

Principy digitální mikrovlnné komunikace

OBSAH

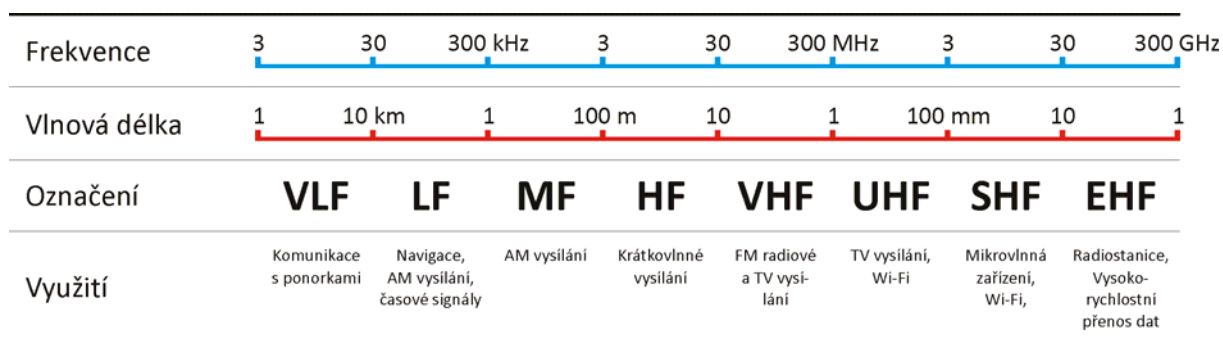
str.

1. PŘEHLED MIKROVLNNÉ KOMUNIKACE	1
1.1 ZÁKLADNÍ KONCEPCE MIKROVLN	1
1.2 VLASTNOST DIGITÁLNÍCH RADIOKOMUNIKAČNÍCH SYSTÉMŮ	1
1.3 VÝBĚR MIKROVLNNÝCH KANÁLŮ A JEJICH USPOŘÁDÁNÍ.....	2
1.4 OBECNÉ SCHÉMA DIGITÁLNÍHO MIKROVLNNÉHO SYSTÉMU	3
1.5 STRUKTURA DIGITÁLNÍHO MIKROVLNNÉHO RÁMCE	5
2. DIGITÁLNÍ MIKROVLNNÁ ZAŘÍZENÍ	6
2.1 KLASIFIKACE MIKROVLNNÝCH ZAŘÍZENÍ	6
2.2 MIKROVLNNÁ ANTÉNA A NAPÁJEČ	6
2.3 VNĚJŠÍ JEDNOTKA (ODU OUTDOOR UNIT)	9
2.4 VNITŘNÍ JEDNOTKA (IDU INDOOR UNIT)	12
2.5 MONTÁŽ A NASTAVENÍ MIKROVLNNÉHO SPOJE	13
3. DIGITÁLNÍ MIKROVLNNÁ SPOJENÍ A JEJICH SÍTĚ	15
3.1 MIKROVLNNÉ STANICE A TYPY SÍTÍ.....	15
3.2 RETRANSLAČNÍ STANICE	15
3.3 POUŽITÍ DIGITÁLNÍCH MIKROVLNNÝCH SPOJENÍ.....	18
4. TEORIE ŠÍŘENÍ MIKROVLN	19
4.1 ŠÍŘENÍ ELEKTRICKÝCH VLN VE VOLNÉM PROSTORU	19
4.2 VLIV ODRAZŮ NA ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN.....	20
4.3 VLIV TROPOSFÉRY NA ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY	29
4.4 ÚNIK ZPŮSOBENÝ NĚKTERÝMI ATMOSFÉRICKÝMI A ZEMNÍMI VLVY.....	32
4.5 KMITOČTOVĚ ZÁVISLÝ ÚTLUM	35
4.6 STATISTICKÉ ZÁVISLOSTI ÚNIKU.....	38
5. TECHNIKA ANTI-FADING V MIKROVLNNÝCH ZAŘÍZENÍCH	40
5.1 PŘEHLED	40
5.2 ADAPTIVNÍ EKVALIZER	42
5.3 OPATŘENÍ PROTI RUŠENÍ KŘÍŽOVOU POLARIZACÍ (XPIC)	44
5.4 AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ PŘENÁŠENÉHO VÝKONU (ATPC)	45
5.5 DIVERZNÍ PŘÍJEM.....	46
5.6 ZÁLOHOVÁNÍ MIKROVLNNÝCH ZAŘÍZENÍ	50
5.7 RUŠENÍ.....	53
6. VÝPOČTY V MIKROVLNNÝCH SPOJÍCH	55
6.1 ÚVOD	55
6.2 VÝPOČET PARAMETRŮ TRASY	55
6.3 VÝPOČET PARAMETRŮ MIKROVLNNÉ TRASY.....	58
7. POŽADAVKY TECHNICKÉ REALIZACE MIKROVLNNÉHO SPOJE	66
7.1 ÚVOD	66
7.2 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA TRASU	66
7.3 MIKROVLNNÉ PÁSMO A POLARITA ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN	68
7.4 TECHNICKÉ POŽADAVKY NÁVRHU MIKROVLNNÉ KOMUNIKACE.....	71
7.5 NÁVRH MIKROVLNNÉHO SPOJE.....	74
7.6 POSTUP NÁVRHU.....	74
8. PŘÍLOHY	78
8.1 SEZNAM OBRÁZKŮ	78
8.2 SEZNAM TABULEK.....	78

1. PŘEHLED MIKROVLNNÉ KOMUNIKACE

1.1 ZÁKLADNÍ KONCEPCE MIKROVLN

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny o kmitočtu mezi $0,3 \div 300$ GHz a zahrnují horní část spektra elektromagnetických vln. Obecně se šíří elektromagnetické vlny z bodového zdroje všemi směry a vytváří kulovou vlnoplochu. Ve větších vzdálenostech lze kulovou vlnoplochu aproximovat rovinou. Elektromagnetické vlny jsou příčné vlnění bez podélné složky. Jak elektrické, tak magnetické pole má jen složky kolmé ke směru šíření, které jsou rovněž kolmé k sobě navzájem. Takové elektromagnetické vlnění se nazývá transverzální a označuje se TEM. Mezinárodní rozdělení kmitočtů je uvedeno v následujícím obrázku.



Obrázek 1 Rozdělení mikrovlnného spektra

Pásmo UHF využívané pro přenos televize je zahrnuto do mikrovlnného pásma $0,3 \div 300$ GHz, ale mikrovlnným pásmem se nenazývá. Na kmitočet 300 GHz mikrovlnného pásma navazuje pásmo optických vln. Optické vlny jsou také druhem elektromagnetických vln. Optická komunikace využívá k přenosu signálu světla.

Digitální mikrovlnná komunikace je typ komunikačního módu, který pomocí mikrovln přenáší digitální informaci prostorem. Mikrovlny se šíří v přímém směru a ohybu podléhají jen málo. Jednotlivé spolupracující stanice musí být v optickém dohledu. To omezuje přenos na velké vzdálenosti. Při větších vzdálenostech je nutné do spoje vkládat mezistanice (retranslační stanice), aby podmínka přímé viditelnosti byla splněna. Takový spoj se pak nazývá mikrovlnný reléový spoj.

Mikrovlnná komunikace používá k přenosu signálu mikrovln, které se šíří prostorem. Jí podobná optická komunikace používá k přenosu signálu světla, velkou většinou v optických kabelech.

1.2 VLASTNOST DIGITÁLNÍCH RADIOKOMUNIKAČNÍCH SYSTÉMŮ

Radiokomunikační digitální systém má tyto přednosti:

- Může být rychle instalován.
- Může využít již dříve vybudovaná připojení
- Lehce překonává terénní překážky (hory, jezera, řeky).
- Má charakter spojení bod-bod i na velké vzdálenosti.
- Spojení může být rychle obnoveno při nepředpokladatelné poruše.
- Dovoluje několikanásobné využití přenosových kmitočtů v různých oblastech.

Tyto přednosti mají nejen pevné či dočasné stanice radiokomunikačního systému v místní komunikaci, ale je možné je použít i pro spojení na velké vzdálenosti. Ve městech a vůbec v zástavbě je to často jediný prostředek k přenosu informací v budované síti. Je skutečně velmi drahé pokládat kabely do výkopů v městské a průmyslové zástavbě a v osídlené krajině vůbec. Je zjištěno, že $80 \div 90$ % přenosu v sítích mobilních telefonů se uskuteční pomocí mikrovlnných komunikačních spojů. (Údaj z roku 2010).

Pro většinu světa radioreléové spoje mohou být jediným schopným vysokokapacitním prostředkem pro překonání tisíců kilometrů přes lesy, hory prémie, pouště, pralesy a přes jiná nehostinná místa. Navíc ještě energetické požadavky radioreléových spojů jsou velmi nízké a postačuje jejich napájení solárními články.

Pochopitelně mikrovlnný spoj má také své nedostatky:

- Musí být zajištěna přímá viditelnost mezi stanicemi spoje.
- Vzdálenost mezi spolupracujícími stanicemi obvykle nepřesahuje desítky kilometrů.
- Mikrovlnný spoj obsazuje kmitočet pásma.
- Kvalita komunikace závisí na vlastnostech okolí.
- Komunikační kapacita přenosu je omezena.

Vážným konkurentem mikrovlnných spojů jsou optické kabely. Vznik komunikace optickými kabely je ta nejprogresivnější událostí dvacátého století. Od doby teoretického návrhu optického spoje v roce 1970 a praktického použití optických kabelů v roce 1980 se tato technika komunikace rychle rozvíjela. Důvodem je velká šířka optického kanálu, minimální ztráty a nízká cena zařízení. Komunikace optickými kabely se stala hlavním prostředkem přenosu dat v páteřních sítích digitální komunikace. Mikrovlnná síť však nevyžaduje drahé pokládání kabelů a proto si stále své postavení udržuje.

1.3 VÝBĚR MIKROVLNNÝCH KANÁLŮ A JEJICH USPOŘÁDÁNÍ

Uspořádání mikrovlnných pásem je koordinováno v celosvětovém měřítku. Podle Rozhodnutí ITU-R (International Telecommunication Union – Radio communication Section)

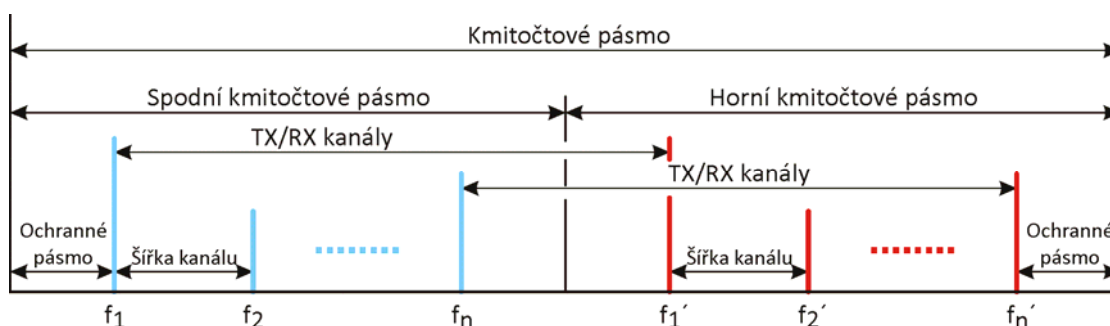
Na frekvenční spektrum se pohlíží jako na přírodní bohatství, s kterým je třeba uvážlivě hospodařit. Koordinačním a regulačním orgánem v České republice je ČTÚ (Český telekomunikační úřad), který rozdělení kmitočtového pásma přesně definuje a stanovuje podmínky provozu jednotlivých radiokomunikačních zařízení. V České republice jsou rozhodnutí ITU-R závazná. Jednotlivá kmitočtová pásma na sebe nenavazují kontinuálně. Mezery mezi nimi jsou určeny pro použití např. meteorologickými radary, astronomickým měřením aj.

Ve všech kmitočtových pásmech je definován kmitočtový rozsah pásma, vzájemný odstup mezi přijímaným a vysílaným kmitočtem a kmitočtový odstup jednotlivých kanálů. Odstup kanálů odpovídá šířce přenášeného pásma.

Zařízení ALCOMA využívají z mikrovlnných pásem určených pro digitální mikrovlnnou komunikaci všechna dostupná pásma.

Pásma 2,4 GHz, 5 GHz, 10 GHz, 17 GHz 24 GHz a 74÷75; 84÷86 GHz jsou tzv. volná pásma, kdy v České republice, při splnění daných podmínek provozu, není nutné individuální povolení ČTÚ.

Pro použití daného kmitočtového pásma se specifikuje střední frekvence, odstup přijímaného a vysílaného kmitočtu (T/R) a odstup kanálů.



Obrázek 2 Uspořádání kmitočtového pásma

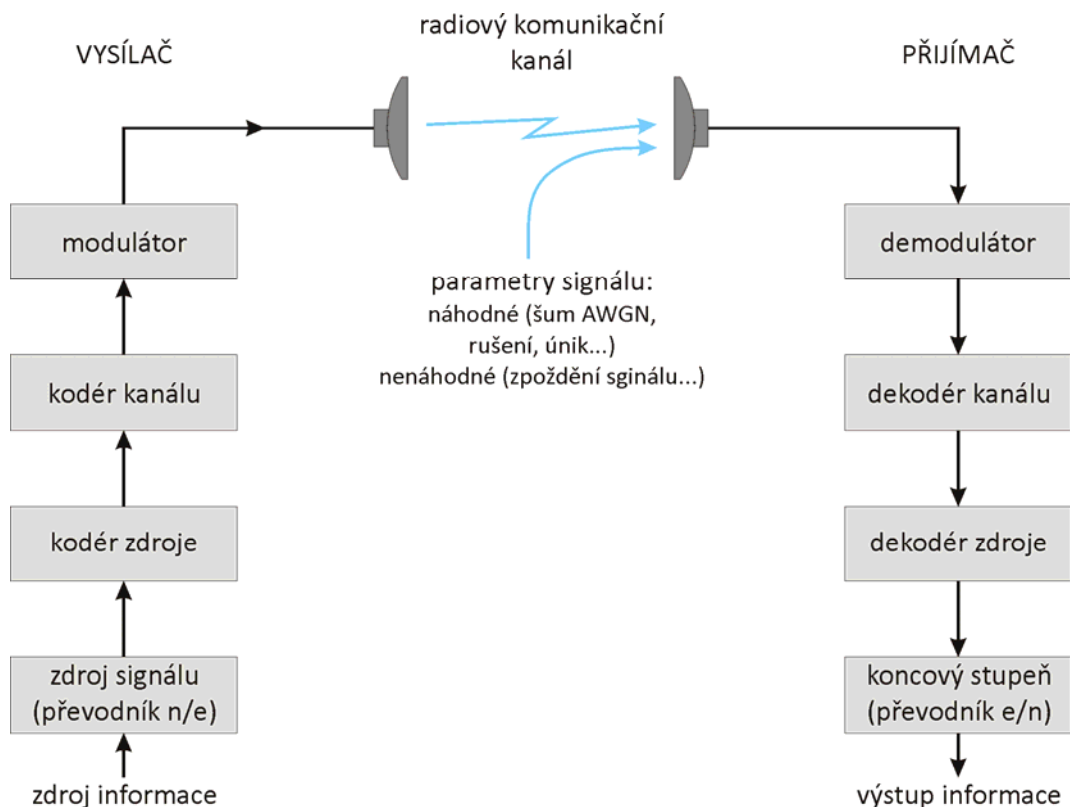
Dané kmitočtové pásmo je dále rozděleno do kanálů. Jejich šířka je zvolena tak, aby umožňovala použití kmitočtové spektrum, které je pro přenos nutné. Kmitočtový kanál se definuje jeho středním kmitočtem a označuje se pořadovým číslem. Šířka kanálu je určena šířkou spektra přenášeného signálu tj. způsobem modulace a kapacitou přenosu.

Pro rozdělení kanálů musí být brány v úvahu následující faktory:

- Co největší ekonomické využití přenášeného spektra kmitočtů
- Dostatečný odstup mezi přijímaným a vysílaným kmitočtem v každé mikrovlnné stanici. Zabráni se tak rušení přímým přenosem signálu z vysílače do přijímače.
- Dostatečný odstup mezi kanály. Omezí se tak vzájemné rušení stanic pracujících ve vícekanálových sítích.
- Dostatečně velká ochranná pásma na koncích daného kmitočtového pásma, která zamezí vznik rušení kmitočty systémů, které na tato kmitočtové pásmo navazují.

Běžný je odstup kanálů 2,5 MHz a 3,5 MHz a jejich násobků. V soustavě s odstupem 3,5 MHz se pro přenos při nízké kapacitě spoje ještě používá dělení s odstupem polovičním tj. 1,75 MHz. Tento odstup umožňuje přenos signálů 1xE1 a 2xE1.

1.4 OBECNÉ SCHÉMA DIGITÁLNÍHO MIKROVLNNÉHO SYSTÉMU



Obrázek 3 obecné schéma digitálního mikrovlnného systému

Zdroj signálu na vstupu vysílače je zařízení, které přebírá původní data zákazníků, upravuje je a předává je dalšímu zpracování.

Kodér zdroje zlepšuje spolehlivost přenášených signálů. V přenosu signálu se může vyskytnout náhodné rušení a šum a také se zde může vyskytnout chybný bit. Aby bylo možné provést automatickou kontrolu

a opravu přenášeného kódového bloku na přijímací straně, kodér zdroje přidává dodatečné kódové jednotky ke vstupnímu signálu. Tyto dodatečné bity se přidávají podle přesných algoritmů a vzniká tak nový blok přenášeného signálu. Tím se pochopitelně poněkud snižuje rychlost přenosu původního vstupního signálu.

V modulátoru se signál přicházející z kodéru zdroje vhodně namoduluje na mikrovlnný nosný kmitočet. Modulace je proces, který pomocí změny amplitudy, fáze a kmitočtu přenáší požadovaný signál.

Mikrovlnný signál je pomocí antény přenesen na přijímací stranu.

Na přijímací straně je funkce demodulátoru a dekodéru opačná k funkci kodéru a modulátoru na straně vysílací. Výstupem je téměř shodný signál se vstupním signálem. Odchylky se vyjadřují bitovou chybovostí (BER), která vyjadřuje poměr chybně přenesených bitů k celkovému počtu přeneseným bitům. Maximální hodnota BER vyjadřuje kvalitu přenosu.

1.4.1 Modulační metody v mikrovlnách

Nemodulovaný digitální signál se nazývá digitální basebandový signál. Protože tento signál nemůže být přenášen přímo v mikrovlnném pásmu, je nutné jej nejprve konvertovat na vyšší kmitočet (mezifrekvenční, IF) a ten pak po úpravě použít k přenosu v mikrovlnném pásmu.

Jako mezifrekvenční kmitočet se nejčastěji používá 140 MHz, resp. 70 MHz pro nižší mikrovlnná pásma a 850 MHz, resp. 350 MHz pro vyšší pásma.

Do mikrovlnného pásma může být mezifrekvenční kmitočet přenesen pomocí upkonveroru. V upkonvertoru je směřován mezifrekvenční kmitočet a kmitočet místního oscilátoru. Po směřování se vybere ze vzniklého pásma kombinačních kmitočtů horní postranní pásmo vzniklé součtem mezifrekvenčního kmitočtu a kmitočtu místního oscilátoru. Pro downkonvertor je proces opačný, ale se stejnými principy. Využije se rozdílový kmitočet vzniklý směřováním kmitočtu místního oscilátoru a vstupního kmitočtu

Celková stabilita kmitočtu je určena stabilitou místního oscilátoru. Lehký posun jeho signálu znamená značný posun vysílaného resp. přijímaného signálu.

Základní princip modulace digitálním basebandovým signálem lze lehce postihnout na výrazu pro harmonickou funkci:

$$A * \cos(2\pi f_c * t + \varphi)$$

kde je

A	amplituda signálu
f_c	kmitočet nosné
t	čas
φ	fázový posun

- Modulace amplitudová (AM, ASK) používá změnu amplitudy A nosného kmitočtu podle změny basebandového signálu. Hodnoty f_c a φ se nemění.
- Modulace kmitočtová (FM, FSK) používá změnu nosného kmitočtu podle změny basebandového signálu. Hodnoty A a φ se nemění.
- Modulace fázová (PSK) používá změnu fáze nosného kmitočtu podle změny basebandového signálu. Hodnoty A a f_c se nemění.
- Kvadraturní amplitudová modulace (QAM) používá basebandového signálu ke změně amplitudy nosné A i fázového posunu φ . Nemění se kmitočet nosné f_c .

V současnosti se v profesionálních spojích používá výhradně modulace QAM, kde číslo před modulační metodou znamená počet modulačních stavů. Modemy nové generace využívají 1024 QAM. To při šíři pásma 56 MHz umožňuje přenos dat s kapacitou 530 Mbit/s a při šíři pásma 112 MHz teoreticky dosahuje i kapacity kolem 960 Mbit/s.

Z uvedeného tedy vyplývá, že přenos dat rádiovými spoji v současné době spíše nežli na fyzikální hranice naráží na hranice stanovené regulačními orgány.

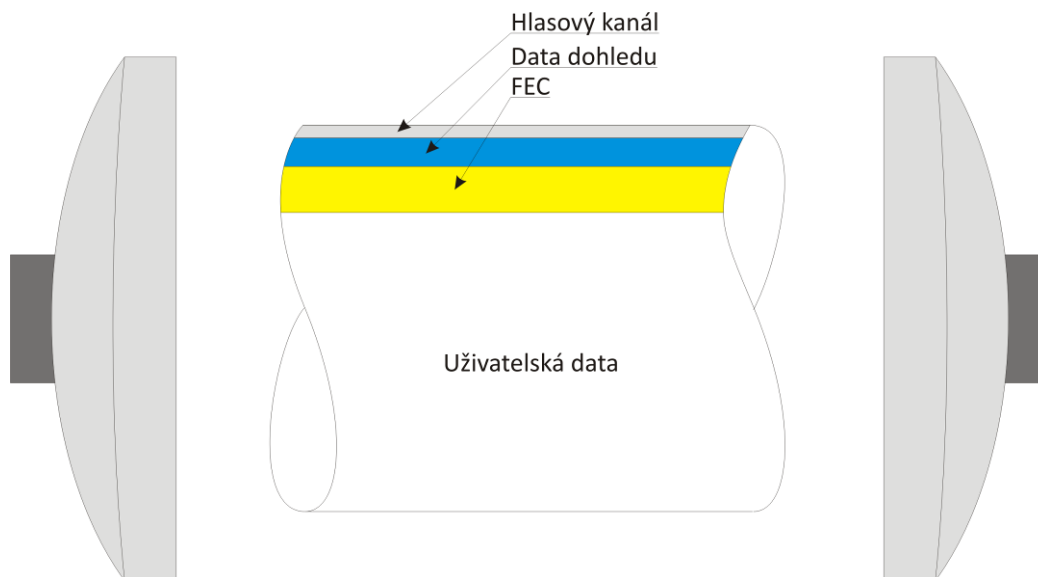
1.4.2 Využití kmitočtového kanálu

Využití kanálu je měřítkem pro vhodnost, či nevhodnost daného typu modulace. Využití kanálu je definováno jako poměr šířky kanálu basebandového signálu k šířce přenášeného kanálu a má rozměr [bit/s/Hz]. Pro binární digitální signál je frekvenční využití pásma 2 [bit/s/Hz], protože jedna vlna signálu, může přenášet dva bity. Pro vysokofrekvenční modulaci je basebandový signál již namodulován na dvě postranní pásma.

V praxi není basebandový přenášený signál ideálně pravouhlý a šířka kanálu musí být poněkud širší. Nominální využití kanálu bude tedy nižší než teoretická hodnota. V následující tabulce jsou uvedeny teoretické hodnoty využití basebandových kanálů, vysokofrekvenčních kanálů a nominální hodnoty pro mikrovlnné kanály v závislosti na typu modulace.

1.5 STRUKTURA DIGITÁLNÍHO MIKROVLNNÉHO RÁMCE

Přenášený hlavní datový tok je rozdělen do bloků, které se doplňují dalšími daty. Doplněná data tvoří rámec celého přenosu. Nejdůležitější v rámci je synchronizační slovo, které zajišťuje správnou interpretaci bitů nepřetržitého datového toku. Dále jsou přenášeny v hlavičce informace režie rádia (informace o spojení, nastavení modemu, multiplexu, ...) a servisní informace (ATPC, přepnutí kanálu, ...). I když poloha některých bytu je předdefinována normou pro přenos, každý výrobce uspořádání rámce volí podle své potřeby. Je tedy uspořádání rámce různých výrobců různé.



Obrázek 4 Struktura digitálního mikrovlnného přenosu

2. DIGITÁLNÍ MIKROVLNNÁ ZAŘÍZENÍ

2.1 KLASIFIKACE MIKROVLNNÝCH ZAŘÍZENÍ

Zařízení pro přenos datových signálů pomocí mikrovln lze roztřídit podle různých hledisek.

Nejběžnější metoda třídění je podle struktury konstrukce.

- Kategorii kde všechna zařízení jsou ve vnitřních prostorech. Pouze anténa je umístěna v prostoru vnějším. Tato zařízení jsou enormně spolehlivá a mají vysoké přenosové rychlosti. Jsou také enormně drahá. Používají se na páteřní spojení.
- Kategorii kde všechna zařízení jsou ve vnějším prostoru (ALL OUTDOOR). Zákaznická data jsou přiváděna také do vnějších jednotek. Instalace těchto zařízení je jednoduchá a celek zabírá málu prostoru. Takové zařízení není náročné na vnitřní instalaci, ale obvykle má omezený počet vstupních interfejsů.
- Zařízení smíšená (SPLIT) se skládají z vnitřní jednotky (IDU) a z vnější jednotky (ODU). Mikrovlnná anténa a ODU jsou spojeny buď přímo do kompaktního celku anebo pomocí ohebného vlnovodu. Jednotky ODU a IDU jsou spolu spojeny pomocí koaxiálního kabelu, který přenáší vedle MF signálů i servisní signály a zajišťuje také napájení ODU. Smíšená zařízení lze lehce montovat a rychle z nich budovat rozsáhlé komunikační sítě s využitím mnoha interfejsů. V současnosti je to nejvíce rozšířený typ konstrukce.

2.2 MIKROVLNNÁ ANTÉNA A NAPÁJEČ

2.2.1 Mikrovlnná anténa

Mikrovlnná anténa vyzařuje do prostoru mikrovlnný výkon generovaný ve vysílači ODU a přijímaný mikrovlnný signál přenáší do přijímače ODU. Nejběžnějším typem antény je anténa parabolická. V méně exponovaných místech se omezeně užívá i trychtýřová anténa. Nejčastěji se používají parabolické antény průměrů 0,35 / 0,65 / 0,90 / 1,20 / 1,80 / 2,40 m. Ve zvláštních případech lze použít i průměry větší.

Vlastnosti antény závisí na jejím průměru a použitém kmitočtu. Antény jsou většinou navrženy tak, aby jedna anténa mohla pracovat se všemi kanály daného kmitočtového pásma.



Obrázek 5 Parabolické antény ALCOMA s ODU

V systému radioreléové komunikace se vyžaduje, aby anténa měla co největší účinnost, vyzařovací diagram s malými postranními laloky, velké potlačení křížové polarizace, co nejširší pracovní kmitočtové pásmo a v něm nízký poměr stojatých vln.

Zisk mikrovlnné antény

Zisk je hlavní parametr antény. Pro dané rozměry antény její zisk přímo ukazuje také na její účinnost. Zisk antény je poměr vstupního výkonu P_{io} izotropické antény, která vyzařuje homogenně do celého prostoru, ke vstupnímu výkonu P_i hodnocené antény, když obě tyto antény v daném bodě prostoru vytvářejí elektromagnetické pole stejné intenzity.

Zisk antény pro mikrovlnné parabolické antény je

$$G = \frac{P_{io}}{P_i} = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 * \eta$$

Ve výrazu je

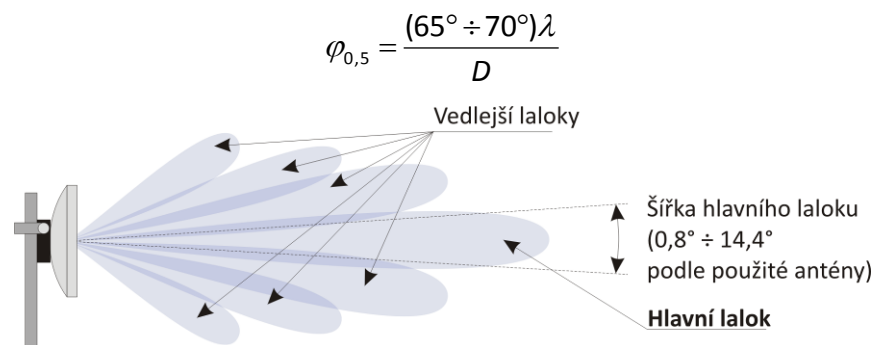
D	průměr parabolické antény
λ	délka vlny pracovního kmitočtu
η	činnost vyzařování antény zachycuje vliv ozáření antény, nepřesnosti výroby a povrchu antény. Jeho normální rozsah bývá $0,45 \div 0,6$.

Zisk antény udávaný v tabulkách je maximální zisk tj. zisk hlavního laloku a je udávaný v dB

$$G[dB] = 10 \log(G)$$

Vyzařovací úhel antény

Na obou stranách hlavního laloku, když vycházíme ze směru jeho maxima, lze nalézt body, kde výkon poklesne na polovinu tj. o 3 dB. Úhel mezi těmito body se nazývá vyzařovací úhel antény pro 3 dB a lze jej vyjádřit vztahem



Ze vztahu je jasně patrné, že při daném průměru antény se při zvyšování pracovního kmitočtu, kdy se snižuje délka jeho vlny, se také snižuje její vyzařovací úhel a také se více výkonu soustřeďuje do hlavního směru, protože roste i její zisk. Pokud se při dané frekvenci zvětšuje průměr antény, vyzařovací úhel se rovněž snižuje a zisk roste.

Potlačení křížové polarizace (XPD)

Mikrovlnné spoje pracují s lineární polarizací horizontálního, nebo vertikálního směru. Při použití jedné polarizace vyjadřuje XPD potlačení té druhé – křížové (ortogonální). XPD je poměr přijímaných výkonů a obvykle se vyjadřuje v dB.

$$XPD = 10 \log \left(\frac{P_o}{P_x} \right)$$

Ve výrazu je

P_o přijímaný výkon normálně polarizované vlny
 P_x přijímaný výkon ortogonálně polarizované vlny

Potlačení křížové polarizace by mělo být u antény co největší, aby se omezilo rušení příjmem ortogonálně polarizovaných vln. Ve vysokokapacitních mikrovlnných systémech se často používá ortogonální polarizace na stejném kanálu pro zlepšení kapacity přenosu a šetření kmitočtů. V systémech SDH jsou požadavky na XPD přísné. XPD pro ně musí být větší než 40 dB.

V konkrétních mikrovlnných spojích se XPD může snižovat vlivem mnohocestného šíření signálu a útlumem deštěm. Pro frekvence pod 10 GHz, není vliv deště tak výrazný a hlavní změnu vyvolává mnohocestné šíření.

Vliv geografických a meteorologických podmínek na dvě stejně polarizované vlny shodného kmitočtu přicházející z různých směrů není shodný. Tím spíše není shodný pro dvě ortogonálně polarizované vlny. To vše je příčinou změny XPD. Měřením bylo zjištěno, že XPD spíše než konstantní hodnotu má Gaussovo logaritmické rozložení.

Ochranný poměr antény

Ochranný poměr antény je pokles zisku antény pro příjem z nějakého směru oproti příjmu z hlavního směru. Ochranný poměr antény pro 180° se také nazývá předozadní poměr. Ochranný poměr antény je důležitá specifikace v mikrovlnné komunikaci a lze jej odečíst z vyzářovacího diagramu dané antény.

Poměr stojatých vln

Impedance antény a napáječe by měly být co nejvíce přizpůsobené, aby poměr stojatých vln byl co nejnižší. Vyhovující je PSV v rozmezí 1,05 ÷ 1,5.

2.2.2 Klasifikace mikrovlnných antén

Podle elektrických vlastností lze mikrovlnné antény rozdělit na skupiny standardních antén a antény pokročilé techniky. Vyžaduje se, aby antény pokročilé techniky měly oproti anténám standardním předozadní poměr lepší alespoň o 10 dB. Podle způsobu instalování lze antény rozdělit na antény stožárové, výložníkové a samostatné.

2.2.3 Anténní napájecí systém

Do anténního napájecího systému nutno zahrnout vedle spojovacích vlnovodů i anténní sdružovače, které jsou většinou součástí ODU. Spojovací vlnovod při kompaktní montáži ODU se systémem antény je redukován na minimum. Při oddělené montáži se používá ohebných vlnovodů různé délky (0,6 / 0,9 / 1,2 m). V současnosti pro delší spojení se používají vlnovody eliptické. Ve zvláštních případech jako je pasivní retranslace signálu lze provést napájení anténního systému i koaxiálním kabelem s dvěma přechody koaxiál - vlnovod.

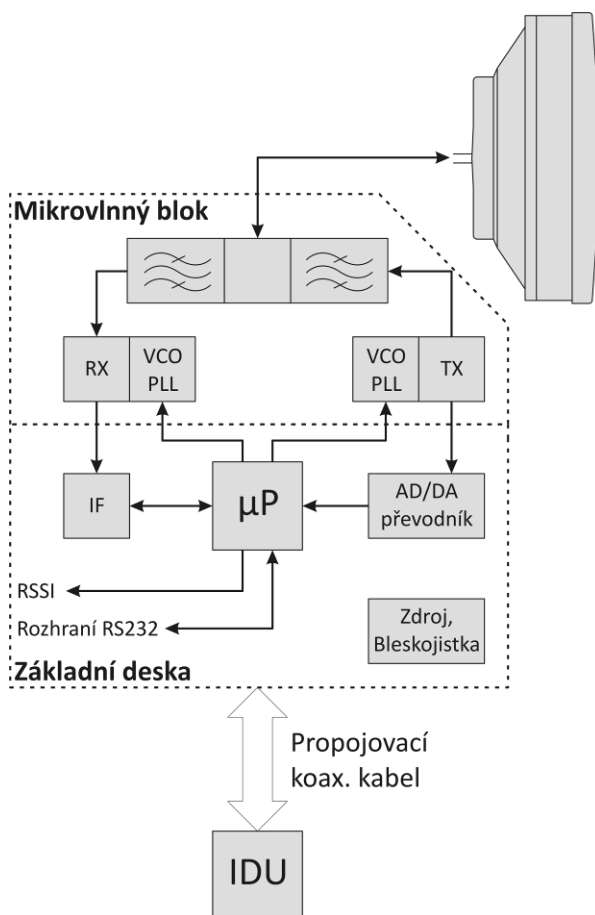
Výhodou oddělené montáže s ohebným vlnovodem je možnost snadné montáže ve stísněném prostoru a její větší flexibilita oproti kompaktnímu provedení. Podstatnou nevýhodou jsou velké ztráty spojovacího ohebného vlnovodu i spojovacího koaxiálního kabelu. Koaxiální kabel je použitelný jen na kratší vzdálenosti a nižší kmitočty.

2.2.4 Anténní rozbočovače

V mikrovlnné komunikaci, pokud to podmínky vyžadují, je možno použít jednu anténu pro více kanálů stejného mikrovlnného pásma. Signál antény je pak nutno rozdělit pomocí anténního rozbočovače. Anténní rozbočovač se skládá z cirkulátoru, rozdělovacího filtru a vlnododového zakončení. Rozdělovací filtr je druh pásmové propusti, která přenáší pouze kmitočty daného pásma a ostatní zadržuje. Oddělovací cirkulátor propouští vlny pouze v jednom směru. Signál z opačného směru je absorbován v zakončovacím odporu.

2.3 VNĚJŠÍ JEDNOTKA (ODU OUTDOOR UNIT)

Úkolem vnější jednotky je přeměna mezifrekvenčního kmitočtu na kmitočet rádiový, úprava rádiového kmitočtu a jeho zesílení. Parametry ODU vychází z použitého kmitočtu a přenosové kapacity. Protože obvykle nemůže jedna ODU pokrýt celé kmitočtové pásmo, rozděluje se kmitočtové pásmo do podpásem A, B, někdy i dále C, D atd. Jednotlivé ODU se liší přizpůsobením na jednotlivá podpásma, liší se rozdílným odstupem mezi vysílaným a přijímaným kmitočtem a dělí se na vysoké a nízké podle toho v kterém podpásmu může vysílat jejich vysílač. Pro nízkou ODU je kmitočet vysílače nižší než kmitočet přijímaný. Protistanice má ODU vyšší, protože kmitočet jejího vysílače je vyšší, než kmitočet přijímaný. Z rozdělení vyplývá, že ODU má mnoho různých variant. Tyto všechny varianty mají téměř shodná zapojení. Základní bloky ODU zobrazuje obrázek 6.



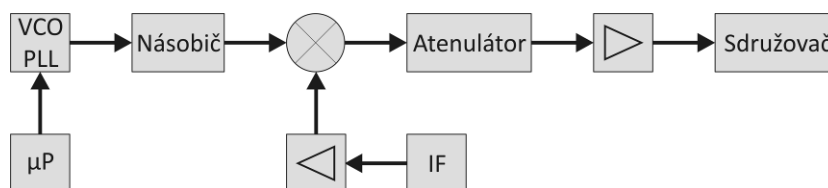
Obrázek 6 Vnitřní bloková struktura ODU

ODU podle obrázku se skládá z větve vysílače, který mění IF vysílače na RF a větve přijímače, který mění RF na IF přijímače.

2.3.1 Mikrovlnný vysílač a specifikace hlavních parametrů

Hlavní funkce vysílače

- Generovat kmitočet (LO) pro odpovídající mikrovlnný kanál.
- Použít kmitočet LO a smísit jej s kmitočtem IF na požadovaný kmitočet RF pro vysílání.
- Nastavit charakteristiku signálu tak aby se vyrovnaly nelinearity RF zesilovače.
- Lineárně zesílit RF signál na požadovanou úroveň.
- Pomocí RF filtru odstranit nadbytečné kmitočty (harmonické a zrcadlové kmitočty, průnik kmitočtu LO, cizí kombinační kmitočty) a udržet kmitočtové spektrum v daných mezích. Pokud se používá vícekanálová společná anténa v rozvětřujících systémech je místní nosná sloučena s dalšími nosnými a celek pak odeslán do antény.



Obrázek 7 Blokové schéma vysílače

Mezifrekvenční kmitočet vysílače je nejprve na vstupu zesílen na požadovanou signální úroveň. Takto vyrovnaný signál je převeden do směšovače vysílače a zde konvertován na požadovaný signál v RF pásmu. K potlačení průniku LO do dalších stupňů a omezení cizích kombinačních kmitočtů se preferuje použití ekvalizačních kmitočtových směšovačů. Signál ze směšovače je přiveden do vhodného filtru, který zadrží jedno postranní pásmo. Signál po průchodu směšovačem a filtrem je velice slabý (-30 ÷ -50 dBm). Proto následuje zesílení na požadovanou úroveň v mikrovlnném zesilovači. Typický RF výkonový zesilovač je osazen tranzistorem GaAs FET. U vysokokapacitních systémů SDH, které využívají vícecestavové modulace, jsou přísné požadavky na linearitu zesilovače. Typické zesilovače pracují s výkonem, který je mnohem nižší než pro kompresní bod 1 dB. Jsou proto navrhovány s větší výkonovou rezervou. Tím pochopitelně roste cena zesilovače. Zbytkového nelineárního zkreslení se odstraní úpravou signálu v předcházejícím zesilovači, která toto zkreslení vykompenzuje. Výkon mikrovlnného zesilovače je za normálních podmínek přenosu mikrovlnného spoje snižován činností ATPC. Dále je výkonový mikrovlnný signál přenášen přes sdrůžovač do napáječe antény.

Specifikace hlavních parametrů vysílače

- **Pracovní kmitočtové pásmo.**

V současnosti se používají pásma 1,9 / 6 / 7 / 8 / 10 / 11 / 13 / 15 / 18 / 23 / 24 / 26 / 38 GHz. Pásma 10 GHz, 17, 24 GHz a perspektivní pásmo 80GHz jsou tzv. volná pásma.

- **Výstupní výkon.**

Výstupní výkon vysílače je hodnota naměřená na jeho výstupu. Rozsah výstupního výkonu závisí na kmitočtu a je od -25 dBm do 30 dBm. Je nastaven podle povolovacích podmínek spoje.

- **Kmitočtová stabilita.**

Každý mikrovlnný kanál má svůj nominální střední pracovní kmitočet. Stabilita pracovního kmitočtu závisí na kmitočtové stabilitě lokálního oscilátoru vysílače. Jestliže je pracovní kmitočet vysílače nestabilní vznikající offset se projevuje snižováním amplitudy signálu po demodulaci v přijímači. To může dále způsobit zvětšení bitové chybovosti. V současnosti se požaduje kmitočtová stabilita mikrovlnných vysílačů 3 ÷ 10 ppm.

- **Kmitočtové spektrum vysílače.**

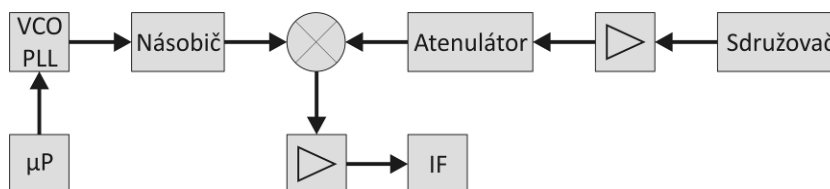
Kmitočtové spektrum vysílaných signálů musí vyhovovat normovaným požadavkům na šíři použitého kanálu. Jeho kmitočtový rozsah nesmí překračovat šířku kanálu a způsobovat rušení na kanálech sousedních. Mezní kmitočty kmitočtového spektra tvoří tzv. kmitočtový rámec.

2.3.2 Volba přijímače a specifikace hlavních parametrů

Struktura přijímače

Úkolem přijímače je pomocí nízkošumových zesilovačů zesílit signál přicházející z přijímací antény, přeměnit jej na IF signál a předat do demodulátoru. Blokové schéma mikrovlnného přijímače znázorňuje Obrázek 8.

Na vstupu přijímače je pásmový filtr, často zahrnutý do sdrůžovače signálu pro anténu. Nízkošumový zesilovač nejprve slabý signál zesílí na požadovanou pracovní úroveň. Následující pásmový filtr odstraní všechny vznikající zrcadlové kmitočty. Lokální oscilátor přijímače generuje kmitočet, který s přijímaným kmitočtem RF vytvoří ve směšovači mezifrekvenční kmitočet. Mezifrekvenční zesilovače s proměnným ziskem zaručují stálou hodnotu mezifrekvence, i když přijímaný signál se vlivem proměnného úniku v šíření mění. Důvodem automatického řízení zisku mezifrekvenčních zesilovačů je nutnost přivádět do demodulátoru stálý signál. Změna zisku je dosažena ve více zesilovacích stupních. Zisk v nich je řízen regulačním napětím. Regulační napětí je funkcí amplitudy IF na výstupu zesilovače. Prakticky je část výstupního signálu zesilovače odbočena, detekována diodou a napětí upraveno ve filtru AVC. Úkolem tohoto filtru je odstranit všechny signály z oblasti mimo použitelné kmitočtové spektrum, které by mohly ovlivňovat celkovou přenosovou charakteristiku zesilovače. Po zesílení se regulační napětí užívá k řízení zisku ve stupních zesilovače. Podstatou činnosti je tedy vybrat nějaké signály ze zpětné vazby a průměrnou hladinou řídit proměnný zisk zesilovačů tak, aby výstupní hodnota IF signálu zůstala neměnná.



Obrázek 8 Blokové schéma přijímače

Pro diverzní příjem je mikrovlnná část přijímače zdvojena a celý přijímač doplněn o výběrový blok, který do dalších obvodů propouští nejvhodnější IF signál.

Specifikace hlavních parametrů přijímače

- **Pracovní kmitočet**

V provozu musí přijímač a vysílač protistanice spolupracovat. Vysílací kmitočet vzdálené mikrovlnné stanice je přijímacím kmitočtem stanice místní. Vysílací kmitočet stanice místní je přijímacím kmitočtem stanice vzdálené.

- **Kmitočtová stabilita**

Požadavky na kmitočtovou stabilitu oscilátoru přijímače jsou shodné jako pro vysílač. Normálně je to stabilita $3 \div 10$ ppm.

- **Šumový faktor**

Šumový faktor digitálního mikrovlnného přijímače je obvykle 2,5 ÷ 5 dB. Jsou to hodnoty o 5 dB nižší, než se dosahují u analogových přijímačů.

- **Propustné pásmo**

Účinné potlačení rušení vyžaduje co nejlepší přenos signálu a tedy vhodnou volbu propustného pásma a jeho amplitudových vlastností. Vlastnosti propustného pásma přijímače jsou hlavně závislé na mezifrekvenčním filtru přijímače. Vyžaduje se, aby propustné pásmo bylo 1 ÷ 2 krát větší, než je určeno rozsahem kódování.

- **Selektivita**

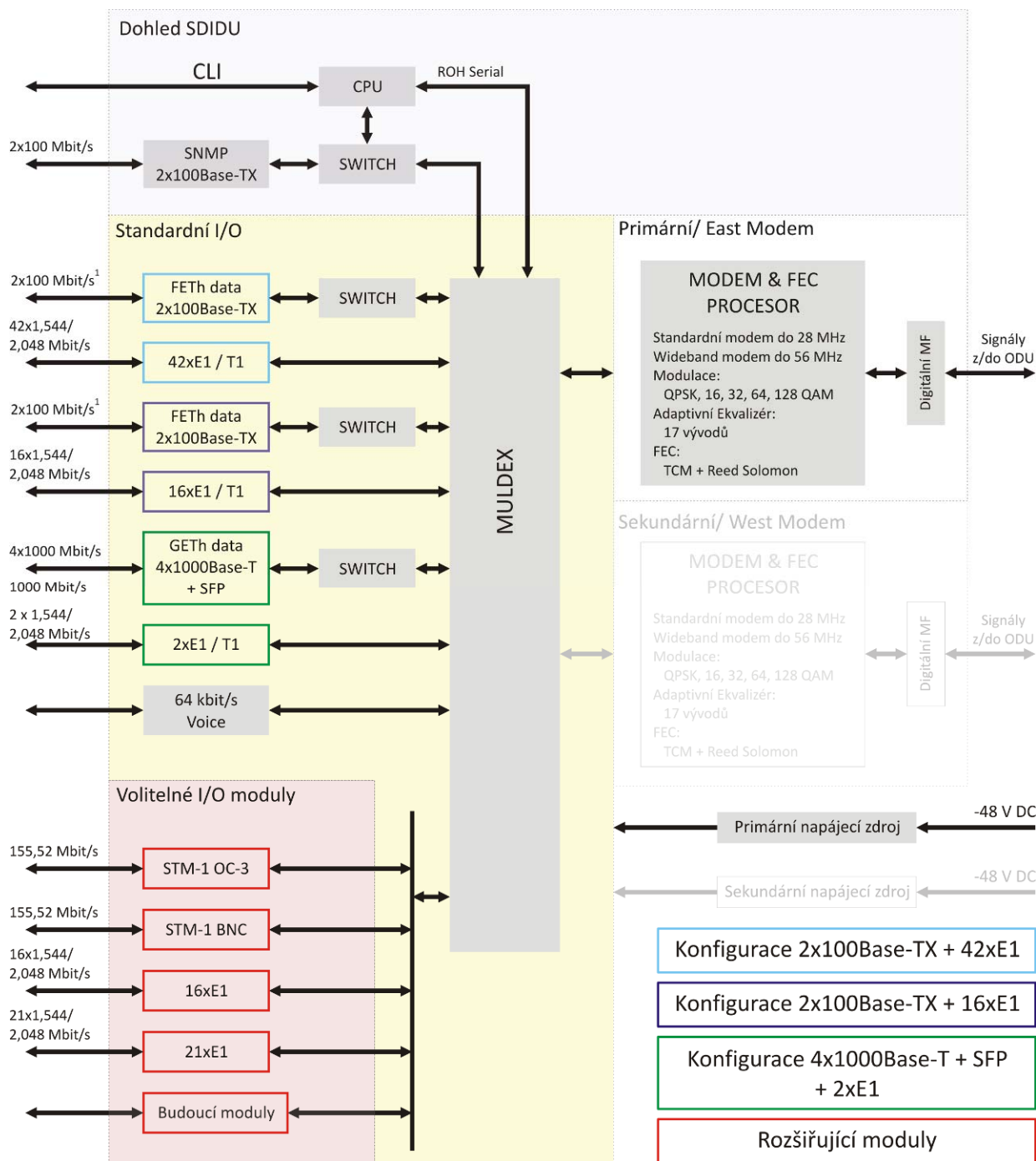
Aby bylo zajištěno, že přijímač zpracovává pouze signály na zvoleném kanálu, musí být schopný potlačovat signály nežádoucí. Jedná se o potlačení kmitočtů mimo pásmo zvoleného kanálu, zejména pak kanálů sousedních, zrcadlové kmitočty a kmitočty přeslechu vlastního vysílače.

- **Rozsah automatického řízení zisku**

Při normálním provozu je přijímaná hladina nižší než odpovídá hladině šíření ve volném prostoru. Podle toho je zvolena referenční hladina. Když přijímaná hladina je vyšší než hladina referenční nastává upward fading. Pokud je přijímaná hladina je nižší než hladina referenční je to downward fading. Předpokládejme že upward fading je +5 dB a downward fading -40 dB. Potom celkový únik je 45 dB. Rozsah automatického řízení zisku musí být takový, že pokud se mění přijímaný signál v mezích celkového úniku, nesmí se měnit výstupní signál přijímače. Dynamický rozsah automatického řízení zisku musí tedy být 45 dB.

2.4 VNITŘNÍ JEDNOTKA (IDU INDOOR UNIT)

Funkce IDU musí zajišťovat modulaci a demodulaci, multiplexování a servisní dohled. IDU je hlavní část mikrovlnného přenosového systému.



Obrázek 9 Blokové schéma SDIDU

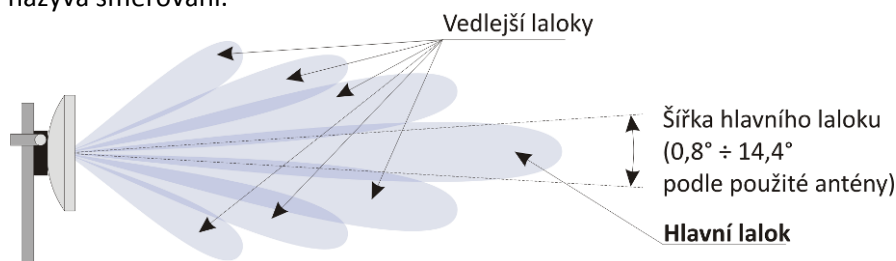
2.5 MONTÁŽ A NASTAVENÍ MIKROVLNNÉHO SPOJE

Montáž mikrovlnného spoje se dělí na montáž vnější jednotky a na montáž vnitřní jednotky. Tato kapitola pojednává o vnější montáži, tedy o montáži vnější jednotky a anténního systému. Nejčastější je montáž kompaktního provedení, kdy je anténní systém spojen s ODU do jednoho celku. Připevnění antény současně zajišťuje i připevnění ODU. Nepoužívá se zde žádný mikrovlnný napáječ spojující ODU a anténní systém. Je ovšem možná i oddělená montáž ODU a anténního systému. Toto provedení se používá jen výjimečně. ODU i anténa mají v tomto případě samostatné závěsy a musí být spojeny napáječem. Tím je také oddělené provedení dražší.



Obrázek 10 Instalace paraboly s ODU na nosnou trubku

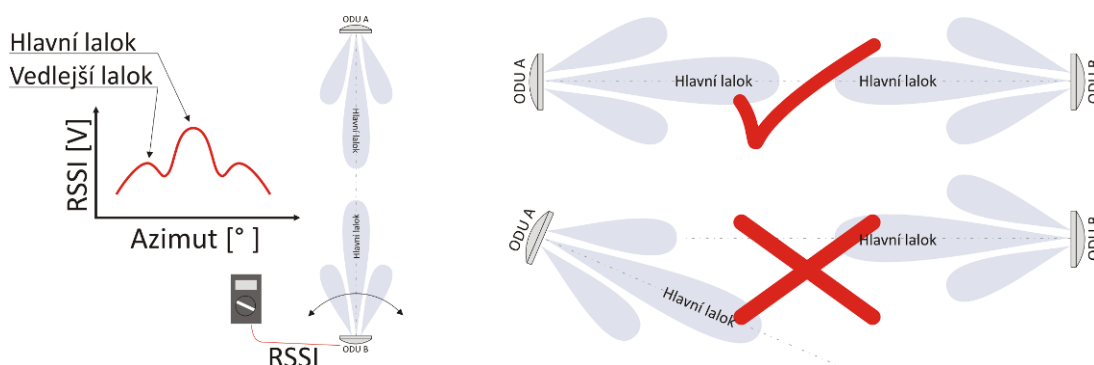
Po montáži spoje následuje velmi důležitý, klíčový proces: Nastavení mikrovlnných antén do správné polohy. Tento postup se nazývá směřování.



Obrázek 11 Vyzářování antény

Smyslem směřování je nastavit parabolické antény spoje na maximální úroveň přijímaného signálu. Úroveň přijímaného signálu je úměrná napětí RSSI, které je vyvedeno z ODU a po připojení voltmetru ho lze měřit. Směřování musí být provedeno ve vertikálním i horizontálním směru. Při hrubém nastavení je nutné zachytit oba postranní laloky (obrázek 12) a nastavit hlavní lalok. Při jemném nastavení se pak hledá maximum hlavního laloku. Směřování musí být pečlivě provedeno, aby se zabránilo chybnému nastavení (obrázek 12). Při stálém počasí může automatická kontrola zisku přijímače chybné nastavení kompenzovat. Při špatných podmínkách šíření

tj. za deště, mlhy a sněžení bude rezerva zesílení nedostatečná a spoj začne při špatném nastavení chybovat.



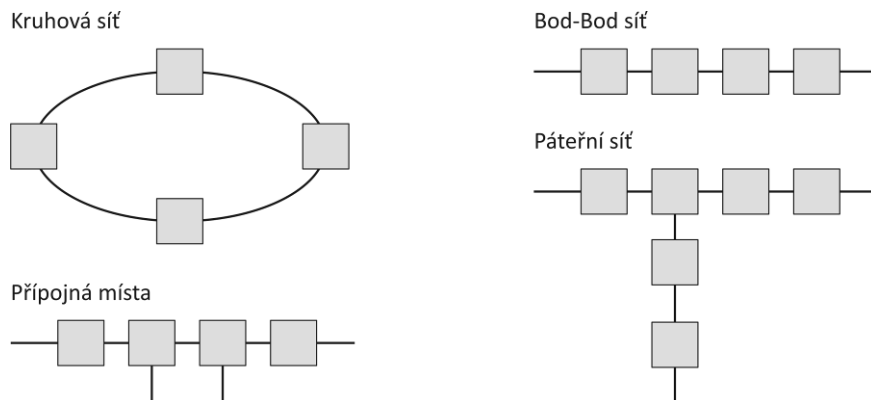
Obrázek 12 Směřování spoje

3. DIGITÁLNÍ MIKROVLNNÁ SPOJENÍ A JEJICH SÍTĚ

3.1 MIKROVLNNÉ STANICE A TYPY SÍTÍ

3.1.1 Typy sítí

Základní zapojení sítí mikrovlnné komunikace znázorňuje obrázek 13. Stejně možnosti jsou i pro budování optických sítí.



Obrázek 13 Typy mikrovlnných sítí

3.1.2 Typy mikrovlnných stanic

Základem pro klasifikaci mikrovlnných stanic, je jejich umístění v síti. Jednak jsou to stanice koncové a jednak stanice průchozí – retranslační. Koncové stanice jsou umístěny na obou koncích mikrovlnného spoje a předávají přenášená data uživatelům. Retranslační stanice jsou umístěny mezi stanicemi koncovými. Jejich úkolem je přijímat data z jednoho skoku a předávat je dalšímu. Některé konstrukce retranslačních stanic umožňují odbočovat data z celkového datového toku tj. data přidávat a odebírat. Pokud tato odbočená data jsou směřována na další stanici, tj. retranslační bod spolupracuje alespoň do 3 směrů, nazývá se tento bod pivotním.

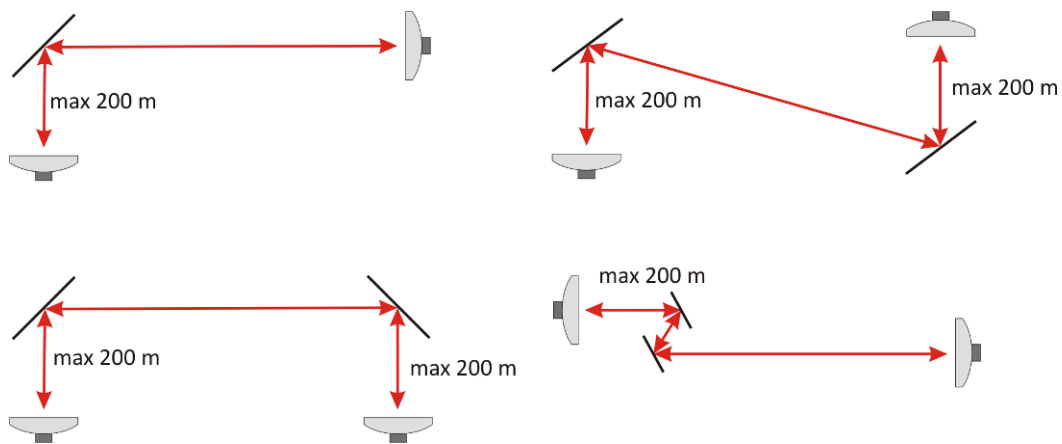
3.2 RETRANSLAČNÍ STANICE

Mikrovlnná kmitočtová pásma využívají vysokých kmitočtů, jejichž vlastnosti se blíží k vlastnostem světla. Mikrovlnný paprsek se šíří po přímce a nemůže ohybem obejít překážku v šíření. Proto v přímce viditelnost nesmí žádná překážka být. Pokud tam taková překážka je, musí se na vhodném místě vybudovat další komunikační bod (retranslační) a pomocí něho překážku obejít.

Retranslační stanice se rozdělují do dvou skupin:

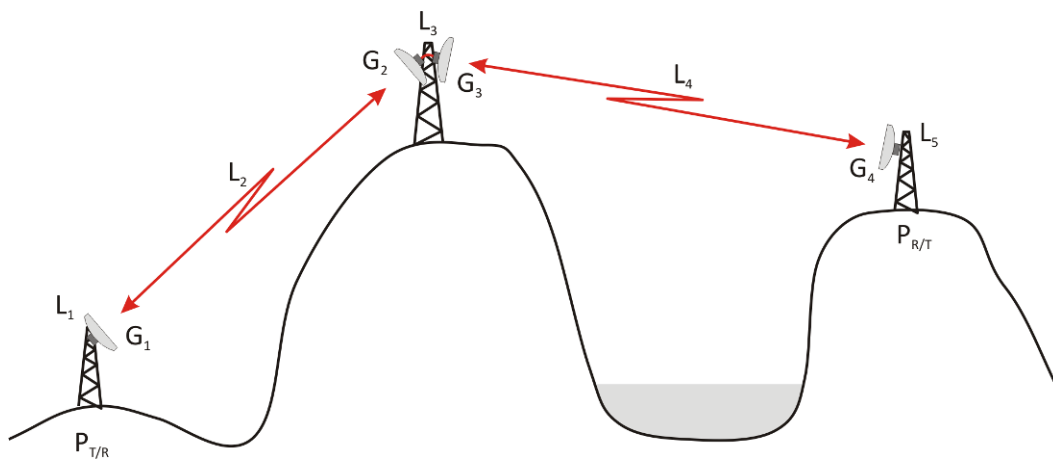
3.2.1 Pasivní retranslační stanice

Pasivní retranslační stanice pracuje jako odrazec mikrovlnného paprsku. To lze provést jednak pomocí odrazné desky, která nasměruje paprsek z jeho dráhy do žádaného směru, a jednak pomocí dvou spojených parabolických antén, které jsou vzájemně propojeny pomocí ohebného vlnovodu.



Obrázek 14 Pasivní retranslační stanice

Pasivní retranslace pomocí dvou parabolických antén



Obrázek 15 Uspořádání pasivní retranslace

Symbyly na obrázku:

$P_{T/R}$	Výstupní výkon vysílače
$P_{R/T}$	Přijímaný výkon = výkon na vstupu přijímače koncové stanice.
L_1	Ztráty v napáječi vysílací antény
L_2, L_4	Ztráty šíření ve volném prostoru
L_3	Ztráty v napáječe mezi anténami pasivní retranslační stanice
L_5	Ztráty napáječe přijímací antény
$G_1 \div G_4$	Zisky jednotlivých antén

Přijímaný výkon je vyjádřen vztahem

$$P_R = P_T - L_0$$

Kde L_0 jsou celkové ztráty mezi vysílací a přijímací stanicí

$$L_0 = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 - (G_1 + G_2 + G_3 + G_4)$$

Ze vztahu je patrné, že pro zvětšení přijímaného výkonu je nutné buď zvýšit vysílací výkon, nebo snížit ztráty v napáječích eventuálně i ve volném prostoru zkrácením trasy, nebo zvýšit zisk alespoň některé antény.

Zvolením typu spojení a varianty koncových stanic byl vlastně zvolen vysílací mikrovlnný výkon a výkonová citlivost přijímače. Když je zvoleno pevné umístění vysílací antény a vysílače jsou tím dány i ztráty L_1 napáječe. Stejně tak je-li pevně zvoleno umístění přijímací antény a přijímače jsou konstantní i ztráty L_5 napáječe. Z toho

plyne, že pro zvýšení přijímaného výkonu je možno buď zvýšit zisk 4 mikrovlnných antén nebo antény v retranslačním bodě montovat k sobě co nejbližší a omezit tak vliv ztrát L_3 nebo volit retranslační bod tak, aby bylo spojení co nejkratší a omezily se ztráty volného prostoru.

Zisk parabolické antény je vyjádřen vztahem:

$$G = 17,8 + 20 \log(FD)$$

kde je

G[dB]	zisk antény
D[m]	průměr parabolické antény
F[GHz]	pracovní kmitočet

Ze vztahu vyplývá, že se v pasivní retranslační stanici při daném kmitočtu užívá antén co největších průměrů. Zvětšováním průměru antény roste její zisk, ale klesá vyzařovací úhel (vztahy na str. 55). Se zvětšováním rozměrů antén roste ale i jejich cena. Vedle potíží s montáží velkých antén vznikají další potíže s jejich nastavením při směrování. Z těchto důvodů není vhodné průměry antén v pasivní retranslační stanici enormně zvětšovat. Pokud se zvětší průměr všech antén, je celkové zlepšení čtyřnásobné.

Jak již bylo řečeno, je nutné pokud možno snížit ztráty volného prostoru. Celkové ztráty volného prostoru jsou dány součtem ztrát jednotlivých skoků. Pro pasivní retranslační bod mezi koncovými stanicemi platí $L = L_2 + L_4$. To znamená, že celkové retranslace závisí na relativním umístění retranslační stanice vzhledem ke koncovým stanicím. Účinnost retranslační stanice je tím větší, čím je menší její vzdálenost od některého z koncových bodů. Je proto nejlépe umístit retranslační stanici jak možno nejbližší. Nejhorší případ vzhledem k podmínkám šíření nastává, když je retranslační stanice umístěna doprostřed mezi dvě koncové stanice. Ztráty volného prostoru zde dosahují svého maxima.

Pasivní retranslace pomocí odrazné plochy

Odrzná deska s vodivostí ve všech směrech stejnou, která je v určitých mezích hladká a má odpovídající rozměr, může také sloužit jako pasivní retranslační stanice. Musí být v daném místě mezi koncovými stanicemi nastavena do úhlu, kdy dochází k odrazu mikrovlnného paprsku do žádaného směru. Rozměry odrazné desky vycházejí z rozměru 1. Fresnelovy zóny v místě odrazu. Výpočet přijímaného výkonu se provádí podle obdobných vzorců jako v předcházejícím případě pasivní retranslace pomocí dvou parabolických antén

Porovnání typů pasivní retranslace

- Podstatnou předností odrazné plochy je její větší účinnost, protože zisk antény je dvojnásobný vzhledem k přijímací a vysílací straně.
- Retranslační bod s parabolickými anténami má mnohem snazší instalaci a nastavení a pracuje mnohem stabilněji. Odrzná deska, která může být velká i několik čtverečních metrů, se obtížně montuje i nastavuje. Vzhledem k ploše je za větru i méně stabilní.
- Retranslační bod s parabolickými anténami není omezen úhlem mezi směrem vysílače a přijímače, zatímco odrzná deska ano. Pokud oddělovací úhel je větší než 100° , musí být použity desky dvě, což činí dvojnásob obtížnou montáž i nastavení při směrování.
- Retranslační bod s parabolickými anténami může využívat polarizační selektor pro výběr vln horizontální a vertikální polarizace přicházejících ze sousedních stanic k omezení úniku způsobeného změnou podmínek šíření. Obzvláště pokud je pasivní retranslační stanice umístěna na přímce mezi přijímačem a vysílačem, může změna polarizace omezit vliv mnohocestného úniku na spoj.
- V případě nutnosti lze na základě požadavku šíření signálu a podmínek terénu vybudovat retranslační bod s třemi parabolickými anténami. S odraznými deskami je tento problém neřešitelný.
- Z pohledu nákladů je retranslační bod s parabolickými anténami mnohem lacinější než retranslační bod s odraznou deskou. Ještě větší je rozdíl nákladů pokud se budují v retranslačním bodě odrazné

desky dvě. Retranslační bod s dvěma odraznými deskami má přísné podmínky na umístění. Aby byl zaručen bezchybný provoz s ohledem na vlivu větru, musí být konstrukce zrcadel pevná. To představuje další náklady.

3.2.2 Aktivní retranslační stanice

Používají se dva typy aktivních retranslačních stanic

Aktivní retranslační stanice

Aktivní retranslační stanice je obousměrná bez kmitočtového mikrovlnného posuvu. Přijímaný mikrovlnný signál pouze přijme, zesílí a vyšle dál. Nemůže být použita k odbočení signálového toku, protože ve stanici se neprovádí demodulace a modulace signálu. Tato retranslační stanice řeší problémy vznikající v horách a ve velkých budovách, také zvyšuje rezervu na únik v nově budovaných a formovaných mikrovlnných sítích. Aktivní retranslační stanice jsou široce použitelné vzhledem k následujícím vlastnostem.

Aktivní retranslační stanice mají

- velký zisk a dobré přenosové vlastnosti
- velkou spolehlivost a možnost zařadit do sítě s různými koncovými stanicemi
- možnost k napájení použít běžnou rozvodnou síť, stejnosměrné napájení, solární články a větrné elektrárny.
- nízké provozní a investiční náklady. Tyto stanice se montují přímo na stožár poblíž antén. Není nutná žádná vnitřní jednotka a tedy ani prostory pro její umístění. Při montáži pokud je vybráno místo je nutno pouze zvolit optimální umístění bez ohledu na dopravu, napájení atd. Celkové náklady jsou 50÷80 % nákladů na regenerující stanici.

Aktivní retranslační regenerující stanice

Regenerující aktivní retranslační stanice je mikrovlnný opakovač podobný spojeným koncovým stanicím. Obsahuje celou vnější jednotu s regenerací mikrovlnného signálu. Tato stanice může prodlužovat dosah spoje a také obcházet překážku šíření. Neumožňuje odbočení signálového toku, protože ve stanici se neprovádí demodulace a modulace signálu. Stanice přijme signál, plně jej obnoví a zesílí a v požadovaném směru přenesení dále.

3.3 POUŽITÍ DIGITÁLNÍCH MIKROVLNNÝCH SPOJENÍ

Mikrovlnné spojení se používá hlavně v těchto případech:

- Náhradní a zálohová síť k síti optické. Geografické podmínky a jiné obtíže někdy nedovolují položení optických kabelů. V tomto případě může doplnit optickou síť síť mikrovlnných digitálních spojů. Mikrovlnná síť je budována podle shodných zásad jako síť optická.
- Náhrada a zálohování kabelových sítí. Mikrovlnné spojení mezi dvěma důležitými body, které jsou spojeny kabely, může pracovat jako záloha, která kabely nahradí při jejich poruše.
- Budování soukromých sítí. Mikrovlnnou síť lze vybudovat pro některá zvláštní použití, jako jsou naftovody, plynovody, teplovody atp., správa vodních toků a přenosy TV signálů. Do soukromých sítí lze zahrnout i sítě vojenské a státní pro přenos utajovaných dat.

4. TEORIE ŠÍŘENÍ MIKROVLN

4.1 ŠÍŘENÍ ELEKTRICKÝCH VLN VE VOLNÉM PROSTORU

4.1.1 Volný prostor

Volný prostor, také nazývaný ideálním prostředím, je ideální vakuový prostor. Tento prostor je zcela homogenní a má konstantní materiálové parametry v celém objemu. Ideální volný prostor má vodivost $\sigma = 0$, dielektrickou konstantu (permitivitu) $\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \left[\frac{F}{m} \right]$ a magnetickou permeabilitu

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{H}{m} \right].$$

Volný prostor je prostředí isotropní a tedy jeho materiálové konstanty jsou nezávislé na elektromagnetickém poli vlny, která se v něm šíří. Ve volném prostoru se nedochází k absorpci elektromagnetické vlny. Nejsou zde žádné překážky a tak nedochází k odrazům, rozptylu, či k ohybu.

4.1.2 Ztráty šířením elektromagnetické vlny ve volném prostoru

Elektromagnetická vlna, která se šíří volným prostorem, nevykazuje ztráty energie způsobené odrazem, rozptylem, ohybem nebo absorpcí. Její celková energie se tedy nemění, ale dochází k jejímu rozprostření do většího prostoru. Intenzita tedy slábne, jako slábne světlo žárovky. Světlo žárovky se šíří do všech stran a dopadá na stále větší plochu. V dostatečné vzdálenosti od žárovky je již její světlo nepatrné. Také intenzita elektromagnetické vlny je nepřímo úměrná vzdálenosti od jejího zdroje. Difuzní ztráty intenzity elektromagnetické vlny se nazývají ztrátami volného prostoru. Na základě ideálního přenosu lze vyjádřit ztráty volného prostoru:

$$L_0[dB] = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

kde znamená

L_0 jsou ztráty volného prostoru

d je vzdálenost mezi zdrojem elektromagnetické vlny a přijímacím bodem

λ je vlnová délka elektromagnetické vlny

Vlnová délka je

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

kde je

c je rychlost světla

f je kmitočet elektromagnetické vlny.

Po dosazení a převedení na dB jsou ztráty volného prostoru

$$L_0[dB] = 20 \log \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)$$

$$L_0[dB] = 20 \log \left(\frac{4\pi}{c} \right) + 20 \log(d) + 20 \log(f)$$

Pro prakticky používané jednotky d [km], f [GHz] a $c = 3 \cdot 10^8$ [GHz] je vyjádření předchozího vzorce

$$L_0 [dB] = 92,4 + 20 \log(d [km]) + 20 \log(f [GHz])$$

4.2 VLIV ODRAZŮ NA ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN

U ideálního rádiového spoje postupují elektromagnetické vlny od vysílače k přijímači po jediné přímé dráze. Objevuje se zde vedle ztráty šíření i zpoždění dané konečnou rychlostí šíření elektromagnetických vln. Vzhledem k různosti terénu mají rozdílné úseky přenosu rozdílný vliv na šíření elektromagnetických vln. Největší vliv má odraz, pak ohyb a konečně i rozptyl na povrchu. Vliv rozptyl na povrchu je nejmenší a tak bývá oproti hlavnímu paprsku zanedbáván. Všechny tyto vlivy jsou lineární a v přijímací anténě se vektorově skládají s hlavním paprskem. Tak může vzniknout nejen součet paprsků, kdy výsledný signál je vyšší než by odpovídalo šíření ve volném prostoru, ale i rozdíl, kdy signál bývá mnohem nižší. Odraz je silný hlavně od vodní plochy a hladkých povrchů např. budov.

4.2.1 Fresnelova zóna

Koncept Fresnelovy zóny pomáhá pochopit problémy odrazu a ohybu elektromagnetických vln a je vhodné se s ním blíže seznámit.

Huygens - Fresnelův princip

Huygensův princip je založen na myšlence elementárních kulových vlnoploch a dá se vyjádřit takto: Vlnění se šíří prostorem tak, že každý bod, do kterého vlnění dospěje, se stává zdrojem elementárního vlnění, které se rozšíří na elementární vlnoplochu. Každý bod elementární vlnoplochy se stává opět zdrojem vlnění a tak vlnění postupuje k delším a dalším bodům prostředí. Plocha, na kterou vlnění dospěje současně ve všech jejích bodech, se nazývá vlnoplochu a kolmice na ní určují směr šíření vln - paprsky. Nutno dodat, že jak ukázal Fresnel, je výsledný stav vlnění v prostředí dán superpozicí všech elementárních vlnění se zřetelem na interferenci. Teprve s tímto dodatkem se stává Huygens - Fresnelův princip užitečným nástrojem v řešení problémů šíření vln.

Světlo i elektromagnetické vlny lze považovat za jistý druh vlnění. V mikrovlnné oblasti se šíří rádiové vlny téměř přímočaře. Antény oproti vzdálenosti přenosu jsou velmi malé a lze je považovat za bodový zdroj vlnění.

Fresnelův elipsoid

Uvažujme pro mikrovlnný spoj, že vysílací bod je A, přijímací bod je B a vzdálenost mezi těmito body je stálá a je rovna d . Pro bod každý C ležící mimo spojnicí AB, musí rádiová vlna urazit vzdálenost u , která je větší než vzdálenost d o hodnotu Δ . Platí tedy:

$$u = AC + CB = d + \Delta$$

Pro konstantní vzdálenost u , vytvářejí body C v rovině elipsu s ohnisky v bodech A, B. V prostoru se pak vytváří rotační elipsoid. Když konstanta $\Delta = \frac{\lambda}{2}$ tj. $u = d + \frac{\lambda}{2}$ je rotační elipsoid nazýván prvním Fresnelovým elipsoidem. Pro konstantu $\Delta = \frac{2 * \lambda}{2}$ tj. pro $u = d + \frac{2 * \lambda}{2}$ druhým Fresnelovým elipsoidem atd. Tedy obecně

N-tý Fresnelův elipsoid má konstantu $\Delta = \frac{N * \lambda}{2}$.

Fresnelova zóna

Fresnelovy elipsoidy jsou rotační. Proto průsečík s rovinou kolmou na spojnici AB je množina kružnic se společným středem. První Fresnelovou zónou se nazývá kruh, který vzniká jako průsečík kolmé roviny a prvního Fresnelova elipsoidu. Druhá Fresnelova zóna je mezikruží vzniklé odečtením první Fresnelovy zóny od průsečíku druhého Fresnelova elipsoidu. Dále pak analogicky N-tá Fresnelova zóna je mezikruží vzniklé odečtením N-1 zóny od N-tého průsečíku. Protože rozdíl drah elektromagnetické vlny pro jednotlivé sousedící Fresnelovy zóny je $\lambda/2$ jsou tyto zóny v opačné fázi a jejich příspěvky v přijímacím bodě se vzájemně odečítají. To znamená, že příspěvek vytvořený první Fresnelovou zónou je snižován o příspěvek druhé Fresnelovy zóny, ale třetí Fresnelova zóna výsledek zase zvyšuje, protože je v opačné fázi než zóna druhá atd. Čím vyšší je řadové číslo Fresnelovy zóny, tím menší je její příspěvek. Největší část energie (60%) prochází první Fresnelovou zónou. Proto také v praxi bývá vliv vyšších Fresnelových zón zanedbáván.

Poloměr Fresnelovy zóny

Při výpočtu hraničního poloměru N-té Fresnelovy zóny lze vyjít z geometrického náhledu obrázek 16. Označíme úsečku $|CD| = b_n$. Pak podle definice Fresnelova elipsoidu platí:

$$(AC + CB) - d = \frac{N * \lambda}{2}$$

$$(d_1^2 + b_n^2)^{\frac{1}{2}} + (d_2^2 + b_n^2)^{\frac{1}{2}} - d = \frac{N * \lambda}{2}$$

Protože poloměr b_n je vždy o hodně menší než d_1 i d_2 lze použít vzorec pro počítání s malými čísly kde je pro malé x vychází $(1 + x)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{x}{2}$ a dostaneme:

$$d_1 + \frac{b_n^2}{2d_1} + d_2 + \frac{b_n^2}{2d_2} - d = \frac{N * \lambda}{2}$$

po vykrácení

$$\frac{b_n^2}{d_1} + \frac{b_n^2}{d_2} = N\lambda$$

Konečný výraz pak

$$b_n = \left(\frac{d_1 d_2 N \lambda}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Vztah lze ještě upravit pro praktické jednotky, kdy d_1, d_2, d je v km a f je v GHz

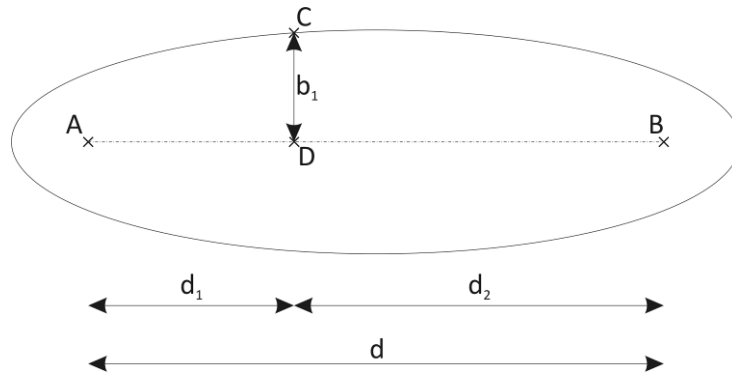
$$b_n [m] = 17,32 \left(\frac{d_1 d_2 N}{fd} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Poloměr 1. Fresnelovy zóny:

$$b_1 [m] = 17,32 \left(\frac{d_1 d_2}{fd} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$b_n = b_1 (N)^{\frac{1}{2}}$$

Poloměr Fresnelovy zóny je největší uprostřed mikrovlnné trasy. Zvětšuje se s její délkou a snižuje se použitým kmitočtem.



Obrázek 16 Fresnelova zóna

4.2.2 Vliv odrazů od země na hladinu přijímaného signálu

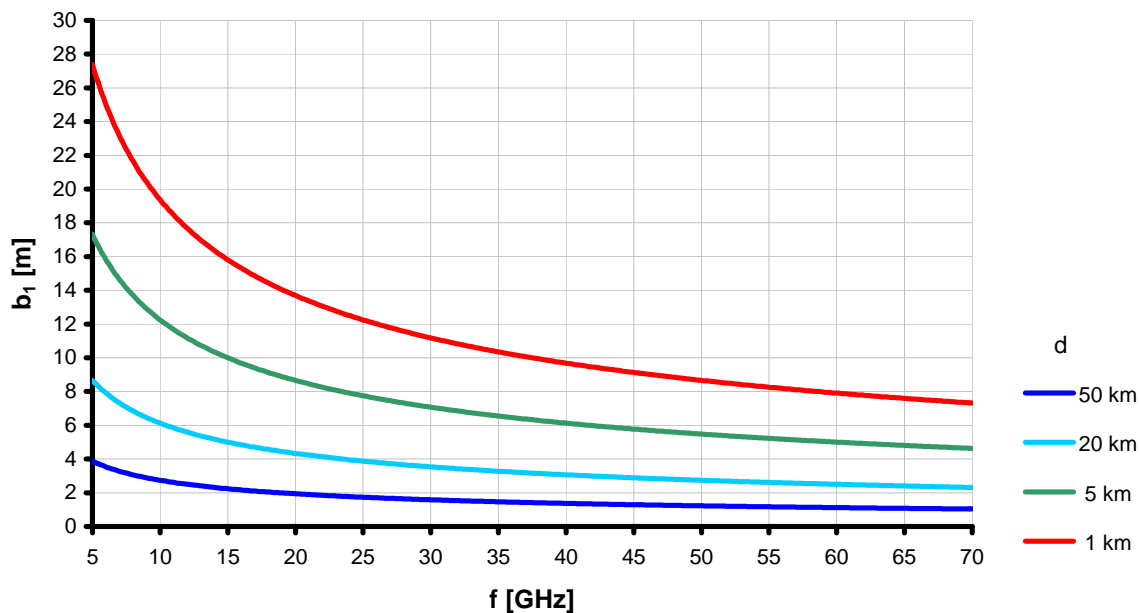
Průchodnost trasy

Šíření mikrovlnného signálu může být omezeno horami, budovami a stromy. Vzhledem k tomu, že vyzařovaná energie není soustředěna do jednoho nerozbíhavého paprsku, nestačí zajistit pouze optickou viditelnost mezi anténami. Převážná část energie se nachází v první Fresnelově zóně. Proto se snažíme, aby žádná překážka do ní nezasahovala. Pokud překážka je ostrá tj. má charakter břitu může dojít i k pozitivnímu ovlivnění přijímané hladiny, což bude vysvětleno v následující kapitole. Většina překážek však charakter břitu nemá a tak pokud je dostatečně vysoká a zasahuje do 1. Fresnelovy zóny, způsobuje dodatečné ztráty a tím snižuje hladinu přijímaného signálu a ovlivňuje i spolehlivost přenosu. Proto se zjišťuje průchodnost trasy pomocí kritéria volného profilu.

Pro každou překážku na mikrovlnné trase nutno v jejím místě vypočítat poloměr první Fresnelovy zóny a zjistit, zdali překážka do ní nezasahuje.

Kritériem průchodnosti je poměr $\frac{h_c}{b_1}$. Čím je tento poměr větší, tím je profil mikrovlnného spoje volnější.

Pro názornost je v následujícím grafu vyneseno poloměr první Fresnelovy zóny pro střed spoje v závislosti na frekvenci se vzdálenosti spoje d jako parametrem.



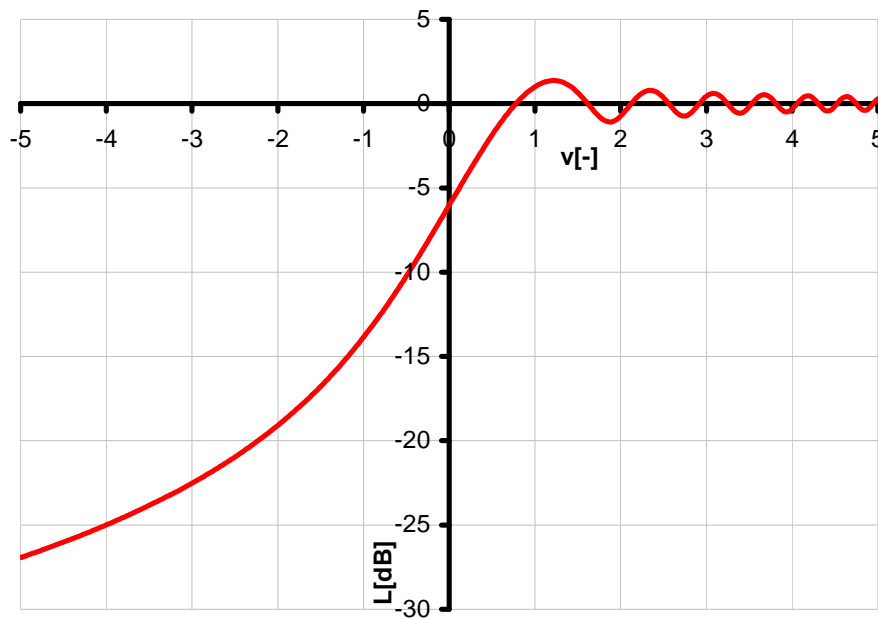
Při delších trasách je nutno ještě uvážit zaoblení zeměkoule. K nadmořské výšce překážky nutno přičíst hodnotu

$$h[m] = \frac{d_1 d_2}{12,74}$$

kde d_1 i d_2 je opět v [km].

Difrakce na ostré překážce

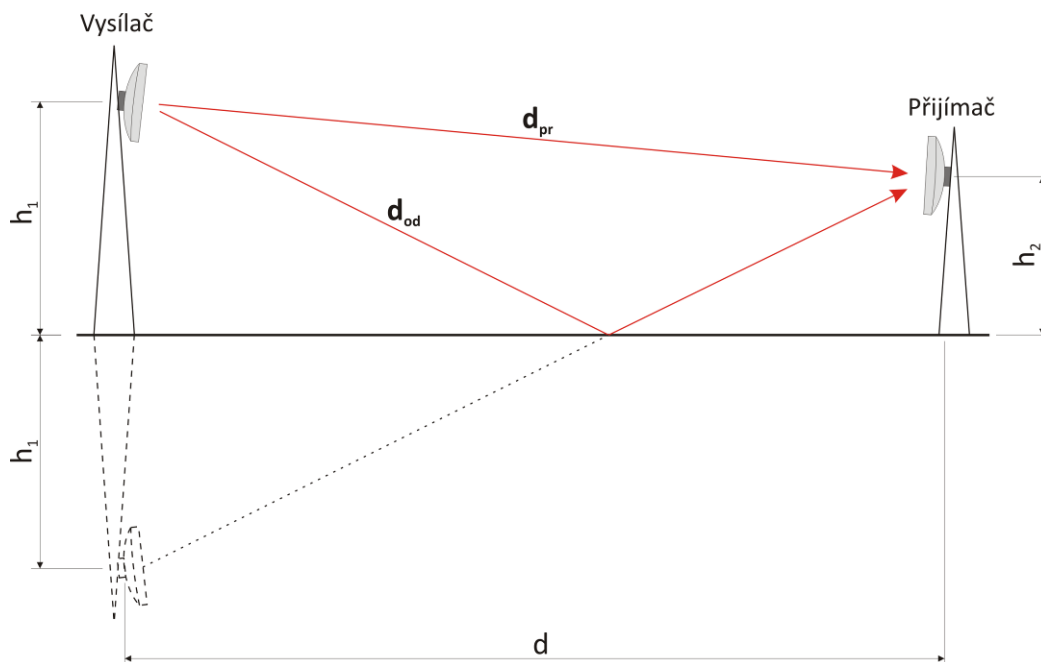
Pomocí Huyghensova principu lze vysvětlit chování elektromagnetické vlny za ostrou překážkou. Ostrá překážka v závislosti na její výšce h_c zakrývá postupně jednotlivé části Fresnelových zón. Neblokuje najednou všechny a tak alespoň část energie může dopadat do přijímacího bodu. Přijímaná hladina je nižší oproti volnému prostředí. Tak je vytvářen dodatečný útlum. Pro ostrou překážku, která se právě dotýká spojnice přijímacího a vysílacího bodu tj. zakrývá polovinu první Fresnelovy zóny a tedy $h_c = 0$, jsou dodatečné ztráty 6 dB. Pokud je ostrá překážka nad touto spojnicí, hladina přijímaného signálu rapidně klesá, a tedy rapidně rostou dodatečné ztráty. V případě že je ostrá překážka pod spojnicí přijímacího a vysílacího bodu hladina přijímaného signálu vlivem difrakce lehce kolísá okolo hodnoty volného prostoru, tj. dodatečné ztráty kolísají lehce kolem 0 dB. Toto kolísání je způsobeno postupným zakrýváním Fresnelových zón, jejichž účinky se navzájem částečně kompenzují. Pro názornost jsou v následujícím grafu vyneseny dodatečné ztráty pro ostrou překážku v závislosti na její relativní výšce. Tento graf se často udává v závislosti na míře zastínění, kde platí $v = \sqrt{2} * \frac{h_c}{b_1}$.



Obrázek 17 Ztráty za ostrou překážkou

Odraz elektromagnetických vln na plochem terénu

Plochý terén znamená, že zvlnění terénu vzhledem k délce použité vlny je malé a že se neuvažuje zaoblení zeměkoule. Ve skutečném mikrovlnném spoji jsou přijímací antény nastaveny tak, aby přijímaly nejsilnější paprsek, paprsek na přímé viditelnosti. Ale na základě Huyghensova principu se vždy některé paprsky vysílají k zemi a tedy na přijímací straně je kromě přímého paprsku zachycován i paprsek odražený od země. Pro odražený paprsek platí známý zákon o rovnosti úhlu dopadu a úhlu odrazu vln. Při součtu přímé a odražené vlny je rozhodující fázový posun těchto paprsků. Fázový posun vzniká rozdílem drah paprsku přímého a odraženého. Vydeme geometrické představy (obrázek 18).



Obrázek 18 Odraz od země

Dráha paprsku přímého

$$d_{PR} = \left(d^2 + (h_1 - h_2)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$d_{PR} = d \left(1 + \left(\frac{h_1 - h_2}{d} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Vzhledem k tomu, že $h_1 \ll d$ a také $h_2 \ll d$ je $(h_1 - h_2)/d \ll 1$ lze použít přibližného vyjádření

$$d_{PR} \approx d + \frac{(h_1 - h_2)^2}{2d}$$

Dráha paprsku odraženého

$$d_{od} = \left(d^2 + (h_1 + h_2)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$d_{od} = d \left(1 + \left(\frac{h_1 + h_2}{d} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Přibližné vyjádření

$$d_{od} \approx d + \frac{(h_1 + h_2)^2}{2d}$$

Hledaný rozdíl drah

$$\Delta d = d_{od} - d_{pr}$$

$$\Delta d = \frac{2h_1 h_2}{d}$$

Fázový rozdíl

$$\Delta \varphi = \Delta d \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)$$

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi h_1 h_2}{d\lambda}$$

Intenzita přímého paprsku

$$E_1 = E_0 \cos(\omega t)$$

Intenzita odraženého paprsku

$$E_2 = E_0 R \cos(\omega t - (\psi + \Delta \varphi))$$

Kde R , ψ jsou konstanty činitele odrazu.

Přímý a odražený paprsek se spolu vektorově skládají. Při dopadu na přijímací anténu jsou stejné intenzity (rozdíl drah je malý a tedy zanedbatelný) a posunuty o úhel $\psi + \Delta\varphi$.

$$E_p^2 = E_0^2 + E_0^2 R^2 - 2E_0^2 R \cos(\pi - (\psi + \Delta\varphi))$$

$$E_p = E_0 \left(1 + R^2 + 2R \cos(\psi + \varphi)\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$E_p = E_0 \left(1 + R^2 + 2R \cos\left(\frac{\psi + 4\pi h_1 h_2}{d\lambda}\right)\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$F = \frac{E_p}{E_0}$$

Činitel tlumení F vyjadřuje poměr přijímané intenzity elektromagnetického pole k intenzitě pole vypočtené pro šíření ve volném prostoru

Pro $d \gg h_1, h_2$ kdy je úhel dopadu velmi malý a pro dobře vodivou zem lze uvažovat $R \approx 1, \psi \approx \pi$.

$$F = \left(2 + 2 \cos\left(\frac{4\pi h_1 h_2}{d\lambda}\right)\right)^{\frac{1}{2}}$$

Po úpravách lze nalézt pro činitel tlumení výraz

$$F = 2 \left| \sin\left(\frac{2\pi h_1 h_2}{d\lambda}\right) \right|$$

Použití Fresnelových zón k analýze vlivu odrazů od země

Pokud je délka mikrovlnného spoje d mnohem větší než výška obou antén lze rozdíl dráhy přímého a odraženého paprsku přibližně vyjádřit takto:

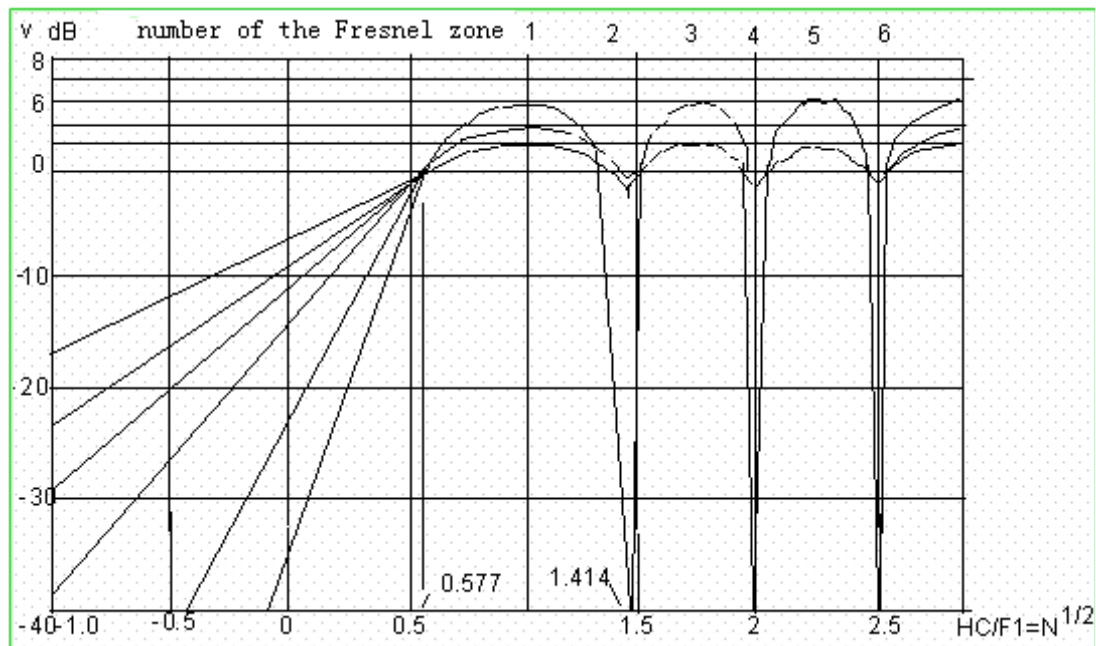
$$\Delta r = \left(\frac{h_c}{b_1}\right)^2 * \left(\frac{\lambda}{2}\right)$$

kde h_c je výška paraboly nad terénem
 b_1 poloměr první Fresnelovy zóny
 λ vlnová délka použitého kmitočtu

Po dosazení do výchozího vzorce vyjde

$$F = \left(1 + R^2 - 2R \cos\left(\pi \frac{h_c}{b_1}\right)\right)^{\frac{1}{2}}$$

Tento výraz ukazuje kvantitativní vztah mezi činitelem tlumení F a relativní průchodností h_c/b_1 . Byl vypočten graf, který lze jednoduše použít při návrhu mikrovlnné trasy. Činitel tlumení F představuje dodatečné ztráty způsobené odrazem od země. Činitel odrazu R závisí na vlastnostech odrazové plochy země a je nejvýše roven 1.



Obrázek 19 Odrazové ztráty

V obrázku „odrazové ztráty“ je znázorněno, jak je v porovnání s přímou přicházející vlnou odražená vlna tlumena. Hodnota je vyjádřena v dB.

$$P_R [dBm] = P_{RO} [dBm] + F [dB]$$

Jak je patrné z grafu (obrázek 19) pro různé hodnoty R dosahuje hladina přijímané vlny hodnoty pro volný prostor při $\frac{h_c}{b_1} = 0,577$. Tato hodnota bývá nazývána relativní prostupností volné prostoru a z ní vypočtené h se označuje h_0 .

Klasifikace mikrovlnných spojů

Podle prostupnosti h_c lze mikrovlnné spoje rozdělit do tří skupin:

- Pro $h_c \geq h_0$ jsou to spoje volné.
- Pro $h_0 > h_c \geq 0$ jsou spoje na půl uzavřené.
- Pro $h_c \leq 0$ jsou spoje uzavřené.

S ohledem na tyto 3 skupiny lze činitele úniku vypočítat takto:

Pro volné spoje jej lze určit pro první přiblížení podle grafu (obrázek 19) Pro ostré překážky použít grafu (obrázek 17)

Pro uzavřené spoje a spoje zpola uzavřené, které jsou zejména v pahorkatinách a horách, lze faktor tlumení spoje odhadnout podle (obrázek 19), nebo vypočítat pomocí difrakce. Na základě odpovídající teorie lze odvodit přibližné vyjádření útlumu. Rozeznáváme tři skupiny:

- | | |
|--|--|
| A) Je-li $h_c = h_0 = 0,577 b_1$ je | $F = 1$ tj. $F[\text{dB}] = 0$ |
| B) Je-li $h_c = 0$ pro ostrou překážku je
pro širší překážku je | $F[\text{dB}] = -6$
$F[\text{dB}] < -6$ (podle výrazu ad C) |
| C) Je-li $h_c < h_0$ je | $F[\text{dB}] = F_0[\text{dB}] (1 - h_c/h_0)$ |

V těchto vzorcích znamená:

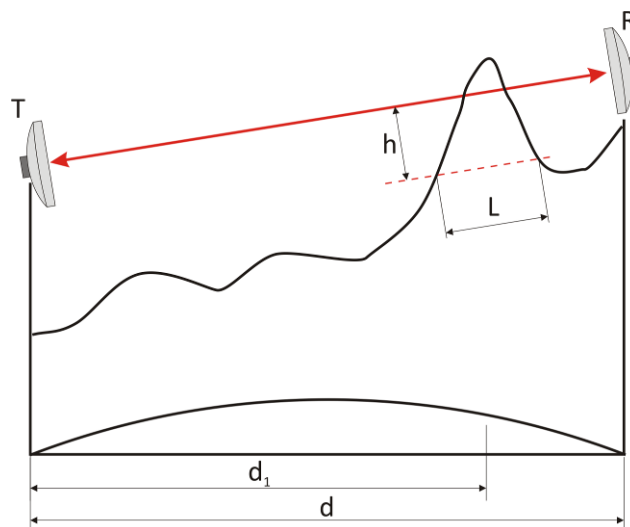
- F činitel útlumu při uvažování difrakce
 h_0 výška průchodnosti pro volný prostor $h_0 = 0,577 b_1$
 h_c výška překážky vzhledem k hlavnímu paprsku spoje
 F_0 hodnota činitele útlumu když průchodnost $h_c = 0$.

Hodnota činitele F_0 se vypočítá pomocí parametru μ , v kterém jsou zahrnuty vlastnosti terénu

$$\mu = 2,02 \left(K \frac{1-K}{L} \right)^{\frac{2}{3}}$$

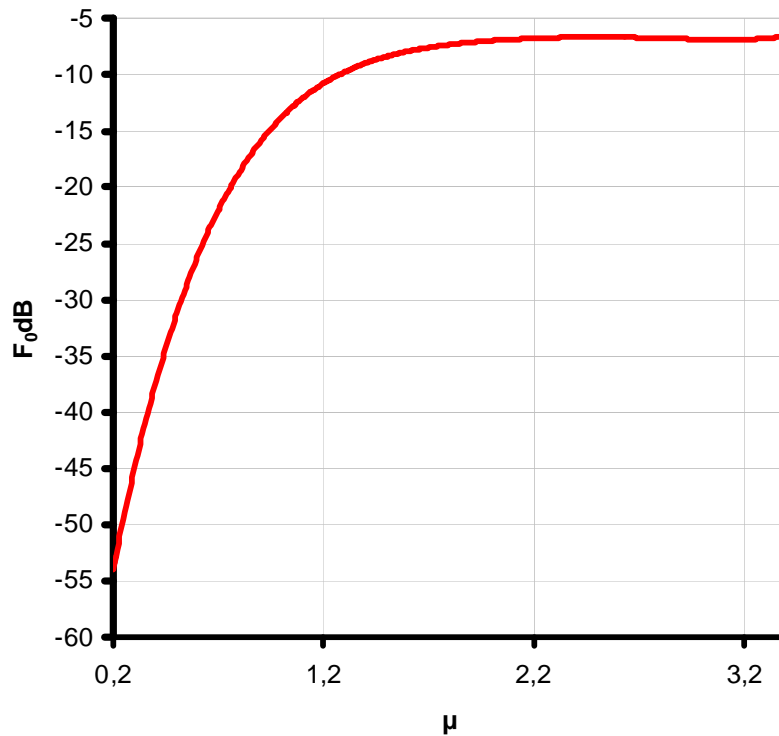
Kde znamená

- K poměrná vzdálenost překážky $K = \frac{d_1}{d}$
L úsečku na přímce paralelní s hlavním paprskem ve vzdálenosti
 $h = \frac{(\lambda d)^{\frac{1}{2}}}{2}$. Pokud se přímka dotýká nebo protíná překážku, určuje její šířku



Obrázek 20 Určení činitele terénu μ

Hodnoty činitele útlumu v závislosti terénního parametru μ lze odečíst z grafu (obrázek 21)

Obrázek 21 Závislost útlumu na μ

4.3 VLIV TROPOSFÉRY NA ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY

Největší vliv troposféry na elektromagnetické vlny je vliv atmosférického lomu na jejich šíření.

4.3.1 Paprsky elektromagnetických v atmosféře

Rychlost šíření elektromagnetických vln ve volném prostoru je

$$v = c = \frac{1}{(\mu_0 \varepsilon_0)^{\frac{1}{2}}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Ve skutečné atmosféře je dielektrická konstanta $\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon'$ a permeabilita $\mu_a = \mu_0$. Po dosazení vychází rychlost šíření elektromagnetických vln

$$v = \frac{1}{(\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon')^{\frac{1}{2}}} = \frac{c}{(\varepsilon')^{\frac{1}{2}}}$$

V tomto výrazu ε' se nazývá relativní dielektrická konstanta

Index lomu atmosféry n je poměr rychlosti šíření elektromagnetické vlny ve volném prostoru k rychlosti šíření v atmosféře

$$n = \frac{c}{v} = (\varepsilon')^{\frac{1}{2}}$$

Index lomu n nabývá typických hodnot od 1,000325 u povrchu země do 1,000110 na horní hranici troposféry. Z praktických důvodů se zavádí pojem refraktivita N

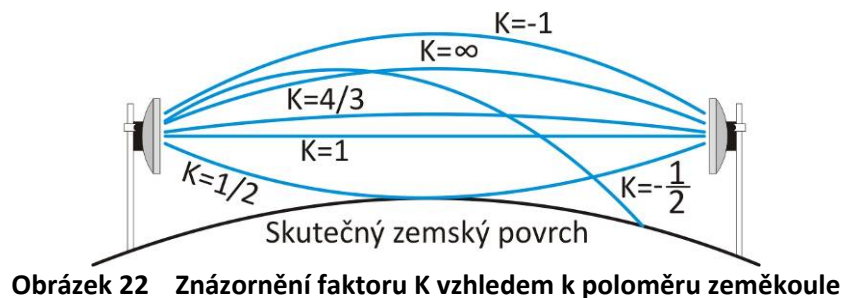
$$N = (n - 1) \cdot 10^6$$

U povrchu země je tedy refraktivita 300, na horní hranici troposféry 110 a ve volném prostoru je $N = 0$. Atmosféra v různých výškách při různém tlaku, teplotě a vlhkosti má také různé vlastnosti. Jejich změna se vyjadřuje poměrem dn/dh což je gradient indexu lomu.

Pro $\frac{dn}{dh} < 0$ nastává reverzní stav změny h , který nutí elektromagnetické paprsky ohýbat se dolů.

4.3.2 Efektivní poloměr země

Analýza šíření elektromagnetických vln nad zakřivenou zemí je technicky náročná. Proto se zavádí pojem ekvivalentního poloměru země a_e . Snahou transformace je narovnat zakřivený paprsek, nebo narovnat zakřivenou zemi a v obou případech tak zjednodušit výpočet. Pravidlo ekvivalence pak říká, že průchodnost mezi paprskem a překážkou se transformací nemění. (Viz obrázek 22)



Obrázek 22 Znárodnění faktoru K vzhledem k poloměru zeměkoule

Zavádí se koeficient efektivního poloměru země $K = a_e / a$, kde $a = 6370$ km je poloměr zeměkoule. Faktor K násobený skutečným poloměrem zeměkoule udává poloměr smyšleného zakřivení země. Vztah mezi faktorem K a gradientem indexu lomu je dán vzorcem

$$K = \frac{1}{1 + a \frac{dn}{dh}}$$

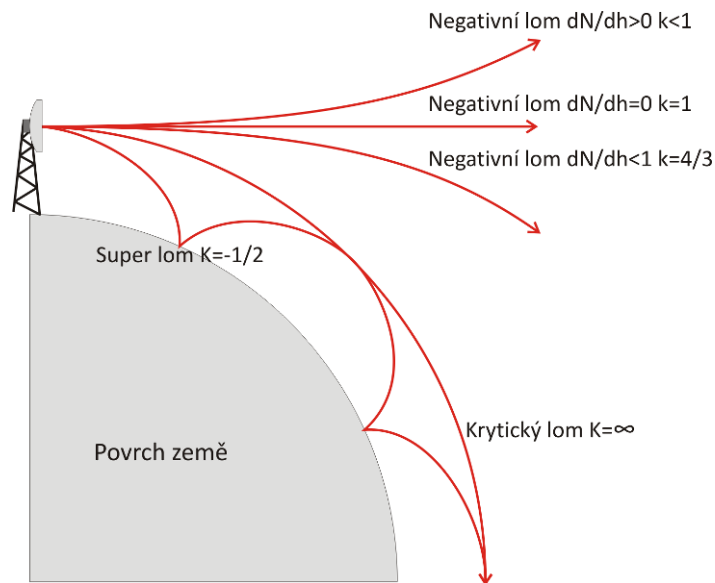
Faktor K se při návrhu mikrovlnného spoje velmi používá a je vhodné jej dále rozebrat.

4.3.3 Rozdělení ohybu paprsků podle faktoru K

Lze stanovit tři kategorie lomu paprsku v mikrovlnném spoji.

1. Spoj v prostředí bez ohybu, kdy gradientem indexu lomu $dn/dh = 0$ má $K = 1$. Z toho vyplývá $a_e = a$.
2. Spoj s negativním ohybem, kdy $dn/dh > 0$ má $K < 1$. Z toho plyne $a_e < a$. V tomto případě je skutečné zakřivení paprsku opačné než zakřivení země.
3. Spoj s pozitivním ohybem, kdy $dn/dh < 0$ má $K > 1$. Z toho plyne $a_e > a$. V tomto případě je skutečné zakřivení paprsku stejné jako zakřivení země.

Na základě řady měření byl stanoven gradient indexu lomu $dn/dh = -1 / (4a)$. Po dosazení je možné vypočítat $K = 4/3$. Oblasti kde $K = 4/3$ se nazývají standardní a atmosféra má zde standardní tlak. Stejně tak efektivní poloměr země $a_e = (4/3)a$ se nazývá standardní efektivní poloměr.



Obrázek 23 Rozdělení ohybu paprsků podle faktoru K

4.3.4 Význam faktoru K při návrhu mikrovlnného spoje

I když při návrhu mikrovlnného spoje se hodně hledí na ekonomické parametry, musí vzhledem k průchodnosti trasy výška antény splňovat i následující požadavky. Pokud nelze tyto požadavky splnit je nutno změnit výšku antény, nebo zvolte jinou trasu pro spojení.

- 1) Pro činitel odrazu $R \leq 0,5$ tj. prostředí s malými zemními odrazy jako hory, lesy, osídlení, kdy interference není velká, má být anténa umístěna tak, aby pro $K = 2/3$ bylo

$h_c > 0,3 b_1$	(pro obecné překážky)
$h_c > 0$	(pro ostré překážky)

V těchto případech útlum trasy nepřekračuje 8 dB

- 2) Pro činitel odrazu $R > 0,7$ tj. prostředí s větším zemním odrazem jako vodní plochy a roviny, které zapříčiní větší interferenční útlum má být anténa umístěna tak, aby pro $K = 2/3$ bylo

$h_c > 0,3 b_1$	(pro obecné překážky)
$h_c > 0$	(pro ostré překážky)

 pro $K = 4/3$ bylo

$h_c \approx b_1$

 pro $K = \infty$ bylo

$h_c \leq 1,35 b_1$

 (pro $h_c > 1,41 b_1$ lze očekávat velký interferenční útlum).

4.4 ÚNIK ZPŮSOBENÝ NĚKTERÝMI ATMOSFÉRICKÝMI A ZEMNÍMI VLIVY

Mikrovlnné spojení musí být budováno v přímé viditelnosti, kdy intenzita přímého paprsku značně převyšuje paprsky odražené od země i navracené z jiných směrů. Prostředí šíření v přímé viditelnosti se nachází v malých nadzemních výškách se zemí jako překážkou v šíření. Prostředí se mění nejen s časem (roční období, noc a den), s počasím (děšť, mlha sněžení, námraza), s atmosférickou teplotou a tlakem, s indexem lomu, ale také s místem odrazu na zemi. To vše způsobuje změny intenzity pole v přijímací anténě. Této vlastnosti se říká únik přenosu. Jako všechny jiné atmosférické jevy je i únik záležitost náhodná a lze ji postihnout pouze statisticky.

4.4.1 Typy úniku

Rychlý a pomalý únik

Na základě doby trvání úniku můžeme rozeznávat rychlý a pomalý únik. Dlouho trvající únik se nazývá pomalý únik a trvá od několika minut do několika hodin. Krátce trvající únik se nazývá rychlý únik a trvá od několika vteřin do několika minut. Pomalý únik se pomalu mění. Pomalu narůstá a pomalu zaniká. Je vždy způsoben kolísáním refrakce atmosféry na velké ploše. Vzhledem k velikosti plochy (soutěžitelné s délkou spoje) jsou změny indexu lomu, jeho nárůst i pokles, relativně pomalé.

Rychlý únik je hlavně zapříčiněn mnohocestným šířením, kdy do bodu příjmu přichází vlna po různých drahách s různým časovým zpožděním. Turbulence v atmosféře způsobí změny dráhy jednotlivých paprsků a tak po jejich sečtení se vytváří rychlé kolísání intenzity přijímaného signálu. Rychlé úniky mají kmitočtově selektivní charakter.

Zeslabení a zesílení přenosu

Únik lze také klasifikovat podle síly pole vytvořené v místě příjmu. Pokud je přijímaná hladina vyšší než daná hladina pro volný prostor nazývá se tento případ zesílený přenos (upward fading). Naopak, pokud v místě příjmu je intenzita pole nižší, než odpovídá volnému prostoru. Tento stav se označuje, jako snížený přenos (downward fading)

Blikající únik a mnohocestný únik

Při výpočtu se blikající únik a mnohocestný únik zahrnují do úniků fyzikálně závislých. Blikající únik zapříčiňují hlavně rychlé turbulence atmosféry, které rychle mění rozptyl paprsků každý rozptýlený paprsek má malou amplitudu a fázi má závislou na stavu atmosféry. Výsledná složená intenzita se sice mění, ale dost málo a tak tento typ úniku podstatně neovlivňuje hlavní paprsek. Tento únik málokdy ohrozí spolehlivost přenosu mikrovlnného spoje.

Mnohocestný únik, jak název napovídá, je způsoben šířením paprsků po různých drahách před jejich sloučením v přijímacím bodě. Hlavně tento únik působí hluboký poklesu signálu a vzácně i totální výpadek celého mikrovlnného spoje.

Jak v analogových tak v digitálních mikrovlnných spojích se mnohocestný únik opravdu vyskytuje a spoj ovlivňuje. Nutno podotknout, že digitální spoj oproti spoji analogovému je na tento únik více citlivý.

Mnohocestné šíření je druh šíření kdy paprsky, které opustily vysílací anténu, přichází do antény přijímací po různých cestách. Od antény vysílací kromě přímé vlny přichází i vlny druhotné, odražené. Na přijímací straně dochází k jejich vektorovému sčítání. Druhotných vln může být nekonečně mnoho, protože v cestě každého paprsku může docházet odrazům, difrakcím či průchodům překážkou. Také v troposféře vlivem nehomogenit může docházet k ohybu, či rozptylu vln. Rozložení překážek a nehomogenit může být stálé, ale také se může velmi rychle náhodně měnit. Výsledné pole v přijímacím bodě se také velmi rychle a náhodně mění. Protože u použitých kmitočtů je délka vlny malá je změna fáze $2\pi/\lambda$ velmi rychlá a zapříčiňuje velké změny výsledné intenzity. V mikrovlnném pásmu má tedy mnohocestný únik podstatný vliv na spolehlivost spoje.

4.4.2 Vliv troposféry na šíření elektromagnetických vln

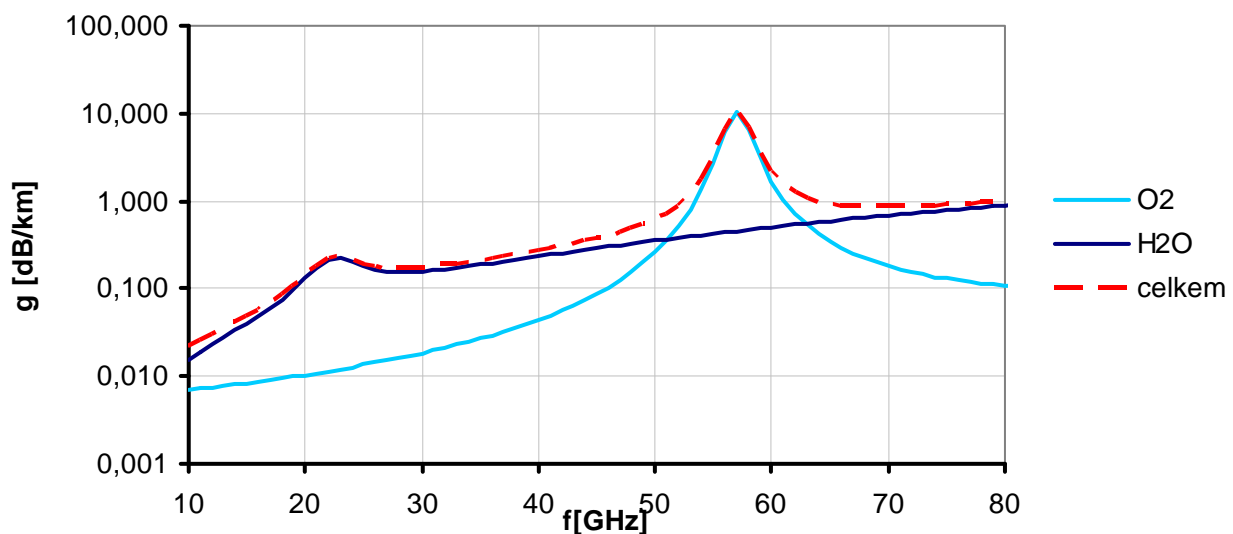
Od země směrem vzhůru se atmosféra dělí do 6 vrstev. V pořadí od země je to: troposféra, stratosféra, mezosféra, termosféra, ionosféra a exosféra. Troposféra je v atmosféře nejnižší a rozkládá se od země do výše 10 km. Mikrovlnné spoje pracují hlavně v této vrstvě. Troposféra obsahuje $\frac{3}{4}$ hmoty celé atmosféry.

Jestliže na zem svítí slunce, povrch země se ohřívá a jeho teplota vzrůstá. Teplo se přenáší do atmosféry. Atmosféra u země se začíná ohřívát, mění se její hustota, vznikají turbulence a tvoří se stoupavé proudy. Vrstva atmosféry, kde se to vše děje, se nazývá troposféra. V dalších odstavcích je rozebrán vliv troposféry na šíření elektromagnetických vln.

Absorpční ztráty

Molekuly každé hmoty se skládají z nabitých částic. Tyto částice mají určitou stabilní frekvenci elektromagnetické rezonance. Jestliže vyslaný mikrovlnný kmitočet je blízko jejich rezonanční frekvenci, molekuly jej začnou absorbovat a tak způsobují útlum šířících se elektromagnetických vln. Na kmitočtech do 350 GHz je pouze několik absorpčních kmitočtů. Jsou to zejména absorpční kmitočty molekul vodních par a molekul kyslíku. Maximum absorpce vodních par nastává pro $\lambda = 1,3$ cm tj. $f = 22,2$ GHz a pro molekuly kyslíku pro $\lambda = 0,57$ cm tj. $f = 57$ GHz.

Následující graf (obrázek 24) ukazuje závislost absorpčních ztrát vztažených k 1 km v závislosti na použitém kmitočtu.



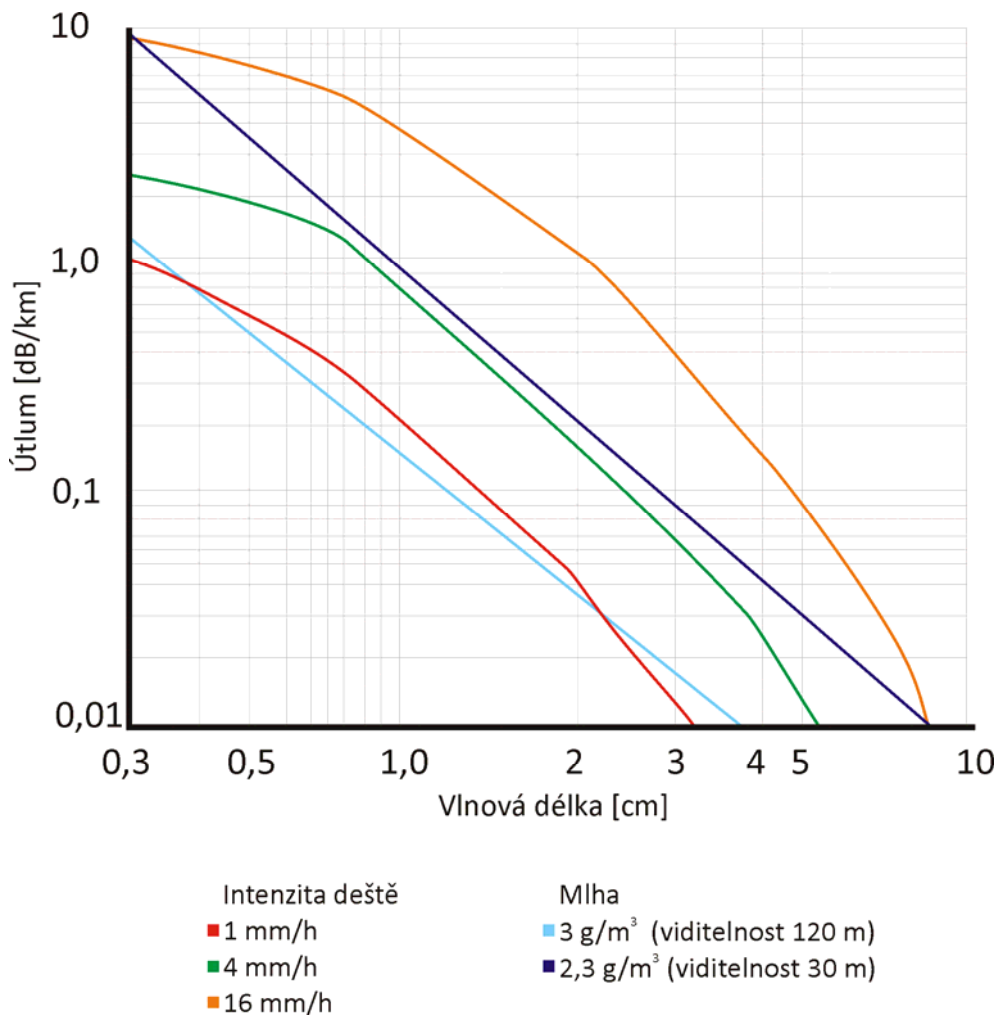
Obrázek 24 Absorpční ztráty

Z obrázku je patrné, že pro mikrovlnný kmitočet $f = 12$ GHz tj. $\lambda = 2,5$ cm jsou absorpční ztráty okolo 0,02 dB/km. V mikrovlnném spoji pracujícím na vzdálenost 50 km je přídatný útlum 1,0 dB. Tedy pro kmitočty pod 12 GHz, lze oproti útlumu volného prostoru absorpční ztráty zcela zanedbat.

Rozptylové ztráty způsobené meteorologickými srážkami

Děšť, mlha a sníh mohou pohlcovat energii magnetoelektrických vln, pokud jejich délka λ je pod 5 cm tj. kmitočet nad 6 GHz. Pro délku vlny $\lambda > 5$ cm absorpci lze zanedbat. Ani pro kmitočty do 10 GHz nepředstavuje děšť a mlha vážný problém, protože rozptylové ztráty mezi dvěma stanicemi jsou jen několik dB. Pro kmitočty nad 10 GHz však tyto ztráty již podstatně omezují vzdálenost mezi stanicemi. Jak je patrné z předchozího grafu

(obrázek 24) vzdálenost nemůže být moc velká. Někdy se v atmosféře vyvinou jen lehké opary a mženi. Tyto atmosférické nehomogenity mohou také způsobit absorpci, rozptyl, lom a odrazy elektromagnetických vln. Největší vliv má zde hlavně lom



Obrázek 25 Vliv intenzity deště na útlum pro různé vlnové délky

Útlum typu K

Útlum typu K je interferenční útlum způsobený mnohocestným přenosem. Tento útlum vzniká vzájemnou interferencí přímé vlny a vlny odražené od země (nebo za určitých podmínek vlny zalomené v atmosféře) vlivem změn fáze vln přicházejících do přijímacího bodu. Interference vzniká při postupující poruše. V troposféře postupující porucha se mění podle faktoru K. Tento typ úniku je proto nazýván útlumem K. Tento útlum je velmi vážný problém pokud mikrovlnný spoj přetíná řeku, jezero, či jiný hladký povrch. V případě, že vlna přímá i odražená mají srovnatelnou amplitudu, ale opačnou fázi, dochází v přijímacím bodě k jejich odečtení. Únik je velmi hluboký. Za takové situace stačí malá změna dráhového rozdílu (srovnatelná s délkou vlny λ) k velké změně hodnot útlumu. Vzhledem ke spolehlivosti spoje je lépe se přetínání řeky, jezera či hladkého povrchu vyhnout. Pokud to není možné použít techniku vysoké a nízké antény, která posune odrazný bod blíže k jedné anténě a tak omezí dopad odražených paprsků do antény. Někdy je vhodné i vytvoření zálohovacího spoje tzv. diverzní příjem. Dvě dostatečně vzdálené antény přijímají signál s různým průběhem úniku. Toho využije diverzní přijímač, který vybere méně zatlučený signál. Kromě prostorové diverzity příjmu, lze použít i frekvenční diverzity příjmu, protože jak bylo vysvětleno, únik ve mnohocestném příjmu se rychle mění i s malou změnou délky vlny.

Vlnovodový útlum

Při ohřívání povrchu sluncem ve dne, nebo naopak při jeho chladnutí v noci, nebo při vysoké atmosférickém tlaku vznikají nehomogenity, které vytvářejí gradient indexu lomu, který paprsky unikající do prostoru vrací zpět do přijímací antény. Za příznivých okolností je takto vytvářen jakýsi atmosférický vlnovod. Pro tyto případy je zaváděn i pojem vlnovodového útlumu. Je to ale stále případ šíření vícecestného se všemi přednostmi a komplikacemi, které z toho plynou.

4.4.3 Společní jmenovatelé útlumu

Totální únik se vyskytuje v různých částech světa a má některé společné vlastnosti:

- 1) V každém případě zapříčiní úplné zablokování spojovací trasy
- 2) Únik se uplatňuje v oblastech, kde jsou mělčiny, bažiny, zdroje teplé vody, zavodněné plochy hospodářské půdy, mělké zálivy, nebo v místech, kde je směrový spoj umístěn podél mořského břehu.
- 3) Počasí těsně před totálním únikem je teplé a vlhké. Do denních hodin se přenáší jeho působení jen při studené frontě.
- 4) Délka spojovacích tras je asi 32 až 48 km
- 5) Hluboká časová prodleva působí současně v obou směrech šíření. Různé typy selektivních i neselektivních úniků mohou měnit své vlastnosti v závislosti na reflektivitě terénu, zvlnění vodní hladiny, intenzitě deště, atmosférické turbulenci a kmitočtu přenášeného signálu, zatímco totální únik je obecně typu ano – ne (buď se vůbec neuplatňuje, nebo nastane totální zablokování cesty). Tento typ úniku je často zaměňován s difrakčním únikem způsobeným inverzním ohybem vln. Totální únik vznikající v superlomivé atmosféře způsobuje ohýbání paprsku směrem k zemi. Obvykle centimetrové vlny vyslané z vysílací antény nedosáhnou přijímací antény. Naproti tomu difrakční únik, jako produkt subdrazné atmosféry, způsobuje ohýbání paprsků směrem vzhůru. V případě difrakčního úniku však nedojde k úplnému zablokování cesty.

4.5 KMITOČTOVĚ ZÁVISLÝ ÚTLUM

4.5.1 Vícecestné šíření elektromagnetických vln

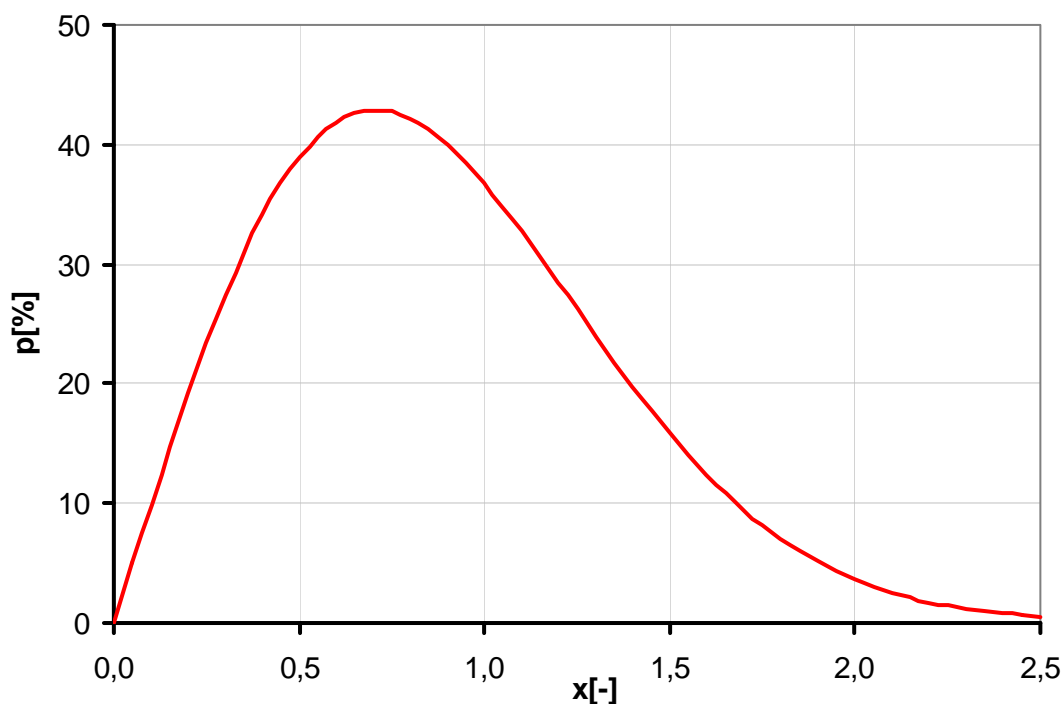
Základní vysvětlení

Z předcházejících kapitol je patrné, že přijímací anténa mikrovlnného spoje přijímá vedle paprsku přímého i paprsky další, odražené do přijímací antény od některého bodu jeho dráhy. Atmosférické vlivy způsobí náhodný ohyb paprsku a náhodný rozptyl, účinky zcela nezávislé na pevných odrazech od země. Tak přijímací anténa může přijímat elektromagnetické vlny z mnoha různých směrů a to je mnohocestné šíření vln.

Mnohocestné elektromagnetické vlny mají náhodnou amplitudu a náhodnou fázi. V přijímací anténě se setkávají a jejich hodnoty se vektorově sčítají a vytvářejí různé interference. Za podmínek mnohocestné interference vykazuje hladina přijímaného signálu vlastnosti mnohocestného šíření elektromagnetických vln, které je popisováno vícecestným útlumem. Příznivé okolnosti pro vznik podmínek mnohocestného atmosférického šíření nastávají v horkém, vlhkém létě. Výskyt je častější nad vodní plochou a nad rovinatými terény, než v horách a v terénu kopcovitém.

Analýza mnohocestného šíření

Mnohocestný útlum může být rozdělen na útlum amplitudový a útlum kmitočtově selektivní. Vliv amplitudového útlumu v digitálním mikrovlnném spoji je shodný s poklesem přijímané hladiny. Proto odpovídající úpravou hladiny přenosu lze tento mnohocestný útlum lehce vyrovnat. Amplitudový útlum se jeví jako součet konstantního vektoru síly pole a nespočítatelných změn náhodně závislého vektoru. Předpokládá se, že součet těchto vektorů má Rayleighovo statistické rozdělení.



Obrázek 26 Hustota pravděpodobnosti Rayleighova rozdělení

Vliv frekvenčně selektivního útlumu v digitálním mikrovlnném spoji je ekvivalentní snížení poměru signál-šum. To je omezení při zvětšení rozsahu útlumu pro zlepšení bitových chyb spoje. Výpočetní metody normálně používají dvou dráhový model, nebo zjednodušený model tří dráhový.

Mnohocestné šíření lze rozdělit do dvou základních typů:

- 1) Mnohocestný typ vytváří přímá vlna a vlna odražená
- 2) Mnohocestný typ tvoří také paprsek přicházející z dráhy, která je vytvořena atmosférickými vlivy

Normálně nastává nejčastěji první případ. Druhý případ není tak typický a nastává méně často. Pokud ale je odražený paprsek slabý a málo zřetelný vliv druhého typu roste a stává se hlavním faktorem ve mnohocestném šíření.

Pro frekvenčně selektivní vícecestný útlum je vytvářen model vzájemné interference elektrických vln v různých drahách. Tedy teoretický model pro výpočet by měl být založen na skládání více paprsků elektromagnetických vln. V každém případě při interference více než tří paprsků je snižování jakosti mikrovlnného spoje málo pravděpodobné. Proto také k rozboru kmitočtové selektivního interferenčního útlumu se používá vztah pouze pro dva paprsky.

4.5.2 Vliv frekvenčně selektivního útlumu na kvalitu přenosu v mikrovlnném spoji

Příčiny pásmových zkreslení

Pásmové zkreslení vyjadřuje jak je amplituda kmitočtové charakteristiky a charakteristika časového zpoždění mikrovlnného signálu (modulačního signálu) v pásmu lineární. Charakteristiky $A(f)$ a $T(f)$ se mění pro každé kmitočtové spektrum signálu v závislosti na kmitočtu. Tato změna se nazývá pásmovým zkreslením.

Pásmové zkreslení vyvolané kmitočtové selektivním únikem odpovídá šířce pásma přenášeného signálu, zatím co šířka pásma přenášeného signálu je určena přenosovou kapacitou spoje a typem modulace.

Potlačení křížové polarizace

Mikrovlnný signál, přenášený v určité polarizaci (horizontální / vertikální polarizace) je po přenosu kanálem vlivem přítomnosti atmosféry na přenos elektromagnetických vln zkreslen tak, že část energie se změní v ortogonální polarizaci k polarizaci původní (v našem případě polarizace vertikální). Pak v přijímači může docházet k interferenci těchto signálů. Křížovou polarizační interferencí se nazývá interference mezi dvěma kanály na stejné frekvenci, ale s ortogonální polarizací. Křížová polarizační interference se označuje XPI a je vytvářena v anténním systému i v jejím napáječi a to jak na vysílací tak na přijímací straně spoje. XPI ale existuje jako část rušení pozadí (šumu) a zůstává konstantní. Pro kmitočtová pásma pod 10 GHz, je XPI hlavně vytvářena mnohocestným šířením.

Potlačení křížové polarizace (XPD) se normálně vyjadřuje vztahem:

$$XPD = 10 \log \left(\frac{P}{P_x} \right)$$

kde je

- P je výkon signálu přijímaný na některém přijímacím kanálu a mající stejnou polarizaci jako vysílací strana.
- P_x je signál XPI přijímaný ve stejném kanále.

Jestliže je hodnota XPD velká, znamená to, že pokud se přenosem změní polarizace na polarizaci ortogonální, je její potlačení velké.

V kmitočtovém pásmu 4 GHz a 6 GHz by neměl být XPD pro anténu a napáječ větší než 40 dB. Mnohocestné šíření však může tuto hodnotu podstatně redukovat.

Snižování vlivu základního úniku zálohou na únik

Jestliže neuvažujeme frekvenčně selektivní únik, nebo spoj přenáší úzké pásmo signálů (a tedy frekvenčně selektivní únik lze zanedbat) protiúniková záloha na útlum je dána rozsahem plochého úniku.

Porovnejme podmínky šíření ve volném prostoru, když se zvyšuje tepelný šum. Uvažuje se pouze tepelný šum. Aby spoj za těchto podmínek pracoval, nesmí být překročena mez bitového chybovosti. Tedy musí být rezervována odpovídající hladina signálu. Na příklad. Za podmínek šíření ve volném prostoru má mikrovlnný spoj hladinu příjmu -35 dB, pro bitovou chybovost BER = 10⁻³ je nalezena hladina příjmu -80 dB. Pak rezerva na únik je 45 dB.

Když se uvažuje frekvenčně selektivní únik, tedy pro středně a vysokokapacitní mikrovlnné spoje, myšlenka rezervy na únik není moc užitečná. To proto, že šířka přenášeného pásma je poměrně velká. Čím širší je přenášené pásmo, tím větší je vliv kmitočtově selektivního úniku. Pak může nastat případ, kdy rezerva nebude stačit, protože aktuální rozsah bude menší než uvažovaný. To je proto, že pásmové zkreslení je dosti velké i když únik není moc hluboký a i když tepelný šum lze zanedbat. Bitová chybovost se může stále zvyšovat, a když překročí mez pro BER, mikrovlnný spoj se zhroutí.

Efektivní meze chybovosti jsou u mikrovlnných spojů vždy udávány. Je to mez, která musí být zachována, aby spoj mohl stále pracovat, kdy mez BER není překročena a kmitočtově selektivní únik je kompenzován na hranici šíření ve volném prostoru.

Pro vysoce a středně kapacitní digitální mikrovlnné spoje, kdy je přidána plochá rezerva na únik spoje, nemůže být přidána další efektivní rezerva úměrná k ploché rezervě. To jde pouze pomocí zvětšení ploché rezervy, jakou je třeba zvýšení přenášeného výkonu. Pak se vyžaduje vylepšení vlastností celého mikrovlnného spoje. Může se využít frekvenční diverzity, prostorové diverzity a techniky automatického výběru pro zlepšení vlastností spoje v podmínkách frekvenčně selektivního úniku

4.6 STATISTICKÉ ZÁVISLOSTI ÚNIKU

4.6.1 Model mikrovlnného úniku- Rayleighova distribuční funkce

Aby bylo možné porozumět spolehlivosti komunikačního spoje, je nutno porozumět rozdělení hloubky úniku a trvání úniku. Hloubka úniku představuje hladinu pro výpadek spojení a doba úniku pak čas, po který k přerušení dochází.

Fázová interference, ke které dochází při mnohocestném přenosu, je hlavní příčinou hlubokého útlumu mikrovlnného spoje. Model útlumu předpokládá součet mnoha náhodných vektorů s nezávislou fází. Pro rozbor charakteristiky útlumu v různých podmínkách jsou použity statistické metody. K popisu chování úniku se používá mnoho distribučních rozložení s analytickým vyjádřením. Nejpoužívanější je Rayleighovo rozložení. Ukazuje se, že absolutní hodnota součtu mnoha vektorů má právě toto obecné rozložení. Rayleighovo rozložení popisuje rychlý i hluboký únik.

Rayleighovo rozložení je pravděpodobná hodnota přijímané hladiny, při které dochází k úniku. Pokud se řídí charakteristika úniku Rayleighovým rozložením, je pravděpodobnost, že přijímaná hladina je nižší než jistá mez dána vzorcem

$$F(E) = 1 - \exp\left(\frac{-E^2}{2E_e^2}\right)$$

Ve vzorci je

E^2 je čtverec dříve definované efektivní hodnoty intenzity pole, ten odpovídá přijímanému výkonu a někdy to znamená přijímaný výkon vztažený k mezním podmínkám.

E_e^2 je efektivní odchylka od střední hodnoty intenzity pole, odpovídá průměru přijímaného výkonu

Pro malé E lze použít Taylorova rozvoje a při zanedbání vyšších členů aproximovat

$$F(E) = \frac{E^2}{2E_e^2}$$

Hustota pravděpodobnosti Rayleighovo rozložení je dána vzorcem

$$p(E) = \left(\frac{E}{2E_e^2}\right) \exp\left(\frac{-E^2}{2E_e^2}\right)$$

4.6.2 Výpočet pravděpodobnosti útlumu podle Rayleighova rozložení

Použití Rayleighova distribučního vzorce pro útlum v mikrovlnných spojích bere v úvahu podmínky šíření elektromagnetických vln. Pravděpodobnost útlumu je

$$P_R = \frac{KQf^B d^C W}{W_0}$$

kde je

- P_R Rayleighova pravděpodobnost úniku, není větší než pravděpodobnost přijímaného výkonu když únik existuje
- K konstanta zahrnující vliv okolí
- Q konstanta zahrnující zeměpisné podmínky
- f pracovní kmitočet [GHz]
- B, C konstanta zahrnující vlivy počasí a vliv ročního období
- d vzdálenost spoje [km]
- W přijímaný výkon když není únik
- W_0 přijímaný výkon když únik existuje.

V reálných výpočtech již většinou známe hloubku úniku F [dB] a pravděpodobnost výskytu této hloubky stanovit z upraveného vzorce

$$P_R = KQf^B d^C 10^{\left(\frac{-F}{10}\right)}$$

Pokud při výpočtu hodnota P_R mikrovlnného spoje souhlasí s hodnotou BER daného mikrovlnného kanálu, spoj je v pořádku.

5. TECHNIKA ANTI-FADING V MIKROVLNNÝCH ZAŘÍZENÍCH

5.1 PŘEHLED

Mnohocestný únik může způsobit rušení v přenosovém kanálu, které se bude měnit s okolím a časem. Proto musí být provedeno nějaké vyhodnocení.

Pokud se jedná o pomalý únik je běžně využívána technika automatického řízení zisku mezifrekvenčního zesilovače v přijímači, nebo metoda přepínání kanálů.

Pokud se jedná o kmitočtově selektivní útlum, používá se technika diverzního příjmu, nebo technika adaptivního vyrovnání. Pro použití ve frekvenčně selektivním anti-fadingu se používají 3 postupy, které budou dále vysvětleny. Tyto anti-fadingové techniky potlačují amplitudový rozptyl a časový rozptyl způsobený v různých částech prostoru, kmitočtu a čase. Při kombinaci těchto technik lze dosáhnout zlepšení celkového antifadingového efektu.

5.1.1 Důvod použití antifadingových prostředků

1. V porovnání s drátovými spoji, číslicové mikrovlnné systémy mají následující problémy:
 - Snížení přijímaného výkonu při mnohohráhovém úniku
 - Degradace tvaru impulsů způsobená zkreslením tvaru vln

V návrhu mikrovlnných spojů se musí použít odpovídající antifadingové prostředky, aby splnily obecné chybové parametry systému, jako je třeba hodnota BES.

2. ITU-T určuje parametry chybovost spoje pro vzdálenost koncových stanic 27 000 km. Lze také použít ITU-R a má obdobné závěry. Pro dodržení parametrů chybovosti, musí být v mikrovlnných systémech použít antifadingové prostředky pro zlepšení vlastností celého systému. Během návrhu zařízení všechny druhy antifadingových prvků jsou důležitou částí systému. Čím přísnější jsou požadavky na chybovost, tím dokonalejší antifadingové prostředky musí být.
3. Dalším důvodem pro užití antifadingových prostředků je rozšíření použití mikrovlnných spojů do míst kde jsou zhoršené podmínky šíření. Např. odpovídající diverzní přijímač a efektivní ekvalizér může překonat obtíže spojů na velké vzdálenosti přes moře. V těchto případech je mikrovlnný spoj, jediná možnost přenosu podle požadavků.
Každé použití antifadingových prostředků vyžaduje vyšší náklady. Při výběru antifadingových prostředků musí být uvážena jak cena tak provedení.

5.1.2 Klasifikace antifadingových prostředků

Antifadingové prostředky mohou být klasifikovány na základě 2 hledisek

Fyzikální hledisko

Tabulka 1 a tabulka 2 ukazuje klasifikaci antifadingových prostředků, podle fyzikálního hlediska. Kategorie A je pro zařízení, kategorie B pro systém.

Antifadingové prostředky (tabulka 1 a tabulka 2) jsou použity pro kompenzaci v případě 1 nebo 2 cest šíření.

Kategorie A - pro zařízení		
Kmitočtový ekvalizér		
Adaptivní ekvalizace	Časový ekvalizér	Lineární ekvalizace
Potlačení interference	XPIC	Zpětná ekvalizace
ATPC	IC jiného postupu	
FEC		

Tabulka 1 Fyzikální hledisko pro zařízení

Kategorie B - pro systém	
Prostorová diverzita	Dvě cesty
Úhlová diverzita	Tři / čtyři cesty
Kmitočtová diverzita	Ve stejném kmitočtovém pásmu
Přenos více nosných	Křížové spojení (pro velmi nepříznivé podmínky)

Tabulka 2 Fyzikální hledisko pro systém

Klasifikace	Ovlivňuje	
Antifading pro přístroje	Adaptivní ekvalizér	Zkreslení tvaru impulsu
	Potlačení interference	Zkreslení tvaru impulsu
	ATPC	Omezení vysílaného výkonu
	FEC	Omezení vysílaného výkonu
Antifading pro systém	Prostorová diverzita	Zkreslení tvaru impulsu
	Úhlová diverzita	a
	Kmitočtová diverzita	omezení vysílaného výkonu
	Více nosných	Zkreslení tvaru impulsu

Tabulka 3 Funkční hledisko

Tabulka 3 ukazuje klasifikaci založenou na hledisku funkce

Hledisko funkce

Mnohocestný útlum má za následek snížení přijímaného výkonu a zkreslení přijímaného signálu. Spektra v kmitočtovém pásmu jsou plně nebo částečně omezena. Podle toho, který druh úniku nastává. Celkový únik může úměrně zhoršovat poměr signál – šum (C/N) a C/I. Selektivní únik je případ dominantní v širokopásmových mikrovlnných spojích

5.1.3 Vývoj antifadingových prostředků

Činitel zlepšení antifadingového prostředku je definován jako poměr

$$I = \frac{P}{P'}$$

kde je

- P pravděpodobnost výpadku spoje na dané hloubce útlumu, když se antifadingové prostředky nepoužívají
- P' pravděpodobnost výpadku spoje na dané hloubce útlumu když se antifadingové prostředky používají

Hodnota I odpovídá stupni degradace provedení. Každý antifadingový prostředek má svůj faktor zlepšení. Ale zlepšení pro dva různé antifadingové prostředky neznámá násobení jejich faktorů zlepšení. Např. při současném použití adaptivního ekvalizéru a prostorové diverzity nastane s určitým zlepšení přenosu. Výsledný činitel je ale větší než prostý součin činitele zlepšení ekvalizéru a činitele zlepšení prostorové diverzity.

5.2 ADAPTIVNÍ EKVALIZER

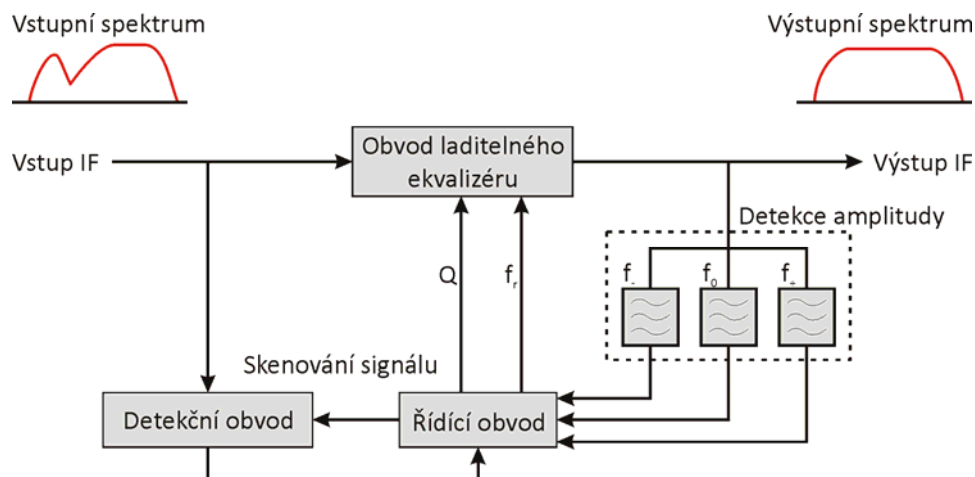
V číslicových mikrovlnných spojích se pro opravy zkreslení signálu, které je způsobeno mnohocestným útlumem často používá adaptivního ekvalizéru. Adaptivní ekvalizér tak zmenšuje i dobu výpadku spoje. Adaptivní ekvalizér je založen na různých pracovních kmitočtech a různém místě. Používají se 2 typy:

- Adaptivní ekvalizér s kmitočtovou oblastí (AFE), který řídí přenos kanálu na mezifrekvenčním kmitočtu.
- Adaptivní ekvalizér s časovou oblastí (ATE) jež používá časovou oblast k přímému omezení interference mezi symboly (ISI). Tato interference je způsobena špatnou funkcí přenosu. V porovnání k AFE, je ATE silnější. Některé mikrovlnné spoje SDH proto používají ATE spíše než AFE. Ovšem hodně mikrovlnných spojů používá jak AFE tak ATE. Jejich kombinací se zvyšuje celkový činitel zlepšení.

5.2.1 AFE

Kmitočtový ekvalizér používá kmitočtovou charakteristiku nějakého nastavitelného obvodu, aby vykompenzoval zkreslení amplitudy a fáze frekvenčních charakteristik skutečného přenosu. Běžně používaný je mezifrekvenční adaptivní ekvalizér odvozený z pásmového ekvalizéru. Mezifrekvenční adaptivní ekvalizér (IF-EQL) se skládá z korekčního obvodu (ekvalizační zapojení), detektoru ekvalizační charakteristiky a řídicího členu.

IF-EQL je zařazen do mf laditelných ekvalizérů a mf adaptivních ekvalizérů sklonu frekvenční charakteristiky



Obrázek 27 Mf laditelný adaptivní ekvalizér

Ekvalizér sklonu charakteristiky v kmitočtové oblasti

V případě mnohocestného úniku se používá ekvalizér sklonu charakteristiky v kmitočtové oblasti ke kompenzování kmitočtové nesymetrie ve frekvenční charakteristice mikrovlnného kanálu. Ekvalizér je zde nástroj k řízení sklonu amplitudy a tak obnovuje intenzitu výkonového spektra přijímaných signálů.

Použití několika úzkopásmových filtrů ke zjištění výstupního výkonového spektra na třech místech je základ práce ekvalizéru sklonu charakteristiky v kmitočtové oblasti. V závislosti na směru sklonu charakteristiky je generován signál opačného směru a smíchán s původním signálem. Tak může být upravena amplituda kmitočtové charakteristiky, aby byla zcela plochá.

Během zjišťování spektra, nelze získat informace o změně skupinového zpoždění. Tedy možnosti zlepšení ekvalizérem jsou omezené.

Ekvalizér poklesu v kmitočtové oblasti

Přenosová funkce by měla být blízko reciproční funkci charakteristiky kanálů, která vyhovuje modelu šíření dvou paprsků. Touto cestou lze obdržet ze skutečné přenosové charakteristiky plochou amplitudu frekvenční charakteristiky.

Princip činnosti ekvalizér poklesu v kmitočtové doméně je tento: Je použita rezonance filtrů k řízení gradientu a střední frekvence pro nalezení údolí úniku. Tato vlastnost zapojení vždy vykazuje konkávní charakteristiku skupinového zpoždění. Tedy jestliže má kanál minimální fázový únik, je sníženo zkreslení signálu. Jestliže nemá kanál minimální fázový únik, zkreslení skupinového zpoždění bude dvojnásobné. V tomto případě systém charakteristik křivek minimálního fázového úniku může být snížen, ale křivka charakteristiky neminimálního fázového úniku se nezlepší.

Řídící signál vícekmitočtového doménového ekvalizéru (obrázek 27) je získán ze spektra signálu pomocí tří pásmových filtrů. Proto musí být použito mnoho součástí a tedy přesnost řízení je špatná. Běžně je řídicí signál v daném ekvalizér poklesu v kmitočtové oblasti získáván z basebandových signálů. Tedy časová oblast řídí ekvalizér ve frekvenční oblasti.

ATE

ATE je používáno v časové oblasti pro přímé snížení interference mezi symboly (ISI), které je způsobeno zkreslením amplitudy a skupinového zpoždění. Následující formule popisující diskretizovaný vztah vstup / výstup obecné odezvy kanálu, názorně uvádí základní princip AET:

$$X_k(\tau) = \sum h_i(\tau) a_{k-i} + n_k$$

ve vzorci znamená

$x_k(\tau) = x(kT + \tau)$ složku přijímaného signálu v čase vzorkování $kT + \tau$

a_k symbol v přenášených dat v čase kT

n_k vzorkovací hodnota přídavného bílého Gaussova šumu (AWGN)

$h_i(\tau)$, $i = -\infty \dots +\infty$ vzorkovací hodnota odezvy na obecný puls v kanálu

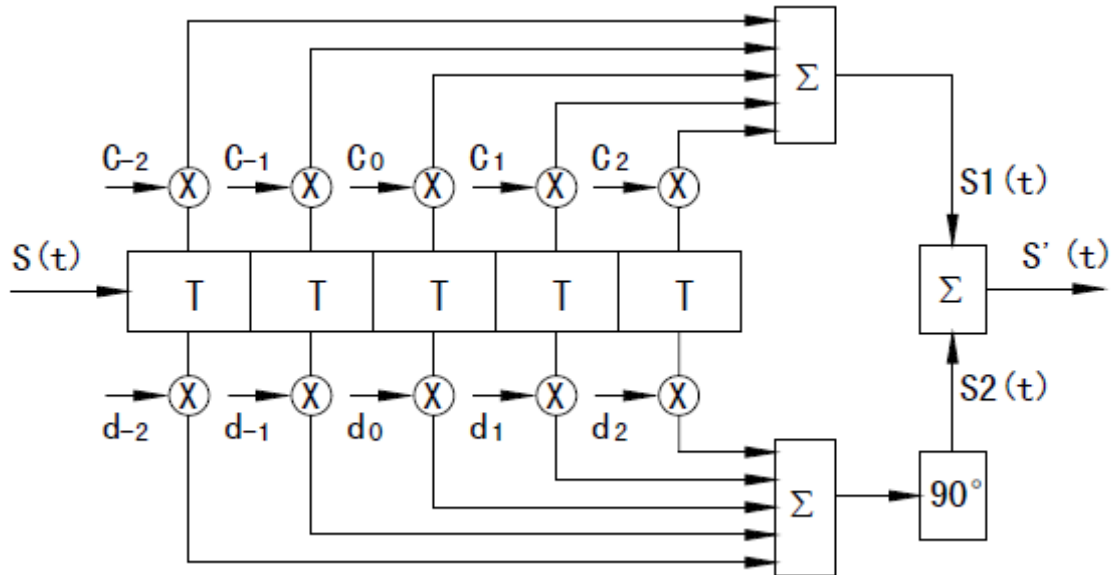
ve vzorkovacím čase τ

Uvedený vztah zachycuje dva důvody snížení kvality přenášených symbolů:

přídavný bílý šum a interference předcházejících a následujících symbolů. Pouze, když impulsní odezva $h(\tau)$ vyhovuje Nyquistovu zákonu, nenastává interference symbolů. V praxi ačkoliv jsou přijímací i vysílací filtry navrženy tak, aby byly Nyquistovými filtry, variace času ve mnohocestném šíření vlastního mikrovlnného kanálu poškodí tuto charakteristiku a tak způsobí interferenci mezi symboly. K jejímu snížení se přidává na výstup přijímače adaptivní ekvalizér.

V mikrovlnném zařízení s modulací QAM, jsou přenášeny odlišné informace pomocí nosných s ortogonálními fázemi. Tedy zkreslení způsobené šířením v kanálu může interferovat ve vzájemných ortogonálních nosných. Pro odstranění této interference se mezi ortogonální nosné vkládá ekvalizér v časové oblasti.

Obrázek 28 ukazuje princip mf adaptivního přenosového ekvalizéru.



Obrázek 28 princip mf adaptivního přenosového ekvalizéru¹

ATE může vyrovnat neminimální fázový únik, kde odražená vlna je silnější než vlna přímá. Ve skutečných zařízeních se používá jak AFE tak ATE

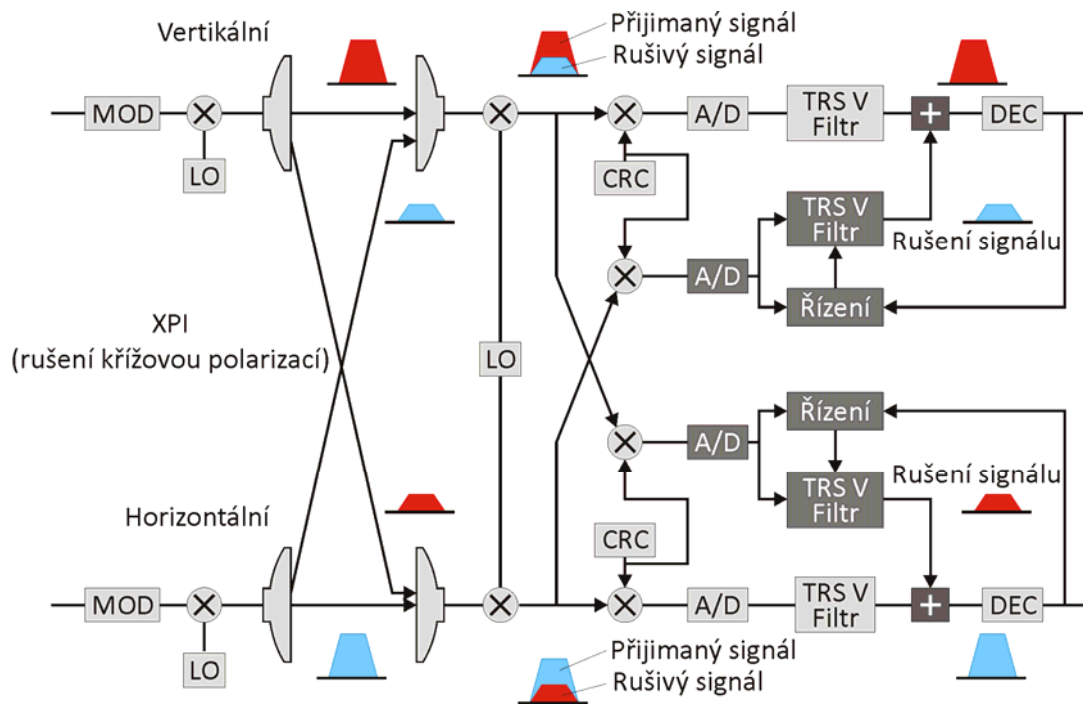
5.3 OPATŘENÍ PROTI RUŠENÍ KŘÍŽOVOU POLARIZACÍ (XPIC)

V běžných systémech mikrovlnného přenosu se používají dvě polarizované vlny používané v různých prokládacích módech. Interference mezi dvěma polarizačními vlnami je malá. V mikrovlnném přenosu v SDH ke zlepšení využití spektra se využívá regenerace mezikanálové křížové polarizace.

V bočních cestách šíření, v případě mnohocestného útlumu, nebo v případě diverze v nehomogenních přízemní vrstvě, v mlze či v dešti signály z křížové modulace mohou v mnoha případech ovlivnit signály shodné polarizace. Proto byla vyvinuta technika kompenzace mezivlnové interference křížově polarizovaných signálů.

Vyrovnač ortogonálně polarizované interference (OPIC) může být zapojen v oborech v rádiovém kmitočtu, v mezifrekvenčním kmitočtu i v basebandovém kmitočtu. Nejběžnější je použití v posledních dvou kmitočtových pásmech. Při použití XPIC je zlepšení XPI okolo 20 dB Obrázek 29 schematicky znázorňuje způsob fungování XPIC.

¹ V obrázku je zpoždovací linka se zpožděním 1 bit

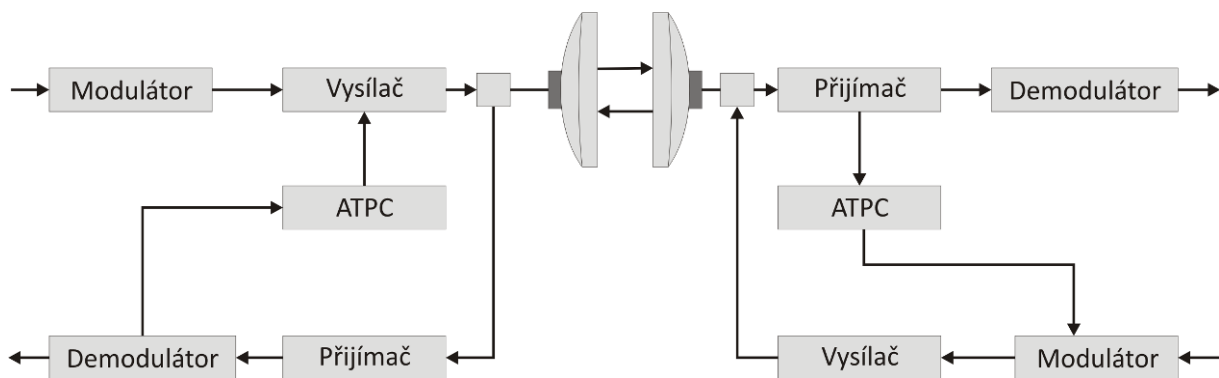


Obrázek 29 Princip XPIC

5.4 AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ PŘENÁŠENÉHO VÝKONU (ATPC)

Klíčovou technikou v oblasti digitálních mikrovlnných spojů je ATPC. ATPC pomáhá snižovat výstupní výkon na minimální hodnoty v případě, kdy spoj pracuje v normálních podmínkách. Když se hladina přijímaného signálu ve vzdálené stanici snižuje, pomocí zpětného servisního kanálu se to oznámí vysílací straně. Zásahem do zpětné vazby vysílače se zvyšuje vysílaný výkon až do P_{max} .

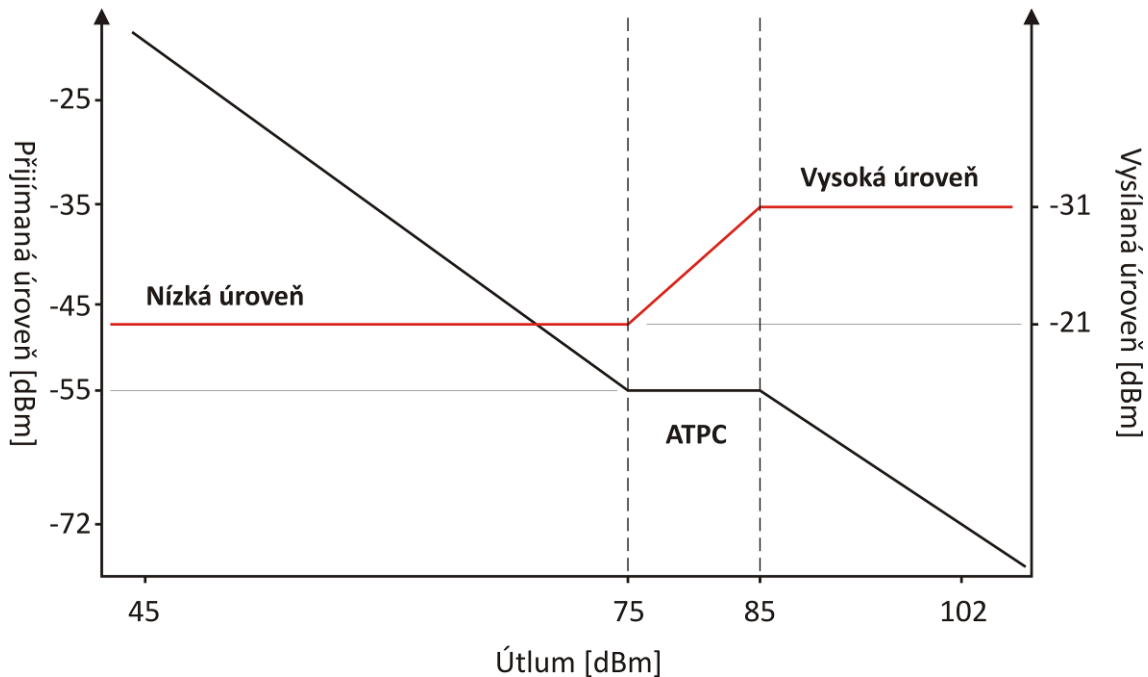
Činnost ATPC: Výstupní výkon mikrovlnného vysílače automaticky sleduje hladinu přijímaného signálu v přijímací straně spoje a podle tohoto signálu se pomocí ATPC automaticky mění. Při normálních podmínkách šíření je výstupní výkon vysílače ustálen na hladině o 10 ÷ 15 dB nižší oproti běžnému výkonu. Jestliže se hladina přijímaného signálu sníží pod nastavenou mez, nebo přijímač detekuje únik v šíření, ATPC pomocí bytu RFCOH zvýší vysílaný výkon tak, aby přijímaná hladina byla nad stanovenou mezí. Obvykle je čas takového úniku krátký. Asi kolem 1% vysílacího času. Znamená to, že při použití ATPC vysílač po většinu vysílacího času (99%) vysílá s výkonem o 10 ÷ 15 dB nižším.



Obrázek 30 Princip ATPC

Podle provedení změny vysílacího výkonu lze ATPC rozdělit do dvou skupin: Skokový ATPC a progresivní ATPC. Skokový ATPC používá nízkou a vysokou hladinu výkonu. Pokud při provozu spoje se v přijímači sníží hladina pod mez stanovenou v ATPC, je vysílač přepnut ihned na vyšší výkon. Když se později přijímací hladina zvýší, je vysílač přepnut na hladinu nižší. V progresivním ATPC tato skoková změna mezi dvěma výkony vysílače není. Zde se v určitém rozsahu výkon vysílače mění úměrně k hladině přijímaného signálu viz obrázek 30.

Pro vyrovnání změn úniku by měl systém ATPC pracovat s rychlostí okolo 100 dB/s. A dále by nemělo docházet během činnosti ATPC k chybování spoje.



Obrázek 31 ATPC

Výhody použití ATPC.

- Je omezena doba výpadku spoje při hlubokém úniku. Ve středním pásmu chybovosti (pro BER $<10^{-9}$; 10^{-6}) je v mikrovlnném spoji zvyšován zisk a tedy se zlepšují vlastnosti BER.
- Snižuje se napájení celé stanice. Výkonové stupně stanice vysílají s nižším výkonem, a proto potřebují nižší proud ze stejnosměrného napájení. Pokles může být až 50%. Takový pokles snižuje i jejich teplotu a ve svém důsledku zvyšuje i spolehlivost součástek. Střední doba bezporuchového provozu součástek (MTBF) je na teplotě závislá exponenciálně.
- Je odstraněn problém s činností přijímače při zesílení (upward) v úniku.
- Je redukováno rušení sousedních kanálů (ACI)
- Snížení vysílacího výkonu snižuje rušení okolních spojů v místech s více spoji a tak se zlepšuje kmitočtová koordinace v pásu.

Všechna tato zlepšení jsou velmi důležitá pro nové generace mikrovlnných systémů SDH.

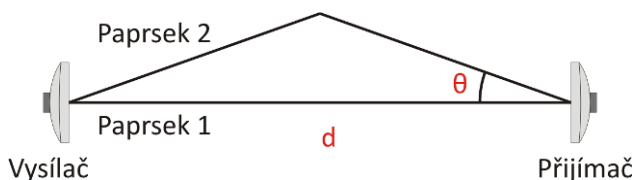
5.5 DIVERZNÍ PŘÍJEM

Diverzní příjem znamená, že výsledný přijímaný signál se získává výběrem signálu a kombinací dvou i více nezávislých zdrojů signálu, které musí být modulovány stejným informačním signálem, ale mají v daném okamžiku rozdílné charakteristiky úniku. Diverzní příjem se využívá pro snížení vlivu úniků.

5.5.1 Klasifikace diverzního příjmu

Diverzní příjem lze rozdělit do následujících skupin:

- 1) **Prostorová diverzita (SD).** Využívá ke snížení vlivu úniku simultánní přenos do dvou a více antén. Ideálně jsou antény od sebe vzdáleny o jednu a více vlnových délek. Protože antény jsou fyzicky odděleny, je korelace současného výskytu úniku malá. Počet antén je stanovuje také stupeň diverzity. Prostorová diverzita efektivně řeší problém úniku vyvolaný interferencí mezi přímým paprskem a paprskem odraženým. Protože k provozu nepotřebuje další kmitočty, prostorová diverzita nemění obsazení kmitočtového pásma. Je ale náročná na vybavení. K provozu je nutná další anténní souprava tj. anténa i její napáječ a přijímač umožňující výběr.
- 2) **Frekvenční diverzita (FD)** využívá přenos jednoho informačního signálu simultánní vysílání a přijímání na dvou různých kmitočtech. Využívá malé pravděpodobnosti současného výskytu útlumu na dvou různých kmitočtech. Hlavním důvodem výpadku spojení nebývá snížení intenzity signálu, ale vznik interferenčního útlumu, který je kmitočtově závislý. Frekvenční diverzita zlepšuje přenos v digitálním mikrovlnném spoji mnohem více než ve spoji analogovém. Pravděpodobnost současného výskytu úniku na dvou kmitočtech se snižuje při zvětšování jejich odstupů. Takto se dosahuje s frekvenční diverzitou velkého činitele zlepšení. Zlepšení je patrné, i když kmitočtové odstup jsou 2% pracovního kmitočtu. Využití kmitočtového pásma je ale malé a k provozu je nutná další anténní souprava tj. anténa včetně jejího napáječe.
- 3) **Polarizační diverzita (PD)** využívá přenos jednoho informačního signálu ortogonálně polarizovaných vln jednoho kmitočtu. Různá polarizace vykazuje různé vlastnosti při šíření. V porovnání s ostatními skupinami diverzity má polarizační diverzita nejmenší efekt a její praktické použití bývá malé.
- 4) **Úhlová diverzita (AD)** je založena na skutečnosti, že v troposférickém šíření jsou vlny rozptylovány v lehce odlišných úhlech. To závisí na dráze rozptýleného paprsku. Metoda využívá dvou nezávislých antén, které mají různé elevační úhly. Může ale být využita i anténa jedna s dvěma nezávislými ozařovači. Celkové zapojení znázorňuje obrázek 32. Hlavní anténa přijímá přímý paprsek, diverzní anténa pak odražený paprsek sekundární



Obrázek 32 Úhlová diverzita

Prostorová diverzita s úhlovou diverzitou mají mnohem větší efekt zlepšení než prostorová diverzita bez diverzity úhlové a to obzvláště v případech, kdy pro velkou přímou vzdálenost mezi anténami nemůže být zaručena cesta se silným odrazem od země. Nyní je k dispozici již velký počet testovacích výsledků úhlové diverzity. Tyto výsledky ukazují, že vlastnosti úhlové diverzity a prostorové diverzity jsou shodné pokud vlastnosti digitálního mikrovlnného spoje závisí na amplitudové disperzi. Pokud vlastnosti spoje závisí na efektu termálního šumu, je prostorová diverzita lepší.

5.5.2 Popis prostorové diverzity

Nejvíce rozšířené je použití prostorové diverzity a kmitočtové diverzity. V současnosti při velkém zaplnění kmitočtových kanálů se ale od kmitočtové diverzity upouští. Kmitočtová diverzita má dobré výsledky hlavně při větším odstupů použitých kmitočtů. Nevýhodou je nutnost obsadit další kmitočtového pásma. Proto je dále popsána pouze prostorová diverzita.

Prostorová diverzita vyžaduje několik antén na stejném stožáru. Při návrhu jejich vzájemné vzdálenosti je nutno rozhodnout zdali mnohocestný útlum je způsobený odrazy od země, nebo z atmosféry.

Pro spoj se slabým odrazem od země, kdy prostorová diverzita se zaměřuje na mnohocestný únik z atmosféry, používá se následující vzorec:

$$P_c = \exp\left[-0,0021fs\sqrt{0,4d}\right]$$

Zde znamená

ρ_c	korelační koeficient mezi signály dvou antén. Jeho hodnota se mění od 0,4 do 0,6.
f	kmitočet přenosu
d	vzdálenost přijímací a vysílací antény
S	vzdálenost středů přijímacích antén. Požaduje se $S \geq (100 \div 200)\lambda$. V rovinatých krajích a u vody se využívá pravidla poloviční šířky hlavního laloku.

$$S_1 = \frac{\lambda d}{4h'_2} \qquad h'_2 = h_2 - \frac{d_2^2}{2kR_0}$$

$$S_2 = \frac{\lambda d}{4h'_1} \qquad h'_1 = h_1 - \frac{d_1^2}{2kR_0}$$

S_1, S_2	jsou vzdálenosti středů diverzních antén na přijímací a vysílací straně
h_1, h_2	jsou výšky přijímací a vysílací antény nad okolím
h'_1, h'_2	jsou redukované výšky přijímací a vysílací antény vzhledem k zaoblení zeměkoule $R_0 = 6378$ km je poloměr zeměkoule
k	koeficient efektivního poloměru země

Při použití předcházejících vztahů je nutno mít na zřeteli tato omezení:

- Je-li propustnost dlouhého spoje malá a kmitočet je nízký a vzdálenost antén na obou koncích velká, vypočtená hodnota pomocí předcházejících vzorců je nadhodnocena. Je lépe zvolit hodnotu odpovídající vztahu $S \geq (100 \div 200)\lambda$.
- Je-li propustnost krátkého spoje velká a kmitočet je vysoký, je vypočtená hodnota pomocí předcházejících vzorců je podhodnocena. Je lépe zvolit hodnotu odpovídající vztahu $S \geq (100 \div 200)\lambda$ a hodnota může být vzata jako celistvý násobek poloviční šířky hlavního laloku

V normální technické praxi se vzdálenost antén v prostorové diverzitě pro mikrovlnné digitální spoje nachází v rozmezí 8 až 12 m, ale 10 m je postačující. Prostorová diverzita dosti snižuje přijímaný výkon, ale snižuje disperzi signálu. Prostorová diverzita omezuje vliv plochého úniku a pásmovou disperzi signálu. Tím zlepšuje jakost přenosu v digitálních mikrovlnných spojích.

Prostorová diverzita se dále dělí takto:

Standardní prostorová diverzita

Standardní prostorová diverzita je běžný přijímací mód pro digitální mikrovlnné systémy. Mikrovlnná stanice je vybavena jedním vysílačem a dvěma přijímači (jeden z nich je diverzitní přijímač). Každá stanice používá dvě antény. Hlavní anténa vysílá a přijímá přímý paprsek, diverzitní anténa přijímá diverzitní signál. Pokud je mikrovlnný spoj navržen s konfigurací zálohování 1 + 0, může být standardní prostorová diverzita provedena.

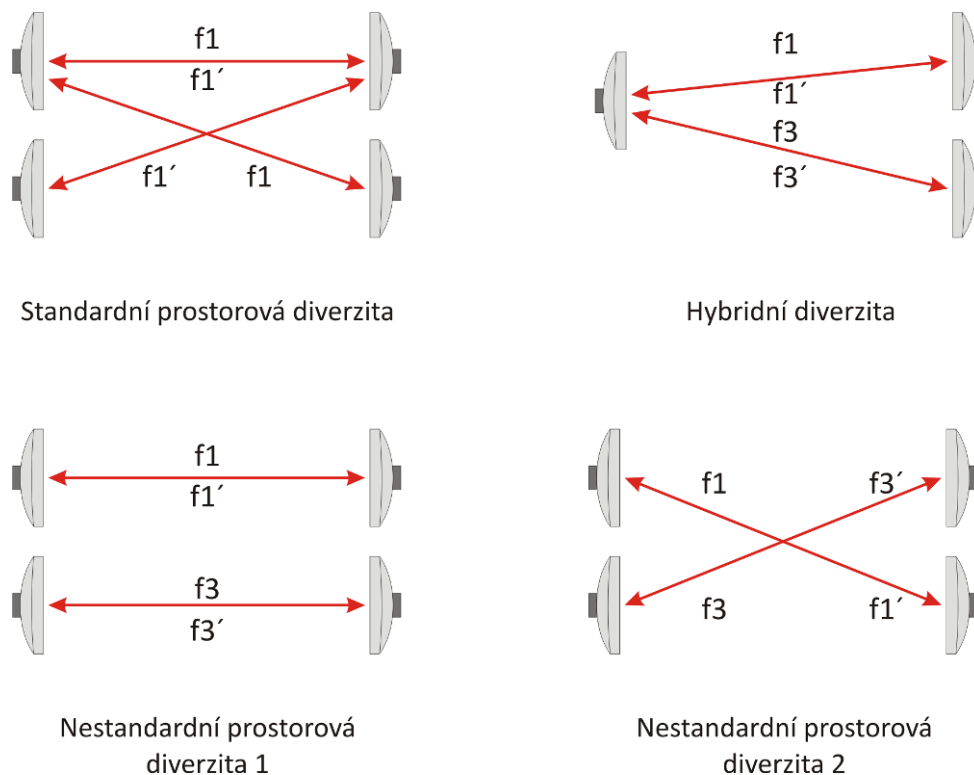
Hybridní prostorová diverzita

Hybridní prostorová diverzita je běžný přijímací mód pro digitální mikrovlnné systémy. Mikrovlnná stanice na jedné straně je vybavena vysílačem, který vysílá shodný datový signál na dvou různých kmitočtech a dvěma přijímači. Mikrovlnná stanice na druhé straně používá jednu anténu, která vysílá a přijímá přímý paprsek. Spoj je doplněn další stanicí, která vysílá a přijímá další přímý paprsek na jiném kmitočtu. Pokud je mikrovlnný spoj navržen s konfigurací zálohy 1 + 0, hybridní prostorová diverzita nemůže být použita. Pro použití hybridní prostorové diverzity musí být mikrovlnný spoj navržen s konfigurací zálohy 1 + 1.

Nestandardní prostorová diverzita

Nestandardní prostorová diverzita je také běžný přijímací mód pro digitální mikrovlnné systémy. Hlavní i diverzní mikrovlnná stanice je vybavena jedním vysílačem a jedním přijímačem. Každá stanice používá jednu anténu. Pokud je mikrovlnný spoj navržen s konfigurací zálohy 1 + 0, nestandardní prostorová diverzita nemůže být použita. Pro použití nestandardní prostorové diverzity musí být mikrovlnný spoj navržen s konfigurací zálohového módu 1 + 1.

Jednotlivé zapojení prostorové diverzity znázorňuje obrázek 33.



Obrázek 33 Schematické znázornění prostorové diverzity

5.5.3 Výběr diverzitních signálů

Existují dva způsoby získání signálu z diverzního příjmu – přepínání a skládání.

Přepínání je postup, kdy se volí ze dvou signálů ten, který má vyšší poměr signál šum, nebo má nižší bitovou chybovost. Výběr se provádí podle rozdílných pravidel. Každý způsob skládání má své přednosti i nedostatky.

Přepínání

Tento způsob je pro svou jednoduchost hodně v mikrovlnné komunikaci rozšířený. Přepínání přináší problémy ve skoku amplitudy a fáze signálu a také ve zkreslení tvaru vlny.

Výběr podle maximálního výkonu

Tento mód se také nazývá soufázový mód. Ignoruje kmitočtově selektivní únik a reaguje pouze na plochý únik způsobený mnohocestným šířením. Zvyšuje hladinu přijímaného signálu. Nezvažuje rozdílný poměr signál šum dvou přijímaných signálů. Pokud poměr signál šum dvou kanálů je různý, může být vybrán ten horší jen proto, že má větší výkon.

Výběr signálu podle maximálního výkonu se lehce provádí v mezifrekvenčním stupni přijímače.

Výběr podle maximálního poměru signál / šum

Pro zajištění maximálního poměru signál / šum ve složeném signálu se provádí podle tohoto parametru výběr. Výhodou zde je, že pokud se snižuje výkon přijímaného signálu k nule, vybírá se vždy vzhledem k poměru signál / šum signál lepší.

Výběr podle minimální disperze

V podmínkách širokopásmové modulace kmitočtově závislý únik nemůže být zanedbáván, neboť jeho vliv je často větší než vliv plochého úniku. V tomto případě objektivní výběrové kritérium pro jeho překonání je požadavek minimální disperze.

Nevýhodou výběr podle minimální disperze je, že vybraný signál může být nižší, než při výběru na maximální výkon. To může být důvod zvýšení tepelného šumu a zhoršení bitové chybovosti přenosu

5.6 ZÁLOHOVÁNÍ MIKROVLNNÝCH ZAŘÍZENÍ

Existují dva způsoby zálohování široce používané v mikrovlnných spojích:

- Bezzásahové přepínání (HSM)
- Horká záloha (HSB)

V praxi se v mikrovlnných zařízeních pro zálohování často používá kombinace obou způsobů.

5.6.1 Bezzásahové přepínání

Jak bylo v předešlé kapitole ukázáno, používá prostorová diverzita i kmitočtová diverzita zálohování přenosu. Pokud je signál některého z kanálů nedokonalý, může být nahrazen signálem dalšího kanálu. Na přijímací straně je přepnutí přenosu mezi aktivním a zálohovým kanálem samostatné. Po demulaci rádiového signálu, místní mf modul nejen zasílá signál do místního multiplexového modulu, ale také zasílá zpětný signál do záložního mf modulu.

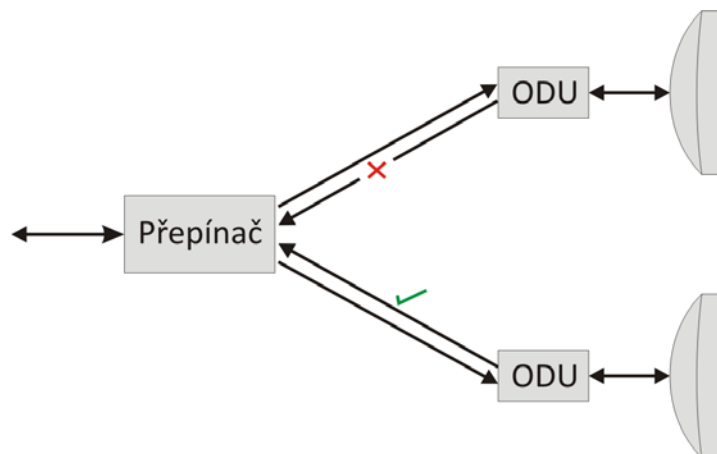
Multiplexový modul vybírá a přijímá signál nejlepší kvality ze všech signálů a automaticky vypíná nepoužité. Prostorová diverzita i frekvenční diverzita jsou stejné. Obě jsou duálně napájeny. Rozdíl je pouze v tom, že v prostorové diverzitě ODU zálohového kanálu nevysílá, ale pouze přijímá signál. V kmitočtové diverzitě je třeba pouze jedna anténa, ale dvě ODU, které vysílají shodný signál, ale na různých kmitočtech. (Viz obrázek 34)

5.6.2 Horká záloha

Horká záloha (obrázek 34) je podobná ke konfiguraci ochrany 1 + 1 pro přepínání modulů nebo SDD módu v optických spojích. Je realizována zálohováním mf modulu a ODU duálně vysílá a samostatně přijímá. Přepínač přijímá jen jeden signál. Pokud se signál jednoho mf modulu zhorší, je automaticky přepnut na příjem signálu druhého mf modulu. Během přepínání může být signál poškozen.

Pro přenos signálu lze využít mikrovlnný slučovač a pak použít jen jednu anténu, nebo ponechat signály ODU samostatné a použít dvě antény.

Je nutné zdůraznit, že bezzásahové přepínání je soustředěno v mf modulu, zatím co při použití horké zálohy je celkové přepínání provedeno v přepínači a ten může poškodit signál v okamžiku přepnutí.



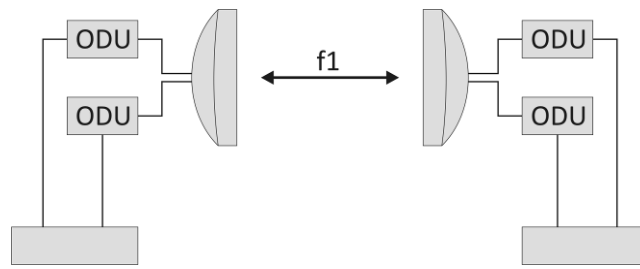
Obrázek 34 Horká záloha

5.6.3 Klasifikace zálohovacích módů

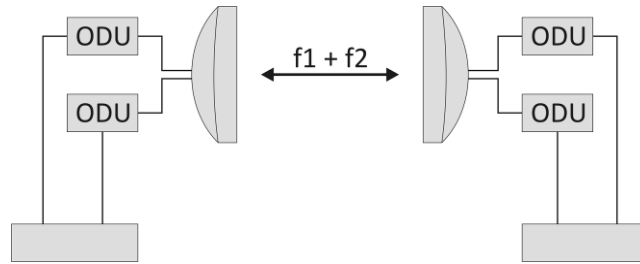
Přehlednou klasifikaci zálohovacích módů digitálních mikrovlnných spojů udává tabulka 4. Bez zálohový mód 1 + 0, používá na obou koncích spoje jednu IDU, jednu ODU a jednu anténu. Pro další zálohovací módy jsou požadavky patrné z následujících obrázků (obrázek 35 ÷ obrázek 38).

Konfigurace	Zkratka	Zálohovací mód	Poznámka	Použití
1 + 0	NP	Bez zálohy		Normální spoje
1 + 1	HSB	Záloha přístrojů		Krátké spoje
1 + 1	HSB+FD	Záloha přístrojů a přenosu		Volba podle geografických podmínek a požadavků zákazníka
1 + 1	HSB+SD	Záloha přístrojů, přenosu a antény	Mf modul	
1 + 1	FD+SF	Záloha přístrojů, přenosu a antény		
1 + 1	FD	Záloha přístrojů a přenosu	Mf modul	Vysokokapacitní páteřní spoje

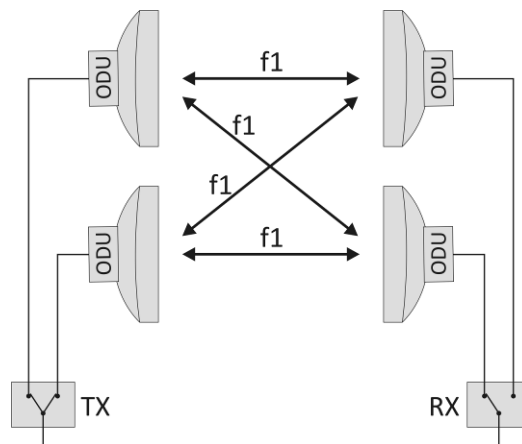
Tabulka 4 Klasifikace zálohovacích módů



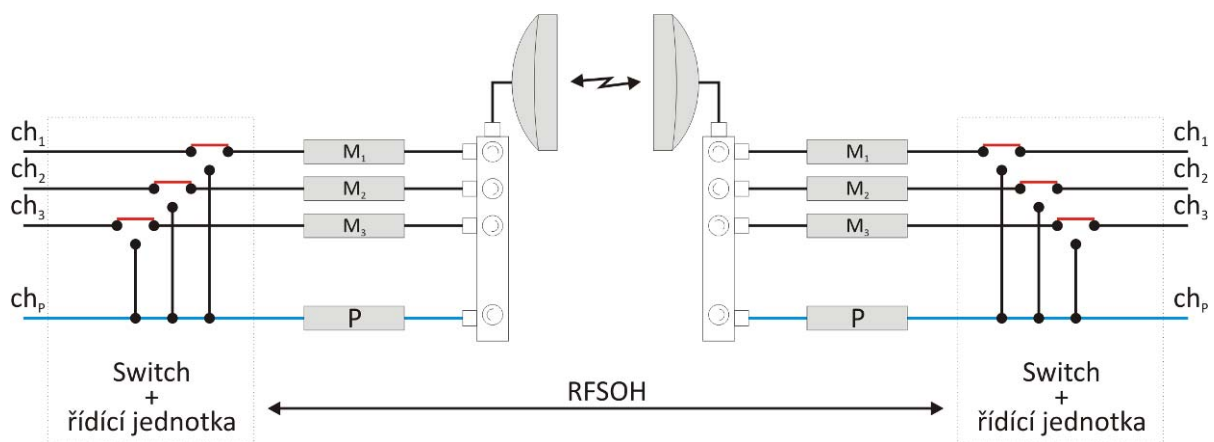
Obrázek 35 HSB



Obrázek 36 HSB + FD



Obrázek 37 HSB + SD



Obrázek 38 N+1

Na předchozím obrázku (obrázek 38) znamená M_n aktivní kanál a P je zálohovací kanál. Oba obsahují nezávislý modulátor a demodulátor, přijímací a vysílací jednotku. Když se vyskytne únik, nebo porucha na aktivním kanálu, signál může být přepnut do zálohovacího. Zálohovací kanál je mf záloha a diversní frekvenční mód je používán všemi vnitřními jednotkami. Tento zálohovací mód se nazývá N+1 záloha. Rozdílní výrobci nabízejí rozdílná zapojení a specifikace.

5.7 RUŠENÍ

5.7.1 Zdroje rušení

K rušení v mikrovlnných spojích dochází všemi možnými zdroji, jako je

- 1) Tepelný šum, který je způsoben teplotním pohybem elektronů ve vodičích.
- 2) Vnitřním šumem elektronických součástek, který je hlavně způsoben diskontinuitou pohybu náboje uvnitř součástky.
- 3) Šumem tepelného vyzařování objektů (včetně absorbovaného šumu), který je způsoben tepelným vyzařováním těles s teplotou nad 0 K.
- 4) Vesmírný šum pozadí a šum vesmírných objektů.
- 5) Atmosférický šum, zapříčiněný elektronickými výboji v atmosféře.
- 6) Průmyslové rušení, vyzařování elektrických zařízení, zejména jiskření.
- 7) Všechny druhy rušení uvnitř vlastního přístroje. Je to např. střídavý brum, mikrofonový efekt, harmonické kmitočty oscilátorů, fázový jitter.
- 8) Interference s kmitočty, které vyzařují jiné stanice.

5.7.2 Hlavní metody k omezení rušení

Hlavní faktor, který ovlivňuje kvalitu telekomunikace, jsou defekty (včetně chyb) v zařízeních a rušení. Kvalita v telekomunikačních zařízeních může být zlepšena využitím pokrokové techniky. Ale rušení vždy existovalo a s rozšiřováním elektrických zařízení narůstá. Vliv rušení v telekomunikacích se zvyšuje. Tím se stává omezení vlivu rušení stěžejním problémem.

Rušením v telekomunikačních systémech se již zabývají specializované obory. V současnosti pokrok v telekomunikační technice je vždy pokrokem v boji proti rušení, či těsně s ním spojeným. Prostředky k omezení rušení lze shrnout takto:

- 1) Zesílení výkonu vysílaného signálu, zvýšení hladiny vstupního signálu na přijímací straně.
Tento postup je velmi efektivní, ale je omezen mnoha dalšími hledisky jako je váha zařízení, jeho rozměry, požadavky na napájení. Zvýšení výstupního výkonu vysílače může zvýšit rušení ostatních okolních stanic. V neposlední řadě také telekomunikační úřad vydává přísná omezení maximálních vysílaných výkonů.
- 2) Použití směrových antén.
Směrová anténa je vhodná pro zvýšení síly přijímaného signálu a svou směrovostí potlačuje příjem signálu z ostatních směrů. Tak je současně zamezeno vzniku nežádoucích interferencí. Dokonce lze nežádoucí silné signály touto anténou eliminovat. Nutnost použít velké antény nebo jejich systém omezuje obecnou realizaci tohoto postupu z hlediska ekonomického i z hlediska využití prostoru na anténních stožárech.

3) Použití úzkopásmových filtrů k výběru kmitočtu

Použití úzkopásmových filtrů je hlavní metoda používaná k zamezení nežádoucích interferencí. Úzkopásmové filtry jsou používány téměř ve všech telekomunikačních zařízeních. Úzkopásmové filtry, zejména pro vyšší pracovní kmitočty, vedou k výrobním potížím kdy je třeba zaručit útlumové vlastnosti. Proto se vždy používají ještě další prostředky, které použití úzkopásmových filtrů doplňují.

4) Využití korelátorů pro výběr kmitočtu

Úzkopásmové filtry zpracovávají signály v kmitočtové oblasti. Korelační metody příjmu pracují se signálem v oblasti časové. Když má jak vstupní signál korelátoru tak interferenční signál nízkou hladinu a je tak zajištěna činnost korelátoru v lineární oblasti jsou výsledky úzkopásmového filtrování vynikající. Tato metoda přitahuje stále víc a víc pozornosti. Pokud ale hladina interferenčního signálu překročí meze lineární oblasti korelátoru, antiinterferenční vlastnosti se samozřejmě zhorší.

5) Zlepšení modulace a demodulace

Technika modulace a demodulace se rychle vyvíjí. Podle různých druhů rušení se používá úzkopásmová modulace (s jedním postranním pásmem), širokopásmová modulace (jako je kmitočtová modulace), technika kmitočtově rozšířené komunikace a technika digitální komunikace.

6) Použití detekce a opravy chyb

Toto jsou velmi efektivní metody k potlačení rušení. Byly vyvinuty pro použití v digitálních komunikačních systémech, kde požadavky na spolehlivost a jsou velmi vysoké a nízká chybovost podmínkou provozu.

6. VÝPOČTY V MIKROVLNNÝCH SPOJÍCH

6.1 ÚVOD

Výpočty v mikrovlnných spojích jsou zaměřeny na výpočet parametrů trasy a výpočty zařízení.

6.2 VÝPOČET PARAMETRŮ TRASY

Výpočet parametrů trasy v mikrovlnných spojích zahrnuje výpočet přímé vzdálenosti stanic, azimutu a elevačního úhlu, výpočet průchodnosti trasy a možných bodů odrazu či rozptylu.

6.2.1 Výpočet azimutu pro nastavení antény

Na základě geografických souřadnic stanic v bodech A a B lze vypočítat azimut α_A pro směr z bodu A do B takto:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{\sin(\Phi_B - \Phi_A)}{\cos V_A \operatorname{tg} V_B - \sin V_A \cos(\Phi_B - \Phi_A)} [\operatorname{rad}]$$

Je-li $\operatorname{tg}(\alpha) > 0$ je

pro $V_A < V_B$	$\alpha_A = \alpha$
pro $V_A > V_B$	$\alpha_A = \alpha + \pi$

Je-li $\operatorname{tg}(\alpha) < 0$ je

pro $V_A < V_B$	$\alpha_A = 2\pi - \alpha $
pro $V_A > V_B$	$\alpha_A = \pi - \alpha $

kde je

Φ_A - je zeměpisná šířka bodu A,	Φ_B - zeměpisná šířka bodu B
V_A - je zeměpisná délka bodu A,	V_B - zeměpisná délka bodu B

6.2.2 Výpočet délky spoje

Používají se stejné vstupní parametry jako v předešlém paragrafu

Vypočet pokud lze zanedbat zakřivení zeměkoule tj. pro $d \leq 10$ km

$$d = R_z \sqrt{(V_B - V_A)^2 + (\Phi_B - \Phi_A)^2 \cos^2 V_B} [\operatorname{km}]$$

Ve vzorci znamená $R_z = 6378$ km poloměr zeměkoule.

Hodnoty Φ a V nutno zadávat v radiánech.

Vypočet pokud lze nelze zanedbat zakřivení zeměkoule tj. pro $d > 10$ km

$$d = R_z \arccos(\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta \cos C)$$

kde je

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - V_A \qquad \beta = \frac{\pi}{2} - V_B \qquad C = \Phi_A - \Phi_B$$

6.2.3 Výpočet elevace antén

Kladnou i zápornou elevaci antén lze vypočítat z následujících výrazů:

$$\theta_A = \frac{H_2 + h_2 - H_1 - h_1}{d} - \frac{d}{2kR_z}$$

$$\theta_B = \frac{H_1 + h_1 - H_2 - h_2}{d} - \frac{d}{2kR_z}$$

Ve výrazu znamená

θ_A [rad]	elevaci antény v bodě A
θ_B [rad]	elevaci antény v bodě B
$H_1 + h_1$	výšku nad mořem antény v bodě A
$H_2 + h_2$	výšku nad mořem antény v bodě B
$R_z = 6378$ km	je poloměr zeměkoule
k	koeficient efektivního poloměru země

Výpočet vychází z předpokladu, že θ_A i θ_B je malé a používá zjednodušení, že pro malá x platí $\text{tg}(x) = x$. Pro krátké spoje a větší rozdíly výšek antén je nutné vyjádřit $\text{arctg}(x)$. V tomto případě je možno zanedbat druhý člen výrazu, který představuje korekci elevace na zaoblení zeměkoule.

6.2.4 Výpočet propustnosti trasy

Na obrázku 6-1 je průřez typickou mikrovlnnou trasou. V praxi jsou spoje tomuto průřezu podobné. Vzhledem k přímému paprsku je volná vzdálenost vyjádřená výrazem:

$$h_{CZ} = \frac{d_2(H_1 + h_1) + d_1(H_2 + h_2)}{d} - H_C - h_z \cdot 10^3$$

$$h_z = \frac{d_1 * d_2}{2kR_z}$$

Ve výrazu je

h_1, h_2 [m]	výška antén v bodě A, B nad zemí
H_1, H_2 [m]	výška bodů A, B nad mořem
d_1, d_2 [km]	vzdálenost překážky od bodu A, resp. B
h_C [m]	výška překážky v bodě C
H_C [m]	nadmořská výška bodu C
h_z [km]	korekce výšky na vrchlík zeměkoule
$R_z = 6378$ [km]	poloměr zeměkoule
k [-]	koeficient efektivního poloměru země

6.2.5 Výpočet bodu odraz

Základní rovnicí pro výpočet bodu odrazu v mikrovlnné trase je

$$2d_1^3 - 3d_1 * d_2^2 + [d_2^2 - 2kR_z(h_1 + h_2)] * d_1 + 2kR_z h_1 d_2 = 0$$

Pro praktický výpočet lze sestavit následující skupinu rovnic

$$d_1 = \frac{d}{2} + 2\sqrt{(q')} * \cos\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{3\pi}{2}\right)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{r}{q'\sqrt{q'}}\right)$$

$$q' = \frac{d^2}{12} + 8,5k \frac{h_1 + h_2}{4}$$

$$r = 6,378kd \frac{h_1 + h_2}{4}$$

d_1 je vzdálenost h_1 od bodu odrazu na hladkém povrchu země

6.2.6 Určení zisku antény

Zisk antény je dán jejím vyzařovacím diagramem. Když není vyzařovací diagram k dispozici, lze zisk antény určit pomocí jeho aproximace.

Pro antény s průměrem D a pro kmitočet s délkou vlny λ lze vyzařovací charakteristiku za předpokladu, že $D/\lambda > 100$ aproximovat takto:

$$\begin{aligned} G(\varphi) &= \\ &= G_0 - 2,5 \times 10^{-3} (\varphi D/\lambda)^2 && \varphi \in (0^\circ; \varphi_1) \\ &= 2 + 15 \log(D/\lambda) && \varphi \in (\varphi_1; \varphi_r) \\ &= 32 - 25 \log(\varphi) && \varphi \in (\varphi_r; 48^\circ) \\ &= -10 && \varphi \in (48^\circ; 180^\circ) \end{aligned}$$

Pro antény kde $D/\lambda < 100$ lze vyzařovací charakteristiku aproximovat takto:

$$\begin{aligned} G(\varphi) &= \\ &= G_0 - 2,5 \times 10^{-3} (\varphi D/\lambda)^2 && \varphi \in (0^\circ; \varphi_1) \\ &= 2 + 15 \log(D/\lambda) && \varphi \in (\varphi_1; 100 \lambda/D) \\ &= 52 - 10 \log(D/\lambda) && \varphi \in (100 \lambda/D; 48^\circ) \\ &= 10 - 10 \log(D/\lambda) && \varphi \in (48^\circ; 180^\circ) \end{aligned}$$

V těchto výrazech je

$$G_0 = 10 \log \left[0,55 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right]$$

$$\varphi_1 [^\circ] = \frac{20\lambda}{D \sqrt{G_0 - 2 - 15 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right)}}$$

$$\varphi_r [^\circ] = 15,85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6}$$

φ je odchylka od hlavního středového paprsku. Všechny úhly jsou ve stupních.

6.3 VÝPOČET PARAMETRŮ MIKROVLNNÉ TRASY

Parametry mikrovlnné trasy zahrnují velikosti útlumu volného prostoru, poměru přerušeni, stupeň zlepšení frekvenční diverzity a prostorové diverzity, útlum deštěm a stupeň rušení.

6.3.1 Výpočet přijímaného výkonu a zálohy na plochý únik

Hladinu přijímaného signálu lze vypočítat z následujících výrazů:

$$P_{in} = P_{out} + (G_o + G_i) - (L_o + L_i) - L_{si} - L_f$$

$$L_f = 92,44 + 20 \log(d f)$$

kde je

f	pracovní kmitočet [GHz]
d	délka spoje [km]
P_{out}	výstupní výkon vysílače [dBm]
P_{in}	vstupní výkon přijímače [dBm]
$G_o ; G_i$	zisk vysílací a přijímací antény [dB]
$L_o ; L_i$	útlum napaječe vysílací a přijímací antény [dB]
L_{si}	útlum mikrovlnného sdružovače [dB]
L_f	útlum volného prostoru [dB]

Výpočet zálohy na plochý únik

$$F_d = P_{in} - P_{th}$$

V tomto vzorci P_{th} [dBm] znamená mezní citlivost přijímače pro danou chybovost.

6.3.2 Výpočet hladiny rušení

V mikrovlnných spojích se používají dva kmitočtové systémy, které mohou způsobovat následující typy interference:

- 1) Vnitřní interference vlastních kmitočtů: Interference zrcadlového kmitočtu přijímače a vysílače, křížová interference harmonických signálů místních oscilátorů,
- 2) Vnitřní interference z okolních spojů: Interference s kmitočty blízkých stanic a vysílacími kmitočty stanic vzdálených
- 3) Vnitřní interference z ostatních zdrojů: Interference s kmitočty satelitní komunikace, radarů, rádiového vysílání rozhlasu a televize, disperze v atmosféře.

Při návrhu mikrovlnného spoje se uvažují hlavně první dva typy interference zejména pak rušení na frekvenci pracovní.

- Výpočet hladiny užitečného signálu

$$P_{in} = P_{out} + (G_o + G_i) - (L_o + L_i) - L_{si} - L_f$$

Ve výpočtu se uvažuje normální průchodnost trasy pro užitečný signál tj. $h_{CE} \geq H_0$
Útlum šíření L_f a ostatní proměnné jsou vysvětleny v předcházejícím bodě.

Výpočet hladiny rušícího signálu

$$P_{in} = P'_{out} + (G'_o + G_i) - (L'_o + L_i) - L_{si} - L_{fi}$$

ve výrazu se čárkované proměnné vztahují ke zdroji rušícího signálu.

- Výpočet útlumu šíření L_{fi} pro rušící signál

Jestliže je dráha rušícího signálu normálně průchodná tj. $h_{CE} \geq b_1$, vypočítá se L_{fi} podle vzorce pro volný prostor.

Jestliže je dráha rušícího signálu není zcela průchodná tj. $h_{CE} \leq b_1$, vypočítá se L_{fi} podle vzorce pro volný prostor.

$$L_f \text{ [dB]} = 92,44 + 20 \log(d[\text{km}] f[\text{GHz}]) + L_d$$

Ve vzorci L_d zahrnuje přídavné difrakční ztráty způsobené překážkou v cestě šíření. Nejčastější překážky v šíření mikrovln jsou ostré překážky, pro které lze L_d aproximovat takto:

$$\begin{aligned} L_d &= \\ &= 6 - 6,9 h_{CE} / h_0 && \text{pro } h_{CE} / h_0 \in (-1; 1) \\ &= 9 - 4 h_{CE} / h_0 && \text{pro } h_{CE} / h_0 \in (-3; -1) \\ &= 11 + 20 \log |h_{CE} / h_0| && \text{pro } h_{CE} / h_0 \leq -3 \end{aligned}$$

ve vzorci je

h_{CE} je zastínění přímé spojnice překážkou [m]

h_0 je zastínění volného prostoru v místě překážky [m] $h_0 = 0,577 b_1$

Výpočet L_d pro překážky obecného tvaru a různých materiálových povrchů je velmi komplikovaná záležitost. Analytické řešení existuje pouze pro několik základních případů. Další případy jsou řešeny v knize: "Základy šíření vln od Pavel Pechač, Stanislav Zvánovec".

6.3.3 Výpočet parametrů prostorové diverzity

V kopcovitém terénu, kde odraz od země není silný, uvažuje se hlavně mnohocestný únik

$$\rho c = \exp\left[-0,0021 f S \sqrt{0,4d}\right]$$

Zde znamená

ρc korelační koeficient mezi signály dvou antén. Jeho hodnota se mění od 0,4 do 0,6.

f kmitočet přenosu

d vzdálenost přijímací a vysílací antény

S vertikální vzdálenost středů přijímacích antén.

Požaduje se $S \geq (100 \div 200)\lambda$.

V rovinatých krajích vody se využívá pravidla poloviční šířky hlavního laloku.

$$S_1 = (\lambda d) / (4h_2') \quad h_2' = h_2 - d_2^2 / (2kR_0)$$

$$S_2 = (\lambda d) / (4h_1') \quad h_1' = h_1 - d_1^2 / (2kR_0)$$

Kde znamená

S_1, S_2 vzdálenosti středů diverzních antén na přijímací a vysílací straně

h_1, h_2 výšky přijímací a vysílací antény nad okolím

$R_0 = 6378$ km je poloměr zeměkoule

k koeficient efektivního poloměru země

Při použití předcházejících vztahů je nutno mít na zřeteli 2 omezení:

- Je-li propustnost dlouhého spoje malá, kmitočet je nízký a vzdálenost antén na obou koncích velká, vypočtená hodnota pomocí předcházejících vzorců je nadhodnocena. Je lépe zvolit hodnotu odpovídající vztahu $S \geq (100 \div 200)\lambda$.
- Je-li propustnost krátkého spoje velká, kmitočet je vysoký, je vypočtená hodnota pomocí předcházejících vzorců je podhodnocena. Je lépe zvolit hodnotu odpovídající vztahu $S \geq (100 \div 200)\lambda$ a hodnota může být vzata jako celistvý násobek poloviční šířky hlavního laloku

6.3.4 Výpočet poměru výpadku spoje

Výpadek způsobený plochým únikem

Pro předpověď plochého úniku lze použít dvě možnosti

- 1) Uvažování vlivu rozdílné výšky antén

$$P_{fr} = \frac{K_Q}{10 + \sqrt{\Delta h}} f^{1,3} d^{3,1} 10^{\frac{F_d}{10}}$$

ve výrazu znamená

$\Delta h = h_2 - h_1 $	výškový rozdíl umístění dvou antén [m]
d [km]	délka spoje
f [GHz]	pracovní kmitočet
F_d [dB]	hloubku úniku
K_Q	faktor zahrnující vliv terénu a počasí

Terén	Hory	Pahorky	Rovina	Jezera
$K_Q =$	6×10^{-7}	$1,26 \times 10^{-6}$	6×10^{-6}	$3,2 \times 10^{-5}$

Ze vzorce je patrné, že pro zlepšení spolehlivosti spoje je vhodná rozdílná výška antén. Jestliže skok spoje má shodný kmitočet a shodnou vzdálenost je lepší spoj s větším rozdílem výšky antén.

- 2) Uvažování vlivu délky spoje

$$P_{fr} = K_Q f^B d^C 10^{\frac{F_d}{10}}$$

ve výrazu znamená

d [km]	délka spoje
f [GHz]	pracovní kmitočet
F_d [dB]	hloubku úniku
K_Q	faktor zahrnující vliv terénu a počasí
B	faktor zahrnující vliv kmitočtu
C	faktor zahrnující vliv délky spoje

Terén	Hory	Pahorky	Rovina	Jezera
$K_Q =$	$1,072 \times 10^{-4}$	$2,750 \times 10^{-5}$	$2,884 \times 10^{-5}$	$2,630 \times 10^{-6}$
B =	1	1	1	1
C =	1,3	1,8	2,2	3,2

Pro umístění více antén v jednom bodě je výhodnější pro stejnou frekvenci používat při stejném výškovém rozestupu větší antény, než antény malé. V praxi se spíše užívá vzorec ad 2).

Stupeň zlepšení v kmitočtové diverzitě

Pro výpočet pravděpodobnosti výskytu kmitočtově závislého úniku je možno vycházet z předpokladu lineární amplitudové disperze, nebo z rozsahu úniku.

1) Lineární amplitudová disperze

Míru disperzního výpadku spoje v systému MQAM je možno odhadnout. Proto je výpočet lehký a přenosovou charakteristickou křivku není třeba zjišťovat.

Výpadek způsobený selektivním únikem může být stanoven, když v lineární amplitudové disperzi překročí L uvnitř kmitočtového pásma nějakou stanovenou hodnotu L_0 . L je zde výkonový poměr dvou kmitočtů uvnitř kmitočtového pásma s kmitočtovou odchylkou $\Delta f = f_s$. Hodnota mezní lineární amplitudové disperze L_0 je vztažena k mezní bitové chybovosti.

Výraz pro pravděpodobnost selektivního úniku byl stanoven empiricky jako

$$P_{fr} = 0,2 P_{re} P_{lo}$$

$$P_{re} = K_Q f^B d^C$$

Ve výrazu je

P_{lo}	pravděpodobnost že $L > L_0$
P_{re}	pravděpodobnost Rayleighova úniku

Pravděpodobnost překročení lineární amplitudové disperze

Bez prostorové diverzity

$$P_{lo} = 1 - \sqrt{\frac{(1 - 10^{L_0/10})^2}{(1 - 10^{L_0/10})^2 + 4 \cdot (1 - R_f) \cdot 10^{(L_0/10)}}$$

Prostorová diverzita

$$P_{lo} = \frac{8}{\pi} \left\{ x_0 \sqrt{1 - x_0^2} \left(0,5 - \sqrt{(1 - x_0^2)^2} \right) + \frac{1}{4} \tan^{-1} \sqrt{\frac{4x(1 - R_f) \cdot 10^{L_0/10}}{(1 - 10^{L_0/10})^2}} \right\}$$

Ve výrazu je

$$x_0 = \frac{\sqrt{1 + \sin \theta} - \sqrt{1 - \sin \theta}}{2}$$

$$\sin \theta = \sqrt{\frac{4 \cdot (1 - R_f) \cdot 10^{(L/10)}}{(1 - 10^{L_0/10})^2 + 4 \cdot (1 - R_f) \cdot 10^{L/10}}$$

Korelační koeficient kmitočtu

$$R_f = \cos\left(\frac{2\pi\Delta f}{c} x L_m\right) x \exp\left(-\frac{2\pi\Delta f}{c} x R_1\right)^2$$

Ve vzorcích je

Δf	rozdíl kmitočtů f_1 a f_2
c	rychlost světla
L_m	průměrná hodnota chyby šíření mezi přímou a interferenční vlnou
R_i	směrodatná odchylka chyby šíření mezi přímou a interferenční vlnou

Chyba šíření mezi přímou a interferenční vlnou je náhodná proměnná. Stanovení hodnoty její průměrné hodnoty a směrodatné odchylky lze provést pomocí empirických vztahů

$$R_1 = k_1 \left(\frac{34,47 x P_M (4GHz)^{0,63}}{\sqrt{2P_M (FGHz)}} \right) x \exp \left(-0,13 \frac{t}{d} \right)$$

$$R_i = L_M = k_1 \left(\frac{28,25 x P_M (4GHz)}{P_M (FGHz)} \right) x (I_{\max}^{-1,4} - I_{\max}^{-0,4})$$

Ve výrazu je

$$I_{\min} = (I_{\max}^{-1,4} + 0,124)^{\frac{1}{1,4}} (cm)$$

$$I_{\max} = 1000 x P_M (4GHz)^{0,43} x \exp \left(-0,45 x \frac{t}{d} \right) (cm)$$

zde znamená

$P_{\Delta f}$ (4 GHz)	Pravděpodobnost úniku při Rayleighovu rozdělení pro 4 GHz
$P_{\Delta f}$ (f GHz)	Pravděpodobnost úniku při Rayleighovu rozdělení pro kmitočet f [GHz]
k_1	je distribuční koeficient chyby šíření, jehož hodnota je $1 \div 2$
t	rozdíl nadmořských výšek uvažovaných stanic [m]
d	vzdálenost stanic [km]

K praktickému výpočtu nutno poznamenat:

- Maximální hodnota poměru t/d je 7,5
- Pro koeficient zlepšení kmitočtové diverzity při chromatickém úniku použijte koeficient zlepšení kmitočtové diverzity pro plochý únik, nebo naměřené hodnoty udávané výrobcem zařízení
- Konkrétní hodnota Δf je udávaná výrobcem zařízení

Modulace	64 QAM	128 QAM
L_0	20,0 dB	18,0 dB
Δf	30,1 MHz	24,08 MHz

2) Rezerva na únik

Výrobce zařízení stanovuje jednu nebo více hodnot rezervy na únik pro jednu nebo více hodnot bitové chybovosti. Protože tyto hodnoty byly stanoveny pro jisté podmínky je nutné jejich přepočítání pro konkrétní spoj. Možnost vzniku selektivního úniku R_d pro konkrétní spoj je dána v následující tabulce

Terén	R_d
Hory	0,5 ÷ 1
Pahorkatiny	3
Rovina	5 ÷ 7

Pro výpočet hloubky úniku spoje pak použijeme výrazu

$$F_e = -10 \log \left(10^{\frac{F_d}{10}} + R_D 10^{\frac{F_s}{10}} + \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\left(\frac{C}{I}\right)_{ri} - \left(\frac{C}{I}\right)_{th}}{10}} \right)$$

Poměr výpadku spoje pro aktuální podmínky, které zahrnují plochý únik, selektivní únik a interferenci vychází ze vztahu na str. 60 odst. 6.3.4 kde jsou také vysvětleny proměnné.

$$P_t = R_D K_Q f^B d^C 10^{\frac{F_e}{10}}$$

Pro výpočet stupně zlepšení kombinace pro prostorové diverzity a kmitočtové diverzity se místo kombinace úniků používá pouze hodnota plochého úniku.

Výpadek spoje vlivem interference

Pro mikrovlnné spoje, které využívají ve spojení dvoukmitočtový systém v digitálním přenosu jsou hlavním problémem rušení mezi vysílaným a přijímaným kmitočtem u místní stanice a vysílaným kmitočtem stanic vzdálených. Pravděpodobnost výpadku způsobená těmito vlivy je dána vztahem

$$P_i = K_Q f^B d^C \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\left(\frac{C}{I}\right)_{ri} - \left(\frac{C}{I}\right)_{th}}{10}}$$

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{ri} = P_{r0} - P_{ri1}$$

Ve výrazu je

P_{ni} , P_{r0} hladina interferenčního signálu a hladina žádaného signálu
 $(C/I)_{th}$ prahový poměr interference nosné

Celková pravděpodobnost výpadku spoje

Výpadek spoje nastává během úniku, bez ohledu na to čím je únik způsoben. Může jít o plochý únik, kmitočtově selektivní únik, či únik způsobený interferencí. Tedy celková pravděpodobnost přerušení spoje je funkcí pravděpodobností všech těchto tří možností.

$$P_t = \xi f(P_{fr}, P_s, P_i)$$

Ve vztahu je

P_t Celková pravděpodobnost výpadku spoje
 P_{fr} Pravděpodobnost výpadku způsobená plochým únikem
 P_s Pravděpodobnost výpadku způsobená kmitočtově selektivním únikem
 P_i Pravděpodobnost výpadku způsobená interferencí
 ξ Koeficient korelace proměnných. Hodnota závisí na mezi disperzního úniku a plochého úniku. Pokud působí pouze jeden únik a další únik je zanedbatelný tj. absolutní hodnota rozdílu mezi plochým a disperzním únikem je hodně velká (např. více než 20 dB), pak koeficient korelace vlivu proměnných má minimální hodnotu $\xi = 1$. Když působí dva útlumy tj. absolutní hodnota

rozdílů mezi plochým a disperzním únikem je malá (např. trochu nad 0 dB), pak koeficient korelace vlivu proměnných má maximální hodnotu $\xi \approx 2,8$

Jestliže pravděpodobnosti plochého úniku, kmitočtově selektivního únik, či úniku způsobeného interferencí jsou navzájem nezávislé pak pravděpodobnost přerušení spoje je dána jejich součtem

$$P_t = P_{fr} + P_s + P_i$$

6.3.5 Útlum způsobený deštěm

Pro kmitočty nad 10 GHz jsou srážky velmi důležitým činitelem, který podstatnou měrou ovlivňuje jejich šíření. Déšť nejen pohlcuje elektromagnetické vlny, ale také je rozptyluje. Na útlumu způsobeném deštěm se tedy podílí jak absorpce, tak difrakce elektromagnetických vln. Dochází zde i ke stáčení polarizační roviny. Útlum způsobený deštěm obecně závisí na velikosti a rozložení vodních kapek. Vzhledem k náhodnosti srážek je nezbytné statistické vyhodnocování. Vychází se zde z dlouhodobého měření odpovídajících útlumů v závislosti na intenzitě srážek a empirických vzorců pro tuto závislost.

Útlum deštěm pro trasu d [km] je dán vztahem:

$$L = \gamma_R d_{ef}$$

kde γ_R je specifický útlum deštěm v dB/km a d_{ef} efektivní délka spoje v km

$$\gamma_R = k R^a$$

ve vzorci je

R intenzita srážek [mm/h]
 k pracovní kmitočet

Statistický charakter intenzity srážek určuje i statistický charakter útlumu. Intenzita deště závisí na klimatické oblasti a ročním období. Je možné volit průměrný rok, nebo nejhorší měsíc. Pro Českou republiku je $R = 25$ mm/h překročeno v 0,01 % času.

Dešťové srážky vzhledem ke svému rozsahu se zřídka vyskytnou na celé délce spoje. Intenzita deště je navíc ještě proměnlivá. Svého maxima dosahuje ve středu dešťového jádra a klesá k jeho okraji. Proto se uvažuje efektivní délka, která je vždy kratší, než délka skutečná.

$$d_{ef} = r d$$

redukční činitel

$$r = 1/(1 + d/d_0)$$

$$d_0 = 35 \exp(-0,15R_{0,01})$$

ve vzorci $R_{0,01}$ znamená intenzitu deště v mm/hod, která je během roku překročena v 0,01% času. Po dosazení hodnoty $R_{0,01}$ do výrazu pro γ_R se dostane $L_{0,01}$ tj hodnota útlumu, která bude překročena za deště v 0,01% času v roce.

$$L_{0,01} = \gamma_{R_{0,01}} d_{ef}$$

Srážky $R_{0,01}$ [mm/h]	Pracovní kmitočet / polarizace									
	10 GHz		20 GHz		30 GHz		50 GHz		70 GHz	
	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
	$\gamma_{R0.01}$ [dB/km]									
8	0,14	0,17	0,74	0,82	1,53	1,73	3,3	3,5	4,6	4,8
12	0,23	0,28	1,11	1,27	2,21	2,54	4,6	4,9	6,2	6,4
15	0,30	0,37	1,38	1,60	2,71	3,14	5,5	5,9	7,2	7,5
19	0,41	0,49	1,75	2,06	3,37	3,92	6,6	7,1	8,5	8,9
22	0,48	0,59	2,02	2,40	3,85	4,51	7,4	8,0	9,5	9,9
28	0,65	0,80	2,56	3,10	4,80	5,67	8,9	9,8	11,3	11,8
30	0,71	0,88	2,74	3,33	5,11	6,05	9,4	10,3	11,8	12,4
32	0,76	0,95	2,92	3,57	5,42	6,43	9,9	10,9	12,4	13,0
35	0,85	1,07	3,19	3,92	5,88	7,00	10,6	11,7	13,2	13,9

Útlum pro jiná procenta času lze přepočítat podle vzorce

$$L_p = 0,12 p^{-(0,546+0,043 \log p)} L_{0,01}$$

Vzorec platí v rozsahu p 0,001% až 2%.

6.3.6 Absorpce plyny

Mezi ztráty přenosu ve volném prostoru nutno zahrnout také ztráty způsobené v mikrovlnných spojích absorpcí kyslíku a vodních par.

Útlum jimi způsobený lze vyjádřit vztahem:

$$L_g = d (r_o + r_w)$$

Ve výrazu jsou

- L_q ztráty způsobené absorpcí v plynech [dB]
- d délka mikrovlnného spoje [km]
- r_o specifický útlum způsobený absorpcí kyslíku [dB/km]
- r_w specifický útlum způsobený absorpcí vodních par [dB/km]. Je nutno zdůraznit že se jedná o nekondenzované vodní páry.

Hodnoty specifického útlumu r_o , r_w lze aproximovat takto:

r_o = aproximace je platná pro kmitočty $f < 57$ GHz

r_w = aproximace je platná pro kmitočty $f < 350$ GHz

Ve výrazu ρ udává měrnou váhu vodní páry [g/m^3]

Pro názornost byla vypracována tabulka celkového specifického útlumu [dB/km] pro měrnou hustotu vodních par $\rho = 10$ [g/m^3]

Specifický útlum	10 GHz	20GHz	30GHz	50GHz	70GHz
Kyslíku r_o	0,0070	0,0104	0,0185	0,2622	0,1796
Vodních par r_w	0,0154	0,1309	0,1572	0,3541	0,6844
Celkový ($r_o + r_w$)	0,0224	0,1413	0,1657	0,6163	0,8640

Pomocí této tabulky např. můžeme vypočítat útlum mikrovlnného spoje na $f = 10$ GHz a vzdálenost stanic 10 km. Celkový specifický útlum způsobený absorpcí atmosférických plynů pro tento kmitočet je 0,0224 dB/km. Pro délku spoje 10 km dostáváme 0,224 dB. Uvážíme-li, že ztráta ve volném prostoru za stejných podmínek jsou $L_s = 132,4$ dB, je možno zde absorpci v atmosférických plynech zcela zanedbat.

7. POŽADAVKY TECHNICKÉ REALIZACE MIKROVLNNÉHO SPOJE

7.1 ÚVOD

Technická realizace mikrovlnného spoje zahrnuje stanovení mikrovlnné trasy, určení výšky antén, výběr kmitočtu a polarizace, výběr mikrovlnných antén.

7.2 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA TRASU

7.2.1 Stanovení vlivu okolí a vzdálenost stanic

Okolí

Okolí pro realizaci mikrovlnného spoje, lze na základě vlivu terénu, meteorologických podmínek výšky antén a šíření vln, rozdělit do 4 základních typů.

Okolí typu A

Tento typ zahrnuje členité hory a vysoké budovy ve městech, nebo kombinaci obou. Nejsou zde široká údolí a volné vodní plochy ležící mezi nimi. Ekvivalentní koeficient odrazu je menší než 0,5 tj. hladina přijímaného signálu vlny odražené od země není větší než 6 dB. Současně jestliže v trase spoje nejsou široká údolí a vodní plochy a vzduch je suchý není pravděpodobný vznik vícecestného úniku na nehomogenních vrstvách vzduchu.

Do okolí typu A náleží oblasti se suchým vzduchem, s horami, které mají ostré hrany delší než 20 m a pahorkatiny kde elevační úhel paprsků je větší než 0,5 a antény mají zcela rozdílnou výšku.

Okolí typu B

Tento typ zahrnuje kopcovitý terén s malými výškovými rozdíly, bez širokých údolí a volné vodní plochy. Ekvivalentní koeficient odrazu je menší než 0,7 tj. hladina přijímaného signálu vlny odražené od země není větší než 10 dB. Tento koeficient nemůže být zanedbán. Ačkoliv v trase nejsou široká údolí ani vodní plochy nemůže být zanedbán ani mnohocestný únik vznikající na nehomogenitách vzduchu.

Do okolí typu B náleží např. oblasti s táhlými horami i roviny kde rozdíl výšky antén je velký.

Okolí typu C

Tento typ zahrnuje roviny a vodní plochy a má ekvivalentní koeficient odrazu větší než 0,7 tj. hladina přijímaného signálu vlny odražené od země je větší než 10 dB. Mnohocestný únik, způsobený nehomogenitou vzduchových vrstev, zde představuje vážný problém.

Okolí typu D

Tento typ zahrnuje roviny a větší vodní plochy. Problémy s odrazy od povrchu a mnohocestný únik již často ohrožují i stabilitu celého mikrovlnného spojení. Podmínky jsou oproti typům A, B i C mnohem horší.

V závěru lze shrnout, že charakter trasy hlavně záleží na vlivu odrazu od země a na nehomogenních vrstvách atmosféry na šíření elektromagnetických vln. Tyto dva faktory určují mnohocestný přenos paprsků elektromagnetických vln a jsou příčinou kmitočtově selektivních úniků přijímaného signálu. Tak vážně ovlivňují mikrovlnné spoje, zvláště pak digitální spoje s vyšší kapacitou přenosu a vícehladinovou modulací. Mnohocestný přenos a kmitočtově selektivní únik jednak zapříčiňují zkrácení přenášených impulsů a tedy zvětšují chybovost spoje, jednak zhoršují polarizaci mikrovln a tak umožňují v systému spojů mezikanálové rušení. Proto k zajištění kvality přenosu signálu je nutné preferovat okolí typu A, či B a typům C, D se pokud možno vyhýbat. Pokud to není možné je nutné použít k překonání vlivu selektivního úniku na mikrovlnné spojení diverzní techniky a zálohování spoje.

Vzdálenost stanic

Vzájemná vzdálenost stanic mikrovlnného spoje by měla být zvolena na základě vlastností zařízení, geografických a meteorologických podmínek, výšce antén, šíření vln a na základě použité techniky přenosu.

Pro krátké i dlouhé spoje má být použita taková technika, která by zajistila, že rozdíl mezi hladinou přijímaného signálu pro volný prostor a nominální hodnotou nebude větší než 3 dB.

7.2.2 Standardní průchodnost

Každý úsek mikrovlnného spoje musí mít volný prostor mezi přímým paprskem a vrcholem překážky. Měřtkem je koeficient K vztažený na ekvivalentní poloměr země (str. 30). Požadavky pro osamocenou překážku v průchodnosti sekce mikrovlnného spoje jsou vyloženy dále. Průchodnost vícenásobné překážky by měla mít $K = K_{\min}$ a difrakční ztráty zaviněné těmito překážkami by neměly být vyšší než 10 dB. K žádným ztrátám nedochází pro $K = 4/3$. Přijímaná hladina by neměla být nižší než hladina vypočítaná pro přenos ve volném prostoru.

V mikrovlnném spoji, který používá prostorovou diverzitu, by průchodností trasy hlavní antény neměly vznikat difrakční ztráty větší než 15 dB (pro jednoduchou i vícenásobnou překážku). Pro průchodnost diverzní antény se předpokládá $K = K_{\min}$

Vedle splnění požadavků na průchodnost pro paprsek elektromagnetické vlny mikrovlnného spoje, tj. volný prostor ve vzdálenosti $d \geq 17,1 D^2 / \lambda$ by neměl být menší než $b_1 \sqrt{3}$, ve vzdálenosti $d \leq 17,1 D^2 / \lambda$, musí být splněny i požadavky na volnost blízké zóny antény. (D je průměr antény, λ je vlnová délka a b_1 průchodnost volného prostoru tj. poloměr první Fresnelovy zóny.)

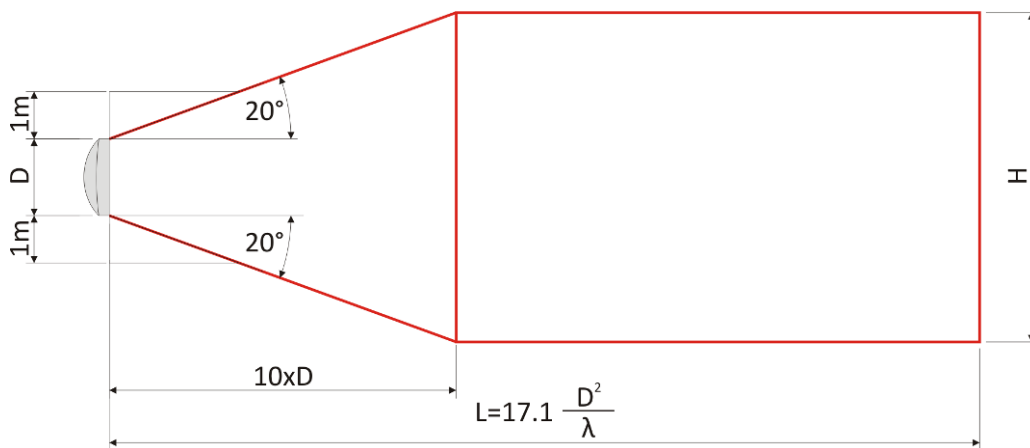
Typ překážky	K_{\min}	$K = 4/3$	Poznámka
Ostrá překážka	$H \geq 0$	$H \geq h_0$	K je efektivní poloměr země
Hladký povrch a další	$H \geq 0,5 h_0$	$h_0 \sqrt{(6m-5)} \leq H \leq h_0 \sqrt{(6m-1)}$	$K_{\min} = 0,1\%$ statistické hodnoty K

Pozn.: $m = 1, 2, 3, \dots$, je počet interferenčních laloků antény. Pro $K = K_{\min}$ by mělo být m co nejnižší, aby se znemožnila práce antény na vyšších řádech laloků pro $K = 4/3$.

7.2.3 Výška antény a vzdálenost pro prostorovou diverzitu

Volba výšky antény

Výška antény musí zaručovat splnění požadavků na průchodnost mikrovlnné trasy a požadavek volného prostoru pro blízkou zónu antény. Konkrétní požadavky plynou z následujícího obrázku (obrázek 39) kde znamená D je průměr antény, λ je vlnová délka pracovního kmitočtu.)



Obrázek 39 Volný prostor v blízké zóně

Výška antény také určuje bod odrazu paprsku elektromagnetické vlny dopadajícího na vodní hladinu nebo na plochu s větším koeficientem odrazu. Současně by měl být co největší rozdíl celkové výšky přijímacích a vysílacích antén, aby se omezil vliv kanálového úniku a úniku K.

Volba vzdálenosti prostorové diverzity

Prostorová diverzita účinně omezuje vliv úniku elektromagnetických vln. Vzdálenost mezi diverzními přijímacími anténami zásadně zlepšuje příjem ovlivněný

- Únikem K pro chladné povrchy s koeficientem odrazu větším než 0,5
- Kanálovým únikem v horských oblastech a oblastech s členitým povrchem s koeficientem odrazu menším než 0,5.

V prakticky se při návrhu mikrovlnného spoje požaduje vzdálenost antén při prostorové diverzitě v rozmezí $200 \lambda \div 300 \lambda$. Tedy konkrétně pro spoj s pracovním kmitočtem 10 GHz je to $6 \div 10$ m.

7.3 MIKROVLNNÉ PÁSMO A POLARITA ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN

7.3.1 Volba mikrovlnného pásma

Výběr mikrovlnného pásma se provádí s ohledem na

- přenosovou kapacitu
- plán spojovací mikrovlnné sítě
- dříve vybudované spoje v oblasti
- lokální možnost umístění stanice
- meteorologické podmínky

Obecně:

- Pro mikrovlnné spoje v systému PDH pro větší vzdálenosti (delší než 15 km) se doporučuje volba nižších kmitočtů (8 GHz). Pokud délka skoku nepřesahuje 25 km je doporučován kmitočet 11 GHz. Konkrétní volba kmitočtu musí vzít v úvahu i průřez krajiny s ohledem na její průchodnost pro mikrovlny.
- Pro mikrovlnné spoje v systému PDH pro menší vzdálenosti (vzdálenosti kolem 10 km) mohou být použity kmitočty nad 11 GHz.

- Pro mikrovlnné spoje v systému SDH se obdobně pro větší vzdálenosti (delší než 15 km) se doporučuje volba nižších kmitočtů. Pokud délka skoku nepřesahuje 20 km je eventuálně možno použít kmitočty 11 GHz. Konkrétní volba kmitočtu musí vzít v úvahu i průřez krajiny s ohledem na její průchodnost pro mikrovlny.
- Pro mikrovlnné spoje v systému SDH pro menší vzdálenosti (vzdálenosti kolem 10 km) mohou být použity kmitočty nad 11 GHz.

7.3.2 Uspořádání mikrovlnných kmitočtů a polarizace

Uspořádání kmitočtů se týká přijímacích a vysílacích kmitočtů na všech pásmech. Základním požadavkem při volbě uspořádání mikrovlnných kmitočtů je zamezení vzájemného rušení stanic v dané lokalitě a maximální využití kmitočtového spektra.

Pro spoje jdoucí stejným směrem je nutno volit dostatečně velký kmitočtový rozestup mezi vysílaným a přijímaným kmitočtem. Tak se zabrání přenosu vlastního vysílaného kmitočtu do přijímače a jeho interferenci s kmitočtem přijímacím.

Pokud je v provozu současně více kanálů musí být dostatečný kmitočtový odstup i jednotlivých stanic, aby se zamezilo jejich vzájemnému rušení. Současně musí být pokrytí pásma rovnoměrné, aby jeho využití bylo ekonomické.

Protože stavba věží pro mikrovlnné spoje je nákladná, je vhodné, aby systémy s několika kanály jdoucí stejným směrem využívaly jedné antény.

Metoda uspořádání kmitočtů při retranslaci

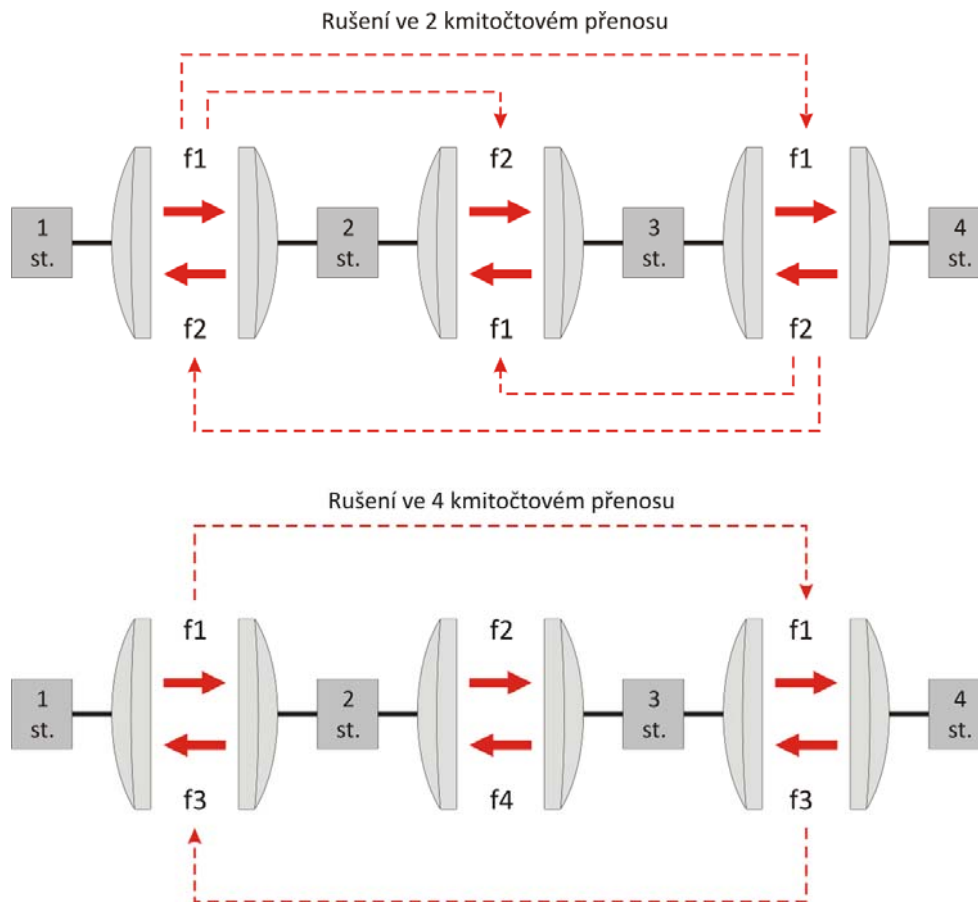
- **Dvoukmitočtový přenos**

V mikrovlnném spoji při dvoukmitočtovém přenosu je používán jeden vysílací a jeden přijímací kmitočet. Toho přenosu využívají i střední, retranslační stanice, které z jedné strany přijímají a na druhou stranu vysílají stejný kmitočet. Mezi jednotlivými spoji jsou však kmitočty různé. Výhodou je obsazení malého pásma kmitočtů a tedy vysoké využití kmitočtového spektra. Nevýhodou je velká možnost rušení, kdy přijímací strana může zachycovat signály vysílané na opačnou stranu. Použité antény musí mít tedy vysoce směrové a hodně potlačené zpětné vyzařování. Požaduje se potlačení zpětného vyzařování alespoň 65 ÷ 75 dB oproti hlavnímu paprsku. Pokud je ve spoji využívána funkce ATPC je možno tento požadavek poněkud snížit.

- **Čtyřkmitočtový přenos.**

Každá střední, retranslační stanice v tomto spoji používá 4 kmitočty. Odpadají potíže se zpětným vyzařováním antén, a proto antény nemusí být tak přísně proti němu chráněny. Ale čtyřkmitočtový přenos zase využívá dvakrát větší část kmitočtového kanálu a tedy snižuje využití kmitočtového spektra.

U obou systémů se může ještě vyskytnout rušení přes stanici, protože tam je použita stejná frekvence. Z tohoto důvodu je vhodné spoje s retranslací nevést v jedné přímce, ale cik-cak. Vybočení z přímého směru dosti omezí, vzhledem ke směrovosti antén, možnost rušení na shodném kmitočtu.



Obrázek 40 Možnosti rušení ve 2 a 4 kmitočtovém přenosu

Vysoká a nízká stanice

Jak již bylo řečeno, je nutná změna přijímacího a vysílacího kmitočtu stanice od stanice. Většinou se jedná o kombinaci horní a spodní poloviny pásma. Z tohoto hlediska existují dva typy stanic. Jedna přijímá na vyšším kmitočtu, než vysílá a nazývá se vysoká stanice. Druhá naopak přijímá na nižším kmitočtu, než vysílá a nazývá se nízká stanice. Pojmenování se řídí podle přijímaného kmitočtu,

Principy uspořádání mikrovlnných kmitočtů a polarizace

Digitální mikrovlnné spoje, které používají stejné kmitočtové pásmo, by měly být shodného typu ve stanicích umístěných ve stejném bodě. Pokud stanice pracují na jiných pásmech, i když v jednom bodě, shodnost typu není nutná.

- **Mikrovlnné spoje „poslední míle“:**

- Pokud jsou mikrovlnná zařízení v jednom místě, je vhodné používat čtyřkmitočtový přenos, hlavně vzhledem k uspořádání kmitočtů. Pokud je zvoleno dvoukmitočtové uspořádání, měly by být použity antény s velmi dobrými parametry.
- Pokud jsou mikrovlnná zařízení v jednom místě a používají sousední kanály kmitočtového pásma a směrový úhel je menší než 20° je nutné nastavit různou polarizaci.
- Pro dlouhé spoje a pro vyšší kmitočtová pásma je dobré upřednostnit vertikální polarizaci.
- Při volbě kmitočtů a polarizace je nutné uvažovat možnost vzájemného rušení od okolních stanic.

- **Mikrovlnné páteřní spoje**

- a) Pro kmitočtové uspořádání je vhodnější dvoukmitočtový systém.
- b) Mikrovlnné retranslační stanice ve spoji mají být umístěny cik-cak a ne v jedné přímce.

Pokud ve střední stanici je úhel odchyly antén:

$\varphi < 20^\circ$ nemohou dva směry pracovat na shodném kanále, jeden by měl být sudý, druhý by měl být lichý. Polarizace by měla být opačná.

$\varphi < 80^\circ$ nemohou dva směry pracovat na shodném kanále, jeden by měl být sudý, druhý by měl být lichý. Polarizace může být shodná.

$80^\circ < \varphi < 135^\circ$ mohou dva směry pracovat na shodném kanále. Polarizace by měla být opačná.

$135^\circ < \varphi < 180^\circ$ mohou dva směry pracovat na shodném kanále i se shodnou polarizací.

- c) Volba polarizace

Změna polarizace v každém skoku snižuje základní interferenci antén.

Změna polarizace v každém druhém skoku snižuje rušení od vzdálených stanic.

7.4 TECHNICKÉ POŽADAVKY NÁVRHU MIKROVLNNÉ KOMUNIKACE

7.4.1 Základní požadavky

Rozdělení mikrovlnného radioreleového systému

Globální digitální kanály mikrovlnného radioreleového systému použité k přenosu na vzdálenost až 2500 km. Jsou používány k přenosu mezi středisky druhé hladiny.

Páteřní digitální kanály mikrovlnného radioreleového systému použité k přenosu na vzdálenost až 1250 km. Jsou používány k přenosu mezi druhou hladinou a místními centry.

Zákaznické digitální kanály mikrovlnného radioreleového systému použité k přenosu na vzdálenost až 50 km. Jsou používány k přenosu mezi místními centry a konečnými uživateli.

Požadavky na chybovost systému

Pro základní spoje s ohledem na únik uvnitř systému, rušení a další chybové faktory, chybovost koncového výstupu 64 kbit/s kanálu oproti referenčnímu kanálu musí vyhovět následujícím podmínkám:

V každém měsíci po dobu max. 0,4% celkového provozního času smí být bitová chybovost za minutu horší než 1×10^{-6} .

V každém měsíci po dobu max. 0,054% celkového provozního času smí být bitová chybovost za minutu horší než 1×10^{-3} .

V každém měsíci celková doba bitového chybování nemá být větší než 0,32% celého měsíce.

Pro páteřní spoje s ohledem na únik uvnitř systému, rušení a další chybové faktory, chybovost koncového výstupu 64 kbit/s kanálu oproti referenčnímu kanálu musí vyhovět následujícím podmínkám:

V každém měsíci po dobu max. 1,5% celkového provozního času smí být bitová chybovost za minutu horší než 1×10^{-6} .

V každém měsíci po dobu max. 0,04% celkového provozního času smí být bitová chybovost za minutu horší než 1×10^{-3} .

V každém měsíci celková doba bitového chybování nemá být větší než 1,2% celého měsíce.

Pro koncové spoje s ohledem na únik uvnitř systému, rušení a další chybové faktory, chybovost koncového výstupu 64 kbit/s kanálu oproti referenčnímu kanálu musí vyhovět následujícím podmínkám:

V každém měsíci po dobu max. 1,5% celkového provozního času smí být bitová chybovost za minutu horší než 1×10^{-6} .

V každém měsíci po dobu 0,015% a více celkového provozního času smí být bitová chybovost za minutu horší než 1×10^{-3} .

V každém měsíci celková doba bitového chybování nemá být větší než 1,2% celého měsíce.

Pokud je pouze jedna metoda přenosu digitálního mikrovlnného kanálu používají se tyto hodnoty: Předpokládejme referenční vzdálenost 50 km a 280 km. Uvažujme únik uvnitř systému, rušení a další chybové faktory. Chybovost koncového výstupu 64 kbit/s kanálu oproti referenčnímu kanálu musí vyhovět požadavkům z následující tabulky.

Typ spoje	Délka [km]	BER $>10^{-6}$ [minut]	BER $>10^{-3}$ [sec]	BER	Zbytkový BER
1	250	0,045 %	0,006 %	0,036 %	$5,6 \times 10^{-10}$
2	250	0,2 %	0,0075%	0,16 %	$2,5 \times 10^{-9}$
3	50	0,2 %	0,002 %	0,16 %	$2,5 \times 10^{-9}$
4	50	0,55%	0,005 %	0,4%	$6,0 \times 10^{-10}$

Tabulka 5 Typy spojů podle chybovosti

V tabulce je

Typ spoje 1 je vhodný pro vytvoření základních spojů s délkou spoje 2500 km.

Typ spoje 2 pro vytvoření základních spojů a páteřních spojů

Typy spoje 3 a 4 pro vytvoření spoje mezi poskytovatelem a konečným uživatelem.

Pro aktuální základní spoje s délkou L přesahující 280 km a pro aktuální páteřní spoje s délkou L větší než dvě digitální sekce, založené na rozdílu obvodových struktur mezi aktuálním a předpokládaným kanálem, s ohledem na únik uvnitř systému, rušení a další chybové faktory, chybovost koncového výstupu 64 kbit/s kanálu oproti referenčnímu kanálu musí vyhovět následujícím podmínkám:

Parametr	Základní spoje	Páteřní spoje
Degradace spoje při BER > 10 ⁻⁶	≤ 0,4 L / 2500	≤ 1,5 L / 1250
SES pro BER > 10 ⁻³ [sec]	≤ 0,054 L / 2500	≤ 0,04 L / 1250
BER	≤ 0,32 L / 2500	≤ 1,2 L / 1250
Zbytkový BER	≤ 5×10 ⁻⁹ L / 2500	≤ 1,8×10 ⁻⁸ L / 1250

Tabulka 6 Požadavky na chybovost spoje

Pro aktuální základní spoje s délkou L nepřesahující 280 km se změna neuvažuje a berou vlastnosti jako pro spoj s délkou 280 km.

Když aktuální délka spoje L mezi uživatelem a poskytovatelem přesahuje 50 km berou se vlastnosti podle tab. pro L = 50 km.

Pokud délka kanálu pro spoje typu 2, 3 a 4 nemá více než dvě digitální sekce a pokud délka sekce je L a označíme-li délku referenční sekce L₀, a pokud má pro uvažovaný typ platí vztah $n L_0 < L < (n+1) L_0$ parametry chybovost BER koncového výstupu 64 kbit/s kanálu jsou (n+1) násobkem referenčních hodnot pro spoj uvažovaného typu.

Index výpadku mikrovlnného spoje

Index výpadku základního obousměrného mikrovlnného spoje za rok nemá být větší než 0,03 % a v tom maximálně 1/3 může být zapříčiněna poruchami šíření.

Index výpadku páteřního obousměrného mikrovlnného spoje za rok nemá být větší než 0,02 ÷ 0,05 % a v tom maximálně 1/3 může být zapříčiněna poruchami šíření.

Index výpadku koncového obousměrného mikrovlnného spoje za rok nemá být větší než 0,08 ÷ 1,0 % a v tom maximálně 1/3 může být zapříčiněna poruchami šíření.

Pro aktuálně spoje se předpokládá lineární závislost indexu výpadku vzhledem k délce spoje. Referenční hodnoty indexu výpadku pro obousměrný spoj uvádí následující tabulka

Typ digitálního spoje	Index výpadku
1 (pro L = 280 km)	0,033 %
2 (pro L = 280 km)	0,05 %
3 (pro L = 50 km)	0,05 %
4 (pro L = 50 km)	0,1 %

Tabulka 7 Index výpadku mikrovlnného spoje

7.4.2 Technické požadavky návrhu mikrovlnného spoje SDH

Komunikační systém

- Spojovací délka mezinárodní páteřní sítě L1, která používá mikrovlnné spojení k přenosu základních grup a vysokou bitovou rychlost je 5000 km.
- Mikrovlnné komunikační systémy s IF kanály sloužícími k přenosu základních skupin s vysokým bitovým poměrem mohou být podle pozice v síti klasifikovány jako páteřní spoje mezioblastní nebo oblastní, místní síť nebo přístupové síť.
- Mezioblastní páteřní spojení je prostředek výměny mezi oblastními centry a mezinárodními stykovými body. Oblastní páteřní spojení spojuje oblastní centra navzájem. Místní síť slouží k připojení poskytovatelů k oblastnímu centru. Přístupové síť slouží k přístupu konečného uživatele k místním stanicím poskytovatele.

Specifikace BER v mikrovlnných systémech SDH

BER nesmí překročit hodnoty následující tabulky v libovolném měsíci v roce a v libovolném směru spoje. Předpokládá se běžný únik v síti, rušení a dalších nepříznivé okolnosti.

Kapacita kanálu	1,5÷5 Mbit/s	15÷55 Mbit/s	55÷160 Mbit/s	160÷350 Mbit/s
Bit / blok	2000 ÷ 8000	4000 ÷ 20000	6000 ÷ 20000	15000 ÷ 30000
ESR	$0,04 \times X$	$0,075 \times X$	$0,16 \times X$	dosud neurčeno
SESR	$0,002 \times X$	$0,002 \times X$	$0,002 \times X$	$0,002 \times X$
BBER	$2 \times 10^{-4} \times X$	$2 \times 10^{-4} \times X$	$2 \times 10^{-4} \times X$	$2 \times 10^{-4} \times X$

Tabulka 8 Specifikace BER v mikrovlnných systémech SDH

Spoj	X =
mezioblastní	$6\% \times L / 5000$ L [km] délka spoje
oblastní	$(2,5\% \div 1\%) \times L / 500$ L [km] délka spoje
místní	5 %
přístupové	8 %

Tabulka 9 Přepočítání hodnoty BER pro mezioblastní a oblastní sítě

Pro mezioblastní a oblastní sítě skutečná specifikace hodnoty BER by měla být přepočítána úměrně k délce spoje. Výchozí hodnota je dána v předcházející tabulce

Parametr poruchovosti mikrovlnných reléových komunikačních systémů

Parametr poruchovosti během roku by neměl překročit 0,06% na každých 500 km délky spoje. Z toho poruchy způsobené šířením by neměly přesáhnout 1/3. Parametr poruchovosti se lineárně přepočítává vzhledem k délce aktuálního spoje.

7.5 NÁVRH MIKROVLNNÉHO SPOJE

7.6 POSTUP NÁVRHU

7.6.1 Přehled

Návrh mikrovlnného spoje hlavně zahrnuje tyto tři hlediska:

- Volba trasy spoje, určení výšky antény, kontrola volného prostoru a výpočet hladiny přijímaného signálu.
- Určení uspořádání kmitočtů a polarizace.
- Odvození vlastností a parametrů spoje

7.6.2 Trasa spoje a výška antén

Principy volby trasy spoje

Nejprve na základě požadavku přímé viditelnosti musí být určena vzdálenost spolupracujících komunikačních bodů.

Aby byl vyloučen vliv hlubokého útlumu vlivem odrazu na vodních plochách a volných plochách země, je třeba se takových ploch vyvarovat. Pokud je to možné vybrat pro trasu členitý povrch a plně využít možností terénu.

Pokud nelze plochy s velkým odrazem vyloučit je vhodné na jedné straně spojení umístit anténu co nejvýše a na druhé straně co nejnižše. Bod odrazu se tak může posunout k nižší straně. Pokud to nepřinese úspěch, lze vybudovat umělou překážku k zamezení příjmu odražené vlny.

Aby bylo zajištěno spolehlivé spojení, nesmí být délka spoje moc velká. Závisí na použitém kmitočtu a aktuálním průřezu terénu. Pro mikrovlnný systém 10 GHz to bývá maximálně v rozmezí 30 ÷ 50 km.

Pro páteřní spoje je vhodné použít dvoukmitočtový systém a trasu spoje vést cik-cak.

Volba trasy by měla být založena na předpokládané organizaci celé sítě a existujících spojovacích bodech

Principy volby stanoviště stanic

Stanoviště mikrovlnné stanice by mělo být spíše v dostupném místě s možností přívodu napájecí sítě než v místě bez možnosti dopravy a zcela izolovaném.

Okolí by mělo být homogenní a mělo by být také bezpečné. Není vhodné např. nepevné skalnaté nebo poddolované podloží. Stanoviště by nemělo být v těsné blízkosti továren, které vypouštějí agresivní plyny, nebo produkují prach, popílek, smog a jiné nevhodné látky.

Při volbě stanoviště je nutné také brát ohled na bezpečnost zařízení z hlediska kriminality a také bezpečnosti požární.

Metody volby propojení spoje

- **Vnitřní příprava**

Hlavním úkolem této přípravy je návrh a zakreslení trasy spoje do mapy a prohlédnutí jeho průběhu. Může se použít mapy tištěných či elektronických s rozlišením alespoň 1:50000. Pečlivě se uváží umístění koncových stanic a možných stanic retranslačních a pak se celý spoj zakreslí. Vytvoří se seznam nivelačních dat profilu trasy. Určí se výška antén při jejich montáži na věž a překontroluje se z hlediska šíření vln prostupnost trasy. Je vhodné zvolit dvě i více variant a teprve jejich porovnáním určit trasu nejlepší a pro spojení nejvýhodnější.

- **Obhlídka místa**

Při obhlídce umístění mikrovlnné stanice se zkoumá možnost dopravy, geologické podmínky, životní podmínky, místní meteorologické podmínky a všeobecně i shodu mapy se skutečností. Na základě těchto údajů se upravuje původní návrh. Může z toho vyplýnout řada dalších požadavků a úkolů, které je ještě nutno rozhodnout.

Po obhlídce místa a celé trasy by měla následovat praktická zkouška. Ta není nutná, pokud je možné se opřít o zkušenosti s budováním obdobných tras v dané lokalitě. Pokud ale porovnání a odhad vlastnosti nové trasy není možný, je vhodné praktickou zkoušku vždy provést.

Na závěr se shrnou všechny okolnosti. Zkontroluje se, zdali navrhované spojení splňuje požadované technické parametry, zdali spojení splňuje podmínky provozu a možnosti běžného napájení.

Do této rozvahy je také nutno zahrnout ekonomické aspekty: Celkové nutné investice podle počtu budovaných stanic na trase, nutnost vybudovat jejich nezávislého napájení, nutnost stavby stožárů a také délka spojovacích kabelů.

Určení výšky antény

Na základě určení spojovací trasy, je nutno zvolit výšku montáže antény a provést výpočet průchodnosti mikrovlnné trasy. Pokud je nutné z hlediska spolehlivosti spojení uvažovat použití prostorové diverzity, pak je také nutné určit vedle polohy a výšky hlavní antény také polohu a výšku antény diverzní.

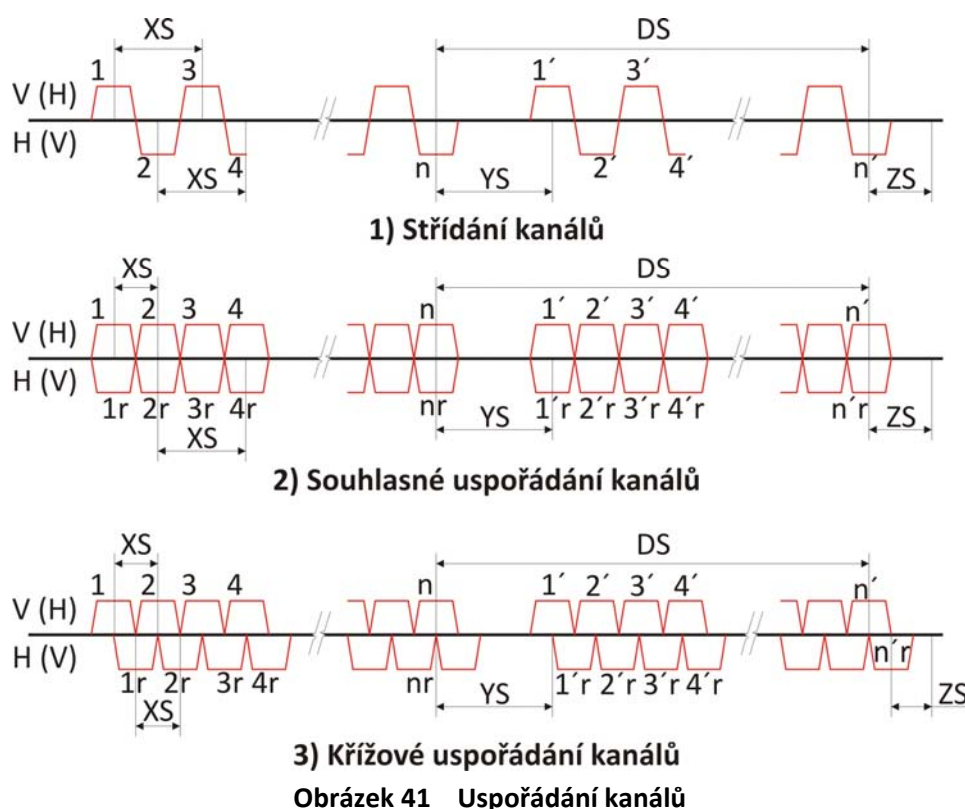
Výška montáže mikrovlnné antény musí zaručovat průchodnost mikrovlnné trasy a poblíž antény by neměly být žádné překážky šíření vln. Kontrolu nutno provést výpočtem podle zjištěného profilu trasy.

Pro větší odrazné plochy ve směru trasy (vodní plochy, roviny s větším koeficientem odrazu) je nutné zjistit, jestli se v nich nenachází bod odrazu vlny.

Antény by měly být montovány v rozdílné výšce. Rozdíl výšky montáže by měl být co největší, protože pomáhá odstranit kanálový a K únik. Pro mikrovlnné reléové spoje je výhodné montovat antény v uspořádání „vysoká – nízká - vysoká – nízká“.

8.1.2 Výběr kmitočtu a uspořádání polarizace

Taktikou pro tento výběr je zaručení plného využití stávajících kmitočtových možností a omezení možného vzájemného rušení v systému. Existují tři základní uspořádání kmitočtových kanálů, která vyhovují těmto principům.



Obrázek 41 Uspořádání kanálů

V obrázku znamená:

XS [MHz] vzdálenost středních kmitočtů sousedních kanálů stejné polarizace ve stejném směru spoje.

YS [MHz] vzdálenost středních kmitočtů nejbližších kanálů vysílače a přijímače

ZS [MHz] vzdálenost středního kmitočtu kanálů od okraje pásma. Pokud je horní a spodní rozdělení odlišné je ZS₁ spodní kmitočtový odstup a ZS₂ horní kmitočtový odstup.

DS [MHz] vzdálenost středních kmitočtů páru kanálů pro přijímač a vysílač.

8.1.3 Posouzení vlastností spoje

Existují dvě možnosti ocenění vlastností spoje. Jedna je založena na stupni provozuschopnosti spoje. Spoj nemusí být schopný provozu v důsledku úniku v šíření, poruchy zařízení nebo při poruše napájení. Porovnáním nalezených hodnot s hodnotami požadovanými se určí, zda spoj požadované parametry splňuje. Možnosti poruch přístrojů a napájení jsou různé a velice široké. V technické praxi se tento postup moc nepoužívá. Druhá možnost je stanovit jestli poruchovost splňuje požadavky založené na určení ztráty spojení pomocí SES (severe error second) nebo SESR (severe error second ratio). Stanovit poruchovost systému pouze vyžaduje stanovit vliv úniku v šíření mikrovln. Tato druhá metoda vyžaduje rozpracování následujících bodů:

- 1) Posouzení přijímané hladiny na základě vysílaného výkonu, ztráty v šíření a zisku antén. Výpočet rezervy na únik ze znalosti hodnoty přijímané hladiny a mezní citlivosti přijímače.
- 2) Posouzení poruchovosti přenosu systému na základě rezervy na únik, kmitočtové a prostorové diverzity, selektivního úniku a stanovení zda zjištěné hodnoty splňují požadavky na SES respektive SESR.

Určení mezní hladiny

Pro mikrovlnné systémy PDH je chybovost určena pomocí BER a určení systémových vteřin pro základní měření. Prostě v technické praxi je pouze nutné předpovědět možný SESR pro BER přesahující 10^{-3} . Výpočet se provádí postupy uvedenými v kap. 6)

Pro mikrovlnné systémy SDH je chybovost založena na blocích a blok je jednotkou pro základní měření vlastností systému. Požadavky na blok jsou vyšší, než na BER a tedy v technické praxi k předpovědi pravděpodobnosti SEBS je třeba předpovědět pravděpodobnost SESR pro hodnoty BER přesahující $10^{-5} \div 10^{-4}$.

Porovnání výpočtu a cílových hodnot

Při praktickém výpočtu se uvažuje únik způsobený absorpcí v plynech od 20 GHz do 40 GHz a předpokládá se jen únik plochý. Kmitočtově selektivní únik a ztráta spojení zaviněná interferencí jsou vzájemně nezávislé a mají koeficient korelace $\xi = 1$. Současně s tím lze předpokládat rozdíl mezi skutečně přijímanou hladinou a teoreticky vypočítanou hodnotou. Předpokládaný poměr přerušení bývá o $7 \div 10$ dB nižší než cílová hodnota to je $5 \div 10$ krát.

8. PŘÍLOHY

8.1 SEZNAM OBRÁZKŮ

Rozdělení mikrovlnného spektra	1	Znázornění faktoru K vzhledem	
Uspořádání kmitočtového pásma	2	k poloměru zeměkoule	30
obecné schéma digitálního mikrovlnného systému	3	Rozdělení ohybu paprsků podle faktoru K	31
Struktura digitálního mikrovlnného přenosu	5	Absorbční ztráty	33
Parabolické antény ALCOMA s ODU	6	Vliv intenzity deště na útlum pro různé vlnové délky	34
Vnitřní bloková struktura ODU	9	Hustota pravděpodobnosti Rayleighova rozdělení	36
Blokové schéma vysílače	10	Mf laditelný adaptivní ekvalizer	42
Blokové schéma přijímače	11	princip mf adaptivního přenosového ekvalizéru	44
Blokové schéma SDIDU	13	Princip XPIC	45
Instalace paraboly s ODU na nosnou trubku	14	Princip ATPC	45
Vyzařování antény	14	ATPC	46
Směrování spoje	14	Úhlová diverzita	47
Typy mikrovlnných sítí	15	Schematické znázornění prostorové diverzity	49
Pasivní retranslační stanice	16	Horká záloha	51
Uspořádání pasivní retranslace	16	HSB	52
Fresnelova zona	22	HSB + FD	52
Ztráty za ostrou překážkou	24	HSB + SD	52
Odraz od země	24	N+1	52
Odrazové ztráty	27	Volný prostor v blízké zóně	68
Určení činitele terénu μ	28	Možnosti rušení ve 2 a 4 kmitočtovém přenosu	70
Závislost útlumu na μ	29	Uspořádání kanálů	76

8.2 SEZNAM TABULEK

Fyzikální hledisko pro zařízení	41
Fyzikální hledisko pro systém	41
Funkční hledisko	41
Klasifikace zálohovacích modů	51
Typy spojů podle chybovosti	72
Požadavky na chybovost spoje	73
Index výpadku mikrovlnného spoje	73
Specifikace BER v mikrovlnných systémech SDH	74
Přepoččet hodnoty BER pro mezioblastní a oblastní síť	74

ALCOMA a.s. | Vinšova 11 | CZ 106 00 Praha 10
Tel: +420 267 211 111
E-mail: alcoma@alcoma.cz