

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Kalibrace systému White Rabbit

Bc. Šárka Květoňová

Vedoucí: doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc.
Srpen 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Květoňová** Jméno: **Šárka** Osobní číslo: **434915**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Kalibrace systému White Rabbit

Název diplomové práce anglicky:

White Rabbit System Calibration

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte teoretický rozbor přenosu přesného času a frekvence po optických vláknech pomocí technologie White Rabbit (WR).
2. Navrhněte metody kalibrace systémů WR.
3. Vypracujte a implementujte detailní metodiku kalibrace (včetně potřebného programového vybavení) a ověřte ji měřeními na reálném systému WR.
4. Proveďte základní analýzu dosažitelné přesnosti transferu času při použití technologie WR.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Hedekvist, P. O. - Ebenhag, S. C.: Time and Frequency Transfer in Optical Fibers. In Recent Progress in Optical Fiber Research. InTech, Rijeka 2012, p. 371-386, ISBN 978-953-307-823-6.
- [2] Moreira, P. – Serrano, J. – Wlostowski, T.: White Rabbit: Sub-Nanosecond Timing over Ethernet. ISPCS 2009 International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. Brescia, Italy, October 2009.
- [3] Daniluk, G.: White Rabbit calibration procedure ver. 1.1. CERN BE-CO-HT, November 2015.
- [4] Pinkert, T. et al.: High-accuracy long-haul time & frequency transfer using White Rabbit. 9th White Rabbit Workshop (2016).

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc., katedra měření FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **23.01.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce zimního semestru 2021/2022

doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce doc. Ing. Jaroslavu Roztočilovi, CSc. za jeho trpělivost a vstřícnost během vypracovávání práce. Velké díky též patří Ing. Vojtěchu Vignerovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při řešení kalibrace systému White Rabbit. A nakonec nesmím zapomenout poděkovat svým blízkým, především své rodině, která mne během celého studia podporovala a věřila ve mě.

Prohlášení

I hereby declare that I worked out the presented thesis independently, and I quoted all the sources used in this thesis in accord with Methodical instructions about ethical principles for writing an academic thesis.

In Prague, 14th srpna 2020

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně, a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 14. srpna 2020

Abstrakt

V práci je diskutována problematika kalibrace systémů White Rabbit. Byl proveden teoretický rozbor přenosu přesného času a frekvence pomocí optických vláken pomocí technologii White Rabbit. Též došlo k návržení a implementaci detailní metodiky pro kalibraci systému White Rabbit. Celá metodika kalibrace byla ověřena na reálném měřicím systému. S využitím této metodiky také proběhlo provedení základní analýzy dosažitelné přesnosti transferu času při použití technologie White Rabbit.

Klíčová slova: White Rabbit, Kalibrace, Optické vlákno, WR-LEN, WR-SWITCH, PTP, Synchronní Ethernet

Vedoucí: doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc.

Abstract

The thesis discusses the issue of calibration of White Rabbit systems. A theoretical analysis of the transfer of precise time and frequency over optical fiber using technology White Rabbit was performed. A detailed methodology for the calibration of the White Rabbit system was also designed and implemented. The whole calibration methodology was verified on a real measuring system. Thanks to this, a basic analysis of the achievable accuracy of time transfer using White Rabbit technology was performed.

Keywords: White Rabbit, Calibration, Optical fiber, WR-LEN, WR-SWITCH, Precision Time Protocol, Synchronous Ethernet

Title translation: White Rabbit System Calibration

Obsah

1 Úvod	1	4.1.5 Numerická apertura a její ztráty	13
2 Cíle práce	3	4.2 SFP moduly	13
3 Problematika synchronizace	5	5 White Rabbit	15
3.1 Syntonizace	6	5.1 Důvody kalibrace systému White Rabbit	16
3.2 Synchronní Ethernet	6	5.2 Zařízení WR-LEN	17
3.3 Precise Time Protocol	7	5.3 Zařízení WR-SWITCH	18
3.3.1 Princip PTP	7	6 Kalibrace zařízení	21
3.3.2 Režimy PTP	8	6.1 Kalibrace latence vlákna	22
3.3.3 Použití PTP	8	6.1.1 Výsledné parametry kalibrace latence vlákna	23
4 Transfer času po optických vláknech	11	6.2 Asymetrie vláken	23
4.1 Optické vlákno	11	6.2.1 Výsledné parametry kalibrace asymetrie vlákna	24
4.1.1 Druhy optických vláken	11	6.3 Kalibrace zpoždění transceiverů	24
4.1.2 Charakteristické vlastnosti vláken	12	6.3.1 Výsledné parametry kalibrace zpoždění transceiverů	25
4.1.3 Útlum optického vlákna	12	6.4 Shrnutí výsledků reálné kalibrace	25
4.1.4 Chromatická disperze	13		

7 Aplikace pro kalibraci	27
7.1 Vývojové prostředí	27
7.2 Popis aplikace	28
7.2.1 Tab 0 - Navázání spojení s WR-LEN	29
7.2.2 Tab 1 - Kalibrace latence vlákna	30
7.2.3 Tab 2 - Kalibrace asymetrie vlákna	32
7.2.4 Tab 3 - Kalibrace zpoždění transceiverů.....	34
7.2.5 Finální kroky kalibrace	36
8 Výsledky	39
9 Závěr	41
Literatura	43
A White Rabbit kalibrace - Semestrální práce	45
B Seznam důležitých příkazů[10]	53
C CD	57

Obrázky

3.1 Typy hodinových synchronizací [1] a) Synchronizace jednosměrná, b) Synchronizace jednosměrná s výměnou informace u přijímačů, c) Synchronizace vzájemná obousměrná. 6	7.6 Zapsání nulové hodnoty alfa do záložky Fiber configuration 32
5.1 Hierarchie White Rabbit systému[14] 16	7.7 Model spojení White Rabbit zařízení 34
5.2 Zařízení White Rabbit LEN [11] 18	7.8 Model spojení White Rabbit zařízení 35
5.3 Zařízení White Rabbit Switch [11] 19	7.9 SSH příkazový řádek s příkazem <code>wrs wrs_sfp_dump -I</code> 35
6.1 Model spojení White Rabbit zařízení [11] 21	7.10 Ukázka výpisu informací na portu WR-SWITCH 36
7.1 Welcome Page vývojového prostředí LabWindows TM /CVI TM 28	7.11 Model spojení White Rabbit zařízení 37
7.2 Ukázka úvodní stránky webového GUI přístupném Management Portu WR-SWITCH 29	8.1 Graf zobrazující vliv délky vlákna na zpoždění Master.Slave, nekalibrovaný případ 40
7.3 Ukázka připojení WR-LEN pomocí Tab 0 30	8.2 Graf zobrazující vliv délky vlákna na zpoždění Master-Slave, kalibrovaný případ 40
7.4 Tab 1 před vyplněním údajů a vypočtením rovnic 31	
7.5 Ukázka vyčtení hodnoty loopback ze záložky Endpoint Tool ve webovém GUI 32	

Tabulky

6.1 Parametry kalibrace latence vlákna	23
6.2 Parametry kalibrace asymetrie vlákna	24
6.3 Parametry kalibrace zpoždění transceiverů před dokalibrováním .	25
6.4 Parametry kalibrace zpoždění transceiverů po dokalibrování	25



Kapitola 1

Úvod

Mezinárodní metrologický slovník [7] definuje kalibraci jako operaci, která za specifických podmínek stanoví v prvním kroku vztah mezi hodnotami a souvisejícími nejistotami měření, které jsou poskytovány standardy, a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami. Ve druhém kroku následně použije tuto informaci k vytvoření vztahu pro získání výsledku měření z indikace.

Definici kalibrace [12] lze rozšířit dále tak, že jde o metrologický úkon, který probíhá podle písemně daného postupu a jeho výsledkem je kalibrační protokol. Kalibrace se provádí v pravidelných lhůtách a její výsledky jsou uváděny spolu s nejistotou měření. Před měřením je nutné provést provozní kalibraci. Provozní kalibrace se stává velmi důležitou, neboť prověří celý měřicí řetězec ve stavu a zapojení, ve kterém bude použit pro vlastní měření. Provozní kalibrace bývá v měřidlech automatizovaná. Toto řešení není zcela ideální, neboť etalony často reprezentují pouze jednu hodnotu.

Kalibrace probíraná v rámci této diplomové práce se zaměřuje na jeden systém, konkrétně cílí na prozkoumání problematiky kalibrace systémů White Rabbit. Nejprve práce seznamuje obecně s okruhy zájmů jako jsou synchronizace, optická vlákna a transfer času po nich probíhající. Dále bude probírána samotná problematika technologie White Rabbit, na kterou naváže detailní popis návrhu a ověření metodiky pro kalibraci systémů White Rabbit. Tato metodika bude dále rozebírána a ověřována i v další kapitole diplomové práce, avšak tentokrát již půjde o popis implementace aplikace usnadňující kalibraci systémů White Rabbit. Nakonec se práce zaměří na detailní souhrn dosažených výsledků a tím i provedenou analýzu dosažitelné přesnosti transferu

času při použití technologie White Rabbit.

Pod pojmem Projekt White Rabbit[14] se skrývá multilaboratorní, nadnárodní spolupráce více společností na vývoji nové technologie, která poskytuje univerzální řešení pro systémy řízení a získávání dat. Projekt vznikl především za účelem synchronizace na částicovém urychlovači v CERN. V projektu je navržen koncept časové synchronizace, který se snaží využít stávajících standardů a dosáhnout přesnosti lepší než 1 ns.



Kapitola 2

Cíle práce

- Provést teoretický rozbor přenosu přesného času a frekvence po optických vláknech pomocí technologie White Rabbit (WR). Rozumí se tím seznámení s problematikou optických vláken a seznámení s technologií White Rabbit.
- Navrhnout vhodnou metodu kalibrace systémů White Rabbit. Tedy, představit takové řešení kalibrace systémů White Rabbit, které povede ke snížení offsetů/zpoždění mezi zařízeními White Rabbit.
- Vypracovat a implementovat detailní metodiku kalibrace, včetně vytvoření potřebného programového vybavení. Danou detailní metodiku ověřit měřeními na reálném systému White Rabbit.
- Provést základní analýzu dosažitelné přesnosti transferu času při použití technologie White Rabbit. Tedy zjistit, zda lze některý z negativních vlivů (chromatická disperze, závislost zpoždění na délce vlákna atd.) na měřicí systém eliminovat či snížit jeho vliv na měření.

Kapitola 3

Problematika synchronizace

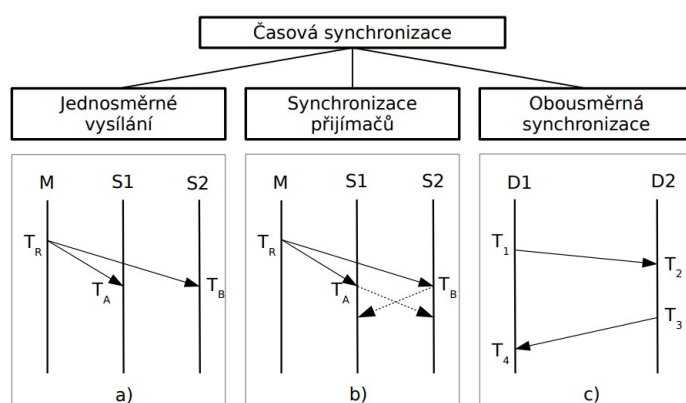
Ottův slovník naučný [8] uvádí, že synchronismus, t.j. soudobost, představuje soustavu soudobých událostí. Při nahlédnutí do slovníku cizích slov lze pod pojmem synchronizace nalézt význam: uvádění v časový soulad, do společného rytmu či opisem lze nazvat synchronizaci fázováním.

Obecně synchronizace, jiným názvem sladění, je proces, při kterém se několik elementů v systému uvádí do shodného stavu či jsou přiváděny k organizovanému chodu. Neorganizovaná činnost prvků či vykazování rozdílných vlastností by mohlo být nežádoucí, právě proto se využívá na těchto místech synchronizace.

Synchronizace však může mít různé podoby napříč vědními obory. Při zaměření na obor informatiky byly nalezeny 2 podobné definice:

- Synchronizace procesů je situací, při které se více procesů má v určitém okamžiku setkat (tzv. handshake) z důvodu vzájemné dohody, respektive společné akce.
- Synchronizace dat představuje snahu o udržení několika kopií dat (dataset) v soudržnosti či snahu o udržení integrity dat.

Pro lepší pochopení problematiky synchronizace slouží obr. 3.1 [1] zobrazující synchronizaci hodin. Jedná se konkrétně o základní způsoby synchronizace hodin. Jako časová osa hlavních hodin je zde použita osa M. Osy S1 a S2 představují časové osy podružných hodin. Pro znázornění časových os obecných zařízení slouží osy D1 a D2.



Obrázek 3.1: Typy hodinových synchronizací [1] a) Synchronizace jednosměrná, b) Synchronizace jednosměrná s výměnou informace u přijímačů, c) Synchronizace vzájemná obousměrná.

3.1 Syntonizace

Společně s tématem White Rabbit lze také narazit na pojem syntonizace. Jedná se o jednosměrnou synchronizaci, avšak nelze s tímto pojmem spojovat pojem synchronizace času. Dle [1] se v případě syntonizace přenáší pouze signál s určitou frekvencí nebo dochází k obnově frekvence v koncovém zařízení z nosného signálu. Zdroj dále uvádí, že bez znalosti zpoždění přenosové cesty nelze kompenzovat fázi signálu. Neboť většinou lze považovat zpoždění za konstantní, koncová frekvence a frekvence zdrojová se shodují. Vzhledem k tomu, že ve většině případů můžeme zpoždění považovat za konstantní, je zdrojová frekvence stejná jako cílová. Při syntonizaci nedochází k přenosu informace o čase, dochází k přenosu pouze frekvence.

Pomocí syntonizace lze tedy přenášet signály s definovanou frekvencí a fází, takovým signálem je kupříkladu 1 PPS pulz. Dalším signálem, který lze pomocí syntonizace přenášet je takový signál na přenosové cestě, díky kterému je možnost obnovy frekvence nosné, tedy synchronní telekomunikační přenosy či synchronní Ethernet SyncE [15].

3.2 Synchronní Ethernet

Synchronní ethernet [15] (zkráceně Sync-E) rozšiřuje standard o syntonizaci podobnou SDH / SONET a mechanismus TDM. Na rozdíl od modelu Ethernet typu „peer-to-peer“, Sync-E ukládá hierarchickou síťovou strukturu s horním uzlem s názvem System Timing Master (STM). STM obsahuje primární hodiny, jako jsou atomové hodiny nebo přijímač GPS, a používá svou výstupní frekvenci k zakódování odchozího

datového toku. Uzly Slave používají PLL k obnovení referenčních hodin z příchozích dat. Obnovené hodiny se používají k kódování datových toků šířených do uzlů, které jsou nižší v hierarchii systému, a datový tok odeslaný zpět do nadřízeného uzlu.

Sync-E je část WR zodpovědná za synchronizaci hodin. Proto je role protokolu PTP v síti Sync-E snížena na měření a kompenzaci offsetu hodin. Sync-E také usnadňuje synchronizaci pod nanosekundami otevřením technologie detektoru fázového detektoru jako prostředku pro měření zpoždění. Měření fázového posunu je mnohem snazší na implementaci implementovat a poskytuje lepší přesnost než přímé měření času.

Vzhledem k tomu, že Sync-E používá kaskádové fázově uzamčené smyčky k šíření referenční frekvence v síti, musí být přijata opatření proti peaking efektu. V sítích WR jsou frekvenční odezvy PLL přesně řízeny digitálními filtry. Topologie sítě má tvar vyváženého stromu, přičemž hlavní časování je kořenový uzel, aby se minimalizovaly délky řetězce PLL.

■ 3.3 Precise Time Protocol

Standard IEEE 1588, neboli Precise Time Protocol (PTP), je protokol pro přesnou časovou synchronizaci v počítačových sítích. PTP byl původně definován ve standardu IEEE 1588-2002, oficiálně nazývaném „Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems“, publikovaném v roce 2002. Avšak v roce 2008 došlo k zásadním změnám v protokolu PTP a vznikl standard IEEE 1588-2008, známý jako PTP Version 2. IEEE 1588-2008 zlepšuje přesnost, preciznost a robustnost protokolu, avšak není zpětně kompatibilní s původní verzí 2002. Poslední velkou změnu zaznamenal standard IEEE 1588 v roce 2019, kdy vznikl standard IEEE 1588-2019. Tento standard je neformálně známý jako PTPv2.1 a zahrnuje zpětně kompatibilní vylepšení verze z roku 2008.

■ 3.3.1 Princip PTP

Základem pro synchronizaci [1] se stává komunikace Master/Slave. Master, tedy hlavní hodiny, periodicky vysílá zprávy s časovou značkou a Slave zařízení se pomocí těchto časových značek synchronizuje. Pro korekci časového zpoždění přenosové cesty vysílá Slave zařízení dotaz na délku přenosové cesty. Pro zvýšení přesnosti je přesná časová značka odeslána ve zprávě, která okamžitě následuje po synchronizační zprávě, nikoliv v synchronizační zprávě samotné. Přesnou časovou značku lze též vložit do právě odesílaného paketu v případě, že pro to existuje dostatečná HW podpora.

PTP Protokol implementuje autokonfigurační vlastnosti. Jedná se o tzv. Best Master Clock Algorithm (BMCA) [1] pomocí kterého probíhá výběr nejlepších hlavních hodin. Na tyto hodiny se následně všechna ostatní zařízení sesynchronizují. BMCA se také používá pro zabezpečení redundance hlavních hodin. Při případném selhání si zařízení automaticky vyberou náhradní hlavní hodiny.

Protokol PTP může pracovat jak s relativní časovou stupnicí, tak i přímo s absolutní stupnicí UTC (Universal Time Coordinated), tedy koordinovaným světovým časem. Synchronizační intervaly lze volit dle potřeby v rozmezí od desítek ms do desítek s.

■ 3.3.2 Režimy PTP

Neboť každé zařízení může mít více fyzických portů [1] a každý port může být v jiném režimu, může zařízení na některých portech komunikovat jako Master nebo být pasivní a na dalším se může chovat jako Slave. O vysílání synchronizačních zpráv je rozhodováno právě na základě těchto režimů, tedy na základě režimů jednotlivých portů. Režim Master znamená, že na konkrétním portu jsou pravidelně vysílány synchronizační zprávy, oproti tomu režim Slave znamená, že dané zařízení se synchronizuje s pomocí synchronizačních zpráv a dále se doptává na zpoždění přenosové cesty. Pasivní režim je pouze na portech, kde se zařízení synchronizuje pomocí jiného zdroje, tedy jinak než pomocí PTP. Takovým zařízením mohou být kupříkladu náhradní hlavní hodiny. V případě výpadku hlavních hodin přejde zařízení z pasivního režimu do režimu Master. V pasivním režimu nejsou zařízením odesílány synchronizační pakety kromě paketů pro zjištění zpoždění linky.

■ 3.3.3 Použití PTP

PTP protokol [1] je určen pro použití především v lokálních sítích. Existuje několik standardizovaných metod pro posílání datagramů. Těmi nejznámějšími jsou multicast a unicast. Pro měřicí aplikace se využívá nejčastěji metoda přeposílání multicast, pro telekomunikační účely naopak metoda unicast. Zprávy protokolu PTP mohou být odesílány pomocí obou metod pro posílání datagramů, tedy jak metodou multicast, tak metodou unicast. PTP protokol ve zprávách při komunikaci využívá velmi často nespojový protokol UDP přes IPv4 nebo IPv6. Zprávy mohou dále být dvojího typu, události a obecné zprávy. V případě zprávy typu událost se ke každé zprávě ukládá časová značka na straně příjemce i vysílače. Tyto značky se následně pomocí obecných zpráv přenesou. Pro rozlišení typů zpráv se při odesílání pomocí protokolu UDP odesílají pakety událostí na portu 319 a obecné zprávy na portu 320. Z důvodu

požadavku rychlosti procházení přes síťové přepínače by zprávy pro synchronizaci času měly být co nejkratší. Ve standardu IEEE 1588 je proto definován i způsob přenosu zpráv přímo ve druhé vrstvě IEEE 802.3 Ethernet.

Kapitola 4

Transfer času po optických vláknech

Čas je velmi originální veličina, nejen z pohledu jejího přenosu. Unikátnost charakteristiky času[5], která komplikuje její přenos, spočívá v tom, že se neustále mění. Požadované informace obsahují jak aktuální denní dobu (Time-Of-Day), tak i kolik času uplynulo od vytvoření této informace. Pro mnoho aplikací stačí odhadnout přibližné zpoždění a přijmout jakékoli změny, ale pro přesnost, která přesahuje μs , musí být doba přenosu neustále odhadována nebo měřena a zohledňována.

4.1 Optické vlákno

Optické vlákno je dielektrický vlnovod válečkovitého tvaru vyrobený z materiálu s nízkou ztrátovostí, nejčastěji z křemičitého skla či plastu. [5] Optickým vláknem se šíří elektromagnetické vlny (většinou světlo či infračervené záření) ve směru podélné osy vlákna a využívají při tom principu totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu, tedy s využitím Snellova zákona. Uvnitř vlákna se nachází jádro, skrz které jsou vedeny elektromagnetické vlny, obklopené pláštěm s nižším indexem lomu a primární ochranou. Světelné paprsky, které dopadají na hranici pláště jádra v úhlech větších než je kritický úhel, podléhají úplnému vnitřnímu odrazu a jsou vedeny jádrem, aniž by byly lámány do pláště. Optická vlákna se uplatňují v telekomunikačních přenosech či pro vysokorychlostní přenosy v Internetu.

4.1.1 Druhy optických vláken

Obecně mohou být vlákna buď jednovidová či vícevidová. Jednovidové optické vlákno (single mode) je používáno pro přenos dat na větší vzdálenosti (města, státy, kontinenty). Na kratší vzdálenosti se používají levnější vícevidová nebo gradientní optická vlákna. Vícevidové optické vlákno (multimode) používán pro komunikaci například uvnitř budov či areálů.

V souvislosti s útlumem optického vlákna se často mluví o koeficientu útlumu. Jedná se o útlum vztažený k délce vlákna.

$$\alpha(\lambda) = \frac{u(\lambda)}{L} \quad [dB.km^{-1}], \quad (4.2)$$

kde L představuje právě zmiňovanou délku vlákna udávanou v kilometrech.

4.1.4 Chromatická disperze

Chromatická disperze je zapříčiněna tím, že index lomu vlákna závisí na frekvenci přenášeného signálu $n = n(f)$. Díky tomu se jednotlivé frekvence v optickém vlákne šíří po různých trajektoriích, a tak doba šíření jednotlivých kmitočtů není stejná.

Chromatickou disperzi lze charakterizovat pomocí koeficientu chromatické disperze [9].

$$D = \frac{\lambda}{c} \left(\frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right) \quad [ps/km.nm], \quad (4.3)$$

kde c je rychlost šíření světla, n je index lomu materiálu vlákna a λ je vlnová délka šíření.

4.1.5 Numerická apertura a její ztráty

Přesnější definice NA vychází z výpočtu její hodnoty. Jedná se o sinus polovičního úhlu dopadu svazku na plochu vlákna, který ještě vstoupí do prostoru vlákna. Na místě spojení dvou vláken či na místě mezi vláknem a zdrojem světelného paprsku vznikají ztráty numerickou aperturou. Pro výpočet NA lze použít vzorec 4.4.

$$A = n_0 \cdot \sin \alpha, \quad (4.4)$$

kde n_0 představuje index lomu prostředí, odkud vstupuje paprsek do materiálu jádra. α je úhel, pod kterým paprsek dopadá na materiál jádra vzhledem k optické ose.

4.2 SFP moduly

SFP modul (Small Form-factor Pluggable) je optický transceiver[13], resp. modul, převodník, používaný v telekomunikačních a datových sítích. Jedná se o rozšířený a výrobci aktivních optických komponent masivně podporovaný modul. SFP moduly v dnešní době postupně vytěsňují starší konstrukce modulů, konkrétně například GBIC moduly. Na rozdíl od GBIC modulu má modul SFP přibližně $\frac{1}{2}$ velikost, což umožňuje osazení aktivních prvků v hustotě až 24 portů pro SFP moduly na jednu jednotku.

Kapitola 5

White Rabbit

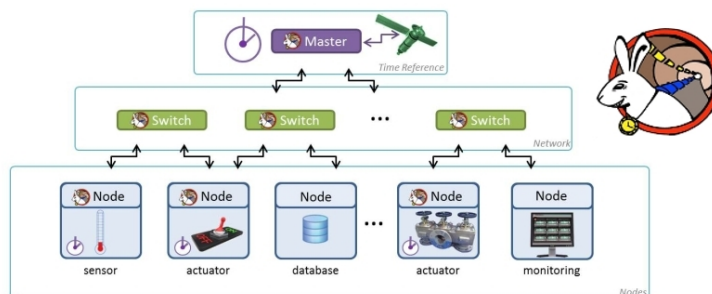
Dle dokumentace [14] je White Rabbit plně deterministická síť založená na bázi Ethernetu, konkrétně se jedná o rozšíření synchronního Ethernetu, pro účely všeobecného přenosu a synchronizaci dat. Umožňuje synchronizaci více než 1 000 uzlů se sub-nanosekundovou přesností pro délku vláken až 10 km. Jedná se o open-source projekt, který je komerčně dostupný.

White Rabbit poskytuje subnanosekundovou přesnost synchronizace pro velké distribuované systémy. Právě to umožňuje deterministické a spolehlivé doručování dat. White Rabbit propůjčuje uživateli možnost přesně měřit časově označená měřená data, skýtá spouštění sběru dat v rozsáhlých systémech za možnosti současného využití stejné sítě k přenosu dat.

Mezi hlavní rysy systému White Rabbit tedy patří:

- Sub-nanosekundová synchronizace
- Možnost propojení tisíců uzlů
- Typická vzdálenost mezi uzly až 10 km
- Spolehlivý přenos dat díky gigabitové rychlosti založené na bázi Ethernetu
- Plně open-source hardware, software i firmware
- Hardware vyráběný komerčně více dodavateli

Pro lepší představu o členění White Rabbit slouží ukázka hierarchie celého systému White Rabbit 5.2.



Obrázek 5.1: Hierarchie White Rabbit systému[14]

Projekt White Rabbit [1] vznikl na částicovém urychlovači v CERN hlavně pro účely časové synchronizace. V rámci projektu byl navržen ucelený koncept časové synchronizace, který se snaží využít stávajících standardů, a dosáhnout co největší přesnosti a spolehlivosti. Cílem projektu je dosáhnout či alespoň se co nejvíce přiblížit přesnosti lepší než 1 ns.

Veškeré síťové prvky mají redundantní spojení, avšak v porovnání s klasickým PTP protokolem jsou všechny redundantní spoje aktivní. V případě výpadku se okamžitě začne používat jiný aktivní datový spoj, a tudíž není třeba čekat na autokonfiguraci. V projektu White Rabbit je kombinována klasická synchronizace se synchronním Ethernetem Sync-E. Právě díky této skutečnosti je možné přesné navázání frekvence.

Provoz zajišťují optická vlákna. Asymetrie způsobená různou rychlostí šíření světla při různých vlnových délkách je v provozu numericky korigována. Součástí návrhu je i Dual Mixer Time Difference (DMTD), tedy přesné měření fázové odchylky technikou, s jejímž použitím se naskýtá možnost měřit fázový rozdíl v jednotkách ps. Celou komunikaci lze korigovat díky tomu, že měření je prováděno automaticky.

[1] Breuer dodává [1]: „Díky koncepci protokolu a použitým korekcím lze například na 2 km dlouhém optickém vedení dosáhnout jitter menší než 80 ps a to i v případě, že je optické vedení podrobena tepelnému namáhání, které by se jinak projevilo v nanosekundových odchylkách.“

5.1 Důvody kalibrace systému White Rabbit

Synchronizace v případě White Rabbit [15] vyplývá z kombinace IEEE1588-2008 (PTP) se dvěma dalšími vylepšeními: přesná znalost modelu pož-
 dění spojení a synchronizace hodin přes fyzickou vrstvu.

Každé zařízení White Rabbit Master a White Rabbit Slave má určité konstantní zpoždění přenosu a příjmu (ΔTX_M , ΔRX_M , ΔTX_S , ΔRX_S). Jde o souhrnný výsledek SFP transceiveru, PCB trasování a zpoždění elektronických součástek, stejně jako zpoždění uvnitř FPGA čipu. Dodatečné zpoždění příjmu je také způsobeno na obou stranách vyrovnaním získaného hodinového signálu hranicemi datového toku. Tomu se říká bit-slide value a označuje se jako ϵ_M a ϵ_S . Kromě hardwarových zpoždění jsou pakety přenášené v souboru ovlivňovány i latencemi šíření v obou směrech (δ_{MS} , δ_{SM}). Tyto latence šíření vlny nejsou stejné, neboť ke komunikaci pomocí jediného vlákna se současně používají různé vlnové délky. Na základě těchto parametrů je round-trip zpoždění (delay_{MM}) definováno jako součet všech výše popsanych faktorů zpoždění:

$$\text{delay}_{MM} = \Delta TX_M + \Delta RX_M + \Delta TX_S + \Delta RX_S + \epsilon_M + \epsilon_S + \delta_{MS} + \delta_{SM} \quad (5.1)$$

5.2 Zařízení WR-LEN

Obecně [10] White Rabbit Lite Embedded Node (WR-LEN) je řešení, které přináší subnanosekundovou přesnost do sériových řetězců, kdy každá deska WR-LEN obdrží synchronizaci z vyšší úrovně hierarchie a poskytuje ji na nižší úroveň. V rámci přenosu času a fáze po optických vláknech přes 1G Ethernet poskytuje WR-LEN dynamickou kalibraci na vzdálenosti až desítky kilometrů a jeho škálovatelnost přesahuje. Všestrannost WR-LEN navíc umožňuje uživateli přenášet čas a frekvenci v uzlech Master-Slave a Master-Master.

Následující synchronizační signály jsou k dispozici na desce WR-LEN:

- 1 PPS I/O signál, synchronizovaný do WR sítě
- 10 MHz výstupní signál, synchronizovaný do WR sítě
- 10 MHz vstupní signál. V tomto případě je WR-LEN nakonfigurovaný jako GrandMaster a může být připojen na referenci externích Master hodin.

„Jedná se o konkurenceschopnou WR alternativu schopnou podporovat konfiguraci se sériovým zapojením. Umožňuje distribuci PPS/10MHz signálů a protokolu IRIG-B. WR-LEN je k dispozici i ve verzi OEM, díky které je možné do určitého produktu začlenit přesnou časovou synchronizaci.[11]“

Základní charakteristika:

- Sub-nanosekundová časová přesnost
- Kompaktní velikost

- Rozsah vzdálenosti až 80 km pomocí vlákna
- Podpora PTPv2 či Sync-E
- Dynamická kalibrace
- Robustnost a redundance
- Vzdálené monitorování a upgrade
- Programovatelná spoušť
- Časová značka události
- Python GUI: WR-LEN/SPEC (LM32)



Obrázek 5.2: Zařízení White Rabbit LEN [11]

5.3 Zařízení WR-SWITCH

White Rabbit switch (zkráceně lze WRS) [6] je hlavní součástí sítě White Rabbit. Stejně jako každý moderní přepínač, i White Rabbit switch obsahuje procesor s vlastním operačním systémem.

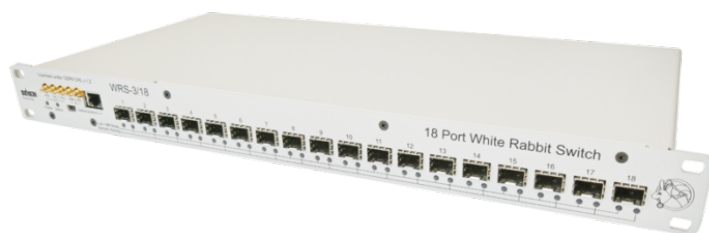
Dle [11] se jedná o první komerčně dostupné zařízení vyvinuté pro technologii White Rabbit (WR). Distribuuje čas a frekvenci s přesností na nanosekundy přes tisíce uzlů prostřednictvím standardního optického vlákna skrze síť typu MAN. Funguje také jako základní přepínač dat.

Dynamická konfigurace umožňuje každému zařízení WRS [6] načíst svůj vlastní konfigurační soubor při každém spuštění a použít případné volby před zahájením jakékoli služby. Název konfiguračního souboru může zahrnovat MAC adresu, adresu IP nebo HOSTNAME zařízení, aby bylo

možné současně spustit několik přepínačů s různou konfigurací. Umístění konfiguračního souboru lze zvolit do *dot-config* nebo načíst ze serveru DHCP.

Základní charakteristika:

- Deterministická distribuce času s přesností 1 ns.
- Funkce na velké vzdálenosti (stovky km).
- Zachování subnanosekundové přesnosti napříč mnoha zařízeními (dle [11] až 14 skoků)
- Subnanosekundové přesné časové značky událostí (ps pro ethernetový provoz)
- Redundantní topologie sítě.
- Dynamická kalibrace
- Vysoká škálovatelnost.
- Heterogenní časové rozhraní (PTPv2, Sync-E)
- 18 SFP portů pro 1GbE
- Správa SNMP a podpora VLAN
- Integrované webové GUI
- Otevřený hardware



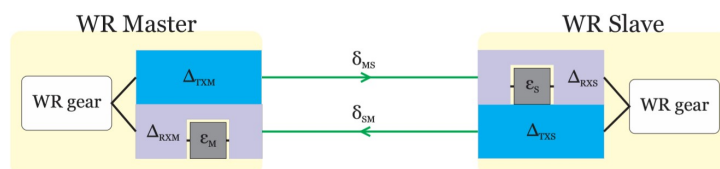
Obrázek 5.3: Zařízení White Rabbit Switch [11]

Kapitola 6

Kalibrace zařízení

Ještě před samotným sestavením softwarového řešení kalibrace systému White Rabbit bylo nutné se seznámit s postupem a možnými problémy během řešení úlohy. Pro lepší pochopení problematiky související s tímto tématem se stal velmi nápomocným dokument sestavený v CERNu, kde bylo možné se podrobněji seznámit s jednotlivými kroky kalibrace[3]. Dle daného dokumentu byla navržena a ověřena metodika pro kalibraci systému White Rabbit. Korektnost navrhované metodiky byla poprvé ověřována v rámci semestrální práce a během tohoto procesu vznikl zjednodušený popis postupu dané kalibrace. Tento dokument je dostupný v příloze A.

Kompletní kalibrace White Rabbit systému byla provedena v konfiguraci WR-SWITCH jako GrandMaster a WR-LEN jako Slave. Optické kabely použité pro kalibraci měly délku 15 m a 10 km. Pro lepší přehlednost bylo používáno označení f1 pro kratší vlákno, f2 pro delší vlákno a spojením těchto vláken vzniklo vlákno označované jako f3. Pro měření časových intervalů zpoždění Master-Slave, tedy 1-PPS pulzů, byl použit čítač Stanford research systems SR 620. Každé spojení dvou zařízení White Rabbit charakterizuje hardwarové zpoždění a zpoždění vznikající během šíření vláknem, celý problém je zobrazen na 6.1



Obrázek 6.1: Model spojení White Rabbit zařízení [11]

6.1 Kalibrace latence vlákna

Připojte se k oběma zařízením přes monitorovací systém. Konkrétně k zařízení Slave se připojte pomocí sériové linky a k zařízení Master skrze SSH připojení. V případě popisované kalibrace byl pro sériové připojení použit program Putty. Velmi vhodné je, společně s otevřenými příkazovými řádkami, se připojit na Management port WR-SWITCHE. Jde o GUI WR-SWITCH, odkud lze též některé hodnoty potřebné k následujícím výpočtům vyčíst a též se zde během kalibrace některé parametry nastavují či pozměňují.

White Rabbit zařízení Slave a WR zařízení Master se v tomto počátečním kroku spojí pomocí kratšího optického vlákna, tedy vlákna f1. Po propojení zařízení je nutno vyčkat na synchronizaci. Úspěšnou synchronizaci lze poznat i v monitorovacím programu. Do příkazové řádky se zadá příkaz `stat`. Pokud jsou zařízení synchronizována, v řádku `Servo state` se objeví hláška `TRACK_PHASE`.

Nyní se dá již vyčíst první z parametrů k následným výpočtům, tedy $delay_{MM1}$, který se skrývá ve výpisu v monitorovacím programu pod názvem `Round-trip time` a je v ps. Aktualizaci výpisu hodnot je možno zastavte stiskem klávesy `ESC`. Pro vyčtení hodnoty ϵ_{S1} se zadá příkaz `stat bts`. Veličina je udávána též v ps. Pozor, tento příkaz vypíše `bitslide` hodnotu pouze na portu `wr0` a nikde jinde. Je nutné tedy mít zařízení Slave připojené na portu `wr0`. Hodnotu ϵ_{M1} je uživatel schopen vyčíst skrze již zmíněné GUI WR-SWITCHE. Konkrétně se tato hodnota nalézá pod záložkou `Endpoint tool`. Hodnota ϵ_{M1} je skryta pod názvem `loopback` u portu, kam je Master zařízení připojeno. Opět jsou jednotky ps. Tímto pro tuto chvíli skončila práce s optickým vláknem f1.

Zařízení Slave a Master se nyní propojí pomocí vlákna f2. Vyčká se na synchronizaci a proceduru vyčítání hodnot se zopakuje. Tedy, pomocí příkazu `stat` se získá $delay_{MM2}$, pomocí příkazu `stat bts` se vyčte hodnota ϵ_{S2} a z GUI WR-SWITCH v záložce `Endpoint tool` se získá hodnota ϵ_{M2} .

Nyní se obě vlákna spojí a vytvoří se nejdelší optická cesta pro měření, tedy vlákno f3. Opět se počká na synchronizaci a i zde se vyčtou žádané hodnoty, tentokrát se bude jednat o $delay_{MM1}$, ϵ_{S3} a ϵ_{M3} . Pro výpočet zpoždění jednotlivých tras se použijí následující rovnice:

$$delay'_{MM1} = delay_{MM1} - \epsilon_{M1} - \epsilon_{S1} \quad (6.1)$$

$$delay'_{MM2} = delay_{MM2} - \epsilon_{M2} - \epsilon_{S2} \quad (6.2)$$

$$delay'_{MM3} = delay_{MM3} - \epsilon_{M3} - \epsilon_{S3} \quad (6.3)$$

Výsledné zpoždění vláken f1 a f2 se pak získá pomocí výpočtů níže.

$$\delta_1 = \text{delay}'_{MM3} - \text{delay}'_{MM2} \quad (6.4)$$

$$\delta_2 = \text{delay}'_{MM3} - \text{delay}'_{MM1} \quad (6.5)$$

6.1.1 Výsledné parametry kalibrace latence vlákna

Delay _{MM1}	1029191 ps	Delay _{MM2}	10422979 ps	Delay _{MM3}	10432068 ps
ϵ_{M1}	2270 ps	ϵ_{M2}	10558 ps	ϵ_{M3}	502 ps
ϵ_{S1}	9600 ps	ϵ_{S2}	5600 ps	ϵ_{S3}	4000 ps
Delay' _{MM1}	1017321 ps	Delay' _{MM2}	104213621 ps	Delay' _{MM3}	10436566 ps
δ_1	153945 ps	δ_2	103350245 ps	X	X

Tabulka 6.1: Parametry kalibrace latence vlákna

6.2 Asymetrie vláken

V dalším kroku kalibrace se provádí měření pro zjištění asymetrie vlákna. I na začátku toho to kroku se spojují zařízení Slave a Master pomocí vlákna f1. Je nutné nastavit parametr α zařízení na hodnotu 0. Na straně Slave použijeme příkaz `sfp add <port, který používáme pro Slave> <SFP ID transceiveru> <deltaRx> <deltaTx> <alpha>` s danými požadovanými parametry. Na straně Master to lze provést v GUI WR-SWITCH v záložce Fiber configuration. α se skrývá pod hodnotou Value, úplně vpravo, v řádku příslušného kanálu. V případě prováděné kalibrace to byl kanál s číslem 2. Též nastavíme vlnové délky, které používáme. Pro popísanou kalibraci šlo o 1550 nm a 1310 nm. S tím také souvisí nutnost nastavení čísla používaného kanálu k příslušnému portu v GUI WR-SWITCH v záložce Endpoint configuration nastavit. Během prováděné kalibrace byl používán port wr1 a kanál číslo 2. Po proběhnutí synchronizace zařízení WR je možno pokračovat v dalších krocích kalibrace. Z čítače PPS pulzů lze získat pro následný výpočet hodnotu **skew_{PPS1}**, jedná se o zkresení 1-PPS signálu mezi Slave a Master. Stejná procedura se zopakuje i pro vlákno f2. Získá se tím hodnota **skew_{PPS2}**.

Obě hodnoty **skew_{PPS}** se využijí při výpočtu parametru α , který se následně bude zadávat do GUI WR-SWITCH.

$$\alpha = \frac{2(\text{skew}_{PPS2} - \text{skew}_{PPS1})}{\frac{1}{2}\delta_2 - (\text{skew}_{PPS2} - \text{skew}_{PPS1})} \quad (6.6)$$

Hodnota α se zadá do záložky Fiber configuration v GUI WR-SWITCH k příslušnému kanálu, který se používá. Pro hodnotu α , která e zadává na

straně Slave zařízení je nutné provést ještě přepočítání na správný formát čísla.

$$\alpha^N = 2^{40} \frac{\alpha + 1}{(\alpha + 2) - \frac{1}{2}} \quad (6.7)$$

6.2.1 Výsledné parametry kalibrace asymetrie vlákna

skew_{PPS1}	-48902.5 ps	skew_{PPS2}	-37977.7 ps	α	$4.2292e^{-4}$
$\sigma(\text{skew}_{PPS1})$	15.5 ps	$\sigma(\text{skew}_{PPS2})$	14.82 ps	α^N	$7.3111057e^{11}$

Tabulka 6.2: Parametry kalibrace asymetrie vlákna

6.3 Kalibrace zpoždění transceiverů

Posledním krokem kalibrace se pro uživatele stane kalibrace zpoždění transceiverů. K neznámému zařízení se připojí pomocí vytvořeného kalibrátoru. Tedy, pomocí vlákna se známým parametrem α , který byl vypočten v rovnicích 6.6 a 6.7. Pro tento krok je také bezpodmínečně důležité použít odpovídající SFP transceiver. Pro zjištění, jaké SFP transceivery se již nachází v databázi slouží příkaz `sfp show`, který se zadává na straně Slave v monitorovacím programu. Pro zjištění SFP ID uživatele se zadává příkaz `sfp detect`. SFP ID zařízení Slave používaného během popisované kalibrace: SFPSMGBEBIDI3120.

Pro zjištění, jaké SFP ID má konkrétní SFP transceiver na straně WR-SWITCH slouží příkaz `wrs_sfp_dump -I`, který se zadává na straně Master v monitorovacím programu při připojení pomocí SSH. Tímto příkazem se získá soupis, co je připojeno na jednotlivých portech. Během popisované kalibrace šlo o SFP transceiver s následujícím SFP ID: SFPSMGBEBIDI5520. SFP ID získané z WR-SWITCH, tedy vyčtené v monitorovacím programu na straně Master se vloží do GUI WR-SWITCH do záložky SFP database. Do kolonky Vendor Name se zadává výrobce, ID SFP transceiveru do kolonky Model a vlnové délky, které používáme do kolonky λ_{trx} .

Z monitorovacího programu na straně Slave si pomocí příkazu `gui` nebo též pomocí příkazu `stat` lze vyčíst Round-trip time, tedy hodnotu, která představuje delay_{MM} a fixní hodnoty $\Delta \mathbf{T}\mathbf{x}_M$, $\Delta \mathbf{R}\mathbf{x}_M$. Pomocí příkazu `stat bts` lze vyčíst bitslide hodnotu, tedy ϵ_S . Pro výpočet hodnot $\Delta \mathbf{T}\mathbf{x}_S$ a $\Delta \mathbf{R}\mathbf{x}_S$, potřebných pro finální kalibraci, si též je nutno z první části procesu kalibrace převzít hodnotu δ_1 a z druhé části kalibrace převzít hodnotu skew_{PPS1} , tedy hodnotu zpoždění mezi Master a Slave při měření pomocí krátkého vlákna, která bude představovat hodnotu skew_{PPS} .

v následujících výpočtech.

$$\frac{1}{2}s = \frac{1}{2}(\text{delay}_{MM} - \Delta T x_M - \Delta R x_M - \epsilon_S - \delta_1) \quad (6.8)$$

$$\Delta T x_S = \frac{1}{2}s - \text{skew}_{PPS} \quad (6.9)$$

$$\Delta R x_S = \frac{1}{2}s + \text{skew}_{PPS} \quad (6.10)$$

Pro vložení SFP do databáze slouží příkaz:

```
sfp add <port používaný pro Slave> <SFP ID transceiveru> < $\Delta R x_S$ >
< $\Delta T x_S$ > < $\alpha$ >
```

V případě popisované kalibrace:

```
sfp add SFPSMGBEBIDI3120 wr0 214490 201010 116387312.
```

Po restartování PTP daemon a synchronizaci by měla být kalibrace finálně hotová. V případě prvotní popisované kalibrace se povedlo získat hodnotu 1-PPS stejnou jak pro krátké vlákno **f1**, tak pro dlouhé vlákno **f2**. Jak ale bylo zjištěno, po nastavení těchto parametrů do Master a Slave jednotky je vhodné provést finální měření skew_{PPS} a případně znovu přepočítat $\Delta R x_S$ a $\Delta T x_S$, tak aby se dosáhlo nulového offsetu. Pro nulovou hodnotu zpoždění je třeba ještě dodatečně dokalibrovat zařízení. Jde o zvýšení, respektive snížení hodnoty $\Delta R x_S$, respektive $\Delta T x_S$ o hodnotu skew_{PPS} , která se na čítači zobrazí po restartování a synchronizaci zařízení.

6.3.1 Výsledné parametry kalibrace zpoždění transceiverů

Před finálním dokalibrováním:

delay_{MM}	1039805 ps	$\Delta T x_M$	223897 ps	$\Delta R x_M$	231073 ps
ϵ_S	15200 ps	$\Delta T x_S$	151910 ps	$\Delta R x_S$	278790 ps

Tabulka 6.3: Parametry kalibrace zpoždění transceiverů před dokalibrováním

Po provedení finálního měření skew_{PPS} a přepočítání $\Delta T x_S$ a $\Delta R x_S$. Měřeno čítačem SR620.

skew_{PPS}	49100 ps	$\Delta T x_S$	201010 ps	$\Delta R x_S$	214490 ps
---------------------	----------	----------------	-----------	----------------	-----------

Tabulka 6.4: Parametry kalibrace zpoždění transceiverů po dokalibrování

6.4 Shrnutí výsledků reálné kalibrace

Použitím této kalibrace na reálný systém White Rabbit se eliminovala vnitřní zpoždění použitých adaptérů včetně využitých transceiverů. Vliv chromatické disperze způsobené použitím dvou rozdílných vlnových délek,

konkrétně 1310 nm a 1550 nm, se podařilo téměř potlačit. Kalibrací se také povedlo téměř eliminovat závislost na délce použitého vlákna.

Kapitola 7

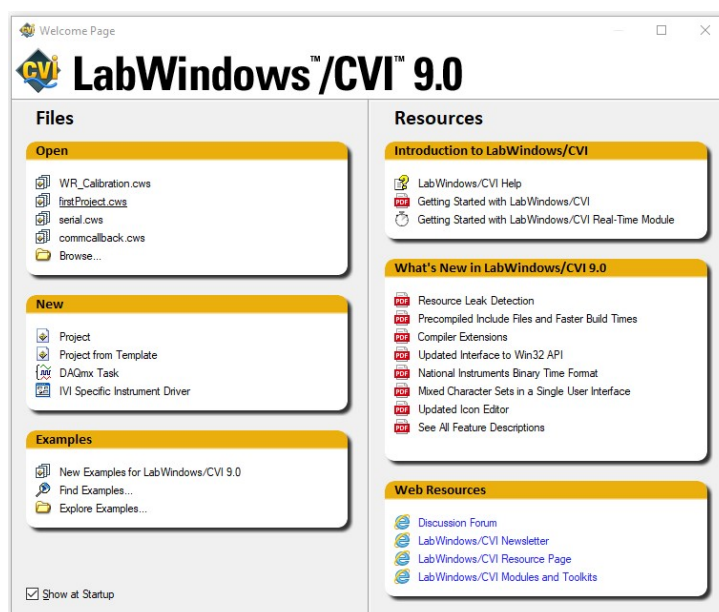
Aplikace pro kalibraci

Na základě úspěšného ověření funkčnosti vybrané metodiky kalibrace systémů White Rabbit mohla být vytvořena aplikace pro usnadnění celého procesu kalibrace. Aplikace sice nenabízí plné zautomatizování procesu kalibrace, avšak uživateli umožní lehčí průchod skrze jednotlivé kroky postupu. Jde spíše o podpůrný element, který výrazně přispívá k pohodlnému nastavení jednotlivých parametrů procesu kalibrace.

7.1 Vývojové prostředí

Softwarové řešení bylo implementováno pomocí programovacího jazyka C. Jako vývojové prostředí bylo vybráno LabWindowsTM/CVI, konkrétně ve verzi 9.0.1 od firmy National Instruments. Obecně LabWindowsTM/CVI může být charakterizováno jako vývojové prostředí ANSI C softwaru, které nabízí velmi komplexní sadu programovacích nástrojů pro vytváření testovacích a měřících aplikací. [2]

Sama společnost National Instruments[2] na svém webu píše: „Integrované programovací prostředí LabWindows/CVI ANSI C pomáhá vytvářet vlastní inženýrské aplikace. Můžete jej použít ke správě projektu, úpravě a ladění zdrojového kódu, vytvoření uživatelského rozhraní a testování výstupu a výkonu kódu v jednom zjednodušeném pracovním prostoru s kartami. LabWindows/CVI obsahuje nástroje pro pokročilé ladění, dokumentaci kódů a nasazení systému, takže můžete integrovat řízení zdrojového kódu, požadavky a systémy správy dat. Software také usnadňuje rychlé získávání dat z GPIB, USB, sériových, ethernetových, PXI, VXI a FPGA nástrojů pomocí vestavěných knihoven I/O nástrojů, vestavěných ovladačů nástrojů nebo dvou interaktivních asistentů měření.“



Obrázek 7.1: Welcome Page vývojového prostředí LabWindowsTM/CVITM

7.2 Popis aplikace

Aplikace je koncipována záložkově. Konkrétně obsahuje 4 samostatná okna, kdy v každém se provádí jiný krok procesu kalibrace. Pro přehlednost a usnadnění procesu obsahuje každé okno přesný popis postupu kalibrace. Tento popis je řešen pomocí vyskakovacího okna při stisknutí tlačítka označeného otazníkem. V tomto pop-up okně uživatel nalezne potřebné informace pro snadný průchod skrze daný krok kalibrace. Jedná se o detailní popis „krok-za-krokem“, jak správně postupovat na dané úrovni procesu kalibrace.

Všechny kroky kalibrace, které se provádějí na straně WR-LEN, který s aplikací komunikuje po sériové lince, jsou prováděny pomocí aplikace a díky k tomu určeným tlačítkům. Tím se snižuje riziko nežádáného vstupu ze strany uživatele do procesu kalibrace. Manuálně se provádějí kroky spojené s WR-SWITCH, který je třeba připojit k používanému počítači skrze SSH komunikaci. K tomuto segmentu se připojujeme kvůli komunikaci s Master zařízením, které též tvoří zařízení WR-LEN, avšak samozřejmě fyzicky jiné než to, které představuje Slave zařízení. Pro komunikaci s WR-SWITCH se nejlépe osvědčilo používání Management Portu přímo na WR-SWITCHi. Díky tomuto portu se lze dostat do webového GUI, kde se provádějí změny a vyčítají se zde některé potřebné parametry pro kalibraci systémů White Rabbit. Vzhled úvodní stránky webového GUI ukazuje obr.7.2. V některých případech se může stát, že ještě před samotnou úvodní stránkou bude Management Port vyžadovat přihlášení. Ve všech případech se během vývoje aplikace osvědčilo při-

hlašovací jméno: root a kolonku pro heslo nechat bez vyplnění.

Switch Info

Hostname	(none)
IP Address	10.20.30.2
MAC Address	64:FB:81:20:03:B5
Kernel Version	3.16.38
Firmware Version	v5.0.1
Hardware Version	scb: v3.4 backplane: v3.30
FPGA type	LX240T
Manufacturer	7S
Serial Number	949
Kernel Compiled Date	#1 Fri Aug 25 12:15:11 CEST 2017

WRS Services

PTP Mode	GrandMaster
NTP Server	time.ufe.cz
White-Rabbit Date	1970-02-11 22:55:02.600633000 TAI 1970-02-11 22:54:27.600633000 UTC
WR Status	
PPSI	[on]
System Monitor	[on]
Net-SNMP Server	[on] (port 161)
Temperature (°C)	fpga:49.63

Obrázek 7.2: Ukázka úvodní stránky webového GUI přístupném Management Portu WR-SWITCH

Neopomenutelnou informací pro uživatele aplikace je fakt, že barevné odlišení jednotlivých kolonek nebylo zvoleno náhodně. Zelená políčka by měl v průběhu procesu kalibrace vyplňovat uživatel manuálně, oproti žlutá barva políček signalizuje hodnoty, které jsou vyplňovány automaticky, pouze na základě stisknutí příslušného tlačítka. Bílá políčka jsou políčka, která jsou výsledkem či mezivýsledkem určité operace, respektive výpočtem na pozadí aplikace dle příslušných rovnic.

Důležitým faktem celé aplikace se též stává událost, která se děje při každém stisknutí tlačítka "Compute" v jednotlivých záložkách aplikace. Dochází totiž k průběžnému ukládání všech důležitých parametrů procesu kalibrace do textového souboru. Uživatel tím získá možnost kalibraci zopakovat s příslušnými hodnotami bez nutnosti procházet všemi kroky kalibrace od počátku. Je tím také zaručeno, že při nečekaném výpadku aplikace se nemusí celý proces nutně procházet znovu. Hodnoty jednotlivých políček má uživatel pohodlně k dispozici v daném textovém souboru, konkrétně WRCalib.txt.

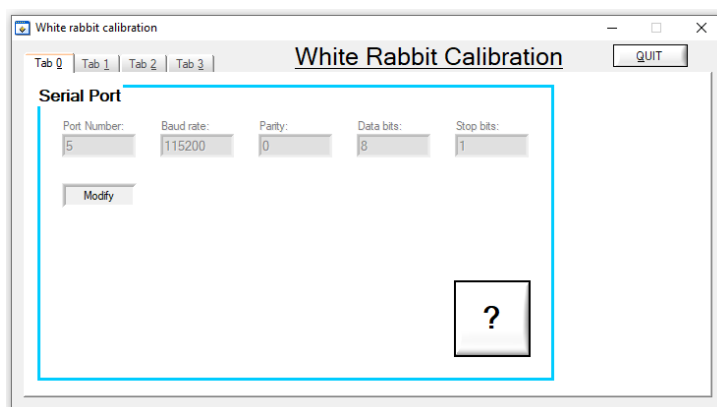
7.2.1 Tab 0 - Navázání spojení s WR-LEN

V prvním okně aplikace se nastavují parametry pro připojení WR-LEN, konkrétně segmentu představujícího Slave zařízení, k aplikaci, tedy para-

metry pro sériovou komunikaci mezi aplikací a Slave stranou. Při zapnutí aplikace jsou v kolonkách předvyplněné hodnoty. Uživatel může tyto hodnoty v případě souhlasu přijmout stisknutím tlačítka "Verify". Pokud se některá hodnota neshoduje se skutečností, uživatel může lehce daný změnit manuálním vepsáním korektní hodnoty do příslušné kolonky. Uživatel má možnost měnit číslo portu, ke kterému se bude připojovat, Baud rate, vybrat, zda parita připojení bude sudá či lichá zadat počet datových bitů či počet stop bitů.

Ve chvíli, kdy jsou všechna vepsaná data v kolonkách správná, uživatel potvrdí akci stisknutím tlačítka "Verify". Po stisknutí toho tlačítka dojde k ověření, zda data v kolonkách mají požadovaný formát. Tedy, zda kolonka neobsahuje nekorektní znaky. Další důležité ověření, které je prováděno během kontroly zadaných dat, je ověření, zda kolonka není prázdná. I obou případech je o těchto skutečnostech uživatel aplikace upozorněn chybovou hláškou.

Následně dojde k připojení zařízení k příslušnému portu. Od této chvíle je možné komunikovat mezi aplikací a koncovým zařízením. V případě, že se některý z parametrů připojení změnil, tedy došlo by kupříkladu k připojení jiného zařízení na jiný port, uživatel je schopen tu skutečnost propsat do aplikace pomocí stisknutí tlačítka "Modify", které vidí na místě původního tlačítka "Verify". Po změně údajů lze opět stisknout tlačítko pro připojení, tedy tlačítko "Verify" a opět navázat komunikaci s koncovým zařízením. Situaci lze vidět na obr. 7.3



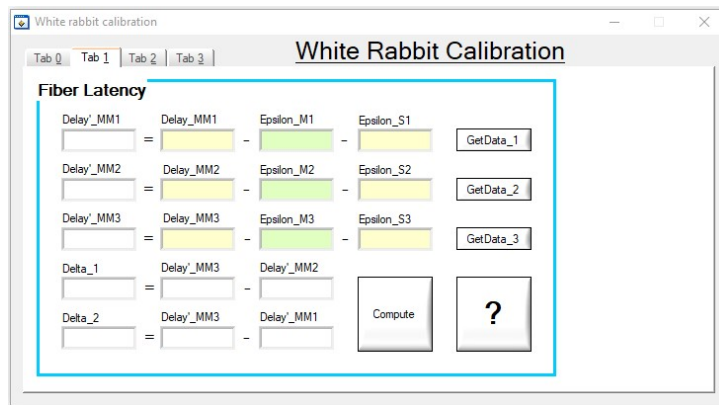
Obrázek 7.3: Ukázka připojení WR-LEN pomocí Tab 0

7.2.2 Tab 1 - Kalibrace latence vlákna

Po úspěšném připojení zařízení WR-LEN k sériovému portu lze přejít k prvnímu bodu samotné kalibrace, v tomto případě kalibraci latence optického vlákna. WR-LEN, představující Slave stranu kalibrace, a druhý WR-LEN, představující Master stranu, by měly na začátku tohoto kroku

být spojeny krátkým optickým vláknem f1.

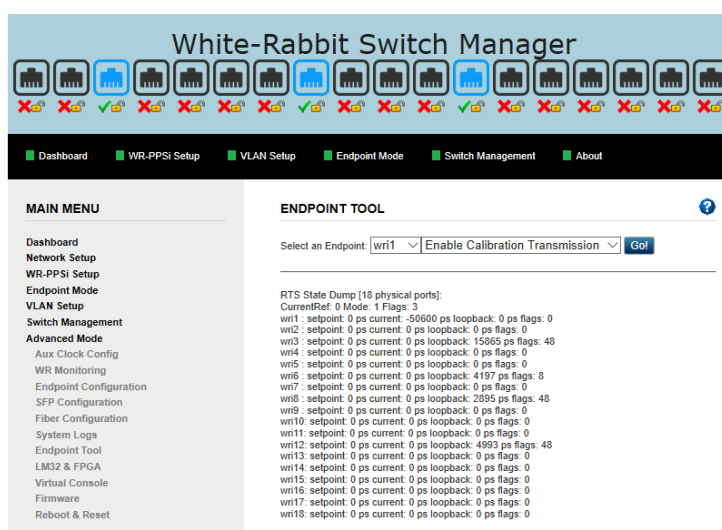
Pokud tomu tak je, nic nebrání uživateli ve stisknutí tlačítka "GetData_1". Aplikace se nejprve ujistí, že parametry pro sériovou komunikaci jsou korektní. V případě negativní odpovědi vyzve pomocí chybové hlášky uživatele k verifikování parametrů spojení. V případě kladné odpovědi se následně vyšle do WR-LEN příkaz *stat*. Obsah vzniklého výpisu se uloží do bufferu a v tomto bufferu se dále vyhledávají parametry, které uživatel má v úmyslu získat. Hledají se tedy hodnoty pro kolonky **Delay_MM1** a **Epsilon_S1**. Dané hodnoty se automaticky propíší do příslušných okének. Ukázkou nevyplněné záložky Tab 1 lze spatřit na obr.7.4.



Obrázek 7.4: Tab 1 před vyplněním údajů a vypočtením rovnic

Pro získání hodnoty **Epsilon_M1**, jak již zelená barva políčka napovídá, je třeba větší kooperace uživatele s některým připojeným zařízením. V případě Tab 1 jde o práci s WR-SWITCH, konkrétně s webovým GUI přístupným skrze Management Port. Ve webovém GUI v záložce Endpoint Tool nalezne hodnotu **loopback** u příslušného čísla portu, na kterém je k WR-SWITCH připojené zařízení WR-LEN a manuálně ji zadá do políčka **Epsilon_M1**. Vzhled webového GUI, konkrétně záložky Endpoint Tool je znázorněn na obr.7.5

Tento postup uživatel zopakuje i pro dlouhé optické vlákno f2, tlačítkem "GetData_2" a spojení obou optických vláken f3, tlačítkem "GetData_3". Po vyplnění všech 9 políček nebrání nic uživateli ve stisknutí tlačítka "Compute", které na získané hodnoty použije vzorce 6.3 a 6.5. Neboť budou hodnoty **Delta_1** a **Delta_2** potřebné v dalších krocích procesu kalibrace, dojde též k automatickému propsání daných hodnot na příslušná místa v jednotlivých záložkách aplikace.

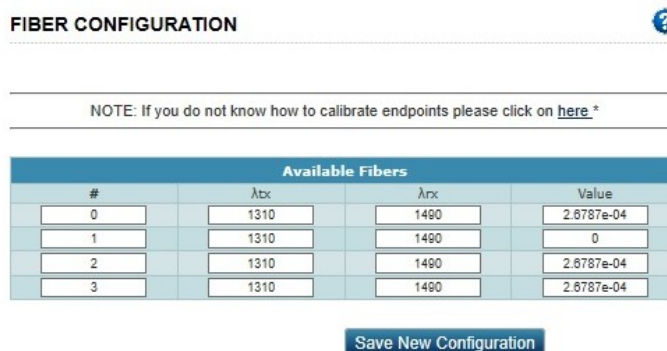


Obrázek 7.5: Ukázka vyčtení hodnoty **loopback** ze záložky Endpoint Tool ve webovém GUI

7.2.3 Tab 2 - Kalibrace asymetrie vlákna

Kupříkladu hodnota **Delta_2** se automaticky vepsala z Tab 1 do Tab 2 přímo na příslušné místo pro něj určené. Tím se proces kalibrace dostává do další fáze, konkrétně do části, kdy dochází ke kalibraci asymetrie optického vlákna.

Tento krok však nezačíná práci s WR-LEN a vyčítáním hodnot z tohoto segmentu, avšak zde pracuje uživatel nejprve s WR-SWITCH. Stejně jako v Tab 0, i zde se pracuje nejprve s optickým vláknem f1, kterým se spojí koncová zařízení Master a Slave. Ve webovém rozhraní Management Portu se přejde do záložky Fiber configuration a parametr **alfa** u právě používaného kanálu se nastaví na 0. Daný úkon vyobrazuje obr.7.6



Obrázek 7.6: Zapsání nulové hodnoty alfa do záložky Fiber configuration

Používaný kanál lze nastavit v záložce Endpoint configuration. K portu, který se používá se přiřadí číslo používaného kanálu. Pokračuje se v záložce Fiber configuration, kde se nastaví vlnové délky, které používají TX a RX transceivery. Je nutné dbát na to, aby se měnili pouze hodnoty pro používaný kanál. Tím v tuto chvíli lze opustit práci ve webovém rozhraní Management portu. Přechází se zpět do aplikace.

Neboť databáze SFP transceiverů, kam se chystáme zapisovat pojme najednou pouze 4 SFP ID a uživatel nemůže vědět, kolik místa ještě v dané databázi zbývá, je nutno provést vyčištění databáze SFP transceiverů. Při tvorbě aplikace se však myslelo i na situaci že by uživatel mohl obsah původní databáze chtít znát, proto se vytvořilo mírně multifunkční tlačítko "Read Database". Po stisknutí tohoto tlačítka dojde k vyčtení aktuálního obsahu databáze, zapsání právě vyčtených dat do textového souboru SFPFile.txt a následnému smazání obsahu v databázi.

Stisknutím tlačítka "Get_SFP_F1" se pomocí sériové komunikace vyčte hodnota **SFP_ID**, **Delta_TX_1** a **Delta_RX_1**. Dalším krokem v tomto procesu se stává stisknutí tlačítka "Send_SFP_F1", které provede přidání SFP transceiveru do databáze. Neboť je třeba obnovit relaci spojení a propsat změny skrz celý systém, je v tomto bodě procesu kalibrace nutné zařízení restartovat a vyčkat na synchronizaci. Po ustálení hodnoty na čítači 1-PPS pulzů, respektive proběhnutí synchronizace zařízení by měl uživatel vyčíst z čítače 1-PPS pulzů hodnotu zpoždění a vepsat ji do kolonky **SKEW_PPS1**. Zde si uživatel může všimnout dalšího usnadnění, které pro jeho pohodlí bylo vytvořeno. Hodnota **SKEW_PPS1** se totiž při zapisování vkládá do obou kolonek pro něj určených současně a uživatel ji nemusí psát manuálně dvakrát. Tato výhoda je použita v celé aplikaci tam, kde je třeba.

Po zapsání hodnoty zpoždění z čítače uživatel musí kvůli dalšímu postupu vyměnit krátké optické vlákno **f1** za dlouhé optické vlákno **f2** a proceduru, kterou právě prováděl v aplikaci v záložce Tab 2 opakovat. Provede pomocí tlačítka "Get_SFP_F2" vyčtení hodnot **Delta_TX_2** a **Delta_RX_2** ze zařízení Slave, pro propsání získaných hodnot do zařízení stiskne tlačítko "Send_SFP_F2". Opět provede restart spojení a vyčká na synchronizaci zařízení. I zde se provede manuální zápis hodnoty z čítače 1-PPS pulzů do kolonky **SKEW_PPS2**.

V případě, že se ve všech políčkách pro doplňování nachází příslušné hodnoty, tedy matematický výraz nemá prázdná políčka ve jmenovateli či v čitateli, je ten pravý čas na stisknutí tlačítka "Compute". Jak již bylo řečeno, aplikace hlídá, aby nedocházelo k nesprávnému formátu hodnot v políčkách či k přehlédnutí nevyplněného okénka. Nejinak tomu je i v případě Tab 2. Uživatel by i zde, stejně jako ve všech ostatních záložkách byl na tyto skutečnosti upozorněn chybovou hláškou a aplikace

by vyčkala na opravu daných chyb.

Stisknutím tlačítka "Compute" došlo k vypočtení hodnot **alfa** a **alfa_N**. Nyní se uživatel vrátí k práci s webovým GUI na Management Portu na straně WR-SWITCH, neboť získanou hodnotu **alfa** bude zadávat do záložky Fiber configuration na místo předtím zadávané 0. Je velmi nutné dbát na správný formát zadávání, konkrétně xe^{-04} ! Vypočtená hodnota **alfa_N** byla automaticky propsána do záložky Tab 3, neboť bude v dalším kroku kalibrace použita jako jeden z parametrů příkazu *sfp add ...*

Pro lepší přehlednost a pochopení souslednosti záložky Tab 2 lze pohlédnout ještě na obr.7.7 a 7.8. První zmíněný obrázek nabízí čtenáři lepší pochopení formátu pro zadání parametru **alfa** na straně webového GUI Management Portu. Jedná se jednu z reálných hodnot, které byly během vypracování metodiky kalibrace získány a ověřeny. Obrázek zobrazuje parametr **alfa** po změně z nulové hodnoty na hodnotu získanou výpočtem pomocí výrazu v Tab 2.

Obrázek 7.8 doplňuje čtenáři informaci o tom, jak by měla vypadat

FIBER CONFIGURATION ?

NOTE: If you do not know how to calibrate endpoints please click on [here](#).*

Available Fibers			
#	λ_{tx}	λ_{rx}	Value
0	1310	1490	2.6787e-04
1	1310	1490	2.5812e-04
2	1310	1490	2.6787e-04
3	1310	1490	2.6787e-04

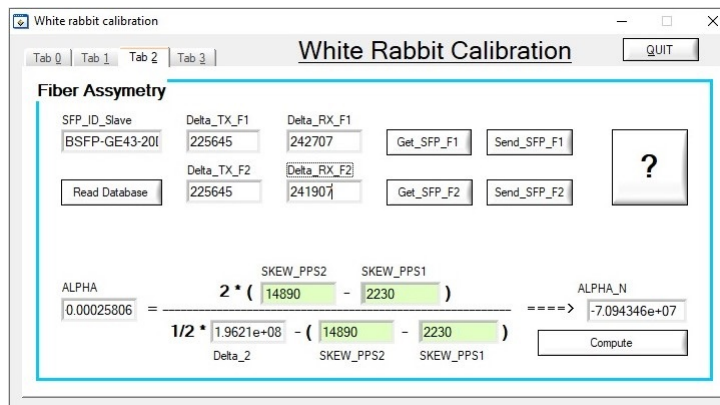
Save New Configuration

Obrázek 7.7: Model spojení White Rabbit zařízení

záložka Tab 2 před přechodem k dalšímu kroku kalibrace, respektive před překliknutím na Tab 3.

7.2.4 Tab 3 - Kalibrace zpoždění transceiverů

Nyní se přesouvá uživatel k téměř poslednímu bodu procesu kalibrace systému White Rabbit. Zde je opět nezbytné nejprve pracovat s webovým GUI na straně WR-SWITCH. Tento krok se musí provádět s krátkým vláknem f1, u kterého známe parametr **alfa** a používat odpovídající transceiver.



Obrázek 7.8: Model spojení White Rabbit zařízení

V první řadě se uživatel musí připojit k zařízení Master skrze SSH komunikaci a ve vzniklé příkazové řádce zadat příkaz `wrs_sfp_dump -I`. Zadání příkazu je znázorněno na obr.7.9 Nyní se v příkazové řádce přejde

```

10.20.30.2 - PuTTY
login as: root
root@10.20.30.2's password:
dot-config status: config_ok
dot-config source: local
wrs-10.20.30.2#wrs_sfp_dump -I
wrs_sfp_dump: Initializing SFP I2C busses...
Reading SFP eeprom via I2C

```

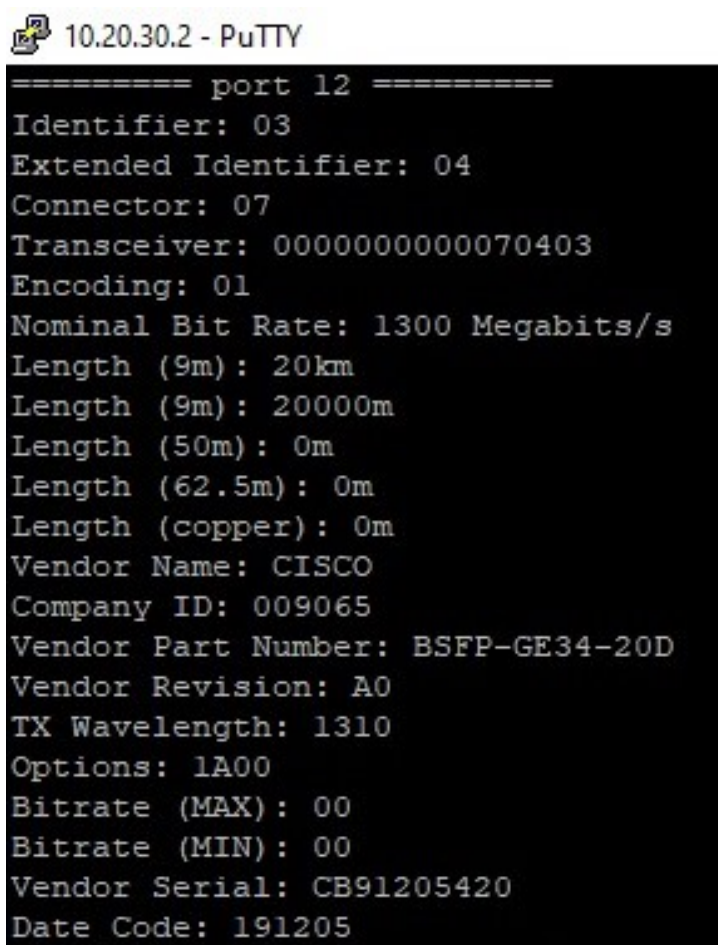
Obrázek 7.9: SSH příkazový řádek s příkazem `wrs_sfp_dump -I`

na výpis pro příslušný používaný port. Společně s tím se stává nezbytné přejít ve webovém GUI WR-SWITCH na záložku SFP Database a začne se s vytvářením nového SFP. Z výpisu na příslušném portu se převezmou následující parametry:

- Vendor Name = výrobce SFP
- Model = SFP_ID switche
- tx = 0, rx = 0, 'lambda_TXRX' = 'vlnová délka TX' + 'vlnová délka RX', např. 'lambda_TXRX' = 1550 + 1310, přesně v tomto formátu

Pro přehlednost je ukázka jednoho takového výpisu z příkazové řádky ke shlédnutí na obr.7.10.

Dále se uživatel přesune zpět do aplikace. Stisknutím tlačítka "GetData_4" se doplní políčka **Delay_MM**, **Delta_TX_M**, **Delta_RX_M** a **Epsilon_S**. Hodnota **Delta_1** by měla být vyplněna. Jedná se o **Delta_1**, kterou



```
10.20.30.2 - PuTTY
===== port 12 =====
Identifier: 03
Extended Identifier: 04
Connector: 07
Transceiver: 0000000000070403
Encoding: 01
Nominal Bit Rate: 1300 Megabits/s
Length (9m): 20km
Length (9m): 20000m
Length (50m): 0m
Length (62.5m): 0m
Length (copper): 0m
Vendor Name: CISCO
Company ID: 009065
Vendor Part Number: BSFP-GE34-20D
Vendor Revision: A0
TX Wavelength: 1310
Options: 1A00
Bitrate (MAX): 00
Bitrate (MIN): 00
Vendor Serial: CB91205420
Date Code: 191205
```

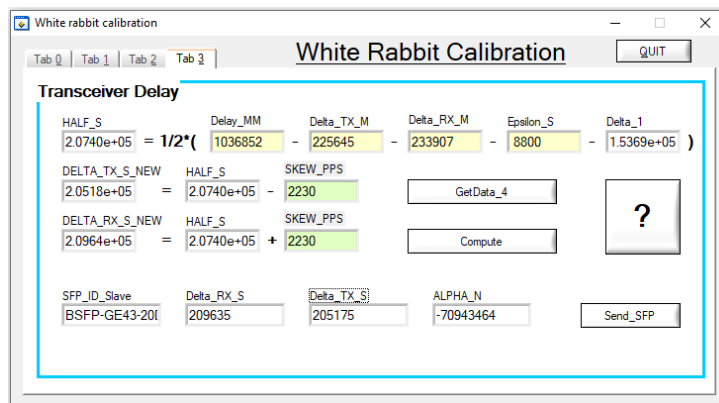
Obrázek 7.10: Ukázka výpisu informací na portu WR-SWITCH

uživatel získal v Tab 1 a která na základě funkce pro automatické propisování mnohonásobně používaných parametrů skrze záložky by se do této záložky přesně do této kolonky měla dostat. V tento moment uživatel přechází k stisknutí tlačítka "Compute" a získává tím hodnoty, které zaplní do této chvíle prázdná políčka v záložce. V ideálním případě jsou všechna políčka v záložce vyplněna a nic nebrání posledním krůčkům procesu kalibrace systému White Rabbit.

7.2.5 Finální kroky kalibrace

Pro vložení **SFP_ID_Slave** se všemi ostatními potřebnými parametry do databáze stačí stlačit tlačítko "Send_SFP". Následovat by mělo restartování všech zařízení a vyčkání na synchronizaci. Nyní lze ještě provést finální měření **skew_PPS** vypisujícím se na displeji čítače 1-PPS pulzů. V případě velkého/nenulového offsetu se provede přepočtení hodnoty **Delta_TX_S_NEW**, respektive **Delta_RX_S_NEW**. Přepočtem se mívá dokalibrování, které je též zmíněno v metodice kalibrace. Jedná se o

přičtení, respektive odečtení hodnoty zobrazující se na čítači 1-PPS pulzů k parametru **Delta_RX_S_NEW**, respektive **Delta_TX_S_NEW**. V tuto chvíli by uživatel měl opět provést restart systému a vyčkat na synchronizaci. V ideálním případě by se na čítači měla objevit hodnota zpoždění mezi Master a Slave blížící se nule. Reálně půjde o hodnotu směrodatné odchylky v řádu desítek ps. Tímto krokem lze považovat kalibraci za úspěšně ukončenou. Na obr. 7.11 lze pohlédnout na ukázkou záložky Tab 3 před ukončením kalibrace.



Obrázek 7.11: Model spojení White Rabbit zařízení

Kapitola 8

Výsledky

Kalibrací reálného systému White Rabbit se eliminovala vnitřní zpoždění použitých adaptérů včetně využitých transceiverů. Vliv chromatické disperze způsobené použitím dvou rozdílných vlnových délek se též podařilo téměř potlačit. Kalibrací se také povedlo eliminovat závislost zpoždění mezi časovými stupnicemi Master a Slave na délce použitého vlákna.

Měření bylo prováděno v laboratorních podmínkách, tudíž byly sníženy negativní vlivy na kalibraci. Tím se myslí, že přenos nebyl ovlivněn kolísáním teplot či negativními vlivy potenciálních pasivních prvků, které by mohly být zapojeny v měřicím řetězci.

Pro měření byly použity transceivery s následující parametry:

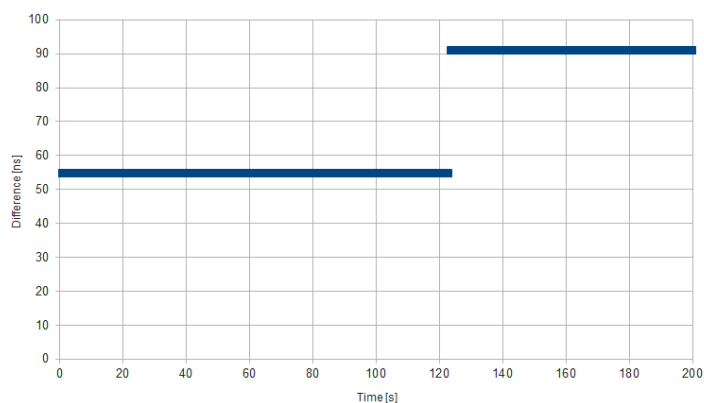
- Master SFP = SPB-7620WHPA Tx = 1310nm
- Slave SFP = SPB-7720WHPA Tx1550nm

Nejprve byla zařízení Master a Slave propojena optickým vláknem v délce 20 metrů, na které byl připojen atenuátor pro snazší připojení dlouhého vlákna během měření. V tomto zapojení byla naměřena první část souboru dat pro první část grafu. V čase 125 sekund bylo do měřicího řetězce připojeno druhé optické vlákno, tentokrát v délce 20 km. Takto pokračovalo měření a byl získán celkový soubor dat pro následné zpracování.

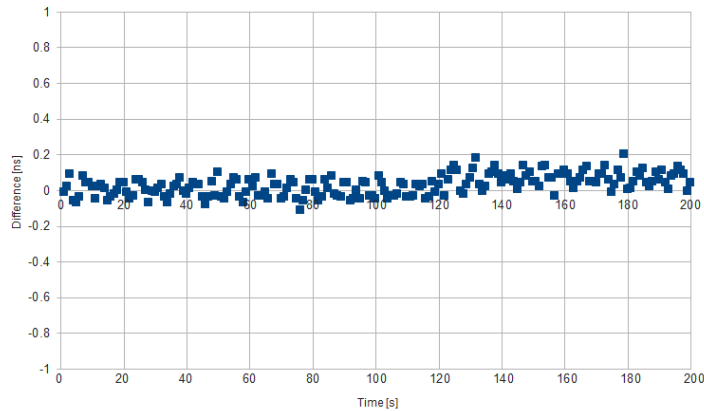
Na obr.8.1 je patrný skok v čase 125 s, kdy bylo ke krátkému vláknem připojeno vlákno dlouhé. Jedná se o situaci, kdy systém White Rabbit nebyl zkalibrovaný. Je zde vidět, že zpoždění mezi koncovými zařízeními je závislé na délce vlákna. Je tedy patrný vliv asymetrie vlákna na velikost hodnoty zobrazované na čítači. Směrodatná odchylka měření před kalibrací má hodnotu 17.419 ns.

Ve chvíli dokončení procesu kalibrace došlo k dalšímu měření systému. Měřicí řetězec se shodoval s tím předcházejícím. Byly použity stejné transceivery s hodnotami SFP, které jsou uvedeny výše. Měření bylo opět zahájeno s krátkým dvaceti metrovým optickým vláknem a v čase 125 sekund bylo přidáno optické vlákno v délce 20 km. Naměřená data

byla zpracována stejným způsobem, jako v případě nekalibrovaného měřicího řetězce. Výstupem je graf na obr.8.2. Na tomto grafu je patrné, že kalibrací byla potlačena závislost zpoždění na délce trasy. Dále lze pozorovat odstranění ofsetů obou transceiverů. Směrodatná odchylka má v tomto případě hodnotu pouze 59 ps.



Obrázek 8.1: Graf zobrazující vliv délky vlákna na zpoždění Master-Slave, nekalibrovaný případ



Obrázek 8.2: Graf zobrazující vliv délky vlákna na zpoždění Master-Slave, kalibrovaný případ

Kapitola 9

Závěr

V rámci diplomové práce byl proveden teoretický rozbor přenosu přesného času a frekvence po optických vláknech pomocí technologie White Rabbit (WR). Diplomová práce seznamuje nejprve s problematikou synchronizace, přesouvá se dále na problematiku transferu času po optických vláknech a v neposlední řadě seznamuje se samotnou technologií White Rabbit.

Během řešení diplomové práce vznikl návrh metody kalibrace systémů White Rabbit. Metoda byla ověřena na reálném měřicím systému White Rabbit. Díky použití navrhované metody došlo k eliminaci vnitřních zpoždění použitých adaptérů včetně využitých transceiverů. Vliv chromatické disperze způsobené použitím dvou rozdílných vlnových délek se podařilo potlačit. Kalibrací se též povedlo eliminovat závislost velikosti zpoždění mezi Master a Slave na délce použitého vlákna. Představené řešení kalibrace systémů WR vedlo ke snížení offsetů mezi zařízeními WR.

Celá ověřená metodika kalibrace byla implementována do podoby uživatelské aplikace, která celý proces zkalibrování systémů White Rabbit zrychlí a zjednoduší. Uživatelské rozhraní aplikace bylo koncipováno tak, aby uživateli nabídlo co nejvíce intuitivní ovládání. Vzniklé programové vybavení bylo použito pro kalibraci reálného systému White Rabbit. Stejně jako v případě manuální kalibrace, i zde došlo k eliminaci vnitřních zpoždění použitých adaptérů včetně využitých transceiverů a opět se podařilo potlačit vliv chromatické disperze způsobené použitím dvou rozdílných vlnových délek.

Díky vzniklému softwarovému řešení kalibrace systémů WR se podařilo určit dosažitelnou přesnost transferu času při použití technologie WR. Výsledky měření jsou k dispozici v kapitole 8. Analýza na základě naměřených dat prokázala, že kalibrací se odstraní vliv asymetrie vlákna a že kalibrace sníží vliv chromatické disperze na výsledky měření. Kalibrací též došlo k odstranění offsetů na obou SFP transceiverech.



Literatura

- [1] Jan Breuer. *Synchronizace času v distribuovaných heterogenních měřicích a řídicích systémech*. České vysoké učení technické v Praze, August 2016.
- [2] National Instruments corp. What is labwindowsTM/cvi? <https://www.ni.com/cs-cz/shop/electronic-test-instrumentation/programming-environments-for-electronic-test-and-instrumentation/what-is-labwindows-cvi.html>. Accessed: 2020-08-03.
- [3] Grzegorz Daniluk. *White Rabbit calibration procedure*. CERN BE-CO-HT, October 2019. version 1.1.
- [4] Jaroslav Dolecek, editor. *Moderní učebnice elektroniky 3. díl - Optoelektronika - optoelektronické prvky a optická vlákna*. BEN - technická literatura, 2005.
- [5] Sven-Christian Ebenhag. *Frequency Transfer Techniques and Applications in Fiber Optic Communication Systems*. Chalmers University Of Technology, 2013.
- [6] Rubini A. Wujek A. Rat B. Vaga F. *White Rabbit Switch: User's Manual*, August 2017. wr-switch-sw-v5.0.1.
- [7] JCGM. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, 2012. 3rd edition.
- [8] J. Otto, editor. *Ottův slovník naučný, ilustrovaná encyklopedie obecných vědomostí, Svazek 24*. Nakladatelství ARGO společně se společností Lombard a.s., 2003.
- [9] Tomáš Rouča. *Limitující faktory optického vlákna na přenosovou kapacitu optických tras*. Vysoké učení technické v Brně, 2010.
- [10] Seven Solution S.L. *User Guide WR-LEN*. Seven Solution S.L., July 2017. v5: 13 Jul. 2017 - 9475c22.
- [11] Seven Solution. White rabbit technology. <https://sevensols.com/index.php/projects/white-rabbit-technology/>. Accessed: 2020-08-01.

- [12] Ekosoftware s.r.o. Není kalibrace jako kalibrace. <https://www.ekosoftware.cz/neni-kalibrace-jako-kalibrace>. Accessed: 2020-08-01.
- [13] LANCOMAT s.r.o. Sfp moduly. <https://www.lancomat.cz/sfp-moduly-c850/>. Accessed: 2020-08-13.
- [14] WR CERN Team. White rabbit. <https://www.ohwr.org/project/white-rabbit/wikis/home>. Accessed: 2020-08-02.
- [15] Tomasz Wlostowski. *Precise time and frequency transfer in a White Rabbit network*. Warsaw University of Technology, 2011.



Příloha A

White Rabbit kalibrace - Semestrální práce

White Rabbit – kalibrace

Autor: Bc. Šárka Květoňová

1. Kalibrace latence vlákna

- 1.1 Je třeba mít 2 WR zařízení, jedno nastavené jako Slave, druhé jako Master a 2 různě dlouhá optická vlákna. Jedno vlákno postačí v délce několika metrů, druhé je třeba mít dlouhé alespoň jednotky kilometrů. Dále se hodí též čítač pulzů, kde uvidíme časové zpoždění 1-PPS mezi Master a Slave.
- 1.2 Připojte se s oběma zařízeními přes některý monitorovací systém. V našem případě jsme se připojovali přes Putty a komunikovali pomocí sériové linky.
- 1.3 Velmi vhodné je si společně s otevřenými příkazovými řádkami otevřít ještě webové rozhraní na adrese 192.168.1.50. Jde o GUI WR switche, odkud lze též některé hodnoty potřebné k následujícím výpočtům vyčíst a také zde budeme měnit v průběhu kalibrace některé parametry. Pro připojení k WR switchi použijeme ethernetový kabel.
- 1.4 WR zařízení Slave a WR zařízení Master spojíme pomocí kratšího optického vlákna, nazvěme jej f_1 . Pro úplnost si zavedme, že delší z optických vláken nese název f_2 . Počkejme, dokud se zařízení nesynchronizují. Synchronizaci poznáme i v monitorovacím programu. Do příkazové řádky zadáme příkaz „stat“. Pokud jsou zařízení synchronizována, v řádku Servo state se objeví hláška TRACK_PHASE.
- 1.5 Nyní můžeme vyčíst „delay_{MM1}“, který se skrývá ve výpisu před námi pod názvem „Round-trip time“ a je v pikosekundách. Aktualizaci výpisu hodnot si zastavte stiskem klávesy Esc.

```
COM9 - PuTTY
WR PTP Core Sync Monitor: PPSI - LEN board
Esc = exit

TAI Time:                Fri, Dec 9, 2016, 18:52:39

WR-LEN mode : WRC_SLAVE_WRO
-----
Link status:

wr0 : Link up   (RX: 1017, TX: 299), mode: WR Slave   Locked Calibrated
IPv4: BOOTP running


wr1 : Link down
-----

Servo state:                TRACK_PHASE
Phase tracking:              ON
Synchronization source:    wr0

Timing parameters:

Round-trip time (mu):       104234294 ps
Master-slave delay:         52157659 ps
Master PHY delays:          TX: 223897 ps, RX: 240673 ps
Slave PHY delays:           TX: 151910 ps, RX: 271590 ps
Total link asymmetry:       -81024 ps
Cable rtt delay:            103346224 ps
Clock offset:                -10 ps
Phase setpoint:              12020 ps
Skew:                        -9 ps
Manual phase adjustment:    0 ps
Update counter:              11
--wrc# stat bts
wr0: 8000 ps
wrc#
```


- 1.6 Pro vyčtení hodnoty ϵ_{S1} zadejte příkaz „stat bts“. Veličina je udávána v pikosekundách. Pozor, tento příkaz vypíše bitslide hodnotu pouze na portu wr0 a nikde jinde. Je nutné tedy mít zařízení Slave připojené na portu wr0. Nepodařilo se nám zatím přijít na způsob vyčtení z jiného portu. A dokonce jsme se mnohdy ani nebyli schopni synchronizovat.
- 1.7 Hodnotu ϵ_{M1} jsme schopni vyčíst z již zmíněného webového rozhraní na adrese 192.168.1.50. Konkrétně se tato hodnota nalézá pod záložkou Endpoint tool. Hodnota ϵ_{M1} se skrývá pod názvem loopback u portu, kam je Master zařízení připojeno. Opět se jedná o veličinu s jednotkami v pikosekundách.

ENDPOINT TOOL 

Select an Endpoint: Enable Calibration Transmission

RTS State Dump [18 physical ports]:
 CurrentRef: 0 Mode: 1 Flags: 3
 wri1 : setpoint: 0 ps current: -56500 ps loopback: 5541 ps flags: 48
 wri2 : setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri3 : setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri4 : setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri5 : setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri6 : setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri7 : setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri8 : setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri9 : setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri10: setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri11: setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri12: setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri13: setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri14: setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri15: setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri16: setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri17: setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0
 wri18: setpoint: 0 ps current: 0 ps loopback: 0 ps flags: 0

- 1.8 Propojíme zařízení Slave a Master pomocí vlákna f_2 , tedy několikakilometrového. Počkáme na synchronizaci a proceduru vyčítání hodnot opakujeme. Tedy, pomocí příkazu „stat“ získáme „delay_{MM2}“, pomocí příkazu „stat bts“ získáme hodnotu ϵ_{S2} a z webového rozhraní v záložce Nedopít tool vyčteme hodnotu ϵ_{M2} .
- 1.9 Nyní propojíme vlákna f_1 a f_2 dohromady a vytvoříme nejdelší optickou cestu během měření. Opět počkáme na synchronizaci a opět vyčteme hodnoty. Tentokrát se bude jednat o hodnoty delay_{MM3}, ϵ_{S3} a ϵ_{M3} .
- 1.10 Spočteme zpoždění jednotlivých tras pomocí následujících rovnic:
 $delay'_{MM1} = delay_{MM1} - \epsilon_{M1} - \epsilon_{S1}$
 $delay'_{MM2} = delay_{MM2} - \epsilon_{M2} - \epsilon_{S2}$
 $delay'_{MM3} = delay_{MM3} - \epsilon_{M3} - \epsilon_{S3}$
- 1.11 Spočteme zpoždění vláken f_1 a f_2
 $\delta_1 = delay'_{MM3} - delay'_{MM2}$
 $\delta_2 = delay'_{MM3} - delay'_{MM1}$
- 1.12 Výsledky reálné kalibrace z 6.11.2019 pro vlákna $f_1 = 15$ m a $f_2 = 10$ km.

delay_{MM1}	1029191 ps
ϵ_{M1}	2270 ps
ϵ_{S1}	9600 ps
delay'_{MM1}	1017321 ps
δ_1	153945 ps

delay_{MM2}	104229779 ps
ϵ_{M2}	10558 ps
ϵ_{S2}	5600 ps
delay'_{MM2}	104213621 ps
δ_2	103350245 ps

delay_{MM3}	104372068 ps
ϵ_{M3}	502 ps
ϵ_{S3}	4000 ps
delay'_{MM3}	104367566 ps

2. Kalibrace asymetrie vlákna

- 2.1 Nyní začneme měření pro zjištění asymetrie vlákna. Spojíme Slave a Master zařízení pomocí vlákna f_1 a nastavíme jejich parametr α na hodnotu 0. Na straně Master to provedeme ve webovém rozhraní v záložce Fiber configuration. α se skrývá pod hodnotou Value, úplně vpravo, v řádku příslušného kanálu. V našem případě to byl kanál s číslem 2. Též nastavíme vlnové délky, které používáme. V našem případě šlo o 1550 a 1310. Na obrázku je již hodnota α po celé kalibraci, my ji v tomto kroku chceme mít nastavenou v 0.

FIBER CONFIGURATION



NOTE: If you do not know how to calibrate endpoints please click on [here](#) *

Available Fibers			
#	λ_{tx}	λ_{rx}	Value
0	1310	1490	2.6787e-04
1	1310	1490	2.6787e-04
2	1550	1310	4.233249534e-04
3	1310	1490	2.6787e-04

Save New Configuration

- 2.2 S tím také souvisí, že musíme ve webovém rozhraní v záložce Endpoint configuration nastavit k příslušnému portu, v našem případě portu wr1, který kanál používáme.

ENDPOINT CONFIGURATION



NOTE: If you do not know how to calibrate endpoints please click on [here](#) *

Endpoint Configuration						
WR port	Protocol	Δ Tx	Δ Rx	Mode	Fiber	
wr1	raw	223897	226273	master	2	
wr2	raw	224037	226377	master	0	
wr3	raw	224142	226638	master	0	
wr4	raw	224313	226471	master	0	
wr5	raw	224455	227679	master	0	
wr6	raw	224603	227891	master	0	
wr7	raw	224761	228055	master	0	
wr8	raw	224898	228178	master	0	
wr9	raw	225069	228277	master	0	
wr10	raw	225245	228435	master	0	
wr11	raw	225463	228963	master	0	
wr12	raw	225645	229107	master	0	
wr13	raw	225801	229225	master	0	
wr14	raw	225983	229463	master	0	
wr15	raw	226208	229850	master	0	
wr16	raw	226393	229907	master	0	
wr17	raw	226594	230106	master	0	
wr18	raw	226737	230273	master	0	

Save New Configuration

- 2.3 Na straně Slave použijeme příkaz „sfp add <port, který používáme pro Slave> <ID SFP transceiveru> <deltaRx> <deltaTx> <alpha>“ s danými požadovanými parametry.
- 2.4 Počkáme, dokud se zařízení WR nesynchronizují. Opět můžeme sledovat synchronizaci pomocí monitorovacího programu. V našem případě šlo o Putty a SSH spojení pomocí USB kabelu.
- 2.5 Pomocí čítače vyčteme zkreslení 1-PPS signálu mezi Slave a Master. Jedná se o hodnotu skew_{PPS1} v pikosekundách.
- 2.6 Stejnou proceduru zopakujeme i pro dlouhé vlákno f₂. Získáme tím hodnotu skew_{PPS2}.
- 2.7 Hodnotu α, kterou budeme zadávat do webového rozhraní vypočteme vzorcem:

$$\alpha = \frac{2(\text{skew}_{PPS2} - \text{skew}_{PPS1})}{\frac{1}{2}\delta_2 - (\text{skew}_{PPS2} - \text{skew}_{PPS1})}$$

Hodnotu zadáme do záložky Fiber configuration ve webovém rozhraní k příslušnému kanálu, který používáme.

FIBER CONFIGURATION ?

NOTE: If you do not know how to calibrate endpoints please click on [here](#) *

Available Fibers			
#	λ _{tx}	λ _{rx}	Value
0	1310	1490	2.6787e-04
1	1310	1490	2.6787e-04
2	1550	1310	4.233249534e-04
3	1310	1490	2.6787e-04

Save New Configuration

- 2.8 Hodnotu α, kterou budeme zadávat do příkazové řádky v monitorovacím programu na straně Slave zařízení získáme pomocí vzorce:

$$\alpha^N = 2^{40} \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha + 2} - 0.5 \right)$$

- 2.9 Výsledky reálné kalibrace z 6.11.2019 pro vlákna f₁ = 15 m a f₂ = 10 km. Měřeno čítačem SR620.

skew _{PPS1}	-48902,5 ps	skew _{PPS2}	-37977,7 ps	α	4,2292e-4
σ(skew _{PPS1})	15,5 ps	σ(skew _{PPS2})	14,82 ps	α ^N	5600 ps

3. Kalibrace zpoždění transceiverů

- 3.1 Nyní přejdeme již k samotné kalibraci. Připojíme náš kalibrátor k neznámému WR zařízení pomocí vlákna se známým parametrem α, který jsme si vypočetli výše. Nesmíme zapomenout na to, že musíme použít odpovídající SFP transceiver.
- 3.2 Pro zjištění, jaké SFP transceivery se již nachází v databázi slouží příkaz „sfp show“, který zadáváme na straně Slave v monitorovacím programu.
- 3.3 Pro zjištění ID našeho konkrétního SFP jsme zadali příkaz „sfp detect“. Získali jsme následující ID: SFPSMGBEBIDI3120

- 3.4 Pro zjištění, jaké ID má náš konkrétní SFP tranceiver na straně Switche slouží příkaz „wrs_sfp_dump -I“, který se zadává na straně Master v monitorovacím programu. Tímto příkazem získáme soupis, co je připojeno na jednotlivých portech. Na obrázku níže můžeme vidět, že na našem portu 1 je SFP tranceiver s následujícím ID: SFPSMGBEBIDI5520.

```
wrs-192.168.1.50#wrs_sfp_dump I
wrs_sfp_dump: Error: Please specify the source of SFP eeprom data.
  -L for saved data in HAL at SFP plugin
  -I for direct access to SFPs via i2c
wrs-192.168.1.50#wrs_sfp_dump -I
wrs_sfp_dump: Initializing SFP I2C busses...
Reading SFP eeprom via I2C
===== port 1 =====
Identifier: 03
Extended Identifier: 04
Connector: 07
Transceiver: 0002000000070403
Encoding: 01
Nominal Bit Rate: 1300 Megabits/s
Length (9m): 10km
Length (9m): 10000m
Length (50m): 550m
Length (62.5m): 550m
Length (copper): 0m
Vendor Name: OEM
Company ID: 009065
Vendor Part Number: SFPSMGBEBIDI5520
Vendor Revision: A
TX Wavelength: 1550
Options: 1A00
Bitrate (MAX): 00
Bitrate (MIN): 00
Vendor Serial: CLS10844281
Date Code: 181210
```

- 3.5 SFP získané na straně Switche, tedy vyčtené v monitorovacím programu na straně Master vložíme do webového rozhraní do záložky SFP database. Je nutné zadat výrobce do kolonky Vendor Name, ID SFP tranceiveru do kolonky Model a vlnové délky, které používáme do kolonky λ_{txrx} .

SFP DATABASE



SFP Configuration					
Vendor Name	Vendor Serial	Model	tx	rx	λ_{txrx}
Axcen Photonics		AXGE-1254-053	0	0	1310+1490
Axcen Photonics		AXGE-3454-053	0	0	1490+1310
APAC Opto		LS38-C3S-TC-N-	761	557	1310+1490
APAC Opto		LS48-C3S-TC-N-	-29	507	1490+1310
ZyXEL		SFP-BX1490-10-	0	0	1490+1310
ZyXEL		SFP-BX1310-10-	0	0	1310+1490
OFIBER		SFPSMGBEBIDI	0	0	1550+1310

Save New Configuration

- 3.6 Z monitorovacího programu na straně Slave si pomocí již zmíněného příkazu „gui“ vyčteme Round-trip time, tedy hodnotu delayMM a fixní hodnoty Δ_{TxM} , Δ_{RxM} , Δ_{TxS} a Δ_{RxS} . Pomocí příkazu „stat bts“ vyčteme bitslide hodnotu ϵ_s .
- 3.7 Získané hodnoty vložíme do následujícího vzorce:

$$\frac{1}{2}s = \frac{1}{2}(delay_{MM} - \Delta_{TxM} - \Delta_{RxM} - \epsilon_s - \delta_1)$$

$$\Delta_{TxS} = \frac{1}{2}s - skew_{PPS}$$

$$\Delta_{RxS} = \frac{1}{2}s + skew_{PPS}$$

3.8 Pro vložení SFP do databáze použijeme příkaz:

sfp add <port, který používáme pro Slave> <ID SFP transceiveru> <deltaRx> <deltaTx> <alpha>>

V našem případě:

sfp add SFPSMGBEBIDI3120 wr0 214490 201010 116387312

3.9 Po restartování PTP daemon a synchronizaci by měla být kalibrace finálně hotová. V našem případě se povedlo získat hodnotu 1-PPS stejnou jak pro krátké vlákno f_1 , tak pro dlouhé vlákno f_2 .

3.10 Výsledky reálné kalibrace z 6.11.2019 pro vlákna $f_1 = 15$ m a $f_2 = 10$ km.

delay_{MM}	1039805 ps	ΔTxM	223897 ps	ΔRxM	231073 ps
ε_s	15200 ps	ΔTxS	151910 ps	ΔRxS	278790 ps

3.12 Po nastavení těchto parametrů do Master a Slave jednotky je vhodné provést finální měření skewPPS a případně znovu přepočítat ΔTxS a ΔRxS , tak aby se dosáhlo nulového offsetu.

3.11 Výsledky reálné kalibrace z 6.11.2019 pro vlákna $f_1 = 15$ m a $f_2 = 10$ km. Měřeno čítačem SR620.

skewPPS	49100 ps	ΔTxS	201010 ps	ΔRxS	214490 ps
----------------	----------	-------------	-----------	-------------	-----------



Příloha B

Seznam důležitých příkazů[10]

A List of commands.

A list of the most commonly used commands is provided below:

```
## To stop the PTP daemon
wrc# ptp stop
## To set the WR-LEN mode
wrc# mode <option>
## To restart the PTP daemon again.
wrc# ptp start
## To start the WRC monitor. [Esc] to stop it.
wrc# gui
```

```
## To force the manually run of the spll init() function to initialize Soft PLL.
wrc# pll init <mode> <ref_channel> <align_pps>
## To check if SoftPLL is locked for the channel.
wrc# pll cl <channel>
## To set phase shift for the channel.
wrc# pll sps <channel> <picoseconds>
## To get current and target phase shift for the channel.
wrc# pll gps <channel>:
## To start SoftPLL for the channel.
wrc# pll start <channel>
## To stop SoftPLL for the channel.
wrc# pll stop <channel>
## To set the dac voltage value.
wrc# pll sdac <index> <val>
## To get the dac voltage value.
wrc# pll gdac <index>
```

```
## To clean the initialization script in FMC EEPROM
wrc# init erase
## To add shell command at the end of initialization script
wrc# init add <cmd>
## To print all commands from the script stored in EEPROM
wrc# init show
## To execute the script stored in FMC EEPROM (the same action is done automatically when
WRPC-2P starts after resetting LM32)
wrc# init boot
```

```
## To print which version of WRPC is running.
wrc# ver
## To set PPSi verbosity. See the PPSi manual about the meaning of the digits (hint:
verbose 1111 is a good first bet too see how the ptp system is working).
wrc# verbose <digits>
```

To get and set the MAC addresses into the ports use the **mac** command:


```
## To print the MAC address
wrc# mac get
## To re-generate the MAC address from 1-wire digital thermometer or EEPROM
wrc# mac getp
## To set the MAC address
wrc# mac set <wr0/wr1> <MAC>
## To set the MAC address to the 1-wire EEPROM (if available)
wrc# mac get <wr0/wr1>
```

The **calibration** command tries to read t2/4 phase transition from EEPROM, if not found it will run the calibration procedure

```
## Calibrate the WR-LEN
wrc# calibration
## Start calibration procedure and store the result to EEPROM
wrc#calibration <port> <force>
```

The **stat** command prints log messages and the bitslide values.

```
## To print one line log message with info about the WRC state
wrc# stat
## To print a log message for each second ([Esc] to exit back to shell).
wrc# stat cont
## To print log message for each time specified in nanoseconds param (Esc to exit back to shell).
wrc# stat cont <milliseconds>
## To print bitslide value at the wr0 port needed by calibration procedure.
wrc# stat bts
```

```
## To print the current time from WRPC-2P
wrc# time
## To print the current time in a raw format (seconds nanoseconds)
wrc# time raw
## To set only the seconds part of WRPC-2P time (useful for setting time in GrandMaster mode, when nanoseconds counter is aligned to external 1-PPS and 10MHz)
wrc# time setsec <sec>
## To set only the snanoseconds part of the WRPC-2P
wrc# time setnsec <nsec>
```

```
## To print the ID of currently used SFP transceiver
wrc# sfp detect
## To cleans the SFP database stored in FMC EEPROM
wrc# sfp erase
## To store the calibration parameters for the SFP to the database in FMC EEPROM
wrc# add <ID> <deltaTx> <deltaRx> <alpha>
## To print all SFP transceivers stored in database
wrc# sfp show
## To get calibration parameters from database for currently used SFP transceiver(it requires running _sfp detect_ first)
wrc# sfp match
```

```
## To print irigb state.
wrc# irigb
## To turn on/off irigb.
wrc# irigb on/off
## To print irigb time.
wrc# irigb print
```

```
## Prints a list of available commands.
wrc# help
## To print one line log message with info about the WRC state.
wrc# stat
## To print the devices connected to the Wishbone bus inside WRPC.
wrc# sdb
## Print the RTU (routing table unit) and shows the node connected to the ethernet port
wrc# eth
## Shows the current IP address.
wrc# ip get
## Sets the The IP address which is valid for both ports.
wrc# ip set <ip>
```

```
## Enable/disable the generation of the back signals.
trig pps_clk [on/off] [ -c -pps <coarse> <fine> -clk <coarse> <fine> [save] ]
```

B WR-LEN Virtual UART User Manual

B.1 Summary

This Appendix deals with the use of the Virtual UART Shell tool to connect with WR-LEN devices using the Etherbone protocol.

The WR-LEN's main control interface uses the serial communication via a USB cable to a PC. This is the most desirable way to monitor a WR-LEN, but in some cases is not possible to establish the serial connection. An example of this situation is a WR network with multiple nodes spread over multiple locations.

To solve this problem, a new tool has been developed by Seven Solutions S.L. It provides access to devices in a WR network to monitor devices over this network using the Etherbone protocol.

The WR-LEN devices from version 2.0 and forward supports the Etherbone protocol. The following sections explain how to setup the system to run the shell interface for sending/receiving commands to the device and some issues that may occur.

B.1.1 System Setup

The version 1.0 of the Virtual UART shell tool only supports GNU/Linux systems. This manual covers the setup in Ubuntu systems.



Příloha C

CD