

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra počítačů



Bakalářská práce

**Kalibrační a ovládací software sítě částicových pixelových  
detektorů umístěných uvnitř experimentu ATLAS  
na LHC v CERN**

*Jakub Begera*

Vedoucí práce: Ing. Štěpán Polanský

Studijní program: Otevřená informatika, Bakalářský

Obor: Softwarové systémy

6. května 2016



zadani



## Poděkování

Zde můžete napsat své poděkování, pokud chcete a máte komu děkovat.



## 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 20. 5. 2016

.....





# Abstract

Translation of Czech abstract into English.

# Abstrakt

Abstrakt práce by měl velmi stručně vystihovat její obsah. Tedy čím se práce zabývá a co je jejím výsledkem/přínosem.

Očekávají se cca 1 – 2 odstavce, maximálně půl stránky.



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
1.1	Motivace . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Detektory ionizujícího záření</b>	<b>3</b>
2.1	Klasifikace detektorů a jejich parametry . . . . .	3
2.2	Geiger-Müllerův počítač . . . . .	3
2.3	Sintilační detektory . . . . .	3
2.4	Polovodičové detektory . . . . .	3
2.4.1	Princip . . . . .	3
2.4.2	Módy . . . . .	3
2.4.3	Medipix . . . . .	3
2.4.4	Timepix . . . . .	3
2.4.5	Cluster analýza . . . . .	3
2.4.6	FitPix . . . . .	3
2.4.7	Pixelman . . . . .	3
2.4.8	Aplikace . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Energetická kalibrace</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Atlas TPX</b>	<b>7</b>
4.1	Atlas MPX . . . . .	8
4.1.1	Hardwarová a softwarová architektura sítě Atlas MPX . . . . .	9
4.2	Hardwarová architektura . . . . .	10
4.3	Softwarová architektura . . . . .	13
4.4	Řídící software . . . . .	13
4.4.1	Řízení detektorů . . . . .	13
4.4.2	REST API server . . . . .	13
4.4.3	Zpracování a ukládání dat . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>15</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>19</b>



# Seznam obrázků

4.1	Atlas TPX detektor - vrstvy a rozmístění konvertorů . . . . .	7
4.2	Atlas MPX s přehledem rozmístění detektorů . . . . .	8
4.3	Snímek z Atlas MPX detektoru s výřezem zachycených částic (převzato z [1]) . . . . .	9
4.4	Fotografie znázorňující Medipix2 detektor s neutronovými konvertory (převzato z [5]) . . . . .	9
4.5	Atlas MPX - řídicí aplikace (převzato z [3]) . . . . .	10
4.6	Atlas TPX - diagram hw komponent . . . . .	11
4.7	Atlas TPX - fotografie hw komponent . . . . .	12
A.1	Seznam přiloženého CD — příklad . . . . .	19



# Seznam tabulek





# Kapitola 1

## Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a implementací software pro ovládání a kalibraci sítě hybridních částicových pixelových detektorů umístěných uvnitř experimentu Atlas na LHC v CERN - projekt AtlasTPX. Jelikož proces kalibrace je zcela nezávislý na následném řízení činnosti těchto detektorů, je tento software členěn na dvě nezávislé části - energetickou kalibraci částicových pixelových detektorů (viz kapitola [3](#)) a řízení sítě těchto detektorů - AtlasTPX (viz kapitola [4](#)).

**TODO**

### 1.1 Motivace

Ionizující záření je spjato s naším světem už od začátku jeho existence. Jeho studium započalo koncem 19. století a pomáhá nám pochopit podstatu hmoty, její interakce s prostředím a další vlastnosti. Tyto poznatky našli své uplatnění v mnoha oborech, jako například v defektoskopii, zdravotnictví, energetice a v mnoha dalších. Spolu s rostoucími poznatky o ionizujících záření a s technickým postupem se rozvíjela i detekční technika, která za poslední století prodělala veliký posun. Od prvních bublinových komor, až po nejmodernější polovodičové pixelové detektory, kterými se tato práce zabývá.



## Kapitola 2

# Detektory ionizujícího záření

### 2.1 Klasifikace detektorů a jejich parametry

### 2.2 Geiger-Müllerův počítač

### 2.3 Sintilační detektory

### 2.4 Polovodičové detektory

#### 2.4.1 Princip

#### 2.4.2 Módy

#### 2.4.3 Medipix

#### 2.4.4 Timepix

#### 2.4.5 Cluster analýza

#### 2.4.6 FitPix

#### 2.4.7 Pixelman

#### 2.4.8 Aplikace



## Kapitola 3

# Energetická kalibrace

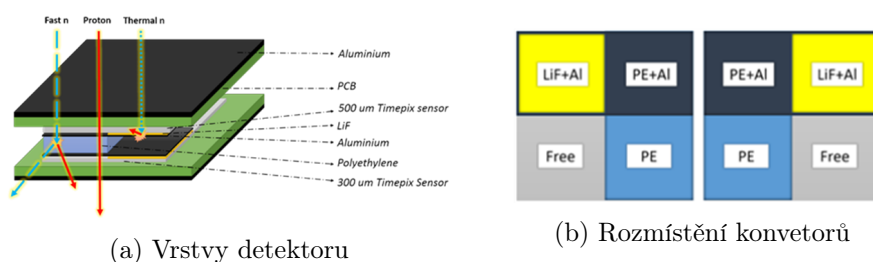


# Kapitola 4

## Atlas TPX

Atlas TPX je síť 15<sup>1</sup> hybridních pixelových detektorů typu Timepix 2.4.4, nainstalovaných na různé pozice experimentu Atlas na LHC<sup>2</sup> v CERN během LS2<sup>3</sup> (leden 2013 až březen 2015) je následníkem svého předchůdce - sítě Atlas MPX (viz 4.1). Hlavní motivací výměny této sítě bylo využití nových technologií, především pak nového detekčního čipu Timepix. Ten na rozdíl od svého předchůdce Medipix2 2.4.3 umožňuje rozšíření naměřené informace i o časovou oblast (viz 2.4.4). To nově umožňuje provozovat detektory v módech TOA<sup>4</sup> a TOT<sup>5</sup>.

Další změnou oproti svému předchůdci je, že každý detektor obsahuje dva detekční čipy s tloušťkami 300  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ , umístěné předními stranami k sobě - viz 4.1a. To přináší možnost měřit koincidence. Když částice projde oběma vrstvami detektoru a zároveň v každé nechá jisté měřitelné množství své energie, je detekována oběma vrstvami a je možné zpětně zrekonstruovat její trajektorii. Tyto koincidence se nejsnáze detekují, pokud oba Timepix čipy pracují v módu TOA - jelikož rychlost částic se blíží rychlosti světla, je vysoce pravděpodobné, že zasažené pixely budou mít stejnou hodnotu.



Obrázek 4.1: Atlas TPX detektor - vrstvy a rozmístění konvertorů

<sup>1</sup>V průběhu LS3<sup>3</sup> (plánováno 2017 - 2018) je plánováno rozšíření této sítě o nové detektory

<sup>2</sup>z angl. Large Hadron Collider

<sup>3</sup>z angl. long shutdown - dlouhodobá technologická přestávka LHC

<sup>4</sup>z angl. Time of Arrival - čas příletu částice v hodinových cyklech detektoru od začátku akvizice

<sup>5</sup>z angl. Time Over Threshold - počet hodinových cyklů, kdy komparační napětí je větší, než referenční (ekvivalent energie deponované částice, viz kapitola 3)

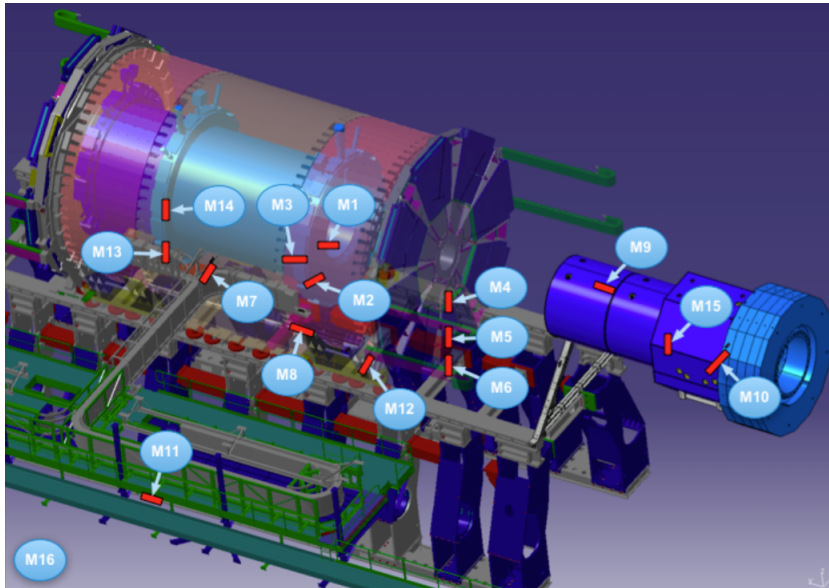
Mezi vrstvami detektoru je umístěn konvertující materiál pro detekci termálních a rychlých neutronů. Rozmístění těchto konvertorů je na obrázku 4.1b.

Hlavním úkolem Atlas TPX je online monitorování spektrální charakteristiky velice různorodého radiačního prostředí Atlas experimentu, založeny na prostorovém uspořádání sítě a (vzhledem k aktuálnímu módu detektoru) i informací o deponované energii zainteragovaných částic a časovou informaci.

Detektory, instalované blízko interakčního bodu, jsou rovněž použity jako monitory integrované luminozity, což je veličina, která udává počet realizovaných srážek, resp. s intenzitou svazku urychlovače. Ve [4] se uvádí, že je to veličina, která v případě srážení dvou proti sobě letících svazků ukazuje, jaký je součin počtů částic v jednotlivých svazcích prolétajících jednotkovou plochou v srážkové oblasti, vynásobený počtem obletů svazků za jednotku času (nejčastěji se vyjadřuje v jednotkách na centimetr čtvereční a sekundu).

## 4.1 Atlas MPX

Atlas MPX[5][1] je předchůdcem detektorové sítě Atlas TPX, která v současné době je plně nahrazena. Skládala se z 16 Medipix2 detektorů, které byly instalovány na různé pozice Atlas detektoru - viz obr. 4.2. Hlavním cílem této sítě bylo měření vlastností radiačního pole uvnitř experimentu Atlas, jeho složení, spektroskopických charakteristik a částečně také přispěla k měření neutronů.

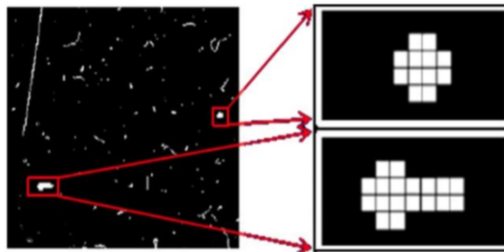


Obrázek 4.2: Atlas MPX s přehledem rozmístění detektorů

Všechny detektory operovaly v tzv. Medipix módu, který se vyznačují tím, že v rámci jedné akvizice počítá počet částic, které interagovaly pixelovou maticí detektoru a jejichž deponovaná energie byla vyšší, než prahová. Na obrázku 4.3 je znázorněn snímek z jednoho detektoru s detailem zachycených částic. Na obrázku vpravo nahoře je částice typu heavy

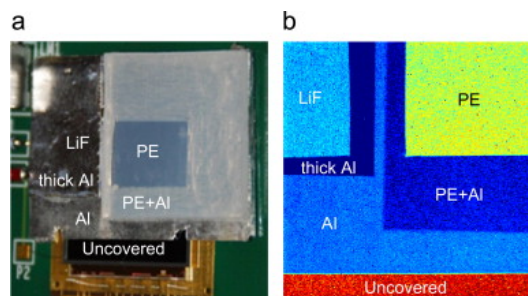


blob (těžce nabitá částice, jejíž trajektorie byla kolmá s povrchem detektoru), vpravo dole je pak zachycena částice typu **heavy track** (také těžce nabitá částice, která ale přiletěla pod větším a proto zanechala větší stopu) - více klasifikací částic se dočtete v podkapitole 2.4.5.



Obrázek 4.3: Snímek z Atlas MPX detektoru s výřezem zachycených částic (převzato z [1])

Každý z těchto detektorů byl osazen  $300\ \mu\text{m}$  tlustým křemíkovým senzorem, který byl pokryt konvertory pro lepší detekční účinnost neutronů (obr. 4.4).

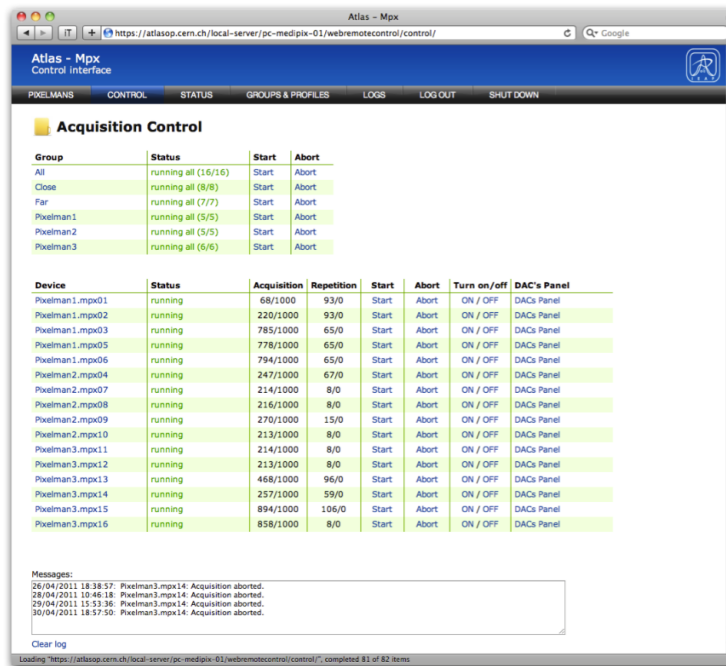


Obrázek 4.4: Fotografie znázorňující Medipix2 detektor s neutronovými konvertory (převzato z [5])

#### 4.1.1 Hardwarová a softwarová architektura sítě Atlas MPX

Tato síť se skládala z 16 Medipix2 2.4.3 detektorů, které byly pomocí USB vyčítacího rozhraní FITPix 2.4.6 připojeny ke třem počítačům (z důvodu distribuce toku dat a výkonu). Na každém počítači se o komunikaci s detektory staral software Pixelman 2.4.7, který řídil akvizici dat, nastavování parametrů detektorů apod.

Pro vzdálené ovládání každého byl vyvinut plugin pro Pixelman, který umožňoval jeho rozšíření o TCP/IP ovládací vrstvu. Pomocí jednoduchého textového protokolu bylo tedy možné řídit každý ze třech uzlů. Pro tyto účely byla vyvinuta centrální řídicí aplikace [2], pomocí které bylo možné řídit akvizici všech detektorů a nastavovat jejich parametry. Tato aplikace poskytovala webové rozhraní (obr. 4.5), které díky tou dobou méně striktní CERNské politice síťové bezpečnosti bylo možné tento experiment ovládat z internetu.



Obrázek 4.5: Atlas MPX - řídicí aplikace (převzato z [3])

## 4.2 Hardwarová architektura

Při návrhu hardwarové architektury sítě Atlas TPX musela být zohledněna zvýšená intenzita radiačního a elektromagnetického pole v okolí Atlas detektoru. Snahou proto bylo, co nejvíce hardwarových komponent umístit z dosahu tohoto pole. Z pohledu hardwarové instalace naší detektorové sítě se prostory Atlas experimentu dělí na dvě části - UX15 a USA15 (viz obr. 4.6). V UX15 se nachází vlastní experiment. V tomto prostoru byly umístěny jen vlastní detektory (na obr. 4.6 TPX01 až TPX15) a zbytek sítě je instalován v USA15, kterou od zbytku experimentu dělí cca 60 m tlustá železobetonová stěna. Tady se nachází vyčítací elektronika a další nezbytný hardware.

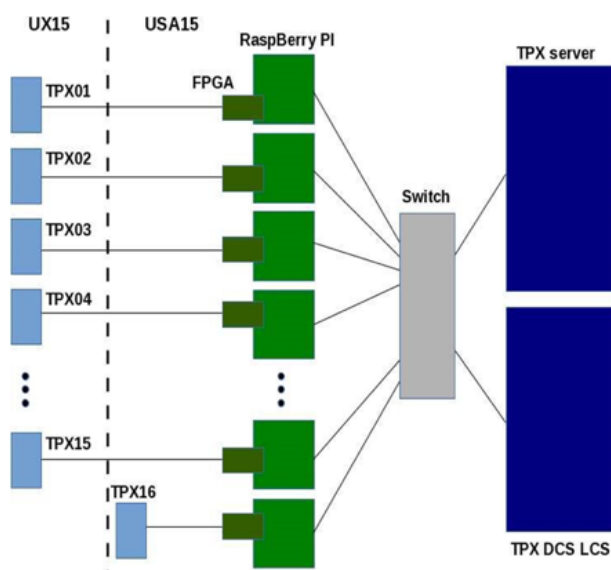
Na obrázku 4.7 je fotografie těchto komponent. Jak již bylo zmíněno výše, detektor (z obr. 4.7, na obr. 4.6 jako TPX01 až TPX15) se skládá z dvojice detekčních čipů Timepix2, které jsou pomocí LVDS zesilovačů a cca 100 m dlouhých ethernetových kabelů propojeny se zařízením AtlasPix (obr. 4.7 dole), které vzniklo modifikací vyčítacího rozhraní FITPix 2.4.6. Toto zařízení obsahuje FPGA<sup>6</sup>, minipočítač Raspberry Pi a další podpůrnou elektroniku.

FPGA se stará o komunikaci s Timepix2 detektory, v rámci které dochází k nastavování řídicích registrů Timepix2 čipů, ovládání akvizice, vyčítání dat, řízení triggeru<sup>7</sup> apod.

Dalším článkem tohoto řetězce je minipočítač Raspberry Pi, který plní dvě úlohy. Tou

<sup>6</sup>z angl. Field Programmable Gate Array (programovatelné hradlové pole)

<sup>7</sup>řídicí signál, který spouští resp. zastavuje (dle konfigurace) akvizici detektoru



Obrázek 4.6: Atlas TPX - diagram hw komponent

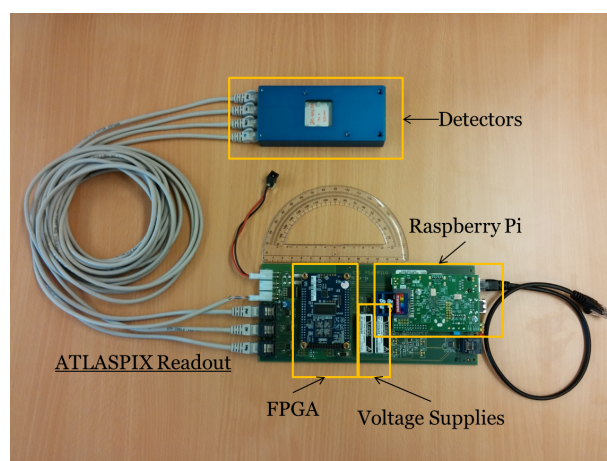
první je komunikace s FPGA pomocí SPI<sup>8</sup> rozhraní, deserializace (získání dat ze struktury komunikačního protokolu) a derandomizace (není zaručena časová posloupnost) surových dat z FPGA. Druhou úlohou tohoto zařízení je poskytování API<sup>9</sup> vyšším řídicím vrstvám této sítě pomocí specifikovaného komunikačního protokolu a klasického ethernetového rozhraní.

Všechny tyto zařízení jsou pomocí ethernetového switchu propojeny s TPX serverem, který je centrálním bodem této sítě, který jí pomocí řídicího softwaru 4.4 a komunikačního protokolu 4.4.1 ovládá. Zároveň je k síti připojen i TPX DCS<sup>10</sup> server, pomocí kterého jsou různé stavové informace Atlas TPX sítě předávány CERNu, resp. Atlas experimentu. Tyto stavové informace jsou převážně hardwarového charakteru (na př. napětí, časování apod.), ale také jsou předávána data o počtu pořízených snímků, jejich okupanci apod.

<sup>8</sup>z angl. Serial Peripheral Interface (sériové periferní rozhraní)

<sup>9</sup>z angl. Application Programming Interface (aplikační programovací rozhraní)

<sup>10</sup>z angl. Data Control System



Obrázek 4.7: Atlas TPX - fotografie hw komponent

## 4.3 Softwarová architektura

### 4.4 Řídící software

#### 4.4.1 Řízení detektorů

#### 4.4.2 REST API server

#### 4.4.3 Zpracování a ukládání dat



## Kapitola 5

## Závěr





# Literatura

- [1] BOUCHAMI, J. et al. Estimate of the neutron fields in ATLAS based on ATLAS-MPX detectors data. *Journal of Instrumentation*. 2011, 6, 01, s. C01042. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/1748-0221/6/i=01/a=C01042>>.
- [2] TURECEK, D. 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*. 2011, 633, Supplement 1, s. S45 – S47. ISSN 0168-9002. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.117>. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210013070>>. 11th International Workshop on Radiation Imaging Detectors (IWORID).
- [3] TURECEK, D. Software for Radiation Detectors Medipix. Master's thesis, Czech Technical University in Prague, Czech Republic, 2011.
- [4] Vladimír Wagner. Článek: Jak se daří urychlovači LHC [online]. 2009. [cit. 4. 5. 2016]. Dostupné z: <[http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/lhc/lhc\\_rok2010.htm](http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/lhc/lhc_rok2010.htm)>.
- [5] VYKYDAL, Z. 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*. 2009, 607, 1, s. 35 – 37. ISSN 0168-9002. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2009.03.104>. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900209005956>>. Radiation Imaging Detectors 2008 Proceedings of the 10th International Workshop on Radiation Imaging Detectors.



## Příloha A

# Obsah přiloženého CD

Tato příloha je povinná pro každou práci. Každá práce musí totiž obsahovat přiložené CD. Viz dále.

Může vypadat například takto. Váš seznam samozřejmě bude odpovídat typu vaší práce...  
[3] fasfassaafsaf



Obrázek A.1: Seznam přiloženého CD — příklad

Na GNU/Linuxu si strukturu přiloženého CD můžete snadno vyrobit příkazem:

```
$ tree . >tree.txt
```

Ve vzniklém souboru pak stačí pouze doplnit komentáře.

Z **README.TXT** (případně index.html apod.) musí být rovněž zřejmé, jak programy instalovat, spouštět a jaké požadavky mají tyto programy na hardware.

Adresář **text** musí obsahovat soubor s vlastním textem práce v PDF nebo PS formátu, který bude později použit pro prezentaci diplomové práce na WWW.