

# Radijska lokalizacija v notranjih okoljih: pregled pristopov

Andrej Hrovat, Mihael Mohorčič, Roman Novak, Tomaž Javornik

*Inštitut Jožef Stefan, Odsek za komunikacijske sisteme, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: andrej.hrovat@ijs.si*

**Povzetek.** Čedalje več storitev in aplikacij uporablja lokacijo uporabnika za njemu prilagojeno storitev. Natančno poznavanje lokacije je ključnega pomena tudi za izboljšanje energetske učinkovitosti mobilnih terminalov in radijskih omrežij, dinamično optimiziranje radijskih in omrežnih virov, vzpostavitev novih kognitivnih brezžičnih omrežij in izboljšanje uporabe storitev neposredne bližine. Vrsta aplikacij temelji na sledenju osebam in stvarjem ter določanju njihove lokacije tudi v notranjosti objektov. Ker globalni sistemi za določanje lokacije niso uporabni v kompleksnih notranjih okoljih in urbanih središčih, kjer je pogosto zahtevana tudi večja natančnost, so se razvile različne tehnologije in algoritmi, primerni za določanje lokacije v notranjosti. Prispevek je obsežen pregled obstoječih rešitev radijske lokalizacije, ki so primerne predvsem za notranja okolja. Poleg kratkega opisa izzivov, s katerim se soočamo pri radijski lokalizaciji, in pregledu meril učinkovitosti rešitev, podajamo tudi kratek pregled primernih brezžičnih tehnologij. Glavni poudarek prispevka je na razdelitvi in opisu različnih lokalizacijskih postopkov in algoritmov. Opisani so algoritmi za določanje lokacije na podlagi posrednega merjenja razdalje (triangulacija) in analize scene (pristop prstnega odtisa). Ker se funkcije lokalizacije pogosto uporabljajo tudi v energijsko omejenih senzorskih omrežjih in omrežjih, kjer so t. i. sidrna vozlišča z znano lokacijo razmeroma redko posejana, smo podali tudi pregled kooperativnih lokalizacijskih pristopov.

**Ključne besede:** radijska lokalizacija, notranja okolja, triangulacija, prstni odtis, kooperativna lokalizacija

## Radio Localization in Indoor Environments - Review of Approaches

An increasing number of services and applications are using the user's location for personalization. Accurate localization is crucial for improved energy efficiency of mobile terminals and radio networks, dynamic optimization of radio and network resources, setting up new cognitive wireless networks and enhanced use of the proximity services. The need for tracking and locating persons and belongings in indoor environments is continuously increasing. As the global positioning systems are inadequate for complex indoor and dense urban environments, where a higher precision is usually required, a variety of technologies and algorithms suitable for indoor positioning have been developed. The paper is a comprehensive review of the existing radio localization solutions suitable for indoor environments. In addition to a short description of the radio localization challenges and review of the solutions performance criteria, a brief overview of the suitable wireless technologies is provided. The main focus of the paper is on classification and description of various localization procedures and algorithms. Location determination algorithms based on indirect measurements of distances (triangulation) and scene analysis (fingerprint) are described. Since localization features are also frequently used in energy constrained sensor networks and networks where so-called anchor nodes with known location are relatively sparse, an overview of cooperative localization approaches is also given.

**Keywords:** radio localization, indoor environments, triangulation, fingerprinting, cooperative localization

## 1 UVOD

Lokalizacija je postopek določanja lokacije ljudi, živali, stvari in drugih objektov. Srednjeveške metode določanje lokacije, ki so temeljile predvsem na uporabi kompasa in neposredni vidljivosti objektov z znano lokacijo, je skoraj povsem nadomestila lokalizacija na podlagi radijskega signala, tj. radijska lokalizacija. Glede na vrsto okolja, v katerem se nahaja subjekt, ki mu želimo določiti lokacijo, ločimo dva osnovna tipa lokalizacije, in sicer lokalizacijo v zunanjih okoljih in lokalizacijo v notranjih okoljih. Satelitski navigacijski sistemi, kot so Global Positioning System (GPS), Glonass in Galileo, v večini primerov zadovoljivo določijo lokacijo v zunanjih okoljih, medtem ko v notranjosti objektov ni prevladala še nobena poznana tehnologija. Različni pristopi za lokalizacijo v notranjih okoljih se med seboj razlikujejo v natančnosti, ceni, tehnologiji, razširljivosti, robustnosti in varnosti rešitev. Ker imajo aplikacije različne zahteve in omejitve, je treba izbrati aplikaciji primerne lokalizacijske pristope. Za veliko problemov že obstaja primerna tehnologija [1, 2, 3].

Sistemi za lokalizacijo v notranjih okoljih omogočajo določanje lokacije subjektov v realnem času [4]. Postopki določanja lokacije se uporabljajo za različne aplikacije v stanovanjskih objektih, vključno z

zaznavanjem in sledenjem predmetov, zagotavljanjem asistencije starejšim in invalidom pri njihovih vsakodnevnih aktivnostih in za olajšano spremljanje zdravstvenega stanja in vitalnih znakov [5]. V javnih zgradbah se lokalizacijski sistemi uporabljajo za vodenje slepih in slabovidnih, vodenje turistov v muzejih, sledenje otrok itd. Pomembno področje uporabe je tudi medicinska nega v bolnišnicah, kjer se sistemi uporabljajo za sledenje pacientov in drage opreme. Poleg tega so sistemi nujni pri reševalnih operacijah policistov in gasilcev. Sledenje gasilca v goreči stavbi je ključno za njegovo varnost in uspešno upravljanje operacije. Uporablja se tudi za sledenje policijskih psov pri iskanju eksploziva v stavbah, lociranje ukradenih predmetov in iskanje zasilnih izhodov v zadimljenih prostorih. Z razvojem avtomatizacije in nadzora se lokalizacijski sistemi za notranja okolja čedalje pogosteje uporabljajo tudi v industriji (robotsko vodenje, pametne tovarne, sodelovanje med roboti) [6, 7].

Radijska lokalizacija temelji na merjenju parametrov sprejetega radijskega signala, kot so sprejeta moč, čas potovanja signalov, fazni zamik sprejetega signala [8]. Notranje radijsko okolje drugače popači radijski signal kot zunanje, zato se radijska lokalizacija v notranjih okoljih močno razlikuje od radijske lokalizacije v zunanjih okoljih. V primerjavi z zunanjim okoljem je notranje okolje kompleksnejše, saj po navadi vsebuje veliko objektov (kosi pohištva, stene, osebe), ki odbijajo ali absorbirajo radijski signal, kar povzroča širjenje radijskega signala po več poteh ter poveča njegovo zakasnitev. Različni objekti pogosto ovirajo neposredno pot med oddajnikom in sprejemnikom (LOS – Line-Of-Sight), kar vodi do nedoslednih časovnih zakasnitev na sprejemniku. Prisotnost objektov povzroča tudi visoko slabljenje signalov in razpršitev. Poleg tega pa so v notranjih okoljih prisotni tudi motilci (WiFi, Bluetooth, ZigBee, brezžični telefoni, mikrovalovne pečice itd), ki vnašajo napako pri zaznavanju parametrov radijskega signala.

Notranje okolje je tudi časovno spremenljivo. Spremeni se lahko tudi lokacija sidrnih (referenčnih) vozlišč, zato morajo robustni lokalizacijski sistemi zaznati te spremembe in se jim tudi prilagoditi. Po navadi aplikacije za notranja okolja zahtevajo tudi natančnejšo lokacijo v primerjavi z aplikacijami za zunanja okolja. Dobro poznavanje geometrije in elektromagnetnih lastnosti notranjih okolij pa omogoča lažje določanje lokacije.

Za lokalizacijske sisteme za notranja okolja obstaja pet osnovnih metrik kakovosti: 1. natančnost sistema, 2. pokritje in ločljivost, 3. zakasnitev pri posodabljanju lokacije, 4. vpliv infrastrukture zgradbe in 5. vpliv naključnih napak na sam sistem (napake zaradi interference in odbojev) [9].

Preostanek prispevka ima naslednjo strukturo. V drugem poglavju so opisani izzivi načrtovanja radijskih lokalizacijskih algoritmov in merila za določanje učinkovitosti posameznih rešitev. Tretjemu poglavju, v

katerem je podan kratek opis radijskih tehnologij, sledi poglavje, ki podaja različne delitve in klasifikacije tehnik radijske lokalizacije. Tehnike, ki določajo lokacije vozlišč posredno, z merjenjem metrik radijskega signala, se imenujejo triangulacijske in so opisane v četrtem poglavju. Sledi poglavje z opisom pristopov analize scene oziroma prstnega odtisa, ki določajo lokacijo vozlišč s primerjanjem trenutne izmerjene vrednosti z vrednostmi v podatkovnih bazah. V omrežjih z nezadostnim številom vozlišč z znano lokacijo se pogosto uporabljajo kooperativni lokalizacijski pristopi, ki so opisani v sedmem poglavju. Prispevek zaključimo z osmim poglavjem, ki vsebuje sklepne ugotovitve.

## 2 IZZIVI IN UČINKOVITOST LOKALIZACIJSKIH ALGORITMOV

Pri načrtovanju in implementaciji radijskih lokalizacijskih algoritmov je treba upoštevati omejitve uporabljene radijske tehnologije oziroma sistema. Poleg tega se je treba zavedati, da je v večini primerov podatek o lokaciji vhodni podatek osnovni aplikaciji in da iskanje lokacije ne sme okrniti funkcionalnosti osnovne aplikacije.

### 2.1 Izzivi načrtovanja lokalizacijskih algoritmov

Pogosto so vozlišča, predvsem v senzorskih omrežjih, z vidika zmogljivosti procesorja in razpoložljive energije precej omejena, kar onemogoča izvajanje računsko zahtevnih operacij. Komuniciranje ter zaznavanje in obdelava podatkov porabljajo energijo in tako skrajšujejo življenjsko dobo vozlišč. Senzorji pogosto tvorijo velika omrežja z več sto/tisoč napravami, zato morajo biti vozlišča poceni in preprosta za namestitve. Po navadi lokalizacija ni glavni namen omrežij, je pa pogosto zaželena lastnost in je v omrežjih potrebna za podporo različnim funkcijam. Ker je funkcija lokalizacije pogosto dodatek aplikaciji, mora biti kljub še zadovoljivim rezultatom čim cenejša. Zato morajo načrtovalci lokalizacijskih rešitev delati na algoritmih, ki minimalno vplivajo na porabo energije, ne potrebujejo dodatne strojne opreme ter jih je mogoče namestiti na preprost način in brez pretiranih dodatnih stroškov.

Natančnost lokalizacijskih algoritmov je po navadi odvisna predvsem od gostote vozlišč. Na primer shema, ki deluje na podlagi štetja skokov, zahteva visoko gostoto vozlišč, saj je razdalja določena kot približek števila skokov. Podobno velja tudi za algoritme, ki delujejo na podlagi sidrnih vozlišč, saj rešitev ne deluje, če sidrnih vozlišč na določenem območju ni dovolj. Zato je treba pri načrtovanju in analiziranju algoritmov upoštevati gostoto vozlišč, saj lahko visoka zahtevana gostota vozlišč močno podraži sistem.

Lokalizacijski algoritmi se pogosto soočajo s problemom določanja lokacije vozlišč na robu omrežja

oziroma območja pokritja. Vzrok tiči predvsem v manjšem številu razpoložljivih meritev dosega, s katerimi razpolagajo robna vozlišča, ki so lahko celo pridobljene iz iste smeri robnega vozlišča. Torej, robna vozlišča pomenijo težavo predvsem zaradi manjšega števila in slabše kakovosti razpoložljivih informacij, ki so potrebne za natančno določanje lokacije. Problem se bistveno poveča pri nekonveksni obliki omrežja, saj vozliščem, ki se nahajajo zunaj osnovnega konveksnega jedra, pogosto ni mogoče določiti lokacije oziroma je napaka lahko zelo velika.

## 2.2 Merila učinkovitosti

Mehanizmi za določanje lokacije v notranjih okoljih se med seboj razlikujejo v ceni, natančnosti, uporabljeni tehnologiji, razširljivosti, robustnosti in varnosti. Nekatere aplikacije zahtevajo nizkocenovne rešitve, medtem ko spet druge visoko natančnost (sledenje v medicini, sledenje v industrijskem okolju, sistem navigacije za slepe). Za določanje učinkovitosti posameznih rešitev obstajajo različni kriteriji, ki so na kratko opisani v nadaljevanju [2, 3, 7].

Natančnost je razlika razdalje med ocenjeno lokacijo in dejansko lokacijo naprave – večja ko je natančnost, boljši je sistem. Še vedno je razmeroma velik izziv in zahteva kompromis med natančnostjo in preostalimi merili učinkovitosti.

Razpoložljivost je definirana kot razpoložljivost lokacijske storitve v času, po navadi podana kot odstotek. Nanjo vplivajo različni dejavniki, kot sta zasičenost komunikacije in redno vzdrževanje.

Odzivnost je merilo, ki podaja hitrost posodabljanja lokacije premikajoče se tarče.

Pokritost je območje, ki ga pokriva storitev. Za učinkovitost sistema določanja lokacije je določitev pokritja na analiziranem območju zelo pomembna. Pokritje je tesno povezano z natančnostjo in ga lahko delimo na lokalno, razširljivo in globalno.

Spremembe v okolju lahko vplivajo na učinkovitost lokacijskega sistema. Zmožnost prilagajanja sistema na te spremembe se imenuje prilagodljivost.

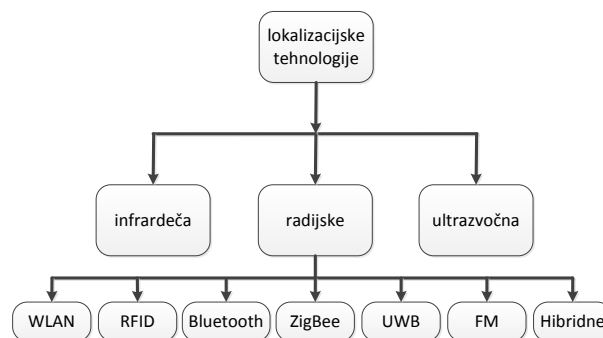
Razširljivost določa stopnjo, do katere sistem zagotavlja normalno funkcionalnost določanja lokacije ob razširitvi v eni ali dveh dimenzijah (število uporabnikov in geografsko). Je zaželena lastnost v skoraj vseh sistemih in opisuje zmožljivost sistema pri delovanju z večjim številom lokacijskih zahtev in večjem pokritju.

Stroški-cena sistema za določanje lokacije se lahko merijo v različnih dimenzijah: denar, čas, prostor in energija. Pojavljajo se na različnih ravneh sistema: namestitvev in vzdrževanje sistema, infrastrukturne komponente in naprave za določanje lokacije. Prihranki so mogoči s souporabo dela obstoječe infrastrukture, opreme in pasovne širine. Glede na samo zmožljivost sistema je določanje lokacije treba uravnovežiti tudi s kompleksnostjo obdelave signalov in algoritmov za oceno lokacije.

Zasebnost je za uporabnike sistema zelo pomembna. Zato je visok nadzor dostopa nad zbiranjem in uporabo uporabniških zasebnih podatkov ključnega pomena. Za izboljšanje zasebnosti uporabnikov morajo sistemi vsebovati varnostne rešitve, ki preprečujejo zlorabo podatkov.

## 3 RAZPOLOŽLJIVE BREŽIČNE TEHNOLOGIJE

Pri izbiri tehnologije za lokalizacijo v notranjih okoljih je treba najti ustrezno ravnotežje med kompleksnostjo in zmožljivostjo rešitve [2, 4]. V preteklosti so raziskovalci razporedili tehnologije za lokalizacijo v notranjih okoljih na različne načine (glede na strojno opremo, potrebo po obstoju omrežja, arhitekturo sistema, osrednji medij za določanje lokacije, predhodno poznavanje, tip senzorjev, odvisne in neodvisne od zgradb). Slika 1 prikazuje najpomembnejše brezžične tehnologije za lokalizacijo v notranjih okoljih [3, 7, 10].



Slika 1: Tehnologije za sisteme lokalizacije

Tehnologije za določanje lokacije v notranjih okoljih je smiselno razdeliti glede na infrastrukturo uporabljenega sistema. V osnovi jih lahko razdelimo na odvisne od zgradbe, v kateri se bodo uporabljale (uporabljajo namensko infrastrukturo ali pa infrastrukturo že vgrajeno v zgradbe), in neodvisne od zgradbe. Tehnologije, ki zahtevajo namensko infrastrukturo, so radijskofrekvenčna identifikacija (RFID), tehnologija ultraširokega pasu (UWB), infrardeča (IR), ultrazvočna in ZigBee. Med tehnologije, ki izrabljajo že obstoječo infrastrukturo v zgradbah, pa spadajo WiFi, celična omrežja in Bluetooth. Tehnologije, ki so popolnoma neodvisne od zgradb, kot so računska navigacija (ang. dead reckoning) in tehnologije na podlagi slik, ne potrebujejo nikakršne namenske strojne opreme. Pri pristopu računske navigacije lahko subjekt določi svojo trenutno lokacijo na podlagi poznavanja predhodne lokacije, hitrosti in smeri premikanja. Tehnologije na podlagi slik pa temeljijo na kamerah in so lahko neodvisne (ne potrebujejo podatkov o zgradbi) ali odvisne (uporabljajo posebne znake v zgradbah ali načrte zgradb) od zgradb.

#### 4 PRISTOPI OCENJEVANJA LOKACIJE IN ALGORITMI ZA LOKALIZACIJO

Radijska lokalizacija v notranjih okoljih se v osnovi deli na lokalizacijo brez naprav (device-free) in lokalizacijo na podlagi naprav (device-based) [11]. V prvem primeru subjekt lokalizacije ne nosi namenske naprave in je lociran oziroma sleden na podlagi svojih fizičnih lastnosti, kot je motnja telesa na širjenje radijskega signala. Pri drugem pristopu je subjekt lokalizacije opremljen z napravo. Glavni prednosti pristopa sta predvsem večja natančnost in cenejša namestitvev. Lokalizacijo na podlagi naprav delimo v štiri kategorije, in sicer na podlagi infrastrukture, prstnega odtisa, modelov razširjanja ter sočasne lokalizacije in mapiranja (SLAM; Simultaneous Localization and Mapping). Med naštetimi pristopi lahko lokalizacija na podlagi prstnega odtisa izrabi največjo paleto dostopne infrastrukture in ima največji potencial za obsežnejšo uporabo.

Za določanje lokacije obstajajo štiri različne topologije sistemov [12]. Prva temelji na mobilnem oddajniku signala in več fiksnih sprejemnih enotah, ki merijo oddani signal in pošiljajo meritve centralnemu vozlišču, ki izračuna lokacijo oddajnika. Drugi je sistem samolociranja, kjer merilna enota sprejema signal iz več oddajnikov na poznanih lokacijah in na podlagi zbranih meritev izračuna svojo lokacijo. Če je naprava brezžično povezana s sistemom lociranja, lahko pošlje svojo trenutno lokacijo na oddaljeno lokacijo. To se imenuje posredno oddaljeno lociranje in pomeni tretjo vrsto topologije sistema. Pri posrednem samo-lociranju, ki je četrti tip topologije sistema, pa so mobilni enoti rezultati meritev posredovani z brezžično povezave z oddaljene lokacije.

Na splošno je radijska lokalizacija sestavljena iz dveh delov, in sicer faze meritve in faze ocene lokacije [13]. Meritve obsegajo oddajo in sprejem signalov med strojnimi komponentami sistema. Sistem za lokalizacijo v notranjih okoljih je sestavljen vsaj iz dveh ločenih fizičnih naprav: oddajnika in sprejemnika oziroma merilne enote, ki po navadi vsebuje tudi večino inteligence sistema. Večina lokalizacijskih algoritmov za določanje lokacije uporablja meritve signala med sosednjimi vozlišči. Med fazo meritev se med sosednjimi vozlišči izmenjajo paketi. Iz radijskih signalov, ki pripadajo tem paketom, sprejemnik z merjenjem ali oceno ene ali več metrik signala pridobi informacije o razdalji ali kotu. Na prvo fazo lokalizacije vplivajo različni dejavniki, ki vnašajo naključne napake, in sicer šum, širjenje signala po več poteh, blokada signala, interferenca, napake pri sinhronizaciji vozlišč in drugi vplivi okolja. Poleg naštetega vnaša dodatne omejitve tudi izbrana tehnologija prenosa, od izbrane modulacijske sheme in sheme sodostopov, časovne sinhronizacije med vozlišči v omrežju, števila in vrste uporabljenih sprejemnih in oddajnih anten, izbrane nosilne frekvence, do omejitev virov napajanja na oddajniku in sprejemniku itd. V drugi fazi vozlišča na

podlagi izmerjenih metrik sprejetih signalov iz sosednjih vozlišč, lastnega stanja in stanja sosednjih vozlišč z uporabo lokalizacijskih algoritmov ocenijo svoje stanje.

Lokalizacijske algoritme delimo na [13,14]:

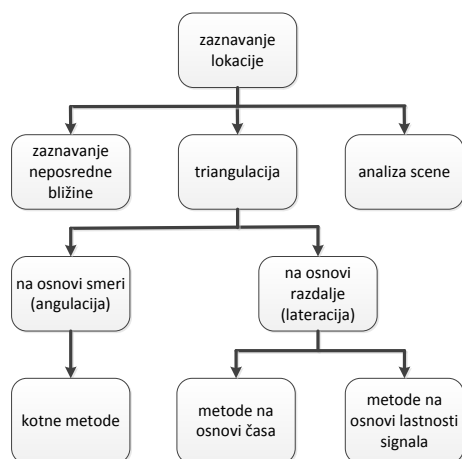
- Centralizirane oziroma porazdeljene. Pri centraliziranem pristopu so vse lokacije vozlišč določene na enem centralnem mestu. Le-to zbira meritve tako od sidrnih vozlišč z znano lokacijo kot tudi vozlišč z neznano lokacijo in izračuna nepoznane lokacije vseh vozlišč. Pristopi z uporabo centraliziranih algoritmov niso razširljivi in so posledično neprimerni za večja omrežja. Pri porazdeljenem pristopu vsako vozlišče določa svojo lokacijo na podlagi lokalno zbranih podatkov. Porazdeljeni algoritmi so preprosto razširljivi in primerni tudi za večja omrežja.
- Absolutne oziroma relativne. Absolutna lokalizacija se nanaša na lokalizacijo v enem samem vnaprej določenem koordinatnem sistemu. Pri relativni lokalizaciji pa se lokalizacija izvaja v okviru posameznih sosedov oziroma lokalnega okolja, zato se lahko koordinatni sistem spreminja od vozlišča do vozlišča.
- Nekooperativne oziroma kooperativne. Pri nekooperativnem pristopu vozlišča z neznano lokacijo komunicirajo le s sidrnimi vozlišči. Ker vsako vozlišče komunicira le z več sidrnimi vozlišči, je bodisi potrebna visoka gostota sidrnih vozlišč bodisi velik doseg sidrnih vozlišč. Pri kooperativnem lokalizacijskem pristopu vozlišča komunicirajo tudi med seboj in ni treba, da se nahajajo v radijskem dosegu več sidrnih vozlišč. Tako ni več potreb po visoki zgoščenosti oziroma dolgem dosegu sidrnih vozlišč. Ker lahko vozlišča komunicirajo tako s sidrnimi kot tudi z drugimi vozlišči v radijskem dosegu, pristop omogoča večjo natančnost lokalizacije in širšo pokritost območja.

Pristope radijske lokalizacije razdelimo tudi na podlagi: 1. algoritmov za določanje lokacije oziroma metod za določanje lokacije, ki izrabljajo različne vrste meritev signalov, kot so čas potovanja, kot prihoda in jakost signala, in 2. radijske infrastrukture za lokalizacijo (brezžična tehnologija, uporabljena za komunikacijo z/med napravami).

Razširjanje radijskega signala v notranjih okoljih je razmeroma specifično in zahtevno za modeliranje, saj so prisotni močan pojav širjenja signalov po več poteh, interference, šuma, blokiranja signala in specifični parametri posameznih fizičnih okolij. Poleg tradicionalnih algoritmov na podlagi triangulacije so bili za zmanjševanje napak meritev razviti različni lokalizacijski pristopi na podlagi analize scene in zaznavanja neposredne bližine. Posamezni algoritmi imajo določene prednosti in slabosti ter so zato primerni

za uporabo v različnih ciljnih aplikacijah in storitvah. Hkratna uporaba več vrst lokalizacijskih algoritmov lahko pripomore k bistveno boljši natančnosti lokalizacijske rešitve. Lokalizacijske tehnike lahko razdelimo v tri osnovne kategorije (slika 2) [15, 16]:

- triangulacija – lokacija določen na podlagi geometrijskih lastnosti trikotnika;
  - lateracija; za ocenitev razdalje med dvema vozliščema se uporablja metrika signala (algoritmi na podlagi dosega) - uporabljene metrike; sprejeta moč signala (RSS), čas prihoda signala (ToA), časovna razlika prihoda signala (TDoA), faza prihoda signala, število radijskih skokov in čas obhoda signala;
  - angulacija (na podlagi signalne matrike izračunajo nagib in azimut sprejemnega radijskega žarka) – metrika signala; smer prihoda signala (AoA);
- zaznavanje neposredne bližine (proximity detection);
- analiza scene.



Slika 2: Klasifikacija lokalizacijskih algoritmov

## 5 TRIANGULACIJA

Za določanje lokacije pristop triangulacije izrablja geometrijske lastnosti trikotnika. Ima dve izpeljanki: lateracijo in angulacijo. Lateracija oceni lokacijo vozlišča z merjenjem razdalje do več sidrnih vozlišč [17, 18]. Imenuje se tudi tehnika merjenja razdalje. Namesto neposrednega merjenja razdalje se po navadi prek izmerjenih metrik signala, kot so jakost sprejetega signala (RSS), čas prihoda signala (ToA) ali časovna razlika prihoda signala (TDoA), izračuna slabljenje oddanega signala, ali pa se prek množenja hitrosti radijskega signala s časom potovanja določi razdalja do neznanega vozlišča oziroma njegova lokacija. V nekaterih sistemih se za določanje razdalje uporabljata tudi čas obhoda signala (RTof) in faza prihoda signala.

Kotne metode določajo lokacijo vozlišča z izračunavanjem kotov relativno na več sidrnih vozlišč.

### 5.1 Čas prihoda signala (ToA)

Razdalja med neznanim vozliščem in merilnim vozliščem je neposredno proporcionalna času razširjanja signala. Za določanje lokacije v dveh dimenzijah morajo biti na voljo meritve ToA signala vsaj iz treh sidrnih vozlišč [19]. V sistemih, ki temeljijo na ToA, je treba izmeriti čas razširjanja signala le v eni smeri, na podlagi tega je nato izračunana razdalja med oddajnikom in merilnim vozliščem. Na splošno ima pristop dve osnovni zahtevi; 1. vsi oddajniki in sprejemniki v sistemu morajo biti sinhronizirani in 2. oddani signal mora imeti časovni žig, ki merilnemu vozlišču omogoča zaznavanje prepotovane razdalje signala. ToA je mogoče meriti z različnimi tehnikami signala, kot sta tehnika razpršenega spektra z neposrednim zaporedjem (DSSS) [20] ali tehnika ultraširokega pasu (UWB) [21].

Najpreprostejši pristop za določanje presečišč krožnic ToA, ki so določene na podlagi izračunanih razdalj in pomenijo morebitno lokacijo neznanega vozlišča, je geometrijska metoda. Lokacijo objekta je mogoče izračunati tudi s postopkom minimizacije vsote kvadratov nelinearne funkcije stroškov, imenovanim tudi algoritem najmanjših kvadratov (LS – Least Squares algorithm) [19, 22]. Algoritem predvideva, da neznano vozlišče, ki se nahaja na  $(x_0, y_0)$ , odda signal v času  $t_0$  in  $N$  baznih postaj na lokacijah  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $\dots$ ,  $(x_N, y_N)$  sprejme signal v časih  $t_1, t_2, \dots, t_N$ . Kot merilo uspešnosti je funkcija stroškov

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 f_i^2(\mathbf{x}), \quad (1)$$

kjer  $\alpha_i$  pomeni zanesljivost signala, sprejetega na merilnem vozlišču  $i$ , in je  $f_i(\mathbf{x})$  podana s

$$f_i(\mathbf{x}) = c(t_i - t) - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}. \quad (2)$$

V predhodni enačbi je  $c$  hitrost svetlobe, vektor  $\mathbf{x}$  pa je definiran kot  $(x, y, t)^T$ . Ta funkcija se oblikuje za vsako merilno vozlišče in je lahko z ustrežno izbiro  $x$ ,  $y$  in  $t$  tudi nič. Ocenjena lokacija je določena z minimiziranjem funkcije stroškov  $F(\mathbf{x})$ .

Za lokalizacijo v notranjih okoljih na podlagi ToA obstajajo še nekateri drugi algoritmi, kot so algoritem najbližjega soseda (CN – Closest-Neighbor) in uteževanja razlike (RWGH – Residual Weighting) [22]. Medtem ko algoritem CN za lokacijo uporabnika privzame lokacijo najbližjega sidrnega vozlišča, je algoritem RWGH nekakšen utežen algoritem najmanjših kvadratov in je primeren za LOS, NLOS in mešane LOS/NLOS radijske kanale. ToA je najnatančnejša tehnika za lokalizacijo v notranjih okoljih, saj omogoča izločitev vplivov več poti. Vendar zahteva po natančni sinhronizaciji med oddajniki in

sprejemniki močno poveča kompleksnost in posledično tudi podraži sistem.

## 5.2 Časovna razlika prihoda signala (TDoA)

Pri določanju relativne lokacije neznanega oddajnika se uporablja časovna razlika dospelja signala na več različnih sidrskih vozliščih. Za vsako meritev TDoA mora oddajnik ležati na hiperboloidu s konstantno razliko razdalje med dvema sprejemnikoma. Enačba hiperboloida je podana kot

$$R_{i,j} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2}, \quad (2)$$

kjer  $(x_i, y_i, z_i)$  in  $(x_j, y_j, z_j)$  pomenita fiksna sprejemnika  $i$  in  $j$ ,  $(x, y, z)$  pa koordinate neznanega vozlišča, ki ga je treba locirati. Eksaktno rešitev predhodne enačbe dobimo prek nelinearne regresije, laže pa jo je linearizirati prek razširitve Taylorjeve vrste in iterativnega algoritma [23]. Presečišče več krivulj določa morebitno lokacijo vozlišča.

Navadne metode za izračun ocene TDoA uporabljajo korelacijske tehnike. TDoA se lahko oceni prek križne korelacije med signaloma, ki sta sprejeta na paru sprejemnikov. Če je oddani signal  $s(t)$  sprejeti signal na sprejemniku  $i$   $x_i(t)$  in je pokvarjen s šumom  $n_i(t)$  ter zakasnen za  $d_i$ , velja  $x_i(t) = s(t - d_i) + n_i(t)$ . Podobno velja za signal, ki dospe na sprejemnik  $j$ . Funkcija križne korelacije teh dveh signalov je podana kot integracija produktov dveh časovno zamaknjenih sprejetih signalov prek časovne periode  $T$ :

$$\hat{R}_{x_i x_j}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) x_j(t - \tau) dt. \quad (4)$$

TDoA oceni vrednost  $\tau$ , ki maksimizira razliko razdalj  $R_{x_i, x_j}(\tau)$ . Za razrešitev časovnega žiga in določanje lokacije ni potrebna sinhronizacija izvora oddajanja. Pri uporabi pristopa TDoA je signal oddan ob neznanem času in sprejet na več sprejemnikih, ki pa morajo biti med seboj časovno sinhronizirani [24].

## 5.3 Jakost sprejetega signala (RSSI)

Predhodno opisana pristopa imata nekatere pomanjkljivosti. V notranjih okoljih je prisotnost neposredne vidljivosti med oddajnikom in sprejemnikom redka. Radijski signal se v notranjih okoljih po navadi širi po več poteh, kar popači čas in smer prihoda signala ter posledično zmanjšuje natančnost določanja lokacije. Alternativni način določanja razdalje do neznanne lokacije vozlišča je merjenje slabljenja jakosti radijskega signala. Metode na podlagi slabljenja signala s pomočjo modelov izgube poti pretvorijo razliko med jakostjo oddanega in sprejetega signala v ocenjeno razdaljo. Pristop je razmeroma privlačen, saj po navadi ni treba nameščati

dodatne strojne opreme, ne vpliva na porabo moči vozlišč in posledično tudi ne na stroške.

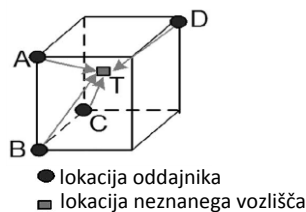
Zaradi večpotnega presiha in senčenja, ki sta v notranjih okoljih močno prisotna, so modeli izgube poti pogosto nenatančni. Parametri modelov so po navadi odvisni od okolja razširjanja signala. Natančnost metode je mogoče izboljšati z vnaprejšnjimi meritvami jakosti sprejetega signala na krogih s središčem v sprejemniku ali z meritvami na več sidrskih vozliščih [25].

## 5.4 Čas obhoda signala (RToF)

Metoda meri čas potovanja signala od oddajnika do merilnega vozlišča in nazaj. Pri pristopu ToA se zakasnitev računa z uporabo dveh lokalnih taktov v obeh vozliščih, medtem ko se pri pristopu RToF za beleženje časov oddaje in sprejema uporablja le eno vozlišče. Tako pristop do določene mere rešuje problem sinhronizacije med vozlišči. Ena od slabosti je merjenje oddaljenosti do več naprav, ki se mora pri tej metodi izvajati zaporedno, kar vnaša negotovost v zakasnitev. To je kritično predvsem v aplikacijah, kjer se naprave hitro gibljejo. Dodatna slabost je tudi nepoznavanje časa obdelave v odzivnem vozlišču, kar pride do izraza pri sistemih kratkega dosega. Alternativen pristop je uporaba koncepta moduliranega odboja [26], ki je primeren le za sisteme kratkega dosega. ToA algoritmi za določanje lokacije se lahko uporabljajo tudi pri RToF pristopu [27].

## 5.5 Faza prihoda signala (PoA)

Metode na podlagi faze prihoda signala določijo lokacijo vozlišča prek faze oziroma razlike faz signala [28]. Ob predpostavki, da vsi oddajniki oddajajo čisti sinusni signal iste frekvence  $f$  in brez faznega zamika, morajo za določitev faze signala na ciljnem vozlišču vsi signali imeti omejeno prehodno zakasnitev. Na sliki 3 so oddajniki, označeni z A do D, nameščeni v oglišča kocke. Zakasnitev je izražena kot razmerje valovne dolžine signala in je v enačbi  $S_i(t) = \sin(2\pi f t + \phi_i)$  označena z  $\phi_i = (2\pi f D_i)/c$ , kjer je  $i \in \{A, B, C, D\}$  in  $c$  hitrost svetlobe. Dokler je valovna dolžina oddanega signala daljša od diagonale kocke ( $0 < \phi_i < 2\pi$ ), se razdalja lahko oceni ( $D_i = (c\phi_i)/(2\pi f)$ ). Za določanje lokacije vozlišča se lahko nato uporabljajo isti algoritmi kot za metodo ToA.



Slika 3: Določanje lokacije na podlagi faze signala

Za natančnejše določanje lokacije v notranjih okoljih je mogoče pristop uporabljati v kombinaciji z metodami na podlagi ToA/TDoA oziroma RSS. Glavna slabost metode je, da za natančno določanje lokacije potrebuje neposredno vidljivost med oddajnikom in sprejemnikom, kar je, zlasti v notranjem okolju, po navadi težko zagotoviti.

### 5.6 Kotni pristopi – Smer prihoda signala (AoA)

Pri AoA je lokacija neznanega vozlišča določena s presekom več parov kotno usmerjenih linij. Za določitev lokacije vozlišča v dveh dimenzijah sta potrebni vsaj dve sidrni vozlišči in dve meritvi kotov [3]. Za izboljšanje natančnosti se za določanje lokacije uporablja tri ali več sidrnih vozlišč. Za določitev smeri sprejetega signala se uporabljajo ozko usmerjene antene ali polje anten.

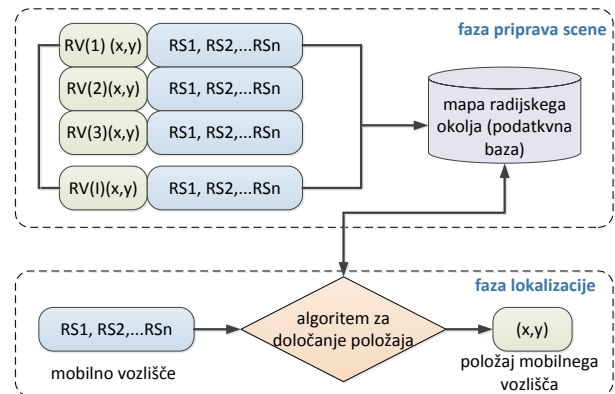
Glavna prednost pristopa je, da je lokacijo mogoče določiti že z dvema (2D) oziroma v primeru 3D lokalizacije s tremi merilnimi vozlišči. Poleg tega pa ni potrebna nikakršna časovna sinhronizacija med merilnimi vozlišči. Pristop ima tudi nekatere pomanjkljivosti, kot so dodatne antene za meritve smeri prihoda signala, ki podražijo sistem. Poleg tega so predvsem zaradi večpoptnosti, NLOS radijskega kanala, senčenja signala ter odbojev od sten in drugih objektov metode na podlagi AoA v notranjih okoljih razmeroma neuporabne. Omenjeni dejavniki lahko bistveno spremenijo smer prihoda signala in posledično močno zmanjšajo natančnost sistema za določanje lokacije v notranjih okoljih.

## 6 ANALIZA SCENE

Predvsem v mestnih in notranjih okoljih obstaja velika verjetnost blokade neposrednega žarka in širjenja radijskih žarkov po več poteh. V takih okoljih algoritmi za določanje lokacije na podlagi dosega niso najprimernejši. Za taka okolja so bili razviti algoritmi analize radijske scene oziroma radijskega okolja, ki jih imenujemo tudi algoritmi prstnega odtisa [29, 30].

Pri pristopu na podlagi analize scene, ki je prikazan na sliki 4, se v prvi fazi, imenovani tudi faza kalibracije oziroma faza priprave scene, zberejo značilnosti (t. i. prstni odtis) za vse mogoče lokacije na izbranem območju. V vsaki izbrani točki analiziranega območja se s pomočjo modelov širjenja radijskega signala izračunajo ali izmerijo lastnosti radijskih signalov sidrnih vozlišč ( $RV(i)(x,y)$ ) in zapišejo kot vektor ( $RSli(1), RSli(2), \dots, RSli(j), \dots, RSli(N)$ ), kjer je  $i$ -ta lokacija,  $j$ -to sidrno vozlišče in  $N$  število sidrnih vozlišč. Sledi gradnja map radijskega okolja za izbrano območje. Mapa radijskega okolja je podatkovna baza vnaprej določenih koordinat z različnimi karakteristikami radijskega signala (RSS, koti signala, čas razširjanja signala, impulzni odziv kanala, profil močnostne zakasnitve), ki se imenujejo prstni odtisi

signala. Za vsak prstni odtis mora biti na voljo meritev oziroma izračunana vrednost, ki vključuje informacije o vseh sidrnih vozliščih in njihovih karakteristikah sprejetega signala. Med samim delovanjem sistema lokalizacije, v drugi fazi lokalizacije, neznanu vozlišču izmeri lastnosti signala na neznani lokaciji. Za ugotovitev trenutne lokacije se nato izmerjene vrednosti jakosti radijskih signalov primerjajo z vrednostmi v podatkovni bazi oziroma prstnim odtisom. Prstni odtis najbližje izmerjenemu določa lokacijo vozlišča.



Slika 4: Blok diagram metode prstnega odtisa

Pristop ne potrebuje namenske strojne opreme, niti časovne sinhronizacije med vozlišči. V celoti je lahko implementiran programsko, kar v primerjavi s predhodno predstavljenimi sistemi na podlagi meritev časov in kotov zmanjšuje kompleksnost in znižuje ceno sistema. Glavna slabost pristopa je predvsem težaven in dolgotrajen proces kalibracije oziroma gradnje radijskega okolja. Pristop je izjemno občutljiv na spremembe okolja, kot so premikanje objektov v zgradbi (ljudi, opreme), ukloni in odboji, kar vpliva na razširjanje radijskega signala. Za vzdrževanje natančnosti je potreben proces kalibracije, ki obsega ponovno preračunavanje vnaprej določenih map jakosti signala oziroma meritev lastnosti radijskega signala, periodično ponavljati. V ta namen se lahko uporabljajo tehnike zaznavanja množice (crowdsourcing) [31], ki pa ne morejo zajeti informacij o spremembah lokacij, oddajnih močeh itd. sidrnih vozlišč.

Za primerjavo prstnih odtisov se uporabljajo različne tehnike prepoznavanja vzorcev, vključno z metodo najmanjše kvadratne napake, največje podobnosti ter naprednejše metode na podlagi nevronske mreže.

### 6.1 Deterministični pristopi

Določanje lokacije prek Evklidove razdalje [32] je preprost pristop prstnega odtisa, ki izračuna razliko med trenutno izmerjeno vrednostjo in vrednostjo na lokaciji  $m$  v podatkovni bazi, podano z

$$D_E(X_{t,m}, X_r) = |\overline{X_{t,m}} - \overline{X_r}|, \quad (5)$$

kjer sta  $X_{i,m}$  and  $X_r$  vektorja prstnih odtisov iz podatkovne baze oziroma trenutno izmerjeni prstni odtis. Za ocenjeno lokacijo je izbrana lokacija z najmanjšo razdaljo. Po navadi je ocenjena lokacija dodana v nabor najbolj ocenjenih lokacij. Torej je mogoče namesto ene same lokacije, ki pomeni najboljšo ujemanje med podatkovno bazo in trenutno meritvijo, uporabiti k najbolj ocenjenih lokacij in jih povprečiti ter tako oceniti končno najverjetnejšo lokacijo vozlišča. Pristop, ki uporablja razširjen nabor najbolj ocenjenih lokacij (prstnih odtisov), se imenuje metoda k najbližjih sosedov (kNN – k Nearest Neighbours). Medtem ko je pri uporabi neutežene kNN metode vsakemu prstnemu odtisu, ki je izbran kot najboljši približek lokacije dodeljena enaka utež, so pri uteženi kNN (WkNN – Weighted kNN) metodi vsakemu prstnemu odtisu dodeljene določene uteži [33]. V [34] je predlagan algoritem, imenovan napovedovani kNN (PkNN – Predicted kNN), ki za ocenitev trenutne lokacije vozlišča poleg metode WkNN uporabi tudi njegovo predhodno lokacijo in hitrost premikanja. V [35] so izboljšali natančnost ocene lokacije uporabnika s pristopom filtriranje grozdov kNN (CFK – Cluster Filtered kNN), ki za določitev k najbližjih sosedov uporablja tehnike grozdenja.

## 6.2 Verjetnostni pristopi

Deterministične metode, kot na primer metode kNN, v fazi določanja lokacije za izračun razdalje uporabljajo srednjo vrednost vzorcev. Na ta način surovi podatki zbrani v fazi kalibracije niso upoštevani celovito. Statistični oziroma verjetnostni pristopi učinkoviteje izrabljajo vzorce meritev, zbranih med fazo kalibracije [36]. Osnovna ideja verjetnostnih metod pri lokalizaciji s prstnim odtisom je izračun pogojne funkcije gostote verjetnosti (PDF – Probability Density Function) stanja  $x$  pri podani meritvi lastnosti radijskega signala  $y$ . Z upoštevanjem Bayesianovega pravila velja

$$p(x|y) = \frac{p(x|y)p(x)}{p(y)} \quad (6)$$

Funkcija  $p(y/x)$  se imenuje funkcija verjetnosti meritve  $y$ ,  $p(x)$  pa se imenuje a prior in je neodvisna od meritve. Rezultat deljenja zmnožka a prior in verjetnosti z normalizirano konstanto  $p(y)$  je pogojna PDF  $p(x|y)$ , ki se imenuje posterior stanja  $x$ .

Za določanje verjetnostne funkcije se lahko uporabljajo neparametrični pristopi, kot sta na primer metoda histogramov in metoda jedra, in parametrični pristopi, kjer je histogram aproksimiran z znano funkcijo (Gaussovo ali log-normalno distribucijo). Omenjeni pristopi se opirajo na model merjenja in predvsem na neparametrično in parametrično aproksimacijo normaliziranih histogramov prstnih odtisov [37].

Obstajajo tudi pristopi, ki kot prstni odtis signala uporabljajo profil močnostne zakasnitve (PDP – Power

Delay Profile). Ta vsebuje informacije o moči signala in časih dospelja različnih poti žarkov med izbranim oddajnikom in sprejemnikom. Pri sinhroniziranih omrežjih prvi vrh izmerjenega PDP določa čas dospelja (ToA) sprejetega signala, ki se uporablja v algoritmičnih ToA. Poleg tega pristop prstnega odtisa na podlagi PDP (s časovno referenco) izrablja celotni izmerjeni PDP (celotno časovno raznolikost). Zato lahko sistem za določitev lokacije uporabi samo podatke iz ene same točke, čeprav je sprejemanje signala z več točk še vedno zelo zaželeno. Pri nesinhroniziranih omrežjih (brez časovne reference), kjer ToA ni poznan, se lahko izmerjeni PDP ujema s katerokoli zakasnjeno verzijo PDP iz podatkovne baze. V tem primeru je treba sprejeti signal z več točk, saj je mogoče prek izmerjenih PDP določiti TDoA med različnimi oddajniki.

Impulzni odziv kanala (CIR - Channel Impulse Response) v celoti opiše večpotni radijski kanal in ohranja lokacijsko odvisnost ter je zelo primerna metrika signala za določanje lokacije s postopkom prstnega odtisa [38]. Da bi bile storitve lokalizacije dostopnejše uporabnikom obstoječih in prihajajočih širokopasovnih tehnologij, so v [39] predlagali aproksimacijo CIR iz rezultatov ocene kanala na sprejemniku. V OFDM sistemih je lahko ocena kanala predstavljena kot vektor  $N$  kompleksnih elementov, ki opisujejo kanal v frekvenčnem prostoru, kjer vrednost  $N$  pomeni število podnosilcev. CIR je v časovnem prostoru določen kot inverzna Fourierova transformacija (IFT – Inverse Fourier Transform) diskretnega vektorja ocene kanala v frekvenčnem prostoru. Za radijske kanale v notranjih okoljih velja, da je po navadi največja zakasnitev razširjanja po navadi manjša od 500 ns, kar ustreza določenemu številu vzorcev v CIR. Preostali vzorci so nepomembni za lokalizacijo. Za določanje lokacije mora biti vrednost SNR dovolj visoka. Ob povečanju pasovne širine sistema se poveča tudi časovna ločljivost in posledično število nepomembnih časovnih vzorcev postaja manjše. Za doseg ustreznosti natančnosti in računske učinkovitosti je treba na podlagi pasovne širine sistema določiti ustrezno število časovnih vzorcev.

## 6.3 Nevronske mreže

Pri pristopu na podlagi nevronske mreže se v fazi zajemanja podatkov zbirajo meritve moči sprejetega signala in pripadajoče lokacije. Moči sprejetega signala se med učno fazo uporabijo kot vhodni podatki, pripadajoče lokacije pa kot izhodni podatki, kjer se določajo uteži povezav med nevroni v nevronske mreži [40]. Za lokalizacijo z nevronskimi mrežami se po navadi uporablja večplastni perceptron z eno skrito plastjo. Vhodni vektor moči sprejetega signala se pripelje na sinapse vhodne plasti večplastnega perceptrona, kjer se pomnoži z utežmi, ki so bile določene med učno fazo, naknadno pa se po potrebi na nevronih vhodne plasti doda še enosmerni pribitek za dodatno kompenzacijo vhodnega signala. Vhodni



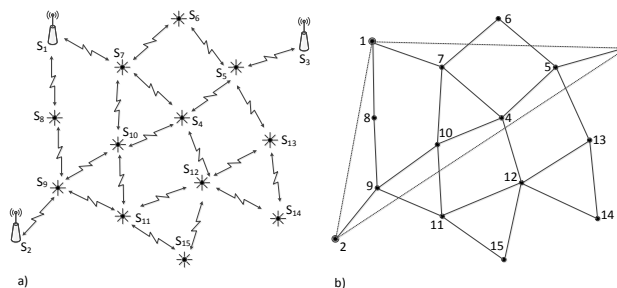
nevroni nato na podlagi svoje prenosne funkcije izračunajo izhodni signal, ki se pelje na vhode vseh nevronov v skriti plasti večplastnega perceptrona. Izhod sistema je definiran kot vektor z dvema elementoma ali kot vektor s tremi elementi, kar je odvisno od tega, ali iščemo oceno lokacije v dveh ali v treh dimenzijah.

## 7 KOOPERATIVNA IN NEKOOPERATIVNA LOKALIZACIJA

Pri nekooperativnem lokalizacijskem pristopu komunikacija obstaja samo med navadnimi in sidrnimi vozlišči, ki imajo znano lokacijo. Vsako vozlišče mora komunicirati z več sidrnimi vozlišči, kar zahteva razmeroma veliko gostoto sidrnih vozlišč oziroma dolg doseg sidrnih vozlišč. Pri gradnji brezžičnega sistema so stroški gradnje in vzdrževanja omrežja ključnega pomena. Zato je po navadi število sidrnih vozlišč z znano lokacijo omejeno in razmeroma redko. Poleg tega so vozlišča pogosto tudi energijsko omejena, zlasti v senzorskih omrežjih, kar zmanjšuje doseg posameznih vozlišč. Posledično veliko vozlišč ne sprejema signala iz zadostnega števila sidrnih vozlišč z znano lokacijo. V takih primerih je mogoče lokacijo vozlišč določiti z uporabe lokalizacije z več skoki oziroma kooperativne lokalizacije. Kooperativna lokalizacija uporablja poleg komunikacije med vozlišči in sidrnimi vozlišči tudi neposredno komunikacijo med vozlišči, ki imajo neznan lokacijo. Pri izrabljanju neposredne komunikacije med vozlišči ni potrebno, da so vsa vozlišča v dosegu več sidrnih vozlišč, kar posledično pomeni manjšo potrebno gostoto sidrnih vozlišč in manjši doseg. Poleg tega pa lahko dodatne meritve med pari vozlišč bistveno izboljšajo natančnost določanja lokacije in povečajo območje pokrivanja [13].

Formalna definicija problema kooperativne lokalizacije v [41] predvideva omrežje  $S$  z  $m > 0$  sidrnimi vozlišči z znano lokacijo, ki so označeni od 1 do  $m$ , in  $n - m > 0$  dodatnimi vozlišči, ki so označeni z  $m + 1$  do  $n$  in so navadna vozlišča. Na podlagi podane meritve  $\mu_{ij}$  med dvema vozliščema  $s_i$  in  $s_j$  ter znanimi lokacijami sidrnih vozlišč se s postopkom kooperativne lokalizacije določijo neznanne koordinate običajnih vozlišč tako, da so dodeljene koordinate navadnih vozlišč v skladu z meritvami  $\mu_{ij}$  in s koordinatami sidrnega vozlišča. Slika 5 prikazuje primer kooperativnega omrežja in pripadajoči graf strukture, kjer so vozlišča 1, 2 in 3 sidrna vozlišča. Ker imajo ta vozlišča znane lokacije in je mogoče izračunati njihovo medsebojno oddaljenost brez dodatnih meritev metrik radijskega signala, so v grafu med seboj povezani z robovi.

Kooperativne lokalizacijske algoritme na splošno delimo na centralizirane, ki zbirajo meritve na centralnem vozlišču in se tam tudi obdelajo, in porazdeljene, ki zahtevajo, da vozlišča delijo informacije samo s svojimi sosedi na iterativni način.



Slika 5: Kooperativno senzorsko omrežje a) in pripadajoči graf b)

Centralizirani algoritmi za kooperativno lokalizacijo določajo lokacijo vseh vozlišč na centralnem procesorju oziroma vozlišču. Ta zbira podatke sidrnih vozlišč in tudi navadnih vozlišč ter izračuna lokacijo vseh navadnih vozlišč. Centralizirani pristopi po navadi niso razširljivi in posledično niso uporabni za večja omrežja. Glavni motiv za njihovo implementacijo je predvsem v zagotavljanju boljše natančnosti ocenjene lokacije v primerjavi z distribuiranim pristopom. Obstajajo trije osnovni pristopi za načrtovanje centraliziranih kooperativnih algoritmov na podlagi razdalje: večdimenzionalno stopnjevanje (MDS – MultiDimensional Scaling), linearno programiranje in pristopi stohastične optimizacije [41].

Če so podatki poznani in jih je mogoče dobro opisati z določenim statističnim modelom, je mogoče implementirati pristop ocene največje podobnosti (MLE – Maximum Likelihood Estimation). Eden od razlogov za uporabo tega pristopa je, da se njegova varianca asimptotično približuje spodnji meji, ki je podana z mejo Cramér-Rao (CRB) [42]. Kot pove že samo ime, je treba najti najbolj podobno funkcijo. Pristop ima dve ključni omejitvi, in sicer: 1. obstaja velika verjetnost, da rešitev konvergira v lokalni in ne v globalni maksimum, in 2. močna odvisnost pristopa od modela (če se meritve bistveno razlikujejo od domnevnega modela, rezultati niso več zanesljivi).

Za preprečitev problema lokalnega maksimuma je bilo predlagano, da se lokalizacija obravnava kot konveksni optimizacijski problem. V [43] so predstavljene omejitve konveksnosti, ki določajo, da mora biti ocenjena lokacija vozlišča znotraj radija  $r$  in/ali v območju kota  $[\alpha_1, \alpha_2]$  drugega vozlišča. Hiter način za grobo ocenitev lokacije vozlišča je mogoč z linearnim programiranjem [42], ki je, podobno kot tehnike SDP (SemiDefinite Programming), računsko zelo zahteven. Bistveno znižanje računske kompleksnosti je doseženo s porazdeljenim algoritmom SDP [44].

Algoritmi večdimenzionalnega stopnjevanja opisujejo lokalizacijo vozlišč iz meritev razdalj kot problem najmanjših kvadratov (LS) [45]. Pri klasičnem MDS pristopu je LS rešitev določena z lastno dekompozicijo (eigen-decomposition), ki ni

izpostavljena problemu lokalnega maksimuma. Za linearizacijo lokalizacijskega problema klasična metoda MDS uporablja kvadrat razdalj. Končni rezultat je močno odvisen od napak merjenja razdalje. Druge tehnike MDS, ki ne temeljijo na lastni dekompoziciji, so robustnejše, saj dovoljujejo utežene meritve glede na zaznane natančnosti [46]. Medtem ko je kompleksnost pristopa MDS  $O(N^3)$ , kjer je  $N=n+m$  celotno število vozlišč, je kompleksnost preostalih metod mnogovrstnega (manifold) učenja, ki tudi temelji na lastni dekompoziciji,  $O(N^2)$ . V [47] so bile predstavljene zmogljivosti mnogovrstnega učenja, ki za lokacijsko informacijo uporablja zabeležene senzorske podatke. Prav tako s področja statističnega učenja nadzorovano učenje obravnava lokalizacijo kot serijo problemov zaznavanja [48]. V obravnavanem pristopu je območje pokritja razdeljeno na manjša prekrivajoča se območja. Vsako območje na podlagi meritev zazna, ali je vozlišče znotraj njegovih meja.

Pri porazdeljenih algoritmih za kooperativno lokalizacijo ni centralnih nadzornikov in vsako vozlišče določi svojo lokacijo na podlagi lokalno zbranih informacij. Tako se izognemo potrebam po centralnih vozliščih z veliko računsko močjo, preprečimo ozka grla, ki po navadi nastanejo pri komunikaciji vozlišč s centralnim nadzornikom, ter dosežemo uravnoteženo porabo energije v vseh vozliščih. Porazdeljeni algoritmi so razširljivi in primerni tudi za večja omrežja ter jih lahko razvrstimo v dve skupini, in sicer multilateracijske algoritme in algoritme zaporednega približevanja.

Pri pristopu multilateracije vsako vozlišče oceni večskokovno (multihop) razdaljo do najbližjega sidrnega vozlišča. Ko vsako sidrno vozlišče razpolaga z ocenjenimi razdaljami do več sidrnih vozlišč, se njegova lokacija izračuna lokalno, prek postopka multilateracije.

Algoritmi zaporednega približevanja poskušajo določiti optimum globalne cenovne funkcije. V to skupino spadajo algoritmi najmanjših kvadratov (LS – Least Square), uteženih najmanjših kvadratov (WLS – Weighted Least Squares) oziroma največje verjetnosti (ML – Maximum Likelihood). Vsako vozlišče oceni svojo lokacijo in nato odda ta podatek svojim sosedom, ki na podlagi prejete informacije preračunajo svojo lokacijo in jo ponovno oddajo. Postopek poteka do končne konvergence. Naprava, ki nima nobene koordinate, lahko začne s svojim lokalnim koordinatnim sistemom in ga pozneje združi s sosednjimi koordinatnimi sistemi. Po navadi je mogoče s pristopi zaporednega približevanja doseči boljše rezultate, vendar je treba obravnavati vprašanje konvergence.

Najnovejše raziskovalne smeri na področju porazdeljenih algoritmov vključujejo tako imenovane pristope na podlagi filtriranja delcev (angl. particle filters), kjer vsako vozlišče shrani delce, ki pomenijo morebitne koordinate vozlišča in so uteženi glede na njihovo podobnost. Metode se uporabljajo za natančno lociranje in sledenje robotov ter v bodočih raziskavah lokalizacijskih postopkov za senzorska omrežja. V [49]

so problem lokalizacije v senzorskih omrežjih formulirali kot problem sklepanja na grafičnih modelih in za določitev približne lokacije vozlišča uporabili različico tehnike širjenja zaupanja (BP – Belief Propagation), tako imenovani algoritem neparimetričnega širjenja zaupanja (NBP – Nonparametric Belief Propagation). Pristop NBP je implementiran kot algoritem za lokalno iterativno izmenjavo sporočil. V vsakem koraku vozlišče določi zaupanje svoje ocenjene lokacije in pošlje informacijo zaupanja svojim sosedom, prejme koristne informacije od sosedov ter nato iterativno posodobi svoje zaupanje. Iterativni proces se prekine le, ko je konvergenčni kriterij zaupanja in ocenjenih lokacij vozlišča v omrežju dosežen. Glavni prednosti algoritma sta preprosta porazdeljena implementacija in razmeroma majhno število iteracij, potrebnih za dosego konvergence. Poleg tega pristop zagotavlja tudi informacije o negotovosti ocenjene lokacije. V [50] je Bayesianovo sklepanje izvedeno prek iterativnega postopka lokalnega posredovanja sporočil, ki temelji na širjenju prepričanja in predstavitve sporočil s filtriranjem delcev.

Obstajajo tudi hibridni algoritmi, ki združujejo značilnosti centraliziranih in porazdeljenih algoritmov in tako zmanjšujejo porabo energije. Pri hibridnem pristopu se celotno omrežje razdeli na več manjših gruči. V vsaki gruči algoritem izbere centralno vozlišče za ocenitev lokacij vozlišč v gruči. V naslednji fazi vsa centralna vozlišča za združitev in optimizacijo lokalno določenih lokacij uporabijo porazdeljene algoritme [51].

## 8 SKLEP

Lokacija uporabnikov v radijskem omrežju je postala pomembna informacija za optimizacijo radijskih omrežij in zagotavljanje lokacijsko odvisnih storitev, zato je področje radijske lokalizacije pritegnilo izjemno zanimanje raziskovalcev. S širjenjem aplikacij brezžičnih senzorskih omrežij se je potreba po preprostih in robustnih lokalizacijskih tehnikah še povečala, predvsem v notranosti objektov, kjer lokalizacija s pomočjo satelitov odpove. Pričujoči prispevek je obširen pregled lokalizacijskih tehnik in algoritmov, ki so primerni predvsem za določanje lokacije v notranosti objektov oziroma na gostih urbanih območjih.

V prispevku smo obravnavali različne izzive pri načrtovanju lokalizacijskih tehnik. Določili smo vrsto kriterijev za ocenjevanje lokalizacijskih tehnik, kot so razpoložljivost, odzivnost, pokritost, cena, kompleksnost itd. Pogosto je treba pri izbiri sistema oziroma tehnike za določanje lokacije narediti kompromis, na primer med kompleksnostjo in natančnostjo rešitve, ki je po navadi odvisen od okolja in namena uporabe aplikacije.

Po kratkem pregledu brezžičnih tehnologij smo podali različne klasifikacije tehnik lokalizacije. Medtem ko triangulacijske tehnike določajo lokacijo vozlišč na

podlagi posrednega merjenja razdalje prek različnih metrik radijskega signala, pristopi analize scene, imenovani tudi pristopi prstnega odtisa, temeljijo na primerjanju trenutne meritve radijskega signala z izmerjenimi oziroma izračunanimi podatki, ki so shranjeni v podatkovni bazi oziroma radijski mapi okolja. Izbira tehnologije in tehnike lokalizacije močno vpliva na resolucijo in natančnost lokacijske informacije.

Sodelovanje med vozlišči lahko bistveno izboljša zmogljivost lokalizacije. Predvsem v omrežjih, kjer ni na voljo zadostnega števila vozlišč z znano lokacijo, se čedalje pogosteje uporabljajo kooperativni lokalizacijski pristopi, katerih pregled smo podali v zadnjem delu prispevka.

Kljub številnim obstoječim pristopom, ki rešujejo problem lokalizacije v notranjih okoljih, trenutne rešitve ne dosegajo potrebne ravni učinkovitosti oziroma zmogljivosti, ki jih zahteva večina aplikacij. Z dosego zahtev za različna aplikacijska okolja, kot so natančnost, pokritje, razpoložljivost in minimalni stroški namestitve, se ukvarja velik del raziskovalnih pristopov.

Trendi radijske lokalizacije za notranja okolja gredo v smeri novih hibridnih rešitev za 5G omrežja, ki temeljijo na razpoložljivih sistemih in tehnologijah, kooperativni lokalizaciji in na novih inovativnih aplikacijah za različne mobilne naprave, kjer bo lokacijska informacija uporabljena za izboljšanje kakovosti uporabniške izkušnje in tudi kot dodana vrednost obstoječim storitvam brezžičnih operaterjev.

## ZAHVALA

Projekt »L2-7664 Napredne tehnike sledenja žarkom za karakterizacijo radijskega okolja in radijsko lokalizacijo« je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

## LITERATURA

- [1] J. Hightower, G. Borriello, "Location systems for ubiquitous computing", *IEEE Comput.*, vol. 34, pp. 57–66, 2001.
- [2] H. Huang, G. Gartner, "A Survey of Mobile Indoor Navigation Systems", In *Cartography in Central and Eastern Europe*; Gartner, G., Ortog, F., Eds.; Springer: Heidelberg, Germany; pp. 305–319.
- [3] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, J. Liu, "Vanpositioning techniques and systems", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080, 2007.
- [4] Y. Gu, A. Lo, I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks", *IEEE Commun. Surv. and Tutor.*, vol. 11, pp. 13–32, 2009.
- [5] S. Savazzi, S. Sigg, M. Nicoli, V. Rampa, S. Kianoush, U. Spagnolini, "Device-Free Radio Vision for Assisted Living: Leveraging wireless channel quality information for human sensing", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 33, no. 2, Mar. 2016.
- [6] K. Al Nuaimi; H. Kamel, "A survey of indoor positioning systems and algorithms", in *Proceedings of the 2011 International Conference on Innovations in Information Technology (IIT)*, IEEE Society, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 25–27 Apr. 2011, pp. 185–190.
- [7] R. Mautz, R., *Indoor Positioning Technologies*, Ph.D. Thesis, ETH Zürich, Zürich, Switzerland, 2012.
- [8] L. Cheng, C. Wu, Y. Zhang, H. Wu, M. Li, and C. Maple, "A Survey of Localization in Wireless Sensor Network", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2012, Article ID 962523, 12 pages, doi:10.1155/2012/962523.
- [9] H. Wu, A. Marshall, W. Yu, "Path planning and following algorithms in an indoor navigation model for visually impaired", *Proceedings of the Second International Conference on Internet Monitoring and Protection, ICIMP 2007*, San Jose, CA, USA, 1–5 Jul. 2007, pp. 38–48.
- [10] A. Alarifi, A. M. Al-Salman, M. Alsaleh, A. Alnafessah, S. Al-Hadhrami, M. A. Al-Ammar and H. S. Al-Khalifa, "UltraWideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances", *Sensors (Basel)*, vol. 16, no. 5, Maj 2016, doi: 10.3390/s16050707.
- [11] J. Xiao, Z. Zhou, Y. Yi, L. M. Ni, "A survey on wireless indoor localization from the device perspective", *ACM Comput. Surv.*, vol. 49, no. 2, Article 25, 31 pages, Jun. 2016).
- [12] C. Drane, M. Macnaughtan, C. Scott, "Positioning GSM telephones", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 4, pp. 46–54, 59, Apr. 1998.
- [13] H. Wymeersch, J. Lien, M. Z. Win, "Cooperative Localization in Wireless Networks", *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 2, Feb. 2009.
- [14] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero., R. L. Moses, N. S. Correal, "Locating the nodes: Cooperative localization in wireless sensor networks", *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 22, pp. 54–69, Jul. 2005.
- [15] Z. Farid, R. Nordin, and M. Ismail, "Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques and System", *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2013, Article ID 185138, 12 pages.
- [16] S. Gezici, "A survey on wireless position estimation", *Wireless Personal Communications*, vol. 44, no. 3, pp. 263–282, 2008.
- [17] F. Seco, A. R. Jimenez, C. Prieto, J. Roa, and K. Koutsou, "A survey of mathematical methods for indoor localization", 6th *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP '09)*, pp. 9–14, Aug. 2009.
- [18] M. Vossiek, L. Wiebking, M. Glanzer, D. Mastela, and M. Christmann, "Wireless local positioning—concepts, solutions, applications," *IEEE Radio and Wireless Conference (RAWCON '03)*, pp. 219–224, August 2003.
- [19] B. Fang, "Simple solution for hyperbolic and related position fixes", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 26, no. 5, pp. 748–753, Sep. 1990.
- [20] X. Li, K. Pahlavan, M. Latva-aho, and M. Ylianttila, "Comparison of indoor geolocation methods in DSSS and OFDM wireless LAN", in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 6, pp. 3015–3020, Sep. 2000.
- [21] N. S. Correal, S. Kyperountas, Q. Shi, and M. Welborn, "An ultrawideband relative location system," in *Proc. IEEE Conf. Ultra Wideband Syst. Technol.*, pp. 394–397, Nov. 2003.
- [22] M. Kanaan and K. Pahlavan, "A comparison of wireless geolocation algorithms in the indoor environment", *IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, vol. 1, pp. 177–182, 2004.
- [23] D. Torrieri, "Statistical theory of passive location systems," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 183–197, Mar. 1984.
- [24] D. Zhang, F. Xia, Z. Yang, L. Yao, and W. Zhao, "Localization technologies for indoor human tracking", 5th *International Conference on Future Information Technology (FutureTech '10)*, Maj 2010.
- [25] J. Zhou, K. M.-K. Chu, and J. K.-Y. Ng., "Providing location services within a radio cellular network using ellipse propagation model", 19th *Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl.*, pp. 559–564, Mar. 2005.
- [26] M. Kossel, H. R. Benedickter, R. Peter, and W. Bachtold, "Microwave backscatter modulation systems", *IEEE MTT-S Dig.*, vol. 3, pp. 1427–1430, Jun. 2000.
- [27] A. Gunther and C. Hoene, "Measuring round trip times to determine the distance between WLAN nodes", in *Proc. Netw. 2005.*, Waterloo, ON, Canada, pp. 768–779, Maj 2005.

- [28] K. Pahlavan, X. Li, and J. Makela, "Indoor geolocation science and technology", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 2, pp. 112–118, Feb. 2002.
- [29] L. Jiang, A WLAN fingerprinting based indoor localization technique, Ph.D. Thesis, Faculty of The Graduate College at the University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, Jul., 2012.
- [30] V. Honkavirta, T. Perala, S. Ali-Loytty, R. Piche, "A comparative survey of WLAN location fingerprinting methods", 6th Workshop on Navigation and Communication, 2009 (WPNC '09), Hannover, Germany, 19-19 Mar. 2009.
- [31] A. Rai, K. K. Chintalapudi, V. N. Padmanabhan, and R. Sen, "Zee: Zero-effort crowdsourcing for indoor localization", *Proc. ACM MobiCom*, pp. 293–304, 2012.
- [32] P. Bahl and V. Padmanabhan, "RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system", *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp. 775–784, Tel Aviv, Israel, Mar. 2000.
- [33] F. Lemic, A. Behboodi, V. Handziski and A. Wolisz, "Experimental decomposition of the performance of fingerprinting-based localization algorithms", 2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), (pp. 355-364), Okt. 2014.
- [34] S. Khodayari, M. Maleki, and E. Hamed, "A RSS-based fingerprinting method for positioning based on historical data", *Proceedings of the International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS '2010)*, pp. 306–310, Jul. 2010.
- [35] J. Zheng, C. Wu, H. Chu, and P. Ji, "Localization algorithm based on RSSI and distance geometry constrain for wireless sensor network", *Proceedings of International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, pp. 2836–2839, Jun. 2010.
- [36] N. Swangmuang and P. Krishnamurthy, "Location fingerprint analyses toward efficient indoor positioning," in *Proceedings of Sixth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, pp. 100–109, Hong Kong, Mar. 2008.
- [37] V. Honkavirta, Locaton fingerprinting methods in wireless local area networks, Master of Science Thesis, Tampere University of Technology, Okt. 2008.
- [38] T. S. Rappaport, *Wireless Communications, Principles and Practice*, Prentice Hall, 2002.
- [39] Y. Jin, W.-S. Soh, W.-C. Wong, "Indoor localization with channel impulse response based fingerprint and nonparametric regression," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 3, Mar. 2010.
- [40] A. G. Arrieta, G. C. Estrada, L. A. Romero, Á.L.S.L.B.P. Lancho, "Neural Networks Applied to Fingerprint Recognition", *Distributed Computing, Artificial Intelligence, Bioinformatics, Soft Computing, and Ambient Assisted Living*, (IWANN 2009). *Lecture Notes in Computer Science*, vol 5518. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [41] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero, R. L. Moses, NS Correal, "Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks", *IEEE Signal Processing Magazine* vol. 22, no. 4, 54–69, Jul. 2005.
- [42] E. G. Larsson, "Cramér-Rao bound analysis of distributed positioning in sensor networks", *IEEE Signal Processing Lett.*, vol. 11, no. 3, pp. 334–337, Mar. 2004.
- [43] L. Doherty, K. S. J. Pister, and L. E. Ghaoui, "Convex position estimation in wireless sensor networks", in *Proc. IEEE INFOCOM*, vol. 3, pp. 1655–1663, 2001.
- [44] P. Biswas and Y. Ye, A distributed method for solving semidefinite programs arising from ad hoc wireless sensor network localization, Dept. of Computer Science, Stanford Univ., Stanford, CA, Tech. Rep., Okt. 2003.
- [45] Y. Shang and W. Ruml, "Improved MDS-based localization", *IEEE Proc. Infocom'04*, pp. 2640–2651, Mar. 2004.
- [46] J. A. Costa, N. Patwari, and A. O. Hero III, "Distributed multidimensional scaling with adaptive weighting for node localization in sensor networks", *ACM Journal*, pp. 1-26, Jun. 2005.
- [47] N. Patwari and A. O. Hero III, "Manifold learning algorithms for localization in wireless sensor networks", *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing 2004*, vol. 3, pp. 857–860, Maj 2004.
- [48] S. N. Simic, "A learning-theory approach to sensor networks", *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 2, no. 4, pp. 44–49, 2003.
- [49] A. T. Ihler, J. W. Fisher III and R. L. Moses, "Nonparametric belief propagation for self-calibration in sensor networks", in *Proc. IEEE Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pp. 225–233, Apr. 2004.
- [50] D. Fontanella, M. Nicoli, L. Vandendorpe, "Bayesian localization in sensor networks: distributed algorithm and fundamental limits", in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'10)*, 2010.
- [51] M. Rabbat, R. Nowak, "Distributed optimization in sensor networks", *Proceedings of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2004)* pp 20–27, 2004.

**Andrej Hrovat** je na Odseku za komunikacijske sisteme Inštituta Jožef Stefan zaposlen od leta 2004, v zadnjem času na mestu znanstvenega sodelavca. Poleg tega je tudi docent na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. Diplomiral in magistriral je leta 2004 oziroma 2008 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Leta 2011 je doktoriral na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. Sodeluje pri različnih mednarodnih in domačih raziskovalnih in aplikativnih projektih, povezanih s profesionalnimi mobilnimi komunikacijskimi sistemi, 2/3G, tehnologijami WiFi in WiMAX, satelitskimi in senzorskimi omrežji.

**Mihael Mohorčič** je diplomiral (1994), magistriral (1998) in doktoriral (2002) na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlen je na Inštitutu Jožef Stefan kot znanstveni svetnik in vodja Odseka za komunikacijske sisteme, na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana pa je izvoljen v naziv izrednega profesorja. V zadnjem času se raziskovalno ukvarja predvsem z obsežnimi brezžičnimi senzorskimi omrežji, s heterogenimi, kognitivnimi in elastičnimi radijskimi omrežji ter s pametnimi energetskimi omrežji, pri čemer sodeluje pri vrsti mednarodnih in domačih projektov.

**Roman Novak** je diplomiral, magistriral in doktoriral v letih 1992, 1995 in 1998 na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Na Inštitutu Jožef Stefan dela kot raziskovalec na Odseku za komunikacijske sisteme od leta 1992. V preteklem obdobju je sodeloval pri številnih znanstveno-raziskovalnih in aplikativnih projektih, predvsem na področjih razvoja telekomunikacijskih omrežij, varnosti v komunikacijskih omrežjih in obdelave signalov v jedrski instrumentaciji. Trenutno področje njegovega raziskovalnega dela so algoritmi za napovedovanje razširjanja radijskega signala.

**Tomaž Javornik** je zaposlen kot znanstveni svetnik na Odseku za komunikacijske sisteme Inštituta Jožef Stefan, opravlja pa tudi delo docenta na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. Diplomiral, magistriral in doktoriral je leta 1987, 1990 oziroma 1993 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Kot gostujoči znanstvenik je šest mesecev deloval na univerzi Westminster v Londonu. Raziskovalno se ukvarja predvsem z razširjanjem radijskih signalov, modeliranjem kanalov v zemeljskih in satelitskih komunikacijskih sistemih, adaptivnim kodiranjem in modulacijami, prilagodljivimi antenskimi sistemi MIMO in brezžično optiko.