

POKROČILÉ METODY LOKALIZACE A NAVIGACE

07 LOKALIZACE POMOCÍ BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍ

doc. Ing. Michal Kačmařík, Ph.D.



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



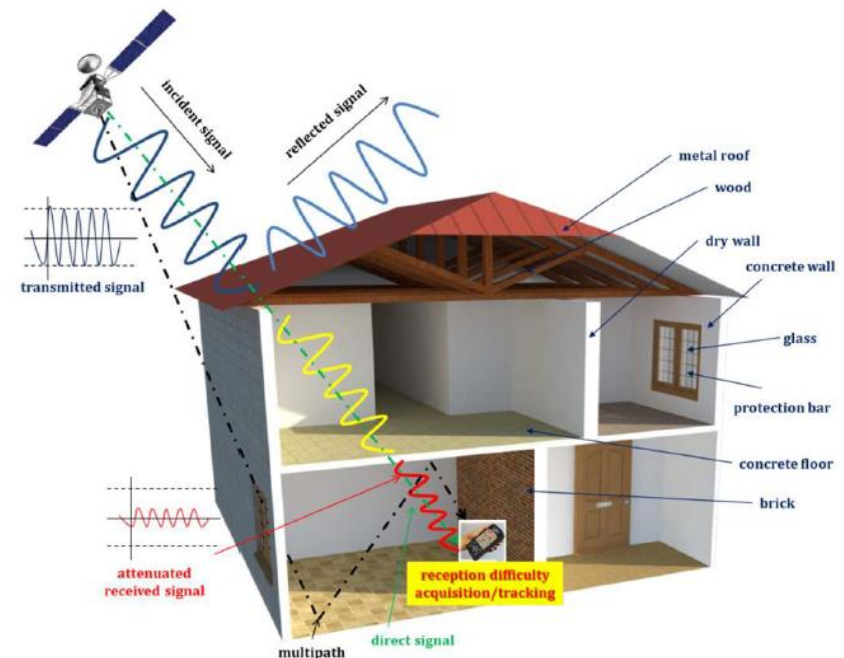
Národní
plán
obnovy



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

- Úvod
- Základní techniky rádiové lokalizace
- Sítě mobilních operátorů
- Wi-Fi
- Bluetooth
- ZigBee
- Ultra Wide Band
- RFID
- FM

- Ačkoliv je GNSS skvělou technologií, je řada prostředí, kde funguje jen omezeně či vůbec
- Dochází proto k využívání jiných technologií pro určování polohy
- S ohledem na úroveň rozšíření bezdrátové komunikace v dnešním světě dochází již delší dobu k vývoji lokalizačních technik postavených nad nimi

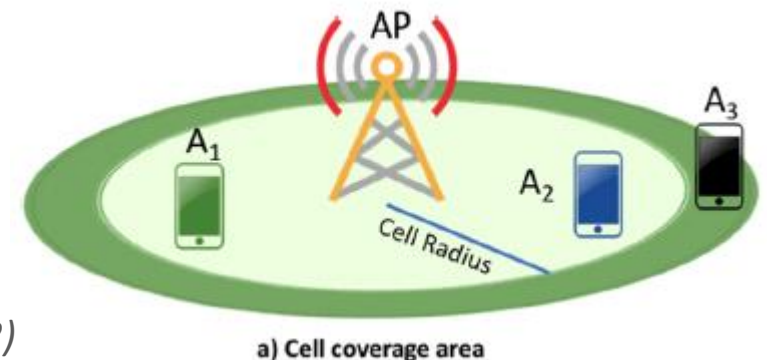


Základní techniky rádiové lokalizace

- Blížkost (proximity detection)
- Měření času (TOA, TDOA, RTT)
- Měření úhlů
- Měření síly přijatého signálu (RSSI)

Blížkost (proximity detection)

- „technika nejbližšího souseda“
- velmi jednoduchý způsob lokalizace
- identifikujeme, že naše zařízení se nachází v rámci lokality obsluhované bezdrátovým vysílačem, jehož poloha je známá a s nímž naše zařízení komunikuje
- příklady:
 - naše zařízení je připojeno ke konkrétnímu přístupovému bodu (AP, Access Point) Wi-Fi či k základnové stanici (BTS, Base Transceiver Station) sítě mobilního operátora
 - platba platební kartou na terminálu umístěném v konkrétní provozovně



- jsou postaveny na určování vzdálenosti mezi vysílačem o známé poloze a koncovým zařízením
- k určení vzdálenosti využívají měření času
- aktuálně jsou využívány tři principy:
 - TOA – Time of Arrival
 - TDOA – Time Difference of Arrival
 - RTT – Round Trip Time
- všechny jsou zatíženy vlivem multipath, šumu

TOA – Time of Arrival

- přijímač určí čas přijetí signálu a zpracováním signálu zjistí čas odeslání signálu vysílačem
- z rozdílu těchto dvou časů získá dobu šíření signálu
- vynásobením doby šíření signálu rychlostí šíření signálu (obvykle rychlost světla) získáme vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem
- nutná je vzájemná synchronizace hodin všech vysílačů a přijímačů zapojených do výpočtu polohy
- trilaterace = polohu přijímače ve 2d prostoru vypočteme z měření vzdálenosti ke třem vysílačům o známé poloze
- tento princip využívají systémy GNSS u kódových měření

TDOA – Time Difference of Arrival

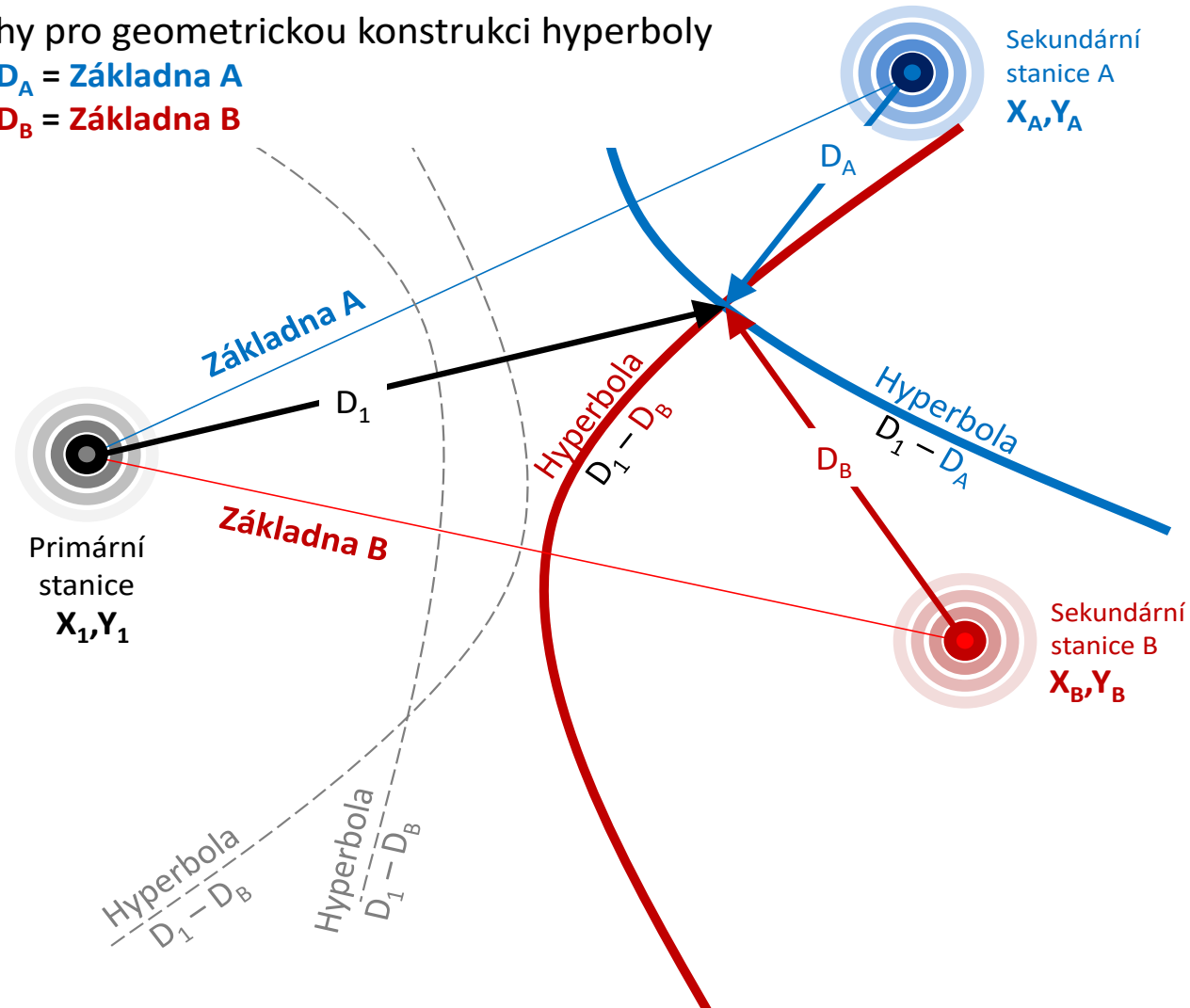
- určení polohy přijímače na základě měření rozdílů časového zpoždění příjmu signálu několika vysílačů o známé poloze
- nutná je vzájemná synchronizace hodin vysílačů
- na rozdíl od TOA není potřeba znát čas odeslání signálu vysílačem, stačí měřit čas přijetí signálu
- multilaterace:
 - porovnání času zpoždění signálu z dvojice vysílačů umožňuje sestavit dvojici hyperbol, na jedné z nich se nachází přijímač
 - pro jednoznačné určení polohy ve 2d prostoru je potřeba minimálně tři vysílačů (dvě dvojice vysílačů)
- tento princip využíval např. systém LORAN sloužící zejména pro námořní a leteckou navigaci v Atlantiku a Pacifiku, jeho činnost ukončena v roce 2010

TDOA – Time Difference of Arrival

Vztahy pro geometrickou konstrukci hyperboly

$$D_1 - D_A = \text{Základna A}$$

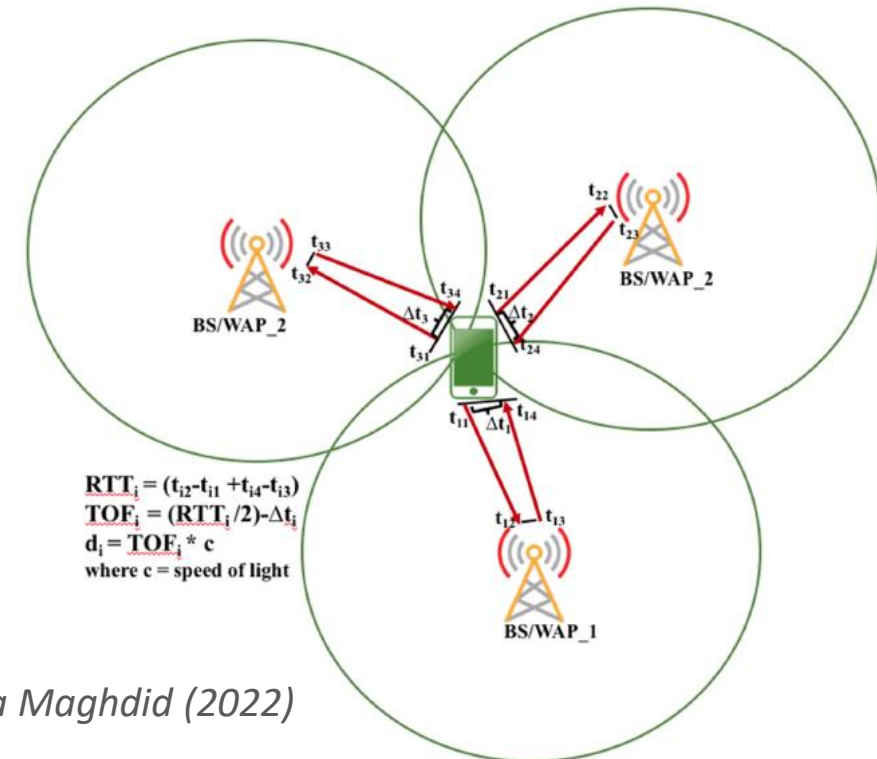
$$D_1 - D_B = \text{Základna B}$$



LORAN: příklad multilaterace, zdroj: Vojtek (2014)

RTT – Round Trip Time

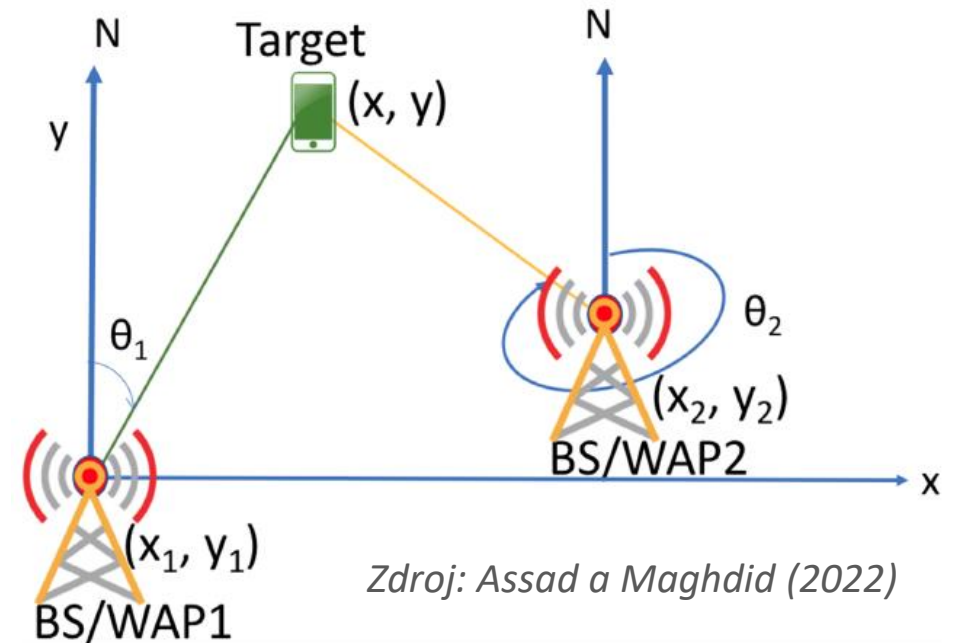
- koncové zařízení vyšle signál (obvykle datový paket), který je přijat AP Wi-Fi či BTS mobilní sítě a okamžitě přeposlán zpět do zařízení
- měří se tedy doba za jakou odeslaný datový paket urazí vzdálenost tam a zpět a zní se odvodí vzdálenost koncového zařízení a zařízení, které paket přeposlalo
- není nutná synchronizace hodin, jelikož veškerá měření času realizuje koncové zařízení
- zatěžuje provoz na síti
- implementováno do standardu Wi-Fi IEEE 802.11 mc



Zdroj: Assad a Maghdid (2022)

Měření úhlů

- AOA – Angle of Arrival
- na úrovni vysílače měříme úhel mezi směrem k severu a koncovým zařízením
- triangulace: pro jednoznačné určení polohy je potřeba měřit úhel na dvou vysílačích, jejichž vzájemná vzdálenost je známa
- analogie protínání vpřed z úhlů (pozemní geodetické měření)
- vyžaduje směrové antény na vysílačích
- ovlivněno multipath (problém zejména indoor)



Měření síly přijatého signálu (RSSI)

RSSI (Received Signal Strength Indicator):

- indikátor síly přijímaného signálu
- jednotka dBm (decibel miliwatt)
- signál cestou od svého zdroje slábne, výrazný vliv mají překážky a možné odrazy

Pro lokalizaci rozlišujeme techniky založené na:

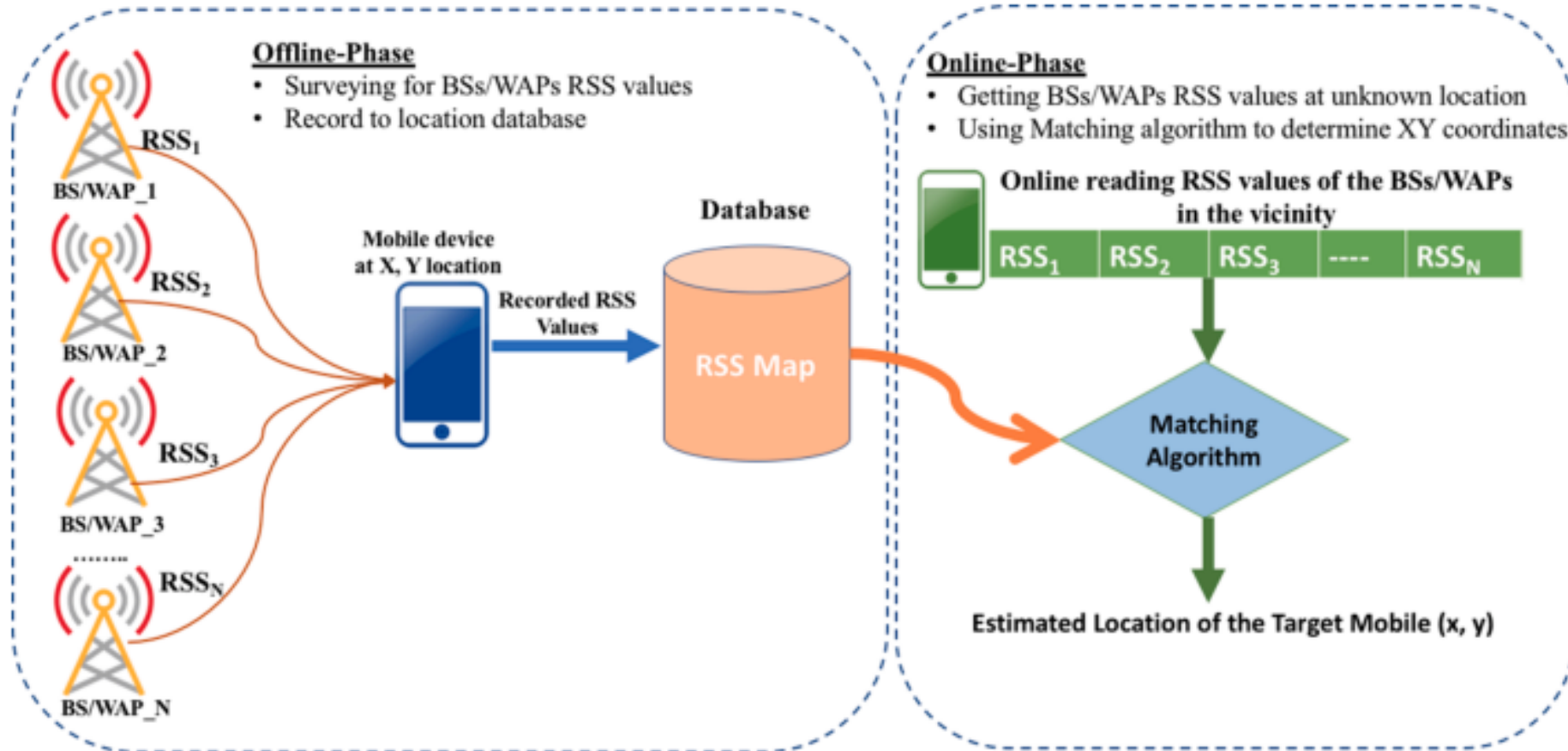
- modelu šíření rádiových vln
- Fingerprinting

RSSI – model šíření rádiových vln

- při znalosti výchozí hodnoty síly signálu a hodnoty síly signálu změřené v místě koncového zařízení jsme schopni modelováním úbytku síly signálu odhadnout vzdálenost koncového zařízení a zdroje signálu
- potřebné je stanovit exponent úbytku síly signálu s rostoucí vzdáleností od zdroje
- velmi jednoduchá technika na implementaci, avšak s omezenou přesností lokalizace
- výrazné problémy způsobují překážky a odrazy signálů v prostředí, kde je technika použita (zejména indoor)

- tzv. technika otisku
- založená na dvou fázích:
 1. **off-line**: vytvoření mapy síly rádiového signálu v oblasti, kde má být lokalizace využívána. Přijímačem je v sadě georeferencovaných bodů měřena síla signálu z více vysílačů (body obvykle rozmístěny v pravidelné mřížce)
 2. **on-line**: koncové zařízení porovnává vlastní změřené síly signálu s dostupnou mapou síly rádiového signálu a na základě nalezení nejbližšího vzoru odhadne svoji polohu v prostoru
- často využíváno pro Wi-Fi indoor lokalizaci, lze však použít i s dalšími technologiemi

RSSI – Fingerprinting



Výhody:

- poměrně přesná technika i pro indoor prostředí
- při existenci sítě vysílačů (např. AP Wi-Fi) nevyžaduje zásahy do stávající infrastruktury
- nevyžaduje časovou synchronizaci zařízení
- nevyžaduje znalost polohy vysílačů
- multipath není problémem

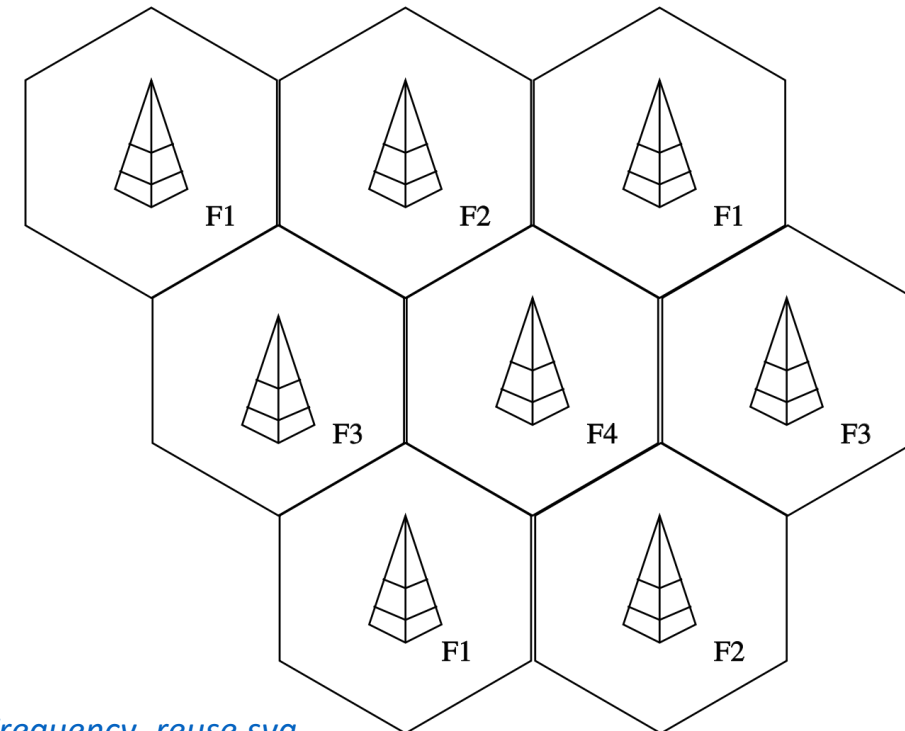
Nevýhody a možné obtíže:

- nutnost realizace off-line fáze:
 - (časově) náročné zejména na velkých plochách či při požadavku na vysokou přesnost určení polohy (vyšší přesnost vyžaduje větší počet referenčních bodů použitých pro vytvoření mapy síly signálu)
 - lze do určité míry řešit simulací šíření signálu v daném prostředí, interpolací řídněji naměřených hodnot, crowdsourcingem, apod.
- Potřeba adaptace na změny:
 - při změně infrastruktury (přidání nového vysílače, výměna stávajícího, atd.) či změně prostředí (stavba/vybourání příčky, apod.) je potřeba aktualizovat mapu síly signálu

Nevýhody a možné obtíže:

- různorodost zařízení:
 - různé typy koncových zařízení naměří různé hodnoty RSSI ve stejném místě, lze řešit různými formami kalibrace
- směrová závislost měření:
 - naměřená hodnota RSSI je závislá i na orientaci antény koncového zařízení (jeho natočení v prostoru), problém způsobuje i stínění těla člověka

- Cellular radio network = buňková rádiová síť
- -> cell phone
- síť je tvořená množstvím základnových stanic (BTS), které svým dosahem vytvářejí soustavu vzájemně se překrývajících buněk pokrývajících větší oblast
- ve standardu GSM tři frekvenční pásma: 0.9 GHz, 1.8 GHz, 2.8 GHz
- sousední stanice využívají rozdílné frekvence, aby se vzájemně nerušily, viz obrázek
- mobilní zařízení se připojuje k nejbližší základnové stanici, při pohybu automaticky dochází k přepojení mezi stanicemi (mobility management)
- veřejné versus neveřejné sítě



- Generace sítí

Generace	Od roku	Popis
1G	1981	analogová síť, jen hlasové služby
2G	1991	GSM standard, hlasové služby a SMS+MMS
3G	2001	standarty UMTS, CDMA200, hlasové a datové služby – poprvé mobilní internet, max. teoretická rychlost 10 Mb/s
4G	2008	standard LTE, max. teoretická rychlost 100 Mb/s při rychlém pohybu (auto, vlak), 1 Gb/s při pomalém pohybu či stání
5G	2020	cílem je max. teoretická rychlost 20 Gb/s

- Existují různé typy základnových stanic
 - Venkovní/vnitřní prostředí – první mívají výrazně větší dosah
 - Statické/mobilní
 - Všesměrové/směrové antény



3 antény: každá pokrývá
120 °



Lokalizace v sítích mob. operátorů

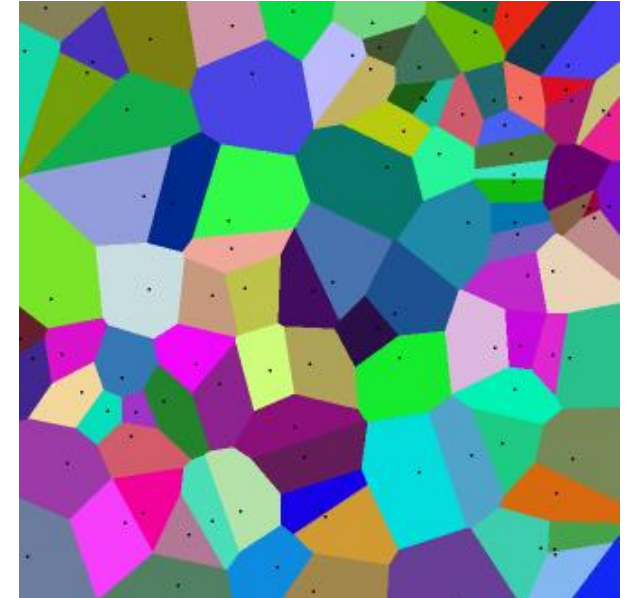
- Možnost využití celé řady technik:
 - blízkost (proximity)
 - trilaterace z měření RSSI
 - trilaterace z měření TOA
 - fingerprinting

Sítě mob. operátorů - Blízkost

- nejjednodušší technika
- možnost vymezení ploch obsluhovaných jednotlivými základnovými stanicemi například s využitím Tiessenových (Voroniových) polygonů
- přesnost určení polohy závisí primárně na hustotě sítě základnových stanic (v městském prostředí může dosahovat desítek metrů, v mimoměstském prostředí i 10-20 km)
- v minulosti vzniklo pro možnost lokalizace při tísňových situacích

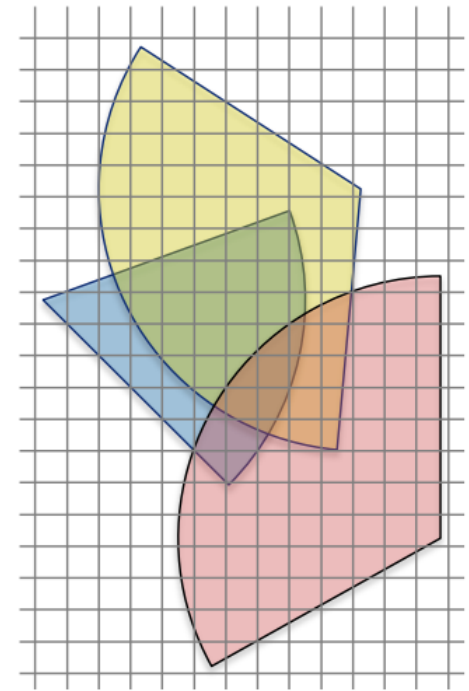
Zdroj:

https://cs.wikipedia.org/wiki/Voron%C3%A9ho_dia_gram#/media/Soubor:Coloured_Voronoi_2D.png

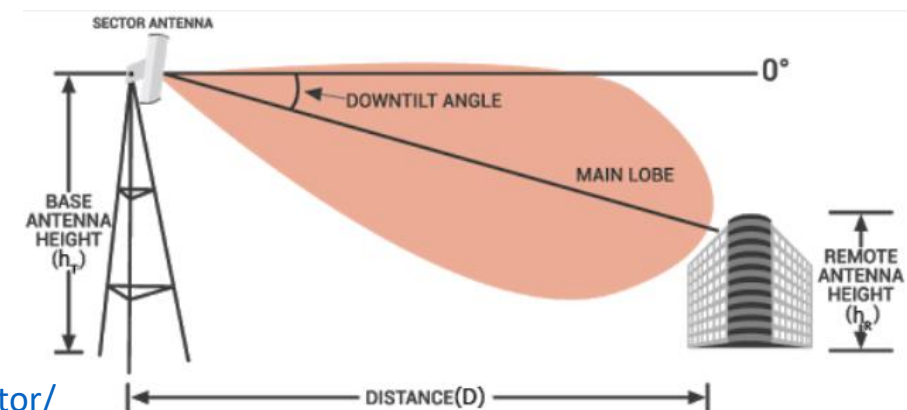


Trilaterace z měření RSSI

- v praxi aktuálně nejčastěji používaná technika
- na základě měření RSSI k okolním stanicím je možno trilaterací určit polohu mobilního zařízení
- měření RSSI je obtížné, jelikož je komplikováno:
 - překážkami v přímé viditelnosti mezi BTS a mobilním zařízením (+multipath)
 - využitím antén se směrovými charakteristikami (zejména ve směru elevace)
 - v některých oblastech omezeným počtem blízkých BTS
- pokročilá řešení využívají modely šíření signálu v daném prostředí, počítají s charakteristikami použitých antén, atd.
- přesnost standardně jednotky až desítky metrů
- poměrně široké možnosti využití v různých odvětvích



Zdroj: Tennekes (2019)



Dostupné (komerční) služby

- Mobilní operátoři standardně nabízejí službu lokalizace mobilního telefonu s aktivní SIM kartou, viz například <https://www.t-mobile.cz/web/partnersky-portal/produkty-pro-partnery/dalsi-produkty/lokalizace-sim-karty>
- Obdobné služby nabízejí i komerční společnosti, viz například <https://www.geofind-cz.com/>

- 5G sítě mají oproti předchozím generacím přinést taktéž výrazný rozvoj služeb pro lokalizaci a navigaci
- klíčové technologie:
 - mmWave: použití milimetrových vln (vysoké frekvence, velká šířka pásma, vysoká přenosová rychlost)
 - MIMO (Multiple Input Multiple Output): základnové stanice vybaveny sadou stovek/tisíců antén
 - D2D (Device To Device): vzájemná komunikace a sdílení informací mezi jednotlivými zařízeními
- aktuálně vše ve stádiu vývoje a experimentů
- využití TDOA, RTT, AOD principů

- Wi-Fi = obchodní značka pro standardy IEEE 802.11
- široce využíváno pro bezdrátové šíření internetu v lokálních sítích, běžně dostupná infrastruktura a podpora v koncových zařízeních
- využití frekvencí v pásmu:
 - 2.4 GHz – od počátku, větší dosah, nižší rychlost, menší počet kanálů
 - 5 GHz – od standardu 802.11n z roku 2008, menší dosah, vyšší rychlost, vyšší počet kanálů
 - v nových standardech se objevuje taktéž využití 900 MHz a 6 GHz
- původně dosah cca 100 m, od standardu IEEE 802.11 až nárůst na cca 1 000 m
- koncové zařízení se připojuje k Wi-Fi routeru (tzv. AP, Acces Point)

Wi-Fi lokalizace

- Wi-Fi bylo primárně navrženo pro bezdrátovou komunikaci, ne pro lokalizaci zařízení
- první studie využívající Wi-Fi pro lokalizaci se objevily v letech 2002 až 2005
- nejběžněji jsou využívány techniky:
 - fingerprinting
 - trilaterace z měření RSSI
 - trilaterace z měření RTT
 - blízkost (proximity)
- dosažitelná přesnost závisí na řadě parametrů, pohybuje se však obvykle na úrovni jednotek metrů

Příklad Wi-Fi lokalizace

- implementace v knihovně Technické univerzity ve Vídni
- šestipatrová budova, plocha jednoho patra cca 1160 m²
- cílem bylo s využitím stávající infrastruktury Wi-Fi vysílačů vytvořit systém pro navigaci na úroveň regálu s knihami: využití Fingerprinting
- provedena měření RSSI s 6 různými mobilními telefony, ve statickém, stop and go a kinematickém režimu: viditelné rozdíly mezi nimi
- výsledná přesnost určení polohy se pohybovala na úrovni jednotek metrů
- pro její zvýšení bylo navrženo doplnit stávající infrastrukturu novými Wi-Fi AP v podobě nízkonákladových Raspberry Pi modulů



Zdroj:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Technische_Universitaet_Wien_Bibliothek.jpg

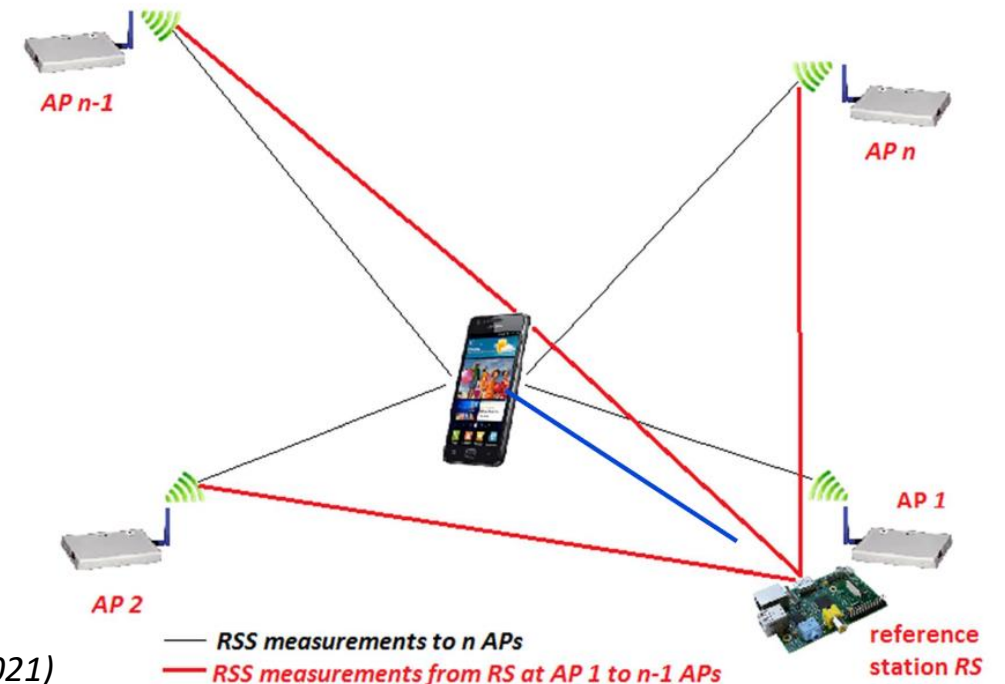
Table 8. Deviations in [m] from the ground truth in dependence of the smartphone for the static measurements.

Smartphone	Orientation	Mean	Median	Standard Deviation
Nexus 5X	1	4.2	3.0	4.0
	2	3.1	2.2	2.6
OnePlus 5T	1	3.5	3.0	3.5
	2	3.1	2.0	4.1
Samsung S3A	1	1.8	1.0	2.3
	2	2.1	1.0	3.6
Samsung S3B	1	2.6	1.0	3.8
	2	2.9	1.0	4.4
Samsung S7	1	3.3	2.2	3.4
	2	2.8	1.4	3.1
Sony Z3	1	3.1	2.0	6.4
	2	2.1	1.0	4.2

Zdroj: Retscher a Leb (2021)

Differential Wi-Fi

- DWi-Fi
- Při využití trilaterace z měření RSSI hodnot je možné aplikovat principy diferenčního určování polohy známé z GNSS
- Součástí infrastruktury je „referenční Wi-Fi AP“ (base), který kontinuálně provádí měření k běžným AP v okolí a je tudíž schopen poskytovat korekce pro koncová zařízení (rovery)



Zdroj: Retscher (2021)

Bluetooth



- technologie pro bezdrátovou komunikaci dvou či více zařízení na krátkou vzdálenost (u nejnovějších verzí ≥ 5.1 je však uváděn dosah až 200 m)
- intenzivně využíván v mobilních zařízeních, nositelné elektronice, dopravních prostředcích, atd.
- standard IEEE 802.15.1
- využití frekvenčního pásma 2.4 GHz
- značná výhoda = nízká energetická náročnost komunikace
- pro lokalizaci je možné využít techniky postavené na měření času, RSSI či blízkosti

Bluetooth

- v době pandemie COVID vznikaly mobilní aplikace pro trasování kontaktů
- pokud se v blízkosti našeho mobilního zařízení ocitlo jiné mobilní zařízení s aktivní aplikací a bluetooth, došlo k uložení kontaktu včetně anonymního identifikátoru potkaného mobilního zařízení
- zpětně díky tomu bylo možné dohledat s kým jsme se dostali v určitém časovém období do kontaktu a v případě nákazy informovat osoby s rizikovým kontaktem
- v ČR aplikace eRouška, <https://erouska.cz/>

Bluetooth Beacon

- ve vnitřních prostorech bývají vytvářeny navigační systémy založené na síti malých jednoduchých zařízení (majáků, anglicky Beacon), které prostřednictvím Bluetooth v pravidelných intervalech zasílají krátkou zprávu (identifikace, poloha v prostředí, apod.)
- vyhodnocením daných zpráv jsme schopni určit vlastní polohu
- Beacon je standardně napájen z vlastní baterie, která zajistí jeho provoz po dobu měsíců či několika let (BLE = Bluetooth Low Energy)
- technologii majáků prvně představila společnost Apple, dnes vyráběna a používána řadou firem
- navigační systémy založené na této technologii jsou využívány např. v nemocnicích, nákupních střediscích, muzeích, podzemních garážích, atd.

Bluetooth Beacon

- Národní muzeum ČR provozuje mobilní aplikaci *Národní muzeum v kapse*
- umožňuje návštěvníkům muzea:
 - **navigovat se na zvolené místo či k vybranému exponátu**
 - s využitím rozšířené reality si prohlédnout některé exponáty v oživené podobě
 - přečíst nebo poslechnout si zajímavosti o exponátech
 - dopředu si naplánovat trasu v muzeu dle vlastních zájmů a pak se po ní nechat vést
 - nákup vstupenek
- lokalizace a navigace uživatele aplikace je postavena na více než 1 000 bluetooth majáků rozmístěných v prostorách muzea
- více viz <https://www.nm.cz/narodni-muzeum-v-kapse>
- obdobné aplikace (systémy) fungují např. v American Museum of Natural History (<https://www.amnh.org/explore/news-blogs/news-posts/bluetooth-beacons-help-navigate-museum-halls>) a dalších

- technologie pro bezdrátovou komunikaci zařízení na omezenou vzdálenost (max. dosah cca 50 m)
- umožňuje propojení až 65 000 zařízení do sítě
- nízká rychlost (max. 250 kbs), nízká energetická náročnost, vysoké zabezpečení, možnost rušení s ohledem na použití frekvencí používaných jinými technologiemi
- primární využití v průmyslu, v senzorových sítích, zařízeních chytré domácnosti
- standard IEEE 802.15.4
- využití frekvenčních pásem 900 MHz a 2.4 GHz
- tři typy topologií sítí = strom, hvězda, mesh
- pro lokalizaci je možné využít techniky postavené na měření RSSI či blízkosti
- přesnost lokalizace bývá řádově v metrech

Ultra-Wideband (UWB)



- nová technologie pro bezdrátovou komunikaci, primárně na omezené vzdálenosti (max. desítky m)
- ve srovnání s Bluetooth či Wi-Fi:
 - vyšší rychlost komunikace (využití pásma alespoň 500 MHz)
 - využívání frekvencí > 2.5 GHz, možnost vyhýbání se frekvencím využívaných jinými technologiemi vede k eliminaci vzájemného rušení
 - lepší odolnost vůči multipath
- nízká energetická náročnost komunikace, využití časově velmi krátkých pulsů
- technologie začíná být šířeji využívána (dnes již i v mobilních telefonech)
- pro lokalizaci je možné využít techniky postavené na měření času (TOA, TDOA) či měření úhlů
- dosažitelná přesnost lokalizace na úrovni cm či dm

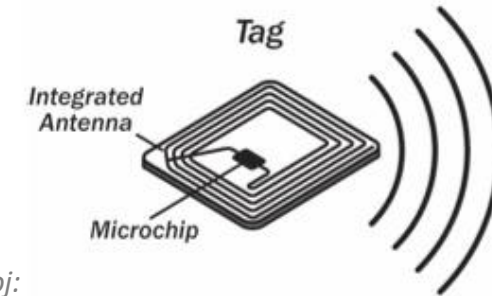


- Radio Frequency Identification
- identifikace zařízení s využitím rádiové komunikace
- dvě komponenty:

1. čtečka (vysílač)

2. čip (malá, levná elektronická součástka, často schopná jen odeslat svoji identifikaci – číselná hodnota uložená v paměti).

- pasivní čip: nemá vlastní zdroj el. energie, dostane energii od čtečky a odešle odpověď. Schopnost načtení čtečkou na omezenou vzdálenost, od několika cm po několik m v závislosti na použité frekvenci. Jednoduché, nízká cena.
- aktivní čip: vybaven vlastním zdrojem energie, dokáže uchovat a odeslat více dat, komunikovat na větší vzdálenosti (při UHF až desítky metrů). Složitější, vyšší cena.



Zdroj:

https://itlaw.fandom.com/wiki/RFID_tag?file=RFID_tag.jpg

- využití různých frekvenčních pásem mezi 125 kHz a 5 GHz
- běžně využíváno v čipových kartách, jízdenkách, mýtných a jiných branách, pro trasování zboží a objektů v různých prostředích (např. obchody, sklady, knihovny, sportoviště, ...), atd.
- RFID navazuje na technologii čárových kódů, na RFID naopak navazuje NFC, které je novější, rozšiřující jeho možnosti a použití
- pro lokalizaci je možné využít techniky postavené na měření RSSI či blízkosti
- přesnost lokalizace významně závisí na hustotě a typu RFID čipů, pohybuje se na úrovni cca 0.5 až 5 m

- Frekvenční modulace (angl. Frequency Modulation)
- technologie celosvětově běžně a dlouhodobě využívaná pro kvalitní přenos zvuku (FM rádio)
- ve většině oblastí světa využívány frekvence 87.5 až 108 MHz
- pro lokalizaci je možné využít techniky postavené nad RSSI Fingerprinting, z pohledu lokalizace jde však o okrajovou technologii využitelnou ve vnitřním prostředí

- Assad, S., Maghdid, H. *A Comprehensive Review of Indoor/Outdoor Localization Solutions in IoT era: Research Challenges and Future Perspectives*. Computer Networks, 212, 2022. doi:10.1016/j.comnet.2022.109041
- Tennekes, M. *Statistical Inference on Mobile Phone Network Data*. GIS workshop for Smart Region, Ostrava, Czech Republic, March 2019.
- Retscher, G. *Techniques and Systems for Wi-Fi Positioning*. GIS workshop for Smart Region, Ostrava, Czech Republic, March 2021.
- Retscher, G., Leb, A. *Development of a Smartphone-Based University Library Navigation and Information Service Employing Wi-Fi Location Fingerprinting*. Sensors, 21, 2021. doi:10.3390/s21020432
- Traboulsi, S. *Overview of 5G-oriented Positioning Technology in Smart Cities*. Procedia Computer Science, 201, 2022. doi:10.1016/j.procs.2022.03.049
- Vojtek, D. *Globální navigační a polohové systémy*. Učební texty, VŠB-TUO, 2014.

Děkuji za pozornost

Michal Kačmařík,
e-mail: michal.kacmarik@vsb.cz
<https://www.hgf.vsb.cz/548/cs/>



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY