

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra počítačů



Diplomová práce

**Software pro distribuované řízení a vyčítání dat ze sítě
částiových pixelových detektorů Timepix3**

Bc. Jakub Begera

Vedoucí práce: Ing. Štěpán Polanský

Studijní program: Otevřená informatika

Obor: Softwarové inženýrství

15. prosince 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Begera** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **420021**
 Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
 Zadávací katedra/ústav: **Katedra počítačů**
 Studijní program: **Otevřená informatika**
 Studijní obor: **Softwarové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Software pro distribuované řízení a vyčítání dat ze sítě částicových pixelových detektorů Timepix3

Název diplomové práce anglicky:

Software for distributed control and data readout for network of Timepix3 particle pixel detectors

Pokyny pro vypracování:

The objective of this diploma thesis is to design and develop software for distributed acquisition control and data readout from the network of Timepix3 particle pixel detectors. The software will provide settings of acquisition parameters for the detectors (e.g., acquisition time, detector mode, threshold, etc.) as well as data readout and data persistence. An adequate data structure and suitable storage type should be chosen. The system will be able to operate in a distributed mode for the possibility of horizontal scalability and manageability of a higher number of detectors. Another motivation for horizontal scalability is the fact that the Timepix3 detector is theoretically able to generate data flow up to 5.12 Gbps, which cannot be handled from multiple detectors by a single node. The software will also implement the Katherine communication protocol [3]. The Timepix3 Ethernet Embedded Readout. ATLAS-TPX, a network of 32 Timepix detectors installed within ATLAS experiment at LHC at CERN, is controlled from a single central server [1], i.e., without the possibility of horizontal scalability. The Second Long Shutdown of LHC is planned in between the years 2019 and 2020, in which the modernization of ATLAS-TPX network is proposed with the usage of Timepix3 detectors and software which will be designed and developed within this diploma thesis.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Manek, P., Begera, J., Bergmann, B., Burian, P., Janecek, J., Polansky, S., ? Suk, M. (2017). Software system for data acquisition and analysis operating the ATLAS-TPX network. In 2017 International Conference on Applied Electronics (AE). IEEE. <https://doi.org/10.23919/ae.2017.8053593>
- [2] Poikela, T., Plosila, J., Westerlund, T., Campbell, M., Gaspari, M. D., Llopart, X., ? Kruth, A. (2014). Timepix3: a 65K channel hybrid pixel readout chip with simultaneous ToA/ToT and sparse readout. Journal of Instrumentation, 9(5), C05013?C05013. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/05/c05013>
- [3] Burian, P., Broulím, P., Jára, M., Georgiev, V., & Bergmann, B. (2017). Katherine: Ethernet Embedded Readout Interface for Timepix3. Journal of Instrumentation, 12(11), C11001?C11001. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/11/c11001>.
- [4] Z. Vykydal et al., The Medipix2?-based network for measurement of spectral characteristics and composition of radiation in ATLAS detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 607, Issue 1, 1 August 2009, Pages 35-?37, ISSN 0168-?9002, h <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2009.03.104>.
- [5] D. Turecek et al., Remote control of ATLAS?-MPX Network and Data Visualization, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 633, Supplement 1, May 2011, Pages S45-?S47, ISSN 0168?-9002, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.117>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Štěpán Polanský, katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření FJFI

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

Datum zadání diplomové práce: **17.01.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Štěpán Polanský
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen 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 studenta

Poděkování

TODO

Prohlášení

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

V Praze dne 27. 5. 2016

.....

Abstract

TODOabstrakt anglicky

Abstrakt

TODOabstrakt česky

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Motivace	1
1.2	Timepix3 detektor	1
1.3	Struktura práce	2
2	Úvod do hybridních částicových pixelových detektorů	3
2.1	Hardwarová architektura	3
2.2	Princip detekce	4
2.3	Operační módy detektoru	5
2.4	Vyčítání naměřených dat	6
2.5	Kalibrace	7
2.5.1	Threshold equalizace	8
2.5.2	Energetická kalibrace	8
2.5.3	Time-Walk korekce	10
2.5.4	ToA offset korekce	11
2.6	Přehled detektorů rodiny Medipix	11
2.7	Vyčítací rozhraní	13
2.7.1	FITPix	13
2.7.2	AdvaDAQ	14
2.7.3	ATLAS Pix	14
2.7.4	Katherine	15
2.7.4.1	Komunikace s nadřazeným PC a řízení akvizice dat	16
3	Návrh architektury	19
3.1	Motivace	19
A	Seznam použitých zkratk	25
B	Obsah přiloženého CD	29

Seznam obrázků

2.1	Struktura hybridního polovodičového pixelového detektoru Timepix3, skládající se z vyčítacího čipu a polovodičového senzoru [14].	4
2.2	Princip detekce ionizujícího záření detektorem Timepix3 [14].	4
2.3	Zpracování signálu pixelem detektoru dle nastaveného módu (<i>Medipix</i> , <i>ToT</i> a <i>ToA</i>) [14].	5
2.4	Doba vyčítání detektoru za použití <i>Frame-based</i> (non-sparse) a <i>Data-driven</i> (sparse) módu [15].	7
2.5	Kalibrační funkce, udávající závislost mezi energií v keV a ToT [7], vzniklá proložením získaných kalibračních bodů funkcí 2.2 a sestávající se ze dvou částí - (i) nelineární částí pro oblast nižších energií (hyperbola) a (ii) lineární částí pro vyšší energie (přímka).	8
2.6	Příklad energetického spektra jednoho pixelu Timepix detektoru s proloženou funkcí 2.3 [3].	9
2.7	<i>Time-walk</i> efekt: příklad interakce jedné částice se čtyřmi pixely detektoru, kde v každém pixelu byla deponována jiná energie, což na výstupů zesilovačů pixelů způsobilo jiné hodnoty napětí. Díky rozdílné charakteristice náběžné hrany pulzů byl threshold překročen v různých časech (t_{1-4}) [20].	11
2.8	Schéma pixelu detektoru <i>Timepix3</i> se společnou elektronikou pro 8 pixelů (tzv. <i>Super-pixel</i>) [15].	12
2.9	Vyčítací rozhraní <i>Katherine</i> s připojeným detektorem <i>Timepix3</i> vlevo a popisem vstupních a výstupních portů vpravo[4].	14
2.10	<i>Katherine</i> : příklad requestu a response řídicího datagramu pro vyčtení biasu.	17
B.1	Obsah příloženého CD	30

Seznam tabulek

2.1 Katherine: závislost maximálního datového toku na typu propojení mezi de- tektorem a vyčítacím rozhraním [4].	15
--	----

Seznam zdrojových kódů

Kapitola 1

Úvod

TODO

1.1 Motivace

TODO

1.2 Timepix3 detektor

Hybridní částicový pixelový detektor Timepix3[15] je nástupcem detektoru Timepix[11] a je vyvíjen v rámci Medipix¹ kolaborace v CERN, mezi jejíž členy patří od roku 1999 i ÚTEF ČVUT v Praze.

Detektor se skládá z matice 256×256 nezávislých pixelů, každý o hraně $55 \mu m$. Jednotlivé pixely se skládají z citlivého polovodičového senzoru (nejčastěji *Si*, nebo *GaAs*) a vyčítací CMOS elektroniky (čítače, komparátory apod.). Princip funkce detektoru lze přirovnat digitálnímu fotoaparátu. Podobně jako u digitálního fotoaparátu, začátek a konec akvizice dat je řízen uzávěrkou (tzv. *shutter signál*). Po tuto dobu pak citlivý polovodičový objem detektoru zaznamenává interakce s nabitými částicemi a dále je zpracovává dle nastaveného modu. V kapitole 2 bude na příklad popsán *Time-Over-Threshold* mód, kde hodnota čítače pixelu na konci akvizice odpovídá deponované energii interagovaných částic s daným pixelem (mezi energií a TOT je nelineární závislost, která je dána fyzikálními vlastnostmi každého pixelu a je předmětem energetické kalibrace detektoru [7]).

Timepix3 detektor přináší oproti svému předchůdci několik výhod. Je schopný operovat i v kontinuálním módu, ve kterém je každý pixel detektoru schopný detekovanou událost ihned zpracovat, nezávisle na ostatních pixelech. Tím se téměř odstraňuje mrtvá doba detektoru, zvyšuje detekční účinnost, ale i zvyšuje datový tok z detektoru, jehož maximální teoretická hodnota je až $5.12 Gb/s$.

¹<http://medipix.web.cern.ch/>

1.3 Struktura práce

TODO

Kapitola 2

Úvod do hybridních částicových pixelových detektorů

Ionizující záření je lidskými smysly nedetekovatelné, avšak jeho studie nám umožňuje pochopit podstatu hmoty, její vlastnosti a interakce. To lidstvu umožnilo mnohé aplikace, jako je například protonová terapie [13], defektoskopie nebo zkoumání pravosti uměleckých děl. První pokusy o detekci ionizujícího záření sahají do počátku 20. století, kde pomocí mlžné komory se prvně podařilo zachytit trajektorii nabitých částic. Rozvoj polovodičové technologie dal vzniku novým detekčním technologiím až po v současné době nejpokrokovějším - pixelovým detektorům.

Existuje celá řada částicových pixelových detektorů, ale v této kapitole budou popsány jen hybridní pixelové detektory, pro které je typické, že se skládají ze dvou nezávisle vyrobených částí - senzoru a vyčítacího čipu. To oproti monolitickým detektorům, kde vyčítací elektronika je součástí senzoru přináší řadu výhod, jako například snížení výrobních nákladů nebo možnost kombinace vyčítacího čipu se senzory různých materiálů (*Si*, *GaAs*, *CaTe* apod.) a tlouštěk (většinou $300\mu m$, nebo $500\mu m$).

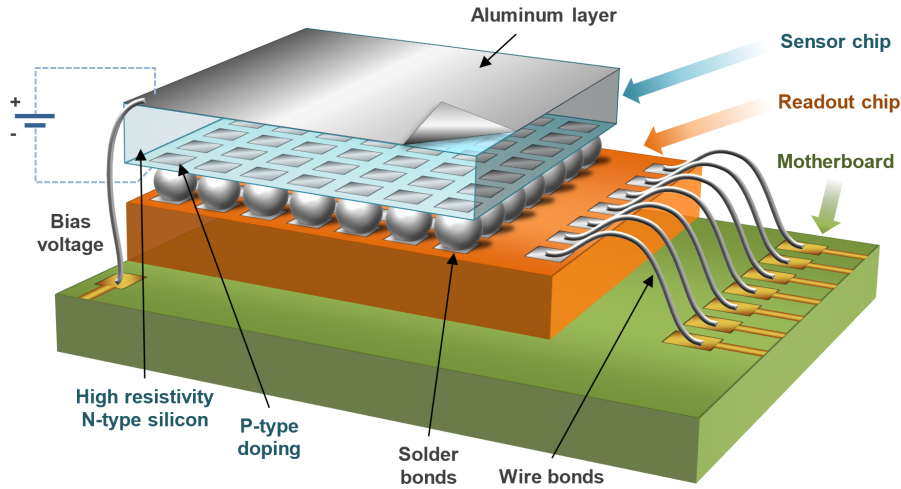
Na tomto místě je třeba zmínit, že existuje více druhů těchto detektorů (*AGH Fermilab*, *Pilatus*, *Philips Chromaix* apod.) [2], v této práci budou použity pouze detektory z rodiny detektorů Medipix.

2.1 Hardwarová architektura

Většina hybridních částicových pixelových detektorů rodiny Medipix obsahuje matici 256×256 pixelů. Každý z nich má stan o délce $55\mu m$, takže senzor čítající 65536 má plochu $1.4 \times 1.4 cm^2$.

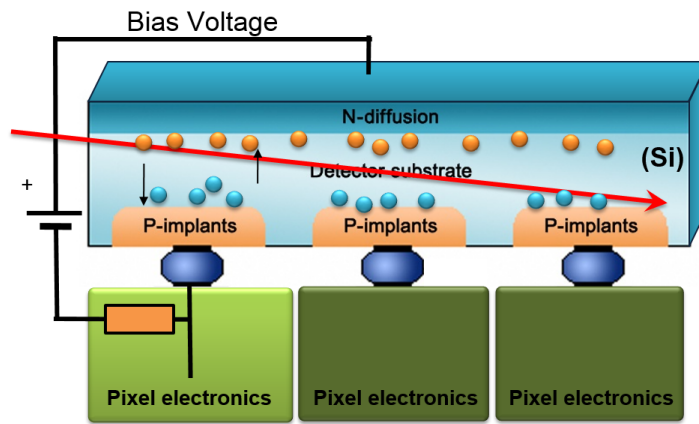
Na obrázku 2.1 je znázorněna struktura detektoru Timepix3. Vrchní část detektoru tvoří polovodičový senzor, který je nejčastěji vyroben z křemíku, ale výjimkou není také *GaAs* nebo *CaTe*. Jednotlivé pixely senzoru jsou spojeny s integrovaným ASIC¹ vyčítacím čipem pomocí technologie zvané *Bump-Bonding*. Vyčítací čip je pak propojen se základní deskou pomocí *wire-bound*, z které je ještě přivedeno měřicí napětí na senzor detektoru (tzv. *bias*).

¹z angl. Application Specific Integrated Circuit



Obrázek 2.1: Struktura hybridního polovodičového pixelového detektoru Timepix3, skládající se z vyčítacího čipu a polovodičového senzoru [14].

2.2 Princip detekce



Obrázek 2.2: Princip detekce ionizujícího záření detektorem Timepix3 [14].

Princip detekce ionizujícího záření pixelovými detektory je založen na známém jevu detekce ionizujícího záření v polovodiči.

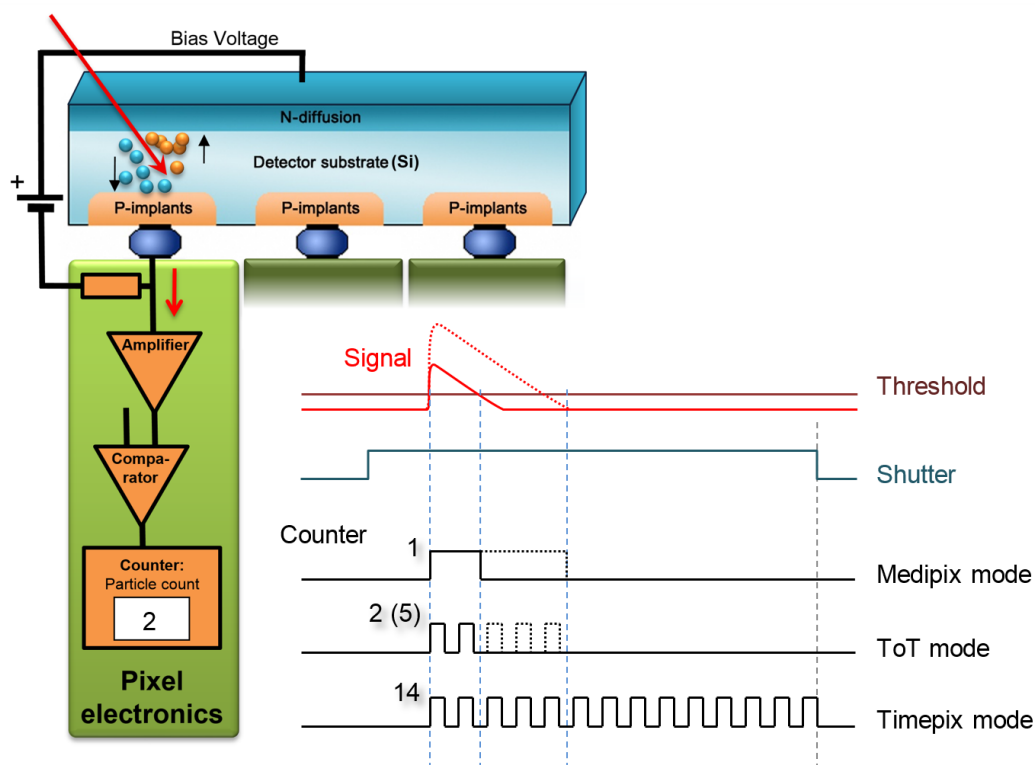
Jako náhradní schéma jednoho pixelu si lze představit diodu zapojenou v závěrném směru, kterou bez přítomnosti ionizujícího záření protéká minimální proud. Vnikne-li do senzoru ionizující částice a dojde k její interakci se senzorem, resp. část její energie je deponována do polovodičového objemu senzoru, dojde v senzoru ke vzniku elektron-děrových párů a díky lavinovému efektu i k následnému otevření PN přechodu (viz. na obr. 2.2, kde červená šipka

znázorňuje interagující částici, elektrony jsou znázorněny žlutě, modře díry).

Vzniklý proudový impuls je měřicím odporem převeden na napětí, které je komparátorem porovnáváno s prahovým napětím (tzv. *threshold*). Výsledek této komparace je dále CMOS obvodem zpracováván, dle použitého měřicího módu, jak bude ukázáno v kapitole 2.3.

Na rozdíl od CCD technologií, CMOS readout *Timepix/Medipix* detektorů negeneruje temný proud², díky odstínění signálu od šumu pomocí komparačního napětí. To znamená, že doba jedné akvizice je teoreticky neomezena, protože detektor je schopný detekovat jen ty částice, jejichž deponovaná energie (resp. amplituda vzniklého napěťového pulzu) je větší, než *threshold*.

2.3 Operační módy detektoru



Obrázek 2.3: Zpracování signálu pixelem detektoru dle nastaveného módu (*Medipix*, *ToT* a *ToA*) [14].

V této podkapitole bude vysvětlena většina operačních módu, ve kterých detektory rodiny *Medipix* jsou schopny pracovat.

Jak už bylo popsáno v předchozí kapitole, interagovaná částice vyvolá napěťový impuls, jehož tvar koreluje s deponovanou energií. Pro účely analýzy se ale používá pouze binární

²Termín charakterizující vyčítací šum u CCD snímačů. Obvykle je udáván v elektronech za sekundu při konstantní teplotě a ve tmě.

informace o překročení prahového napětí v čase. Výsledek této analýzy je po jejím dokončení uložen ve 14-bitovém registru pixelu.

Na obr. 2.3 je znázorněn příklad zpracování analýzy signálu následujícími módy:

Medipix mód (Counting mód) V tomto módu je čítač inkrementován v každém cyklu měřicí frekvence, pokud měřicí napětí překročilo prahové napětí pixelu. Na konci akvizice pak hodnota čítače odpovídá počtu zaznamenaných částic.

Time-Over-Threshold (ToT) Pracuje-li pixel v tomto módu, pak jeho čítač je inkrementován v každém cyklu měřicí frekvence, pokud měřicí napětí je vyšší, než prahové napětí pixelu. Hodnota uložená v čítači odpovídá deponované energii interagovaných částic. Mezi energií a ToT je nelineární závislost a její zkoumání je předmětem energetické kalibrace detektoru, jak bude ukázáno v kapitole 2.5.2. Tento mód má široké spektrum aplikací, například [18] nebo [13].

Time-of-Arrival (ToA) Tímto módem disponují pouze detektory *Timepix* a *Timepix3*, avšak nesdílí stejný princip. Zatímco *Timepix* detektor začne inkrementovat čítač v každém cyklu měřicí frekvence po první náběžné hraně z komparátoru, *Timepix3* na náběžnou hranu uloží do 14-bitového registru aktuální časové razítko z hodin detektoru. V obou případech ToA udává čas první interakce částice v dané akvizici.

2.4 Vyčítání naměřených dat

Jednotlivé detektory rodiny *Medipix* mají různou hardwarovou podporu pro vyčítání naměřených dat. Detektory vždy podporují alespoň jeden z těchto módů:

Frame-Based Pracuje-li detektor v tomto módu, pak jsou všechny registry čítačů pixelů vyčítány najednou, po dokončení aktuálního snímku. Vždy je třeba vyčíst všechny pixely bez ohledu na naměřenou hodnotu.

Data-Driven Tento mód, také označovaný jako *Event-Driven*, byl prvně použit v detektoru *Timepix3*. Pracuje-li detektor v tomto módu, pak v průběhu akvizice dat (resp. když *shutter* signál na nastaven na úroveň HIGH) každý pixel po zpracování události notifikuje readout interface o tom, že nová data jsou připravena k vyčtení a readout interface je pak bez prodlení vyčte a dále zpracuje.

Na obrázku 2.4 je vidět hlavní motivace pro zavedení podpory *Data-Driven* módu u detektoru *Timepix3*. Ukázalo se, že *Data-Driven* mód je efektivnější při takových měření, kde okupance snímků je menší než zhruba 50%. Po překročení této meze je efektivnější použití *Frame-Based* módů, protože není třeba přenášet souřadnice zasažených pixelů. Podle [15] vyčítací čas může být definován následovně:

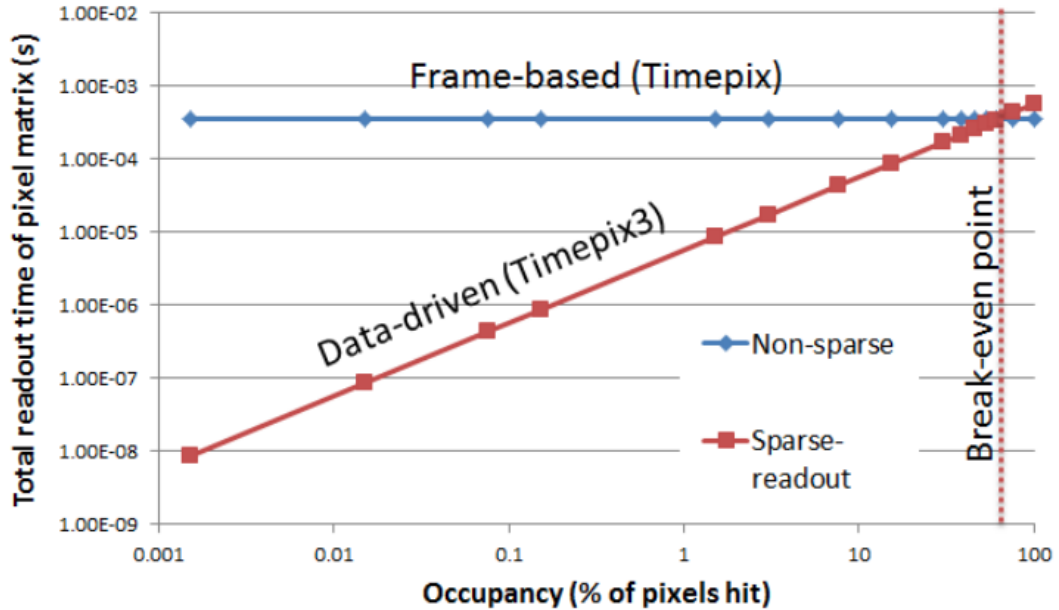
$$T_{readout} = N_{pixels} * bits_{pixel} / BW \quad (2.1)$$

kde:

N_{pixels} je počet pixelů které je potřeba vyčíst (pro *Frame-Based* mód jsou to všechny pixely detektoru (256×256) a pro *Data-Driven* je to počet zasažených pixelů),

$bits_{pixel}$ je počet bitů na pixel ($28b$ v *Frame-Based* módu a $28b + 16b$ v *Data-Driven* módu kvůli nutnosti přenášení adresy pixelu) a

BW je počet bytů za vteřinu, které je možné vyčíst z detektoru (*bandwidth*).



Obrázek 2.4: Doba vyčítání detektoru za použití *Frame-based* (non-sparse) a *Data-driven* (sparse) módu [15].

2.5 Kalibrace

Každý detektor má své specifické vlastnosti, které jsou dány nejenom výrobním procesem, ale i závislostí na opotřebení a únavě materiálu v čase, okolní teplotě nebo na nastavených měřicích parametrech (například *bias*). Hlavní motivací pro kalibraci detektorů je minimalizace systematické chyby měření. Z pohledu aplikace získaných kalibračních dat je možné kalibrační metody rozdělit do dvou kategorií:

- (i) Použití v průběhu akvizice dat - jedná se o data, která jsou použita pro nastavení akvizice dat v detektoru a mají přímý vliv na naměřená data, která danou metodou není možné dodatečně kalibrovat. Do této kategorie spadá například *threshold equalizace* (viz 2.5.1).
- (ii) Transformace naměřených dat - v tomto případě jsou kalibrační data aplikovaná dodatečně na naměřená data. Tento přístup má výhodu v možnosti dodatečné kalibrace

jž naměřených dat. To této kategorie spadá například *Energetická kalibrace* (viz 2.5.2) nebo *Time-Walk korekce* (viz 2.5.3).

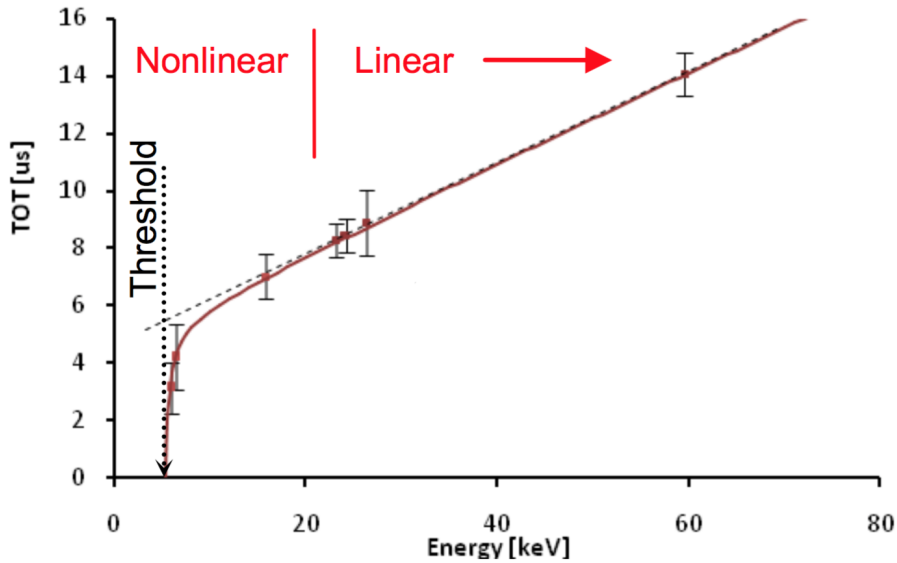
2.5.1 Threshold equalizace

V podkapitole 2.2 a 2.3 již bylo vysvětleno použití prahového napětí (*threshold*) v průběhu akvizice dat detektorem. Každý pixel detektoru má ale rozdílné fyzikální vlastnosti dané výrobním procesem, s čímž souvisí i citlivost (resp. oddělení užitečného signálu od šumu) jednotlivých pixelů. Kromě globální hodnoty thresholdu je možné pro každý pixel upravit citlivost pomocí lokální 4b hodnoty thresholdu (viz obr. 2.8).

Vlastní proces equalizace probíhá tak, že se udělá threshold scan přes všechny hodnoty, přičemž je třeba minimalizovat interakce detektoru z částicemi. V běžné praxi stačí detektor dostatečně odstínit. Výstupem tohoto procesu je pak globální threshold a jeho 4-bitové korekce pro jednotlivé pixely.

Jako vedlejší produkt tohoto procesu je rovněž maskovací matice detektoru, které obsahuje šumějící, nebo jinak poškozené pixely. To jsou například takové pixely, které bez přítomnosti interagujících částic hlásí překročení thresholdu.

2.5.2 Energetická kalibrace



Obrázek 2.5: Kalibrační funkce, udávající závislost mezi energií v keV a ToT [7], vzniklá proložení získaných kalibračních bodů funkcí 2.2 a sestávající se ze dvou částí - (i) nelineární částí pro oblasti nižších energií (hyperbola) a (ii) lineární částí pro vyšší energie (přímka).

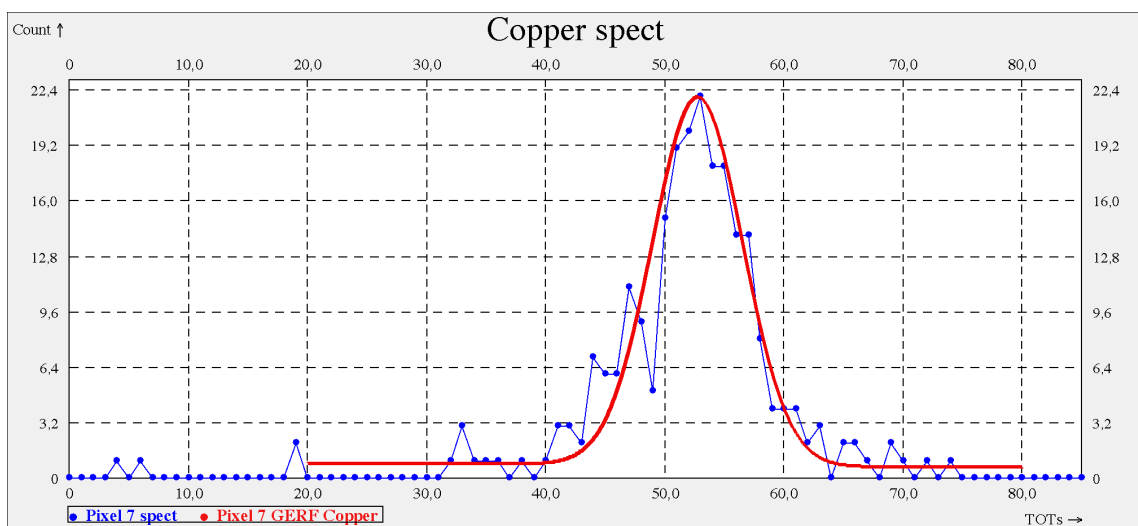
V předchozí části práce byl již představen *Time-Over-Threshold* mód (viz 2.3), ve kterém je detektor schopen měřit deponovanou energii interagovaných v částic, která je udávána v ToT. Jak již bylo ukázáno, vztah mezi energií v keV a ToT je nelineární závislost a závisí na

fyzikální vlastnostech daného pixelu, což je předmětem energetické kalibrace, která bude v této podkapitole popsána.

Tato metoda [7] spočívá v provedení několika sad měření se zdroji ionizujícího záření, jejichž energie jsou předem známy, a v jejich analytickém zpracování a vytvoření kalibrační funkce 2.2 pro každý pixel detektoru. V předchozí práci [3] byly tyto metody podrobně popsány a byl vytvořen software, který uživateli umožňuje vytvoření energetické kalibrace detektoru z naměřených dat.

$$f_{calib}(x) = ax + b - \frac{c}{x - t} \quad (2.2)$$

Pro měření kalibračních dat se jako efektivní řešení v praxi ukázalo použití rentgenové fluorescence³ [6]. Pro zajištění dobré kvality kalibrace je třeba naměřit takový počet událostí, aby spektra ve snímcích byla dobře rozeznatelná. Z naměřených dat jsou vyfiltrovány pouze tzv. *Single-hit* události⁴, aby se minimalizovaly negativní vlastnosti *Charge-sharing* efektu (díky společné elektrodě senzoru jsou díky interagující částici vzniklé elektrony zpracovány více pixely najednou a část deponované energie nemusí být ASIC čipem zpracována, protože vzniklý signál může být nižší než threshold daného pixelu).



Obrázek 2.6: Příklad energetického spektra jednoho pixelu Timepix detektoru s proloženou funkcí 2.3 [3].

Z jednotlivých měření jsou pro každý pixel detektoru vytvořena spektra ToT hodnot. Na obrázku 2.6 je znázorněn příklad takového spektra, získaného z fluorescence mědi. Požadovaný kalibrační bod se získá střední hodnoty ToT a tabulkové hodnoty energie fluorescenčního záření mědi. Střední hodnota je získána proložením spektra funkcí 2.3 - jedná se o součet

³Děj ke kterému dochází při ozařování materiálu (nejčastěji *Cu*, *Fe*, *In* apod.) rentgenovým zářením, při kterém jsou z něj vyraženy excitované elektrony. Při vyražení elektronu na nižší energetické úrovni, elektron z vyšší energetické úrovně obsadí jeho místo a přebytečnou energii emituje formou vyzářeného fotonu - fluorescenčního záření, jehož charakteristické monoenergetické spektrum je pro většinu prvků dobře známé.

⁴Události, ve kterých částice interagovala pouze s jedním pixelem detektoru

Gaussovy funkce a Gaussovy chybové funkce (kvůli levé nesymetrii vzniklé *Charge-sharing* efektem)

$$f_{GERF}(x) = \underbrace{Ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}}_{\text{Gaussova funkce}} + \underbrace{\frac{avg_{right} - avg_{left}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt + avg_{left}}_{\text{Gaussova chybová funkce}}, \quad (2.3)$$

kde:

A je amplituda,

μ je střední hodnota hledané energie,

σ je rozptyl střední hodnoty energie μ , který je možné vypočítat ze vzorce

2.4, kde $FWHM^5$ udává šířku gausiánu v polovině jeho výšky a

avg_{right} , avg_{left} je průměrná hodnota spektra na pravém (resp. levém) úpatí gausiánu.

$$\sigma = \frac{2\sqrt{2\ln 2}}{FWHM} \quad (2.4)$$

2.5.3 Time-Walk korekce

Time-Walk efekt je nežádoucí jev, který vzniká při interakci ionizujícího záření o různé energii. Velikost deponované energie má vliv na amplitudu a sklon napěťového pulzu na zesilovači pixelu. Při interakci ionizující částice s více pixely je pak díky tomuto jevu interagovanými pixely zaznamenána jiná hodnota *Time-of-Arrival* (ToA), i přes to že událost byla způsobena stejnou částicí a ToA by měl být stejný. Viz obrázek 2.7, kde jsou pro interakci stejné částice čtyřmi sousedními pixely zaznamenány různé hodnoty ToA.

S použitím detektoru *Timepix3* [15] je možné tuto energeticky závislou chybu eliminovat za použití kalibrační metody [20], protože tento detektor umožňuje měřit v ToA a ToT módu současně. Tato kalibrační metoda spočívá v analytickém zpracování dat získaných z měření se zdrojem alfa částic (v [20] použito ^{241}Am), které generuje clustery o velikosti maximálně čtyři pixely. Nejprve je však třeba potřeba energeticky zkalibrovat 2.5.2.

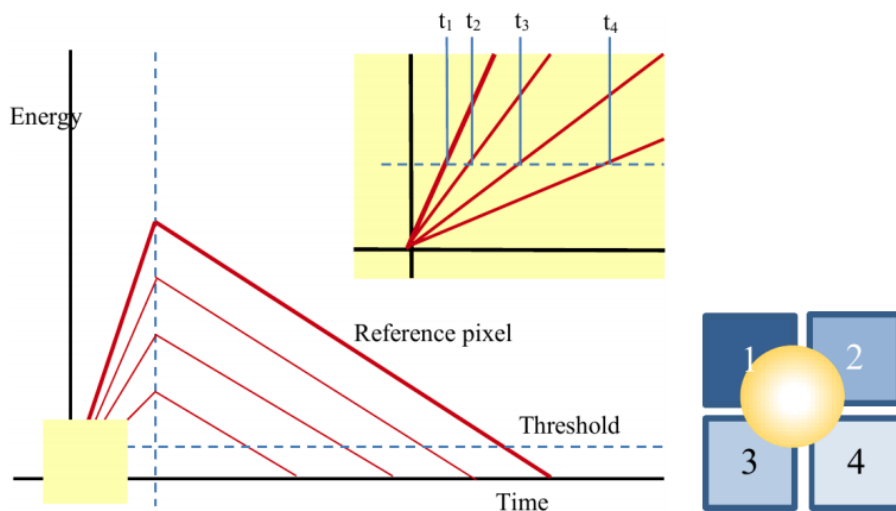
O vybraných clusterech o velikosti 3 a 4 pixely pro ^{241}Am víme, že součet jejich energií je 59.5keV . Z clusteru je vybrán pixel s energií 30keV , který je použit jako referenční (na 2.5.3 jako t_1), zbylá energie je náhodně rozdělena mezi ostatní pixely (na 2.5.3 jako t_{2-4}). Jednotlivé rozdíly $t_i + t_1$ jsou analytickými metodami, popsány v [20], zpracovány a výsledkem tohoto procesu jsou konstanty c , d pro každý pixel detektoru, kterými lze vypočítat jeho *Time-Walk offset* ΔT :

$$\Delta T = \frac{c}{(E - E_0)^d} \quad (2.5)$$

kde:

ΔT je *Time-Walk* korekce pixelu [ns] (výsledná hodnota ToA je pak rovna $ToA - \Delta T$),

⁵z angl. Full Width at Half Maximum



Obrázek 2.7: *Time-walk* efekt: příklad interakce jedné částice se čtyřmi pixely detektoru, kde v každém pixelu byla deponována jiná energie, což na výstupů zesilovačů pixelů způsobilo jiné hodnoty napětí. Díky rozdílné charakteristice náběžné hrany pulzů byl treshold překročen v různých časech (t_{1-4}) [20].

E je energie pixelu [keV],

E_0 je treshold pixelu [keV] a

c, d jsou konstanty.

2.5.4 ToA offset korekce

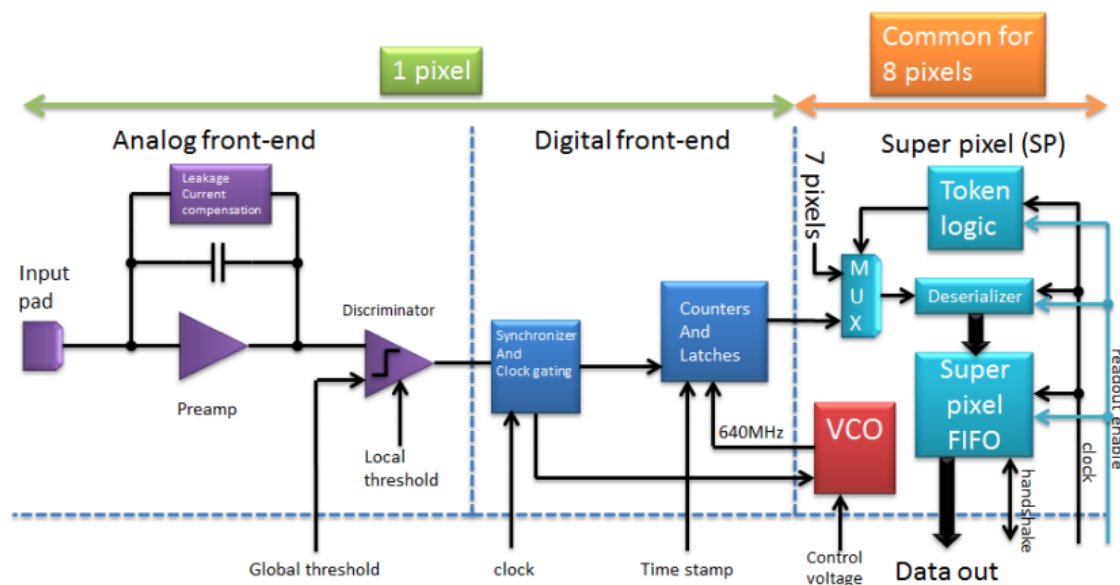
Jedná se o jev, ke kterému dochází u *Timepix3* detektorů z důvodu chyby hardware, který způsobuje špatnou synchronizaci časového razítka napříč sloupci detektoru [4]. Tato chyba vzniká jen při zapnutí detektoru a poté je ToA offset již stabilní, takže je možné vytvořit korekci.

Odstranění tohoto jevu spočívá ve vytvoření kompenzační tabulky pomocí středních hodnot interních testovacích pulzů [15]. Pro získání správných hodnot ToA z naměřených dat stačí jen odečíst příslušnou hodnotu z korekční tabulky.

2.6 Přehled detektorů rodiny Medipix

V této podkapitole budou stručně představeny jednotlivé detektory, které byly vyvinuty v rámci Medipix kolaborace [8].

Medipix1 V roce 1998 byl vyvinut detektor *Medipix1* [16], také zvaný *Photon-Counting-Chip*, byl první velkoplošný detektor používající CMOS technologie. S maticí 64×64 pixelů, každým o hraně $170 \mu\text{m}$, má celkovou aktivní plochu $1,1 \text{ cm}^2$. I přes malý



Obrázek 2.8: Schéma pixelu detektoru *Timepix3* se společnou elektronikou pro 8 pixelů (tzv. *Super-pixel*) [15].

počet pixelů a jejich velkou rozteč, tento detektor prokázal dobré rozlišovací vlastnosti, především pak v rentgenovém zobrazování.

Detektor je vyrobený pomocí $1\ \mu\text{m}$ technologie a je schopný operovat pouze v Medipix módu (viz 2.3) a podporuje pouze vyčítání po snímcích (viz 2.4).

Medipix2 V roce 2001 byl vyvinut detektor *Medipix2* [10], jako náhrada za svého předchůdce *Medipix1*. Díky $250\ \text{nm}$ technologii bylo možné zvýšit počet pixelů a zároveň snížit jejich rozteč - detektor má 256×256 pixelů, každý o hraně $55\ \mu\text{m}$. Navíc má dva tresholdy s diskriminací na 4 pixely.

Stejně jako svůj předchůdce je schopný operovat pouze v Medipix módu (viz 2.3) a podporuje pouze vyčítání po snímcích (viz 2.4).

Timepix V roce 2006 byl vyvinut detektor *Timepix* [11], který vychází z detektoru *Medipix2*. Detektory mají stejné rozměry, ale architektura pixelů se změnila. Nově každý pixel detektoru umožňuje nezávisle měřit čas interakce částice, její energii, nebo je schopný počítat jednotlivé interakce.

Detektor je schopný operovat v ToT, ToA, nebo v Medipix módu (viz 2.3) a podporuje pouze vyčítání po snímcích (viz 2.4).

Medipix3 V roce 2011 byl vyvinut detektor *Medipix3* [1], jako nástupce *Medipix2* detektoru. Rozměry detektoru zůstaly zachovány (256×256 pixelů, každý o hraně $55\ \mu\text{m}$), ale díky $130\ \text{nm}$ technologii byla funkce jednotlivých pixelů vylepšena. Detektor nově umožňuje zvýšení energetického rozlišení díky potlačení *Charge-Sharing* efektu (viz 2.5.2) pomocí integraci náboje do clusteru 4×4 pixelů.

Každý pixel má dva 14-bitové čítače. Jednotlivé pixely můžou být naprogramovány tak, aby vždy měřily za pomoci jednoho čítače, zatímco je hodnota z druhého čítače vyčítána, což umožňuje měření bez mrtvé doby.

Také je možné zapojit tento readout čip (s pixelem o hraně $55\ \mu m$) na senzor s pixely o hraně $110\ \mu m$, takže výsledný super-pixel má k dispozici 8 čítačů a pomocí různých úrovní tresholdů jej lze použít jako 8-kanálový spektrometr.

Stejně jako svůj předchůdce je schopný operovat pouze v Medipix módu (viz 2.3) a podporuje pouze vyčítání po snímcích (viz 2.4).

Timepix3 V roce 2014 byl vyvinut detektor *Timepix3* [15], jako nástupce *Timepix* detektoru. Rozměry byly zachovány, ale bylo použita $130\ \mu m$ výrobní technologie, jako u *Medipix3*. Detektor nově umožňuje měřit v ToA a ToT současně a jeho časové rozlišení bylo vylepšeno více než na šestinásobek.

Detektor nově umožňuje kromě vyčítání po snímcích i *Data-Driven* mód, kde jsou data v rámci akvizice kontinuálně z detektoru vyčítána (viz 2.4). Takto navržená architektura umožňuje vyčítat data až do $40M_{hits} * cm^{-2} * s^{-1}$ bez globální mrtvé doby detektoru (pouze s lokální mrtvou dobou - pro jednotlivé pixely, ze kterých jsou vyčítána naměřená data).

Na obrázku 2.8 je znázorněno blokové schéma jednoho pixelu *Timepix3* detektoru, který se skládá z analogové a digitální části (pro popis funkcionality viz 2.2). Na obrázku vpravo je pak společná elektronika, sdílená vždy 8 sousedními pixely (tzv. *Super-pixel*).

2.7 Vyčítací rozhraní

V této podkapitole bude popsáno několik vyčítacích rozhraní, které byly vyvinuty (v rámci *Medipix kolaborace*⁶) ÚTEF ČVUT v Praze a jeho spinoff společností ADVACAM s.r.o. Pro komunikaci s *Timepix3* detektorem bude v rámci této práce použito nově vyvinuté vyčítací rozhraní **Katherine** [4] 2.7.4.

2.7.1 FITPix

FITPix [9] vyčítací rozhraní bylo vyvinuto v roce 2010 a skládá se z programovatelného hradlového pole (FPGA)⁷, USB 2.0 rozhraní, DAC⁸ a ADC⁹ převodníků a obvodů pro generování měřicího napětí (*bias*).

Zařízení je s detektorem propojeno pomocí LVDS¹⁰ a je schopné jeho plnohodnotného řízení, vč. nastavování hodnot (měřicí frekvence, treshold, bias apod.), řízení akvizice a vyčítání naměřených dat rychlostí až 90 snímků za sekundu. Zařízení rovněž umožňuje připojení externího trigger signálu pro synchronizované měření s více detektory současně.

⁶<<https://medipix.web.cern.ch>>

⁷Z angl. Field Programmable Gate Array

⁸Převodník digitálního signálu na analogový.

⁹Převodník analogového signálu na digitální.

¹⁰Z angl. Low-voltage differential signaling



Obrázek 2.9: Vyčítací rozhraní *Katherine* s připojeným detektorem *Timepix3* vlevo a popisem vstupních a výstupních portů vpravo[4].

FITPix je možné použít pouze jako nízkoúrovňové vyčítací rozhraní a veškerá business logika musí být implementována v připojeném počítači (na př. deserializace a derandomizace naměřených dat apod.). Jako řídicí software je použit *Pixelman*[19]. Zařízení je kompatibilní se všemi detektory uvedenými v 2.6, kromě *Timepix3*.

2.7.2 AdvaDAQ

AdvaDAQ [20] je nástupcem vyčítacího rozhraní FITPix a kompatibilní se všemi detektory uvedenými v 2.6. Principem funkce vychází ze svého předchůdce, ale díky použitému rozhraní USB 3.0 je schopné dosahovat maximálního datového toku 2,9 Gb/s. Deserializace naměřených dat byla implementována do firmware *FPGA*. Pro řízení tohoto rozhraní, vizualizaci a analýzu naměřených dat byl vyvinut software *Pixet*.

2.7.3 ATLAS Pix

ATLAS Pix [12, 3] je zařízení vyvinuté v rámci experimentu *ATLAS-TPX*, síti 16 hybridních částicových detektorů *Timepix*, instalované v rámci experimentu *ATLAS* na *LHC* v *CERN*, operující od roku 2014.

Zařízení vzniklo modifikací vyčítacího rozhraní *FITPix* a disponuje *FPGA*, LVDS zesilovačem a počítačem *Raspberry Pi*, ve kterém je implementován software, poskytující API pro své vzdálené řízení přes TPC protokol. Komunikace mezi *FPGA* a počítačem je realizována pomocí SPI¹¹ protokolu.

2.7.4 Katherine

Katherine [4] je pokročilé vyčítací rozhraní dedikované pro řízení jednoho *Timepix3* detektoru, které v sobě obsahuje embedovaný počítač, čímž se vymezuje od ostatních vyčítacích rozhraní bez procesoru, kde business logika musí být implementována v připojeném počítači, což má negativní dopad na vytížení jeho procesoru.

Hlavním benefitem zařízení je možnost jeho použití na experimentech, kde je nutná větší vzdálenost mezi detektorem a vyčítacím rozhraním (u *Katherine* až 100 m). Toto omezení je dáno především nedostatečnou radiační a elektromagnetickou odolností použité elektroniky. To umožňuje aplikace v blízkosti jaderných reaktorů nebo na částicových urychlovačích (na příklad měření luminosity v rámci experimentu ATLAS na LHC v CERN [17]).

Zařízení je kompatibilní s *Timepix3* detektory, které jsou osazeny na CERN chipboard, nebo na kompatibilní PCB¹² s VHDCI¹³ 68-pinovým konektorem. S detektorem může být propojeno na přímo (viz obr. 2.9 vlevo), prodlužovacím VHDCI kabelem o maximální délce až 10 m, nebo speciálním extenderem na bázi ethernetu pro vzdálenosti až 120 m. S rostoucí vzdáleností ale klesá maximální datový tok (viz tabulka 2.1).

Vzdálenost	Typ propojení	Počet kanálů - datový tok	Hit Rate
3 m	VHDCI	$2 \times 640 \text{ Mb/s}$	$16 M_{hits/s}$
10 m	VHDCI	$4 \times 160 \text{ Mb/s}$	$10 M_{hits/s}$
20 m	Ethernet	$2 \times 640 \text{ Mb/s}$	$16 M_{hits/s}$
100 m	Ethernet	$4 \times 80 \text{ Mb/s}$	$5 M_{hits/s}$

Tabulka 2.1: Katherine: závislost maximálního datového toku na typu propojení mezi detektorem a vyčítacím rozhraním [4].

Jeho maximální výstupní datový tok je daný použitým gigabitovým ethernetem, které odpovídá ekvivalentu datového toku $16 M_{hits} * cm^{-2} * s^{-1}$ v *Data-Driven* módu (viz 2.4). *Timepix3* detektor je schopný generovat až $80 M_{hits} * cm^{-2} * s^{-1}$, takže při vyšší zátěži není zařízení schopné přenést všechny zaznamenané události. Nicméně, *Katherine* disponuje vestavěnou DDR3 pamětí o velikosti 1 GB, která funguje jako buffer - když je aktuální počet zpracovávaných událostí vyšší, než je maximální datový tok spojení s nadřazeným počítačem, tak se data hromadí v bufferu, aby později při nižší intenzitě zpracovávaných událostí mohly být přeneseny.

Pro úplnost výčtu vstupních a výstupních portů je třeba doplnit, že *Katherine* také disponuje GPIO¹⁴ konektorem (viz obr. 2.9 vpravo), zahrnující 4 obecné signály pro integraci s dalšími zařízeními a další rozšíření, jako na příklad pro trigger synchronizaci (pro možnost zapojení na příklad do detektorového teleskopu [5]). Zařízení dále disponuje LEMO konektorem (viz 2.9), poskytujícím vysokonapěťový zdroj ($\pm 300 \text{ V}$) pro *bias* (měřící napětí) detektoru.

Vyčítací rozhraní má implementovanou podporu pro ToA korekci (viz 2.5.4), které je automaticky vykonána v rámci startovací sekvence, kde jsou poškozené sloupce identifikovány

¹¹Z angl. Serial Peripheral Interface.

¹²Z angl. Printed Circuit Board.

¹³Z angl. Very-High-Density-Cable-Interconnect.

¹⁴Z angl. General Purpose Input/Output.

pomocí středních hodnot testovacích pulzů a je sestavena kompenzační tabulka. V průběhu akvizice dat jsou ToA hodnoty automaticky opraveny odečtením příslušných hodnot z výše zmíněné tabulky.

2.7.4.1 Komunikace s nadřazeným PC a řízení akvizice dat

Vyčítací rozhraní *Katherine* je dle dané konfigurace schopné operovat ve dvou módech:

SFTP klient (autonomní mód) V tomto módu zařízení operuje z pohledu řízení a akvizice dat zcela nezávisle. Po spuštění zařízení, resp. dokončení startovací sekvence, jsou z dodané konfigurace automaticky nastaveny měřicí a akviziční parametry detektoru a je spuštěna akvizice dat. Získaná data jsou pak nepřetržitě posílána pomocí *SFTP*¹⁵ na server, kde jsou data ukládána do definovaného adresáře v ASCII souborech. Výhoda tohoto módu spočívá v jednoduchosti obsluhy a hodí se především pro takové aplikace, kde není očekáván vysoký datový tok a kde není potřeba měnit nastavení detektoru, protože každé jeho změna vyžaduje restart zařízení.

Manuální mód Pracuje-li zařízení v tomto módu, pak k jeho funkci je třeba řízení z nadřazeného počítače pomocí proprietárního UDP¹⁶ protokolu. Protokol využívá dvou UDP portů - **řídícího** a **datového**.

Komunikační port je vyhrazen pro pro přenos řídicích a konfiguračních paketů. Komunikace je implementována pomocí 36 příkazů, kde každý z nich se skládá 64-bitového datagramu pro request a 64-bitového datagramu pro response, takže se jedná o synchronní potvrzovanou komunikaci¹⁷. Pro příklad viz obrázek 2.10, kde je zobrazen request datagramu pro vyčtení biasu a jeho response.

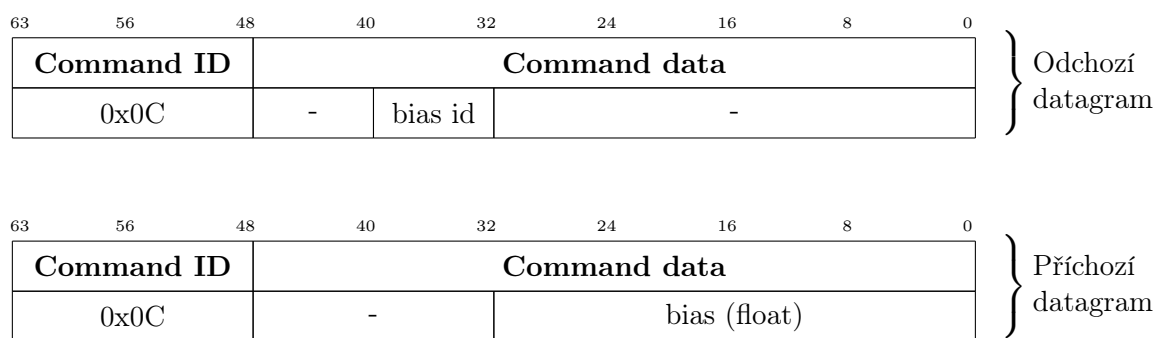
Datový port je určen pro jednosměrnou komunikaci z *katherine* do nadřazeného počítače a slouží k přenosu naměřených dat. každý datagram se skládá z 3-bitové hlavičky 43-bitových dat.

V rámci této práce bude použit druhý zmíněný - manuální mód, protože je méně náročný na šířku pásma a umožňuje vzdálené řízení detektoru. V dalších kapitolách (viz **TODO**^{ref}) bude komunikační rozhraní vyčítacího rozhraní *Katherine* popsáno podrobněji.

¹⁵Z angl. Secure File Transfer Protocol (protokol pro zabezpečený přenos souborů mezi počítači pomocí TPC protokolu).

¹⁶Z angl. User Datagram Protocol.

¹⁷Potvrzování je realizováno na aplikační úrovni ISO/OSI modelu.



Obrázek 2.10: Katherine: příklad requestu a response řídicího datagramu pro vyčtení biasu.

Kapitola 3

Návrh architektury

V této kapitole bude čtenář seznámen s návrhem a koncepcí softwarového systému **Pixnet** - software pro distribuované řízení sítě částicových pixelových detektorů, který byl navržen a implementován v rámci této práce. V této kapitole bude popsána motivace pro vznik tohoto systému a budou představeny jednotlivé komponenty systému a jejich vzájemné interakce. Pro detailnější popis návrhu a implementace komponent viz kapitoly **TODO** (přidat ref na handler až master).

3.1 Motivace

Hlavní motivací pro vznik tohoto systému je fakt, že moderní částicové pixelové detektory jsou schopné generovat vysoký datový tok, na příklad *Timepix3* má teoretické maximum 5,12 Gb/s (viz 2.6), takže nedistribuovaný systém, který by operoval na jedné instanci, by nebyl schopný zpracovat datový tok, který síť o více detektorech je schopná generovat.

Zde je možné namítnout, že každý systém je možné škálovat vertikálně¹. Zatímco cena škálování horizontálně škálovatelného systému je lineární závislost výpočetního výkonu na ceně, u vertikálně škálovatelného systému tato závislost roste exponenciálně. Jelikož vertikální škálování takového systému je vysoce neefektivní, nebude dále uvažováno a tato práce se bude věnovat jenom návrhu a implementaci horizontálně škálovatelného řešení.

Další motivací pro vytvoření tohoto systému je možnost řízení heterogenní sítě detektorů homogenním způsobem. Heterogenní sítě detektorů rozumíme takovou síť, ve které jsou detektory různých typů (na příklad *Timepix*, *Timepix3* apod, viz 2.6), komunikující různými komunikačními protokoly prostřednictvím různých vyčítacích rozhraní (na příklad *Katherine*, *ATLAS Pix* apod, viz 2.7). V další části textu bude detailně popsána navržená a implementovaná modulová architektura, která výše zmíněné umožňuje.

¹Škálováním v kontextu počítačových systému rozumíme změnu vlastností daného systému za účelem zvýšení, nebo snížení jeho výpočetního výkonu (ev. jiného sledovaného parametru). Zatímco u vertikálního škálování měníme vlastnosti jednoho uzlu systému (na příklad přidáváním procesorů, pamětí, kapacity úložiště apod.), u horizontálního škálování přidáváme jednotlivé uzly - samostatné jednotky (na př. počítače). Pro úplnost je třeba doplnit že vertikální škálování má své omezení z hlediska použitého hardware, u horizontálního škálování žádná taková omezení nejsou.

Pro potřeby experimentu *ATLAS TPX* byl již vyvinut software [12, 3] pro řízení sítě detektorů *Timepix* 2.6, prostřednictvím vyčítacího rozhraní *ATLAS Pix* 2.7.3. Software však nevyhovuje požadavkům zmíněných výše:

- (i) **Škálovatelnost** - systém je navržen bez možnosti horizontálního škálování. Všechny detektory sítě jsou řízeny z jednoho uzlu a všechna vygenerovaná data jsou jím zpracovávány. Možnost použití pouze jednoho uzlu představuje nejslabší článek systému, který nemůže být použit pro řízení a vyčítání dat z větší sítě detektorů.
- (ii) **Modularita** - systém implementuje pouze komunikační protokol vyčítacího rozhraní *ATLAS Pix* 2.7.3. Přidání podpory nového vyčítacího rozhraní představuje významnou modifikaci architektury systému a pro nasazení nové verze je nutná odstávka celého systému.

Pro potřeby modernizace sítě *ATLAS TPX* (za použití detektorů *Timepix3*) bylo rozhodnuto o vývoji software, který bude navržen a implementován tak, aby požadavky na škálovatelnost a modularitu byly zajištěny.

Literatura

- [1] BALLABRIGA, R. et al. Medipix3: A 64k pixel detector readout chip working in single photon counting mode with improved spectrometric performance. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2011, 633, s. S15 – S18. ISSN 0168-9002. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.108>. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210012982>>. 11th International Workshop on Radiation Imaging Detectors (IWORID).
- [2] BALLABRIGA, R. et al. Review of hybrid pixel detector readout ASICs for spectroscopic X-ray imaging. *Journal of Instrumentation*. 2016, 11, 01, s. P01007. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/1748-0221/11/i=01/a=P01007>>.
- [3] BEGERA, J. Calibration and control software for network of particle pixel detectors within the Atlas experiment at the LHC at CERN. Bachelor's thesis, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague, Czech Republic, 2016. Dostupné z: <<http://hdl.handle.net/10467/64719>>.
- [4] BURIAN, P. et al. Katherine: Ethernet Embedded Readout Interface for Timepix3. *Journal of Instrumentation*. 2017, 12, 11, s. C11001. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/1748-0221/12/i=11/a=C11001>>.
- [5] BURIAN, P. et al. Particle telescope with Timepix3 pixel detectors. *Journal of Instrumentation*. 2018, 13, 01, s. C01002. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/1748-0221/13/i=01/a=C01002>>.
- [6] JAKUBEK, J. Energy-sensitive X-ray radiography and charge sharing effect in pixelated detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2009, 607, 1, s. 192 – 195. ISSN 0168-9002. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2009.03.148>. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900209006408>>. Radiation Imaging Detectors 2008 Proceedings of the 10th International Workshop on Radiation Imaging Detectors.
- [7] JAKUBEK, J. Precise energy calibration of pixel detector working in time-over-threshold mode. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2011, 633, Supplement 1, s. S262 – S266. ISSN 0168-9002. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.183>. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210012982>>.

- [S0168900210013732](#)>. 11th International Workshop on Radiation Imaging Detectors (IWORID).
- [8] Kolektiv autorů Medipix kolaborace. *Web Medipix* [online]. 2016. [cit. 20.5.2016]. Dostupné z: <<https://medipix.web.cern.ch>>.
- [9] KRAUS, V. et al. FITPix — fast interface for Timepix pixel detectors. *Journal of Instrumentation*. 2011, 6, 01, s. C01079. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/1748-0221/6/i=01/a=C01079>>.
- [10] LLOPART, X. et al. Medipix2: A 64-k pixel readout chip with 55-/spl mu/m square elements working in single photon counting mode. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. Oct 2002, 49, 5, s. 2279–2283. ISSN 0018-9499. doi: 10.1109/TNS.2002.803788.
- [11] LLOPART, X. et al. Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2007, 581, 1-2, s. 485 – 494. ISSN 0168-9002. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2007.08.079>. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900207017020>>. {VCI} 2007Proceedings of the 11th International Vienna Conference on Instrumentation.
- [12] MANEK, P. et al. Software system for data acquisition and analysis operating the ATLAS-TPX network. In *2017 International Conference on Applied Electronics (AE)*, s. 1–4, Sept 2017. doi: 10.23919/AE.2017.8053593.
- [13] MARTISIKOVA, M. et al. Study of the capabilities of the Timepix detector for Ion Beam radiotherapy applications. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*. 10 2012, s. 4324–4328. doi: 10.1109/NSSMIC.2012.6551985.
- [14] PLATKEVIC, M. *Signal Processing and Data Read-Out from Position Sensitive Pixel Detectors*. PhD thesis, Czech Technical University in Prague, Czech Republic, 2014.
- [15] POIKELA, T. et al. Timepix3: a 65K channel hybrid pixel readout chip with simultaneous ToA/ToT and sparse readout. *Journal of Instrumentation*. 2014, 9, 05, s. C05013. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/1748-0221/9/i=05/a=C05013>>.
- [16] SINOR, M. et al. Charge sharing studies with a Medipix1 pixel device. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2003, 509, 1, s. 346 – 354. ISSN 0168-9002. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01648-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01648-6). Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203016486>>. Proceedings of the 4th International Workshop on Radiation Imaging Detectors.
- [17] SOPCZAK, A. et al. Precision Luminosity of LHC Proton–Proton Collisions at 13 TeV Using Hit Counting With TPX Pixel Devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. March 2017, 64, 3, s. 915–924. ISSN 0018-9499. doi: 10.1109/TNS.2017.2664664.
- [18] TREMSIN, A. et al. High Resolution Photon Counting With MCP-Timepix Quad Parallel Readout Operating at > 1 KHz Frame Rates. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 04 2013, 60, s. 578–585. doi: 10.1109/TNS.2012.2223714.

- [19] TURECEK, D. et al. Pixelman: a multi-platform data acquisition and processing software package for Medipix2, Timepix and Medipix3 detectors. *Journal of Instrumentation*. 2011, 6, 01, s. C01046. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/1748-0221/6/i=01/a=C01046>>.
- [20] TURECEK, D. – JAKUBEK, J. – SOUKUP, P. USB 3.0 readout and time-walk correction method for Timepix3 detector. *Journal of Instrumentation*. 2016, 11, 12, s. C12065. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/1748-0221/11/i=12/a=C12065>>.

Příloha A

Seznam použitých zkratk

ADC Analogově digitální převodník

Al Aluminium

API Application Programming Interface

ASIC Application-specific Integrated Circuit

ATLAS A Toroidal LHC Apparatus

B byte

b bite

BPMN Business Process Model and Notation

CdTe Cadmium telluride

CERN Evropská organizace pro jaderný výzkum (Originální název: *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*), se sídlem v Ženevě, ve Švýcarsku.

CMOS Complementary Metal Oxide Semiconductor

CSM Charge Summing Mode

DAC Digitálně analogový převodník

DCS Detector Control Systems

DPS Deska plošného spoje

eV elektronvolt

FITPix Fast Interface for Timepix Pixel Detectors

FPGA Field Programmable Gate Array

FSM Finite State Machine

FWHM	Full width at half maximum
GaAs	Arsenid gallitý
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
HW	Hardware
IP	Internet Protocol
JSON	JavaScript Object Notation
LED	Light Emitting Diode
LHC	Large Hadron Collider
LiF	Lithium fluoride
LS	Long Shutdown - dlouhodobá technologická přestávka LHC
LVDS	Low-voltage differential signaling
MPX	Medipix
PC	Personal Computer
PCC	Photon Counting Chip
PE	Polyethylen
PN	Přechod polovodiče typu P a polovodiče typu N
REST	Representational State Transfer
RS232	Standart sériové linky
SMD	Surface Mount Technology
SPI	Serial Peripheral Interface
SPM	Single Pixel Mode
SQL	Structured Query Language
SSH	Secure Shell
SW	Software
TCP	Transmission Control Protocol
TDAQ	Trigger and Data Aquisition
TOA	Time of Arrival - mód detektoru (viz ??)

TOT Time Over Treshold - mód detektoru (viz ??)

TPX Timepix

URL Uniform Resource Locator

USA15 Serverová místnost ATLAS experimentu

USB Universal Serial Bus

UX15 Označení prostor s ATLAS detektorem (tzv. cavern)

ÚTEF Ústav technické a experimentální fyziky

Příloha B

Obsah přiloženého CD

```
CD/
├── atlas_tpx/
│   ├── dokumentace/ - adresář obsahující popis API
│   ├── exe/
│   │   ├── emulator/
│   │   │   ├── readme.txt - README soubor
│   │   │   └── AtlasPixEmulator-0.1.jar - spustitelný jar soubor emulátoru
│   │   └── atlas_tpx_server/
│   │       ├── readme.txt - README soubor
│   │       ├── AtlasTPX.server-0.1.jar - spustitelný jar soubor serveru
│   │       ├── server-configuration.yml - soubor s konfigurací serveru
│   │       └── detectors.csv - tabulka s detektory
│   └── src/ - adresář se zdrojovými kódy
├── kalibrace/
│   ├── exe/ - spustitelné binární soubory
│   │   ├── libs/ - jar knihovny
│   │   ├── test_data/ - vstupní data kalibrace (spektra)
│   │   ├── readme.txt - README soubor
│   │   └── X-rayTimepixCalibration.jar - spustitelný jar soubor
│   └── src/ - adresář se zdrojovými kódy
└── text/
    ├── LaTeX/ - adresář se zdrojovými soubory tohoto dokumentu
    ├── thesis-begerjak-2016.pdf - tato práce ve formátu PDF
    ├── abstract_cz.txt - abstrakt česky
    └── abstract_en.txt - abstrakt anglicky
```

Obrázek B.1: Obsah příloženého CD