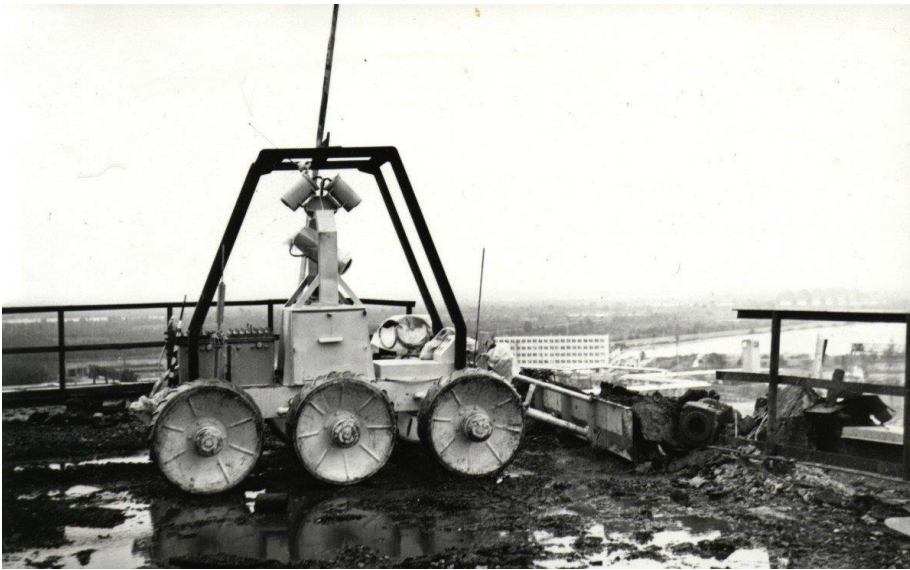




Využití robotických prostředků pro měření a mapování radiace

Tomas Lazna

Brno University of Technology
2022



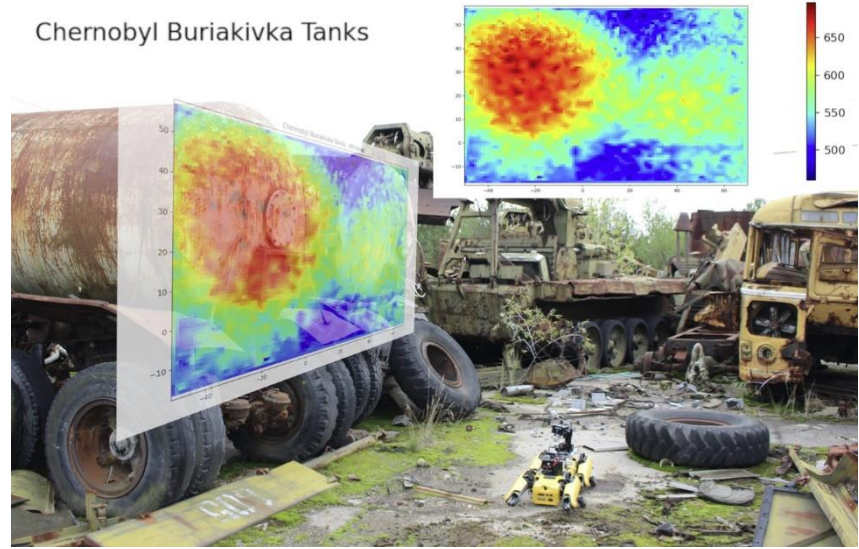
[1]



[2]



[3]



[4]

Chernobyl Buriakivka Tanks

[1] Chernobyl Robots. Chernobyl X, 2021

[2] PEEVA, Aleksandra. Now Available: New Drone Technology for Radiological Monitoring in Emergency Situations. IAEA, 2021

[3] Particles in the Environment: Annual Report for 2017 and Forward Programme. Sellafield Ltd, 2018

[4] DAY, Paul. Spot takes nuclear O&M to parts other robots cannot reach. Reuters Events, 2020

Druhy záření

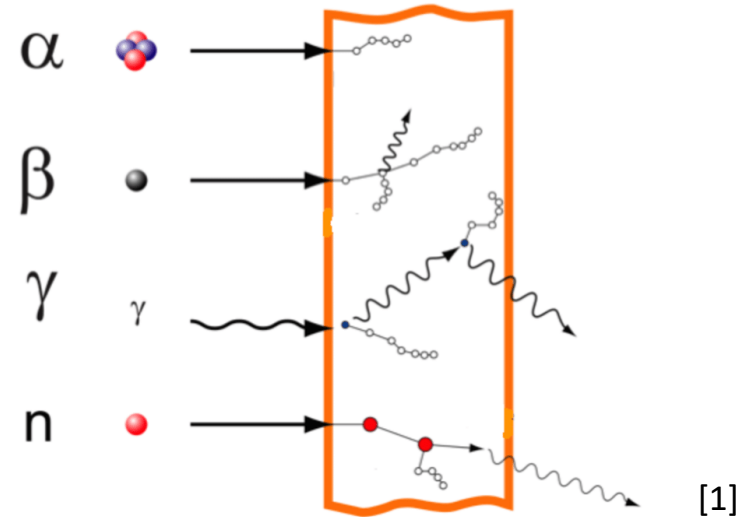
- Alfa – jádra ${}^4_2\text{He}$
- Beta – elektrony, resp. pozitrony
- **Gama** – vysokoenergetické elmag. záření
- Neutronové

Zdroje záření

- Radioaktivní izotopy – přírodní, umělé
- Urychlovače částic
- Jaderné reakce
- Kosmické záření

Typy zářičů

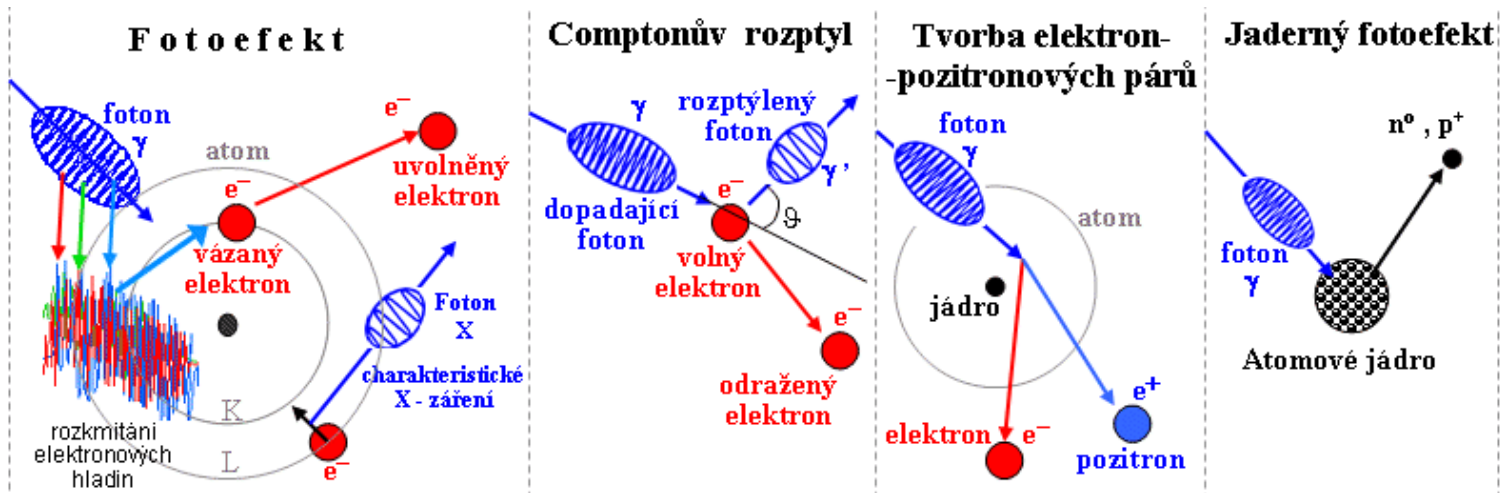
- Uzavřené vs. otevřené
- Bodové, plošné, objemové



Důležité veličiny a jednotky

- Aktivita – becquerel (Bq)
- Dávka, dávkový příkon – gray (za hodinu) (Gy/h)
- Dávkový ekvivalent – sievert (za hodinu) (Sv/h)
- „Intenzita“ záření – pulsy za sekundu (CPS)

Interakce s hmotou

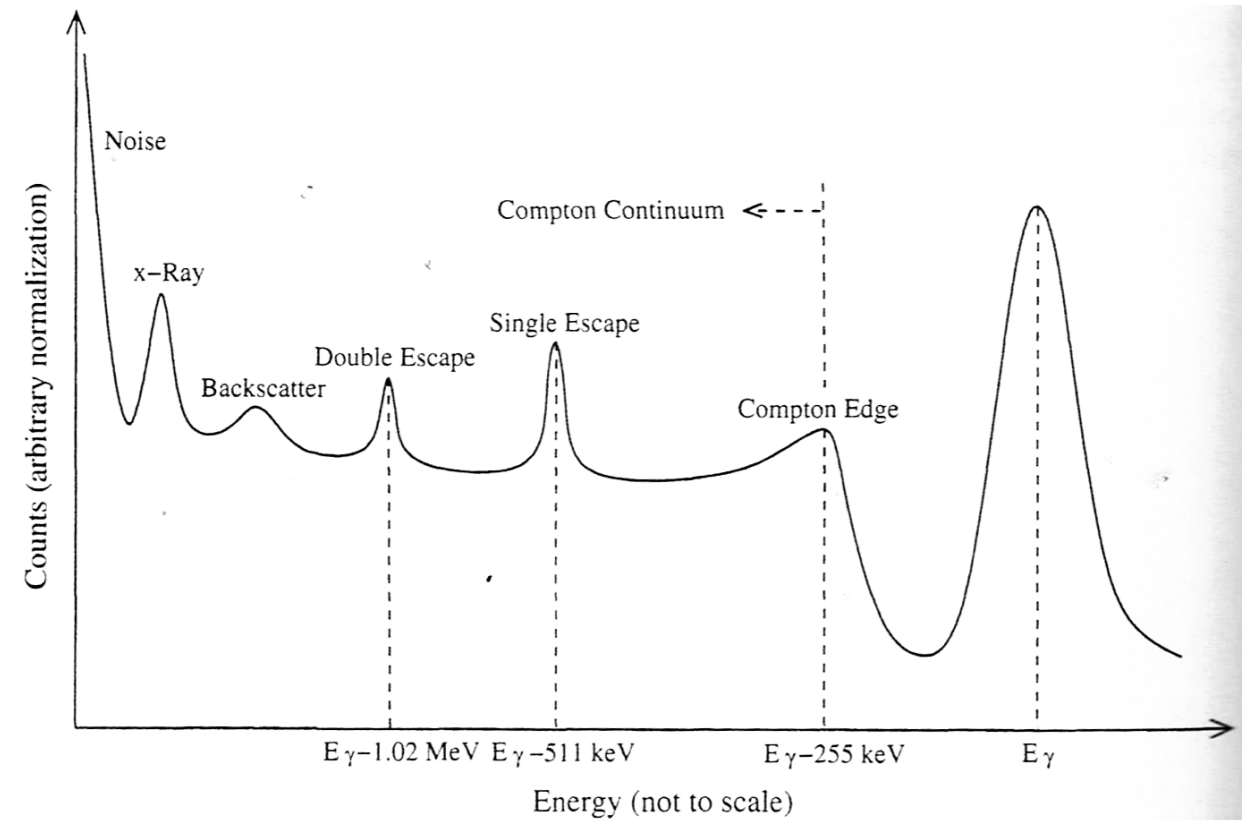


Šíření záření v prostoru

- Intenzita klesá s druhou mocninou vzdálenosti
- Účinný průřez interakce záření s hmotou
- Lineární koeficient útlumu (m^{-1})
- Geometrie – široký vs. úzký svazek

$$I = I_0 \frac{\exp(-\sum \mu_i d_i)}{(\sum d_i)^2}$$

- Měříme energii interagujících částic
- Fotopík + parazitní jevy
- Lze rozeznat radioaktivní izotopy
- Měření dozimetrické veličiny



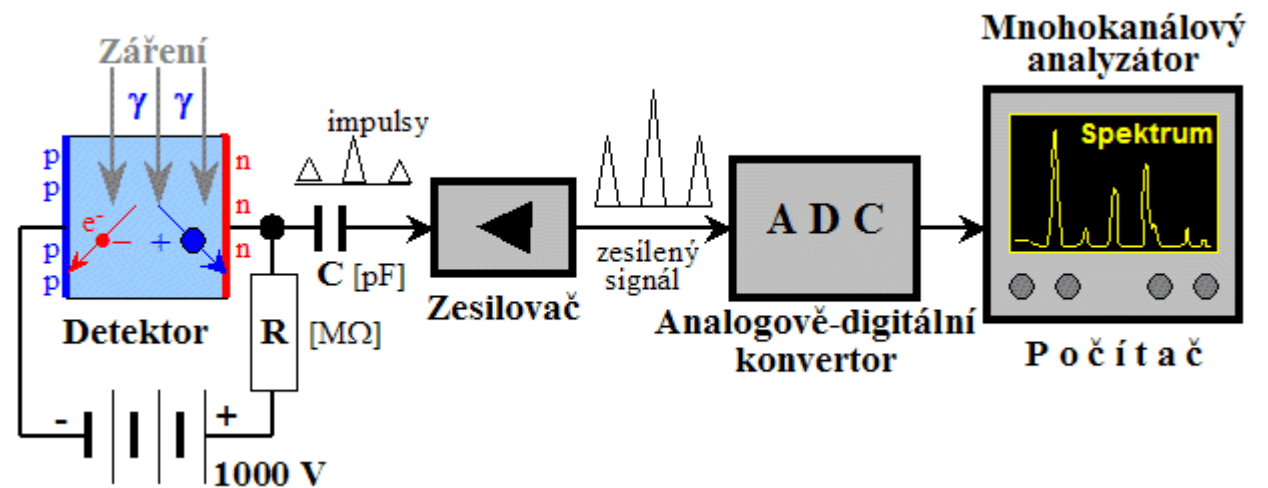
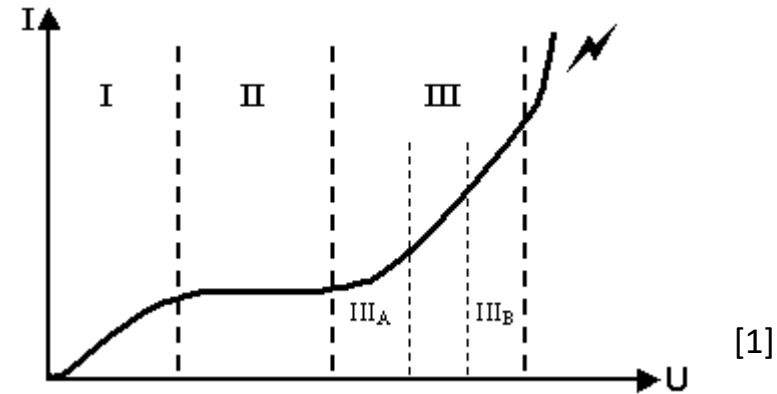
[1]

Plynové detektory

- Princip funkce
- Ionizační komory
- Proporcionální detektory
- Geigerovy-Müllerovy (GM) detektory
- Vlastnosti, výhody, nevýhody

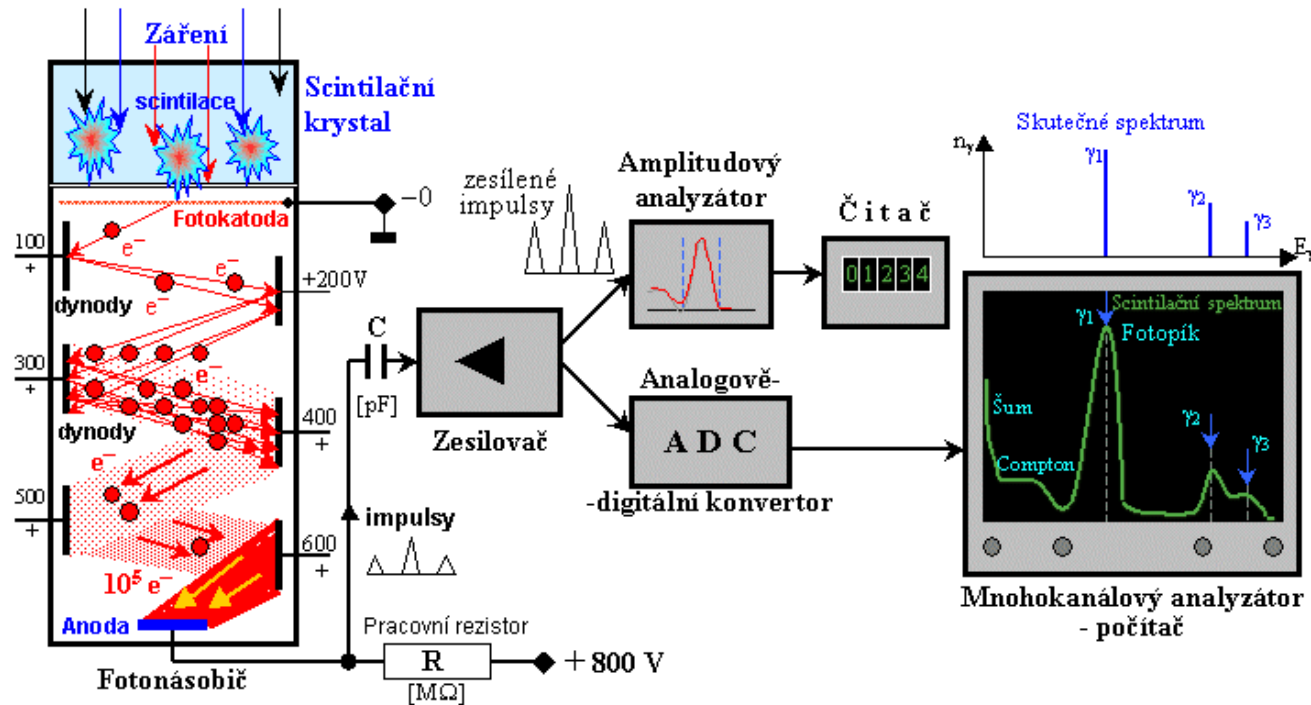
Polovodičové detektory

- Typicky PN přechod v závěrném směru
- Dobré energetické rozlišení
- Si, Ge – nutno chladit
- CdZnTe
- Vysoká cena

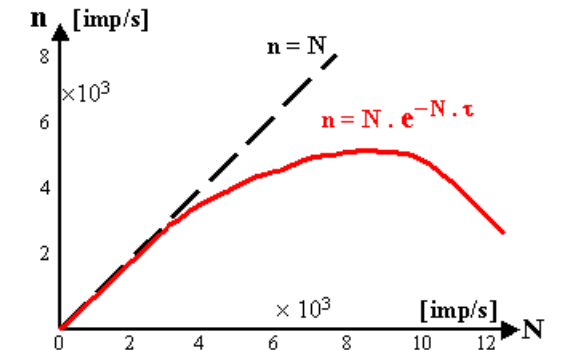
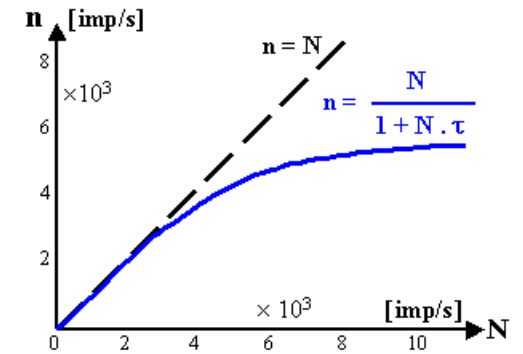


Scintilační detektory

- Využití radioluminescence = převod ionizujícího záření na viditelné světlo
- Scintilátory – anorganické (monokrystaly), organické (plastové detektory)
- Detekce světla – fotonásobič (PMT), fotodioda (SiPM)
- Vlastnosti, výhody, nevýhody → použití na robotických systémech



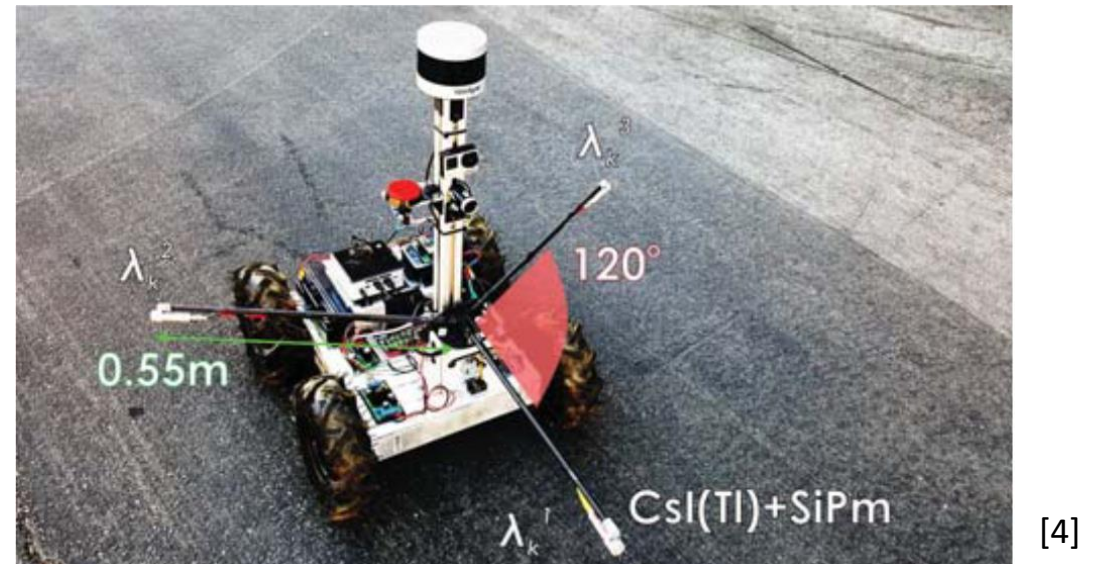
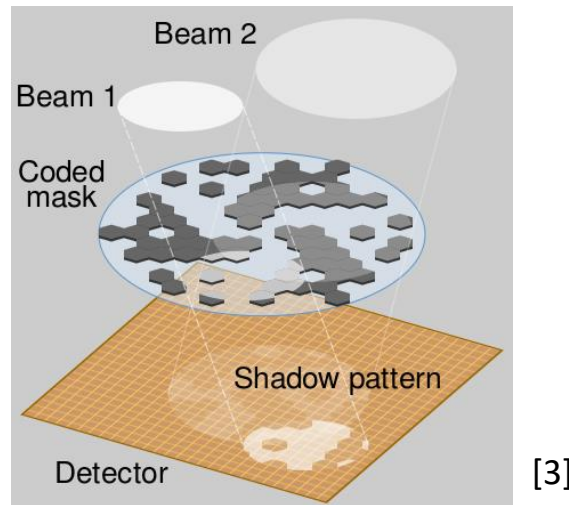
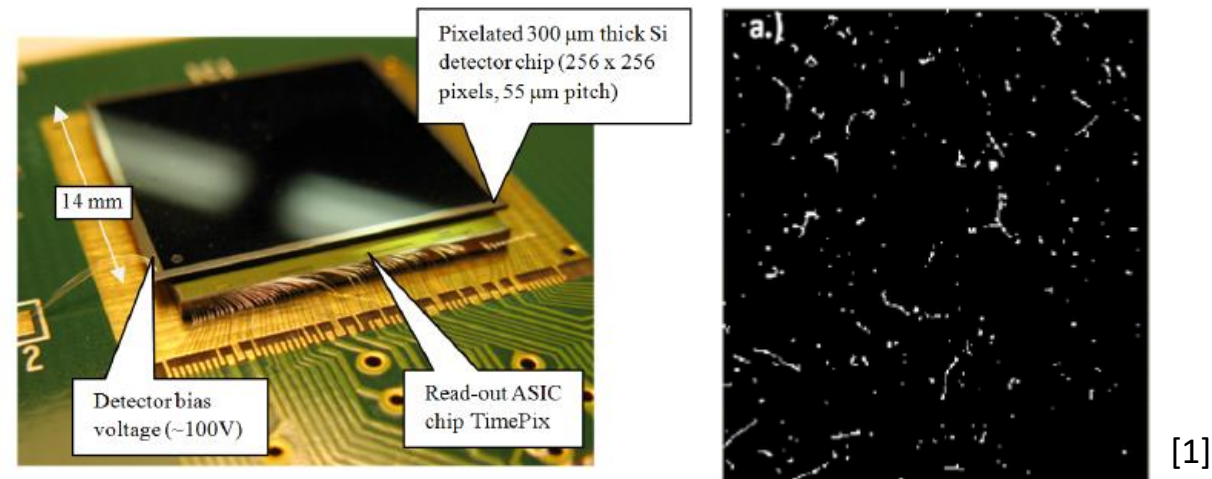
Mrtvá doba



[1]

[1]

- Využití polohově citlivých maticových detektorů
 - Timepix
 - Gama kamera – kódovaná clona
- Multidetektorové systémy
 - Detekce okamžitého gradientu záření



[1] KRAUS, Václav et al. FITPix data preprocessing pipeline for the Timepix single particle pixel detector. Journal of Instrumentation, 2012

[2] iPIX: Ultra Portable Gamma-Ray Imaging System. Mirion Technologies, 2022

[3] Coded aperture. Wikipedia, 2021

[4] MASCARICH, Franz et al. Distributed Radiation Field Estimation and Informative Path Planning for Nuclear Environment Characterization. IEEE, 2019

Scénář

- Definovaná oblast o ploše cca 2 ha v níž se nachází blíže nespecifikovaný počet zdrojů záření gama
- Předpokládáme, že zdroje jsou relevantní z hlediska radiační ochrany
- V oblasti se nachází různorodé překážky
- Máme k dispozici dron (UAS) a pozemní robot (UGV) + potřebnou sensoriku
- Cíl: lokalizovat zdroje



Použité vybavení

- Bezpilotní letoun BRUS
 - Nekomerční systém pro fotogrammetrii
 - Detekční systém DRONES-G (2" NaI(Tl))
- Pozemní kolový robot Orpheus-X4
 - Dvakrát 2" NaI(Tl) + MCA
 - RTK-GNSS přijímač

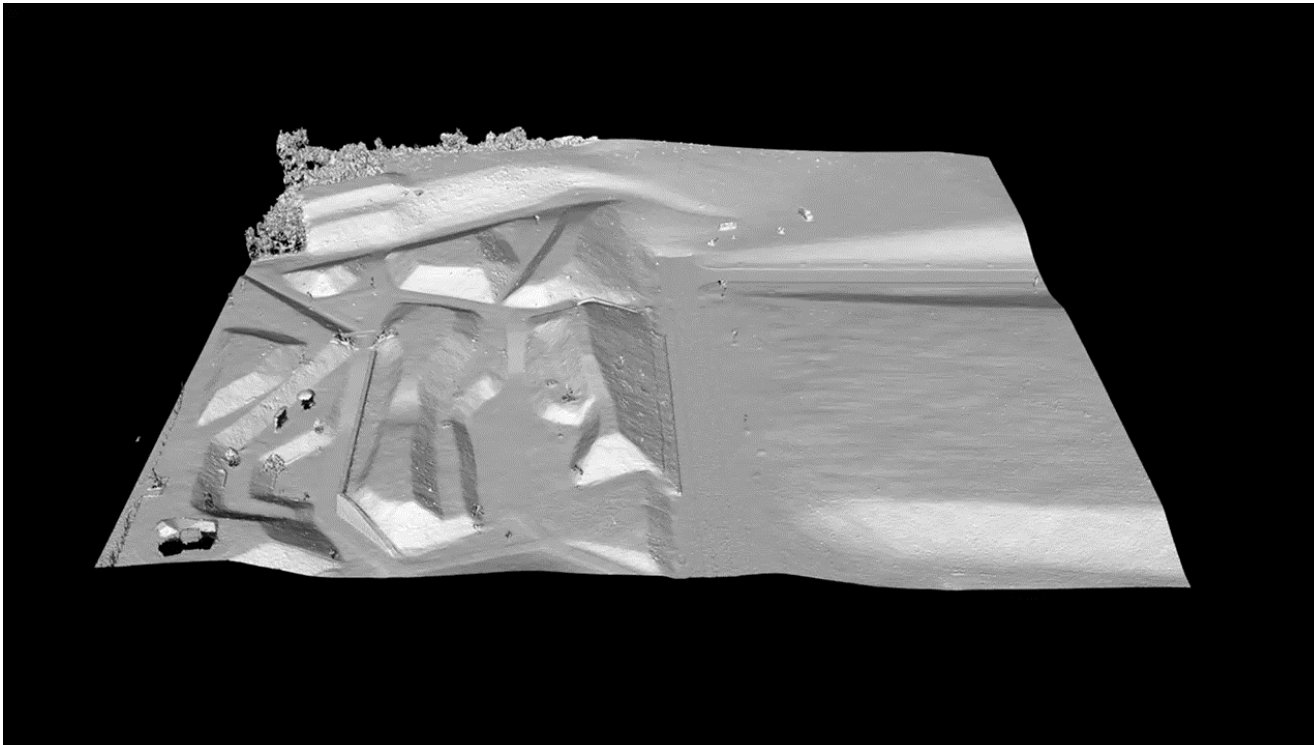
Zdroje záření gama

Co-60	124 MBq	
Cs-137	80 MBq	
Co-60	25 MBq	×2
Cs-137	8 MBq	×2
Co-60	3 MBq	×2



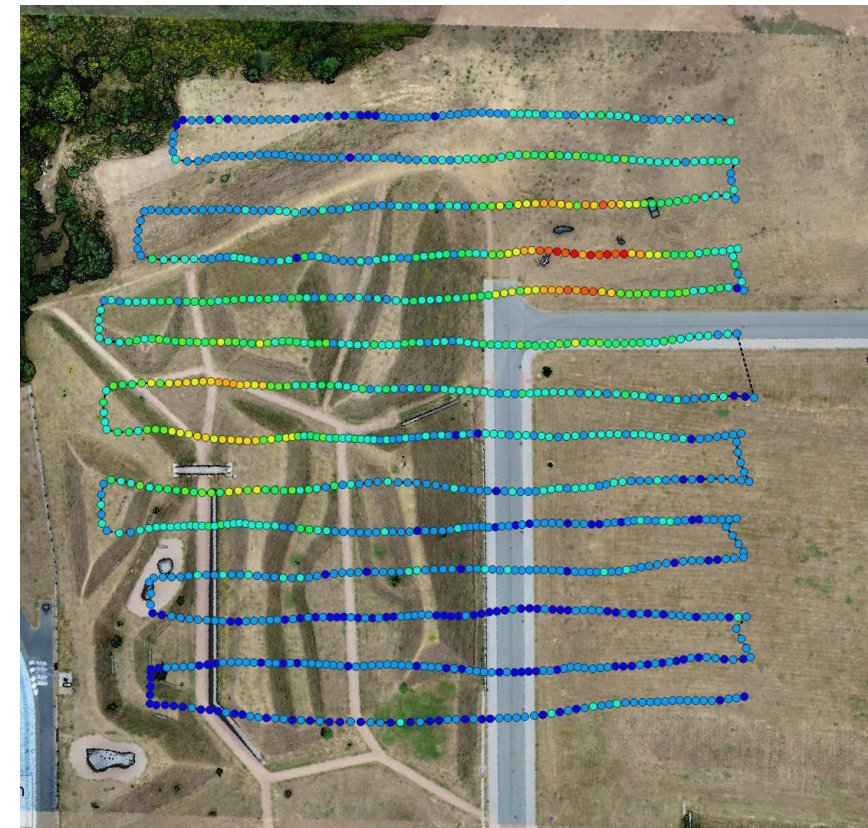
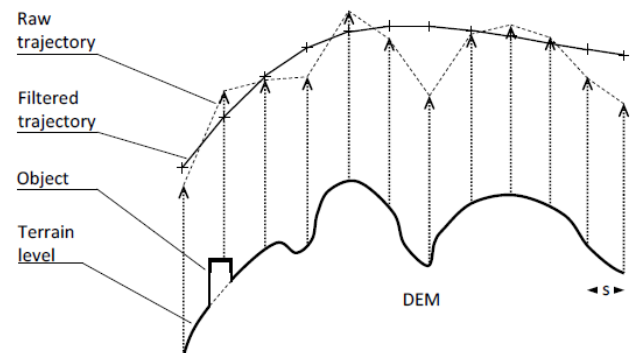
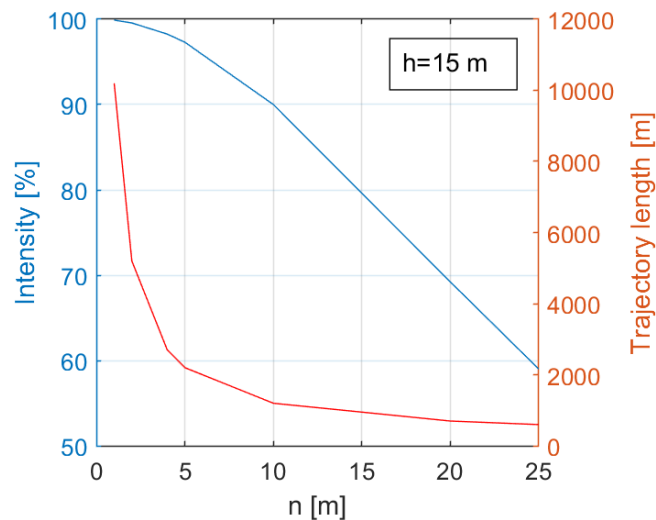
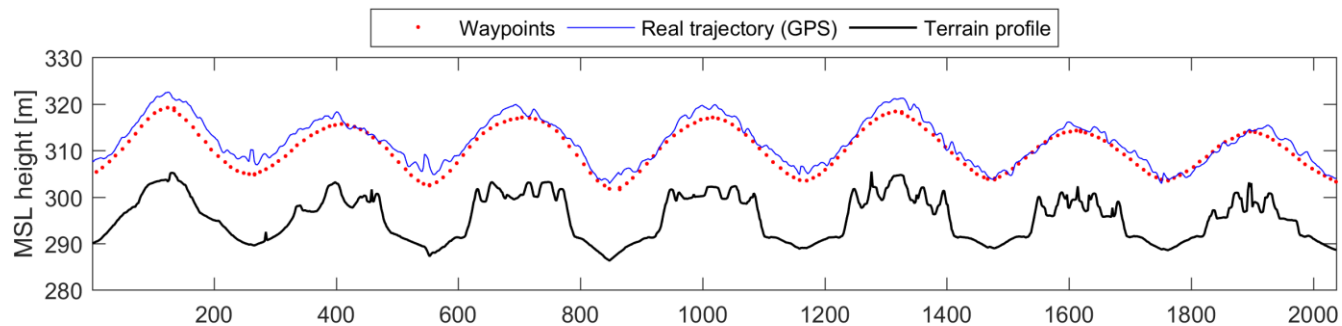
Fáze I – Letecká fotogrammetrie

- Vstupem je definice hranic zkoumaného regionu
- Konstantní nadmořská výška (~60 m ATOP)
- Pořízena série georeferencovaných fotografií
- Rekonstrukce 3D modelu oblasti (DEM, ortofoto)



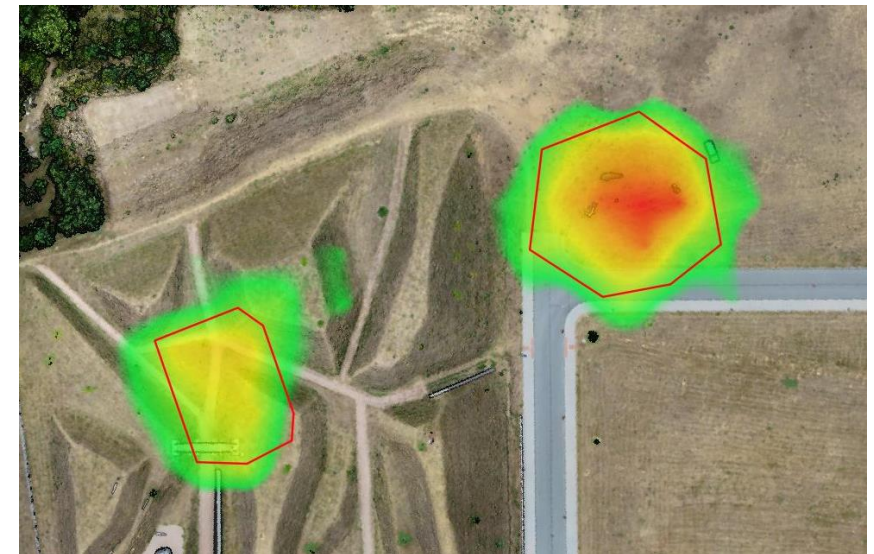
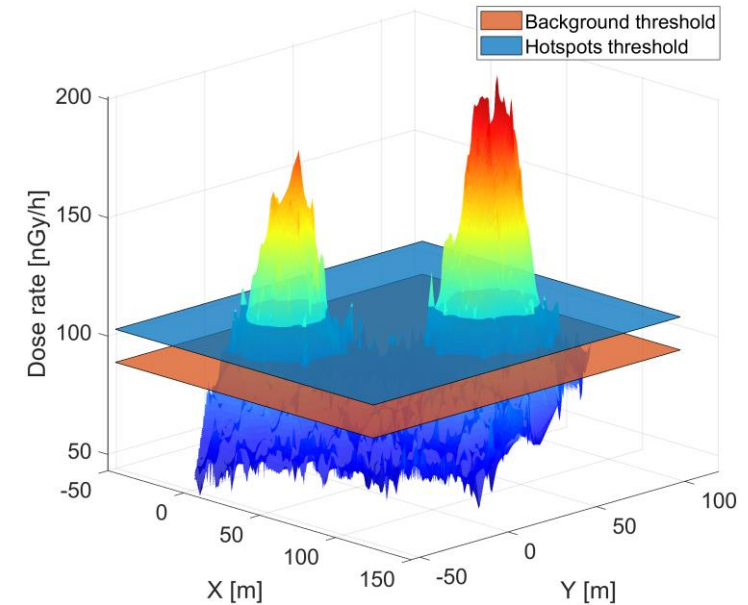
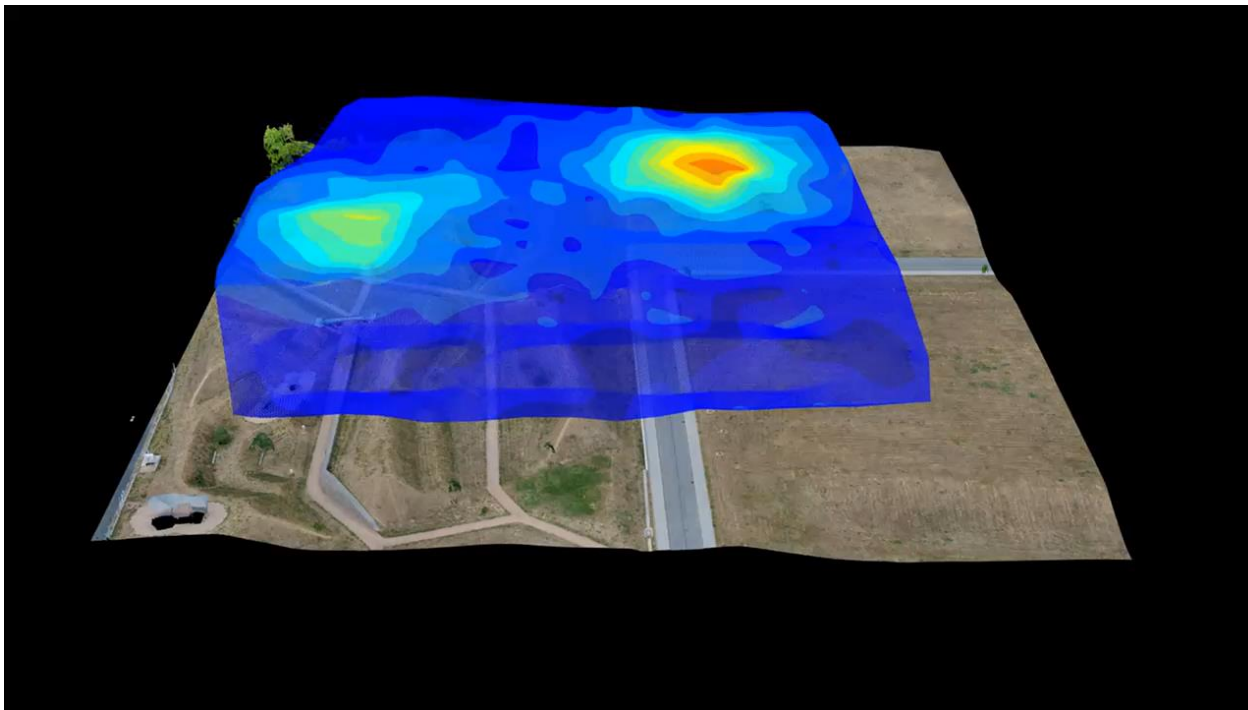
Fáze II – Letecké mapování radiace – sběr dat

- Zájmem je držet konstantní výšku nad terénem (~15 m) – trajektorie vypočítaná dle DEM
- Letová rychlost 2 m/s, vzorkovací perioda 1 s, rozestup linií 10 m
- Výstupem je množina diskretních datových bodů (souřadnice + spektrum + jiné)



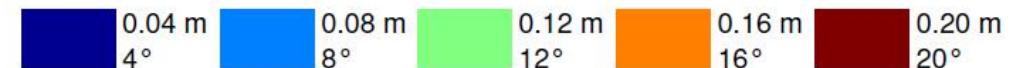
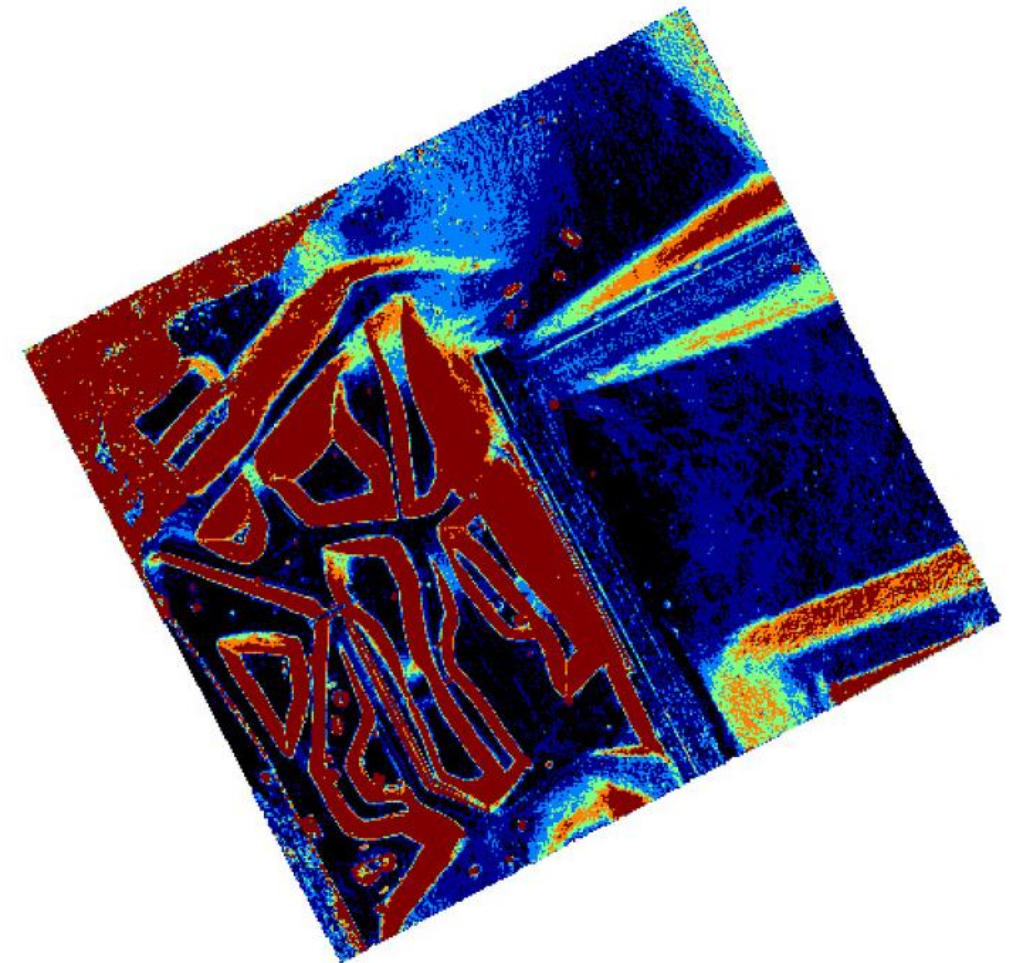
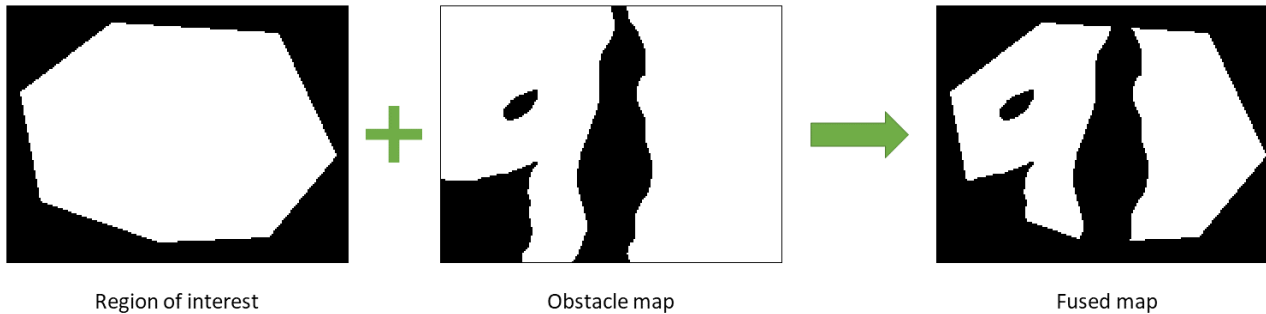
Fáze II – Letecké mapování radiace – zpracování dat

- Předzpracování – redukce datasetu
- Interpolace do pravidelného gridu (Delaunay)
- Konturový graf (snadná interpretace pro člověka)
- Extrakce hotspotů = ořez pozadí – adaptivní prahování
- Aproximace oblastí zájmu (ROI) polygony



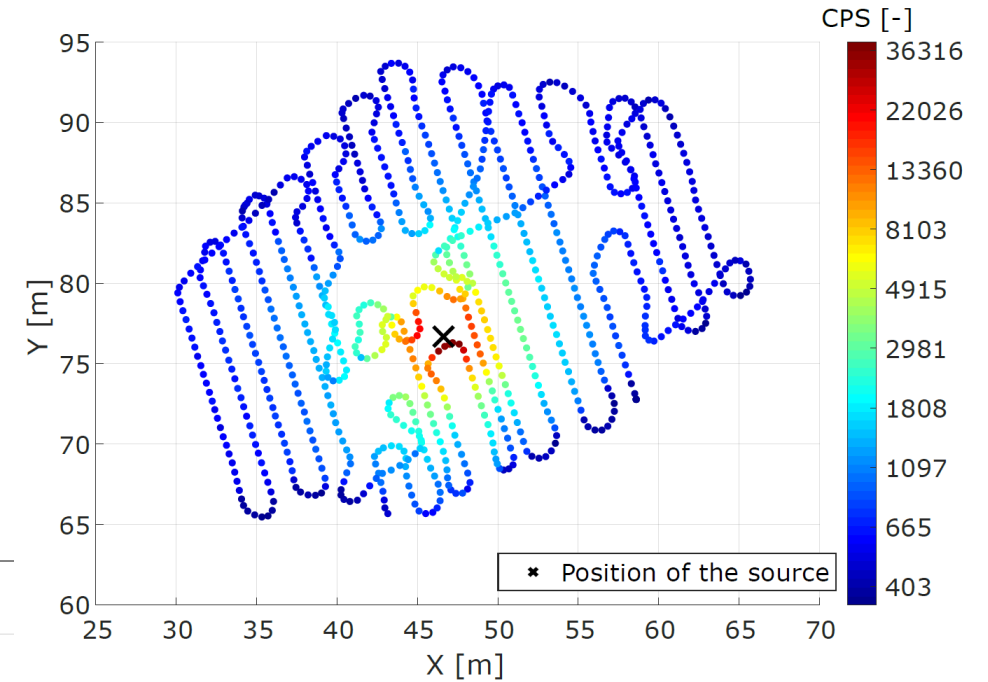
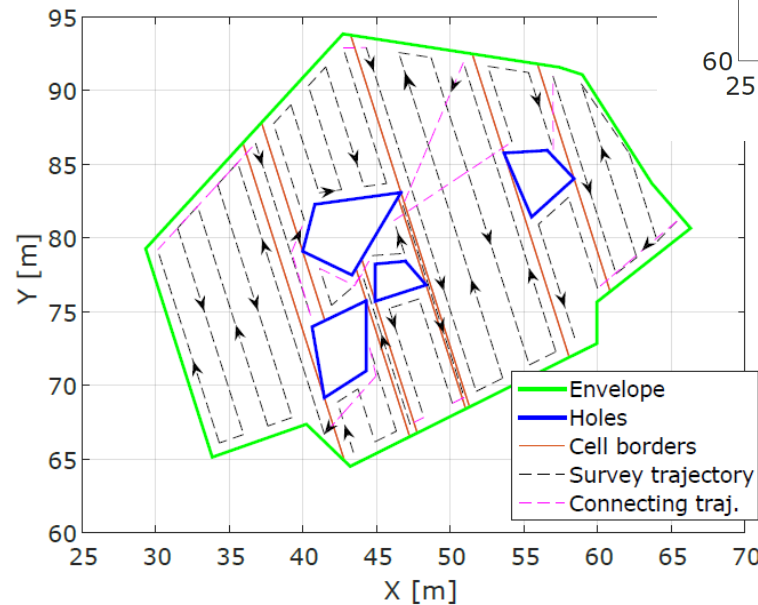
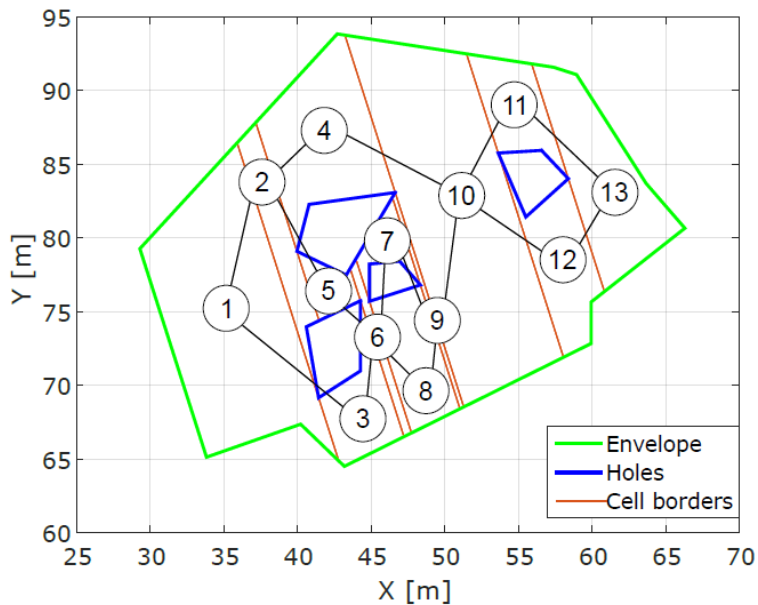
Fáze III – Pozemní průzkum – příprava

- Převod DEM na mřížku obsazenosti (occupancy grid) dle povolených limitních parametrů (výška překážky, sklon terénu)
- Zásah operátora – kontrola překážek (dle ortofoto), dodefinování chybějících překážek
- Finální mapy oblastí zájmu – pro každý ROI obálka a „díry“



Fáze III – Pozemní průzkum – sběr dat

- Plánování trajektorie pro průzkum jednotlivých ROI – na bázi Boustrophedon dekompozice
- Průjezd oblasti podle naplánovaných trajektorií – rozestup linií ~1.5 m, vzorkovací perioda 1 s, maximální dopředná rychlost 0.6 m/s



Fáze III – Pozemní průzkum – zpracování dat

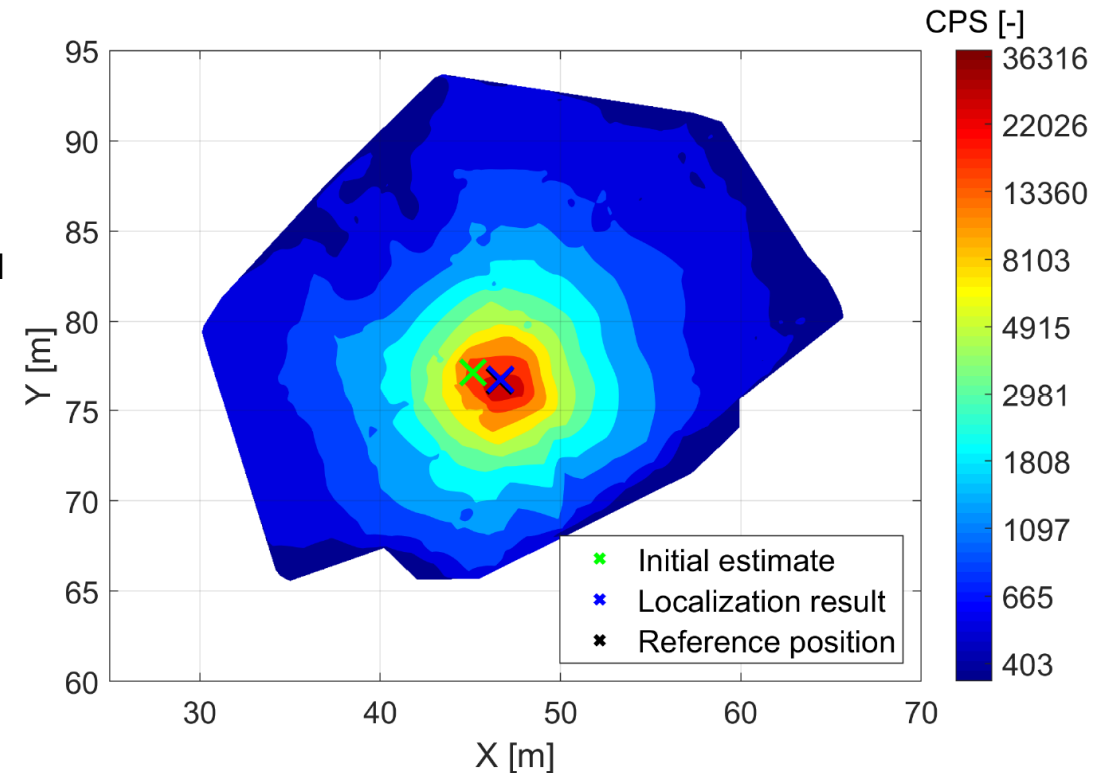
- Interpolace – konturový graf
- Lokalizace zdrojů
 - Adaptivní prahování → hotspots → odhad počtu zdrojů, jejich pozice a intenzity
 - Zpřesnění estimace pomocí Gauss-Newtona (iterativní gradientní metoda)
 - Mějme:

$$\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\theta}_i = (\alpha_i, x_i, y_i), \mathbf{z}, \mathbf{z}_j = (c_j, x_j, y_j)$$

- Minimalizujeme rezidua:

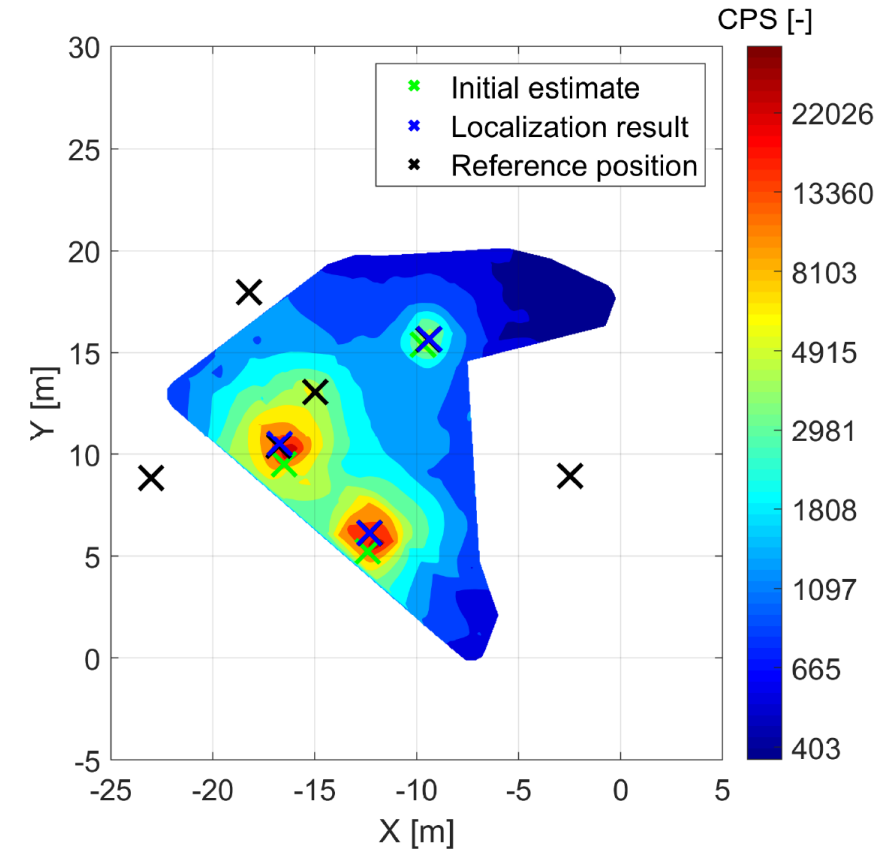
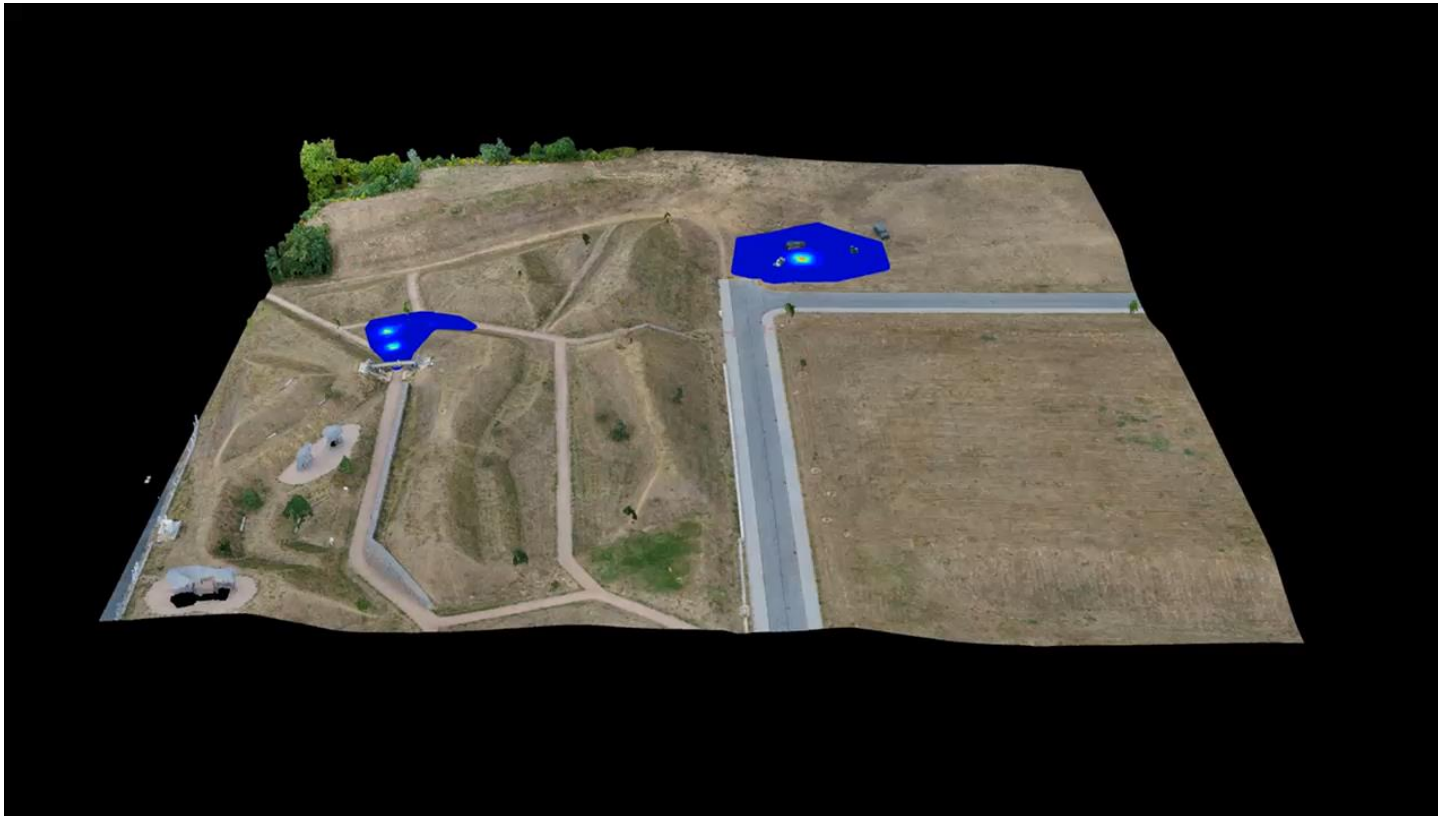
$$r_m = c_m - \sum_{r=1}^R \frac{\alpha_r}{(x_m - x_r)^2 + (y_m - y_r)^2 + h^2}$$

- Iterujeme: $\boldsymbol{\theta}_{k+1} = \boldsymbol{\theta}_k - (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{r}(\boldsymbol{\theta}_k)$



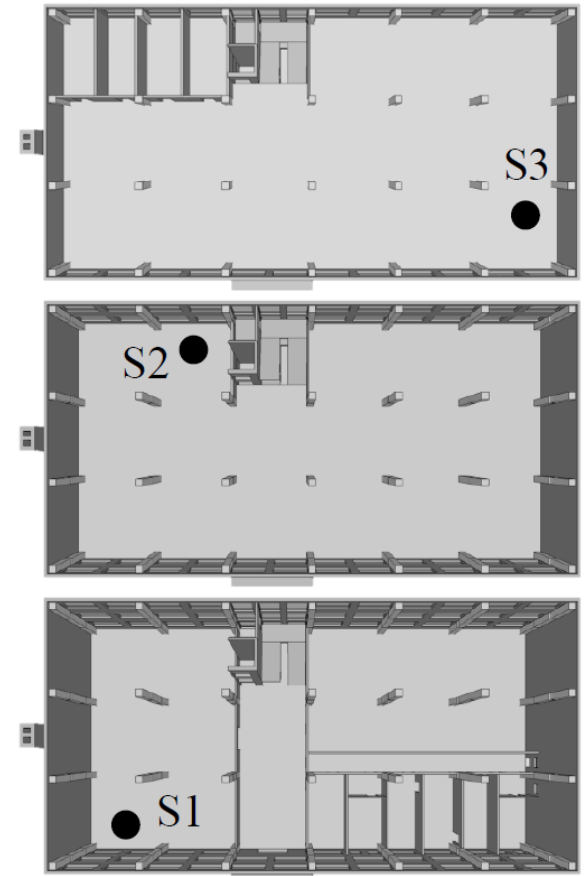
Fáze III – Pozemní průzkum – zpracování dat

- Zhodnocení výsledků



Scénář

- Vícepodlažní budova v níž se nachází blíže nespecifikovaný počet zdrojů záření gama
- Předpokládáme, že zdroje jsou relevantní z hlediska radiační ochrany
- Plášť budovy je z větší části přístupný pro bezpilotní letoun
- Máme k dispozici dron (UAS) s nepřesným GNSS přijímačem a detektorem
- Cíl: sestavit podrobnou povrchovou radiační mapu budovy



Použité vybavení

- Bezpilotní letoun DJI Phantom 2
- Bezpilotní letoun DJI Matrice 210 V2
 - Detekční systém 2" NaI(Tl) + MCA
- Geodetický GNSS přijímač

Zdroje záření gama

Cs-137	10.9 GBq	1. patro	1" Pb
Cs-137	2.4 GBq	2. patro	
Co-60	0.6 GBq	3. patro	



Fáze I – Letecká fotogrammetrie

- Použito nepřímé georeferencování

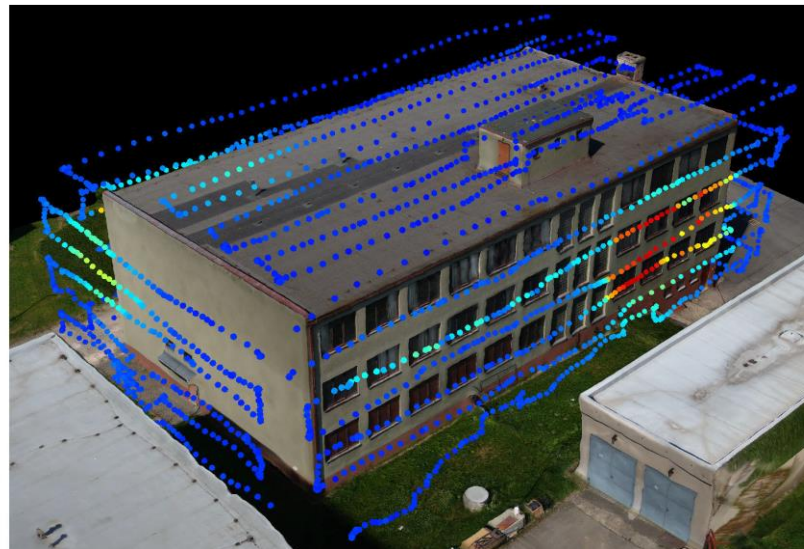
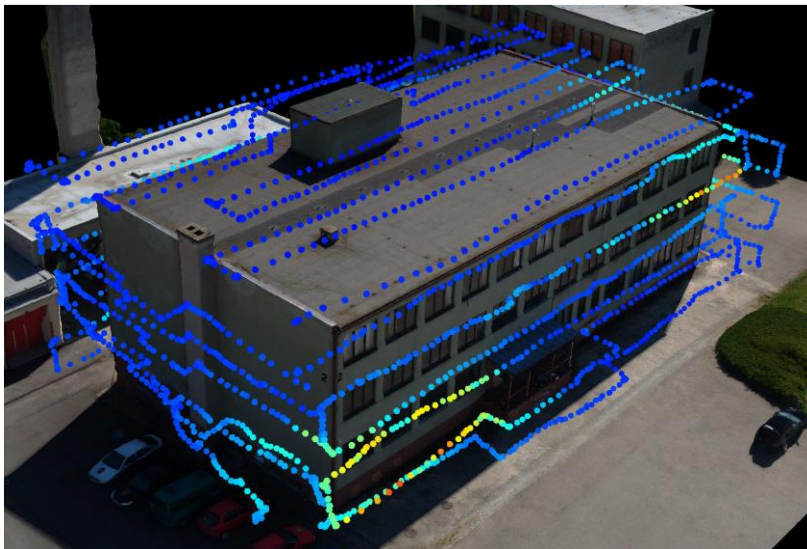
Fáze II – Radiační mapování – sběr dat

- Ruční ovládání zkušeným pilotem
- 2 metry od stěn/nad střechou
- 2 metry rozestup letových linií
- Rychlost letu ~ 0.5 m/s



Fáze II – Radiační mapování – zpracování dat

- Konverze spekter na dávkové příkony → linearizace
- Georeferencování datasetu – palubní data z UAS
- Korekce offsetu dat
- Filtrace a redukce datasetu
- Projekce datových bodů na povrch 3D modelu (point cloud)
- Interpolace dat na povrchu modelu (Delaunay)



Algorithm 1 The algorithm to estimate the position offset.

Input: A building model $B = \{b_i = (b_{x,i}, b_{y,i}, b_{z,i})\}_{i=1}^N$, set of datapoints $P = \{p_i = (p_{x,i}, p_{y,i}, p_{z,i})\}_{i=1}^M$

Output: An estimated offset of measurements $T = (x_{off}, y_{off}, z_{off})$.

1: For each $i \in \{1 \dots M\}$, find the distance d_i of p_i to the closest point b_j : $d_i = \min_{j \in \{1 \dots N\}} \|p_i - b_j\|$

2: Initialize: $d_m = \bar{d}, T_0 = (0, 0, 0)$

3: Initialize: $v_0 = \infty, v_1 = \text{Var}[d], k = 1$

4: Set parameters: α, ε

5: **while** $(v_{k-1} - v_k) > \varepsilon$ **do**

6: Find $B_S \subset B$ s. t. $B_S \leftarrow b_i = \arg \min_{b_j \in B} \|p_i - b_j\|$ for each $i \in \{1 \dots M\}$

each $i \in \{1 \dots M\}$

7: Compute line vector $r = \|B_S - (P + T_{k-1})\|^\top - d_m$

8: Compute $M \times 3$ matrix $\nabla d = 2(P + T_{k-1} - B_S)$

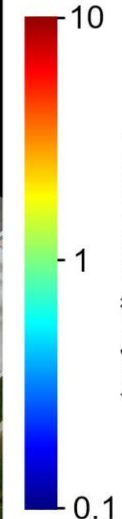
9: $T_k = T_{k-1} - \alpha \cdot r \cdot \nabla d$

10: $k = k + 1$

11: $v_k = \text{Var} [\|B_S - (P + T_k)\|]$

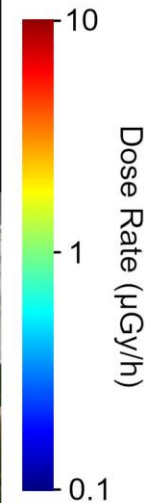
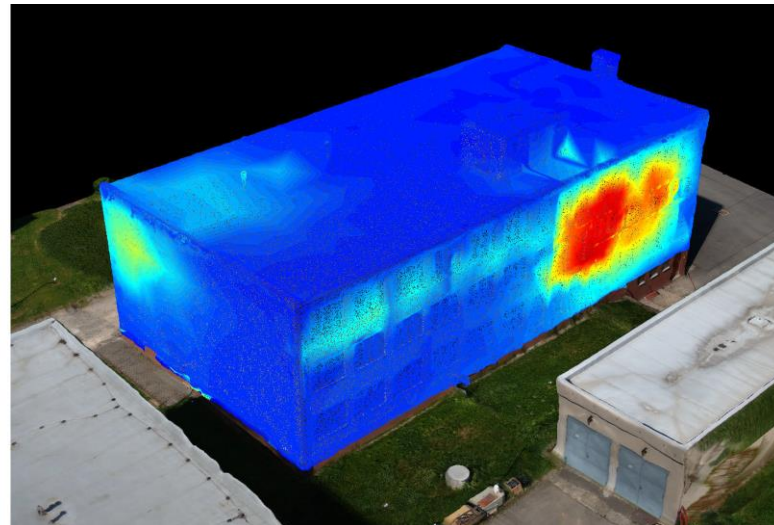
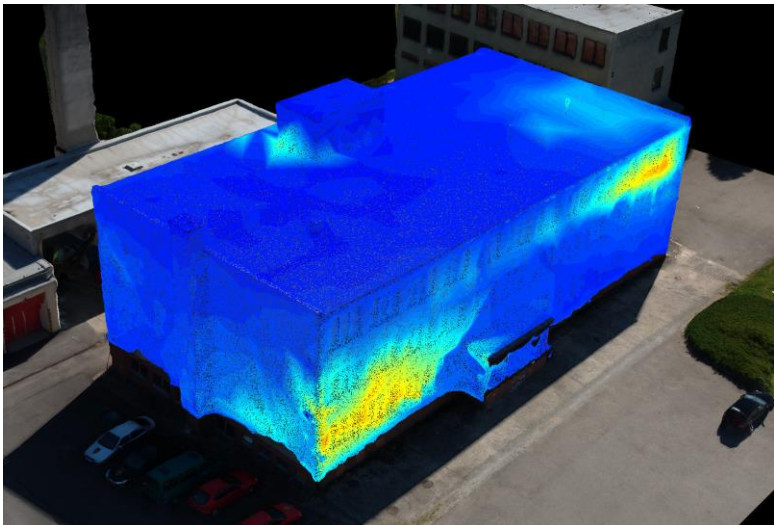
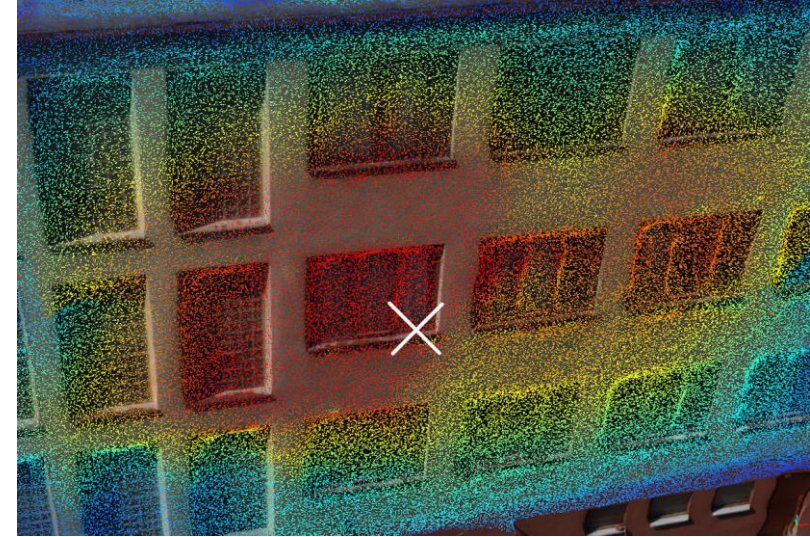
12: **while**

13: T_{k-1}



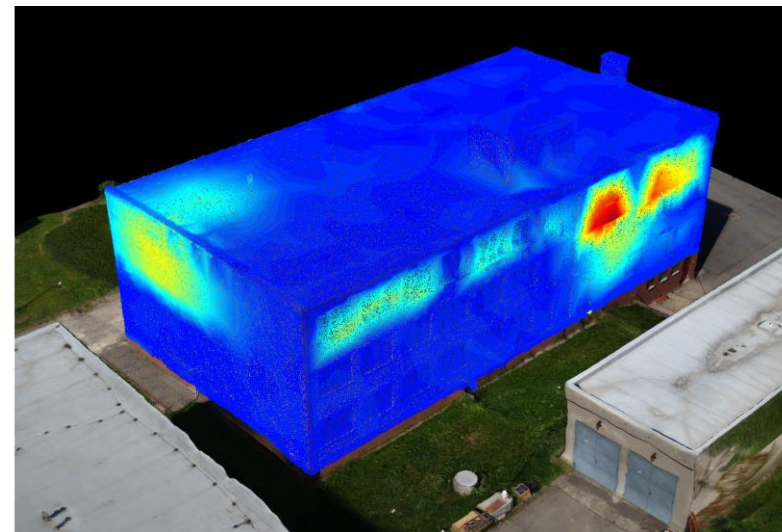
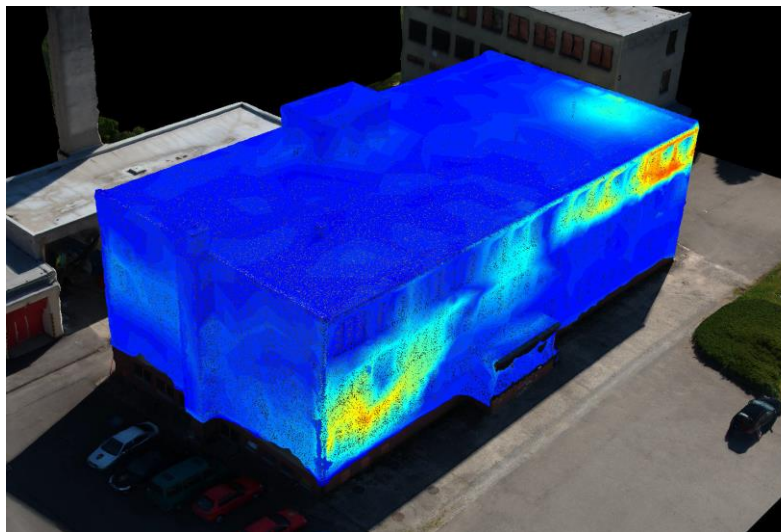
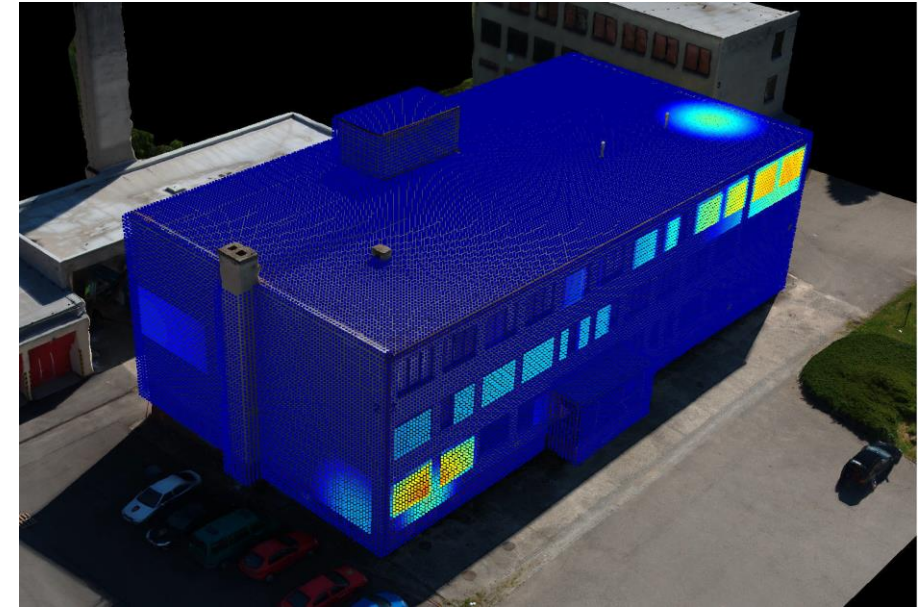
Fáze II – Radiační mapování – zpracování dat

- Bonus – lokalizace zdrojů
 - Úprava lokalizačního algoritmu na 3D
 - Separace hotspotů (adaptivní prahování) → clusterování (k-means)
 - Centroidy clusterů = počáteční odhady → zpřesnění pomocí G-N
 - Zhodnocení výsledků



Fáze III – Simulace experimentu

- Ručně nakreslený materiálový model budovy
- Pro každý měřicí bod se vypočítá vzdálenost a průchod materiálu vůči jednotlivým zářičům
- Zahrnutí šumových vlastností detekce
- Předpokládané přesné georeferencování dat
- Navíc referenční mapa

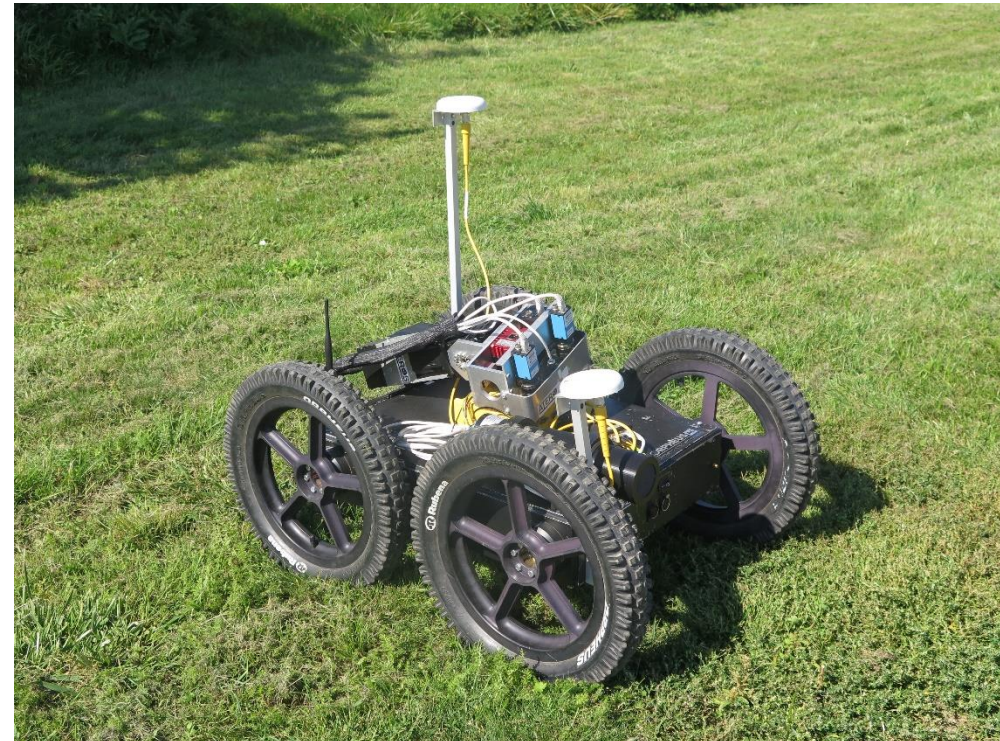


Scénář

- Ohraničená oblast, ve které se nachází jeden neznámý zdroj záření gama
- Předpokládáme, že zdroj je relevantní z hlediska radiační ochrany
- Uvnitř oblasti se mohou nacházet známé (ohraničené) překážky
- Máme k dispozici pozemní robot (UGV) s přesnou lokalizací a jedním detektorem
- Cíl: co nejrychleji lokalizovat zdroj radiace

Použité vybavení

- Kolový robot Orpheus-X4
 - RTK-GNSS přijímač
 - 2" NaI(Tl) + MCA
- Zdroj: Cs-137 o aktivitě 330 MBq



Lokalizace – particle filter

- Stav systému $\mathbf{x}_k = (\alpha_k, x_{S,k}, y_{S,k}, \beta_k)$ – intenzita a pozice zdroje, intenzita pozadí
- Předpokládáme stacionární systém $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k$
- Pozorování $\mathbf{z}_k = (c_k, x_{R,k}, y_{R,k})$
- Predikce – není relevantní
- Korekce – pravděpodobnost pozorování $p(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_k) \propto \varepsilon_{\mu, \delta \cdot c_k^2}(c_k)$

$$\mu = \beta_k + \frac{\alpha_k}{(x_{R,k} - x_{S,k})^2 + (y_{R,k} - y_{S,k})^2 + h^2}$$

- Převzorkování
 - Regularizace dle empirické kovarianční matice – brání degeneraci částic
- Lokalizace je ukončena ve chvíli, kdy rozptyl částic klesne pod určitý práh

Navigace – inspirace algoritmem umělého potenciálového pole (APF)

- Mapa je převedena na repulzivní mřížku dle vzdálenosti od překážek a okraje
- Atraktivní složka je dána distribucí částic
- Výběr nejvhodnější akce z několika kandidátů



Autonomous Radiation Source Localization Using a Particle Filter

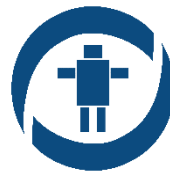
https://youtu.be/Ox4J_Jov2XE



Tomas Lazna

tomas.lazna@ceitec.vutbr.cz

Brno University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Control and Instrumentation



Robotics and AI Research Group