



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## CENTRUM SPORTOVNÍCH AKTIVIT

CENTRE OF SPORTS ACTIVITIES

## VALIDITA LOKAČNÍHO SYSTÉMU

VALIDITY OF LOCAL POSITIONING SYSTEM

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Németh

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hanák

BRNO 2022

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Sportovní technologie**

Centrum sportovních aktivit

**Student:** Filip Németh

**ID:** 220488

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Validita lokačního systému

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte literární rešerši lokačních systémů a jakým způsobem je ověřována jejich validita.
2. Navrhněte způsob a postup opakovatelného měření validity konkrétního lokačního systému.
3. Proveďte pilotní měření, pro ověření Vašeho návrhu měření. Případně Váš návrh upravte.
4. Proveďte měření validity vycházející z Vašeho návrhu.
5. Posuďte naměřené výsledky a zhodnoťte validitu lokačního systému pro Vámi uskutečněné měření a potenciální další využití.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

RICO-GONZÁLEZ, Markel, José PINO-ORTEGA, Fabio Y NAKAMURA, Felipe ARRUDA MOURA, Daniel ROJAS-VALVERDE a Asier LOS ARCOS. Past, present, and future of the technological tracking methods to assess tactical variables in team sports: A systematic review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology [online]. 2020, 234(4), 281-290. ISSN 1754-3371. Dostupné z: doi:10.1177/1754337120932023

**Termín zadání:** 28.1.2022

**Termín odevzdání:** 3.6.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Hanák

předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Táto bakalárska práca sa zameriava na overenie validity LPS, ktorý funguje na princípe rádiových vln, konkrétne UWB technológia. Testovací protokol overuje presnosť fungovania systému v rozdielnych zónach na ihrisku v 2 rozličných výškach. Najväčšiu presnosť vykazuje v strede ihriska a smerom ku krajom ihriska s prítomnosťou steny sa odchýlka zväčšuje. Vo väčšej výške je stred ihriska porovnateľný s krajom ihriska bez výskytu steny. Výška kotiev má vplyv na celkové meranie a pri tagu, ktorý odpovedá približne ich rovine, vykazoval menšiu presnosť ako tag umiestnený vo veste športovca.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

UWB systém, LPS, tag, kotva, kraj ihriska, stred ihriska, stena

## **ABSTRACT**

The aim of this presented thesis is to verify the validation of LPS, which runs on the principle of wave radiations, UWB technology in particular. The testing protocol verifies the precision of system functions in various places and two different altitudes of the pitch. The ultimate precision of monitoring was recorded in the middle of the pitch, vanishing to the sides. In a higher altitude, with no surrounding walls, the recordings from the middle of the pitch were nearly similar to the sides of it. The anchor altitudes of the mechanism affect the overall monitored results. In comparison, the accuracy of tag placed approximately in a plane of anchors was lower than tag placed in a vest of an athlete.

## **KEYWORDS**

UWB system, LPS, tag, anchor, middle of the pitch, side of the pitch, wall

NÉMETH, Filip. *Validita lokačního systému*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Centrum sportovních aktivit, 2022, 62 s. Bakalářská práce. Vedúci práce: Ing. Peter Hanák

## Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko autora:** Filip Németh  
**VUT ID autora:** 220488  
**Typ práce:** Bakalárska práca  
**Akademický rok:** 2021/22  
**Téma záverečnej práce:** Validita lokačného systému

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....  
podpis autora\*

---

\*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

## POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Petrovi Hanákovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a cenné návrhy vypracovaniu k práci.

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Lokalizácia</b>	<b>12</b>
1.1 EPTS	12
1.1.1 VID	13
<b>2 Vonkajšia lokalizácia</b>	<b>14</b>
2.1 GNSS	14
<b>3 Vnútrotná lokalizácia</b>	<b>17</b>
3.1 LPS	18
3.1.1 Architektúra LPS	18
3.1.2 Princíp fungovania LPS	18
3.1.3 Signalizačná schéma	19
3.2 UWB	21
3.2.1 IEEE 802.15.4	21
3.2.2 UWB signály	22
3.2.3 UWB antény	23
3.2.4 Lokalizačné algoritmy	24
3.2.5 UWB technológia	28
<b>4 Qualysis</b>	<b>29</b>
<b>5 Charakteristika LPS</b>	<b>30</b>
5.1 UWB systém	30
5.1.1 UWB kotva	30
5.1.2 UWB tag	30
5.1.3 Popis LPS	31
5.2 Metodika merania	32
5.3 Predspracovanie dát	33
5.3.1 Výber vzorkov Sewia	33
5.3.2 Pootočenie súradníc	33
<b>6 Štatistická analýza experimentálnych dát</b>	<b>35</b>
6.1 Jednovýberový t-test	36
6.2 Priemerná absolútna odchýlka - PAO	36
6.3 ANOVA test	37
6.3.1 Rozdelenie ihriska na zóny	37

6.3.2	Scheffe post hoc test . . . . .	38
6.4	Párový t-test . . . . .	38
<b>7</b>	<b>Výsledky</b>	<b>40</b>
7.1	Analýza bodov . . . . .	40
7.1.1	Výška 1,5 metra . . . . .	40
7.1.2	Výška 3,5 metra . . . . .	41
7.1.3	Porovnanie dvoch výšok . . . . .	42
7.2	Analýza zón . . . . .	43
7.2.1	Výška 1,5 metra . . . . .	44
7.2.2	Výška 3,5 metra . . . . .	45
7.2.3	Porovnanie stredu ihriska v 2 výškach . . . . .	46
7.2.4	Porovnanie kraju ihriska so stenou v 2 výškach . . . . .	47
7.2.5	Porovnanie kraju ihriska bez steny v 2 výškach . . . . .	48
<b>8</b>	<b>Diskusia</b>	<b>49</b>
	<b>Záver</b>	<b>51</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>52</b>
	<b>Zoznam symbolov a skratiek</b>	<b>56</b>
	<b>Zoznam príloh</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Výsledky jednovýberového t-testu</b>	<b>58</b>
A.1	Tabuľka p-hodnôt vo výške 1,5 metra . . . . .	58
A.2	Tabuľka p-hodnôt vo výške 3,5 metra . . . . .	59
<b>B</b>	<b>Hodnoty PAO</b>	<b>61</b>
B.1	Tabuľka PAO vo výške 1,5 metra . . . . .	61
B.2	Tabuľka PAO vo výške 3,5 metra . . . . .	62

# Zoznam obrázkov

1.1	Heat map . . . . .	12
3.1	Šírenie bez priamej viditeľnosti . . . . .	17
3.2	Základná architektúra LPS od spoločnosti Sewio . . . . .	19
3.3	Tag umiestnený vo veste . . . . .	19
3.4	Šírka pásma UWB signálov . . . . .	22
3.5	Časová a frekvenčná oblasť UWB signálu . . . . .	23
3.6	Porovnanie šírky signálov . . . . .	23
3.7	Porovnanie lokalizačných algoritmov . . . . .	24
3.8	Čas príchodu . . . . .	25
3.9	Uhol príchodu . . . . .	26
3.10	Časový rozdiel príchodu . . . . .	27
4.1	Kamera Argus . . . . .	29
4.2	Markery . . . . .	29
5.1	Kotva od spoločnosti Sewio . . . . .	30
5.2	Tag od spoločnosti Sewio . . . . .	31
5.3	Ihrisko s kotvami . . . . .	31
5.4	Qualysis uložený v priestore . . . . .	32
5.5	Heat mapa z merania zo softvéru od Sewia . . . . .	33
6.1	Hodnoty súradníc Sewia a Qualysisu voči ihrisku vo výške 1,5 metra . . . . .	35
6.2	Hodnoty súradníc Sewia a Qualysisu voči ihrisku vo výške 3,5 metra . . . . .	35
6.3	Rozdelenie ihriska na zóny . . . . .	37
7.1	Heat mapa z PAO vo výške 1,5 metra . . . . .	40
7.2	Heat mapa z PAO vo výške 3,5 metra . . . . .	41
7.3	Namerané vzorky Sewia v 2 rôznych bodoch na kraji ihriska pri stene . . . . .	42
7.4	Namerané vzorky Sewia v 2 rôznych bodoch v strede ihriska . . . . .	43
7.5	Namerané vzorky Sewia v 2 rôznych bodoch na kraji ihriska bez steny . . . . .	43
7.6	Porovanie zón pomocou odchýliek vo výške 1,5 metra . . . . .	45
7.7	Porovanie zón pomocou odchýliek vo výške 3,5 metra . . . . .	46
7.8	Porovanie stredu ihriska pomocou odchýliek . . . . .	47
7.9	Porovanie kraju ihriska so stenou pomocou odchýliek . . . . .	47
7.10	Porovanie kraju ihriska bez steny pomocou odchýliek . . . . .	48

## Zoznam tabuliek

7.1	Hodnota priemerných PAO v daných oblastiach a výškach . . . . .	44
7.2	Výsledky ANOVA testu vo výške 1,5 metra . . . . .	44
7.3	Výsledky post hoc testu vo výške 1,5 metra . . . . .	44
7.4	Výsledky ANOVA testu vo výške 3,5 metra . . . . .	45
7.5	Výsledky post hoc testu vo výške 3,5 metra . . . . .	46

# Úvod

Technológie sa neustále vyvíjajú. Na jednej strane v poslednej dekáde v mnohých profesionálnych tímoch je možné pozorovať neuveriteľný vývoj technológií aplikovaných v športovom odvetví, čo výrazne ovplyvňuje ich dennú prácu v oblasti vedy. Na druhej strane vzťah medzi zatažením športovca a výkonom je evidentný, v dôsledku čoho sa stalo monitorovanie výkonnosti nepostrádateľným faktorom pri dosiahnutí maximálneho výkonu.

Schopnosť lokalizovať ľudí a subjekty sa stali nevyhnutnou súčasťou od začiatku 21. storočia. Mobilné reklamy, lokalizačné služby či športové technológie sú len malou hĺstkou aplikácie zo širokej škály využitia lokalizácie. Predovšetkým v oblasti športu nastáva veľký progres technológií.

Teoretická časť práce sa zaoberá všeobecným popisom princípom určovania polohy objektov, porovnanie EPTS systémov, rozdiel medzi vnútornou a vonkajšou lokalizáciou. Následne je popísaný samotný LPS, jeho základná architektúra a princíp fungovania lokalizačných algoritmov UWB signálu. Záverečná časť je venovaná technológií optického sledovania považovaných za referenčný systém od firmy Qualysis.

Praktická časť práce začína charakteristikou používaného LPS, popisom kotiev a tagov. Následne prebieha popis merania, ktoré sa zameriava na overenie validity LPS. Nastavený protokol statického charakteru overuje presnosť fungovania systému v rôznych častiach ihriska v 2 rozdielnych výškach.

# 1 Lokalizácia

Lokalizácia je proces určovania pozície ľudí, zariadení a rôznych objektov. Môže byť rozdelené do 2 základných kategórií, ktoré sa líšia v závislosti od prostredia kde sa určovanie pozície nachádza : **vonkajšia lokalizácia** a **vnútorná lokalizácia**. [1]

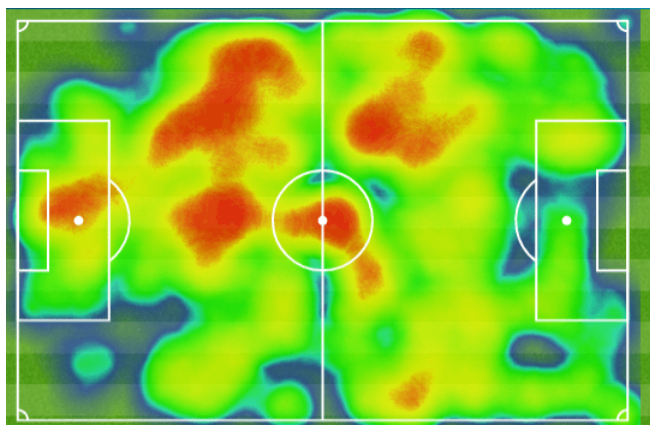
Vonkajšia lokalizácia sa vykonáva mimo budov prostredníctvom vonkajších pozičných systémov (OPS), jej princíp fungovania bude podrobne vysvetlený v kapitole 2. Na druhej strane sa vnútorná lokalizácia vykonáva v budovách (napr. domy, nemocnice, telocvične) prostredníctvom vnútorných pozičných systémov (IPS) a jej základné princípy budú vysvetlené v kapitole 3.

## 1.1 EPTS

Technológie na určovanie polohy a výkonu športovcov sú zoskupené pod názvom *Electronic Performance and Tracking systems* alebo aj EPTS, ktoré sa používajú na sledovanie pohybu hráčov s cieľom pochopiť fyzickú a kondičnú stránku športovca počas sezóny. V závislosti od technológie, ktorej sú systémy založené rozlišujeme 3 skupiny EPTS :

- polo-automatizované video systémy s viacerými kamerami (VID), kapitola 1.1.1
- globálny pozičný systém (GPS), kapitola 2.1
- lokálny pozičný systém (LPS), kapitola 3.1 [2]

Jednou zo základných vlastností EPTS systémov je určovanie polohy v reálnom čase, vďaka čomu je možné sledovať ďalšie ukazatele ako rýchlosť, akcelerácia či znázornenie údajov polohy vo forme mapy, v ktorom sú hodnoty údajov zobrazené vo farbách, tzv. heat map. Tieto mapy sú využívané ako indikátor užitočnosti hráča v rôznych častiach ihriska. [3]



Obr. 1.1: Heat map [4]

Ako je zobrazené na obrázku 1.1 používajú sa rôzne farby pre vykreslenie, kde červené farby zobrazujú najdlhšie strávený čas v danej oblasti, naopak zelená pozíciu hráča len sporadicky. [3]

V praxi to znamená, že ktorýkoľvek člen realizačného tímu môže kedykoľvek zhodnotiť platnosť údajov a na základe spätnej väzby zo systémov sú schopní urobiť okamžite rýchle rozhodnutia založené na metrikách, ktoré sledujú. Napríklad zobrazenie maximálnej rýchlosti hráča, počet nabehaných kilometrov či hodnotu tepovej frekvencie. V neposlednom rade je možné pomocou zariadení EPTS vykonávať analýzu vyhovujúcu najlepšie jeho potrebám z nespracovaných dát signálov z rôznych senzorov. Z tohto pohľadu sú myslené nespracované dáta signálov veľkým objemom dát, ktoré nie sú spracované a priamo pochádzajú z rôznych senzorov zariadenia, ako sú napríklad akcelerometer, gyroskop, magnetometer a barometer.

### 1.1.1 VID

VID je neinvazívny nástroj na sledovanie polohy hráčov na ihrisku pomocou špeciálnych kamier umiestnených na štadióne. Výhodou pre samotných hráčov je absencia mikroelektromechanických zariadení, ale vďaka čomu sa nedostáva táto technológia do popredia je kvôli náročnosti s údržbou a inštaláciou, VID nie je možné jednoducho presunúť zo štadiónov do tréningových zariadení. [2]

Každé EPTS zariadenie disponuje nevýhodami a viacerené štúdie sa zamerali na porovnanie systémov. Mnohé z nich preukázali, že práve LPS je vysoko presný a platný nástroj, a taktiež považuje sa za najslubnejšiu technológiu pre budúcnosť monitorovania športovcov. [5] [6]

Avšak pre lepšie pochopenie fungovanie LPS, ktorej overenie validity je naším primárnym cieľom, bude najprv vysvetlené fungovanie GPS.

## 2 Vonkajšia lokalizácia

Je všeobecne známe, že GNSS sú v súčasnosti najviac používané v športovom svete vo vonkajšom prostredí v tímových športoch [2]. Z tohto dôvodu bude rozoberané ako sú schopné prijímať signály, následne vyhodnotiť údaje o polohe, na čom sú tieto systémy založené, ich hlavné charakteristiky a možné zdroje chýb, ktoré môžu ich merania priniesť.

### 2.1 GNSS

Najviac známou technológiou vo svete na určovanie lokalizácie vo vonkajšom prostredí je GPS, ktorý s použitím satelitov, prijímača a algoritmov sa využíva na synchronizáciu o polohe, rýchlosti a čase pre leteckú, námornú a pozemnú dopravu.

GPS bolo spustené v roku 1979 pre americkú armádu a následne plne funkčný svetu od roku 1994. Satelitný systém sa skladá z konštelácie 24 satelitov v šiestich orbitálnych rovinách zameraných na stred Zeme, každý so štyrmi satelitmi, obiehajúcich vo výške približne 20 000 kilometrov nad Zemou. [7]

Taktiež je možné nájsť ďalšie systémy známe ako GLONASS vytvorený Ruskou republikou, alebo GALILEO kontrolovaný vytvorený Európskou Úniou, alebo Bei-Dou kontrolovaný Čínou. V dnešných dňoch je používanie týchto zariadení rozsiahle a sú využívané v oblasti navigácie, dopravy a okrem iného aj v športe.

Všetky systémy pracujú na rovnakom princípe, ktorý je založený v podstate na práci neuveriteľne presných synchronizovaných hodín využívajúce konšteláciu satelitov rozmiestnených po celej zemeguli. Satelity vysielajú signály a prijímače GPS umiestnené napríklad v smartfónoch ich prijímajú. Presnosť o čase je dôležitým faktorom na zisťovanie polohy. [8] [9]

Je jedno v akom mieste na Zemi sa subjekt nachádza, vždy je v priamej viditeľnosti okolo 6 satelitov, ale prijímač využíva iba 4 s najsilnejším signálom. V prípade použitia len 3 satelitov, pozícia bude zaznamenaná len v 2D priestore, bez použitia nadmorskej výšky. [10]

Každý z týchto satelitov disponuje na palube neuveriteľne presnými atómovými hodinami, ktoré sú synchronizované na hlavné hodiny Námorného observatória s presnosťou na desať nanosekúnd. Každý satelit vysielá nepretržite signál, ktorý udáva svoju časovú značku a polohu v priestore – zemepisná dĺžka ( $x$ ), zemepisná šírka ( $y$ ), nadmorská výška ( $z$ ) a čas ( $t$ ).

Vo svete športu sú najzaujímavejšie premenné poskytované zariadeniami GNSS poloha a jej deriváty : vzdialenosť, rýchlosť a zrýchlenie. Okrem toho, prijímač GPS / GNSS, ktorý sa nachádza na chrbte športovca, musí tiež obsahovať hodiny. Tieto

hodiny sú synchronizované na výpočet času a pre predstavu, že svetlo cestuje rýchlosťou 300 metrov za 1 mikrosekundu tak pri oneskorení signálu o 1 mikrosekundu nastane chyba prepočtu na vzdialenosť o 300 metrov. [11]

## **Vzorkovacia frekvencia GNSS**

V posledných rokoch bola vzorkovacia frekvencia zariadení GNSS dôležitou a rozsiahlo diskutovanou otázkou vo vedeckej literatúre. Nízka vzorkovacia frekvencia znamená, že je získaných málo údajov za sekundu. Napríklad, ak vzorkovacia frekvencia nie je dostatočne vysoká, hodnoty zrýchlenia nebudú pri tomto type zariadení úplne presné. Prvé zariadenia GNSS pracovali pri frekvencii 1 Hz a získali iba jeden údaj za sekundu vzorkovania. Ako sa technológia vyvíjala, objavili sa 5 Hz zariadenia, čo znamenalo veľký pokrok v porovnaní s predchádzajúcimi zariadeniami. [12]

V súčasnosti vo svete športových výkonov pracujú GNSS zariadenia s frekvenciou viac ako 10 Hz. Aj keď je táto frekvencia stále nižšia ako pri vzorkovaní inerciálnych senzorov, je možné usúdiť, že každý pohyb človeka je ľahko zaznamenateľný a okrem toho sa na presnosť údajov dá spoľahnúť.

## **Potenciálne zdroje chýb**

Kvalita signálu môže byť chýlostivá, či už z klimatických dôvodov alebo z dôvodu sťahovacích striech, ktoré je možné sledovať na futbalových štadiónoch. V týchto prípadoch tým, že nie je dobrý signál, nemusí byť jeho presnosť a spoľahlivosť práve najsprávnejšia. Nižšie sú uvedené hlavné zdroje chýb, ktoré sú nahádzané pri prijímaní signálu GNSS :

### **1. Multipath**

Tento druh chyby sa vyskytuje, keď je prijímač umiestnený v blízkosti veľkého reflexného povrchu, ako sú napríklad budovy, a satelitný signál prichádza najprv do blízkosti objektu a potom sa odráža do prijímača, čo spôsobuje nepresné meranie. [12]

Tento typ chyby je extrémne bežný v prijímači pohybu a môže spôsobiť chybu polohy niekoľkých metrov. Fenomén tohto typu sa koná na futbalových štadiónoch so zatiahnutelnými strechami, kde sa signál GNSS odrazí mimo strechy štadióna a ovplyvňuje presnosť signálu.

## 2. Čas satelitov

Ako bolo vyššie spomenuté, hodiny satelitov GNSS sú atómové hodiny s vysokou presnosťou, ale môžu spôsobiť drift v priebehu času kvôli hlukom. Tieto chyby môžu viesť k existencii rozdielu medzi časovým systémom satelitov a prijímacieho systému. Táto chyba nie je konštantná pre všetky satelity.[12]

## 3. Geometria satelitov a zriedenie presnosti

Je známe, že počet a poloha satelitov je rovnako dôležitá ako geometria, ktorú ich signály opisujú a poskytujú. DOP je hodnota, ktorá poskytuje informácie o sile geometrického usporiadania, vytvoreného z prijímacieho zariadenia a vektorov, ktoré určujú prijímače so satelitmi. [13]

Ak majú satelity lepšie priestorové rozloženie, výpočet polohy – pomocou triangulácie – je oveľa presnejší, ako keby mali satelity horšie priestorové rozloženie.

Nasledujúce parametre poskytujú aproximáciu presnej dispozície satelitov, aby sme týmto spôsobom vedeli, či sú zozbierané údaje presné a spoľahlivé :

1. Geometrické DOP (GDOP) - poskytuje informácie o neurčitosti polohy užívateľa z geometrického usporiadania satelitov a časovej presnosti.
2. Pozičné DOP (PDOP) - poskytuje informácie o neistote polohy používateľa s prihliadnutím na geometrické usporiadanie satelitov.
3. Vertikálne DOP (VDOP) - poskytuje informácie o neistote vertikálnej polohy používateľa.
4. Horizontálne DOP (HDOP) - poskytuje informácie o neistote horizontálnej polohy používateľa. [13]

Keď sú satelity zoskupené spolu, HDOP je vysoká a presnosť je naopak slabá, zatiaľ keď sa satelity rozložia, HDOP je nízka a presnosť sa zvyšuje. Keď sa tento signál posiela prostredníctvom vlín, ktoré možno dispergovať kvôli kontaktu so stropmi, stenami alebo inými predmetmi, preto v posledných rokoch boli vyvinuté vnútorné pozičné systémy (IPS).

### 3 Vnútoraná lokalizácia

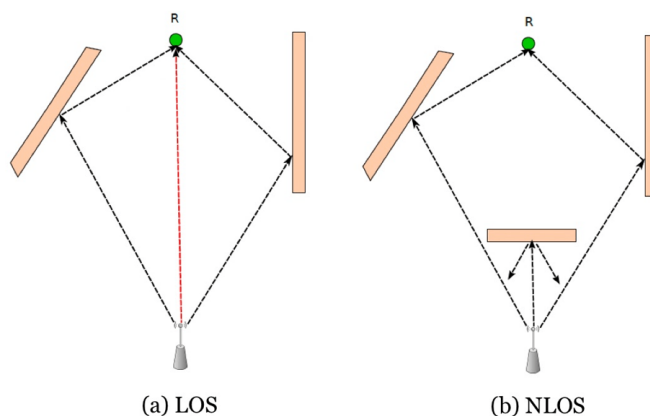
IPS umožňujú lokalizovať polohu objektov alebo ľudí v budovách. Keďže GPS je nespoľahlivý v interiérových priestoroch, pretože nie je vizuálny kontakt so satelitmi GPS, IPS musí použiť iné metódy polohy. IPS využívajú množstvo prístupov k polohovaniu, ktoré sa líšia výrazne z hľadiska presnosti, nákladov, presnosti, technológie, bezpečnosti, atď. [14] [15]. Vzhľadom na zvýšený dopyt a požiadavky na presné zisťovanie polohy v interiéri sa stala veľmi aktívna výskumná oblasť, v ktorej boli navrhnuté rôzne riešenia . [16]

Mnohé z týchto riešení využívajú niektoré existujúce technológie na riešenie problému určovania polohy. Vnútoraná lokalizácia má svoje vlastné požiadavky, ktoré ho odlišujú od vonkajšej lokalizácie. Existuje päť hlavných metrík kvality IPS :

1. Presnosť systému a precíznosť
2. Pokrytie a jeho rozlíšenie
3. Latencia pri aktualizácie polohy
4. Vplyv infraštruktúry budovy
5. Účinok náhodnej chyby v systéme, napr. rušenie a odraz signálu [17]

Existujú dve hlavné otázky, ktoré musia riešiť vývojári IPS: (1) Aké sú vhodné technológie na implementáciu požadovaných IPS? a (2) Ako môžeme dosiahnuť najlepší kompromis medzi rôznymi metrikami kvality s cieľom získať účinné IPS? [18]

Vo všeobecnosti sa vo vnútornom prostredí využíva šírenie bez priamej viditeľnosti (NLOS) ako je možné vidieť na obrázku 3.1, v ktorom sa signály nepohybujú priamou cestou od vysielača k prijímaču, čo následne spôsobuje časové oneskorenie na prijímači alebo rozptyl signálu. Sila signálu má tendenciu kolísať z dôvodu existencie zdrojov rušenia ako sú napríklad mobilné telefóny či bezdrôtové zariadenia. [18].



Obr. 3.1: (b) Šírenie bez priamej viditeľnosti - NLOS [18]

Existuje mnoho dôvodov a charakteristík, ktoré odlišuje IPS a OPS. V porovnaní s vonkajším prostredím sa zdá, že vnútorné prostredie je zložitejšie, pretože existuje viacero predmetov (ako sú steny či ľudia), ktoré sú schopné odrážať signály a vedú k problémom ako multipath či oneskoreniu signálu. Na druhej strane vnútorné prostredie disponuje aj výhodami. Napríklad vopred určená infraštruktúra, pomalá cirkulácia vzduchu či konštantné teploty. [18]

## 3.1 LPS

LPS je technológia používaná na získavanie informácií o polohe alebo lokalite objektov vo vzťahu k danej oblasti alebo ihrisku. Podobá sa GPS, ale funguje len lokálne a udáva iba polohu objektov v danej oblasti. [19]

### 3.1.1 Architektúra LPS

V dnešných dňoch je väčšina LPS založená na využití technológie rádiových vln, do značnej miery vďaka ich vynikajúcemu výkonu. Architektúra tohto typu pozostáva z hardvéru a softvéru používaných na určenie pozície v reálnom čase. Rozlišujú sa 3 hlavné zložky systému :

- **Tag** - elektronické zariadenie fungujúce v rámci použitej lokačnej technológie, dostatočne malé, aby mohlo byť upevnené na objekte či osobe
- **Lokačný senzor - anténa** - zariadenia pevne namontované v známych pozíciách prijímajúce rádiové signály z tagov, pričom následne spolu komunikujú, musia byť od seba vzdialené maximálne 20 metrov
- **Lokačný nástroj** - softvér používajúci informácie z lokačného senzora na odhad umiestenia tagu [20]

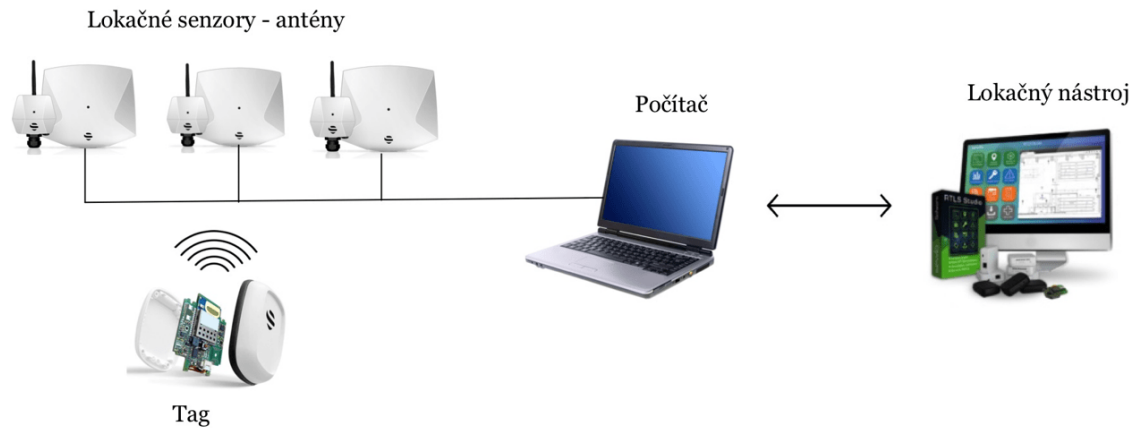
### 3.1.2 Princíp fungovania LPS

LPS využíva uzly v tesnej a predtým známej polohe. Bezdrôtové systémy nadväzujú komunikáciu pomocou elektromagnetickej vlny, ktoré prenášajú potrebné dáta. Tieto technológie obsahujú prijímacie a vysielacie zariadenia, ktoré sú vzájomne prepojené a umožňujú komunikáciu bez možnosti rušenia z iných zariadení. [18]

Jedna z týchto dvoch zložiek je pohybujúci sa objekt (napr. športovec s tagom) a druhý komponent je v statickom stave v známom mieste (kotva). Preto polohy prijímača a jeho nositeľa sú stanovené s ohľadom na známe polohy vysieláčov.

Hodnoty týchto vln sa merajú v priebehu času s údajmi reprezentovanými krivkami, nazývanými ako sínusoida. Tieto krivky sa objavujú v určitom tvare podľa ich hodnôt. Matematicky sú sínusoidy výsledkom cyklov za sekundu (frekvenciu),

výkonom každej frekvenčnej zložky (amplitúdy) a oneskorením signálu (fázy), ktoré opisujú uhlové posunutie dvoch sínusových funkcií. Kľúčom k prenosu informácií je prostredníctvom použitia vln s viacerými tvarmi zložitých tvarov, v dôsledku kombinácie rôznych sínusoid. [21]



Obr. 3.2: Základná architektúra LPS od spoločnosti Sewio

V športe sú kotvy umiestnené okolo ihriska na pevných pozíciách a hráči nosia prístroje (tagy). Pre pohodlnosť sú väčšinou elektronické zariadenia umiestnené vo vestách, ktoré nosia hráči počas tréningu či zápasu, ako je možné vidieť na obrázku 3.3



Obr. 3.3: Tag umiestnený vo veste [12]

### 3.1.3 Signalizačná schéma

LPS nie je špecifikovaný žiadnou presnou exkluzívnou technológiou, ale základná klasifikácia je založená na signalizačnej schéme, ktorú používa lokalizačná technológia :

- **Infračervené signály (IF)** majú nízky výkon a sú pomerne lacné, nemôžu však preniknúť cez prekážky a sú citlivé na slnečné svetlo. Preto je zvyčajne potrebné nainštalovať infračervené senzory v celom vnútornom prostredí na zachytenie signálov z vysielača.
- **Optické signály** taktiež vyžadujú podmienky priamej viditeľnosti (LOS), sú ovplyvnené slnečným žiarením a vyžadujú nízky výkon. Poskytujú vysokú presnosť a zvyčajne sú vhodnejšie pre krátke vzdialenosti (napr. okolo 10 m).
- **Ultrazvukové signály** dosahujú vysokú presnosť pri krátkom dosahu.
- **Akustické signály** hlavnou prednosťou je pomalé šírenie zvuku, vďaka čomu postačujú pomalé hodiny a sú schopné dosiahnuť v podmienkach LOS pomerne vysokú presnosť lacno. Avšak, akustické žiariče sú energeticky náročné a nefungujú spoľahlivo v scenároch bez priamej viditeľnosti (NLOS).
- **Rádiová frekvencia (RF)** je pravdepodobne najbežnejšie používaná signalizačná schéma na účely určovania polohy. Hlavnou výhodou je, že RF signály sú schopné preniknúť cez prekážky (na rozdiel od IF) a môžu sa šíriť na veľké vzdialenosti. Patria medzi ne hlavne *RFID*, *WLAN*, *UWB* a mnohé ďalšie. [22]

## RFID

RFID využíva rádiové vlny na bezdrôtový prenos identity objektu (alebo osoby). Technológia RFID sa najčastejšie používa na automatickú identifikáciu objektov vo veľkých priestoroch. Je založená na výmene rôznych frekvencií signálov a skladá sa z 3 hlavných komponentov : *tagy*, *antény* a *čítačky* [20].

Tagy vysielať rádiové signály, ktoré čítačky prijímajú a naopak. Navyše musia byť pripojené k všetkým objektom na lokalizáciu. Tagy aj čítačky používajú preddefinované rádiové frekvencie a protokoly na odosielanie a prijímanie údajov medzi sebou. Čítačka je schopná následne čítať údaje z tagov.[23]

RFID systémy využívajú 3 hlavné frekvenčné pásma [20] :

- **Nízka frekvencia** (125kHz - 134 kHz) - krátky dosah do 10 cm, menej ovplyvnená kovom alebo vodou, používaná na identifikáciu zvierat;
- **Vysoká frekvencia** (13,56 MHz) - rozsah od 1 cm do 1 m, používaný hlavne v kontrolách prístupu zabezpečia;
- **Ultra-vyysoká frekvencia** (868 MHz – 965 MHz) - rozsah do 6 m, používaný v lekárskech alebo premyselných aplikáciách na identifikáciu tovaru

Existujú dva typy technológií RFID : *pasívne* a *aktívne*. Pasívne využívajú tagy, ktoré nie sú vybavené zdrojom napájania, sú menšie, majú kratší dosah v porovnaní s aktívnymi. Napriek použitému frekvenčnému pásmu závisí rozsah od podmienok

prostredia. Navyše, pasívne RFID systémy pracujúce na vyšších pásmach sa horšie vyrovnávajú s prekážkami, hlavne vo vode alebo v kove. [20]

## **WLAN**

Technológia WLAN využíva Wi-Fi, pracujúce na 2,4 GHz až 5,8 GHz, na odhad polohy zariadenia na základe prijatého signálu z iných prístupových bodov. Využíva 2 základné vlastnosti : zoskupenie bodov na mape na zníženie výpočtovej náročnosti a rozdelenie pravdepodobnosti na zvýšenie presnosti filtrovania šumu. [24]

Používanie Wi-Fi vo IPS závisí od charakteristík bezdrôtových routerov, ktoré sú dostupné v danej oblasti. Najpopulárnejšia metóda určovania polohy pri WLAN je na základe sily prijatého signálu (RSS), bude vysvetlené v kapitole 3.2.4 .

V praktickej časti sa bude overovať validita lokačného systému fungujúceho na princípe UWB technológie, v dôsledku čoho bude rozobraná základná charakteristika tohto druhu technológie v kapitole 3.2.

## **3.2 UWB**

Technológia UWB je široko použiteľná pre vnútorné lokalizačné aplikácie a používaný frekvenčný rozsah je od 3,1 GHz do 10,6 GHz. [20]

Využíva sa predovšetkým na krátke vzdialenosti, rýchly a stabilný prenos dát. Vďaka svojej bezkonkurenčnej presnosti, spoľahlivosti a prenosovej rýchlosti je UWB často tou voľbou pre vnútornú lokalizáciu pohybujúcich sa subjektov v zložitých a priestorovo citlivých prostrediach. Tiež veľká šírka pásma a extrémne krátke impulzné krivky pomáhajú znižovať efekt multipath, vďaka čomu umožňuje signál efektívne prejsť prekážkami, ako sú steny a objekty. [25]

### **3.2.1 IEEE 802.15.4**

Štandard IEEE 802.15.4 je definovaný už od roku 2003 a platí pre zariadenia, ktoré je možné použiť na vybudovanie LR-WPAN. [26]

V dôsledku využitia systémov na určovanie polohy bola vytvorená technológia bezdrôtového prístupu IEEE 802.15.4, ktorá sa vyznačuje nízkou dátovou prenosovou rýchlosťou a nadmerne dlhou výdržou batérie. Štandard IEEE 802.15.4 definuje fyzickú vrstvu (vrstva 1 - PHY) obsahujúcu prijímač a jeho mechanizmy, a taktiež bezchybný prenos dát medzi stanicami, čo zabezpečuje tzv. linková (vrstva 2 - MAC) modelu OSI. [27]

### 3.2.2 UWB signály

Ako bolo spomínané, UWB signály sa vyznačujú veľmi veľkou šírkou pásma v porovnaní s úzkopásmovými signálmi. Pojem absolútna šírka pásma signálu pre pokles o 10 db, označovaný ako  $BW_{-10db}$ , je nevyhnutný pre definíciu UWB signálu (3.1)[22]:

$$BW_{-10db} = f_{max} - f_{min} \quad (3.1)$$

Na druhej strane, relatívna šírka pásma  $B_{rel}$  je definovaná ako (3.2)[22]:

$$B_{rel} = \frac{B_{-10db}}{f_c} \quad (3.2)$$

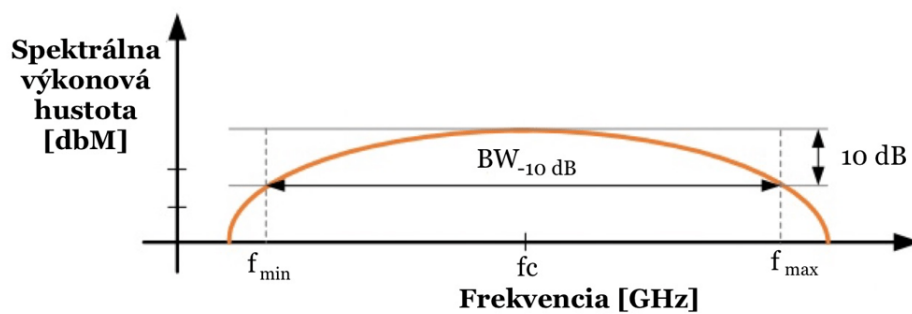
Pričom, strednú frekvenciu  $f_c$  je možné vypočítať ako (3.3)[22]:

$$f_c = \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (3.3)$$

Z vyššie uvedených vzťahov a rovníc vyplýva, že relatívnu šírku pásma  $B_{rel}$  je možné vyjadriť pomocou krajných frekvencií  $f_{max}$  a  $f_{min}$  pre pokles signálu o 10dB, vid' vzťah (3.4)[22]:

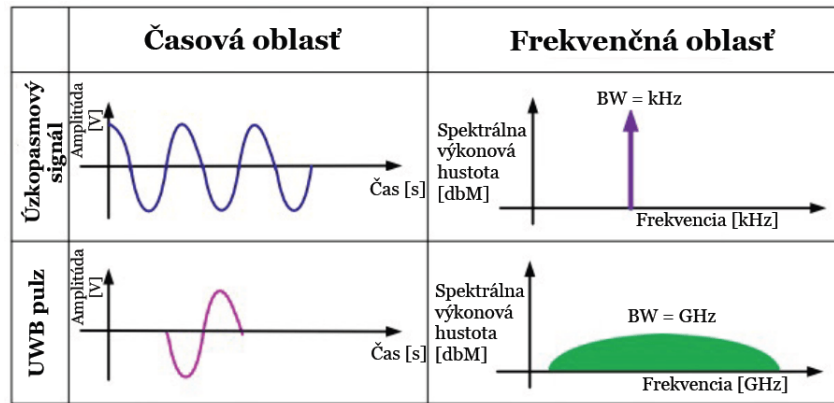
$$B_{rel} = \frac{2(f_{max} - f_{min})}{f_{max} + f_{min}} \quad (3.4)$$

Pokiaľ je stredná frekvencia  $f_c$  väčšia ako 2,5 GHz, a zároveň spĺňa podmienku, že absolútna šírka pásma pre pokles signálu o 10 dB  $BW_{-10dB}$  je väčšia ako 500 MHz, signál je považovaný za UWB. V prípade, že je stredná frekvencia  $f_c$  menšia ako 2,5 GHz, signál musí spĺňať požiadavku na relatívnu šírku pásma  $B_{rel}$  väčšiu ako 0,2, aby spadol do kategórie UWB signálov. [22]



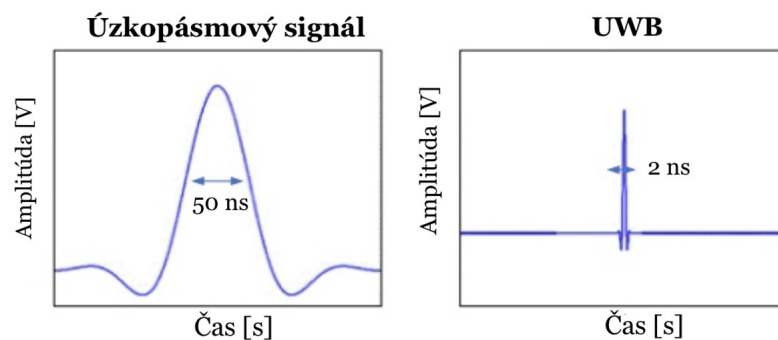
Obr. 3.4: Šírka pásma UWB signálov [28]

Ako je zobrazené na obrázku 3.5 UWB technológia využíva krátke širokopásmové signály - ich parametre sa blížia k Diracovmu impulzu. [22]



Obr. 3.5: Časová a frekvenčná oblasť UWB signálu [28]

Extrémne nízka dĺžka signálu spôsobuje väčšiu rýchlosť náběžnej a zostupnej hrany, čo znamená ľahšie meranie času od začiatku do konca signálu, vďaka čomu je možné odmerať vzdialenosť 2 bodov oveľa presnejšie ako u úzkopásmových signálov [29], ako je zobrazené na obrázku 3.7.



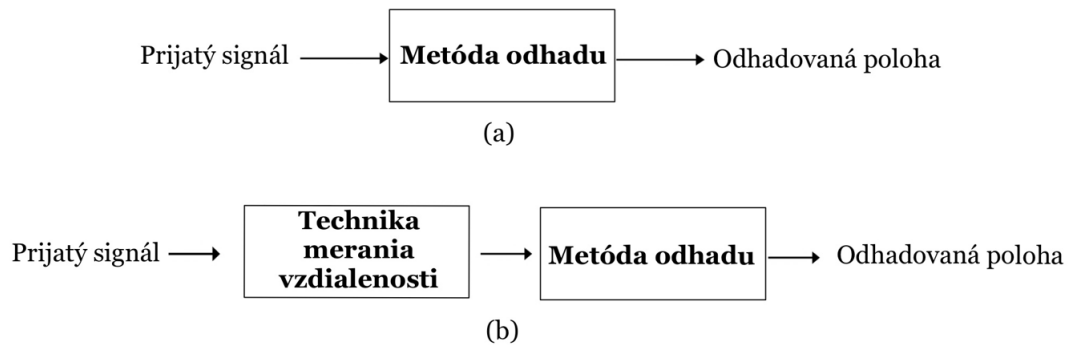
Obr. 3.6: Porovnanie šírky signálov [28]

### 3.2.3 UWB antény

UWB antény, nazývané aj kotvy, sú kľúčovým komponentom UWB systému a ovplyvňujú celkový výkon systému. Vo všeobecnosti sú kotvy prvky, ktoré vyžarujú elektromagnetickú energiu prenosového vedenia do voľného priestoru. Kotvy sú v skutočnosti prechodové zariadenia (prevodníky) medzi riadenou vlnou a voľným priestorom (a naopak). [30]

### 3.2.4 Lokalizačné algoritmy

Po preskúmaní UWB signálov sa ďalšia kapitola zameriava na odhad polohy tagu na ihrisku. Signály sa vymieňajú medzi cieľovým uzlom a množstvom referenčných uzlov, aby bolo možné odhadnúť polohu uzla. Odhad polohy je možný vykonať priamo zo signálov, nazývané aj **priame určovanie polohy** alebo na druhej strane **dvojkrokové určovanie polohy**, pri ktorom sa zo signálov najprv extrahujú určité parametre, a následne sa odhadne poloha. [22]



Obr. 3.7: (a) Priame určovanie polohy (b) Dvojkrokové určovanie polohy

Pre dvojkrokové určovanie polohy je charakteristická nižšia zložitost ako pri priamom určovaní polohy. Výkon obidvoch metód je veľmi porovnateľný aj pre dostatočne vysoké PSS (pomer signálu k šumu). V praxi sa využíva viacej dvojkrokové určovanie polohy, čomu sa bude venovať nasledujúca časť tejto kapitoly. [22]

Vo všeobecnosti lokalizačné algoritmy pre dvojkrokové určovanie polohy pozostávajú z 2 hlavných komponentov :

1. **Technika merania vzdialenosti**
2. **Metóda odhadu** [20]

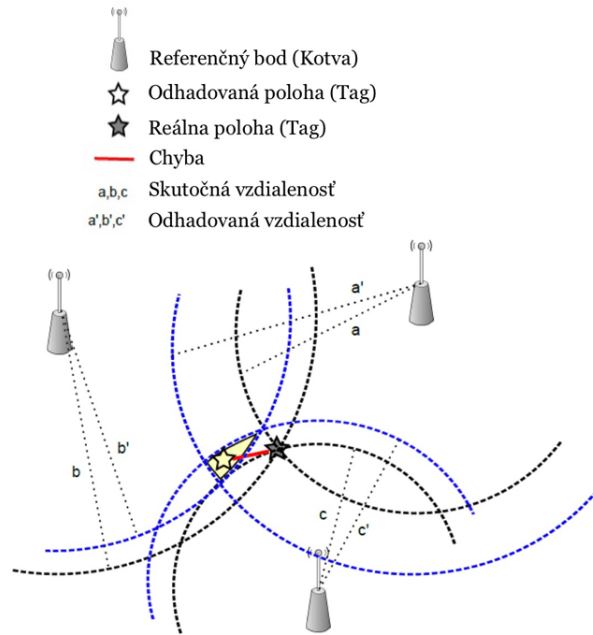
Technika merania vzdialenosti sa používa predovšetkým sa určenie polohy tagu použitím nameraných vzdialeností tagu od každej kotvy. Výsledky sa spracovávajú metódou odhadu na určenie súradníc tagu.

#### **Techniky merania vzdialenosti**

Poloha na ihrisku sa určuje pomocou vzdialeností, ktoré sú vypočítané pomocou pozičných algoritmov UWB. Závisia hlavne od vlastností nameraného signálu a je možné ich rozdeliť do 5 hlavných kategórií :

- **Čas príchodu (TOA)**

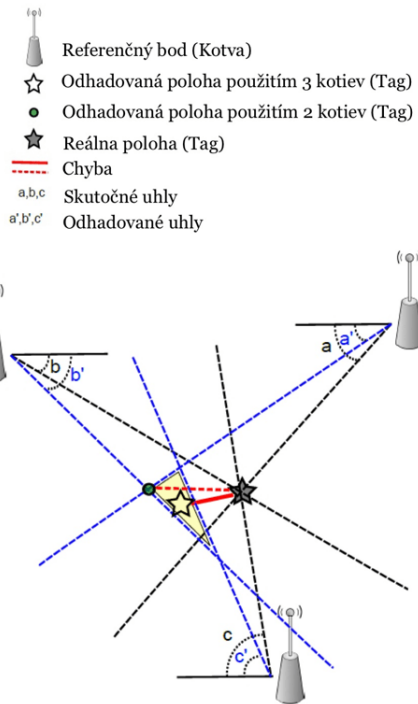
TOA je založená na vzniku priesečníku kružníc pre viacero vysieláčov. Vzďialenosť medzi vysieláčom a prijímačom udáva polomer jednotlivých kružníc. Táto vzdialenosť sa dostane výpočtom medzi prijímačom a vysieláčom pomocou doby jednosmerného šírenia. Dôležitá je časová synchronizácia všetkých vysieláčov, zatiaľ čo synchronizácia prijímača nie je potrebná. Počas výpočtu vzdialenosti musíme brať do úvahy možnosť výrazného oneskorenia. [18][22]



Obr. 3.8: Čas príchodu [18]

- **Uhol príchodu (AOA)**

Na určenie odhadu uhlov príchodu signálu sú potrebné minimálne 2 zdroje signálu. Porovnáva sa buď s fázou alebo amplitúdou signálu naprieč viacerými anténami. Poloha sa určuje pomocou priesečnice uhlovej čiary pre každý zdroj signálu. Algoritmy pre odhad AOA sú veľmi citlivé na viaceré faktory, ktoré môžu následne spôsobovať chyby v odhade polohy. Okrem toho majú vyššiu výpočetnú náročnosť v porovnaní s inými metódami. Napríklad geometria antény zohráva hlavnú úlohu v algoritme. [31] Zníženie presnosti môže nastať pri zväčšení vzdialenosti medzi prijímačom a odosielateľom. [18]



Obr. 3.9: Uhol príchodu [18]

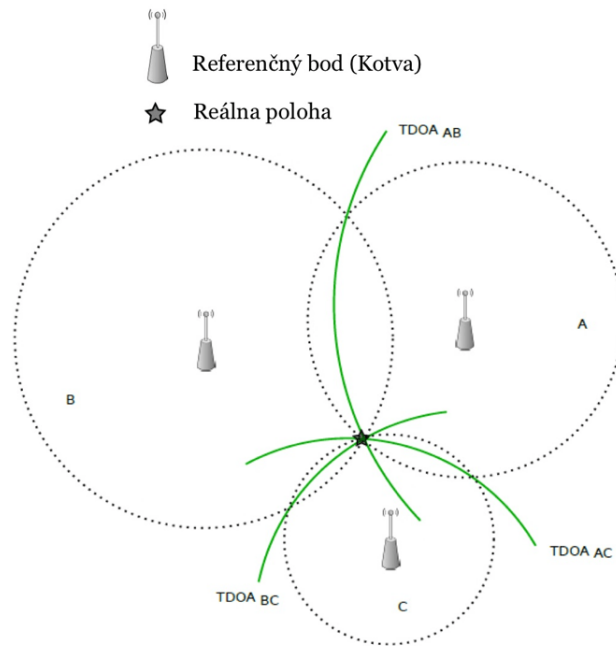
- **Sila prijatého signálu (RSS)**

Pri algoritmoch založených na RSS sa sledovanému cieľu meria silu signálu, ktoré prijíma z viacerých vysielačov. Sila signálu sa využíva na odhad vzdialenosti medzi vysielačmi a prijímačmi. Týmto spôsobom bude prijímač schopný odhadnúť svoju polohu. RSS je citlivý na rušenie a kanál v malom rozsahu spôsobuje náhodnú odchýlku od strednej sily prijímaného signálu. [18]

Tieto algoritmy majú oproti iným určité výhody. Tagy tu fungujú len ako prijímače a tak sa poliehajú na silu prijímaných signálov z viacerých vysielačov, aby našli svoju polohu. Týmto spôsobom majú algoritmy založené na RSS tendenciu mať menšiu „komunikačnú zápchu“, čo pomáha zlepšovaniu riadenia kanálu a presnosti určovania polohy. [22]

- **Časový rozdiel príchodu (TDOA)**

TDOA je založené na meraní časového rozdielu medzi príchodom signálu vysielača z objektu a prijatého signálu z 3 alebo viacerých prijímačmi. Týmto spôsobom sa určuje poloha objektu (vysielač). [18] Všetky snímače polohy musia byť presne časovo synchronizované. V opačnom prípade dôjde k nejednoznačnosti určenia polohy. [22]



Obr. 3.10: Časový rozdiel príchodu [18]

- **Hybridný algoritmus (HA)**

Pri použití viacerých algoritmov na určovanie presnosti polohy objektu sa zvyšuje celková presnosť, ale na druhej strane aj cena.

### Metódy odhadu

Vzdialenosti získané rôznymi technikami, ktoré boli vysvetlené v predchádzajúcej kapitole, sú následne spracované odhadovými algoritmami. Tieto algoritmy odhadujú pozíciu tagu na základe nameraných vzdialeností medzi tagom a kotvami. V závislosti od techniky merania sa používajú nasledujúce algoritmy [20] :

- **Lateračná metóda (LM)**

LM sa využíva predovšetkým pri technike merania vzdialenosti RSS alebo TOA / TDOA. Algoritmus využíva poznatky geometrie na odhadnutie priesečníkov kružníc. Získané kružnice reprezentujú vysielaný signál z každej kotvy a následne sa vypočítava vzdialenosť od tagu. V závislosti od počtu použitých kotiev sa zobrazuje 2D - tag musí byť v dosahu minimálne 3 kotiev - alebo 3D priestor - tag musí byť v dosahu minimálne 4 kotiev. [20]

- **Angulačná metóda (AM)**

AM je založená na používaní geometrických prvkov, ktorý používa technika AOA. Pozícia sa odhaduje na základe uhlov medzi tagom a referenčnou čiarou, ktorá je definovaná uhlami dopadu. [20]

- **Metóda odtlačkov prstov (FM)**

Táto metóda odhadu je všeobecná a je ju možné aplikovať na akúkoľvek techniku merania vzdialenosti. Ide o dvojfázovú metódu založenú na porovnávaní nameraných údajov s vopred stanoveným vzorom mapy. Pri odhade pozície tagu je potrebné použiť vhodnú deterministickú metódu, napríklad K - metóda najbližšieho suseda. Využívajú ju predovšetkým lokačné systémy fungujúce na princípe rádiových vln. [20]

- **Metóda priblíženia (PM)**

Najjednoduchšia technika metódy odhadu, ktorá určuje pozíciu tagu v špecifickejšej oblasti. Priestor je rozdelený do oblastí definované mriežkou antén rozmiestnené po celom priestore, zvyčajne na podlahe v telocvični. Tento algoritmus odhadu určuje pozíciu na základe asociácie s polohou vysielača/prijímača, odkiaľ sa prijíma najsilnejší signál. Táto technika sa využíva bežne pre technológiu RFID. [20]

- **Mŕtva inerciálna metóda (DIM)**

Metóda je založená na odhade pozície tagu – v tomto prípade inerciálneho senzoru - v 2D priestore na základe predtým odhadovaných pozícií, meranej rýchlosti a uplynutého času. Nevyžaduje sa žiadna špeciálna infraštruktúra, ale chyba určovania polohy sa môže časom hromadiť, a preto si vyžaduje potrebnú recalibráciu. [20]

### **3.2.5 UWB technológia**

Na záver je možné skonštatovať, že spomedzi rôznych typov bezdrôtových vnútorných pozičných systémov je UWB najslubnejšou technológiou pre vnútorné určovanie polohy, a tiež pre vonkajšie priestory, kde nie je možné, aby okolitá infraštruktúra zasahovala do výsledkov. [21]

Avšak technológia UWB, na rozdiel od iných technológií určovania polohy ako napríklad infračervené systémy, nie je ovplyvnená existenciou iných komunikačných zariadení, v dôsledku veľkej šírky pásma. Výhody presnosti UWB sú jasné: UWB dokáže merať vzdialenosť a polohu s presnosťou v desiatkách centimetrov, zatiaľ čo Wi-Fi, RFID a iné úzkopásmové rádiové systémy môžu dosiahnuť len presnosť v niekoľkých metrov. [32]

## 4 Qualysis

Ako referenčný systém pri meraní bola použitá technológia optického sledovania od firmy Qualysis, ktorá umožňuje zachytenie pohybu rýchlo pohybujúcich sa objektov s extrémne vysokou presnosťou. Má všestranné použitie pre vonkajšie aj vnútorné použitie. Systém pozostáva z kamier na zachytávanie pohybu, softvéru a hardvéru. [33]

Existuje viacero druhov kamier, pre naše meranie boli používané kamery Argus poskytujúce vynikajúce rozlíšenie, maximálnu snímkovú frekvenciu a sú poháňané 24 vysokovýkonnými LED diódami. Símánie pohybu – resp. pozície markerov je možné pozorovať v programe Qualysis Track Manager (QTM).



Obr. 4.1: Kamera Argus [33]

Systém Qualysis pracuje s veľmi vysokou vzorkovacou frekvenciou a kamera je schopná detekovať statické značky až do vzdialenosti 40 metrov pri veľkosti značky 16 milimetrov.



Obr. 4.2: Markery [33]

Tento systém slúži na určovanie presnosti lokačného systému, ktorý je určovaný voči systému Qualysis, označovaný v tomto prípade ako referenčný systém. Hlavný dôvod je schopnosť detekcie objektov na 0,03 – 0,06 mm, zatiaľ čo UWB technológia to dokáže s presnosťou na 5 – 10 centrimetrov. [33]

## 5 Charakteristika LPS

Hlavným cieľom bolo overenie validity lokačného systému od spoločnosti Sewio. V praktickej časti sa bude porovnávať jeho presnosť v rôznych oblastiach ihriska v 2 rozličných výškach, pričom sa pri meraní používal referenčný systém Qualysis. LPS systém sa nachádza v športovej hale patriacej VUT v Brne. Tento systém funguje na princípe rádiových vln, konkrétne technológia UWB.

### 5.1 UWB systém

Signál sa šíri z vysieláča (kotvy) do prijímača (tagu), následne lokačný nástroj pracuje s informáciou, z ktorej sa pomocou lokalizačných algoritmov odhaduje umiestnenie tagu. Vysielač v systéme UWB je sada kotiev, ktoré prenášajú rádiový signál takmer pod rovnakým princípom ako systém GPS. Základná architektúra systému je zobrazená v teoretickej časti na obrázku 3.2. [32]

#### 5.1.1 UWB kotva

V skratke kotvy detekujú impulzy UWB signálu vysielané tagmi a posielajú ich lokalizačnému serveru na výpočet pozícií tagov. Na pokrytie oblasti je potrebné nainštalovať nad oblasť sadu kotiev, aby boli schopné detekovať polohu. [36]



Obr. 5.1: Kotva od spoločnosti Sewio

#### 5.1.2 UWB tag

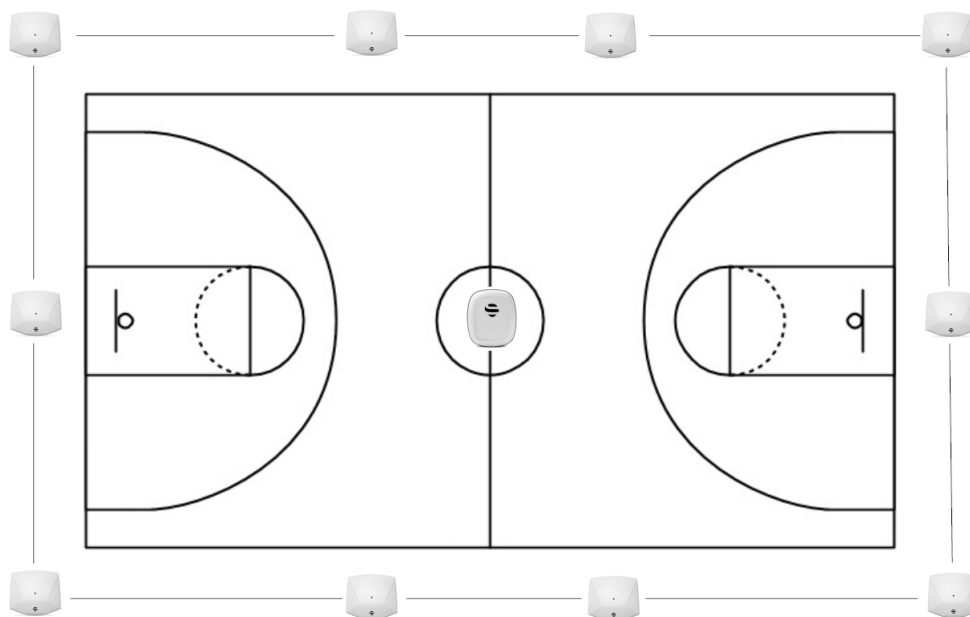
Údaje o polohe na ihrisku z UWB systému boli zaznamenané pomocou tagu, v tomto prípade inerciálnej meracej jednotky (IMU) s rozmermi 55 mm x 46 mm. Zariadenie disponuje vlastným mikroprocesorom, s pamäťou na nahrávanie, ukladanie a odovzdávanie dát do počítača. Obsahuje tiež aj externú batériu s priemernou výdržou 5-6 hodín a váži približne 70 gramov. Vzorkovacia frekvencia tagu je 10 Hz. [36]



Obr. 5.2: Tag od spoločnosti Sewio

### 5.1.3 Popis LPS

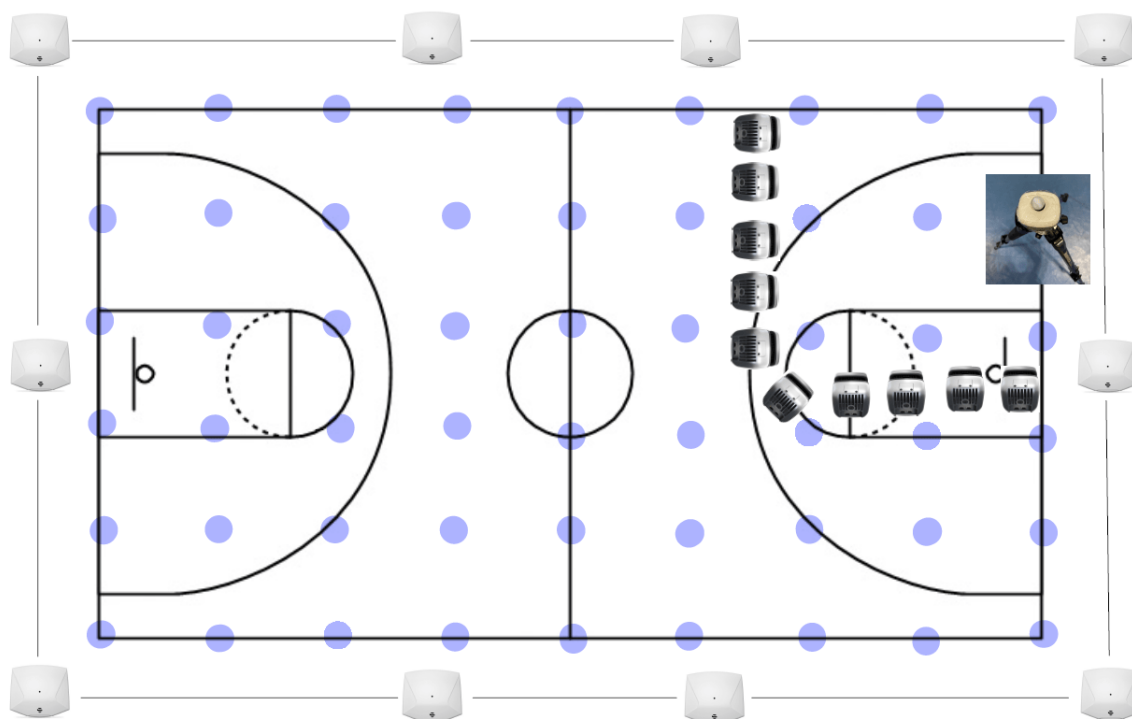
Ilustračná fotografia rozmiestnenia kotiev okolo hracej plochy, kde bolo prevádzané meranie, je zobrazená na obrázku 5.3. Celkový počet kotiev je 10, ktoré sú symetricky rozmiestnené podľa stredu, na kratšej strane sa nachádzajú 3, na dlhšej strane 2 bližšie ku stredu. Systém, s ktorým sa pracovalo využíva techniku merania vzdialenosti TDOA. Jeho hlavnou výhodou je, že umožňuje sledovať až tisíc tagov vrámci jednej oblasti. [36]



Obr. 5.3: Ihrisko s kotvami

## 5.2 Metodika merania

Meranie bolo prevádzané staticky z toho dôvodu, že validita je overovaná v 2 rozličných výškach. Prvá bola zvolená, aby odpovedala približne výške priemernej osoby, ktorá má umiestnený tag vo veste pri športovej činnosti, ako je zobrazené na obrázku 3.3, čo činí približne 150 centimetrov. Následne druhá sa snažila priblížiť čo najbližšie do roviny kotiev, ale bolo potrebné brať v úvahu aj maximálnu stabilitu, čo vo výsledku odpovedá 350 centimetrom. V každej výške sa nachádzal jeden tag a oba tagy boli spolu pevne upevnené na jednom statíve v rovnakej vertikálnej polohe.

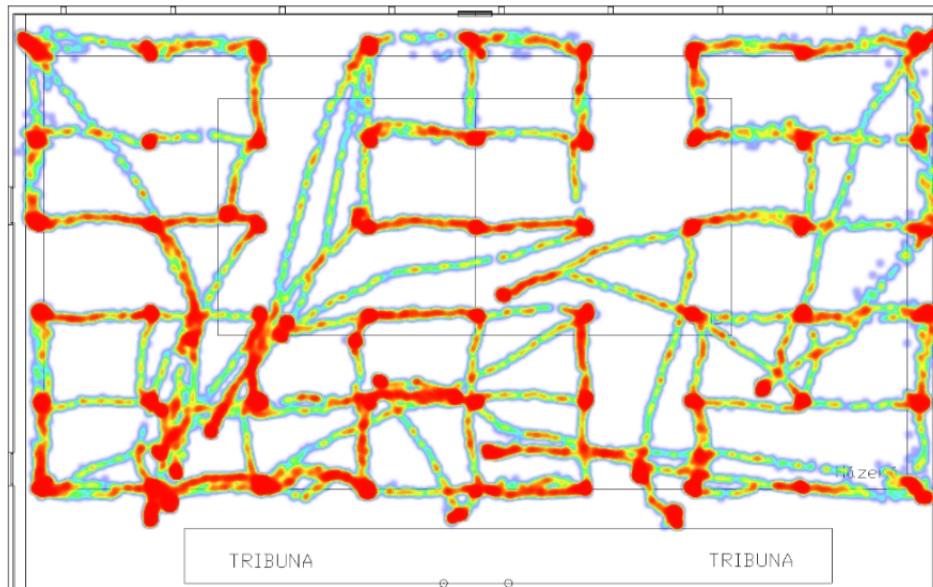


Obr. 5.4: Qualysis uložený v priestore [36]

Ihrisko má rozmery 40x20 metrov a bolo rozdelené na 54 bodov, ako je možné vidieť na obrázku 5.4, kde sú konkrétne body reprezentované modrou farbou. V týchto bodoch boli zaznamenávané údaje o polohe tagu z LPS systému v 2D priestore - súradnica X a Y. Na každom tagu sa nachádzal pevne upevnený marker o veľkosti 16 milimetrov z referenčného systému Qualysis, ktorého súradnice sme si museli následne dopočítavať.

V praxi systém Qualysis dokáže pokryť plochu približne o veľkosti badmintonového ihriska, pretože v každom momente musí byť marker viditeľný minimálne pre 2 kamery, aby bol schopný zaznamenávať údaje o polohe. Z toho dôvodu muselo byť meranie rozdelené na viac častí (konkrétne 6) a nebolo by možné zaznamenať

celé ihrisko na jedenkrát. Roloženie kamier Argus v jednej časti je možné vidieť na obrázku 5.4.



Obr. 5.5: Heat mapa z merania zo softvéru od Sewia

## 5.3 Predspracovanie dát

### 5.3.1 Výber vzorkov Sewia

Vzorkovacia frekvencia tagu od Sewia má 10 Hz, pri meraní sa v každom bode zaznamenávajú údaje o polohe približne 15-20 sekúnd. Prvých 10 sekúnd sa nebralo do úvahy z dôvodu kmitania statívu, hlavne pri výške 3,5 metra, a do výsledného hodnotenia sú brané údaje z posledných 5-7 sekúnd. Preto každý bod disponuje minimálne 50 vzorkami o polohe pre X aj Y súradnicu.

### 5.3.2 Pootočenie súradníc

Svojím spôsobom sa dostali 2 systémy, ktoré bolo potrebné spojiť dokopy a základom bolo získať referenčné súradnice zo systému Qualysis. Pri ich vypočítaní sa využívali poznatky z analytickej geometrie, kde súradnice nových bodov, ktoré sú odvodené voči ihrisku, boli prepočítané pomocou nasledovných vzťahov.

Súradnice bodu A v priestore zo systému Qualysis sú dané hodnotou :

$$A = [Súradnica_X, Súradnica_Y] \quad (5.1)$$

Hodnota referenčnej súradnice pootočená voči ihrisku využíva na prepočet nasledovné rovnice [37] :

$$A_x = Súradnica_X * \cos \alpha + Súradnica_Y * \sin \alpha \quad (5.2)$$

$$A_y = Súradnica_X * \sin \alpha - Súradnica_Y * \cos \alpha \quad (5.3)$$

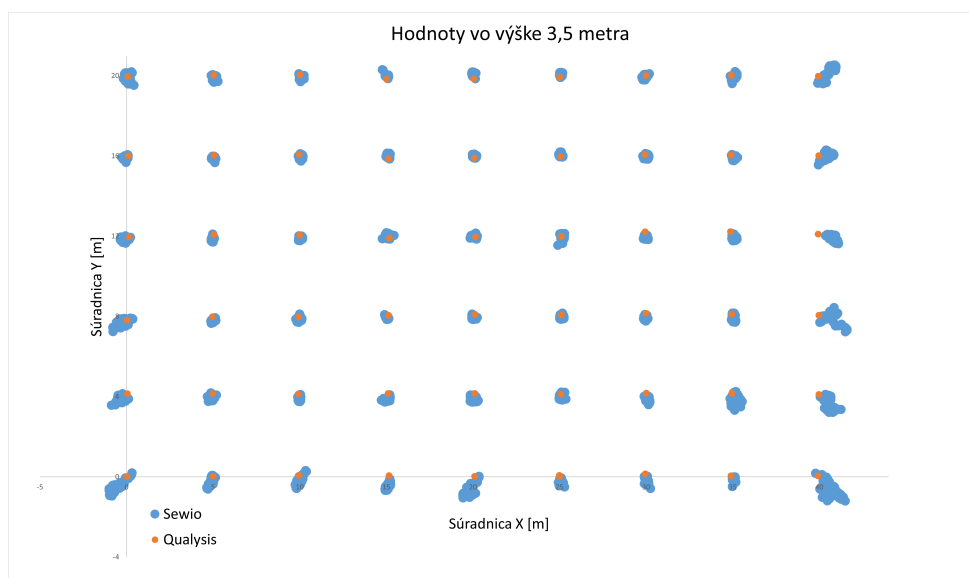
Pričom hodnota uhlu  $\alpha$  bola závislá na kalibrácii systému Qualysis, pretože začiatok súradnicovej sústavy je zvolený uložením kalibračného trojuholníka na zem, ktorý bol vždy volený tak, aby bol rovnobežný s čiarami ihriska. Tým pádom hodnota uhlu  $\alpha$  bola vždy rovná 180 stupňom, líšilo sa jedine znamienko.

## 6 Štatistická analýza experimentálnych dát

Overenie validity LPS prebiehalo pomocou štatistickej analýzy experimentálnych dát. Na začiatku prebehla jednoduchá vizuálna prieskumná analýza, kde boli vykreslené grafy získaných hodnôt súradníc z oboch senzorov v 2 výškach z LPS spolu s dopočítanými referenčnými súradnicami zo systému Qualysis.



Obr. 6.1: Hodnoty súradníc Sewia a Qualysisu voči ihrisku vo výške 1,5 metra



Obr. 6.2: Hodnoty súradníc Sewia a Qualysisu voči ihrisku vo výške 3,5 metra

Na obrázku 6.1 spolu s obrázkom 6.2 sú oranžovou farbou vyzobrazené referenčné súradnice zo systému Qualysis a modrou farbou namerané hodnoty súradníc v jednotlivých bodoch zo Sewia.

Jednoduchá vizuálna prieskumná analýza preukázala, že v niektorých bodoch sú odchýlky väčšie a naopak v niektorých menšie. Následne pomocou použitia štatistických testov je schopné preukázať kde sú najviac a najmenej presné oblasti.

## 6.1 Jednovýberový t-test

Jednovýberový t-test patrí medzi parametrické testy, pri ktorých sa musia overovať predpoklady. Normalita dát je považovaná na základe centrálnej limitnej vety, ktorá hovorí, že pri dostatočnom veľkom  $n$  ( $n > 30$ ) má aritmetický priemer nezávislých hodnôt približne normálne rozdelenie. Test bol aplikovaný na každú súradnicu, kde porovnáva stredné hodnoty vzorkov s referenčou hodnotou a bol prevádzaný pre každú výšku jednotlivo.

**H<sub>0</sub>** : Medzi nameranými hodnotami zo Sewia nie je významný rozdiel v porovnaní s referenčou hodnotou.

**H<sub>1</sub>** : Medzi nameranými hodnotami zo Sewia je významný rozdiel v porovnaní s referenčou hodnotou.

Hladina významnosti bola nastavená na hodnotu  $\alpha = 0.05$ . Výsledky testu s príslušnými p-hodnotami sú popísané v prílohách v tabuľke A.1 a A.2.

## 6.2 Priemerná absolútna odchýlka - PAO

PAO sa najviac používa ako miera rozptýlenosti okolo mediánu alebo aritmetického priemeru [38]. Namiesto použitia týchto dvoch metrík sa používa hodnota referenčnej súradnice. PAO sa počítalo v každom bode zvlášť pre X a Y súradnicu, spriemerovaním hodnoty X a Y súradnice bola vypočítaná PAO v jednom bode. Následne spriemerovaním cez všetky body v danej oblasti sa vypočítalo PAO v tejto oblasti. Vzorec pre výpočet PAO pre jednu súradnicu vyzerá nasledovne [38]:

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x_r| \quad (6.1)$$

$n$  - počet vzorkov,  $x_i$  - i-tá hodnota vzorku,  $x_r$  - hodnota referenčnej súradnice

## 6.3 ANOVA test

ANOVA test, alebo aj analýza rozptylu, patrí medzi parametrické testy a umožňuje porovnanie 3 a viac skupín súčasne, aby sa zistilo či medzi nimi existuje vzťah. V našom prípade budú analyzované 3 skupiny odchýlok medzi sebou, ďalej označované ako zóny.

**H<sub>0</sub>** : Medzi 3 zónami v rovnakej výške neexistuje štatisticky významný rozdiel.

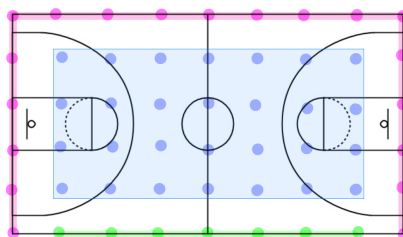
**H<sub>1</sub>** : Aspoň jedna dvojica zón sa líši v rovnakej výške.

Hladina významnosti bola nastavená na hodnotu  $\alpha = 0.05$ .

### 6.3.1 Rozdelenie ihriska na zóny

Na základe výsledkov z jednovýberového t-testu bolo ihrisko rozdelené na 3 zóny a celá ďalšia analýza sa bude prevádzať v kontexte k jednotlivým zónam, zobrazené vizuálne na obrázku 6.3.

1. **Stred ihriska** - modrá farba (28 bodov)
2. **Kraj ihriska v blízkosti steny** - fialová farba (19 bodov)
3. **Kraj ihriska bez steny** - zelená farba (7 bodov)



Obr. 6.3: Rozdelenie ihriska na zóny

### Predpoklady

Predpoklady na normalitu sú splnené na základe centrálnej limitnej vety, homogenita rozptylu overovaná podľa vzorca  $\frac{\max s_i}{\min s_i} \leq 3$ , pričom  $s_i$  je smerodajná odchýlka v jednotlivých skupinách. Vo výške 1,5 metra je homogenita rozptylu 2,48 a vo výške 3,5 metra 2,89.

### Vstupné hodnoty

Vstupom do testu sú hodnoty odchýlok, ktoré sa vypočítali Euklidovskou vzdialenosťou danú vzťahom :

$$d(p, q) = \sqrt{(q_{x_i} - p_{x_r})^2 + (q_{y_i} - p_{y_r})^2} \quad (6.2)$$

$q_{x_i}$  - i-tá hodnota X-súradnice Sewia,  $q_{y_i}$  - i-tá hodnota Y-súradnice Sewia,  
 $p_{x_r}$  - referenčná X-súradnica Qualysisu,  $p_{y_r}$  - referenčná Y-súradnica Qualysisu

Následne sa spojili hodnoty Euklidovských vzdialeností z bodov v každej zóne a svojím spôsobom vznikli 3 skupiny s hodnotami Euklidovských vzdialeností, ktoré sa analyzovali pomocou ANOVA testu. Každá skupina obsahuje iný počet vzorkov, čo ale testu ANOVA neprekáža. Test bol prevádzaný dvakrát, pre každú výšku jednotlivo.

### 6.3.2 Scheffe post hoc test

V prípade, že ANOVA zamietá nulovú hypotézu a prijíma alternatívnu hypotézu, prichádza následná post hoc analýza, aby sa zistilo, ktoré páry skupín sú medzi sebou štatisticky významné.

## 6.4 Párový t-test

Párový t-test, alebo t-test pre závislé výbery, patrí medzi parametrické testy a popisujú vzťah medzi závislými veličinami. Normalita testu sa predpokladá na základe centrálnej limitnej vety ( $n > 30$ ). Vstupom do testu sú hodnoty odchýlok vypočítané pomocou Euklidovskej vzdialenosti, viď kapitola 6.3.1.

V našom prípade porovnáваме rovnaké zóny na tom istom ihrisku v 2 rozličných výškach. Tento typ testu bol vykonaný trikrát pre každú zónu zvlášť :

1. *Stred ihriska vo výške 1,5 metra vs stred ihriska vo výške 3,5 metra*  
**H<sub>0</sub>** : Stred ihriska vo výške 1,5 metra sa významne nelíši od stredu ihriska vo výške 3,5 metra.  
**H<sub>1</sub>** : Stred ihriska vo výške 1,5 metra sa významne líši od stredu ihriska vo výške 3,5 metra.
2. *Kraj ihriska v blízkosti steny vo výške 1,5 metra vs kraj ihriska v blízkosti steny vo výške 3,5 metra*  
**H<sub>0</sub>** : Kraj ihriska v blízkosti steny vo výške 1,5 metra sa významne nelíši od kraju ihriska v blízkosti steny vo výške 3,5 metra.  
**H<sub>1</sub>** : Kraj ihriska v blízkosti steny vo výške 1,5 metra sa významne líši od kraju ihriska v blízkosti steny vo výške 3,5 metra.

3. *Kraj ihriska bez steny vo výške 1,5 metra vs kraj ihriska bez steny vo výške 3,5 metra*

**H0** : Kraj ihriska bez steny vo výške 1,5 metra sa významne nelíši od kraju ihriska bez steny vo výške 3,5 metra.

**H1** : Kraj ihriska bez steny vo výške 1,5 metra sa významne líši od kraju ihriska bez steny vo výške 3,5 metra.

Hladina významnosti bola v každom prípade nastavená na hodnotu  $\alpha = 0.05$ .

## 7 Výsledky

Na základe štatistickej analýzy bolo rozhodnuté, že najprv bude prebiehať analýza samostatných bodov v kapitole 7.1, a na základe výsledku z nej bude celá ďalšia analýza prevádzaná ku kontextu k jednotlivým zónam v kapitole 7.2.

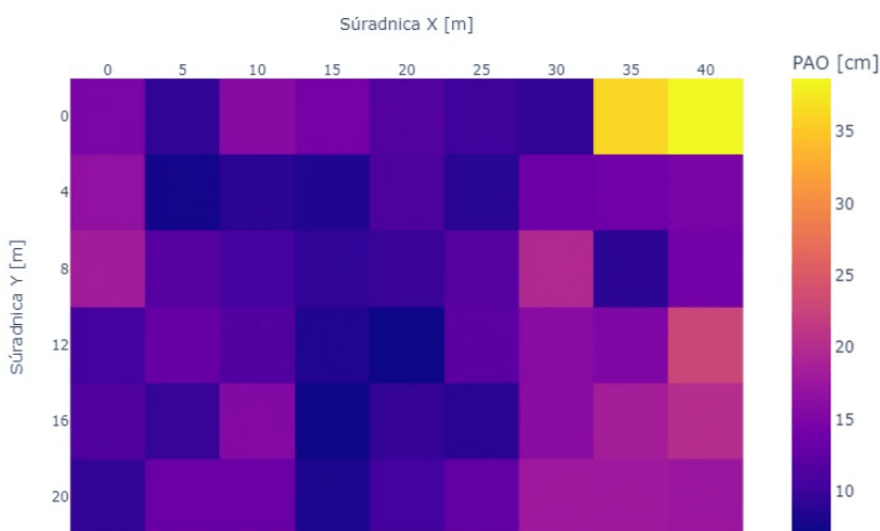
### 7.1 Analýza bodov

V oboch výškach samostatne bola zostrojená z hodnôt PAO heat mapa voči rozmerom ihriska, kde najväčšej priemernej PAO odpovedá žltá farba a postupne sa znižuje až do fialovej farby, ktorej odpovedá najmenšia priemerná hodnota PAO.

#### 7.1.1 Výška 1,5 metra

Na základe štatistickej analýzy bolo zistené, že pri použití jednovýberového t-testu na každý bod s príslušnou X a Y súradnicou a porovnaní s jeho referenčnou súradnicou vo výške 1,5 metra sa zamietá nulová hypotéza v 93 prípadoch z celkových 108, čo činí až 86 %. Príslušné p-hodnoty so súradnicami bodov sú uvedené v tabuľke A.1. P-hodnoty, pri ktorých sa nezamietá nulová hypotéza sú zvýraznené zelenou farbou.

Analýza samostatných bodov prebiehala pomocou výpočtu PAO a ich hodnoty sú zapísané v tabuľke v prílohach B.1.



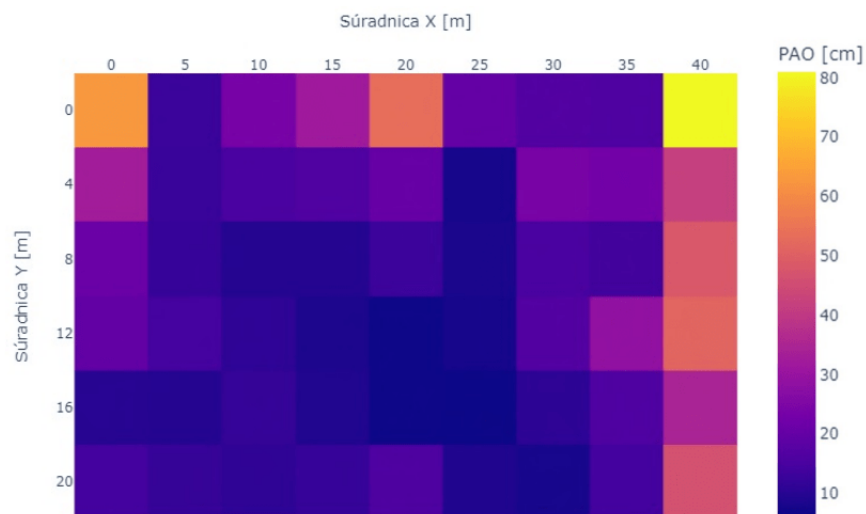
Obr. 7.1: Heat mapa z PAO vo výške 1,5 metra

Škála hodnôt na heat mape na obrázku 7.2 sa pohybuje v rozmedzí 7,03 cm až 38,67 cm. Najviac presný bod sa v tomto prípade ukázal presný stred ihriska

so súradnicami [20,12] s hodnotou 7,03 cm, ale za ním veľmi tesno nasleduje bod [15,16] s priemernou hodnotou 7,08 cm. Naopak najmenej presný bod sa nachádzal v pravom hornom rohu ihriska so súradnicami [40,0] a s priemernou hodnotou až 38,67 cm, bezprostredne pri ňom bod [35,0] s priemernou hodnotou 36,04 cm.

### 7.1.2 Výška 3,5 metra

Pri použití jednovýberového t-testu sa zamietá nulová hypotéza až v 95 % prípadoch, konkrétne 103 z celkových 108. Príslušné p-hodnoty so súradnicami bodov sú uvedené v tabuľke A.2.



Obr. 7.2: Heat mapa z PAO vo výške 3,5 metra

Škála hodnôt sa v tomto prípade pohybuje v rozmedzí od 6,07 cm až do 80,86 cm. Zaujímavým faktom je, že interval PAO sa výrazne rozšíril z oboch strán, čo zapríčinili hlavne väčšie odchýlky PAO vo viacerých bodoch.

Najpresnejší bod sa stal [25,16] nachádzajúci sa približne v strede ihriska s priemernou hodnotou 6,07 cm, ale za ním opäť presný stred ihriska [20,12] s hodnotou 6,25 cm.

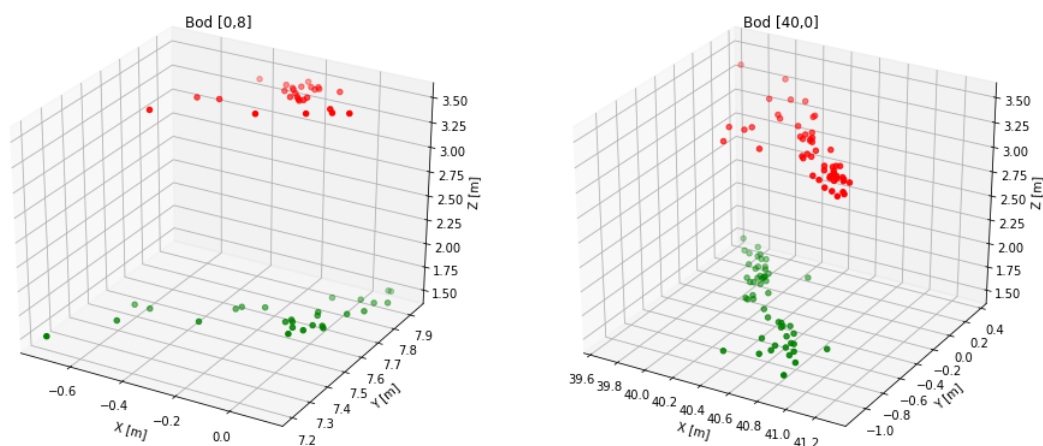
Na druhej strane bod s najväčšou hodnotou sa stal znovu pravý roh ihriska so súradnicami [40,0], ale tentokrát s väčšou priemernou PAO hodnotou 80,86 cm. Ľavý horný roh ihriska disponuje taktiež vysokou priemernou PAO hodnotou a dosahuje až 62,62 cm.

### 7.1.3 Porovnanie dvoch výšok

Na základe analýzy, jediný bod, v ktorom sa nezamieta nulová hypotéza pri jedno-výberovom t-teste v oboch výškach pri X ani Y súradnici je bod [25,12] pri výške 1,5 metra. Na základe čoho sa usudzuje, že je to jediný nameraný bod, v ktorom sa zhodujú namerané údaje zo Sewia so svojimi referenčnými súradnicami.

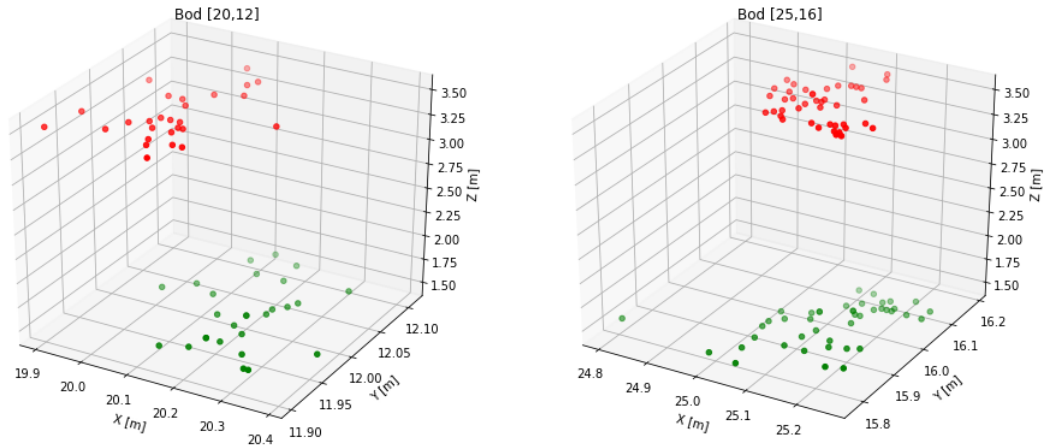
Z vizuálnej analýzy z heat mapy v 2 rozdielnych výškach je možné skonštatovať, že hodnota PAO je najväčšia v krajných bodoch, pri ktorých sa nachádza stena a smerom ku stredu sa jej hodnota znižuje.

V oboch výškach vyšiel bod s najväčšou PAO pravá horný roh ihriska. Na obrázku 7.3 sú červenou farbou znázornené vzorky vo výške 3,5 metra a zelenou farbou vzorky vo výške 1,5 metra. Tieto 2 vykreslené body majú spoločné, že oba sa nachádzajú na kraji ihriska pri stene. Je zreteľne vidieť vychýlenie nameraných vzoriek smerom ku stene, čo má za následok veľkú hodnotu PAO.



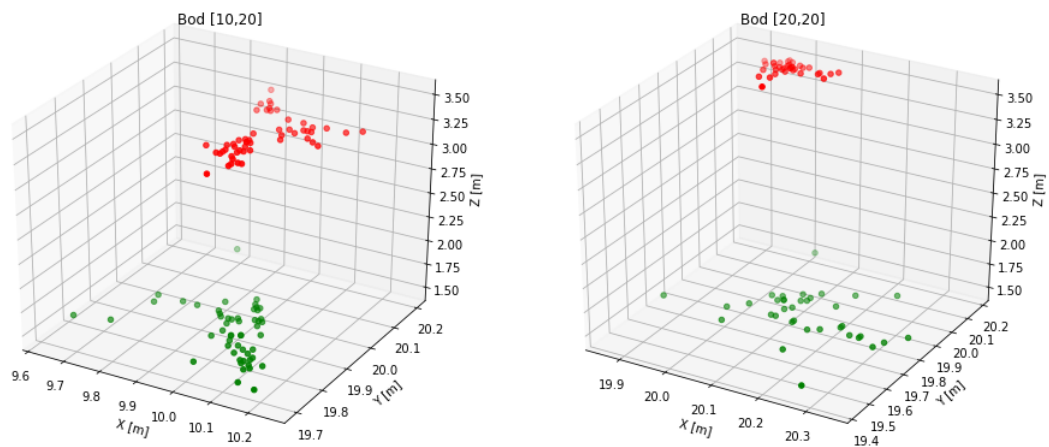
Obr. 7.3: Namerané vzorky Sewia v 2 rôznych bodoch na kraji ihriska pri stene

Na druhej strane na obrázku 7.4 presný stred ihriska vykazoval takmer v oboch výškach najmenšiu hodnotu PAO. Je možné vidieť, že rozptýlenie bodov v strede ihriska je náhodné na všetky strany a nevykazuje žiadne opakované usporiadanie vzoriek.



Obr. 7.4: Namerané vzorky Sewia v 2 rôznych bodoch v strede ihriska

Ako tretia zaujímavá oblasť bola zvolená kraj ihriska, pri ktorej sa nenachádza stena. Usporiadanie nameraných vzorkov je vizuálne veľmi podobné ako v strede ihriska, na základe čoho bolo rozhodnuté, že sa bude skúmať vplyv steny v krajných bodoch ihriska v porovnaní s oblasťami, kde sa stena nenachádza.



Obr. 7.5: Namerané vzorky Sewia v 2 rôznych bodoch na kraji ihriska bez steny

## 7.2 Analýza zón

Podľa analýzy jednotlivých bodov a na základe hodnôt v tabuľke 7.1 bolo rozhodnuté, že sa celá ďalšia analýza bude prevádzať ku kontextu k jednotlivým zónam. Rozdelenie ihriska na jednotlivé zóny je znázornené na obrázku 6.3.

Tab. 7.1: Hodnota priemerných PAO v daných oblastiach a výškach

	<b>1,5 m</b>	<b>3,5 m</b>
<i>Stred</i>	11,51 cm	12,89 cm
<i>Kraj bez steny</i>	13,35 cm	11,66 cm
<i>Kraj so stenou</i>	16,59 cm	33,51 cm

Z tabuľky je možno vidieť, že oblasti v strednej zóne a na kraji bez prítomnosti steny disponujú takmer podobnými hodnotami v 2 rozličných výškach, ale pri oblasti na kraji so stenou je významný rozdiel v 2 výškach.

### 7.2.1 Výška 1,5 metra

Hodnota F-štatistiky pri ANOVA teste bola vypočítaná na 61,49, kritická hodnota F vyšla na hodnotu 2,99. Na základe  $F\text{-štatistika} > F$ , sa zamietá nulová hypotéza a je možné skonštatovať, že aspoň jedna dvojica zón sa významne štatisticky líši.

Tab. 7.2: Výsledky ANOVA testu vo výške 1,5 metra

	<b>Počet</b>	<b>Suma</b>	<b>Priemer</b>	<b>Rozptyl</b>
<i>Stred</i>	1080	196,3732	0,1818	0,009451
<i>Kraj so stenou</i>	814	210,7663	0,2589	0,04276
<i>Kraj bez steny</i>	236	49,5161	0,2098	0,01209

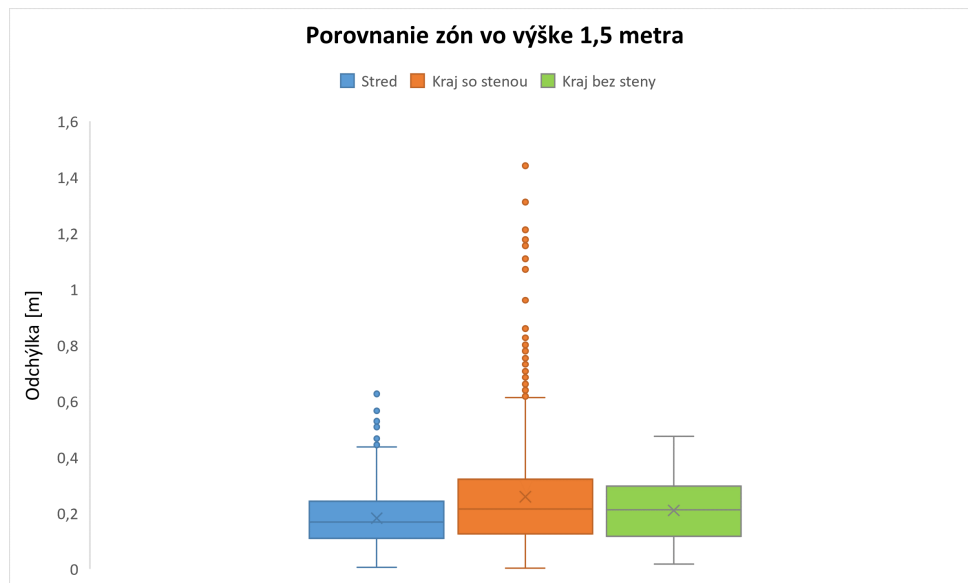
Kritická hodnota H pri Scheffe post hoc teste bola vypočítaná na hodnotu 5,99. Hodnoty sú zobrazené v tabuľke 7.3. V prípade, že je  $H >$  hodnota testu medzi dvoma oblasťami nastáva štatisticky významný rozdiel. Test ukázal, že každá oblasť s každou sa významne medzi sebou líšia.

Tab. 7.3: Výsledky post hoc testu vo výške 1,5 metra

	<b>Hodnota testu</b>
<i>Stred vs kraj so stenou</i>	122,7520
<i>Stred vs kraj bez steny</i>	6,7491
<i>Kraj so stenou vs kraj bez steny</i>	19,6331

Porovnanie zón pomocou boxplotu je zobrazené na obrázku 7.6. V oblasti kraji so stenou je vidieť veľká detekcia odľahlých hodnôt, čo je možné pozorovať aj pri vysokej vypočítanej hodnote PAO (16,59 cm). Oblasť v strede ihriska disponuje najmenším rozsahom hodnôt. V porovnaní oblastí v strede a kraji so stenou je vidieť mierna podobnosť, kvôli čomu kritická hodnota pri post hoc teste bola zamietnutá

len veľmi tesne. Oblasť v strede ihriska disponuje najmenším rozsahom hodnôt, čo nám potvrdzuje aj najmenšia PAO (11,51 cm) v tejto oblasti.



Obr. 7.6: Porovnanie zón pomocou odchýliek vo výške 1,5 metra

## 7.2.2 Výška 3,5 metra

Hodnota F-štatistiky pri ANOVA teste bola vypočítaná na 505,81, kritická hodnota F vyšla na hodnotu 2,99. Na základe  $F\text{-štatistika} > F$ , sa zamietá nulová hypotéza a je možné skonštatovať, že aspoň jedna dvojica zón sa významne štatisticky líši.

Tab. 7.4: Výsledky ANOVA testu vo výške 3,5 metra

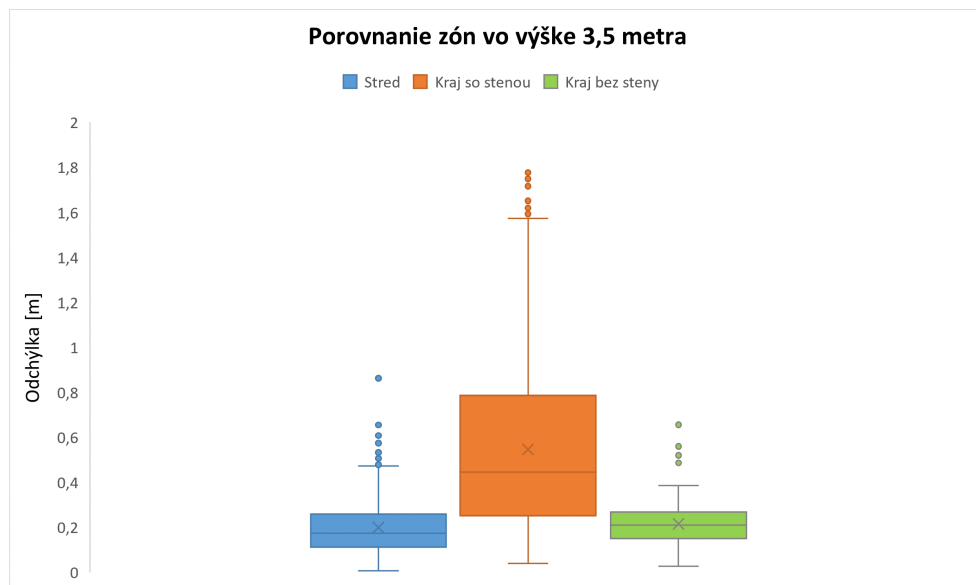
	Počet	Suma	Priemer	Rozptyl
<i>Stred</i>	1080	214,7274	0,1988	0,009451
<i>Kraj so stenou</i>	814	444,4480	0,5460	0,042765
<i>Kraj bez steny</i>	236	50,9309	0,2158	0,009829

Kritická hodnota H pri Scheffe post hoc teste bola vypočítaná na hodnotu 5,99. Hodnoty sú zobrazené v tabuľke 7.5. V prípade, že je  $H >$  hodnota testu medzi dvoma oblasťami nastáva štatisticky významný rozdiel. Test ukázal, že oblasť v strede ihriska a oblasť v kraji bez steny sa štatisticky nelíšia.

Tab. 7.5: Výsledky post hoc testu vo výške 3,5 metra

	Hodnota testu
<i>Stred vs kraj so stenou</i>	949,3573
<i>Stred vs kraj bez steny</i>	0,9483
<i>Kraj so stenou vs kraj bez steny</i>	338,48135

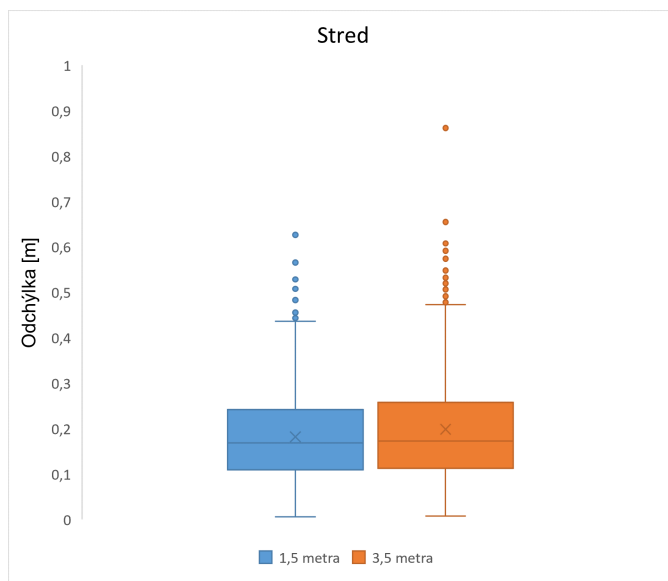
Porovnanie zón pomocou boxplotu je zobrazené na obrázku 7.7. V oblasti strede ihriska a na kraji bez steny je vidieť veľkú podobnosť, až takmer identický rozsah hodnôt, vďaka čomu ukázal aj post hoc test, že sa štatisticky významne nelíšia. Tento výsledok ukazuje aj podobnosť PAO hodnôt (12,89 cm a 11,66 cm). V porovnaní s oblasťou kraj pri stene je interval rozsahu hodnôt významne rozšírený, zvýšený je aj počet odľahlých hodnôt, čo dokazuje aj hodnota PAO (33,51 cm).



Obr. 7.7: Porovnanie zón pomocou odchýliek vo výške 3,5 metra

### 7.2.3 Porovnanie stredu ihriska v 2 výškach

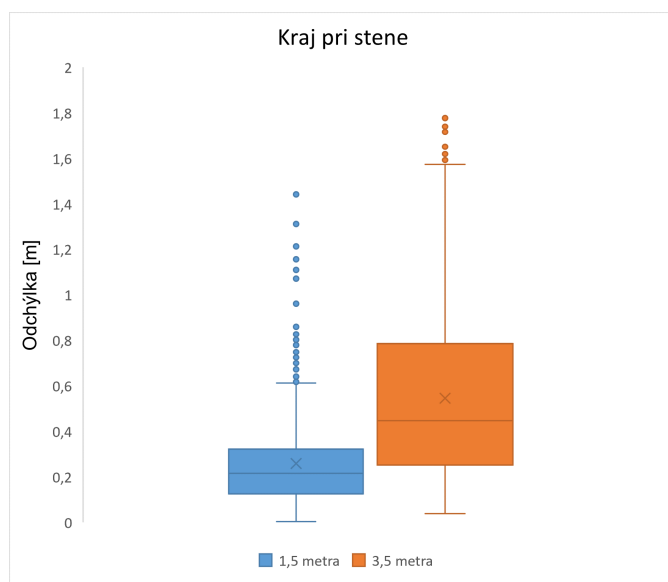
Na základe porovnania stredu ihriska v 2 výškach pomocou párového t-testu sa nezamieta nulová hypotéza ( $p$ -hodnota = 0,1027), čo znamená, že stred ihriska sa v 2 rozdielnych výškach štatisticky významne nelíši. Dokazujú to aj veľmi podobné priemerné PAO v každej výške (11,51 cm a 12,89 cm). Boxplot z odchýliek je zobrazený na obrázku 7.8.



Obr. 7.8: Porovnanie stredu ihriska pomocou odchýliek

### 7.2.4 Porovnanie kraju ihriska so stenou v 2 výškach

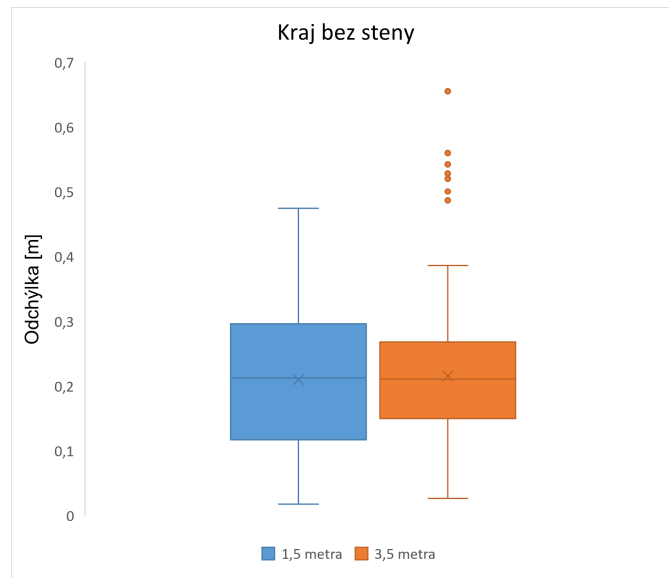
Pomocou výpočtu párového t-testu na kraji ihriska s výskytom steny sa zamieta nulová hypotéza ( $p\text{-hodnota} = 1,514^{-81}$ ), kde sa následne prijíma alternatívna hypotéza, ktorá hovorí, že kraj ihriska so stenou v 2 rozličných výškach sa štatisticky významne líši. Vypočítané priemerné PAO (16,59 cm a 33,51 cm) podporujú tento výsledok.



Obr. 7.9: Porovnanie kraju ihriska so stenou pomocou odchýliek

## 7.2.5 Porovnanie kraju ihriska bez steny v 2 výškach

Aplikovaním párového t-testu na vypočítané odchýlky bodov na kraji ihriska bez prítomnosti steny sa nezamieta nulová hypotéza ( $p$ -hodnota = 0,49511), čo prakticky znamená, že kraj ihriska bez steny sa 2 rozličných výškach štatisticky významne nelíši. Priemerná vypočítaná PAO v tejto oblasti (13,35 cm a 11,66 cm) toto tvrdenie podporuje.



Obr. 7.10: Porovnanie kraju ihriska bez steny pomocou odchýliek

## 8 Diskusia

Porovnanie LPS s použitým referenčným systémom od Qualysisu v rôznych zónach ihriska ukázalo, že výška tagu v porovnaní s umiestneným kotiev a stena v tesnej blízkosti krajoch ihriska má vplyv na celkové ukazatele tagu.

Na základe článku [39], kde bol skúmaný vplyv výšky kotiev na meranie využívajúce UWB v tímových športoch, konkrétne pri basketbale, prišli k tvrdeniu, že výška kotiev by mala byť v podobnej výške, v akej sú tagy umiestnené na chrbte hráča. Tvrdenie sa nemôže potvrdiť, pretože pri meraní vypočítaná priemerná PAO vo výške 1,5 metra odpovedá hodnote 13,54 centimetrov. Kotvy sú umiestnené vo výške 3,9 metra a tag vo výške 3,5 metra vykazoval vyššiu priemernú PAO s hodnotou 19,99 centimetra. Tento výsledok ovplyvňuje najmä kraj ihriska na pravej strane, čiara tvorená od súradnici [40,0] k súradnici [40,20], kde priemerná PAO vo výške 3,5 metra dosahuje hodnotu 50,36 centimetra v porovnaní s výškou 1,5 metra je viac ako dvojnásobne menšia s hodnotou 21,32 centimetra. Na tomto mieste nastáva výrazné vychýlenie vzoriek Sewia od referenčných súradníc. Výsledok mohol byť taktiež ovplyvnený nedostatočne dosiahnutou výškou v rovine kotiev, môže sa len dedukovať, že tag v rovnakej výške ako kotvy by dosahovali najväčšiu presnosť.

Validita UWB technológie bola rozoberaná v štúdií [40], ktorá sledovala dynamické zmeny smeru pohybu v strede ihriska a na krajoch ihriska. Výskumníci prišli k záveru, že vypočítaná chyba sa smerom ku krajom ihriska zväčšuje. So zisteným záverom sa súhlasí, lebo priemerná PAO vo výške 1,5 metra na kraji ihriska s prítomnosťou steny bola 16,35 cm a v kraji ihriska bez steny s priemernou PAO 13,35 cm sa smerom do stredu ihriska pri výške 1,5 metra znižuje a odpovedá priemernej PAO 11,51 cm. Vo výške 3,5 metra sa sleduje podobná postupnosť zvyšujúcej sa priemernej PAO ku krajom ihriska kde sa nachádza stena (33,51 cm) v porovnaní so stredom ihriska (12,89 cm) a krajom bez prítomnosti steny (11,66 cm).

V oblasti kraji ihriska pri stene, kde v oboch výškach vyšla najvyššia PAO (16,59 cm a 33,51 cm), nastáva takzvaný Fresnelov ohybový jav, ktorý vzniká v tesnej blízkosti prekážky z bodového zdroja. V prípade, že je bodový zdroj (tag) umiestnený v dostatočnej vzdialenosti od prekážky (stena), vlnoplocha je už rovinná. V bodoch v strede a na krajoch ihriska, kde sa stena nenachádza, tento jav už nenastáva a priemerná PAO sa znižuje. Parametre a veľkosť ihriska sú požadujúce na futsal. Futsalový hráč nabehá pri zápase v priemere 4500 metrov. Keby má tag umiestnený vo výške 1,5 metra a čisto teoreticky pohybuje po krajoch ihriska, kde sa nachádza stena, tag by mu ukazoval o cca 750 metrov viac. Na druhej strane, kotvy v našej telocvični sú umiestnené vo výške 3,9 metra a keby berieme v úvahu, tag v porovnateľnej výške ako kotvy, tak hráč, ktorý by behal len pri kraji ihriska so stenou pri vzdialenosti 4500 m by mu tag ukazoval až o 1500 m väčšiu hodnotu. Stále sa však

berie v úvahu, že aj najviac presná oblasť na ihrisku vo výške 1,5 metra dosahuje chybovosti v rádoch desiatkach centimetrov, ale stále v porovnaní s inými technológiami fungujúce na princípe rádiových vln ako Wi-Fi či RFID, ktoré dosahujú presnosť na niekoľko metrov, je tento výsledok veľmi prijateľný.

Výrobca od Sewia udáva priemyselne overenú presnosť do 30 centimetrov [36]. Pri statickom meraní sa usudzuje, že vadilita LPS v porovnaní s referenčným systémom Qualysis vo výške 1,5 metra, ktorá odpovedá priemernej osobe nesúcej tag na chrbte, má akceptovateľnú validitu. Pri výške 3,5 metra v oblasti kraja ihriska, kde sa nachádza stena v porovnaní s rovnakou oblasťou vo výške 1,5 metra je priemerná PAO je až 2-násobne vyššia, čo sa považuje za rapídny rozdiel potvrdené aj párovým t-testom.

LPS umiestnený v športovej hale na VUT Brne je určený predovšetkým na florbal. Pre dôkladnejšiu analýzu validity by bolo potrebné vykonať protokol s dynamickým charakterom v rozličných oblastiach ihriska a nastaviť ho štýlom, aby sa viazal na herné prvky vo florbale, predovšetkým rýchla a náhla zmena smeru.

## Záver

V dnešnej dobe je možné sledovať vývoj technológií na zachytenie pohybu resp. polohy objektov či osôb. Čoraz viac sa dostáva do popredia lokalizácia objektov vo vnútornom prostredí, aj keď sa na prvý pohľad zdá, že je komplikovanejšie. Najslubejšou technológiou sa stáva rádiová technológia UWB, ktorá disponuje veľkou šírkou pásma, vďaka čomu dokáže kompenzovať zložitosť vnútorného prostredia a signál dokáže efektívne prejsť prekážkami.

V bakalárskej práci bolo hlavným cieľom overenie validity LPS, ktorý funguje na princípe rádiových vln, konkrétne UWB technológia. Ako referenčný systém bola použitá technológia optického snímania od firmy Qualysis pracujúca s oveľa vyššou presnosťou na detekciu objektov ako LPS. Na začiatku bol popísaný princíp fungovania LPS systémov, porovnanie medzi vnútornou a vonkajšou lokalizáciou, na ne navязovala teória lokalizačných algoritmov UWB signálu. V ďalšej kapitole nasledovala charakteristika používaného LPS systému, ktorá bola ukončená popisom metodiky merania a predspracovania dát.

V praktickej časti sa overovala validita LPS. Konkrétne sa porovnávala presnosť tagu v rozličných zónach ihriska v 2 rozdielnych výškach. Na základe štatistickej analýzy bolo zistené, že v prípade bodov na kraji ihriska, kde sa nachádza stena, vykazujú najmenšiu presnosť v oboch výškach, z dôvodu prítomnosti Fresnelovho ohybového javu. Presnosť sa zvyšuje smerom ku stredu ihriska a vo výške, ktorá odpovedá približne rovine kotiev je stred ihriska porovnateľný s krajom ihriska bez prítomnosti steny. LPS sa považuje za validný, nakoľko sa priemerné odchýlky voči celému ihrisku pohybujú v rádoch desiatkach centimetrov a sú porovnateľné s výrobcom od Sewia.

# Literatúra

- [1] HUANG, H.; GARTNER, G. A Survey of Mobile Indoor Navigation Systems. [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z URL: <<http://www.geo.uzh.ch/~hhuang/pdfs/survey2010.pdf>>
- [2] PINO-ORTEGA, J.; OLIVA-LOZANO, J.; GANTOIS, P.; NAKAMURA, F.; RICO-GONZÁLEZ, M. Comparison of the validity and reliability of local positioning systems against other tracking technologies in team sport: A systematic review. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal Sports Engineering and Technology* 2021 s.10. Dostupné z URL: <<https://doi.org/10.1177/1754337120988236>>
- [3] CUTTRIDGE, D. Soccer Heat Map. [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z URL: <<https://sportblurb.com/soccer-heat-map/>>
- [4] BettingOdds. Heat Map. [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z URL: <<https://twitter.com/bettingoddsuk/status/1409184209944690697>>
- [5] LINK, D.; LAMES, M. Validation of electronic performance and tracking systems EPTS under field conditions. [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z URL: <<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0199519>>
- [6] BASTIDA-CASTILLO, A.; GÓMEZ-CARMONA, D.; RECHE, X; SÁNCHEZ, E. Accuracy and Inter-Unit Reliability of Ultra-Wide-Band Tracking System in Indoor Exercise. [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z URL: <[https://www.researchgate.net/publication/331561165\\_Accuracy\\_and\\_Inter-Unit\\_Reliability\\_of\\_Ultra-Wide-Band\\_Tracking\\_System\\_in\\_Indoor\\_Exercise](https://www.researchgate.net/publication/331561165_Accuracy_and_Inter-Unit_Reliability_of_Ultra-Wide-Band_Tracking_System_in_Indoor_Exercise)>
- [7] Geotab Team. What is GPS? [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z URL: <<https://www.geotab.com/blog/what-is-gps/>>
- [8] GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. 1st ed. John Wiley Sons, Inc., 2001. ISBN 0-471-35032-X.
- [9] XU, G. GPS Theory, Algorithms and Applications. 2nd ed. Springer, 2003. ISBN 978-3-540-72714-9.
- [10] ELBANHAR, F.; RIVENQ, A. New Approach of Indoor and Outdoor Localization Systems. 2012. InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0775-0

- [11] TREVIÑO, E. G. Trilateración: Sismos, GPS, rayos y teléfonos celulares, y la XIX. Olimpiada de Ciencias de la Tierra. In *GEOS*. 2014. [online]. Dostupné z URL: <<https://geos.cicese.mx/index.php/geos/article/view/40>>
- [12] PRIETO, J.; VELASCO, J. Errores y precision de las observaciones GNSS. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z URL: <<http://delegacion.topografia.upm.es/wpcontent/uploads/2016/03/TEMA-2-Errores-y-precisi%C3%B3n-de-las-observaciones-GNSS.pdf>>
- [13] LANGLEY, R. Dilution of precision. University of New Brunswick. [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z URL: <<http://www2.unb.ca/gge/Resources/gpsworld.may99.pdf>>
- [14] HUANG, H.; GARTNER, G. A Survey of Mobile Indoor Navigation Systems. [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z URL: <<http://www.geo.uzh.ch/~hhuang/pdfs/survey2010.pdf>>
- [15] GU, Y.; LO, A.; NIEMEGEREERS, I. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. 2009, [online]. [cit. 2021-11-19]. s. 13–32.
- [16] JEKABSONS, G.; KAIRISH, V.; ZURAVLYOV, V. Analysis of Wi-Fi Based Indoor Positioning Accuracy. In *Scientific Journal of Riga Technical University* 2011 [online]. [cit. 19.11.2021]. Dostupné z URL: <[https://www.researchgate.net/profile/Vadim-Zuravlyov/publication/220625904\\_An\\_Analysis\\_of\\_Wi-Fi\\_Based\\_Indoor\\_Positioning\\_Accuracy/links/5630e8ca08ae13bc6c354878/An-Analysis-of-Wi-Fi-Based-Indoor-Positioning-Accuracy.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vadim-Zuravlyov/publication/220625904_An_Analysis_of_Wi-Fi_Based_Indoor_Positioning_Accuracy/links/5630e8ca08ae13bc6c354878/An-Analysis-of-Wi-Fi-Based-Indoor-Positioning-Accuracy.pdf)>
- [17] WU, H.; MARSHALL, A.; YU, W. *Path planning and following algorithms in an indoor navigation model for visually impaired*. [online]. 2007. [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4271783>>
- [18] ABDULRAHMAN, A. et al. UltraWideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances. In *IEEE PerCom 2003*. may 2016, vol. 16. ISSN 1424-8220.
- [19] Local Positioning System (LPS).[online]. 2021 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <<https://www.techopedia.com/definition/30628/local-positioning-system-lps>>
- [20] JACHIMCZYK, B. Real-time Locating Systems For Indoor Applications. The Methodological Customization Approach. 2019. ISBN : 978-91-7295-373-4

- [21] RICO-GONZÁLEZ, M.; PINO-ORTEGA, J.; NAKAMURA, F. Past, present, and future of the technological tracking methods to assess tactical variables in team sports: A systematic review. 2020. [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1754337120932023>>
- [22] SAHINOGLU, Z.; GEZICI, S.; GUVENC, I. Ultra-wideband Positioning Systems. 2021. ISBN 978-0-521-18763-1
- [23] LIU, H. et al. U Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. [online]. [cit. 2022-20-3]. Dostupné z URL: <<https://sites.pitt.edu/~dtipper/2011/Survey1.pdf>>
- [24] BARSOCCHI, P. et al. Evaluating AAL Systems Through Competitive Benchmarking. Indoor Localization and Tracking. 1st ed. 2012. ISBN 978-3-642-33532-7.
- [25] GUANGLIANG, C. Accurate TOA-based UWB localization system in coal mine based on WSN. *Physics Procedia*. 2012. p. 534–540.
- [26] Introduction of IEEE 802.15.4 Technology. [online]. [cit. 2022-20-3]. Dostupné z: <<https://www.geeksforgeeks.org/introduction-of-ieee-802-15-4-technology/>>
- [27] BLÁHA, R. Systém pro personální lokalizaci. [online]. Praha, 2016 [cit. 2022-22-3]. Dostupné z: <<https://dspace.cvut.cz/handle/10467/65219>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra Kybernetiky. Vedúci práce Libor Přeučil.
- [28] SADLEKOVÁ, S. Lokalizace uvnitř budov s využitím UWB signálů. [online]. Brno, 2021. [cit. 2022-22-3] Dostupné z: <[https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=227144](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=227144). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brne, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedúci práce Ing. Stanislav Rozum.
- [29] CONNEL, C. What's the difference between Measuring Location by UWB, Wi-Fi and Bluetooth? [online]. [cit. 2022-20-3]. Dostupné z URL: <<https://www.electronicdesign.com/communications/what-sdifference-between-measuring-location-uwbi-fi-and-bluetooth>>
- [30] NIKOOKAR, H.; PRASAD, R. Introduction to ultra wideband for wireless communications. 2009. ISBN 978-1-4020-6632-0.

- [31] AL – LAZZAR, S. et al. Low complexity and high accuracy angle of arrival estimations. [online]. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z URL: <<https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2011-123>>
- [32] Difference Between Measuring Location By UWB, Wi-Fi, and Bluetooth.[online]. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <<https://www.electronicdesign.com/technologies/communications/article/21800581/whats-the-difference-between-measuring-location-by-uwb-wifi-and-bluetooth>>
- [33] Qualysis.[online]. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <[https://www.qualisys.com/?gclid=CjwKCAiAiKu0BhBQEiwAId\\_sK-mA65xYKZnMRxENEMNH84I4res7ymc3A4As5fqIj0CeuLUiVVBarhoCE1QQAvD\\_BwE](https://www.qualisys.com/?gclid=CjwKCAiAiKu0BhBQEiwAId_sK-mA65xYKZnMRxENEMNH84I4res7ymc3A4As5fqIj0CeuLUiVVBarhoCE1QQAvD_BwE)>
- [34] Information technology — Real-time locating systems (RTLS).[online]. 2014. [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: <<https://www.iso.org/standard/59801.html>>
- [35] UWB Technology.[online]. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <<https://kinexon.com/uwb-technology>>
- [36] UWB Tags for Indoor Location Tracking.[online]. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <[https://www.sewio.net/uwb-tags/?fbclid=IwAR1Zh-ohXEYs9uhLBTFUW2G2PpMrQAUPvh3YKNpMi\\_MVgvJxRkcIWR3IQvw](https://www.sewio.net/uwb-tags/?fbclid=IwAR1Zh-ohXEYs9uhLBTFUW2G2PpMrQAUPvh3YKNpMi_MVgvJxRkcIWR3IQvw)>
- [37] Posuny a otáčení souřadnic.[online]. [cit. 2022-30-4]. Dostupné z: <[http://84.242.77.122/\\_uc%282ebnice\\_CS/Geometrie/Zobrazovani\\_v\\_souradnych\\_systemech/Zmeny\\_souradnic\\_a\\_zmeny\\_poloh\\_utvaru/Posuny\\_a\\_otaceni\\_souradnic/index.htm?fbclid=IwAR0CY\\_cvSdFYsKbUotzetNFeM\\_X9q7dxQt90kqWD57mq61JRzSdPYm95axc](http://84.242.77.122/_uc%282ebnice_CS/Geometrie/Zobrazovani_v_souradnych_systemech/Zmeny_souradnic_a_zmeny_poloh_utvaru/Posuny_a_otaceni_souradnic/index.htm?fbclid=IwAR0CY_cvSdFYsKbUotzetNFeM_X9q7dxQt90kqWD57mq61JRzSdPYm95axc)>
- [38] Exploračná analýza.[online]. [cit. 2022-30-4]. Dostupné z: <<https://amos.ukf.sk/mod/book/tool/print/index.php?id=8408&chapterid=3165>>
- [39] ORTEGA, J. et al. The Influence of Antenna Height of the Measurement of Collective Variables Using an Ultra-Wide Band Based Local Positioning System in Team Sports. [cit. 2022-5-5]. <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/7/2424>>
- [40] SERPIELLO, F.; Validity of an ultra-wideband local positioning system to measure locomotion in indoor sports. [cit. 2022-5-5]. Dostupné z: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02640414.2017.1411867>>

## Zoznam symbolov a skratiek

<b>GNSS</b>	Globálny navigačný satelitný systém – Global Navigation Satellite System
<b>EPTS</b>	Elektronické systémy na sledovanie výkonu – Electronic Performance and Tracking systems
<b>GPS</b>	Globálny pozičný systém – Global Positioning System
<b>LPS</b>	Lokálny pozičný systém – Local Positioning System
<b>VID</b>	Polo-automatizované video systémy s viacerými kamerami – Semi-automatic multiple-camera video systems
<b>DOP</b>	Zriedenie presnosti – Dilution of precision
<b>IPS</b>	Vnútorne pozičné systémy – Indoor positioning systems
<b>OPS</b>	Vonkajšie pozičné systémy – Outdoor positioning systems
<b>NLOS</b>	Šírenie bez priamej viditeľnosti – Non-line-of-sight
<b>RFID</b>	Rádiofrekvenčná identifikácia – Radio frequency identification
<b>WLAN</b>	Bezdrôtová lokálna sieť – Wireless local area network
<b>UWB</b>	Ultra širokopásmové pripojenie – Ultra-wideband
<b>IEEE</b>	Ústav elektrotechnických a elektronických inžinierov – The Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>LR-WPAN</b>	Bezdrôtové osobné siete s nízkou rýchlosťou – Low-Rate Wireless Personal Area Networks Hybridný algoritmus – Hybrid algorithm
<b>H0</b>	Nulová hypotéza
<b>H1</b>	Alternatívna hypotéza

# Zoznam príloh

<b>A</b>	<b>Výsledky jednovýberového t-testu</b>	<b>58</b>
A.1	Tabuľka p-hodnôt vo výške 1,5 metra . . . . .	58
A.2	Tabuľka p-hodnôt vo výške 3,5 metra . . . . .	59
<b>B</b>	<b>Hodnoty PAO</b>	<b>61</b>
B.1	Tabuľka PAO vo výške 1,5 metra . . . . .	61
B.2	Tabuľka PAO vo výške 3,5 metra . . . . .	62

# A Výsledky jednovýberového t-testu

## A.1 Tabuľka p-hodnôt vo výške 1,5 metra

[X,Y]	[0,12]		[5,12]		[10,12]	
<b>p-hodnota</b>	2,56E-33	3,22E-34	1,21E-06	4,15E-07	4,37E-10	2,02E-10
[X,Y]	[0,0]		[5,0]		[10,0]	
<b>p-hodnota</b>	0,00027021	0,00252136	0,25960973	0,66801882	1,07E-05	3,05E-07
[X,Y]	[15,0]		[20,0]		[25,0]	
<b>p-hodnota</b>	0,00213855	2,66E-08	0,0473957	1,12E-16	0,01072251	0,0167313
[X,Y]	[15,12]		[20,12]		[25,12]	
<b>p-hodnota</b>	5,27E-09	0,02361586	0,00585568	5,86E-05	0,45923245	0,05769592
[X,Y]	[40,20]		[35,20]		[30,20]	
<b>p-hodnota</b>	6,50E-15	0,00079376	2,96E-06	5,17E-13	0,04355509	8,67E-21
[X,Y]	[40,0]		[35,0]		[30,0]	
<b>p-hodnota</b>	1,05E-10	2,09E-08	3,19E-09	3,81E-14	0,04739209	3,13E-06
[X,Y]	[10,16]		[5,16]		[0,16]	
<b>p-hodnota</b>	0,10069962	9,07E-21	7,05E-17	3,95E-17	1,21E-22	6,33E-23
[X,Y]	[10,4]		[5,4]		[0,4]	
<b>p-hodnota</b>	0,21577358	0,00834252	0,00791793	0,01152018	0,83563286	0,00047487
[X,Y]	[25,4]		[20,4]		[15,4]	
<b>p-hodnota</b>	4,10E-19	0,76327432	4,42E-13	9,64E-13	0,90985127	0,70698014
[X,Y]	[25,16]		[20,16]		[15,16]	
<b>p-hodnota</b>	3,85E-07	0,2635845	7,18E-13	0,02001513	0,01193535	0,030458
[X,Y]	[30,16]		[35,16]		[40,16]	
<b>p-hodnota</b>	0,01200011	1,75E-20	4,53E-13	8,40E-14	3,48E-13	1,12E-20
[X,Y]	[30,4]		[35,4]		[40,4]	
<b>p-hodnota</b>	0,40158092	4,77E-11	0,86390895	4,83E-07	7,30E-11	1,30E-06
[X,Y]	[0,20]		[5,20]		[10,20]	
<b>p-hodnota</b>	7,82E-05	4,81E-05	8,59E-20	1,83E-20	0,15981153	0,03682368
[X,Y]	[0,8]		[5,8]		[10,8]	
<b>p-hodnota</b>	0,00173664	3,40E-05	0,00085046	1,42E-05	6,55E-12	0,09081514
[X,Y]	[15,8]		[20,8]		[25,8]	
<b>p-hodnota</b>	4,97E-07	0,00216147	0,00285007	0,00010251	5,76E-14	8,30E-07
[X,Y]	[15,20]		[20,20]		[25,20]	
<b>p-hodnota</b>	1,40E-06	0,05979346	2,80E-06	0,17594461	0,06229783	1,40E-07
[X,Y]	[40,12]		[35,12]		[30,12]	

<b>p-hodnota</b>	2,24E-10	3,10E-12	3,17E-08	9,81E-33	0,00053952	2,24E-15
[X,Y]	[40,8]		[35,8]		[30,8]	
<b>p-hodnota</b>	0,00150361	3,87E-05	0,00625656	7,86E-09	9,06E-16	2,88E-12

## A.2 Tabuľka p-hodnôt vo výške 3,5 metra

[X,Y]	[0,12]		[5,12]		[10,12]	
<b>p-hodnota</b>	2,570E-25	3,190E-25	3,160E-17	1,760E-28	9,205E-10	1,760E-25
[X,Y]	[0,0]		[5,0]		[10,0]	
<b>p-hodnota</b>	1,20E-23	5,49E-28	9,97E-17	2,72E-20	0,09881442	3,11E-39
[X,Y]	[15,0]		[20,0]		[25,0]	
<b>p-hodnota</b>	2,09E-10	2,53E-64	1,94E-27	1,75E-59	4,79E-25	3,85E-49
[X,Y]	[15,12]		[20,12]		[25,12]	
<b>p-hodnota</b>	1,92E-12	1,36E-31	5,47E-09	2,96E-09	0,00198007	0,52983408
[X,Y]	[40,20]		[35,20]		[30,20]	
<b>p-hodnota</b>	9,06E-51	2,96E-15	7,79E-16	2,24E-10	3,44E-07	9,46E-19
[X,Y]	[40,0]		[35,0]		[30,0]	
<b>p-hodnota</b>	7,50E-06	0,00516174	1,94E-53	1,20E-32	1,41E-17	5,52E-37
[X,Y]	[10,16]		[5,16]		[0,16]	
<b>p-hodnota</b>	1,802E-34	5,972E-30	8,982E-03	1,644E-32	2,423E-25	2,004E-09
[X,Y]	[10,4]		[5,4]		[0,4]	
<b>p-hodnota</b>	2,01E-11	2,89E-19	3,01E-09	2,24E-42	1,15E-39	7,66E-36
[X,Y]	[25,4]		[20,4]		[15,4]	
<b>p-hodnota</b>	6,06E-12	4,97E-26	1,05E-07	1,18E-71	0,23268562	1,04E-69
[X,Y]	[25,16]		[20,16]		[15,16]	
<b>p-hodnota</b>	0,02052666	7,82E-09	0,00035466	2,22E-42	0,16469626	1,73E-27
[X,Y]	[30,16]		[35,16]		[40,16]	
<b>p-hodnota</b>	7,55E-05	4,77E-06	1,75E-56	1,12E-39	5,98E-71	0,15971648
[X,Y]	[30,4]		[35,4]		[40,4]	
<b>p-hodnota</b>	1,00E-11	9,23E-27	1,82E-39	3,21E-26	2,27E-81	3,76E-27
[X,Y]	[0,20]		[5,20]		[10,20]	
<b>p-hodnota</b>	3,280E-01	2,602E-06	4,888E-11	1,646E-29	1,299E-07	3,154E-16
[X,Y]	[0,8]		[5,8]		[10,8]	
<b>p-hodnota</b>	3,95E-24	3,25E-13	1,93E-15	8,63E-57	3,66E-16	2,06E-29
[X,Y]	[15,8]		[20,8]		[25,8]	
<b>p-hodnota</b>	2,39E-09	5,62E-21	5,34E-12	7,08E-31	0,17454164	1,53E-39

[X,Y]	[15,20]		[20,20]		[25,20]	
<b>p-hodnota</b>	0,77890332	3,22E-09	8,55E-19	2,67E-101	1,76E-32	2,85E-28
[X,Y]	[40,12]		[35,12]		[30,12]	
<b>p-hodnota</b>	2,15E-76	1,59E-30	2,52E-51	3,97E-56	0,00049519	5,14E-37
[X,Y]	[40,8]		[35,8]		[30,8]	
<b>p-hodnota</b>	1,15E-37	0,0358469	5,75E-42	2,41E-32	3,33E-16	4,02E-41

## B Hodnoty PAO

### B.1 Tabuľka PAO vo výške 1,5 metra

$[X,Y]$	$PAO [cm]$	$[X,Y]$	$PAO [cm]$
[0,0]	14,7835	[25,20]	12,77694
[0,12]	10,45381	[25,4]	8,77037
[0,16]	11,43083	[25,8]	11,86256
[0,20]	9,395119	[30,0]	9,252744
[0,4]	16,6615	[30,12]	15,89691
[0,8]	18,22593	[30,16]	16,03888
[10,0]	15,77723	[30,20]	17,75177
[10,12]	11,59553	[30,4]	13,57657
[10,16]	15,58456	[30,8]	19,65712
[10,20]	13,38724	[35,0]	36,0478
[10,4]	8,915103	[35,12]	15,13327
[10,8]	10,52635	[35,16]	18,40784
[15,0]	14,30679	[35,20]	17,75177
[15,12]	8,314806	[35,4]	13,90381
[15,20]	7,991608	[35,8]	8,923048
[15,4]	8,28748	[40,0]	38,67471
[15,8]	9,253045	[40,12]	22,81533
[16,16]	7,082339	[40,16]	20,11372
[20,0]	11,71263	[40,20]	17,4857
[20,12]	7,039321	[40,4]	14,71774
[20,16]	9,477121	[40,8]	14,15369
[20,20]	10,43281	[5,0]	9,23319
[20,4]	11,13012	[5,12]	13,16353
[20,8]	9,7575	[5,16]	9,551963
[25,0]	10,07404	[5,20]	13,38736
[25,12]	12,21188	[5,4]	7,549713
[25,16]	8,811432	[5,8]	12,00384

## B.2 Tabuľka PAO vo výške 3,5 metra

$[X, Y]$	PAO [cm]	$[X, Y]$	PAO [cm]
[0,0]	62,62211	[25,20]	8,769626
[0,12]	19,75777	[25,4]	7,373325
[0,16]	9,851667	[25,8]	7,938188
[0,20]	14,14363	[30,0]	16,88306
[0,4]	32,54288	[30,12]	16,75592
[0,8]	21,17216	[30,16]	10,75574
[10,0]	23,6269	[30,20]	7,66801
[10,12]	10,8309	[30,4]	23,94744
[10,16]	11,68766	[30,8]	15,07603
[10,20]	11,00896	[35,0]	16,09733
[10,4]	15,07953	[35,12]	28,85586
[10,8]	9,482619	[35,16]	16,00358
[15,0]	31,7666	[35,20]	14,161
[15,12]	8,199027	[35,4]	22,81878
[15,20]	12,13383	[35,8]	13,7996
[15,4]	16,26859	[40,0]	80,86816
[15,8]	9,553567	[40,12]	51,14002
[16,16]	9,004523	[40,16]	34,28771
[20,0]	53,25599	[40,20]	46,21985
[20,12]	6,254025	[40,4]	41,6926
[20,16]	6,28174	[40,8]	47,98724
[20,20]	15,80464	[5,0]	12,74033
[20,4]	20,3634	[5,12]	14,27586
[20,8]	12,95516	[5,16]	9,528045
[25,0]	20,08163	[5,20]	12,13046
[25,12]	7,332017	[5,4]	12,52525
[25,16]	6,071717	[5,8]	12,05