

Zmanjšanje napak radijske lokalizacije v zgradbah

Doktorska disertacija

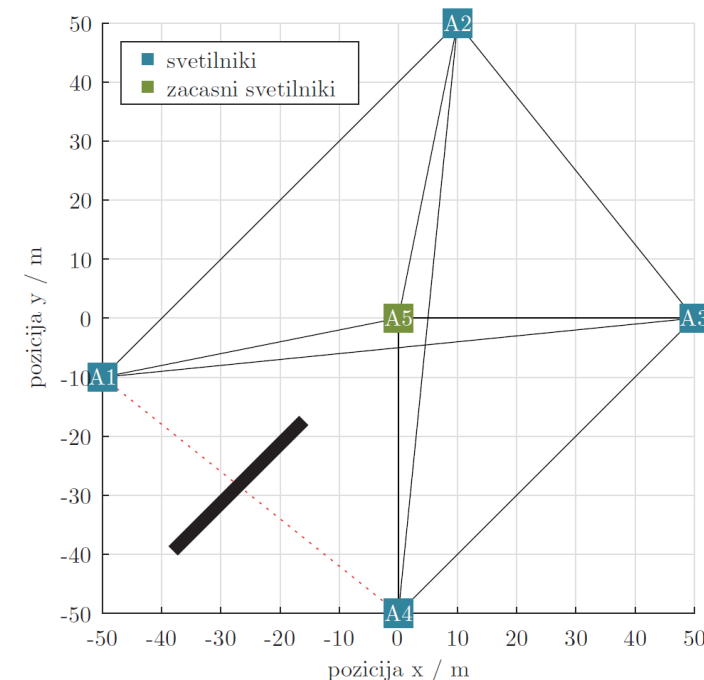
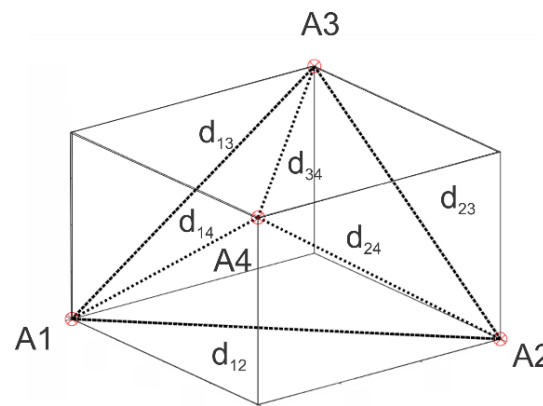
Peter Krapež
Mentor: prof. dr. Marko Munih

Potek

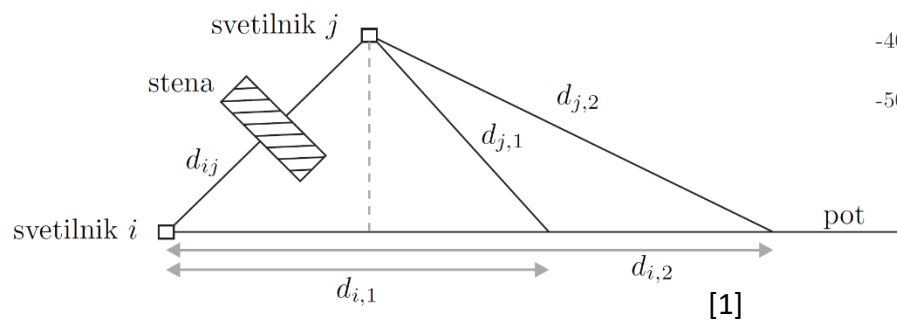
- Uvod
 - Avtomatska lokalizacija svetilnikov.
 - Model napake razdalje med svetilnikom in uporabnikom.
- Cilji
- Merilni sistem za lokalizacijo
- Avtomatska lokalizacija svetilnikov v 3D prostoru z dodatnimi referenčnimi enotami
- Model napake izmerjene razdalje v odvisnosti od orientacije uporabnika
- Izvirni prispevki znanosti

Avtomatska lokalizacija svetilnikov

- Določanje koordinat svetilnikov.
- Omejitve pri postavitvi svetilnikov:
 - možne pozicije,
 - delovno področje sistema,
 - LOS pogoji.



[2]



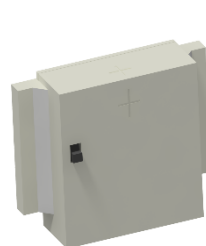
[1]

[1] S. Van de Velde, P. Van Torre in H. Steendam, "Fast and robust anchor calibration in range-based wireless localization," 2013 7th International Conference on Signal Processing and Communication Systems, str. 1–6, IEEE, Dec. 2013.

[2] M. Müller, J. Lategahn, L. Telle in C. Röhrig, "Automatic anchor calibration in IEEE 802.15.4a networks," 2011 8th Workshop Positioning Navigation and Communication, str. 67–71, IEEE, Apr. 2011.

Napaka meritve razdalje zaradi orientacije uporabnika

- Lastnostni ohišja in antene vplivajo na izmerjeno razdaljo v odvisnosti od orientacije in razdalje med UWB enotama [1,2].



3D tiskano ohišje



SEWIO UWB uporabnik



KIO UWB uporabnik



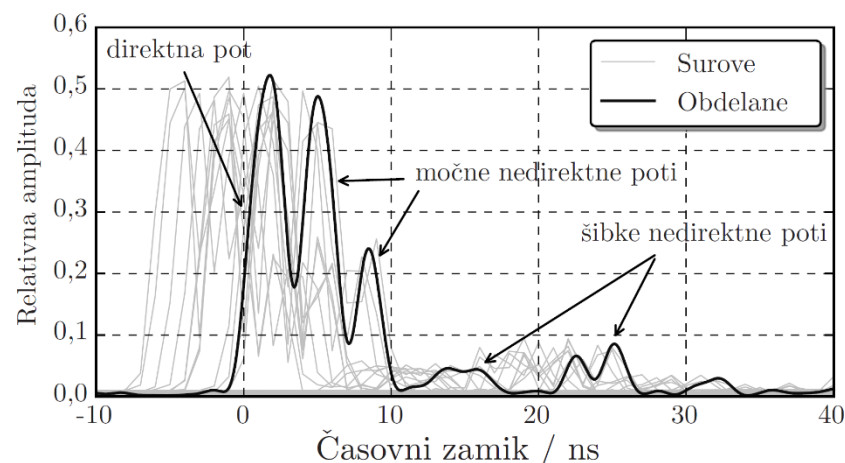
Zebra UWB uporabnik

[1] H. Wymeersch, S. Marano, W. M. Gifford in M. Z. Win, "A machine learning approach to ranging error mitigation for uwb localization," *IEEE transactions on communications*, vol. 60, št. 6, str. 1719–1728, 2012.

[2] M. Sharma, C. G. Parini in A. Alomainy, "Influence of antenna alignment and line-of-sight obstruction on the accuracy of range estimates between a pair of miniature UWB antennas," *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation*, str. 1–5, 2015.

Napaka meritve razdalje zaradi orientacije uporabnika

- Analitični:
 - čas preleta – razdalja med svetilnikom in uporabnikom.
- Metode strojnega učenja:
 - uporaba diagnostičnih podatkov [1].



$$\hat{d}_i = d_i + b_i + n_i = ct_i$$

$$b_i = \begin{cases} \text{če } a_i \leftrightarrow u \text{ je } LOS \\ \text{če } a_i \leftrightarrow u \text{ je } NLOS \end{cases}$$

Cenilke sistemov za lokalizacijo:

- točnost,
- dosegljivost,
- delovno področje,
- razširljivost,
- cena,
- varnost,
- frekvenca osveževanja.

Cilji

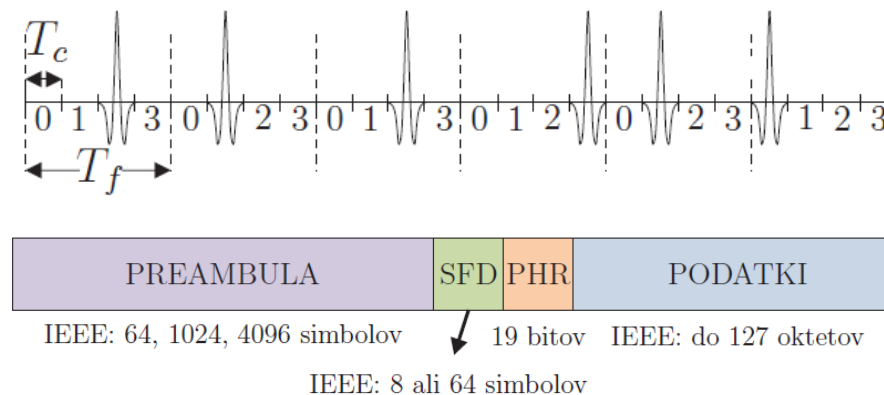
1. Avtomatska lokalizacija svetilnikov v 3D prostoru z referenčnimi enotami in evalvacija vpliva referenčnih enot na lokalizacijo svetilnikov.
2. Upoštevanje vplivov ohišja, fizične zasnove in antene UWB enote na meritev razdalje na podlagi meritev.
3. Validacija modela ohišja, fizične zasnove in antene UWB enote v lokalizacijskem sistemu.

Ultra široko pasoven impulzni radio

- Pasovna širina večja od 500 MHz.
- Ozek časovni impulz.
- 6 kanalov od 3,5 GHz do 6,5 GHz.

Nastavitve komunikacijskega kanala UWB pri meritvah.

Parameter	Vrednost
Kanal	4
PRF	64 MHz
PLEN	128 simbolov
PAC	8 simbolov
TX PC	18
RX PC	18
SFD	1
Hitrost	6,8 Mb/s

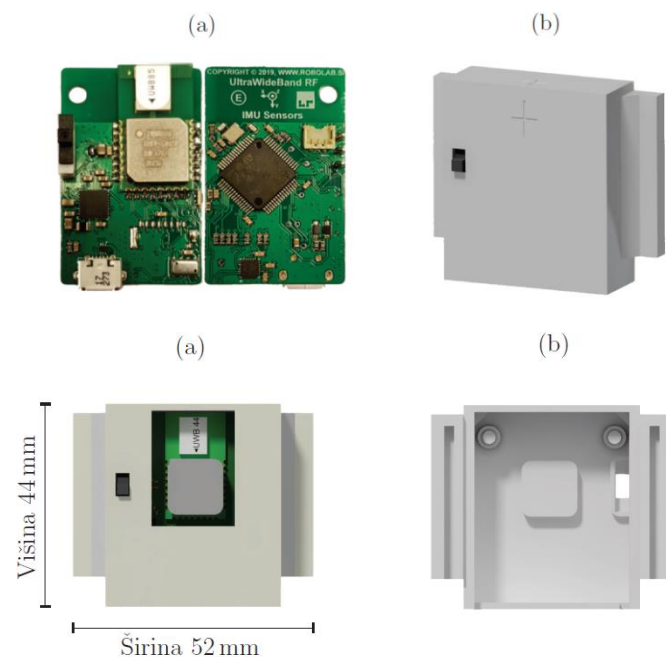


Središčne frekvence in pasovne širine UWB kanalov.

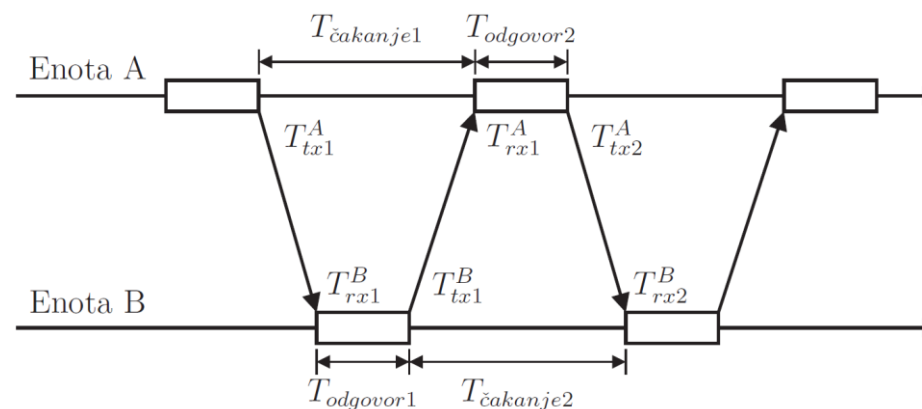
Kanal	Srednja frekvenca / GHz	Pasovna širina / MHz
1	3494,4	499,2
2	3993,6	499,2
3	4492,8	499,2
4	3993,6	900,0
5	6489,6	499,2
7	6489,6	900,0

UWB enote

- UWB radijski modul.
- ABS plastično 3D tiskano ohišje.



- Čas potovanja signala – TOF.

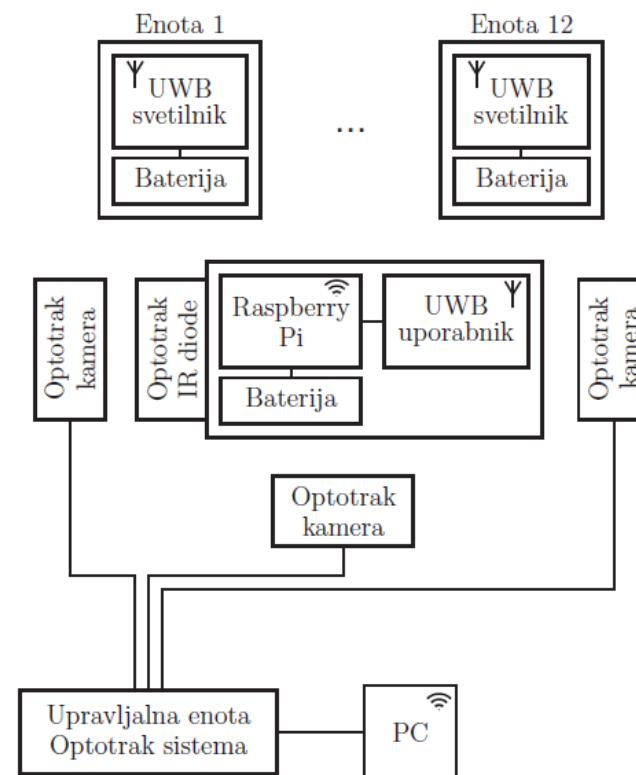


$$\hat{T}_{TOF} = \frac{T_{\check{c}akanje1} \times T_{\check{c}akanje2} - T_{odgovor1} \times T_{odgovor2}}{T_{\check{c}akanje1} + T_{\check{c}akanje2} + T_{odgovor1} + T_{odgovor2}} \quad [1]$$

$$d = \hat{T}_{TOF} \times c_0$$

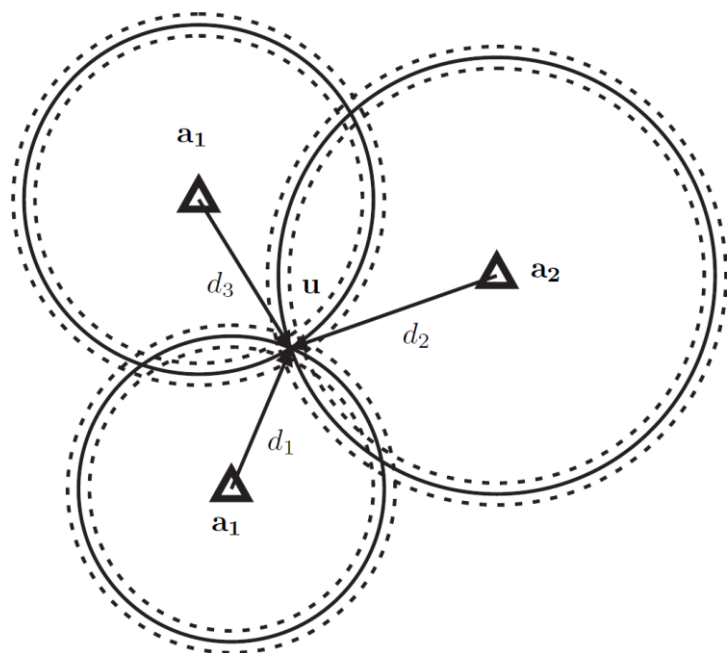
[1] D. Neiryneck, E. Luk in M. McLaughlin, "An alternative double-sided two-way ranging method," 2016 13th Workshop Positioning, Navigation and Communications, IEEE, str. 1-4, 2016.

Merilni sistem



Lokalizacija uporabnika

- Razdalja med svetilniki in uporabnikom.
- Trilateracija ali multilateracija.



$$\|\mathbf{u} - \mathbf{a}_1\|^2 = d_1^2$$

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{a}_2\|^2 = d_2^2$$

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{a}_3\|^2 = d_3^2,$$

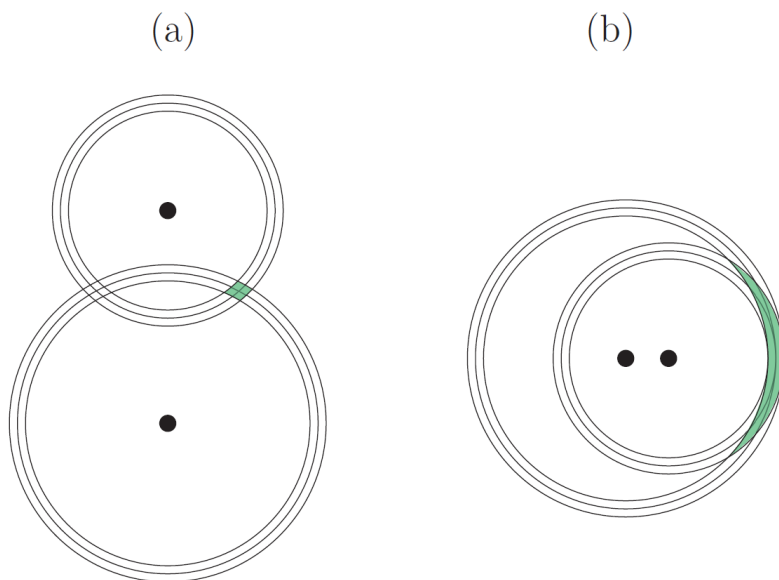
$$2\mathbf{A}\mathbf{u} = \mathbf{b}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_1 \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} d_1^2 - d_2^2 - \|\mathbf{a}_1\|^2 + \|\mathbf{a}_2\|^2 \\ d_1^2 - d_3^2 - \|\mathbf{a}_1\|^2 + \|\mathbf{a}_3\|^2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{a}_n - \mathbf{a}_1 \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} d_1^2 - d_2^2 - \|\mathbf{a}_1\|^2 + \|\mathbf{a}_2\|^2 \\ d_1^2 - d_3^2 - \|\mathbf{a}_1\|^2 + \|\mathbf{a}_3\|^2 \\ \vdots \\ d_1^2 - d_n^2 - \|\mathbf{a}_1\|^2 + \|\mathbf{a}_n\|^2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{u} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{b}$$

Geometrijski faktor GDOP



$$A = \begin{bmatrix} \frac{x_i - x}{R_i} & \frac{y_i - y}{R_i} & \frac{z_i - z}{R_i} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

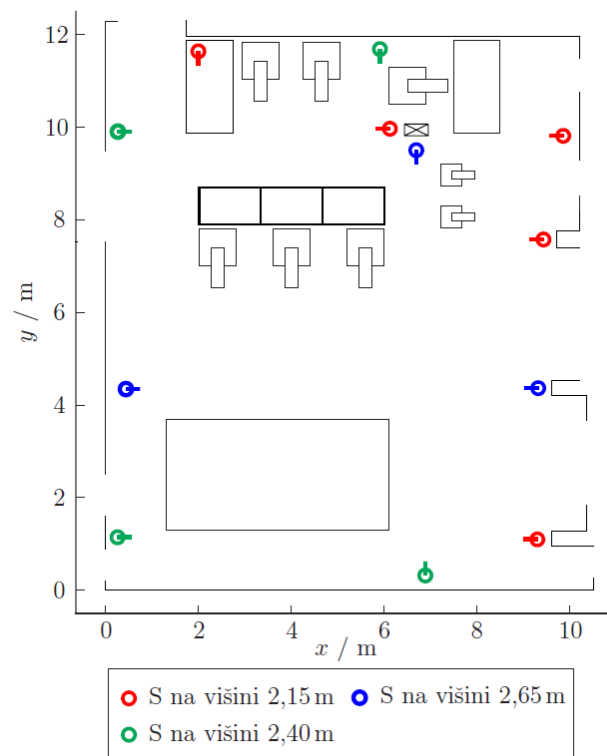
$$Q = (A^T A)^{-1}$$

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xt} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{yt} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 & \sigma_{zt} \\ \sigma_{xt} & \sigma_{yt} & \sigma_{zt} & \sigma_t^2 \end{bmatrix}$$

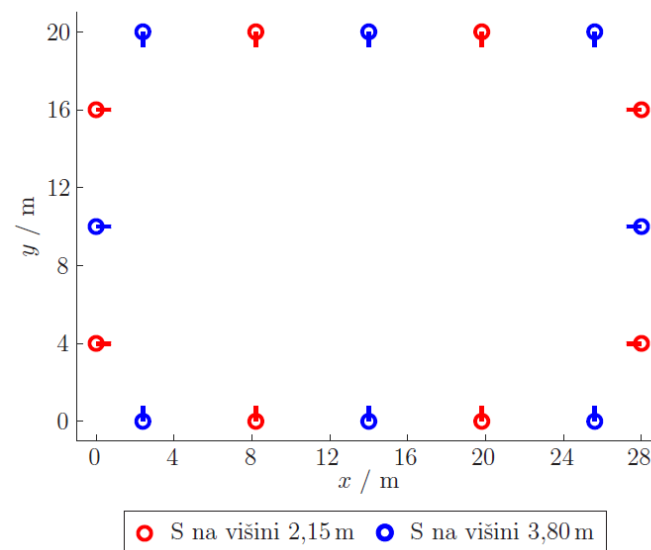
$$GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2}$$

Eksperimentalna postavititev

Laboratorij



Telovadnica

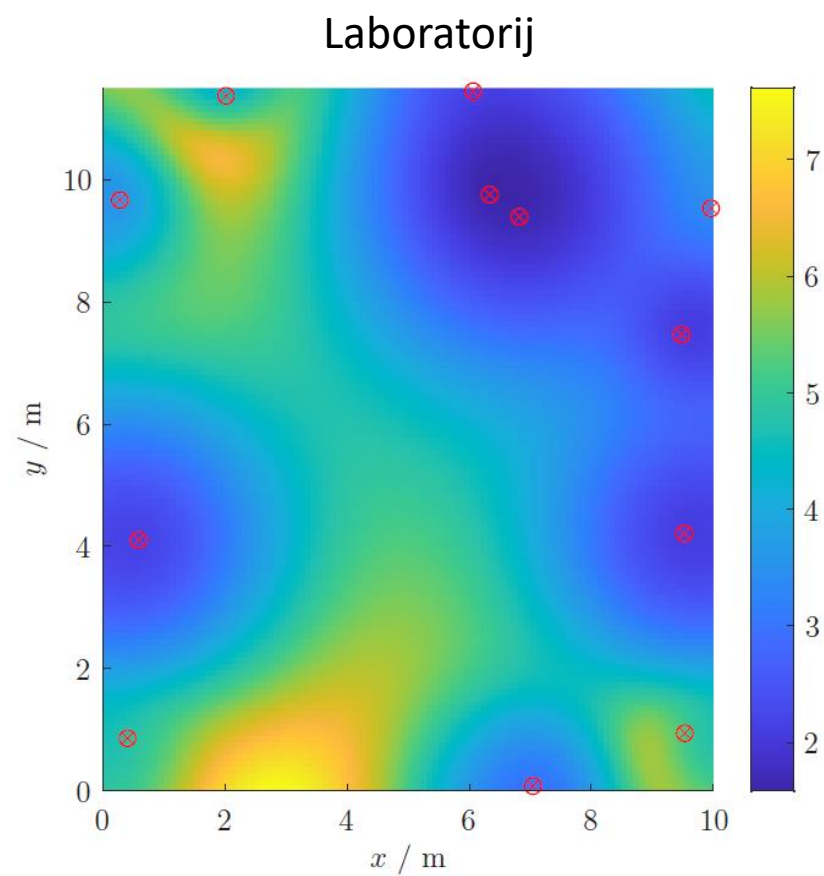
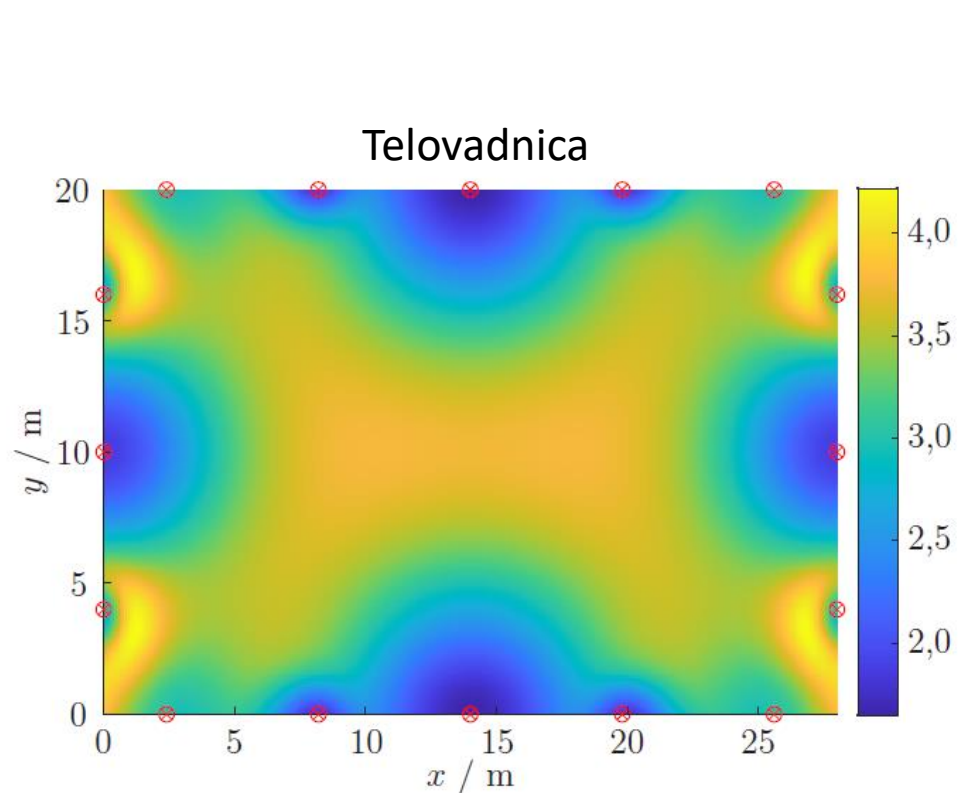


Postavititev svetilnikov

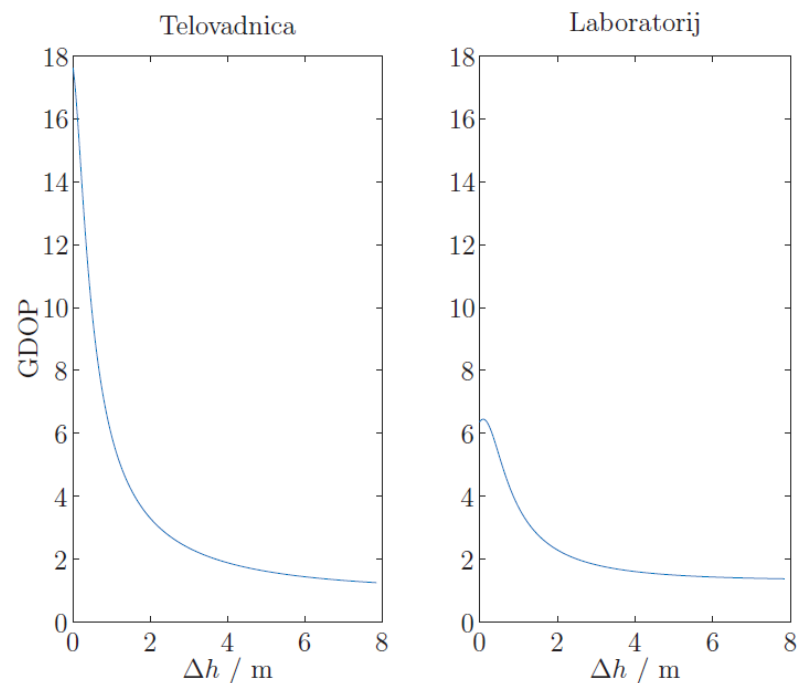
	Telovadnica	Laboratorij
Δx / m	28	10
Δy / m	20	12
Δz / m	1,45	0,50



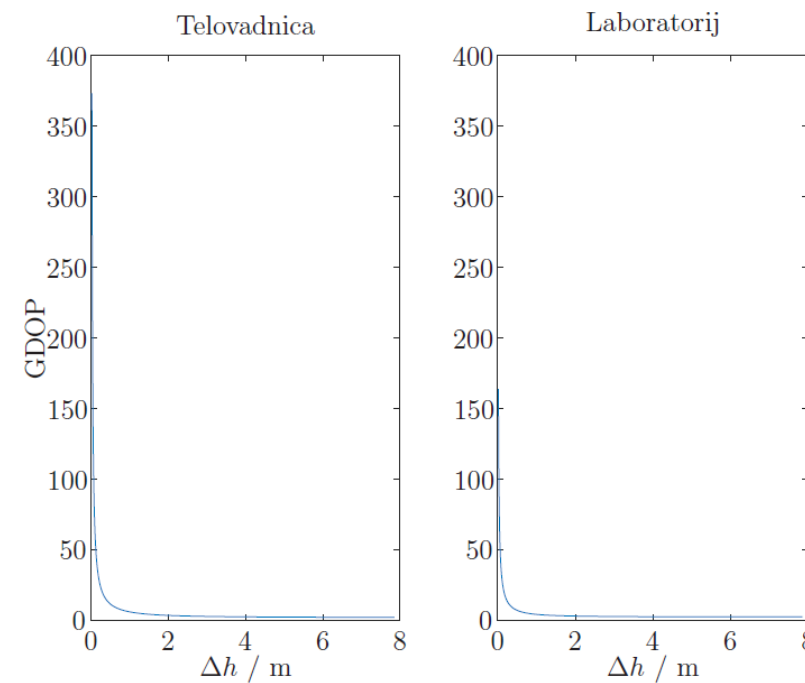
Eksperimentalna postavititev - GDOP



Eksperimentalna postavitve - GDOP



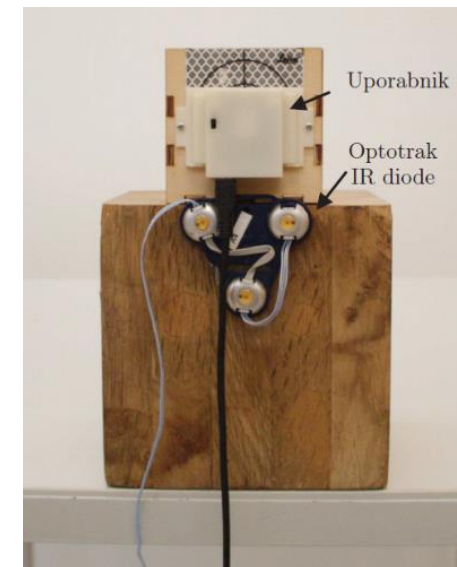
Slika 2.17: Faktor GDOP za uporabnika v središnji poziciji pri spremenljivi višini vsakega drugega svetilnika v telovadnici in laboratoriju.



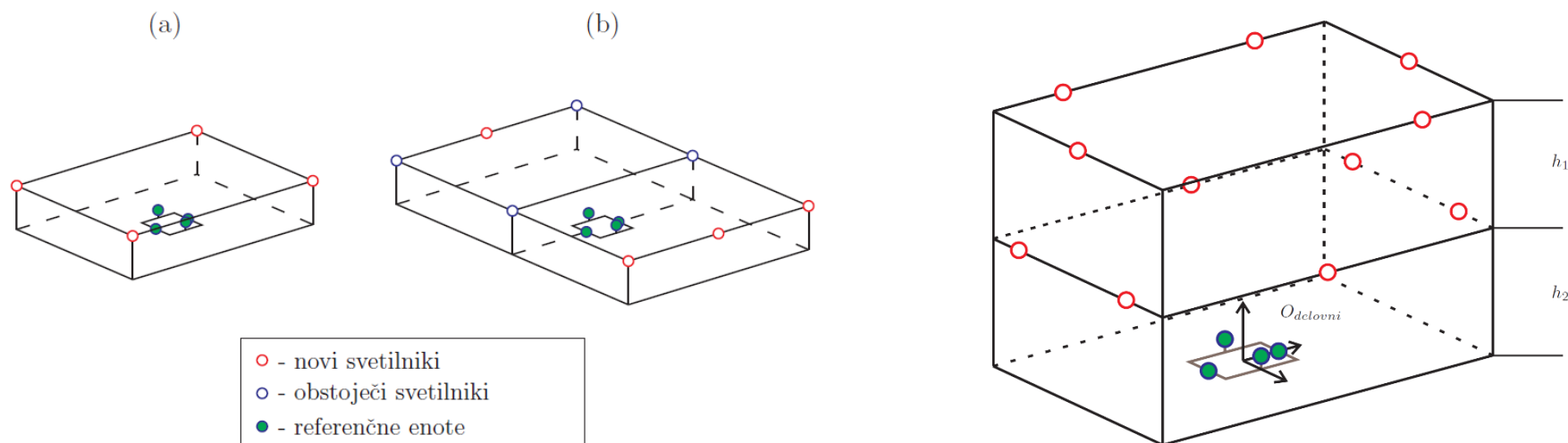
Slika 2.18: Povprečni faktor GDOP za vse svetilnike pri spremenljivi višini vsakega drugega svetilnika v telovadnici in laboratoriju.

Referenčne pozicije

- Referenčne pozicije svetilnikov.
- Referenčne lege uporabnika.

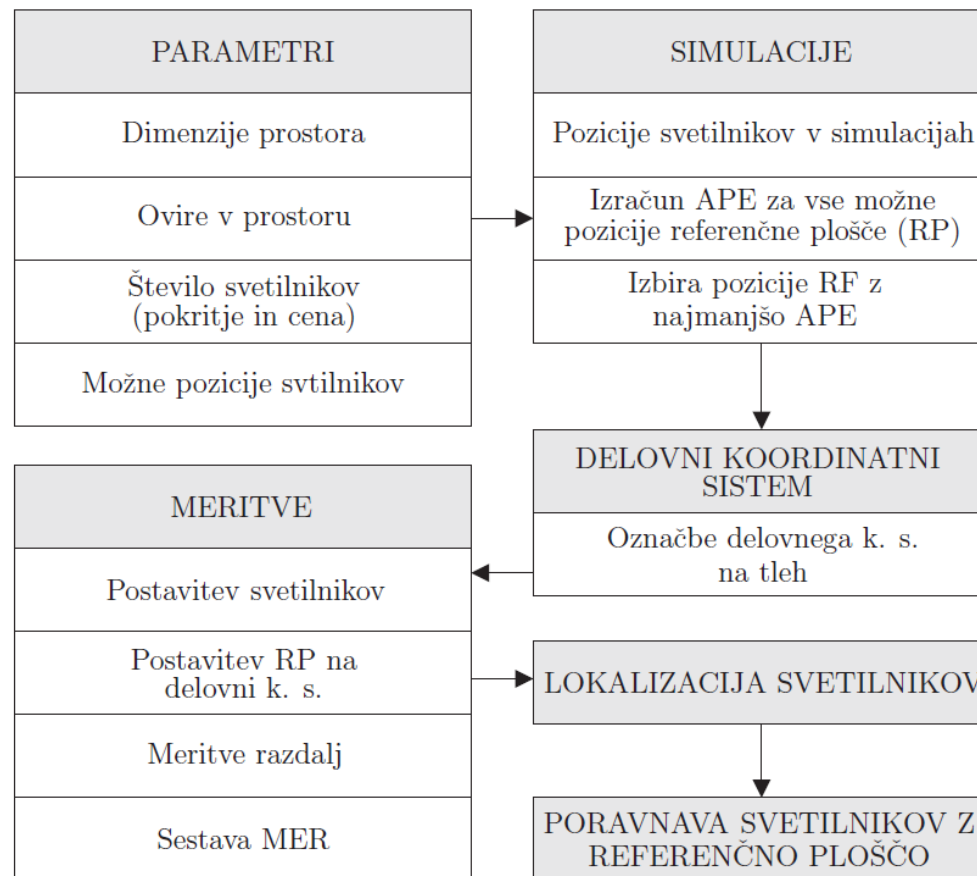


Avtomatska lokalizacija svetilnikov



		0K	1K	2K	3K	4K
GDOP	TELOVADNICA (16S)	3,7	3,2	2,9	2,7	2,6
	LABORATORIJ (12S)	8,1	3,2	2,8	2,4	2,3

Avtomatska lokalizacija svetilnikov



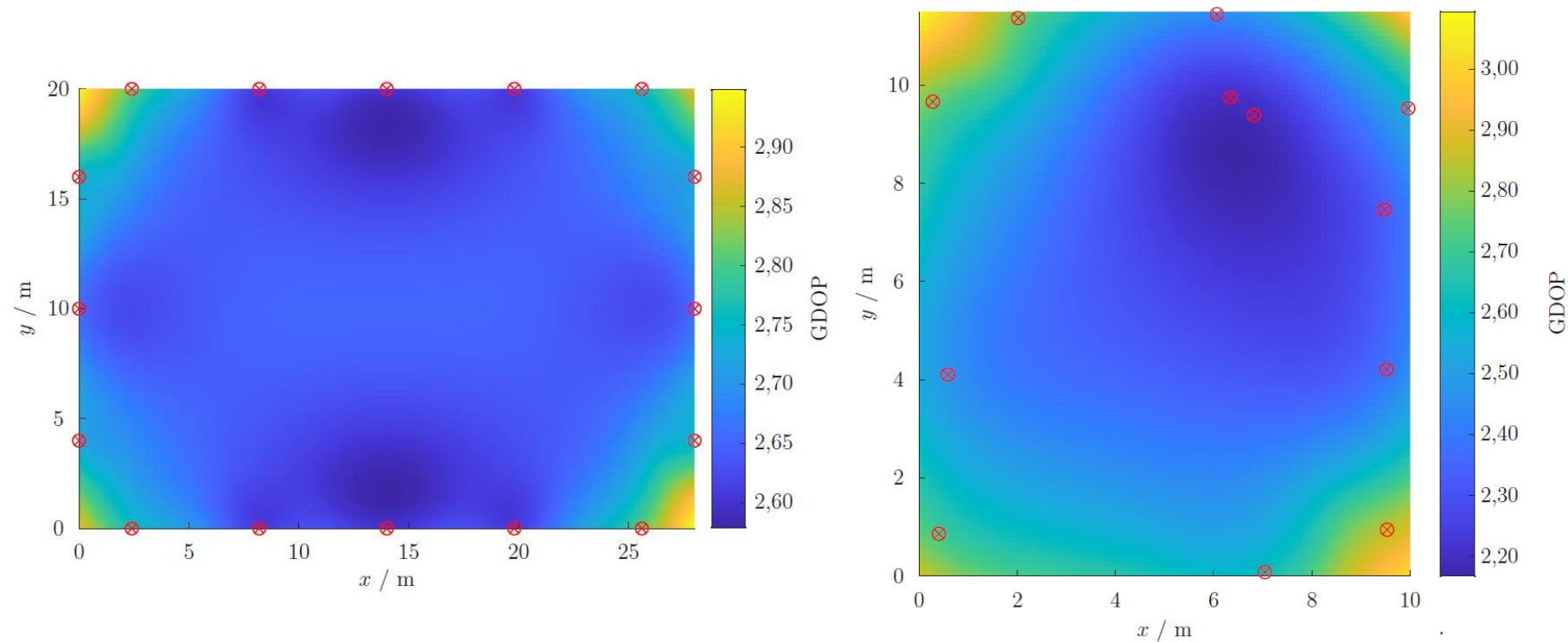
Lokalizacijske metode in cenilke

- Cenilke:
 - kvaliteta naleganja (*Stress*),
 - povprečna pozicijska napaka.
- Lokalizacijske metode:
 - MDS (multidimensional scaling) [1]:
 - matematična metoda za zmanjšanje dimenzije podatkov,
 - $n \times n$ matrika evklidskih razdalj ► $n \times 2(3)$ matrika koordinat.
 - SDP (semidefinitno programiranje) [2]:
 - konveksna optimizacija problema.
 - TRI (Iterativna trilateracija):
 - začetne točke za nadaljnjo trilateracijo,
 - trilateracija ostalih točk,
 - povprečje najboljših rešitev.

$$Stress = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (\hat{d}_i - d_i)^2}{d_i}}$$
$$APE = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(\hat{\mathbf{a}}_i - \mathbf{a}_i)(\hat{\mathbf{a}}_i - \mathbf{a}_i)^T}}{N}$$

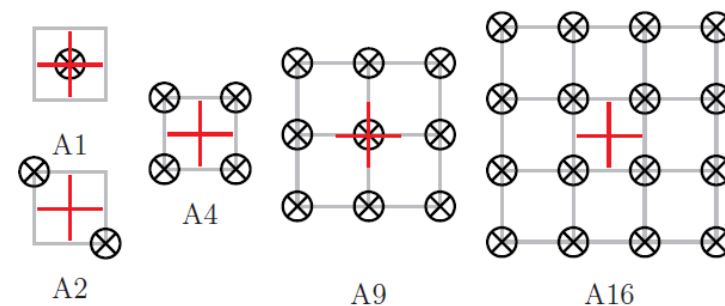
Geometrijski faktor

- GDOP pri različnih pozicijah referenčne plošče.



Simulacije

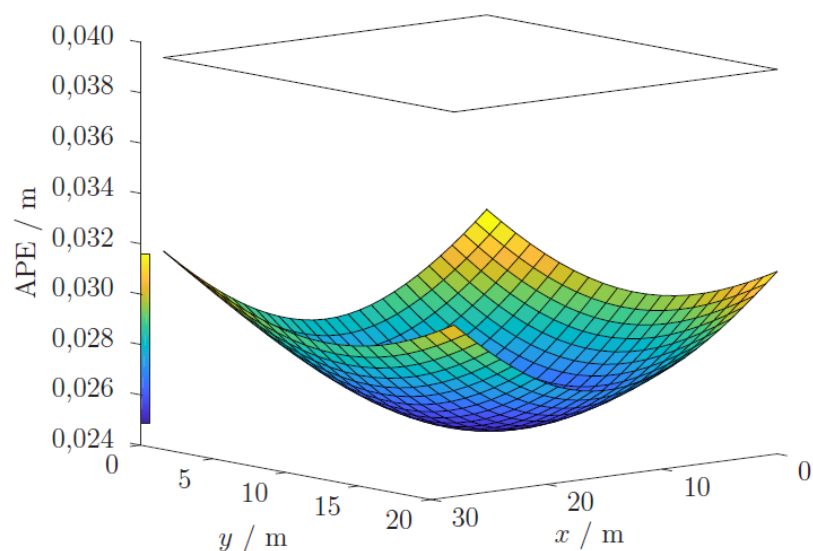
- Konfiguracija referenčne plošče.
- Simulacije:
 - pozicija referenčne plošče,
 - število dodatnih enot na referenčni plošči,
 - višinska razlika med dodatnimi enotami in svetilniki.



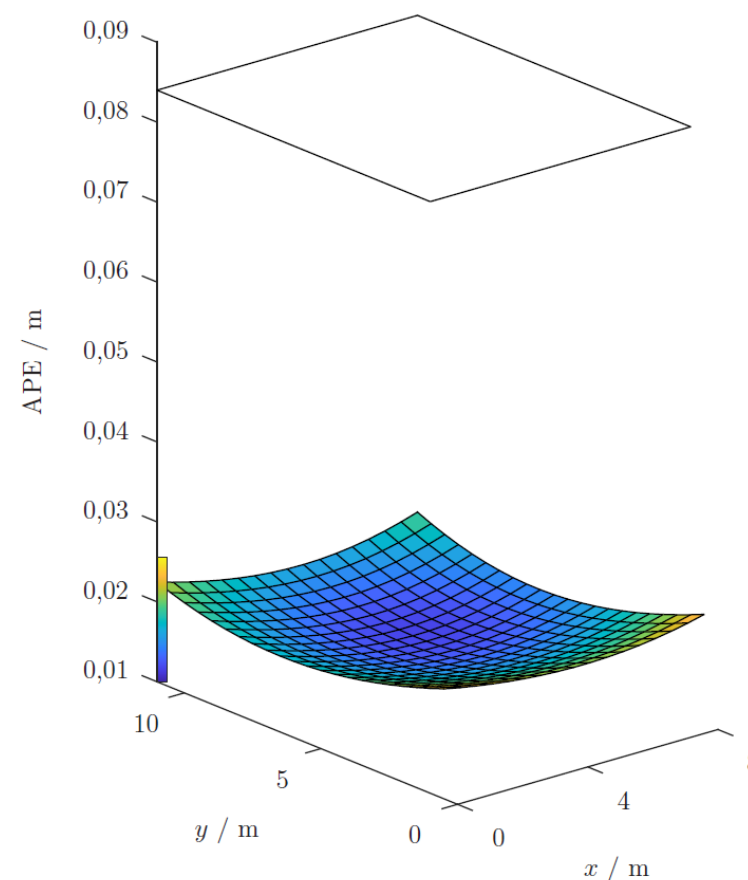
	TELOVADNICA LABORATORIJ		
x / m	0–28,0	0–8,0	korak 1,0 m
y / m	0–20,0	0–10,5	korak 1,0 m
z / m	0–2,0	0–2,0	korak 0,2 m

Simulacije premik referenčne plošče

- Rezultati v telovadnici.



- Rezultati v laboratoriju.



Simulacije

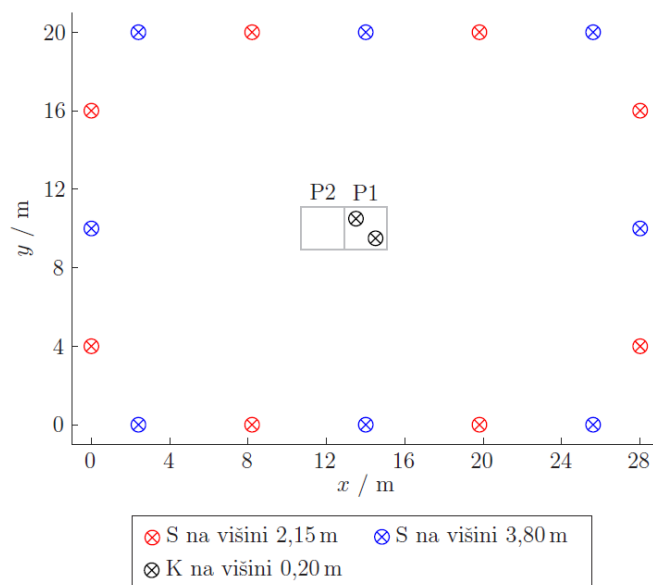
- Spreminjanje števila dodatnih enot na referenčni plošči.
- Spreminjanje višinske razlike med svetilniki in referenčno ploščo.

	TELOVADNICA			LABORATORIJ		
	MDS	SDP	TRI	MDS	SDP	TRI
A0 / m	0,039	0,237	0,047	0,084	0,171	0,095
A1 / m	0,028	0,018	0,035	0,020	0,017	0,050
A2 / m	0,025	0,017	0,036	0,017	0,015	0,048
A4 / m	0,020	0,016	0,031	0,014	0,011	0,037
A9 / m	0,017	0,013	0,030	0,012	0,010	0,035
A16 / m	0,015	0,011	0,031	0,011	0,009	0,033
$\Delta A2$ / m	0,014	0,220	0,011	0,068	0,156	0,047

	Δh / m	3,6	5,0	10,0	15,0	20,0	28,0
Telovadnica	MDS / m	0,025	0,020	0,012	0,010	0,009	0,009
	SDP / m	0,017	0,014	0,010	0,008	0,008	0,007
	TRI / m	0,036	0,029	0,018	0,015	0,014	0,014
	Δh / m	2,7	3,1	2,7	5,1	6,5	12,0
Laboratorij	MDS / m	0,015	0,014	0,012	0,011	0,010	0,009
	SDP / m	0,014	0,012	0,011	0,009	0,009	0,008
	TRI / m	0,048	0,029	0,016	0,013	0,012	0,015

Eksperimentalna validacija

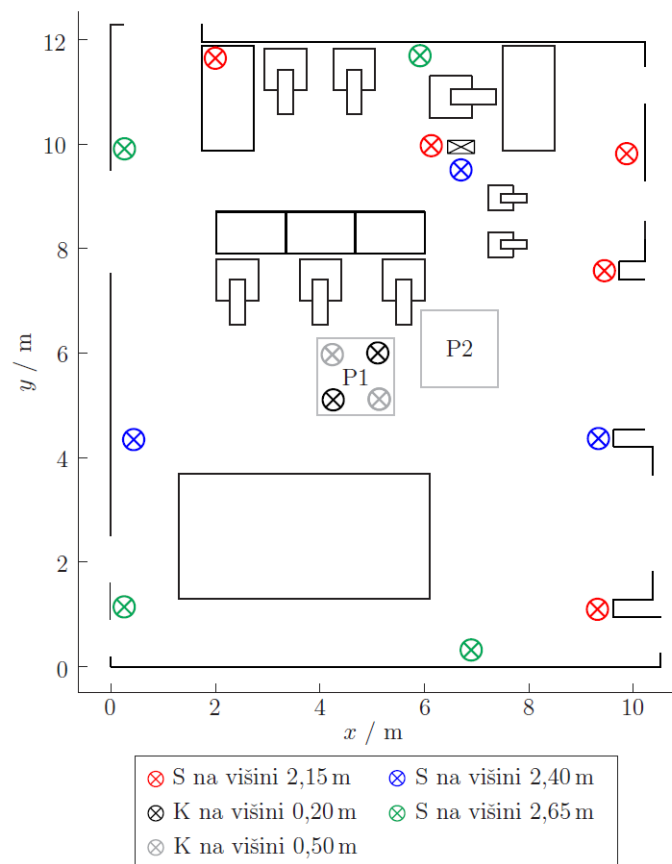
Telovadnica



Višinske razlike med dodatnimi enotami in svetilniki

	TELOVADNICA	LABORATORIJ
Δz / m	3,40	2,45

Laboratorij

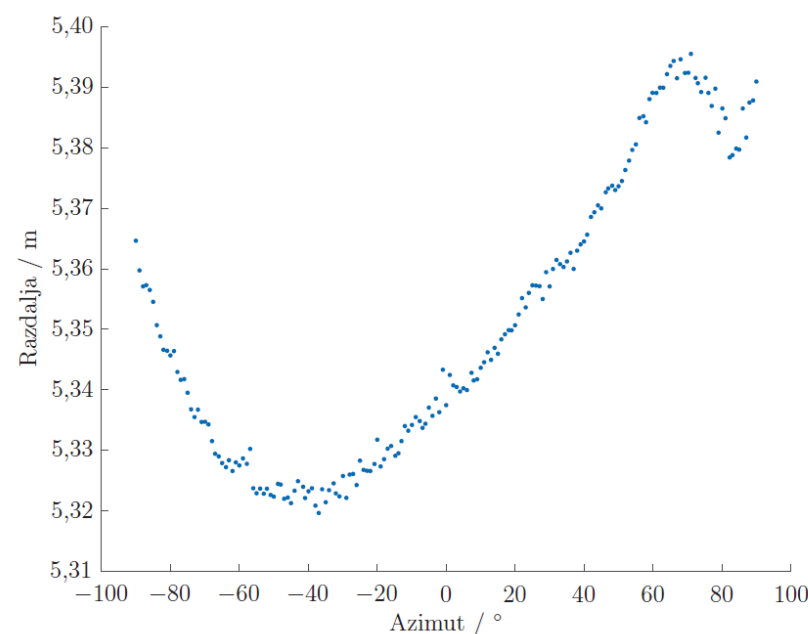


Referenčna plošča



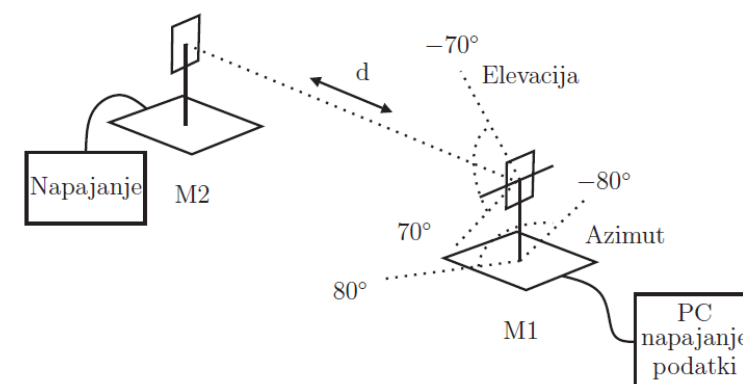
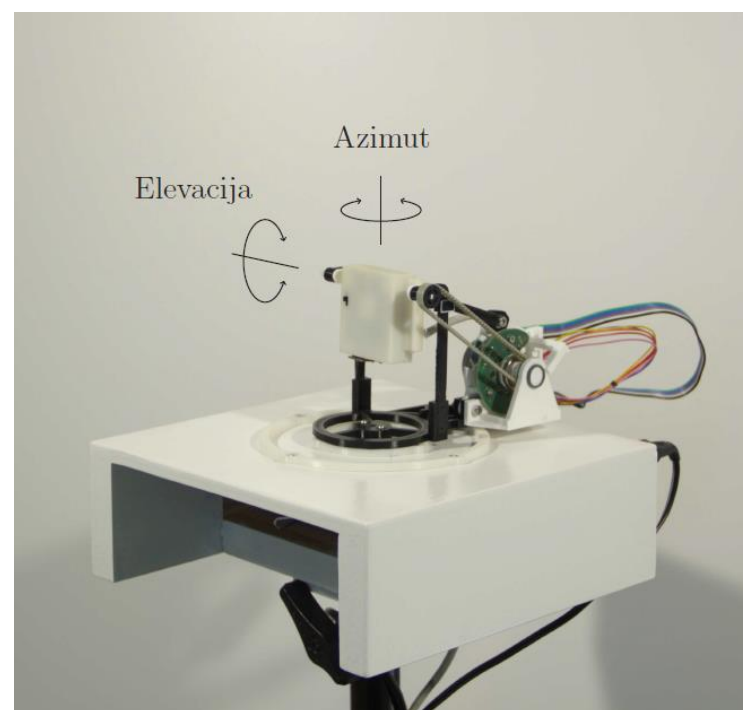
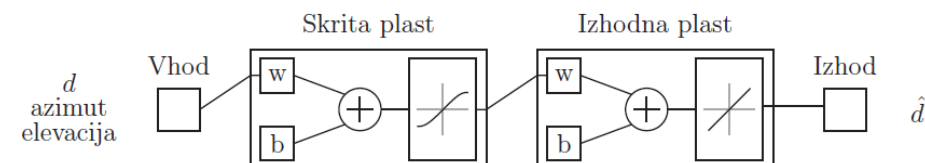
Napaka meritve razdalje zaradi orientacije uporabnika

- Meritev razdalje med svetilnikom in uporabnikom pri rotaciji uporabnika od -90° do 90° s korakom po 1° .



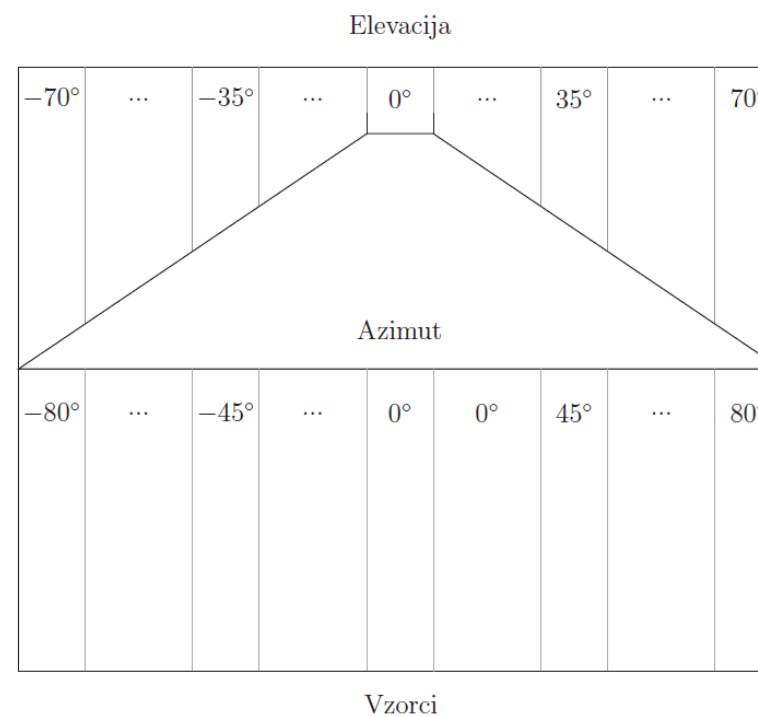
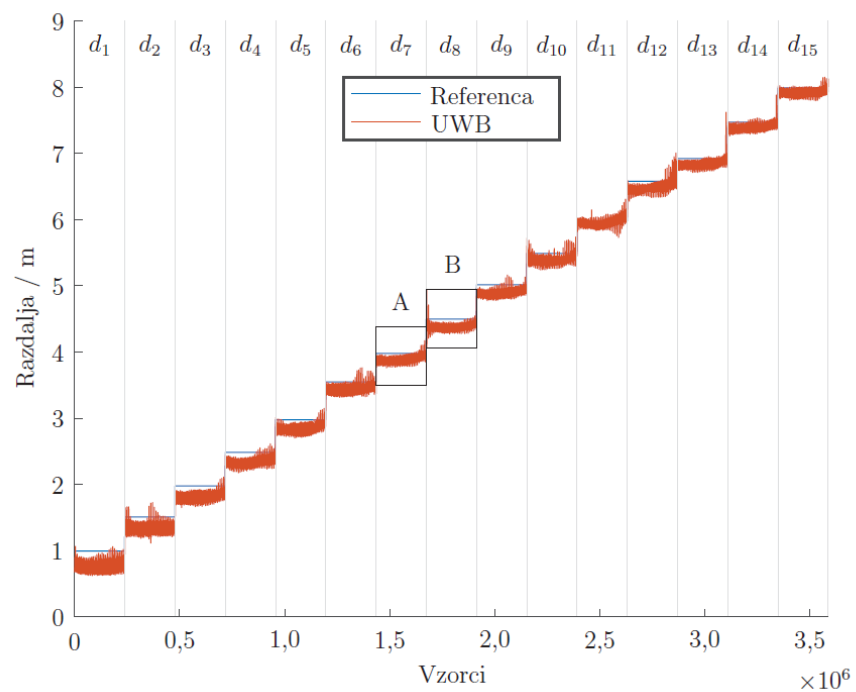
Nevronska mreža

- Perceptron: 6 nevronov v skriti plasti.
- Učna množica meritev.

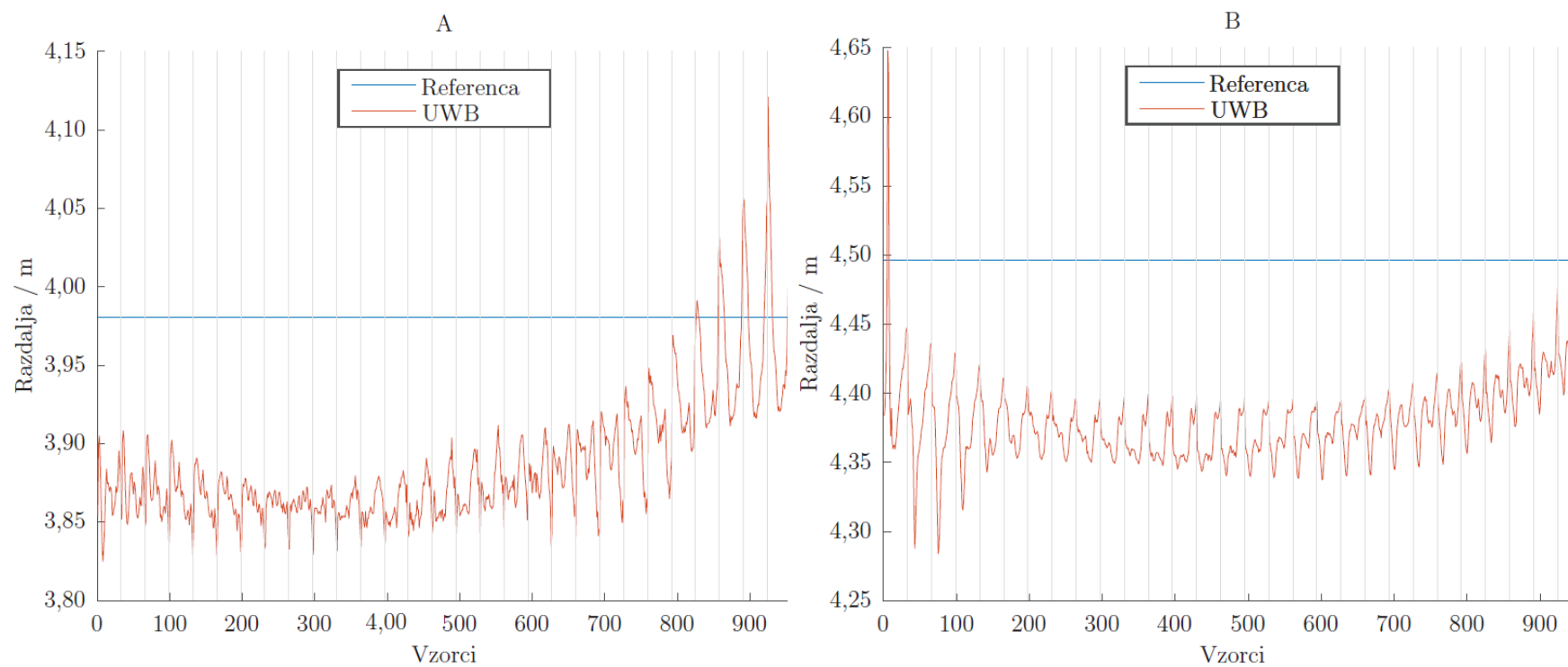


PARAMETER	MINIMUM	MAKSIMUM	KORAK
razdalje	1	8	0,5
azimut	-80	80	5
elevacija	-70	70	5
št. vzorcev	250		

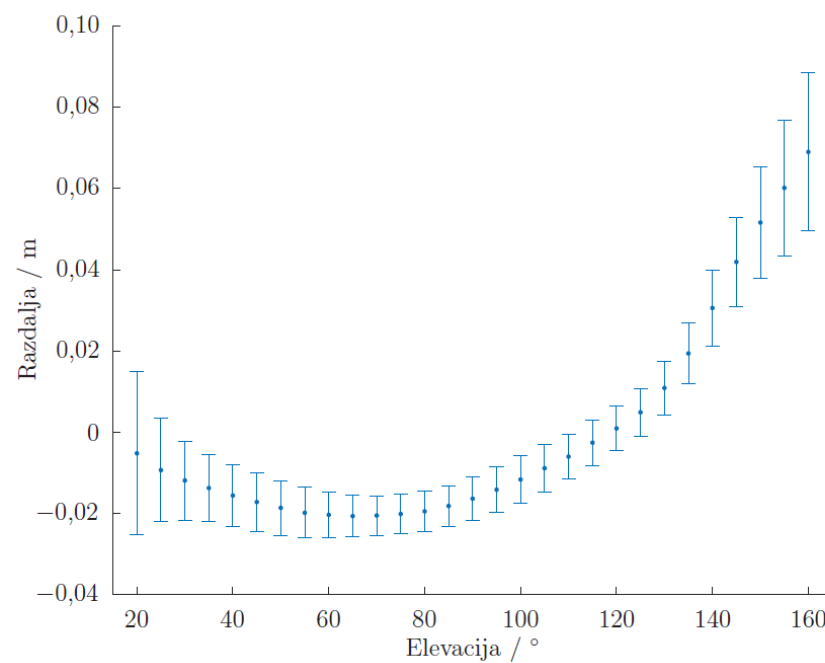
Učna množica meritev



Učna množica meritev



Učna množica meritev



Učenje nevronske mreže

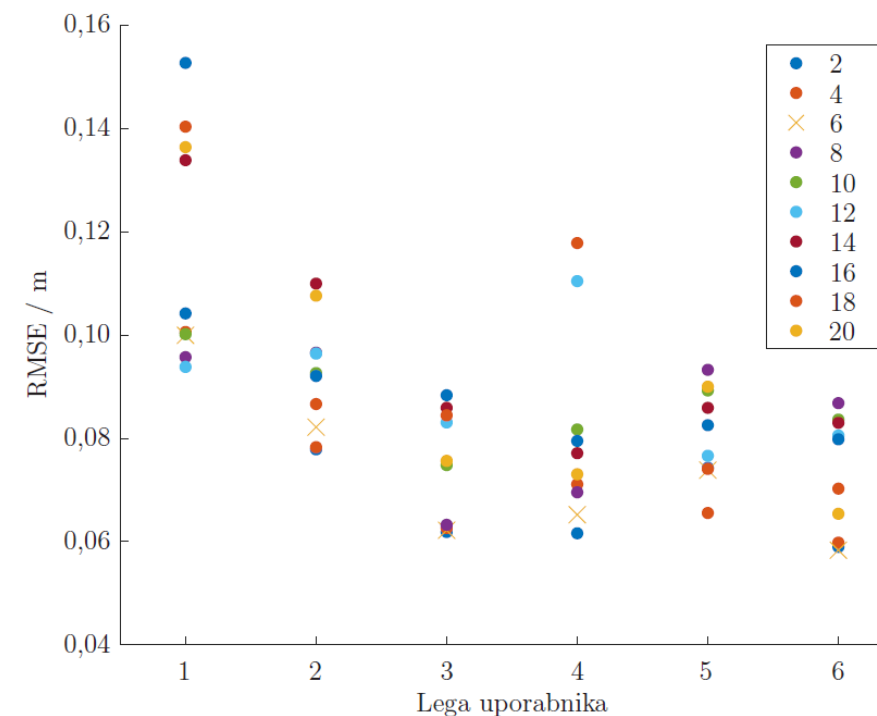
- Pod množice učnih meritev.
- Meritve s sistemom za lokalizacijo.

Napake nevronskih mrež z različnim številom nevronov

št. nevronov	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
RTLS / m	0,073	0,073	0,074	0,084	0,087	0,090	0,096	0,096	0,096	0,091
PODMNOŽICA / m	0,043	0,042	0,041	0,041	0,037	0,038	0,033	0,033	0,032	0,034

Čas učenja nevronskih mrež

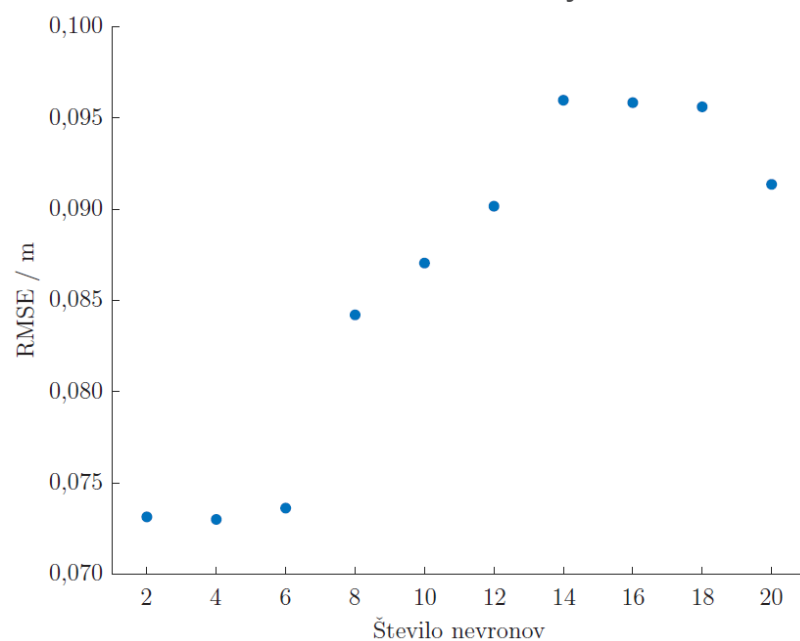
št. nevronov	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
čas učenja / s	280	487	795	1643	2173	2546	2489	3445	3774	3919



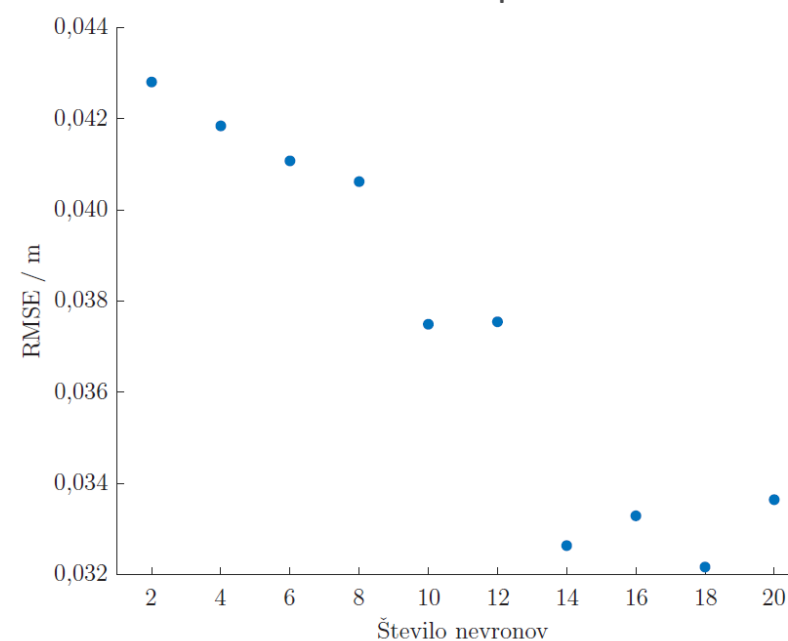
Učenje nevronske mreže

- Izbira števila nevronov v skriti plasti.

Meritve s sistemom za lokalizacijo v laboratoriju

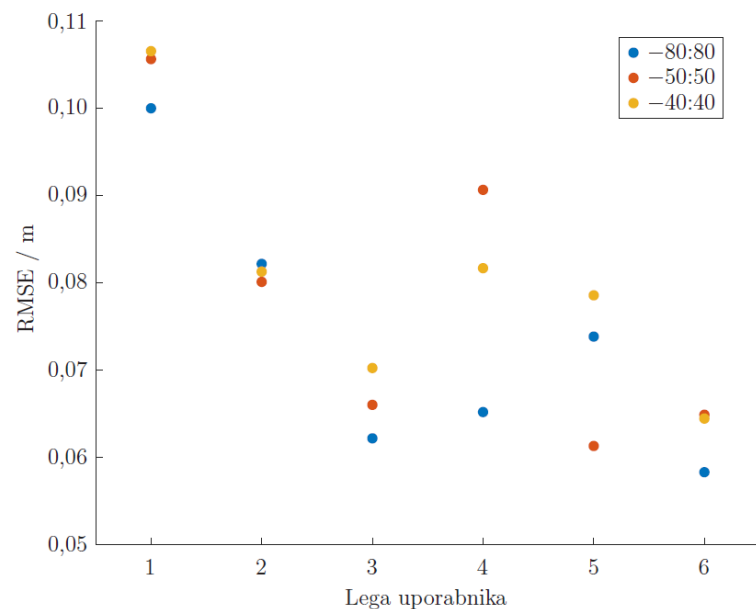


Podmnožica učnih podatkov



Dodatni testi učne množice

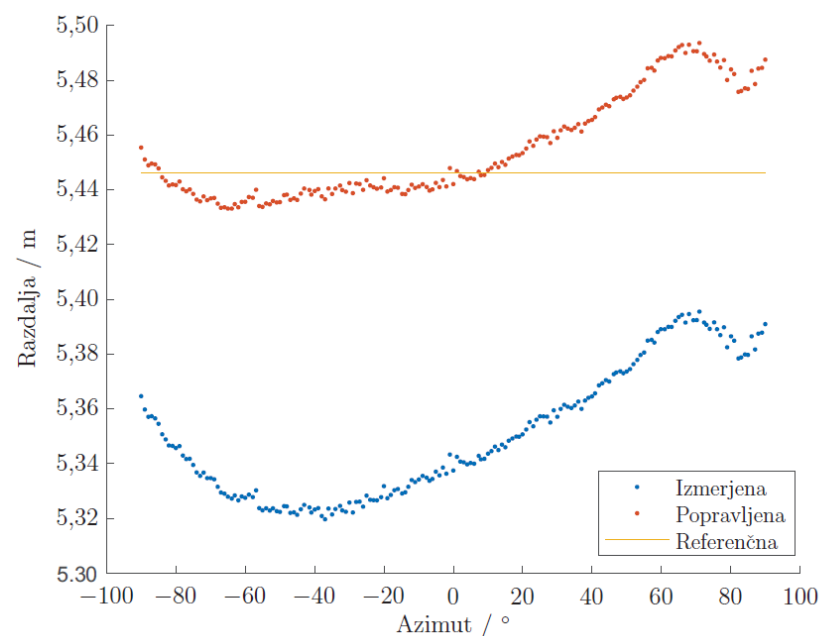
- Zmanjšan obseg kotov:
 - od -50° do 50° ,
 - od -40° do 40° .



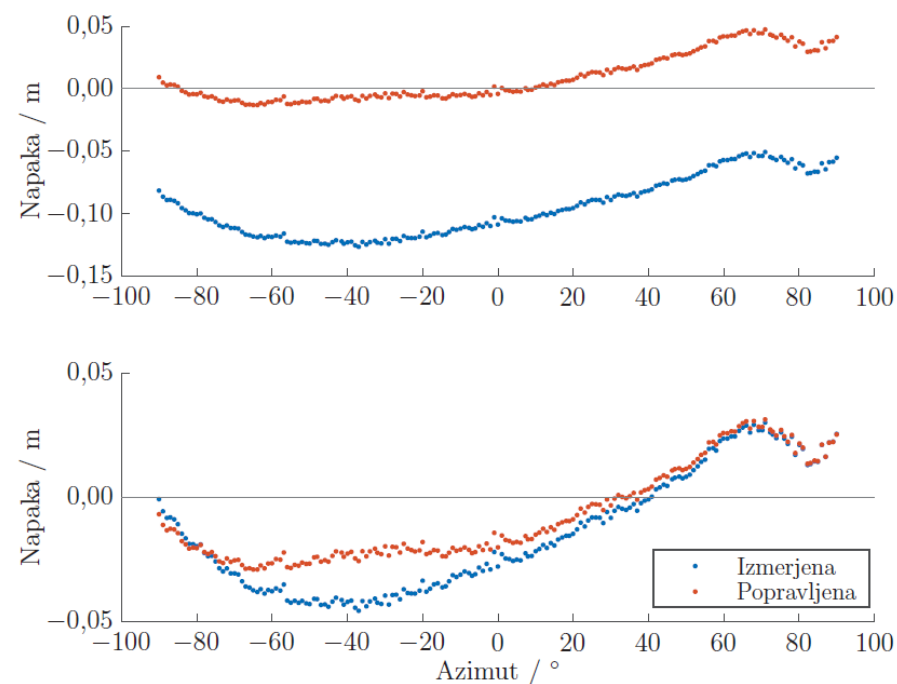
elevacija / °	–80:80	–50:50	–40:40
povprečna napaka / m	0,074	0,078	0,081

Eksperimentalna validacija

- Rotacija uporabnika za 180° .

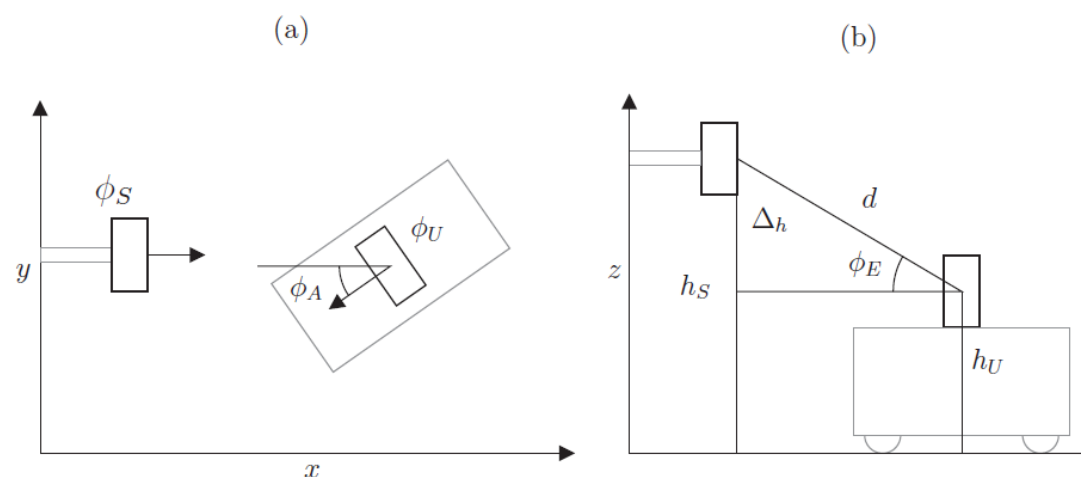


Napake



Eksperimentalna validacija

- Izračun azimuta in elevacije.



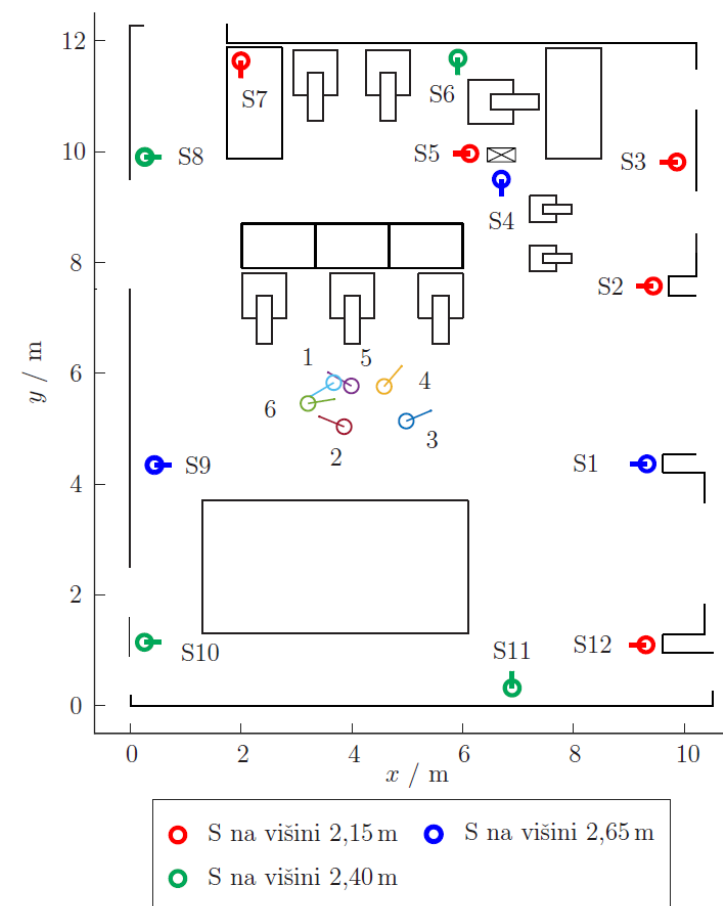
$$\phi_A = \phi_S - \phi_U$$

$$\Delta_h = h_S - h_U$$

$$\phi_E = \arcsin\left(\frac{\Delta_h}{d}\right)$$

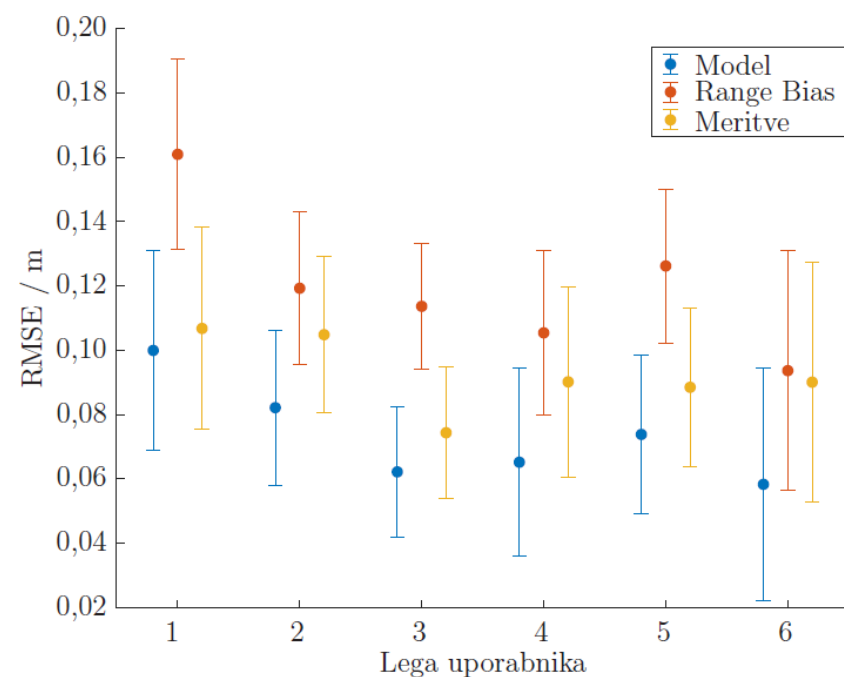
	min.	maks.
azimut / °	-157	171
elevacija / °	-90	-28
razdalje / m	3	8

- Eksperimentalna postavitve.



Rezultati

- Razdalje do 12 svetilnikov.



	NN model	Range Bias	Meritve
povprečna napaka / m	0,07	0,12	0,09
maksimalna napaka / m	0,10	0,16	0,11
minimalna napaka / m	0,06	0,09	0,07

- Lokalizacija v laboratoriju.

		NN model	Meritve
2D	Napaka / m	0,07	0,03
	STD / m	0,03	0,02
3D	Napaka / m	0,25	0,40
	STD / m	0,23	0,26

Povzetek

- Avtomatska lokalizacija svetilnikov

Uporaba dodatnih enot

	TELOVADNICA			LABORATORIJ		
	MDS	SDP	TRI	MDS	SDP	TRI
A0 / m	0,08	0,17	0,14	0,44	0,45	0,33
A2 / m	0,07	0,14	0,13	0,14	0,22	0,23
Δ / m	0,01	0,03	0,01	0,30	0,23	0,10

V delovnem koordinatnem sistemu v 3D prostoru

APE		MDS	SDP	TRI
P1	A4 / m	0,32	0,36	1,06
P2	A4 / m	0,44	0,40	1,40

- Napaka razdalje zaradi orientacije uporabnika

Uporaba modela na razdaljah

	NN model	Range Bias	Meritve
povprečna napaka / m	0,07	0,12	0,09
maksimalna napaka / m	0,10	0,16	0,11
minimalna napaka / m	0,06	0,09	0,07

Lokalizacija uporabnika

		NN model	Meritve
2D	Napaka / m	0,07	0,03
	STD / m	0,03	0,02
3D	Napaka / m	0,25	0,40
	STD / m	0,23	0,26

Izvirni prispevki znanosti

- Avtomatska lokalizacija svetilnikov z dodatnimi referenčnimi enotami v 3D prostoru za izboljšanje lokalizacije in evalvacija vpliva dodatnih referenčnih enot na lokalizacijo svetilnikov.
- Upoštevanje vplivov ohišja, fizične zasnove in antene UWB enote na izračun razdalje na podlagi meritev z uporabo nevronske mreže.
- Validacija v lokalizacijskem sistemu uporabljenega modela vplivov ohišja, fizične zasnove in antene UWB enote zgrajenega iz nevronske mreže.

Hvala za pozornost