

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Lokalizátor interferencí
pro frekvenční pásma EGSM a UMTS

Localisation of Interferences
for EGSM and UMTS systems

Vedoucí diplomové práce: Ing. Marek Dvorský, Ph.D.

ORIGINÁL ZADÁNÍ

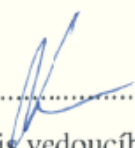
Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v části Literatura.

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava, kromě utajené přílohy č. 1 této práce, jež obsahuje novou metodu měření, která bude podstoupena do řízení o udělení patentu.

V Ostravě dne 1. 5. 2011


.....
podpis autora


.....
podpis vedoucího dip. práce

Abstrakt:

Cílem diplomové práce je popsat možné způsoby lokalizace interferencí, a navrhnout efektivní zaměřovací zařízení pro frekvenční pásma mobilních operátorů.

Hlavním předpokladem je následná výroba zaměřovacího zařízení a jeho nasazení do provozu pro potřeby Českého telekomunikačního úřadu a mobilních operátorů.

Klíčová slova:

interference, zaměřování, frekvenční spektrum, lokalizace

Abstract:

Purpose of this magister thesis is to describe available methods of direction-finding of interferences, and suggest an effective direction-finding device for frequency bands of mobile operators.

Main premise of this thesis is next production of direction-finding device, and its utilization for Czech Telecommunication Office and mobile operators.

Key words:

interference, direction-finding, frequency spectrum, direction finding

Seznam použitých symbolů a zkratek

ATX	Advanced Technology Extended - typové označení počítače, základní desky počítače, typu počítačového zdroje.
BTS	Base Transceiver Station - přístupový bod bezdrátové sítě mobilního operátora.
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications - standard pro bezdrátové telefony pevné linky.
DFT	Discrete Fourier Transform - matematická metoda převodu signálu z časové oblasti do frekvenční oblasti.
EGSM	Extended Global System for Mobile Communications - rozšířený standard mobilních telefonních systémů.
GPS	Global Positioning System - globální poziční systém, využívající družice k určení polohy uživatelského zařízení.
GSM	Global System for Mobile Communications - standard mobilních telefonních systémů.
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation - modulární platforma měřících přístrojů.
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System - 3G systém standardu mobilních telefonů.
USB	Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice, sloužící k připojení periférií k počítači.
WiFi	Značka bezdrátové sítě mezi počítači.

OBSAH:

1. ÚVOD	1
2. ZAMĚŘOVÁNÍ VYSOKOFREKVENČNÍCH ELEKTROMAGNETICKÝCH SIGNÁLŮ	3
2.1. PRINCIP RÁDIO-BUŇKOVÝCH SÍTÍ	3
2.2. FREKVENČNÍ PÁSMO RÁDIO-BUŇKOVÝCH SÍTÍ	4
2.3. ŠÍŘENÍ SIGNÁLŮ	6
2.4. TYPY RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ	7
2.5. VZNIK RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ	10
2.6. ZPŮSOBY URČOVÁNÍ SMĚRU ZDROJE SIGNÁLU	11
2.6.1. <i>Ruční výkonové zaměřování</i>	12
2.6.2. <i>Ruční zaměřování se směrovou anténou a demodulátorem</i>	12
2.6.3. <i>Ruční zaměřování se spektrálním analyzátozem</i>	13
2.6.4. <i>Základní směrová korelačně interferometrická metoda</i>	15
2.7. ZPŮSOBY URČOVÁNÍ POZICE ZDROJE SIGNÁLU NA MAPĚ	19
2.7.1. <i>Ruční nebo automatická směrová triangulace</i>	19
2.7.2. <i>Ruční nebo automatická triangulace s využitím směrové korelační interferometrie</i>	21
2.7.3. <i>Automatická korelačně interferometrická triangulace</i>	23
2.7.4. <i>Celoplošná triangulace z pevných stanovišť</i>	26
2.7.5. <i>Lokální mobilní triangulace</i>	26
3. NÁVRHY PRAKTICKÉ REALIZACE	28
4. ZÁVĚR	29
LITERATURA	30
SEZNAM PŘÍLOH	33

1. Úvod

Práce nazvaná „Lokalizátor interferencí pro frekvenční pásma EGSM a UMTS“ vznikla z důvodu potřeby Českého telekomunikačního úřadu a mobilních operátorů, zefektivnit vyhledávání nežádoucích rušivých signálů na licencovaných frekvenčních pásmech přidělených mobilním operátorům.

Interference¹ vznikají v tomto případě nejčastěji jako vedlejší produkt jiného vysokofrekvenčního datového přenosu (např. WiFi², bezdrátové venkovní teploměry, dálková ovládání, atd.). Krátkodobé interference (maximálně jednotky sekund) se na přenosových pásmech předpokládají, a proto se u většiny přenosů počítá s možností chyby při přenosu a následnou opravou opakováním přenosu. Dlouhodobé nebo periodicky opakující se interference však trvale snižují kvalitu přenosového kanálu. Všechna zařízení splňující normy, včetně elektromagnetické kompatibility, jsou navržena tak, aby produkovala na pásmech, která nevyužívá, co nejméně rušení. Maximální hodnota rušení na okolních pásmech je definovaná normou. Za běžných podmínek se tedy s trvalým rušením většinou nesetkáme, avšak drobnou úpravou nastavení vysokofrekvenční elektroniky lze způsobit značné rušení na okolních pásmech. Nejznámějším případem jsou pak poskytovatelé bezdrátového připojení k internetu s nelegálně navýšeným výkonem WiFi vysílače. Takto upravená zařízení pak vyzářují nežádáný rušivý signál mimo pásmo 2,4GHz, a to značně i na vzdáleném pásmu 800MHz. Jelikož má operátor rušený kmitočtový kanál licencován a rušení je způsobeno cizím zařízením, stává se cizí rušící zařízení předmětem správního řízení vedeného Českým telekomunikačním úřadem proti majiteli rušícího zařízení.

¹ Konkrétně elektromagnetická interference je rušivý elektromagnetický signál v rádiovém spektru, který zvyšuje chybovost přenosu dat nebo v krajním případě zcela přerušuje komunikaci daného bezdrátového přenosového kanálu.

² Bezdrátová náhrada kabelové počítačové sítě.

Aby bylo možné zahájit správní řízení, musí být rušení zjištěno, a musí být znám majitel a umístění rušícího zařízení. O vzniku rušení se operátor dozví ze svých základnových stanic nebo větším počtem nahlášených stížností od zákazníků v dané lokalitě. Následně vyšle operátor do terénu své pracovníky aby lokalizovali zdroj rušení a zjistili totožnost jeho majitele. Informace o zdroji rušení předává mobilní operátor Českému telekomunikačnímu úřadu, aby urychlil sjednání nápravy, a nepřicházel o zisk a o zákazníky.



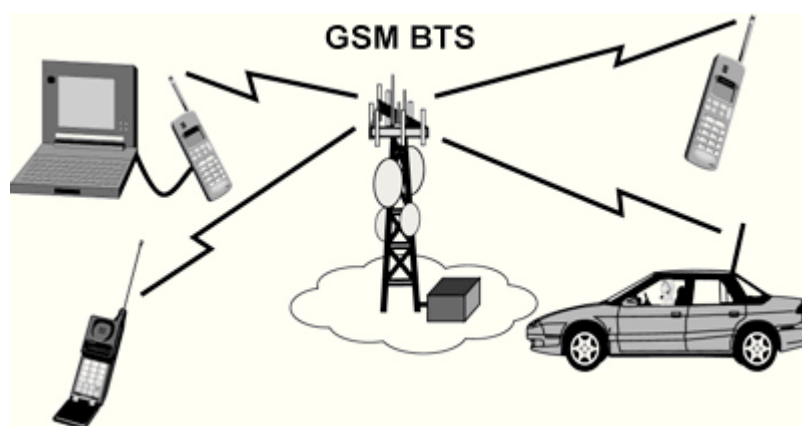
Obrázek 1-1: Zaměřovací vozidlo ČTÚ

2. Zaměřování vysokofrekvenčních elektromagnetických signálů

2.1. Princip rádio-buňkových sítí

GSM je rádio-buňková síť, ve které mobilní účastník využívá služby sítě rádiovým připojením přes nejbližší buňkovou základnovou stanici BTS³. Základnové stanice mají omezený dosah, ale jejich oblasti pokrytí se vzájemně překrývají. Tímto způsobem je pokryto téměř celé území ČR. Více o rádio-buňkových sítích viz [8].

Mobilním účastníkem se myslí osoba, používající elektronické zařízení s bezdrátovým připojením (mobilní telefon, notebook, autotelefon), nebo samostatně funkční elektronické zařízení s bezdrátovým připojením (bezdrátová neobsluhovaná meteorologická stanice, autoalarm).



Obrázek 2-1: Základnová stanice s připojenými mobilními stanicemi. [2]

³ Base Transceiver Station

2.2. Frekvenční pásma rádio-buňkových sítí

Frekvenční spektrum pro rádiové přenosy není nekonečné. Části frekvenčního spektra vhodné pro konkrétní rádio-buňkové sítě jsou omezené. Přerozdělováním spektra se zabývá Český telekomunikační úřad, který jednotlivé kanály nabízí mobilním operátorům ve formě licence.

V současné době používaná frekvenční pásma v mobilních komunikacích jsou rozdělena na dva téměř spojitě celky. Prvním celkem je starší kmitočtové pásmo GSM 900, tedy pásmo nacházející se v okolí kmitočtu 900MHz. Druhým celkem je novější kmitočtové pásmo GSM 1800 v okolí kmitočtu 1800MHz, těsně následované pásmem UMTS v rozmezí 1900 až 2200MHz.

Tabulka 2-1: Hlavní používaná kmitočtová pásma rádio-buňkových sítí [8].

System	Uplink ⁴	Downlink ⁵	Šířka kanálů ⁶	Duplexní odskok ⁷
GSM 900	876 - 915 MHz	921 - 960 MHz	200 kHz	45 MHz
GSM 1800	1710 - 1785 MHz	1805 - 1880 MHz	200 kHz	95 MHz
UMTS FDD	1920 - 1980 MHz	2110 - 2170 MHz	5 MHz	190 MHz
UMTS TDD _a	1900 - 1920 MHz		5 MHz	Není
UMTS TDD _b	2010 - 2025 MHz		5 MHz	Není

V různých koutech světa se používají různé technologie rádio-buňkových sítí na různých kmitočtových pásmech. Značně odlišné systémy můžeme nalézt např. v Japonsku či v USA, avšak pásma, uvedená v tabulce 2-1, jsou aktuálně nejpoužívanější v ČR a tato diplomová práce se ostatními systémy zabývat nebude.

⁴ Kmitočtové pásmo používané pro přenos dat od mobilního účastníka směrem k základnové stanici.

⁵ Kmitočtové pásmo používané pro přenos dat ze základnové stanice směrem k mobilnímu účastníkovi.

⁶ Vzdálenost nejvyššího a nejnižšího kmitočtu náležícího danému rádiovému kanálu.

⁷ Vzdálenost frekvencí uplinku² a downlinku³ konkrétního přenosového kanálu.

Přenos dat ve směru od účastníka a k účastníkovi prozatím nelze úspěšně provádět na stejném kmitočtu ve stejný čas. K oddělení směru přenosu používáme dva základní způsoby:

- FDD (Frequency Division Duplex), tedy systém rozdělení přenosu dat na dvě odlišné nosné frekvence Uplink² a Downlink³. Je možno vysílat i přijímat současně.
- TDD (Time Division Duplex), ve kterém se na stejném kmitočtu ve velmi krátkých časových intervalech střídá směr přenosu dat od mobilního účastníka a k mobilnímu účastníkovi. Používá se jen jeden nosný kmitočet, ale vzhledem ke vzdálenosti účastníka je nutné dodržovat určité minimální časové mezery mezi oběma směry přenosu. Tento způsob se více rozšířil jako systém bezdrátových telefonů pevné linky DECT⁸.

Z důvodu značného rozšíření počtu zařízení v rádio-buňkových sítích se v současné době používají dva základní způsoby přerozdělování přiděleného přenosového pásma mezi účastníky. Oba způsoby se používají současně:

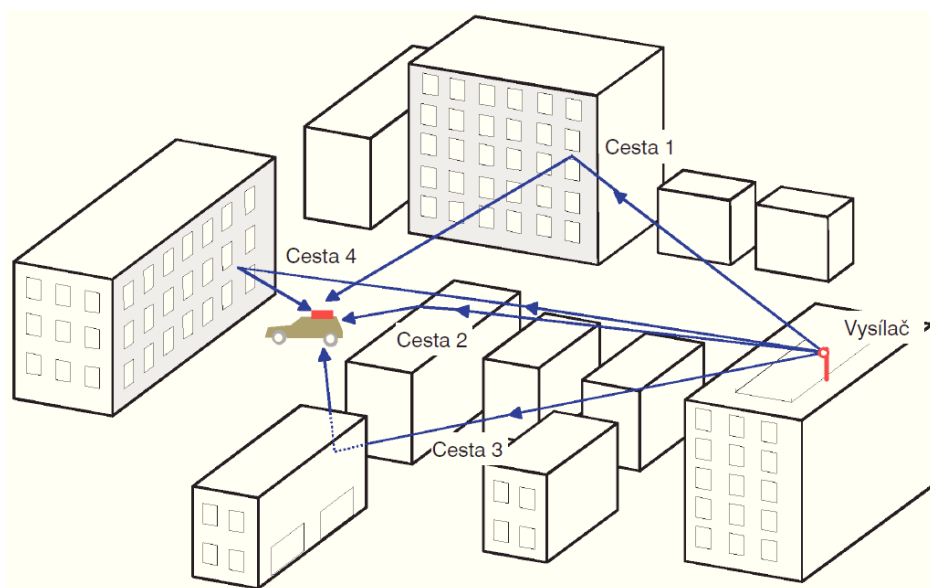
- FDMA (Frequency Division Multiple Access) Více přenosových kanálů je docíleno rozdělením přiděleného frekvenčního pásma na více menších frekvenčních kanálů.
- TDMA (Time Division Multiple Access) Více přenosových kanálů je docíleno rozdělením konkrétního frekvenčního kanálu v čase s vysokou opakovací frekvencí. Každý účastník má přesně definovány velmi krátké časové úseky, kdy může vysílat.

Mezi jednotlivými kanály funguje tzv. hopping, tedy přeskakování mezi aktuálně použitými kanály. Je-li aktuálně použitý přenosový kanál vyhodnocen jako zarušený, dojde ve velmi krátkém časovém intervalu k přeskoku na jiný přenosový kanál. Statistickými metodami lze z údajů o častém přeskakování z určitého kanálu detekovat přítomnost potenciálního rušícího zařízení v okolí.

⁸ Digital Enhanced Cordless Telecommunications

2.3. Šíření signálů

Pro potřeby rádio-buňkových sítí se využívají rádiové kmitočty ve středu pásma ultra-krátkých vln. Signály na těchto kmitočtech se nejlépe šíří na přímou viditelnost, avšak například oproti krátkým vlnám tyto signály snáze prostupují i do budov. Důvodem je vlnová délka, která činí u ultra-krátkých vln velikost do jednoho metru. Obytné prostory a hlavně pak dlouhé chodby vykazují na ultra-krátkých vlnách chování vlnovodu⁹. U krátkých vln se vlnová délka pohybuje v hodnotách desítek metrů, a k jejich úspěšnému šíření je tedy potřeba značně více prostoru.



Obrázek 2-2: Vícecestné šíření signálu [7]

Šíření ultra-krátkých vln ve městě může být pro neznalého pozorovatele matoucí. Víme-li, že před námi přímo za panelovým domem se nachází zdroj signálu, nemůžeme očekávat, že na přijímači zachytíme nejsilnější signál v přímém směru (např. Cesta 2 v obr.2-2). Jsou-li v těsné blízkosti další panelové domy, jejich rovné strany se ve značné části případů budou chovat vůči signálu jako odrazová plocha zrcadla. Pozorovateli se pak může zdát, že se zdroj signálu (vysílač v obr.2-2) nachází za vedlejším domem, který pouze signál odrazil (např. cesty 1,3 a 4 v obr.2-2).

⁹ Trubice obdélníkového nebo kruhového průřezu sloužící k přenosu elektromagnetické energie. Rozměr je úměrný použité vlnové délce.

I když signál odražený k přijímači urazil větší trasu, bude méně utlumen než signál přímý, jelikož útlum způsobený zdmi panelového domu v přímém směru je značně větší, než útlum způsobený vzduchem a odrazem na větší vzdálenost.

Jev, kdy přijímáme signál jednoho zdroje z více směrů, se odborně nazývá vícecestné šíření signálu.

2.4. Typy rušivých signálů

Základním vsudypřítomným rušením je rušení přírodní. Vyskytuje se na Zemi nezávisle na činnosti člověka. Do této skupiny patří především přírodní elektromagnetické jevy v atmosféře (výboj blesku) a jevy mimozemského původu (polární záře, rušivé emise Slunce apod.). Jsou to převážně nepravidelné vysokofrekvenční rušivé signály.

Druhým typem rušení je umělé (popř. průmyslové) rušení, způsobené činností člověka. V této skupině se nachází různá zařízení (nejen elektronická) vyrobená člověkem. Umělá rušení dělíme na:

- Úmyslná - Jedná se o úmyslně vytvořený užitečný vysokofrekvenční signál, který pokud se dostane do míst, kde s ním není počítáno, stává se rušivým signálem. (např. signál mobilního telefonu v blízkosti televize, signál zahraničního televizního vysílače pronikající do signálu našeho televizního vysílače, meteorologické a armádní radary)
- Neúmyslná - Vznikají jako vedlejší produkt při spínání silnoproudé zátěže, při přeměně velkých napětí či proudů a mnoho dalších závislých fyzikálních jevů. (všechny typy jiskření, mechanické i polovodičové spínače, zářivkové osvětlení, spínané zdroje, silnoproudé pece, neodrušené elektromotory i malých výkonů, tření materiálů - výboj statické elektřiny)

Rušení dále dělíme na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční. Dělicí kmitočet obou skupin je přibližně 10 kHz. Z tohoto pohledu taktéž vychází použité odrušovací součástky. Rozměry odrušovacích součástek jsou úměrné použité vlnové délce. Tedy čím nižší je kmitočet rušivého signálu, tím větší jsou rozměry odrušovacích kondenzátorů a tlumivek.

- Nízkofrekvenční rušení - je ve většině případů spojeno s kmitočtem a harmonickými složkami síťového napětí, se skokovými změnami ve stejnosměrném napájení. (pokles síťového napětí připojením velké zátěže, obloukové svařování)
- Vysokofrekvenční rušení - v rozsahu od 10kHz do stovek kHz je tvořeno převážně spínanými zdroji. V kmitočtech nad 300kHz se nacházejí vysokofrekvenční rušení vznikající na zařízeních, která využívají ke své funkci vysokofrekvenční signál. (indukční ohřívač, mikrovlnná trouba, rádiový vysílač)

Elektromagnetické pole můžeme rozdělit na elektrickou a magnetickou složku. Obě složky se vždy u každého signálu vyskytují současně, avšak podle způsobu vzniku elektromagnetického pole můžeme rozlišit, zda bylo vytvořeno primárně magnetickým nebo elektrickým polem.

- Elektrické pole vzniká mezi dvěma vodivými plochami s různým elektrickým potenciálem. Např. mezi vodičem a zemí. Silné elektrické pole tedy vzniká v okolí nadzemního vedení vysokého napětí.
- Magnetické pole vzniká v okolí vodiče, kterým protéká elektrický proud. Silné magnetické pole vzniká v blízkosti svařovacích kabelů nebo přírodních kabelů obloukové pece.

Z časového hlediska dělíme rušení na krátkodobé a dlouhodobé.

- Krátkodobé rušivé signály vznikají při jednorázových dějích. Za běžných podmínek se vyskytují jen náhodně, ale musíme s nimi počítat. Například při bouři můžeme napočítat běžně několik desítek blesků, při kterých můžeme pozorovat silné rušení televizního a rádiového signálu, ale například i WiFi¹⁰. Za běžných podmínek se takový typ rušení nevyskytuje, tudíž je krátkodobý, ale musíme s ním počítat, a proto jsou například ve WiFi implementovány kontrolní a opravné algoritmy, které opět naváží přerušené spojení a přenesou rušením zničená data. Na WiFi⁸ tento jev nemusí být pozorovatelný, ale na analogové televizi můžeme po blízkém úderu blesku pozorovat postupné obnovení synchronizace s vysílacím kmitočtem v řádu až několika vteřin.

¹⁰ WiFi je označení pro několik standardů IEEE 802.11 popisujících bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích.

- Dlouhodobé rušivé signály se mohou vyskytovat trvale nebo přerušovaně bez časového omezení. Tento typ rušení nejvíce snižuje kvalitu přenosového rádiového kanálu. Podle tvaru a úrovně rušivého signálu a podle typu přenosového rádiového kanálu může, ale nemusí, být možné udržet rádiový přenosový kanál v provozu například se sníženou přenosovou rychlostí. Nejnovější používané technologie vysokorychlostního přenosu dat pro mobilní zařízení využívá sérii různých modulací s různými úrovněmi bitové hloubky jednoho přenášeného symbolu. V případě silného přenosového kanálu, tedy přenosu na krátkou vzdálenost a bez rušení, zařízení použije nejsložitější možnou modulaci¹¹ s největším počtem bitů na symbol a nejvyšší možnou přenosovou rychlostí. Naopak při přenosu na velkou vzdálenost a se zarušením rádiového přenosového kanálu zařízení použije jednoduchou dvoustavovou modulaci¹² s nejnižší možnou přenosovou rychlostí. Mezi těmito dvěma krajními stavy je velké množství kombinací použitelných modulací a přenosových rychlostí, které jsou seřazeny a přiřazeny jednotlivým úrovním kvality rádiového přenosového kanálu. Přenosová rychlost mobilního zařízení je tedy plně variabilní a přizpůsobuje se aktuálním podmínkám prostředí. Je-li však kvalita rádiového přenosového kanálu omezena dlouhodobým rušením z cizího zařízení, pak je i dlouhodobě snížena přenosová rychlost mobilního účastníka, což je nepřijatelné, jelikož mobilní účastník platí svému operátorovi za toto připojení s maximální možnou přenosovou rychlostí a operátor platí za licence rádiových přenosových kanálů. Z těchto důvodů je dlouhodobé rušení nepřijatelné a musí být odstraněno.

Z frekvenčního hlediska dělíme rušení na stabilní a nestabilní.

- Frekvenčně stabilní rušivý signál pokrývá konkrétní stále stejně širokou část frekvenčního spektra.

¹¹ Modulace QAM, QPSK. Modulace má více stavů, každý stav odpovídá většímu počtu bitů. Používá se ke zvýšení přenosové rychlosti.

¹² Modulace ASK, FSK, PSK. Jedná se o starší modulace používající pouze dva stavy odpovídající logické jedničce a nule. Dosahují nižších přenosových rychlostí, ale jsou mnohem odolnější vůči rušení.

- Frekvenčně nestabilní rušivý signál s časem mění svou pozici nebo šířku ve spektru. Jedním z nejčastějších případů je přeskakující signál. Projevuje se skokovou změnou pozice signálu ve spektru mezi konečným počtem pozic (může se měnit i šířka ve spektru). Dalším z nejčastějších případů je pak plovoucí signál. Projevuje se plynulou pozorovatelnou změnou pozice signálu ve spektru.

Více o elektromagnetických interferencích viz [9].

2.5. Vznik rušivých signálů

V případě aktuálně používaných frekvenčních pásem rádio-buňkových sítí jsou nejčastějšími zdroji rušení různá stabilně umístěná zařízení, využívající ke své činnosti přilehlá frekvenční pásma. Vůbec nejčastější samostatnou skupinou případů rušení jsou poskytovatelé bezdrátového připojení k internetu pomocí technologie WiFi a podobných. Rušení v tomto případě může vzniknout dvojnásobem:

- Úmyslnými nezákonnými úpravami, tedy nelegálním zvýšením vysílacího výkonu, kdy výstupní filtry vysokofrekvenční části zařízení přestávají plnit svou funkci. Zařízení pak mimo dat na kmitočtu 2,4GHz vysílá i širokopásmové rušení na různých vzdálených kmitočtových pásmech. Druhou nelegální úpravou je pak pevné přeladění všech WiFi zařízení v síti. Po nelegálním přeladění WiFi zařízení neví a nemá možnost samo o sobě zjistit, že je přeladěno. Chová se tedy stejně, jako by pracovalo na pásmu 2,4GHz, ale ve skutečnosti pracuje na pásmu 2,5GHz nebo 2,3GHz popř. 2,2GHz. Frekvenční pásma v okolí pásma 2,4GHz neobsahují signály ostatních běžných WiFi zařízení ani jiných výkonných vysílačů a nelegální WiFi síť tedy pracuje velmi stabilně, avšak použitím těchto kmitočtů dojde k zarušení družicových, rádiových a televizních přenosů na větší vzdálenosti, ke kterým jsou tato pásma určena, a je tedy nutné velmi rychle najít a vyřadit z provozu takto upravená zařízení. Pevné přeladění vysílacího zařízení na nelegální frekvenční pásmo je jedním z nejhorších porušení zákona v tomto odvětví.

- Neúmyslnými příčinami pak může být navlhnutí vysokofrekvenční části a její nestabilní rozladění mimo pásmo 2,4GHz. Mechanické poškození vysokofrekvenční části zařízení, koaxiálních kabelů či antény a následné rozladění. A v neposlední řadě také neúmyslné nasměrování antény WiFi zařízení proti anténě přístupového bodu mobilního operátora, následné přesycení¹³ vstupu a zhoršení přijímacích vlastností přístupového bodu mobilního operátora.

Mobilní zařízení v sítích mobilního operátora stejně jako přístupové body nejsou bezporuchové. Mohou se u nich projevit různé typy závad ve vysokofrekvenčních částech zařízení, které mohou vést ke vzniku rušň. K poruchám zařízení může docházet vlivem času, opotřebení, navlhnutí nebo poničení. Porucha se následně může projevit frekvenčním rozladěním vysokofrekvenční části zařízení nebo například posuvem vysílacího časového intervalu¹⁴. Pohybují-li se tyto poruchy v určitých mezích, zařízení může nadále fungovat, ale přístupový bod svým měřením chybu detekuje a nahlásí v dohledovém centru mobilního operátora. Dojde-li k závažnější poruše, zařízení přestává fungovat, což mobilní účastník jednoznačně pozná.

2.6. Způsoby určování směru zdroje signálu

K zaměřování signálu potřebujeme podobné vybavení jako pro příjem signálu. Hlavní součástí je vždy vhodná přijímací anténa. Podle typu, směrovosti a zisku antény lze určit pro který způsob zaměřování je anténa vhodná, s jakou přesností je s anténou možno zaměřovat a v neposlední řadě na jakou vzdálenost lze s anténou přijímat signál.

Za anténu do koaxiálního vedení můžeme vložit další prvky upravující signál. Tyto prvky budou rozebrány v následujících kapitolách a pro jednotlivé způsoby zaměřování nemají až tak podstatný význam. Jejich použití bude rozebráno až v návrhu konkrétní aplikace.

¹³ Slabší signál, který se snažíme přijímat, může být zastíněn velmi silným signálem z vedlejšího frekvenčního pásma na vstupu přijímače. Projevuje se snížením odstupu signálu od šumu a zhoršením přenosových vlastností rádiového kanálu.

¹⁴ Timeslot - v multiplexu TDMA se jedná o přesně vymezené velmi krátké časové intervaly, kdy může konkrétní mobilní účastník vysílat.

Ze spektra přijatého anténou je nutné jednoznačně určit amplitudu nebo fázi konkrétního signálu (konkrétní měřené frekvence). K tomuto účelu se využívá optické či akustické signalizace, které předchází demodulace nebo složité matematické výpočty.

2.6.1. Ruční výkonové zaměřování

Ruční výkonové zaměřování je nejstarší metodou ke zjišťování pozice vysílače. Kvůli vysoké náročnosti a nepřesnosti se tato metoda téměř nepoužívá, a je zde okrajově uvedena jen z historických důvodů.

Metoda využívá libovolný přijímač s libovolnou malou všesměrovou, nejčastěji drátovou, anténou. Obsluha naladí přijímač na požadovaný kmitočet, a za stálého rovnoměrného pohybu sleduje akusticky nebo opticky indikovanou amplitudu přijímaného signálu. Ve směru pohybu, kde se amplituda zvyšuje, se nejspíše nachází i zdroj signálu. Pokud je možné určit aktuální hodnotu úrovně signálu, je možné naměřené hodnoty zaznamenat na měřicí body na mapě, čímž se zjednoduší zaměřování.

Metoda se používala v dávné historii a stále se používá pouze v případě, že nemáme k dispozici žádnou směrovou anténu ani jiné zařízení vhodné pro zaměřování. Historickým příkladem může být např. krystalka. Příkladem z dnešní doby může být program Netstumbler, který zaznamenává GPS souřadnice a úrovně WiFi signálů jednotlivých přístupových bodů WiFi sítí, ze kterých průběžně zakresluje do mapy přibližné pozice jednotlivých přístupových bodů.

2.6.2. Ruční zaměřování se směrovou anténou a demodulátorem

Přeladitelným demodulátorem se ze spektra vysokofrekvenčních signálů přenesou pouze úzká část na nízkofrekvenční signál. Úroveň nízkofrekvenčního signálu můžeme indikovat akusticky (jako běžný rádiový přijímač) nebo opticky ve formě ukazatele síly signálu (na starých rádiových přijímačích s amplitudovou modulací).

Ke všem metodám ručního zaměřování jsou nejvhodnější ostře směrové antény.

Obsluha po naladění konkrétního sledovaného kmitočtu sleduje indikaci, přičemž míří anténou do všech směrů, odkud může signál přicházet. Ve směru, kde je signál nejsilnější, se s největší pravděpodobností nalézá zdroj signálu. Obsluha se přesune na nejpravděpodobnější místo zdroje signálu a měření opakuje.

Ruční zaměřování s demodulátorem lze dobře použít na výkonově stabilní, třeba i plovoucí signály, ale není vhodné pro krátké periodické signály s delšími mezerami.



Obrázek 2-3: Lodní zaměřovač Sonar Model 45 [5]

Ruční zaměřování s demodulátorem je nejlevnější, efektivně použitelnou metodou zaměřování signálů, a proto je také nejpoužívanější, přestože bývá zdlouhavá.

2.6.3. Ruční zaměřování se spektrálním analyzátozem

Spektrálním analyzátozem lze zobrazit libovolnou část používaného frekvenčního spektra. Výstupem měření pak není jedna úroveň signálu konkrétní frekvence, ale graf závislosti úrovně signálu na frekvenci. Indikace je sice mírně pomalejší, ale dovoluje jednoznačně rozeznat obrys tvaru sledovaného signálu a odlišit jej od ostatních signálů.

Pro ruční zaměřování se spektrálním analyzátozem je taktéž nejvhodnější směrová anténa.

Obsluha nastaví dolní a horní sledovaný kmitočet spektrálního analyzátoru tak, aby výběr přesahoval alespoň jednu třetinu šířky měřeného signálu na obě strany od měřeného signálu. Při sledování špiček signálu ve spektru obsluha míří anténou postupně do všech směrů, odkud může signál přicházet. U pomalejších spektrálních analyzátorů je nutné v každém směru setrvat až několik vteřin, než se dokončí měření. Ve směru, kde má obrys signálu nejvyšší amplitudu se s největší pravděpodobností nalézá zdroj signálu. Obsluha se přesune ve směru, odkud signál přichází, na nejpravděpodobnější místo zdroje signálu a měření opakuje, dokud nenalezne konkrétní zdroj signálu.

Ruční zaměřování se spektrálním analyzátozem lze dobře použít na výkonově stabilní, třeba i plovoucí nebo přeskakující signály. Dá se taktéž použít pro měření periodicky se opakujících signálů s mezerami, ale měření je pak zdlouhavé a nemusí být přesné.

Ruční zaměřování se spektrálním analyzátozem je nákladnou metodou zaměřování signálů, a proto ji používá jen velmi malé množství institucí.



Obrázek 2-4: Ruční spektrální analyzátor R&S®FSH8

2.6.4. Základní směrová korelačně interferometrická metoda

Základní korelačně interferometrická metoda využívá k určení směru zdroje signálu fázový posun signálu v prostoru. K měření fázového posuvu v prostoru je zapotřebí minimálně dvou antén s přesně definovanou vzdáleností od sebe. Vzdálenost antén by měla být blízká vlnové délce zaměřovaného signálu, aby v případě zaměřování stálé nosné vlny bylo možné sledovat a zaznamenat všemi anténami stejnou periodu daného signálu¹⁵.

Signál je zachycen alespoň dvěma anténami s přesně definovanou vzdáleností. Další postup se dělí podle použitého zařízení.

První možností je nastavitelné zpoždění jednoho ze signálů ve vysokofrekvenční části¹⁶. Signál z jedné antény a zpožděný signál ze druhé antény se analogově sečtou v koaxiálním vedení použitím "T" koaxiální spojky. Součtový signál je přiveden do libovolného měřicího zařízení, kterým může být spektrální analyzátor stejně tak, jako i přijímač s demodulátorem a indikací úrovně signálu. Zpožďovací člen je nutné regulovat tak, aby na měřicím zařízení byla indikována maximální amplituda měřeného signálu. Dorazí-li impuls měřeného signálu z obou antén do "T" spojky ve stejný čas, vzájemně se sečtou, ale okolní šum zůstane téměř nezměněn. V opačném případě, dorazí-li signály z obou antén do "T" spojky v protifázi, vzájemně se odečtou. Různé posuny fáze mezi krajními polohami rozdílů fází obou signálů způsobí na výstupu taktéž různé mezistavy mezi minimem a maximem amplitudy. Například u sinusového či obdélníkového signálu je přechod mezi krajními stavy rovnoměrný a hladký, ale je-li například poměr šířky pulsu vůči mezeře v periodě signálu velmi malý, bude i maximum velmi úzké a ostré. Výstupem tohoto způsobu korelace je hodnota úhlu nastavená na vloženém zpožďovacím členu při maximální amplitudě signálu za "T" spojkou.

¹⁵ V případě značně větší vzdálenosti jednotlivých antén není možné rozlišit, která perioda sinusového signálu v digitalizovaném záznamu z jedné přijímací antény odpovídá které periodě téhož signálu přijímaného vzdálenější anténou. Stejnou periodu lze určit pouze u nestálých signálů.

¹⁶ Analogově, elektronicky (zpožďovací členy) nebo mechanicky (přepínatelné délky koaxiálního vedení) u jedné antény.

Druhou možností je matematická korelace signálů z obou antén. Signály z obou antén se bez úprav digitálně zaznamenají, avšak se společným, velmi přesným záznamem času či časové difference¹⁷. Dále následuje matematický výpočet korelace mezi oběma záznamy, jehož výstupem je stejně jako v prvním případě fázový posun obou signálů.

Známe-li přesné umístění obou antén a fázové zpoždění, s jakým dorazil signál do jednotlivých antén, je možné dopočítat křivku¹⁸, na které se zdroj signálu nachází. Pro jednoznačné určení směru je zapotřebí provádět korelaci alespoň ze tří antén¹⁹.

Pro správnou funkci zařízení je potřeba dodržet velmi přesné rozměry všech vysokofrekvenčních dílů. Antény musí mít přesné rozměry a vzdálenost od sebe, ale nesmí svým umístěním žádné tři antény tvořit přímku. Koaxiální kabely musí být přesně stejně dlouhé. U zpožďovacího členu musí být počítáno s korekční křivkou zpoždění. Případné předzesilovače musí být použity u všech antén stejné. Digitalizační a záznamové jednotky, jsou-li použity, musí být u všech antén taktéž stejné.

Přes všechna tato rozměrová opatření je nutné zaměřovací zařízení kalibrovat, jelikož na vysokých kmitočtech způsobují fázové posuny v řádech stupňů i rozměry na koaxiálních kabelech v řádech pod milimetr.

Pro zaměřování s měřením fázového posunu je možné použít i jiné než všesměrové antény, ale při použití ostrých směrových antén je nutné počítat s možností, že bude směrová anténa silněji přijímat signál odražený od překážky, který je ve směru hlavního laloku vyzařovacího diagramu antény.

¹⁷ Aktuální lokální čas není pro měření důležitý, je však důležitý časový posun mezi vzorky z jednotlivých antén.

¹⁸ Dorazí-li signál do obou antén současně, pak zdroj signálu na mapě leží někde na ose kolmé k ose mezi anténami, protínající střed osy. Dorazí-li signál do jedné antény později, mění se přímka na mapě, kde se může nacházet zdroj signálu, v křivku podobnou křivce $y = a \cdot x^2 + b$, kde "a" i "b" rostou od nuly se zvětšujícím se časovým rozdílem přijatých signálů. Křivka se přibližuje a zakřivuje vždy směrem k anténě, která přijala signál jako první.

¹⁹ U dvou blízkých antén a vzdáleného zdroje jsou výsledkem dva směry, kterými křivka prochází, zrcadlově vůči ose antén.

Metodu korelační interferometrie se zpoždovacím členem lze dobře použít na všechny typy dostatečně dlouhých signálů. Korelace musí být provedena alespoň pro tři antény k jednoznačnému určení směru. Nejčastěji je jedna anténa zvolena jako referenční a přivedena na jeden vstup. Druhý vstup je přepínán mezi ostatními anténami. Aktuálně vyráběná zařízení potřebují k zaměření signály o délce minimálně deset milisekund.

Metodu programové matematické korelační interferometrie lze dobře použít na všechny typy signálů, pokud probíhá záznam z alespoň tří antén současně, což je také podmínka k jednoznačnému určení směru. Nejčastěji je však jedna anténa zvolena jako referenční a přivedena na jeden vstup. Druhý vstup je přepínán mezi ostatními anténami. V tomto případě musí být minimální délka signálů dost dlouhá pro naměření a přepnutí všech antén potřebných pro zaměření.

U obou metod platí, je-li měřeno více signálů na blízkých kmitočtech, je možné v jednom měření vyhodnotit směry všech těchto signálů. Každý signál bude v korelaci vykazovat své maximum ve svém směru.

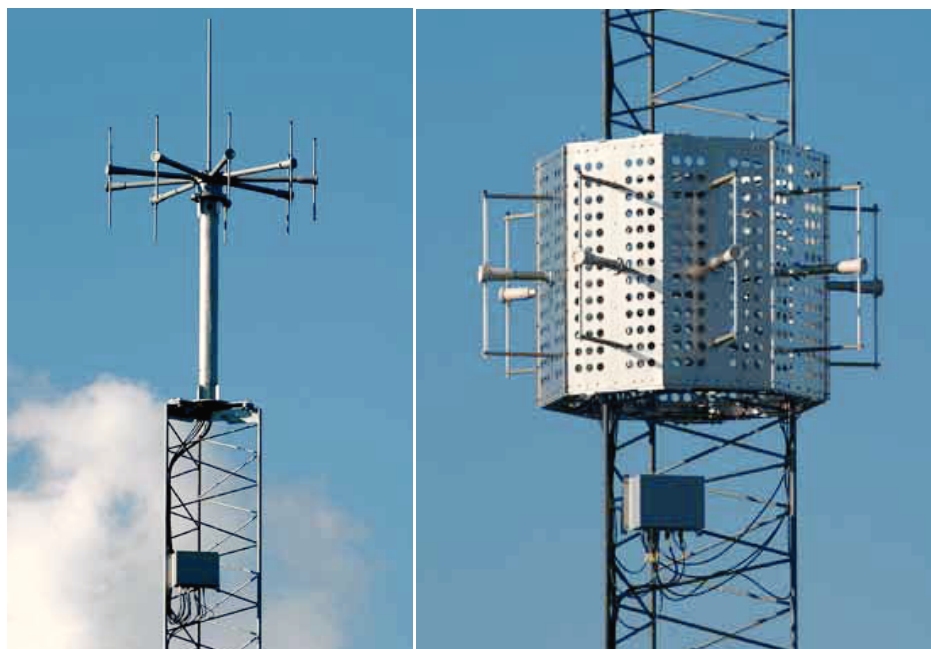
Těmito metodami lze v některých případech zaznamenat každou anténou i více kopií vyslaného signálu. Kopie vznikají důsledkem vícestředného šíření signálu²⁰. Signál s nejvyšší amplitudou nemusí být ten, který chceme měřit, ale může být jen vhodně odraženým signálem, přičemž přímo šířícímu-se signálu může stát v cestě překážka. Z tohoto důvodu je nutné vyhodnotit, který z fázových posunů vystupující z metody, odpovídá prvnímu, třebaže i podstatně slabšímu signálu, jelikož se jedná o originál.

Je-li ve zdroji signálu použita ostrá směrová anténa, pak vůči zaměřovací jednotce dorazí signál odrazem z úplně jiného směru, a to i z velké vzdálenosti. Všechny předchozí metody zaměřování lze tímto způsobem zmást natolik, že mohou zaměřit signál s odchylkou úhlu i větší než 90°. Pouze metody využívající korelační interferometrie jsou do jisté míry odolné vůči vícestřednému šíření, avšak v případě úplného utlumení signálu v přímočarém směru jsou i tyto metody nepoužitelné.

²⁰ Např. nachází-li se někde v okolí vhodně natočená odrazná plocha, do přijímače dorazí signál přímou cestou a zpožděná kopie signálu, která se odrazila o odraznou plochu.

Metoda korelační interferometrie se zpoždovacím členem je nákladnou metodou k určování směru umístění zdroje signálu z důvodu potřeby rychlého přepínače více anténních vstupů a nezkreslujícího zpoždovacího členu, jejichž cena není malá, a proto tuto metodu využívá v České republice zřejmě pouze Český telekomunikační úřad.

Metoda programové matematické korelační interferometrie je extrémně nákladnou metodou k určování směru umístění zdroje signálu pro vysoké kmitočty. K zaznamenání signálů na pásmech mobilních operátorů je zapotřebí nejlépe ke každé anténě připojit zařízení pro nepřerušovanou digitalizaci a záznam signálu se vzorkovacím kmitočtem alespoň 10GS/s^{21} , jejichž cena je extrémní, a proto se tato metoda nevyužívá ani v největších institucích. Aktuální využití je spíše experimentální.



Obrázek 2-5 a 2-6: Zaměřovače na principu základní směrové korelačně interferometrické metody.

²¹ Nyquistovo kritérium. Vzorkovací kmitočet musí být větší nebo roven dvojnásobku maximálního měřeného kmitočtu. Je-li kmitočet UMTS přibližně 2,2 GHz, musí být vzorkovací kmitočet větší nebo roven 4,4 GHz. U signálů různých tvarů musí být vzorkovací kmitočet většinou násobně větší podle tvaru konkrétního signálu.

2.7. Způsoby určování pozice zdroje signálu na mapě

K určení konkrétní pozice zdroje signálu na mapě může být použita kterákoli metoda z předcházející kapitoly, přičemž se obsluha postupně přemísťuje i s měřicím zařízením ve směru zdroje signálu, dokud nenalezne zdroj signálu. Následující kapitoly popisují metody určující konkrétní pozici zdroje signálu na mapě s určitou přesností, avšak bez potřeby několikanásobného postupného přibližování ke zdroji signálu. Základními stavebními prvky následujících metod jsou metody předchozích kapitol.

2.7.1. Ruční nebo automatická směrová triangulace

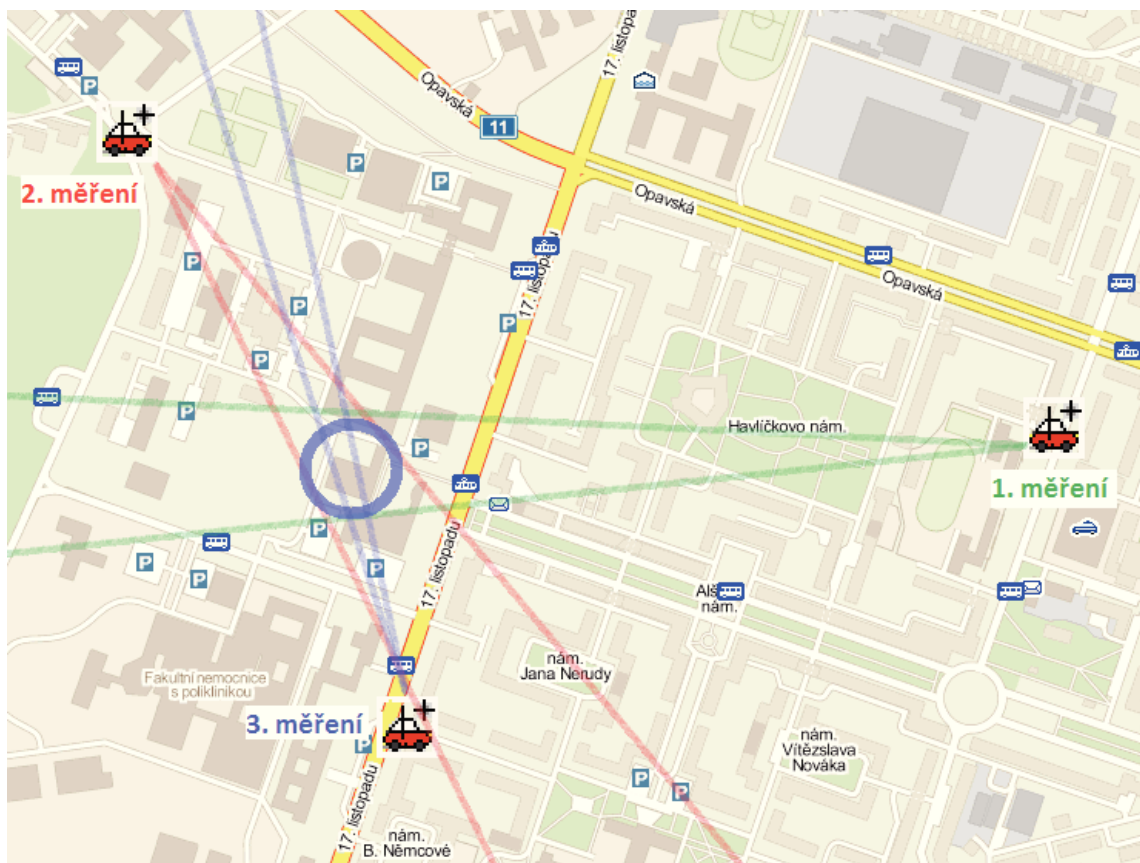
Směrová triangulace spočívá v umístění alespoň dvou zaměřovacích jednotek, využívajících některou z předcházejících spolehlivých metod určení směru zdroje signálu s demodulátorem, někde v terénu v okolí zdroje signálu. Minimální potřebná konfigurace se skládá ze dvou zaměřovacích jednotek, které netvoří svým umístěním v terénu se zaměřovaným zdrojem signálu přímkou, ani se k ní neblíží.

Ke směrové triangulaci se využívají výhradně směrové, nejlépe úzkopaprskové antény.

Zaměřování se provádí současně ze všech zaměřovacích jednotek. Pouze v případě, že je signál dostatečně stabilní, lze provést měření postupně z jednotlivých stanovišť.

Všechny zaměřovací jednotky musí znát svou pozici a směr natočení na mapě. Navzájem pak musí být informačně propojeny. V ideálním případě vlastním rádiovým kanálem. Naopak v nejhorším případě technik objede všechny zaměřovací jednotky, postupně provede zaměření a zaznamená si informace z každého zaměřovacího stanoviště do mapy.

Automatizovaný systém využívá spektrální analyzátoři. Ze všech bodů současně provede měření konkrétní části spektra ve všech směrech. Naměřená data se odešlou do centrálního počítače, který údaje zanesou do mapy. Mapa pak obsahuje konkrétní bod a poloměr kružnice, ve které se zdroj zaměřovaného signálu nejspíše nachází.



Obrázek 2-7: Příklad postupu zaměřování zdroje signálu.

Automatickou metodu směrové triangulace lze dobře použít i na výkonově nestabilní, třeba i plovoucí nebo přeskakující signály. Dá se taktéž dobře použít pro měření periodicky se opakujících signálů s mezerami, přičemž automatizovaný systém vyčkává v každém směru natočení antény na příchod nového krátkého signálu nebo jednoznačné změny signálu a porovnává se signálem, vyslaným ve stejný čas, zachyceným jinou zaměřovací jednotkou. Následně se provede normalizace úrovní v čase. Změní-li se vysílací výkon zdroje signálu mezi dvěma krátkými vyslanými signály, a zároveň se otočí přijímací antény zaměřovacích jednotek, pak nemusí být maximální amplituda naměřena ve směru zdroje signálu. Normalizací úrovní signálů v čase je vyřešen problém změny vysílací úrovně signálu vysílače.

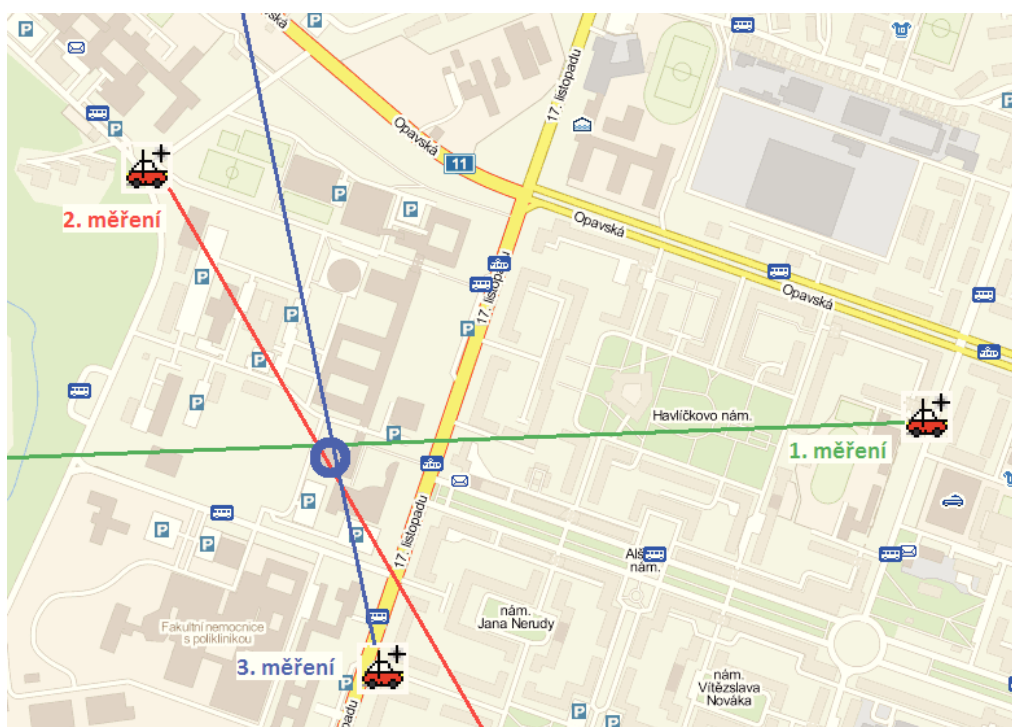
Ruční a zvláště pak automatizované zaměřování se spektrálním analyzátořem je nákladnou metodou zaměřování signálů, a proto ji používá jen malé množství institucí.

2.7.2. Ruční nebo automatická triangulace s využitím směrové korelační interferometrie

Metoda spočívá v umístění alespoň dvou zaměřovacích jednotek, využívajících metodu korelační interferometrie pro určení směru, někde v terénu v okolí zdroje signálu. Minimální potřebná konfigurace se skládá ze dvou zaměřovacích jednotek, které netvoří svým umístěním v terénu se zaměřovaným zdrojem signálu přímku, ani se k ní neblíží.

Není-li možné signál zaměnit s jiným signálem ve spektru ani po několikaminutovém časovém intervalu, lze provést měření postupně z jednotlivých stanovišť.

Každá zaměřovací jednotka musí znát svou pozici a směr natočení na mapě. Je-li použito více než jedna zaměřovací jednotka, musí být jednotky navzájem informačně propojeny. V ideálním případě vlastním rádiovým kanálem. Naopak v nejhorším případě technik objede všechny zaměřovací pozice, postupně provede zaměření a zaznamená si informace z každého zaměřovacího stanoviště do mapy. Princip i výsledek je tedy téměř totožný jako v předchozí metodě, až na typy zaměřitelných signálů a přesnost.



Obrázek 2-8: Příklad postupu zaměřování zdroje signálu.

Automatizovaný systém shromažďuje data ze všech bodů měření v centrálním počítači, který údaje zanesou do mapy. Mapa pak obsahuje konkrétní bod a poloměr kružnice, ve které se zdroj zaměřovaného signálu nejspíše nachází.

Metodu triangulace s využitím směrové korelační interferometrie lze dobře použít na všechny typy signálů jako u metody směrové korelační interferometrie, kde je jediným možným limitem minimální délka signálů, která je dána rychlostí měření a přepínání antén pokud je přepínání v metodě použito.

Náklady na tuto metodu vycházejí hlavně z nákladů na zaměřovací jednotky k určení směru, které jsou uvedeny v předchozích bodech. Dalšími náklady na metodu jsou případné prvky pro automatizaci měření.

Tuto metodu aktuálně využívá Český telekomunikační úřad, a to v podobě stabilních zaměřovacích jednotek, na vyvýšených místech po celé republice, pro hrubé určení pozice zdroje signálu, a zaměřovacích vozidel ke zjištění konkrétní pozice zdroje signálu.



Obrázek 2-9: Stabilní zaměřovací jednotka ČTÚ.

2.7.3. Automatická korelačně interferometrická triangulace

Automatická korelačně interferometrická triangulace spočívá v použití digitálního záznamu měřeného signálu z jedné antény a extrémně přesných hodin v každé ze zaměřovacích jednotek. Není důležitá synchronizace hodin se světovým časem, ale velmi přesná synchronizace hodin mezi zaměřovacími jednotkami. Stejně tak přesně musí být známa pozice každé zaměřovací jednotky. Minimální potřebná konfigurace se skládá ze tří zaměřovacích jednotek, které netvoří svým umístěním v terénu se zaměřovaným zdrojem signálu přímku, ani se k ní neblíží. Jedná se spíše o systém stabilních zaměřovacích jednotek, jelikož není možné jednoduše a efektivně změnit polohu stabilní zaměřovací jednotky a zjistit aktuální pozici jednotky dostatečně přesně. Výsledkem dvou zaměřovacích jednotek je křivka²², je nutné použít rovnou minimálně tři zaměřovací jednotky.

V metodě korelačně interferometrické triangulace se využívají většinou všesměrové antény. Směrové antény lze použít pouze při potřebě co nejvyššího dosahu, ale za cenu značného snížení rychlosti zaměření z důvodu otáčení antén. Dalším problémem směrových antén v této metodě je možnost zachycení odraženého signálu od překážky ve směru hlavního laloku antény, který může být podstatně silnější než signál přímočarý. Se směrovými anténami probíhá prvně měření směru rotací antény každé jednotky zvlášť, a až je zjištěn směr nejvhodnějšího, ale ne vždy nejsilnějšího signálu, provede se samotné zaměření pomocí korelační interferometrie.

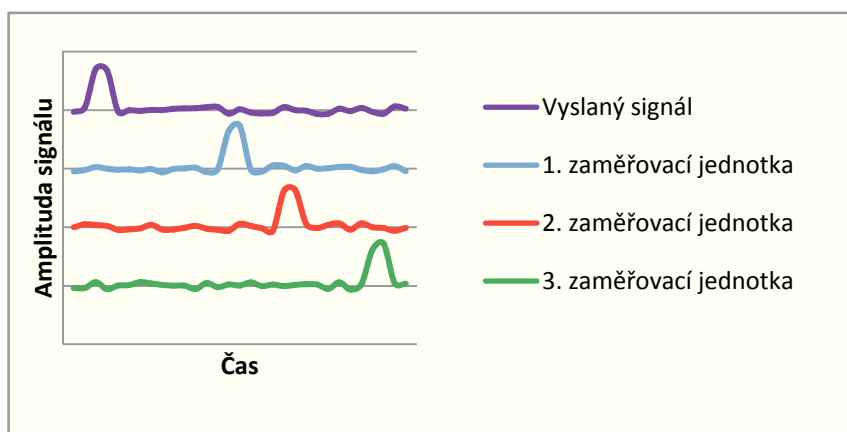
Zaznamenaný signál s přesnými časovými značkami se odešle do centrálního počítače, který provede korelaci současně zaznamenaných signálů postupně vždy ze dvou antén. Z vyhodnoceného fázového posunu v čase mezi jednotlivými zaměřovacími jednotkami se vyhodnotí rozdíly dráhy uražené signálem k zaměřovacím jednotkám.

Ze známých umístění zaměřovacích jednotek na mapě, jejich vzdáleností a fázových posunů téhož signálu mezi jednotkami se vypočte pozice zdroje signálu na mapě.

²² Dorazí-li signál do obou antén současně, pak zdroj signálu na mapě leží někde na ose kolmé k ose mezi anténami, protínající střed osy. Dorazí-li signál do jedné antény později, mění se přímka na mapě, kde se může nacházet zdroj signálu, v křivku podobnou křivce $y=a*x^2 + b$, kde "a" i "b" rostou od nuly se zvětšujícím se časovým rozdílem přijatých signálů. Křivka se přibližuje a zakřivuje vždy směrem k anténě, která přijala signál jako první.



Obrázek 2-10: Příklad zaměřování pozice zdroje signálu.



Obrázek 2-11: Histogram signálů ke příkladu zaměřování.

Metodou korelačně interferometrické triangulace lze v některých případech zaznamenat jednou zaměřovací jednotkou i více kopií vyslaného signálu. Kopie vznikají důsledkem vícecestného šíření

signálu²³. Signál s nejvyšší amplitudou nemusí být ten, který chceme měřit, ale může být jen vhodně odraženým signálem, přičemž přímo šířícímu-se signálu může stát v cestě překážka. Z tohoto důvodu je nutné ze zaznamenaných dat do výpočtů vybírat vždy první, třeba i podstatně slabší signál.

Je-li ve zdroji signálu použita ostrá směrová anténa, pak vůči většině přijímačů dorazí signál odrazem z úplně jiného směru, a to i z velké vzdálenosti. Všechny předchozí metody zaměřování lze tímto způsobem zmást natolik, že může každé zaměřovací stanoviště zaměřit signál s odchylkou úhlu i větší než 90°. Pouze metoda korelačně interferometrické triangulace je dostatečně odolná vůči vícecestnému šíření. V případě že alespoň jedna zaměřovací jednotka zachytí signál z přímého směru, a jsou-li zaměřovací jednotky vhodně rozmístěny, je možné označit data ostatních zaměřovacích jednotek za neplatná, a využít spíše mobilních zaměřovacích jednotek nebo zaměřit zdroj signálu i z jiných, vzdálenějších zaměřovacích jednotek stejného typu.

Metodu korelačně interferometrické triangulace lze použít na absolutně všechny typy rušivých signálů. Značně přesná pozice zdroje signálu je známa ihned po zachycení prvního signálu alespoň třemi zaměřovacími jednotkami. Určení pozice zdroje signálu je zpožděno pouze matematickým výpočtem. Jedná se o nejrychlejší a velmi přesnou metodu.

Metoda korelačně interferometrické triangulace využívá velký počet velmi nákladných stabilních zařízení. K zaznamenání signálů na pásmech mobilních operátorů je zapotřebí k anténě připojit v každé stabilní zaměřovací jednotce zařízení pro nepřerušovanou digitalizaci a záznam signálu včetně času, se vzorkovacím kmitočtem alespoň 10GS/s²⁴, jejichž cena je extrémní, a proto se tato metoda nevyužívá ani v největších institucích. Aktuální využití metody je spíše experimentální, používá se však např. pro detekci blesků, kdy má zaměřovaný signál velmi nízký kmitočet, vysokou amplitudu a jediný jeden impuls. Mobilní zaměřovače, založené na této metodě, lze taktéž použít, ale již tak extrémní cena stabilního zařízení se mění až v nepředstavitelnou v mobilní verzi, přičemž nesmí být opomenuta potřeba alespoň tří zaměřovacích jednotek současně

²³ Např. nachází-li se někde v okolí vhodně natočená odrazná plocha, do přijímače dorazí signál přímou cestou a zpožděná kopie signálu, která se odrazila o odraznou plochu.

²⁴ Nyquistovo kritérium. Vzorkovací kmitočet musí být větší nebo roven dvojnásobku maximálního měřeného kmitočtu. Je-li kmitočet UMTS přibližně 2,2 GHz, musí být vzorkovací kmitočet větší nebo roven 4,4 GHz. U signálů různých tvarů musí být vzorkovací kmitočet většinou násobně větší podle tvaru konkrétního signálu.

a velmi přesného určení aktuální polohy zaměřovací jednotky, kterou nelze běžně pomocí GPS dosáhnout.

Tato metoda by byla nejefektivnější a jednoduše aplikovatelná v rádio-mobilních sítích. Do stávajících přístupových bodů mobilních operátorů na stávající antény stačí přidat funkci digitálního nepřerušovaného záznamu pro potřeby zaměření a přesné hodiny. Jelikož je rádio-mobilními sítěmi pokryta většina území České republiky, bylo by možné zaměřit libovolný zdroj signálu v okolí frekvenčních pásem mobilních operátorů kdekoli na území ČR s dosti vysokou přesností. Libovolným zdrojem signálu se myslí nejen zdroj rušení, ale i mobilní účastník. Bohužel i přes veškeré výhody tohoto řešení je základní nevýhodou extrémní cena.

2.7.4. Celoplošná triangulace z pevných stanovišť

Pevným rozmístěním konečného počtu stejných zaměřovacích stanovišť kteréhokoli typu z výše uvedených lze docílit celoplošného pokrytí. Bohužel žádná ze stacionárních metod není dostatečně přesná, aby určila konkrétní zdroj signálu na více než pár stovek metrů. U všech stacionárních metod měření počítáme s tolerancí, tedy s kružnicí, ve které by se měl zdroj signálu nacházet, jejíž poloměr je minimálně v desítkách nebo stovkách metrů. Pro přirovnání v kružnici s poloměrem deset metrů na střeše jednoho domu se běžně vyskytují i desítky vysokofrekvenčních elektronických zařízení. Pro potřeby určení konkrétního zařízení pak nezbyvá než použít mobilní zaměřovací metodu.

2.7.5. Lokální mobilní triangulace

Je-li známa oblast o maximálním průměru do desítek kilometrů, kde by se měl nacházet zdroj signálu, a potřebujeme-li znát konkrétní umístění zdroje, je nejvhodnější použít mobilní zaměřovací metodu.

Oblast, ve které se zdroj signálu nachází, musí být zjištěna jiným způsobem. Nejčastější způsoby zjištění oblasti, ve které se zdroj signálu nachází jsou:

- Stížnosti mobilních účastníků v jedné lokalitě na zhoršení kvality nebo vypadávání spojení.
- Stížnosti televizních diváků v jedné lokalitě na zhoršení příjmu televizního signálu.
- Zaměření celoplošnou triangulací z pevných stanovišť.
- Konkrétní přístupový bod rádio-mobilní sítě hlásí zvýšenou chybovost.
- Stížnost na rušení od držitele licence na frekvenční pásmo v konkrétní lokalitě.

Lokální mobilní triangulace může využívat kteroukoli z prvních čtyř zmiňovaných metod určujících směr zdroje signálu. Jedinou podmínkou je pak pohyblivost zaměřovacího zařízení v terénu, což způsobí nemalé navýšení nákladů na vybavení, ale také absolutní přesnost zaměření zdroje signálu, pokud je použita metoda vhodná pro daný signál.

Například u metody směrové triangulace je nutné vyměnit stabilní spektrální analyzátor nebo demodulátor s indikátorem za mobilní, stejně jako anténu. Zmenší se mírně dosah měřícího zařízení, ale ten již v konkrétní lokalitě není tak důležitý. K zaměření konkrétního zdroje signálu mobilní směrovou triangulací postačuje jedno mobilní zaměřovací zařízení, pokud je signál dostatečně stabilní, nebo se vyskytuje v pravidelných, dostatečně dlouhých intervalech.

3. Návrhy praktické realizace

Neveřejná část, viz Příloha 1.

4. Závěr

Podářilo se navrhnout a otestovat novou zaměřovací metodu, která v několika významných ohledech předčí aktuálně komerčně vyráběné a využívané metody zaměřování.

Byl vytvořen nový způsob zobrazování směrové závislosti signálů.

Detailní popis nové zaměřovací metody, laboratorní testy i návrh komplexního zaměřovacího systému se nachází v neveřejné příloze.

Laboratorní testy proběhly v krajně nepříznivých podmínkách, přičemž bylo porušeno několik principiálních podmínek pro správnou funkci navržené metody, a přesto bylo dosaženo velmi uspokojivých výsledků.

Navrženou metodou je možné zaměřovat všechny typy signálů, i signály kratší než 10ms, což s většinou komerčně vyráběných zaměřovacích přístrojů nelze. Bezsporu hlavním hlediskem je jednoduchost zařízení, proti aktuálně využívaným zaměřovacím zařízením, která se značně projeví v ceně zařízení.

Navrženou metodu lze jednoduše aplikovat s odpovídajícím zařízením na všech frekvenčních pásmech od přibližně 50MHz výše. S rostoucím kmitočtem se šíření signálů přibližuje k přímočarému šíření, a tedy se i zvyšuje přesnost metody.

Před samotnou výrobou navrženého zařízení je nezbytné provést několik reálných laboratorních měření s vhodnými laboratorními měřicími přístroji a vybavením uvedeným v požadavcích na měřicí metodu. Dle naměřených výsledků je nutné doplnit matematickou programovou část měřicí metody o jednoduchou matematickou úpravu naměřených dat. Tato část nebyla v práci dořešena z důvodu špatné optimalizace programu, velmi zdouhavého vykreslování a neodpovídajícího měřicího vybavení. V důsledku se jedná o doplnění programu o jednoduché matematické sčítání a násobení nad tabulkou čísel podle reálných naměřených hodnot konkrétního měřicího zařízení.

Literatura

- [1] KUPPER, Axel., Location-Based Services, Wiley 2005, ISBN 0-470-09231-9.
- [2] GSMweb [online]. 2005, 2010 [cit. 2011-04-17]. Frekvenční příděl na pásmech GSM, DCS a UMTS v ČR. Dostupné z WWW: <<http://www.gsmweb.cz/clanky/freq2.htm>>.
- [3] Tutorials point [online]. 2011 [cit. 2011-04-17]. GSM - The Base Station Subsystem. Dostupné z WWW: <<http://www.tutorialspoint.com/gsm/>>.
- [4] DOBEŠ, J., ŽALUD, V.: Moderní radiotechnika. Vydavatelství BEN, Praha, 2006.
- [5] The Chum bucket [online]. 2007 [cit. 2011-04-21]. Radio Direction Finders. Dostupné z WWW: <<http://www.angelfire.com/space/proto57/rdf.html>>.
- [6] Jarda Kučera [online]. 2008 [cit. 2011-04-21]. Přijímače z 60.let. Dostupné z WWW: <http://web.quick.cz/jarda.kucera/tarnzist_prijim.html>.
- [7] *Digitální zaměřovač DDF 195 : Návod k obsluze*. Praha : Rohde&Schwarz, 2002. 42 s. Dostupné z WWW: <[http://www.rohde-schwarz.com/www/cz_cont.nsf/file/DDF195_manual_CZweb.pdf/\\$file/DDF195manual_CZweb.pdf](http://www.rohde-schwarz.com/www/cz_cont.nsf/file/DDF195_manual_CZweb.pdf/$file/DDF195manual_CZweb.pdf)>.
- [8] EBERSPÄCHER, Jörg, et al. *GSM – Architecture, Protocols and Services*. Wiltshire : Wiley, 2009. 327 s. ISBN 978-0-470-03070-7.
- [9] VACULÍKOVÁ, P., VACULÍK, E. a kol. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*. Praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vř rušení. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 1998. 504 s. ISBN 80-7169-568-8.
- [10] BROWN, Christie: *Spectrum Analysis Basics*, Hewlett-Packard Company, Microwave Instruments Division, 1400 Fountaingrove Parkway, Santa Rosa, California 95403, U.S.A.
- [11] Christoph Rauscher, Volker Janssen, Roland Minihold: *Fundamentals of Spectrum Analysis*, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Mühldorfstrasse 15, 81671 München, Germa-ny, www.rohde-schwarz.com, First edition 2001, PW 0002.6635

- [12] MAZÁNEK, Miloš; PECHÁČ, Pavel. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2004. 259 s.
- [13] PROCHÁZKA, Miroslav: *Antény - encyklopedická příručka*, BEN - technická literatura, 2005, ISBN 80-7300-166-7
- [14] HÁJEK, Karel; SEDLÁČEK, Jiří. *Kmitočtové filtry*. Praha : BEN - technická literatura , 2002. 536 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [15] Davídek, V. - Laipert, M. - Vlček, M.: *Analogové a číslicové filtry*. Praha: ČVUT, 2000. 337 s. ISBN 80-01-02178-5.
- [16] Rudge, A.W., Olver, A.D., Knight, P., Milne, K.: *The handbook of antenna design*. dostupné na <http://books.google.com>
- [17] Tysl, V., Ružicka, V.: *Teoretické základy mikrovlnné techniky*. SNTL, Praha 1989
- [18] Hoffman, K., Hudec, P., Sokol, V.: *Aktivní mikrovlnné obvody*. skriptum FEL CVUT, Praha 2004.
- [19] ČERNÝ, J., STEINER, I.: *GPS od A do Z*. PICODAS, 2006.
- [20] VALENTI, Chris. *Designing a Digital Compass Using the PIC18F2520*. [s.l.] : Microchip Technology Inc., 2005. 18 s. Dostupné z WWW: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00996a.pdf>>.
- [21] PUŽMANOVÁ, R. *Moderní komunikační sítě od A do Z*. 2. aktualizované vydání. Brno: Computer Press, 2006. 430 s. ISBN 80-251-1278-0.
- [22] VLACH, J. *Začínáme s LabVIEW*. Praha : BEN - technická literatura, 2008.
- [23] *NI PXI-5690 with NI PXI-5661 Specifications : RF Preamplifier with RF Vector Signal Analyzer System Specifications*. [s.l.] : National Instruments Corporation, 2007. 8 s. Dostupné z WWW: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/372118b.pdf>>.

- [24] *NI RF Signal Generators*. [s.l.] : National Instruments Corporation, 2009. 181 s. Dostupné z
WWW: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371356h.pdf>>.

Seznam příloh

- a) Neveřejná část - Návrh zaměřovacího zařízení
- b) Neveřejná část - CD s programy, fotkami a dokumenty