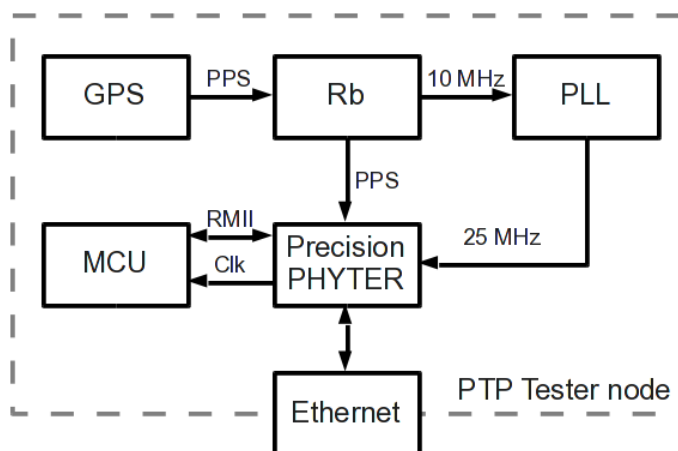


Obrázek 5. Pila 10 μs - Simulace E2E TC - porovnání naměřeného zpoždění s korekcí vzhledem k referenčnímu průběhu zpoždění

Distribuovaný PTP tester

Popis funkce

Princip měření je podobný jako v lokální variantě, pouze se fyzicky rozdělí procesorové moduly. Při rozdělení již není možné využívat přímo vzájemnou synchronizaci pomocí PPS pulzů a sdílením 10MHz hodinového signálu. Ke vzájemné synchronizaci je použit GPS s Rb oscilátorem, které generují potřebné signály pro měření - PPS a 10 MHz.



Obrázek 6. Jedno zařízení PTP testeru

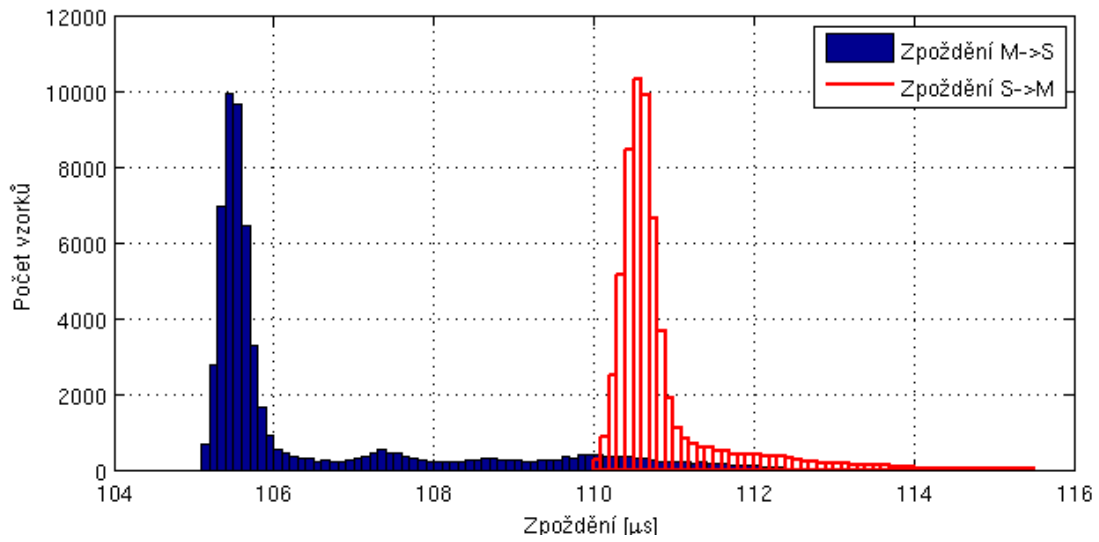


Obrázek 7. Příklad měření sítě

Jedno zařízení testeru “PTP Tester node” může pracovat v režimu master nebo slave. Principiálně je možné zapojit více zařízení typu slave do jedné sítě a měřit tak rozsáhlejší síť.

Naměřené výsledky

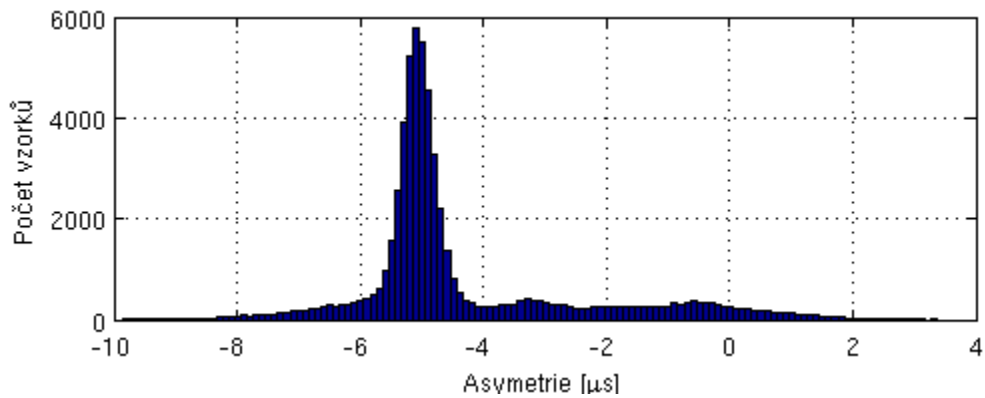
Distribuovaný PTP tester byl testován na akademické síti. Byla použita dvě zařízení propojená přes 3 routery. Měření bylo prováděno rychlostí 1 paket/s a bylo zachyceno více než 60 tis paketů.



Obrázek 8. Histogram zpoždění paketů

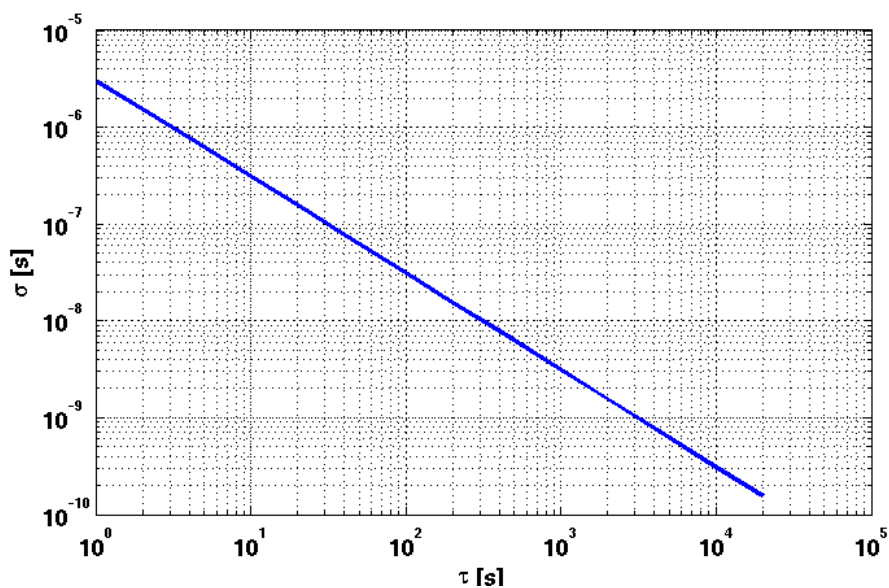
Tabulka: Zpoždění paketů

Směr	Průměr	Směrodatná odchylka	Min	Max
M → S	106,71 μs	17,26 μs	104,93 μs	2550,4 μs
S → M	111,01 μs	27,91 μs	109,86 μs	5856.3 μs



Obrázek 9. Asymetrie zpoždění přenosové cesty

Průměrná asymetrie měřené sítě vycházela 4,8 μs . Bez podobného měření by nebylo možné dosáhnout lepší vzájemné synchronizace než polovina hodnoty asymetrie, tedy 2,4 μs .



Obrázek 10. Allanova variance průměrného zpoždění

Naměřené údaje lze použít pro odhad parametrů synchronizace, která by po této síti probíhala. Allanova variance průměrného zpoždění vzájemných výměn paketů slouží k určení vlastností synchronizace. Porovnáním Allanovy variance oscilátoru, který zvolíme do cílového zařízení hodin, a hodnoty vypočtené z přenosové cesty lze odhadnout dosažitelnou přesnost generované frekvence celého systému. Z asymetrie přenosové cesty lze určit offset časové stupnice na jednotlivých zařízeních.