

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

1. 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	Energetická kalibrace	7
A	Seznam použitých zkratk	11
B	Obsah přiloženého CD	15

Seznam obrázků

2.1	Struktura hybridního polovodičového pixelového detektoru Timepix3, skládající se z vyčítacího čipu a polovodičového senzoru (převzato z [5]).	4
2.2	Princip detekce ionizujícího záření detektorem Timepix3 (převzato z [5]).	4
2.3	Zpracování signálu pixelem detektoru dle nastaveného módu (<i>Medipix</i> , <i>ToT</i> a <i>ToA</i>) (převzato z [5]).	5
2.4	Doba vyčítání detektoru za použití <i>Frame-based</i> (non-sparse) a <i>Data-driven</i> (sparse) módu (převzato z [6]).	7
B.1	Obsah přiloženého CD	16

Seznam tabulek

Seznam zdrojových kódů

Kapitola 1

Úvod

TODO

1.1 Motivace

TODO

1.2 Timepix3 detektor

Hybridní částicový pixelový detektor Timepix3[6] je nástupcem detektoru Timepix[3] 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 [2]).

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 na příklad protonová terapie [4], 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 na příklad snížení výrobních nákladů nebo možnost kombinace vyčítacího čipu se senzory různých materiálů (*Si*, *GaAs*, *CaTe* apod.) a tloušťek (většinou $300\mu m$, nebo $500\mu m$).

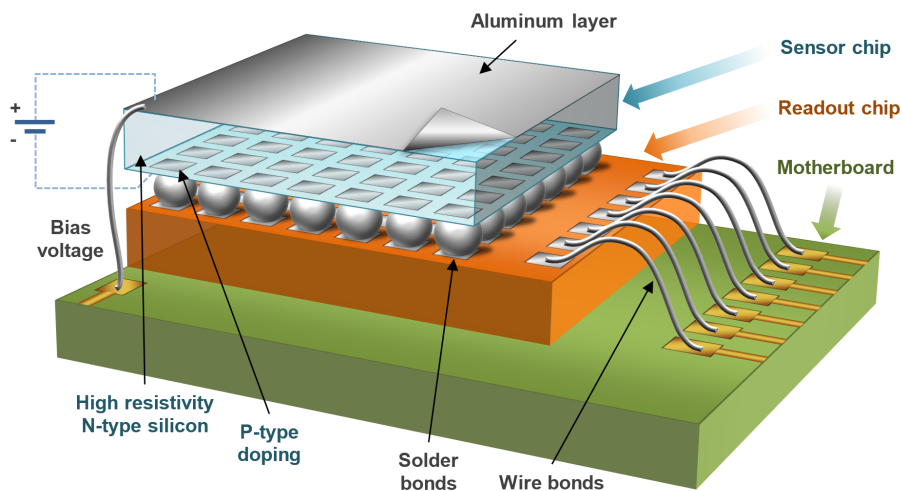
Na tomto místě je třeba zmínit, že existuje více druhů těchto detektorů (*AGH Fermilab*, *Pilatus*, *Philips Chromaix* apod.) [1], v této práci budou použity pouze detektory z rodiny detektorů Medipix.

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 $1.4 \times 1.4 cm^2$.

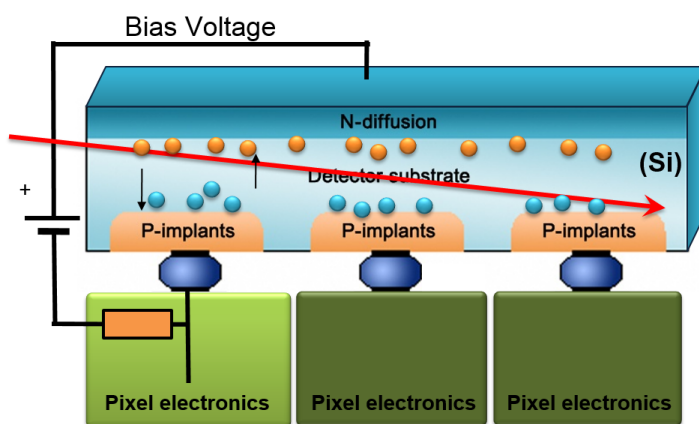
Na obrázku 2.1 je znázorněna struktura detektoru Timepix3. Vrchní část detektoru tvoří polovodičový senzor, který je nejčastěji vyroben z křemíku, ale výjimkou není také *GaAs* nebo *CaTe*. Jednotlivé pixely senzoru jsou spojeny s integrovaným ASIC¹ vyčítacím čipem pomocí technologie zvané *Bump-Bonding*. 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 (převzato z [5]).

2.2 Princip detekce



Obrázek 2.2: Princip detekce ionizujícího záření detektorem Timepix3 (převzato z [5]).

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

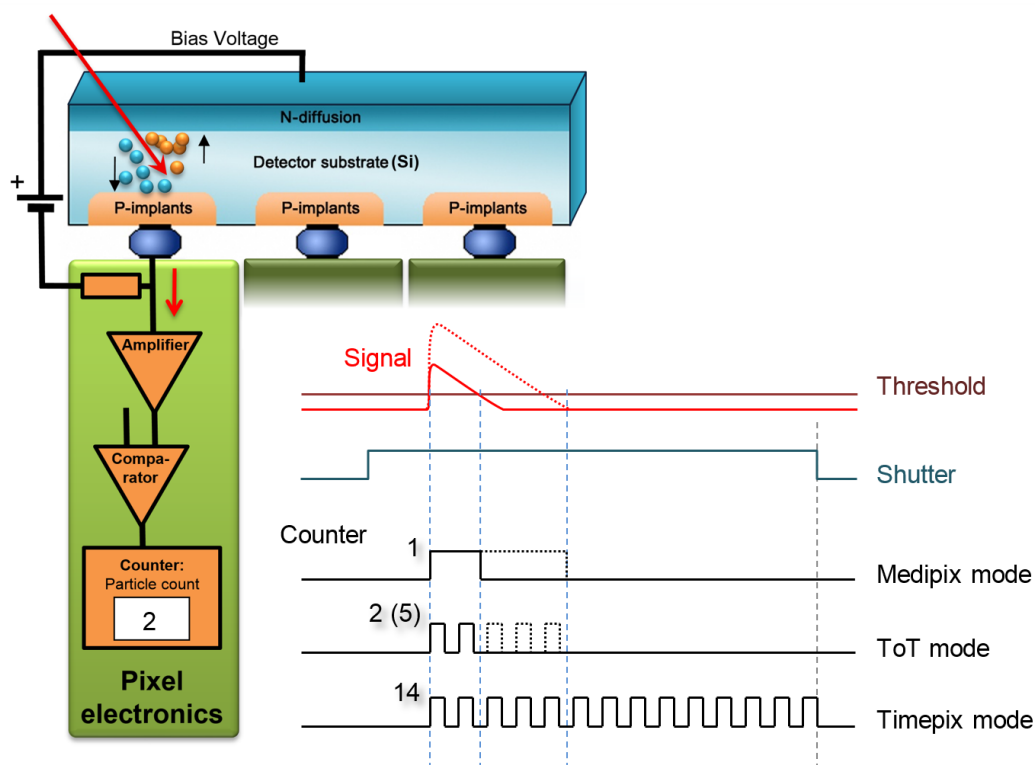
Jako náhradní schéma jednoho pixelu si lze představit diodu zapojenou v závěrném směru, kterou bez přítomnosti ionizujícího záření protéká minimální proud. Vnikne-li do senzoru ionizující částice a dojde k její interakci se senzorem, resp. část její energie je deponována do polovodičového objemu senzoru, 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*) (převzato z [5]).

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 2.5.1. Tento mód má široké spektrum aplikací, na příklad [7] nebo [4].

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 [6] vyčítací čas může být definován následovně:

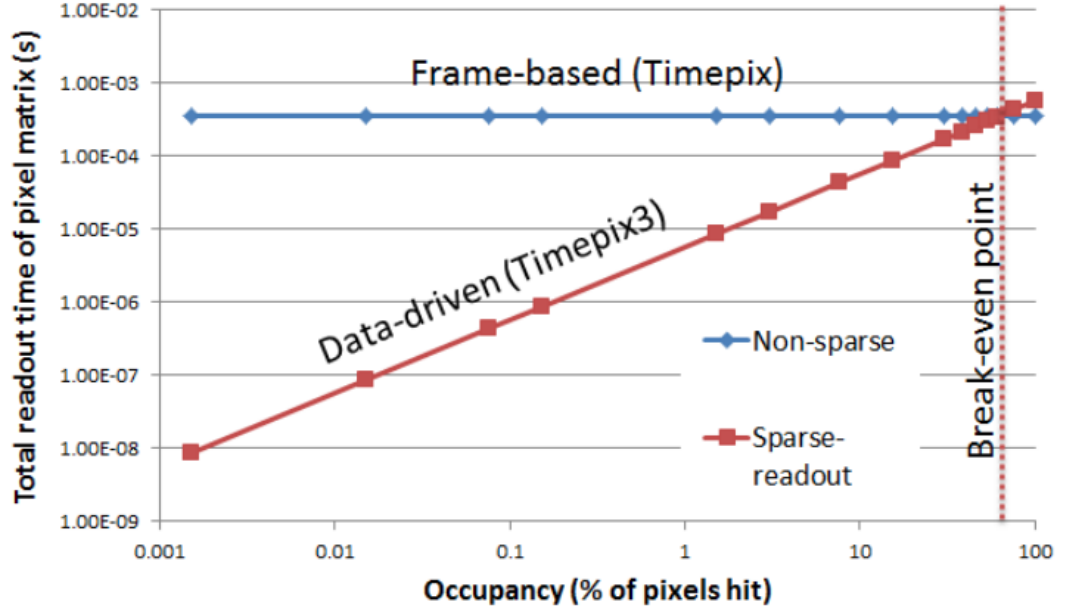
$$T_{readout} = N_{pixels} * bits_{pixel} / BW \quad (2.1)$$

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 (převzato z [6]).

2.5 Kalibrace

2.5.1 Energetická kalibrace

Literatura

- [1] 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>>.
- [2] 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/S0168900210013732>>. 11th International Workshop on Radiation Imaging Detectors (IWORID).
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] PLATKEVIC, M. *Signal Processing and Data Read-Out from Position Sensitive Pixel Detectors*. PhD thesis, Czech Technical University in Prague, Czech Republic, 2014.
- [6] 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>>.
- [7] 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.

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