

Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky

Měření koaxiálních kabelů a antén

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

České Budějovice 2010

Vedoucí práce: Ing. Michal Šerý

Autor: Zdeněk Zeman

Anotace

Práce se zabývá problematikou měření koaxiálních kabelů a antén. Úvod práce obsahuje teoretický popis fyzikálního principu, v další části je popis jednotlivých měření a detekce závad. Práce je doplněna popisem přístroje a na závěr je přiložen popis postupu měření a vyhodnocení výsledků s vypracováním výstupních měřících protokolů.

Annotation

The work deals with measurement of coaxial cables and antennas. The introduction contains a theoretical description of the physical principle, in the next section there is a description of the device and the conclusion is accompanied by a description of the process of measuring and evaluating the results of measuring the output with the development of protocols.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

Datum, podpis

Touto formou děkuji svému vedoucímu bakalářské práce p. Ing Michalu Šerému
za cenné rady a připomínky při zpracování mé práce.

OBSAH

1	Shrnutí	6
2	Šíření elektromagnetických vln	6
2.1	Úvodní poznatky	6
2.2	Základní veličiny charakterizující elektromagnetické pole	6
2.3	Přehled základních rovnic a vztahů elektromagnetického pole	9
2.4	Přenos elektromagnetické vlny anténou	10
2.5	Šíření rovinné elektromagnetické vlny v prostředí	10
2.6	Šíření kulové elektromagnetické vlny v prostředí	12
2.7	Polarizace elektromagnetické vlny	12
2.8	Šíření elektromagnetické vlny v blízkosti dvou rozhraní	13
2.9	Šíření elektromagnetické vlny při povrchu Země	14
2.10	Vyzařování a příjem elektromagnetických vln anténami	15
3	Měření kabelových a anténních systémů	16
3.1	Úvod	16
3.2	Reflektometrie ve frekvenční oblasti	16
3.3	Útlum odrazu (RL) a poměr stojatých vln (VSWR)	17
3.4	Útlum kabelů	20
3.5	Útlum odrazu v systému v závislosti na útlumu kabelu	21
3.6	Vzdálenost poruchy (DTF)	23
3.7	Rozlišení chyby, rozlišení displeje a max. vzdálenosti	24
3.8	Výpočet měření (DTF)	26
3.9	Interpretace měření (DTF)	28
4	Praktický návod měření na koaxiálních kabelech a anténách	32
4.1	Specifikace měřené technologie	32
4.2	Požadovaná měření	33
4.3	Postup měření	33
4.4	Popis menu měřicího přístroje Site Master S331C	37
5	Závěr	42
6	Použité zdroje	44
7	Přílohy	45

1 Shrnutí

Cílem mé práce je popsat problematiku měření koaxiálních kabelů a antén používaných v provozu základnových stanicích pro mobilní telekomunikace ve frekvenčním pásu 300 MHz až 2 GHz s použitím měřicího přístroje Site Master S332C. Dále chci poskytnout návod pro provádění jednotlivých měření, lokalizaci závady a vypracování závěrečného měřicího protokolu.

2 Šíření elektromagnetických vln

2.1 Úvodní poznatky

Pro studium problémů v oboru vyzařování, šíření a příjmu elektromagnetických vln je nutná znalost základních elektromagnetických jevů. S naší další problematikou nejtěsněji souvisí především šíření různých typů vln v homogenním izotropním prostředí, rozptyl a ohyb elektromagnetických vln a další.

2.2 Základní veličiny charakterizující elektromagnetické pole

Elektromagnetické pole je jednou z forem existence hmoty. Projevuje se zejména svými silovými účinky na nabitá tělesa (elementární částice) a je též nositelem energie. Mikroskopickými vlastnostmi elektromagnetického pole se zabývá kvantová elektrodynamika. Naše úvahy se však budou vztahovat na makroskopické účinky elektromagnetického pole. Všechny zákony elektromagnetického pole budou formulovány v inerciální vztažné soustavě Σ , k níž vztahujeme všechny polohy i pohyby uvažovaných těles.

Silové účinky elektromagnetického pole na bodový náboj Q , nacházející se v klidu, charakterizujeme intenzitou elektrického pole

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{Q} \quad (1)$$

kde \vec{F}_e je síla působící na kladný náboj Q . Obecně je $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}, t)$. (2)

Jednotkou intenzity elektrického pole je $\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$. Dá se ukázat, že $\text{N}\cdot\text{C}^{-1} = \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$. Intenzita elektrického pole charakterizuje účinky elektrické složky elektromagnetického pole na náboj. Elektrické náboje vytvářejí elektrické pole. Tento účinek nábojů vystihuje vektor \vec{D} . Od vektoru \vec{D} požadujeme, aby splňoval Gaussovu větu elektrostatiky

$$\oint_{(S)} \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q \quad (3)$$

kde Q je celkový volný náboj uvnitř uzavřené plochy. (Volný náboj je takový, který je možno z uvažované oblasti převést na jiné těleso.) Jednotkou pro \vec{D} je $C \cdot m^{-2}$.

Vzájemnou souvislost vektorů \vec{E} , \vec{D} si ukážeme na příkladu bodového náboje ve vakuu.

Bodový náboj velikosti Q umístíme v počátku soustavy souřadnic a plochu S volíme ve tvaru koule se středem v počátku a s poloměrem r . Potom z důvodů symetrie musí být

$$\int \vec{D} \cdot d\vec{S} = 4\pi r^2 D = Q \quad (4)$$

tedy

$$\vec{D} = \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (5)$$

ve vakuu však i silový účinek klesá se čtvercem vzdálenosti (Coulombův zákon). Proto je přirozené pořadovat kolinearitu obou vektorů. Píšeme

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (6)$$

ϵ_0 se nazývá permitivitou vakua a její hodnota je $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

V experimentální fyzice se dále ukazuje, že izotropní, nevodivé prostředí zeslabuje silové účinky mezi náboji. Zavádíme proto pojem relativní permeability ϵ_r , která splňuje vztah

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (7)$$

Jestliže se nějaký bodový náboj pohybuje v elektromagnetickém poli, přistupuje k elektrické síle ještě magnetická síla \vec{F}_m , kterou můžeme od elektrické síly odlišit tím, že závisí na vektoru rychlosti. V daném bodě prostoru nalezneme směr, v němž při pohybu náboje je síla \vec{F}_m největší. Zavedeme vektor \vec{B} tak, že jeho velikost je

$$|\vec{B}| = \frac{(F_m)_{\max}}{Qv}, \quad Q > 0 \quad (8)$$

Směr vektoru \vec{B} je kolmý k rovině, určené vektory $(\vec{F}_m)_{\max}$ a \vec{v} , a orientace taková,

aby vektory \vec{v} , \vec{B} , \vec{F}_m tvořily pravotočivý trojhran. Vektor \vec{B} charakterizuje silové účinky elektromagnetického pole na pohybující se náboj. Vektor \vec{B} se nazývá magnetickou indukcí. Jednotkou magnetické indukce je 1T (tesla). $1\text{T} = \text{N}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$.

Magnetické účinky elektrického proudu charakterizuje vektor intenzity magnetického pole \vec{H} . Vektor \vec{H} musí splňovat zákon celkového proudu

$$\oint_{(c)} \vec{H} \cdot d\vec{s} = I, \quad (9)$$

kde I je celkový proud obepjatý křivkou (c) .

K určení souvislosti vektorů \vec{B} a \vec{H} použijeme situaci, že přímým vodičem protékaným proudem I obepíná kružnice v rovině kolmé na proudovodič o poloměru r a se středem v něm. Vzhledem k symetrii je

$$\oint_{(c)} \vec{H} \cdot d\vec{s} = 2\pi r H = I \quad (10)$$

a odtud

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (11)$$

Experimentálně bylo zjištěno, že i silové účinky mezi proudovodiči klesají se vzdáleností nepřímo úměrně. Proto je přirozené položit

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (12)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua. Její hodnota vyplývající z definice ampéru je $4\pi \cdot 10^{-7} \text{H}\cdot\text{m}^{-1}$. Jednotkou intenzity magnetického pole je $1 \text{A}\cdot\text{m}^{-1}$.

V izotropním látkovém prostředí jsou silové účinky mezi proudovodiči závislé na vlastnostech tohoto prostředí, což vystihuje veličina relativní permeabilita μ_r , tak, že

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}. \quad (13)$$

V diamagnetických a paramagnetických látkách je $\mu_r \rightarrow 1$. Látky feromagnetické jsou charakterizovány závislostí $\mu_r(H)$ a jejími vysokými hodnotami.

Shrneme-li elektrické i magnetické účinky pole na objemový element V , nesoucí náboj $\Delta Q = \rho \cdot V$

a pohybující se rychlostí \vec{v} , přicházíme k Lorenzovu vztahu

$$\vec{F} = \rho \cdot V \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}). \quad (15)$$

Uvažujeme-li o ustáleném proudu v homogenním vodiči, přijdeme k závěru, že proudová hustota \vec{J} je funkcí intenzity elektrického pole \vec{E} . Experimentální studium chování vodičů přivedlo Ohma k závěru, který lze v naší terminologii vyjádřit tak, že proudová hustota je přímo úměrná intenzitě elektrického pole

$$\vec{J} = \gamma \cdot \vec{E} \quad (\text{diferenciální tvar Ohmova zákona}) \quad (16)$$

skalární veličina γ se nazývá měrnou vodivostí a je podle tvrzení Ohmova zákona konstantou. Platnost tohoto zákona je značně omezená. Přesto jej velmi často užíváme ke stanovení souvislosti obou uvedených vektorů. [1]

2.3 Přehled základních rovnic a vztahů elektromagnetického pole

1.2.1 Diferenciální rovnice pole:

1. série Maxwellových rovnic

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (17)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (18)$$

2. série Maxwellových rovnic

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (19)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (20)$$

Interpretace:

17. Zákon celkového proudu
18. Gaussova věta elektrostatiky
19. Faradayův indukční zákon
20. Neexistence magnetických monopolů

Platnost: universální

Definiční vztahy

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (21)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \vec{H} + \vec{j} \quad (22)$$

Platnost: látková prostředí v klidu [2]

2.4 Přenos elektromagnetické vlny anténou

Elektromagnetická vlna, pozorovaná dostatečně daleko od jakékoliv antény v homogenním izotropním prostředí, je vždy vlnou kulovou. Vlnoplochy jsou soustředné koule a jejich střed se nazývá fázovým středem antény. Je-li anténa zcela všesměrová (izotropní), září do všech směrů stejně a intenzity pole jsou ve všech bodech vlnoplochy stejné (vlna uniformní). Většinou vysílací anténa září do různých směrů ve svém okolí různě a pak intenzity polí na jedné vlnoploše jsou různé (vlna není uniformní, ale zůstává kulová).

Vlny šířící se v různých podmínkách se mohou lišit také svojí strukturou, konkrétně prostorovou orientací vektoru intenzity elektrického pole \vec{E} a intenzity magnetického pole \vec{H} vůči směru šíření vlny. Ve volném homogenním prostředí a na vícedrátových vedeních se mohou šířit jen tzv. příčné elektromagnetické vlny (TEM), u nichž vektory \vec{E} a \vec{H} leží v rovině kolmé na směr šíření. Ve vlnovodech a v některých méně běžných prostředích vznikají vlny, u nichž jeden z vektorů (\vec{E} nebo \vec{H}) má také složku ve směru šíření vlny. Jsou to příčně elektrické vlny (vlna TE, vektor \vec{H} má složku ve směru šíření), nebo příčně magnetické vlny (vlny TM), u nichž není na směr šíření kolmý vektor \vec{E} .

Zakřivení kulové vlnoplochy ve velkých vzdálenostech od zdroje záření je malé. Pozorujeme-li tuto vlnoplochu jen v dosti malé části prostoru, můžeme ji považovat pro mnoho aplikací za vlnu rovinnou.

2.5 Šíření rovinné elektromagnetické vlny v prostředí

Při šíření rovinné vlny v homogenním izotropním prostředí jsou vektory \vec{E} a \vec{H} kolmé nejen na směr šíření, ale jsou kolmé i vzájemně. Pro snazší popis se někdy zavádí pojmy rovina E jako rovina, v níž leží vektor \vec{E} a obdobně rovina H, ve které leží

vektor \vec{H} . Uvažujme nyní vlnu harmonickou v čase, u které se intenzity pole \vec{E} a \vec{H} mění podle sinusového zákona s uhlovým kmitočtem ω . Ve směru šíření se mění v obecném případě amplitudy intenzit polí i jejich fáze. Závislost fázoru intenzity elektrického pole $\vec{E}(r)$ na vzdálenosti r můžeme popsat rovnicí

$$\vec{E}(r) = \vec{E}(r=0) \cdot e^{-k''r} \cdot e^{-jk'r}, \quad (23)$$

kde měrná fáze k' a měrný útlum k'' jsou složkami vlnového čísla $k = k' - jk''$. (24)

Měrná fáze (fázová konstanta k' [rad.m⁻¹] udává zpoždění fáze vlny při jejím šíření na dráze 1 m ve směru šíření, měrný útlum (konstanta útlumu) k'' [dB.m⁻¹] udává strmost exponenciálního poklesu amplitudy vlny se vzdáleností r . Při numerických výpočtech musíme dosazovat měrný útlum k'' ve starších jednotkách neper.m nebo doplnit exponent převodním činitelem. Měrná fáze i měrný útlum závisí na permitivitě ε , permeabilitě μ a na měrné vodivosti γ prostředí a na kmitočtu vlny ω . V tzv. ideálním dielektriku ($\gamma = 0$, ε , μ reálné) je měrný útlum $k'' = 0$ a amplituda intenzity pole zůstává ve směru šíření stálá. Ve vakuu a prakticky i ve vzduchu, kde $\varepsilon_r = \mu_r = 1$, platí $k = k' = 2\pi \cdot \lambda_0^{-1}$. (25)

Amplituda i fáze intenzity magnetického pole \vec{H} se mění při šíření stejně jako amplituda a fáze intenzity elektrického pole \vec{E} . Poměr amplitud \vec{E} a \vec{H} je tedy stálý a nazývá se vlnovou (charakteristickou) impedancí prostředí \vec{Z}_0 . V ideálním dielektriku je vlnová impedance \vec{Z}_0 reálná a tudíž intenzity polí \vec{E} a \vec{H} jsou ve fázi. Ve vakuu a prakticky i ve vzduchu je poměr \vec{E} a \vec{H} roven $120 \pi \Omega \approx 377 \Omega$. (26)

Prostředí s nenulovou vodivostí nebo komplexní permitivitou či permeabilitou má vlnovou impedanci komplexní, vlna je při šíření tlumena a v témže místě prostoru jsou intenzity polí \vec{E} a \vec{H} fázově posunuty.

Okamžité hodnoty intenzit polí závisí ještě na čase. Pro intenzitu elektrického pole \vec{E} pak platí

$$\vec{E}(t, r) = \vec{E}(t=0, r=0) \cdot e^{-k''r} \cdot e^{-jk'r} \cdot e^{+j\omega t}. \quad (27)$$

Obdobný vztah platí i pro intenzitu magnetického pole \vec{H} .

Všimněme si, že závislost fáze vlny v obou časově prostorových souřadnicích (t, r) je stejná; rozdíl je jen ve znaménku a v konstantě (ω, k'). Říkáme, že vlna je harmonická v čase a v prostoru. Stav téže fáze ($\omega t - k'r = \text{konst}$) (28)

se posunuje tzv. fázovou rychlostí v_f ve směru šíření. Fázová rychlost je početně zavedenou veličinou, která bezprostředně nesouvisí s přenosem energie a může tedy nabývat libovolně velkých hodnot. Ve vakuu (μ_0, ϵ_0) a prakticky i ve vzduchu je fázová rychlost rovna rychlosti $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Délka vlny λ je vzdáleností, na které se fáze vlny zpozdí o úhel 2π ($k \cdot \lambda = 2\pi$), nebo kterou proběhne jistá fáze za dobu periody T ($v_f \cdot T = \lambda$). Ve vakuu platí, že $\lambda_0 = c \cdot f^{-1}$. (29)

2.6 Šíření kulové elektromagnetické vlny v prostředí

Zkoumáme-li vlnění na celé trase, zahrnující i zdroj, není možné zanedbat zakřivení vlnoploch a vlnu musíme považovat za kulovou. Při šíření kulové vlny závisí fáze intenzit polí na vzdálenosti stejně jako u rovinné vlny. Velikost vlnoplochy se však při šíření vlny od zdroje zvětšuje a intenzita pole klesá v důsledku ředění energie vlny i při jejím šíření v ideálním dielektriku (které vlně neodčerpává energii a tedy ji netlumí). Hustota energie se mění stejně jako velikost (plocha) vlnoplochy se čtvercem vzdálenosti od zdroje, a proto intenzita pole kulové vlny klesá nepřímo úměrně první mocnině této vzdálenosti. Pro kulovou vlnu v ideálním dielektriku tedy platí

$$\vec{E}(r) = \frac{\text{konst}}{r} \cdot e^{-jk'r} . \quad (30)$$

Velikost konstanty v čitateli (30) závisí na vlastnostech zdroje záření a její určení je jedním z úkolů při studiu vyzařování antén. Pro lineární antény známe její vyjádření součinem proudu v kmitně \vec{I}_m a funkce záření $\vec{F}(v, \varphi)$ ve tvaru 60. $\vec{I}_m \cdot \vec{F}(v, \varphi)$.

2.7 Polarizace elektromagnetické vlny

Polarizace vlny udává orientaci vektoru intenzity elektrického pole \vec{E} vůči rovině dopadu. Rovina dopadu je rovina proložená směrem šíření a kolmá na rovinu rozhraní. Při kolmé (horizontální) polarizaci vlny je vektor intenzity elektrického pole \vec{E} kolmý na rovinu dopadu, při rovnoběžné (vertikální) polarizaci je vektor \vec{E} s rovinou dopadu rovnoběžný. Obecně nemusí být orientován vektor \vec{E} tak, že splňuje jednu z uvedených podmínek. Vždy však může být rozložena složku kolmou k rovině dopadu a na složku s touto rovinou rovnoběžnou. Vlna má pak složku polarizovanou horizontálně i složku polarizovanou vertikálně.

Pojem polarizace vlny se užívá ještě v jiném významu v souvislosti s rozkladem vektoru intenzity elektrického pole na dvě pravouhlé složky \vec{E}_v a \vec{E}_h . Jsou-li složky \vec{E}_v a \vec{E}_h ve fázi, pohybuje se koncový bod výsledného vektoru \vec{E} po přímce a vlnu označujeme jako lineárně polarizovanou. Nejsou-li tyto složky ve fázi, pohybuje se (během jedné periody) koncový bod vektoru \vec{E} po elipse. Vlna je polarizována elipticky. Zvláštním případem je polarizace kruhová ($\vec{E}_v = \vec{E}_h$, fázový posuv 90°). Eliptická nebo kruhová polarizace může být levotočivá nebo pravotočivá. Smysl otáčení vektoru \vec{E} se posuzuje při pohledu ve směru šíření.

2.8 Šíření elektromagnetické vlny v blízkosti dvou rozhraní

Při šíření elektromagnetické vlny v blízkosti rozhraní dvou různých prostředí dochází k dalším fyzikálním jevům, které lze klasifikovat buď jako odraz, ohyb nebo rozptyl.

Na hladké, rovinné a nekonečně rozlehlé ploše rozhraní může dojít k odrazu vlny ve smyslu geometrické optiky. Zákony odrazu zůstávají přibližně v platnosti i tehdy, je-li plocha rozhraní konečná, ale mnohonásobně větší než délka vlny, pokud se ovšem zajímáme jen o pole v blízkosti ozářené strany, dosti daleko od okrajů. Dopadá-li rovinná vlna na rovinné rozhraní dvou prostředí, štěpí se na vlnu odraženou a na vlnu vnikající do druhého prostředí. Intenzitu pole odražené vlny vypočteme násobením intenzity pole dopadající vlny Fresnelovým činitelem odrazu $\rho_{v,h}$. Fresnelův činitel odrazu je obecně komplexní číslo, při odrazu se mění nejen amplituda, ale i fáze vlny. Tento činitel závisí na parametrech obou prostředí, na úhlu dopadu vlny, na kmitočtu a na polarizaci dopadající vlny. Fresnelův činitel odrazu umožňuje vypočítat intenzitu pole odražené vlny přímo na rozhraní. K určení intenzit ve větších vzdálenostech od rozhraní musíme vzít k úvahu další fázové, případně i amplitudové změny vlivem šíření vlny a ve všech bodech nad rozhraním i sečítání dopadající a odražené vlny. Jedná-li se v úloze o pole v blízkosti neozářené strany plochy konečných rozměrů, o pole v blízkosti okrajů nebo naopak o pole ve velkých vzdálenostech, a také jsou-li rozměry plochy (libovolného tvaru) srovnatelné s délkou vlny, klasifikujeme jevy jako difrakci (ohyb) elektromagnetické vlny. Příkladem je třeba ohyb vlny za terénní překážku, ohyb na kulovitěm povrchu Země, na různých částech povrchu vozidla apod. Ohyb

elektromagnetických vln nelze vysvětlit geometrickou optikou a difrakční úlohy jsou řešitelné pouze metodou vlnové optiky.

Není-li rozhraní obou prostředí hladké (rozměry nerovností nejsou velmi malé vůči vlnové délce, povrch je drsný), dochází k rozptylu dopadajícího vlnění. Drsný povrch je zdrojem sekundárního záření, které je vyzařováno s různou intenzitou obecně do všech směrů. Mezní velikost nerovností můžeme určit Rayleighovým kritériem, které považuje za přijatelný rozdíl fází vln, odražených na vrcholech a v patách nerovností, menší než 45° . Jako rozptyl se někdy označuje také odraz od většího počtu ploch, náhodně situovaných vůči směru dopadající vlny (např. v radiotelefonii) nebo difrakce na větším počtu náhodně situovaných těles (např. při šíření rozptylem).

Šíření elektromagnetických vln můžeme chápat jako součást interakce vysílací a přijímací antény. Při jeho studiu vyšetřujeme veškeré změny (amplitudové, fázové, polarizační aj.), jimž elektromagnetické vlnění mezi vysílací a přijímací anténou podléhá. Na tomto procesu, který probíhá v celém prostoru, se vzdálené oblasti podílí jen málo a hlavní význam mají vlastnosti prostředí v okolí spojnice obou antén. Pojem okolí však může být jak z kvalitativního, tak i z kvantitativního hlediska značně relativní.

2.9 Šíření elektromagnetické vlny při povrchu Země

Většina spojů probíhá při Zemi, takže se především zajímáme o situace, kdy se vlny šíří při povrchu Země nebo v její blízkosti. Podmínky jsou zde velmi složité. Je tu rozhraní dvou výrazně odlišných prostředí, z nichž jedno (země) mění své elektrické parametry (tj. permitivitu a měrnou vodivost) v širokých mezích a druhé, atmosféra, se svými elektrickými vlastnostmi blíží vakuu, ale to jen na první pohled. Atmosféra není totiž v důsledku změn tlaku, teploty a vlhkosti homogenní, ve větších výškách je částečně ionizována a obě tyto skutečnosti podstatně ovlivňují šíření elektromagnetických vln. Samotné rozhraní je v makroskopickém pohledu kulovité, v detailech však hrubě i jemně členité, kryté porostem apod.

Není možné ani technicky účelné respektovat vždy všechny tyto faktory v plné šíři. Podle konkrétních podmínek musíme vždy některé, v dané situaci méně významné, zcela vyloučit z úvahy, a tak zjednodušit problém. Tak dochází k třídění způsobů (mechanismů) šíření elektromagnetických vln nad Zemí.

Při rádiovém spojení se mohou vlny šířit v obecném případě různými způsoby. Obvykle však bývá jeden z nich dominující. Vlna šířící se tímto způsobem má nejmenší útlum a přenáší k přijímači relativně největší výkon. Vlastnosti rádiového spoje jsou pak prakticky určeny vlastnostmi dominujícího způsobu šíření. O tom, který ze způsobů je dominující, rozhodne především kmitočet, délka trasy, druh a umístění antény, vlastnosti zemského povrchu a ionosféry a v menší míře některé další faktory.

2.10 Vyzařování a příjem elektromagnetických vln anténami

Anténa je jedním ze základních prvků radiokomunikačního řetězce. V běžném technickém významu je prvkem, který zabezpečuje vyzařování a příjem elektromagnetických vln. U některých systémů se také podílí na zpracování přenášené informace.

Obecná definice považuje anténu za prvek, který transformuje elektromagnetické vlnění, šířící se podél napáječe, na vlnění ve volném prostoru. Přijímací anténa pak plní funkci opačnou. V technickém smyslu patří k anténě nejen její činné části, které se přímo na transformaci podílejí, ale i ostatní součásti a konstrukční prvky, které jsou nutné z hlediska mechanické pevnosti, stability, pohybu apod. Součástí antény se mohou stát i jiné prvky, např. napájecí a přizpůsobovací obvody nebo i složitější elektronické obvody.

V praxi se používá mnoho různých druhů a typů antén, které lze třídit podle různých hledisek. Např. podle funkce (vysílací, přijímací antény), podle kmitočtového pásma (dlouhovlnné, středovlnné,...), podle směrových účinků (všesměrové, směrové, ostře směrové antény) i podle jiných parametrů (úzkopásmové, širokopásmové antény). Jiná kritéria třídění mohou být např. podle způsobu buzení (symetrické, nesymetrické) nebo podle povahy zdrojů (lineární, plošné, magnetické antény).

Přístup ke studiu antén je převážně analytický. Anténa je zadána co do tvaru, rozměrů a způsobu buzení a vyšetřujeme její vlastnosti. Jsou to především její směrové účinky při příjmu, vstupní impedance, účinnost, zisk aj. Ze zobecněných výsledků mnoha takových analýz je pak možné formulovat technické postupy a doporučení pro návrh antény. Přímá syntéza antény (navrhnout přímo tvar a rozměry antény podle daných parametrů) je možná jen omezeně.

Fyzikální proces, který probíhá ve vysílací anténě, je vyzařování. Z teorie elektromagnetického pole víme, že zdrojem elektromagnetického vlnění je střídavý (vysokofrekvenční) proud. [1]

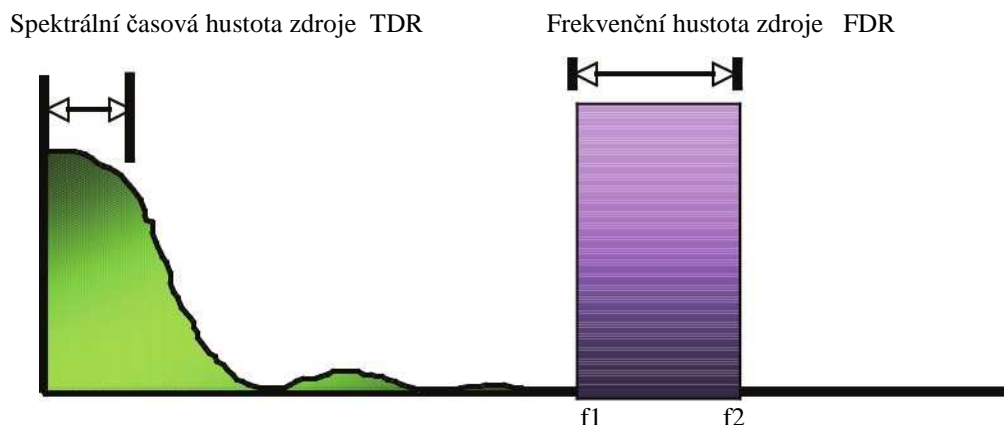
3 Měření kabelových a anténních systémů

3.1 Úvod

Anténní a kabelové soustavy jsou nezbytnou součástí pro celkový chod provozu mobilních základnových stanic. Zhoršené parametry antén, vadné antény nebo poškozené koaxiální kabely mohou vést ke snížení vyzářeného výkonu, což má za následek zhoršené podmínky pro uskutečnění hovorů či dokonce jejich přerušení. To má za následek nespokojenost zákazníků a v konečném důsledku může vést i ke snížení zisku společnosti. Anténní a kabelové soustavy nelze pro jejich umístění snadno vyměnit, jak to lze udělat u jiného druhu technologie mobilních základnových stanic. Proto je velmi důležitou součástí detekce závad, měření a následně případná oprava. V současnosti se specialisté v terénu při analýze a diagnostice závad, charakteru a řešení oprav spoléhají na přenosné kabelové a anténní analyzátoři.

3.2 Reflektometrie ve frekvenční oblasti

Většina dnes rozšířených analyzátoři používá k diagnostice anténního systému techniku reflektometrie ve frekvenční oblasti FDR (Frequency Domain Reflektometry). Tato technika využívá RF – frekvencí (Radio Frequency) k analýze dat, umožňuje lokalizovat změny a snížení výkonu na dané frekvenci. Analyzování dat ve frekvenční oblasti umožňuje uživatelům detekci i malých poklesů výkonu či změn v systému, čímž lze často předejít vážným selháním. Další velkou předností využívání analýzy pomocí frekvenčního přeladování je, že antény jsou testovány na frekvencích, na kterých reálně pracují a signál projde přes frekvenčně selektivní zařízení, jako jsou např. filtry, čtvrtvlnné přepěťové ochrany antén nebo duplexory, které jsou běžné v buňkových anténních systémech. Hlavní výhodou technologií založených na FDR oproti reflektometrii v časové oblasti TDR (Time Domain Reflektometry) je, že zdroj energie je v daném pásmu mnohem silnější, což vede k větší citlivosti a tím také ke zvýšení pravděpodobnosti nalezení malých problémů před tím, než se stanou velkými.

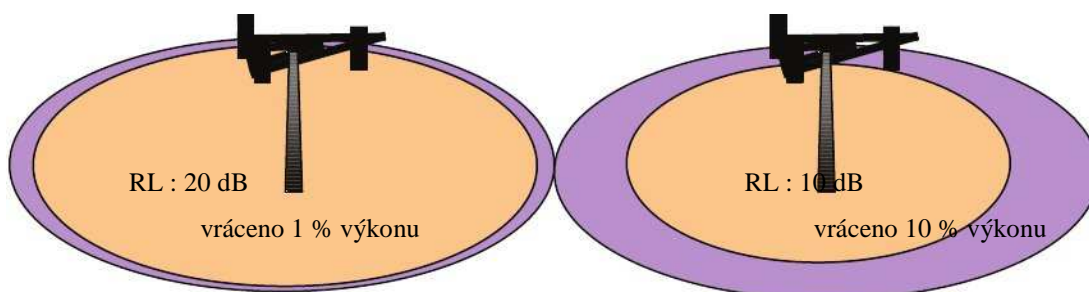


Obrázek č.1 – Spektrální rozložení hustoty energie TDR a FDR

3.3 Útlum odrazu (RL) a poměr stojatých vln (VSWR)

Měření útlumu odrazu (RL – Return Loss) a napěťového poměru stojatých vln (VSWR – Voltage Standing Wave Ratio) patří ke klíčovým metodám pro anténní měření v terénu. Z výsledků lze hodnotit stupeň přizpůsobení systému, který musí odpovídat technickým specifikacím. Problémy zjištěné během testování znamenají, že systém nefunguje zcela správně, což může mít dopad na koncového uživatele. Špatně přizpůsobená anténa odráží drahou vysokofrekvenční energii, která se místo vyzáření vrací zpět k vysílači. Tato energie zkreslí signál šířící se ve správném směru k anténě a tím ovlivní účinnost celého systému při vysílání a velikost oblasti pokrytí signálem.

Např. Je-li v systému naměřena hodnota útlumu odrazu 20 dB, je takový systém považován za velmi účinný, tj. jen 1 % výkonu se odrazí a 99 % je vyzářeno. Pokud je ale útlum 10 dB, tak se odrazí zpět k vysílači 10 % výkonu. Různé systémy mohou mít různé hodnoty akceptovatelného útlumu odrazu – pro kabelové a anténní systémy je obvykle tato limitní hodnota 15 dB a nebo lepší.



Obrázek č.2 - Ukázka různého koeficientu útlumu zpětného odrazu

Anténní systémy mohou selhat z mnoha důvodů – špatně instalované konektory (např. znečištěné), poškozené koaxiální kabely a vadné antény.



Obrázek č.3 - Poškození kabelového vedení

Útlum odrazu a VSWR udávají přizpůsobení systému, ale každý jiným způsobem. Útlum odrazu udává poměr odraženého výkonu k referenčnímu výkonu v decibelech (dB). Toto zobrazení je obvykle preferovanější kvůli výhodám, které poskytuje logaritmické měřítko. Jednou z výhod je možnost snadného porovnání hodnot ve velkém rozsahu.

Hodnoty při měření útlumu odrazu se obvykle nacházejí v rozsahu od 0 dB do 60 dB. Hodnota 0 dB odpovídá zkratu nebo otevřenému konci a 60 dB by bylo téměř dokonalé přizpůsobení. Oproti RL zobrazuje VSWR přizpůsobení systému v lineárním měřítku. VSWR měří poměr napětíových maxim a minim. Pokud je systém špatně přizpůsoben maxima a minima odraženého signálu budou ovlivňovat signál přenášený. Čím větší bude tento poměr, tím horší je přizpůsobení. Pokud je VSWR 1:1 znamená to dokonalé přizpůsobení systému. Praktická hodnota VSWR pro anténní a kabelové systémy je 1,43 (15 dB). Výrobci antén typicky udávají přizpůsobení jako uváděný poměr stojatých vln. Jeho rozsah se obvykle standartně nachází mezi 1 a 65. Převod mezi VSWR a RL lze provést přepočtem:

$$VSWR = (1 + 10^{-RL/20}) / (1 - 10^{-RL/20}); \quad (31)$$

$$RL = 20 \log [(VSWR + 1) / (VSWR - 1)]. \quad (32)$$



Obrázek č.4 - Průběh měření útlumu zpětného odrazu

Na obr. 4 je průběh měření útlumu zpětného odrazu buňkové antény přizpůsobené mezi 806 MHz a 896 MHz. Rozsah amplitudy RL je od 0,5 dB do 28 dB.



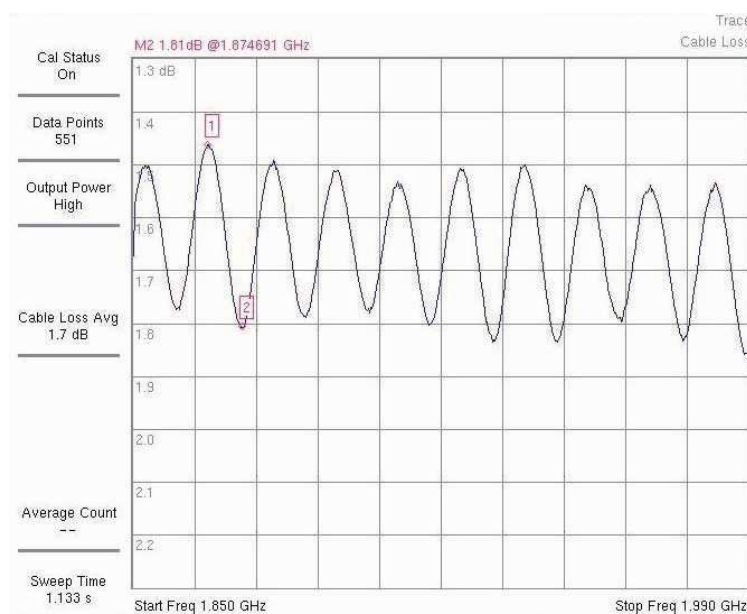
Obrázek č.5 - Zobrazení poměru stojatých vln

VSWR je zobrazeno na obr. 5. Jedná se o měření stejné antény a zobrazované měřítko amplitudy je ve shodě s připojením pro RL. Tyto dva grafy ilustrují vztah mezi VSWR a RL.

$$8,84 \text{ dB RL} \leftrightarrow 2,15 \text{ VSWR} \quad (33)$$

3.4 Útlum kabelů

Průchodem signálu přenosovou trasou je část energie ztracena v kabelech a dalších prvcích přenosové trasy. Aby se zabránilo nestandardnímu chování systému způsobenému tímto jevem je nutné při instalaci změřit útlum kabelů. Měření provádíme přenosným vektorovým síťovým analyzátozem nebo měřičem výkonu. Útlum kabelu může být měřen metodou měření útlumu odrazu (funkce analyzátoru). Při zapojení kabelu na krátko se signál odrazí zpět a díky tomu lze vypočítat ztracenou energii v kabelu. Výrobci měřících zařízení doporučují změřit průměrnou hodnotu útlumu kabelu pro široké pásmo frekvencí. Tuto hodnotu dostaneme tak, že vydělíme rozdíl maxima a minima dvěma v případě měření útlumu kabelu – CL (Cable Loss), nebo čtyřmi v případě měření útlumu odrazu – RL (Return Loss). Uvažujeme s šířením signálu oboustraně. Většina dnešních kabelových a anténních analyzátorů obsahuje možnost měření útlumu kabelů zobrazením průměrného útlumu v širokém frekvenčním pásmu. Použitím této metody není třeba dále už nic počítat.

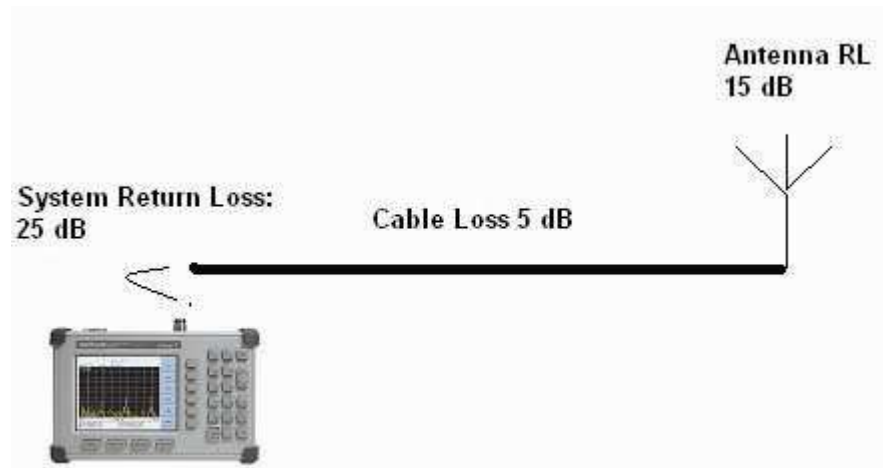


Obrázek č.6 - Měření útlumu kabelů

Na obr. 6 je znázorněno měření útlumu kabelu v rozsahu 1860 MHz a 1990 MHz. Maximální a minimální hodnoty lze použít k výpočtu průměrné hodnoty. Speciální ruční přístroj použitý pro zobrazení grafu na obr. 6 uživateli přímo spočítá průměrný

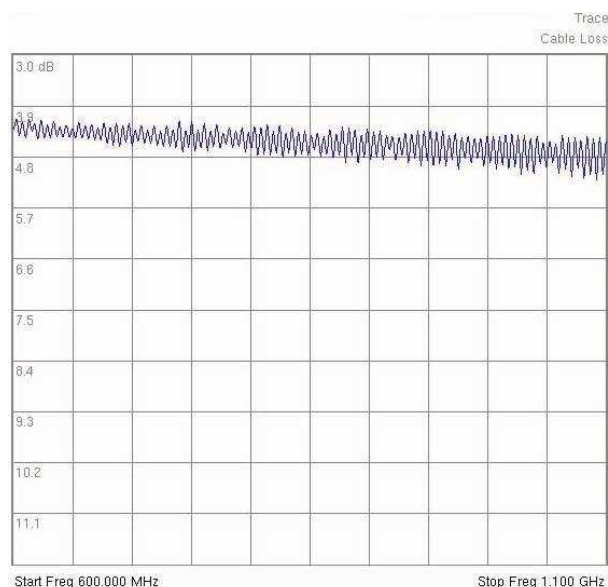
útlum kabelu, tak jak je to vidět v levé části displeje. S rostoucí frekvencí a délkou kabelu dochází k růstu vřazeného útlumu kabelu. Kabely s větším průměrem mají nižší vřazený útlum a výhodnější vlastnosti při přenosu vyššího výkonu než kabely s menším průměrem.

3.5 Útlum odrazu v systému v závislosti na útlumu kabelu



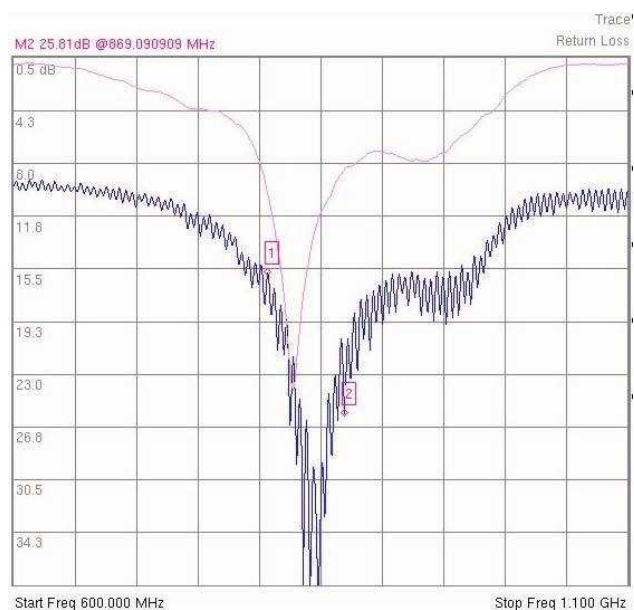
Obrázek č.7 - Měření útlumu zpětného odrazu

Vložený útlum kabelu je potřeba vzít k úvahu při měření útlumu odrazu. Na obr. 7 je vidět, jak útlum kabelu mění nastavené vlastnosti antény. Samotná anténa má útlum odrazu 15 dB, ale dalších 5 dB vřazeného útlumu na kabelu zvyšuje RL systému o dalších 10 dB (2 x 5 dB). Dokonce je to věc, se kterou se musí uvažovat při nastavování a návrhu základnové stanice. Je nezbytné znát vliv vřazeného útlumu a útlumu zpětného odrazu na celkový útlum odrazu. Velmi dobrá hodnota útlumu odrazu neznamená nutně dobře přizpůsobenou anténu. Dobrou hodnotu může způsobit také vadný či poškozený kabel s větším vřazeným útlumem. Vysílaný signál se v kabelu utlumí a anténa se jeví přizpůsobena, jelikož odražená hodnota vráceného signálu, je v důsledku toho malá. Konečný výsledek je takový, že vyzářený výkon je nižší, než je očekáváno a celková oblast s očekávaným pokrytím je velmi ovlivněna. Jinak řečeno, jestliže jsou ztráty odrazem systému příliš nízké, nemusí to znamenat, že systém funguje korektně. V každém případě je vřazený útlum kabelu jedním z nejdůležitějších parametrů kabelu.



Obrázek č.8 - Útlum kabelu

Na obr. 8 je zobrazeno měření útlumu kabelu pro dva kabely o délce 12,2 m (40 ft) spojené dohromady. Průměrná hodnota spojeného útlumu je 4,5 dB.



Obrázek č.9 - Útlum zpětného odrazu antény

Na obr. 9 je zobrazen rozdíl mezi měření RL na samostatné anténě a měření RL v celé soustavě včetně 4,5 dB vřazeného útlumu kabelů. Graf zobrazující útlum kabelu ukazuje nárůst vřazeného útlumu s frekvencí. Rozdíl viditelný z obrázku je úměrný hodnotě 2.CL a pečlivý pozorovatel si může povšimnout, že tento rozdíl je větší na

frekvenci 1100 MHz než na 600 MHz. To je hlavně v důsledku zvyšujícího se útlumu kabelu a nárůstem frekvence. Jestliže jsou známy RL antény a celého systému, lze útlum kabelu z těchto znalostí odvodit.

3.6 Vzdálenost poruchy (DTF)

Velikost hodnoty RL a VSWR charakterizují výkon celého systému. Pokud z nich něco selže, je možné použít měření DTF (Distance To Fault) ke zjištění závad a k jejich lokalizaci. Je důležité porozumět tomu, že měření DTF je vyloženě nástroj pro hledání problémů a nejlépe se hodí v případě porovnání dat a monitorování změn po delší časový interval. Hlavní cílem je najít chyby a lokalizovat je. Použití absolutní hodnoty amplitudy odvozené z dat naměřených pomocí DTF místo hodnot amplitudy z měření RL nelze doporučit jako indikátor chyby, neboť měření DTF je závislé na mnoha parametrech. Např. na změnách rychlosti šíření signálu, nepřesnostech vřazeného útlumu celého systému, rozptylu signálu, změnách teploty a matematických omezeních. Z toho důvodu ne vždy zobrazená hodnota odpovídá změřené hodnotě funkce k tomu určené. Proto je výzvou pro vývojáře těchto systémů dokázat změřit hodnoty tak, aby byly výše uvedené hodnoty zahrnuty. Měření DTF je nejlepší metodou k prověřování a hledání problémů souvisejících s kabely a anténami.

Měření DTF vychází ze znalosti stejných parametrů systému jako RL nebo měření útlumu kabelů. Při měření metodou DTF je kabel skenován ve frekvenčním pásmu a pak pomocí Fourierovy inverzní transformace (Inverse Fast Fourier Transform) – IFFT mohou být data převedena z frekvenční oblasti do časové. Jinak řečeno, jestliže zapomeneme provést měření DTF, ale jeli provedeno měření RL a stále existuje přístup k datům o amplitudě a fázi z jednotlivých jednoportových měření, lze vytvořit softwarově výsledný graf DTF pomocí dat o amplitudě a fázi.

Přenosová rychlost je ovlivněna dielektrickým materiálem kabelu a tím i výsledná rychlost, kterou se přenáší signál. Přesná hodnota přenosové rychlosti v_p určuje přesnost určení polohy nehomogenity či chyby v kabelu. Chyba $\pm 5\%$ v hodnotě přenosové rychlosti ovlivní přesnost určení vzdálenosti v případě kabelu dlouhého 24m tak, že se může měřená hodnota délky tohoto kabelu měnit v rozmezí 23 – 25 m. Dokonce i když je hodnota přenosové rychlosti v_p brána podle výrobce, může zde stále být nesrovnalost mezi zobrazovanou a skutečnou vzdáleností nehomogenity. To způsobují součásti umístěné do systému. Běžná základnová stanice obsahuje hlavní spoje, hlavní propojky,

adaptéry, zakončovací prvky atd., a přestože hlavní spoje přispívají největším dílem, rychlost signálu při průchodu dalšími částmi systému může ovlivňovat výslednou rychlost v_p .

Přesnost určení hodnot amplitudy není obvykle moc důležitá, protože DTF by mělo být použito k prověřování systému a hledání problémů, takže jestli je konektor 30 dB nebo 35 dB, není tak zajímavé jako to, zda byla před rokem hodnota útlumu na konektoru 35 dB a teď už je jen 30 dB. Přenosová rychlost v_p je sice prakticky konstantní v celém frekvenčním pásmu, ale vřazený útlum kabelů je frekvenčně závislý a to má bezprostřední vliv na přesnost hodnoty měřené amplitudy.

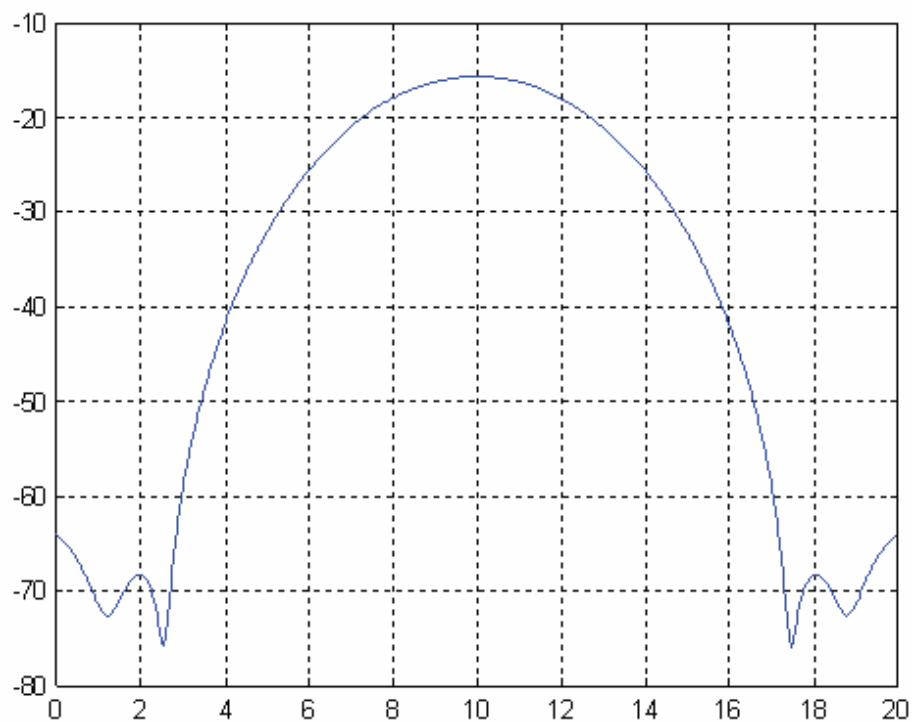
Většina přenosných ručních přístrojů, které jsou dnes dostupné, mají tabulky obsahující hodnoty přenosných rychlostí a vřazených útlumů pro různé frekvence běžně používaných kabelů. To zjednoduší práci technika v terénu, kterému stačí znát typ kabelu, aby zjistil jeho správnou hodnotu přenosové rychlosti a útlumu. V tabulce 1 jsou ukázány rozdílné úrovně útlumu kabelů pro dva běžné typy.

Tabulka 1 Rozdílné úrovně útlumu kabelů

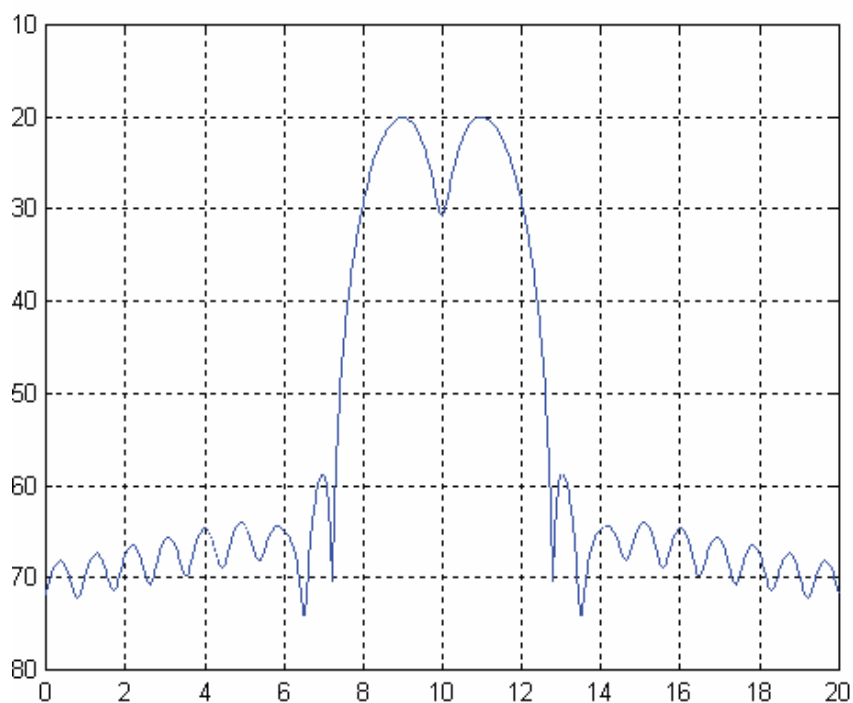
Typ kabelu	Přenosová rychlost v_p	1000 MHz	2500 MHz
Andrew LDF4-50A	0,88	0,073 dB/m	0,120 dB/m
Andrew HJ4.5-50	0,92	0,054 dB/m	0,089 dB/m

3.7 Rozlišení chyby, rozlišení displeje a maximální vzdálenost

Termín rozlišení může být matoucí a jeho definice různá. Pro DTF je důležité porozumět rozdílu mezi rozlišením chyby a rozlišením zobrazení, protože význam je rozdílný. Rozlišení chyby je schopnost přístroje oddělit dva prostorově blízké signály. Dvě nehomogenity umístěné 0,15 m od sebe nebudou identifikovány měřením DTF, když bude rozlišení chyby nastaveno na 0,6 m. Protože DTF pracuje ve frekvenční doméně, bude rozlišení chyby ovlivněno šířkou frekvenčního pásma. Širší pásmo znamená lepší rozlišení chyby a kratší maximální vzdálenost detekce. Obdobně užší pásmo vede k horšímu rozlišení chyby a větší horizontální vzdálenosti. Jediná možnost jak zlepšit rozlišení chyby je tedy zvětšení frekvenčního pásma.



Obrázek č. 10 - Měření DTF v pásmu 1850 – 1990 MHz



Obrázek č. 11 - Měření DTF v pásmu 1500 – 1990 MHz

Demonstované situace na obr. 10 a obr. 11, provedené v programu MATLAB jsou založeny na využívání stejného algoritmu jako DTF. Ukazují, jak dvě simulované chyby s úrovní -20 dBm a 0,6 m od sebe ve vzdálenosti 2,7 a 3,3 metrů jsou viditelné jen v případě rozšíření frekvenčního pásma z 1850 – 1990 MHz na 1500 – 1990 MHz. Pásmo 1850 – 1990 MHz dává rozlišení chyby 0,96 m a pásmo 1500 – 1990 MHz dává rozlišení chyby 0,27 m. Větší počet dat v příkladu na obr. 10 by dal lepší rozlišení zobrazení, ale bylo by to jen přesnější zobrazení stejného grafu. Nezáleží na tom, zda-li máme 20 000 dat, dvě chyby se nezobrazí, dokud nebude rozšířeno frekvenční pásmo. Pečlivý pozorovatel si všimne, že amplitudy dvou nehomogenit na obr. 11 mají úroveň -20 dBm, ale v prvním příkladě se amplitudy sečtou a vytvoří jednu chybu s vyšší úrovní, než mají dvě oddělené chyby.

3.8 Výpočet měření DTF

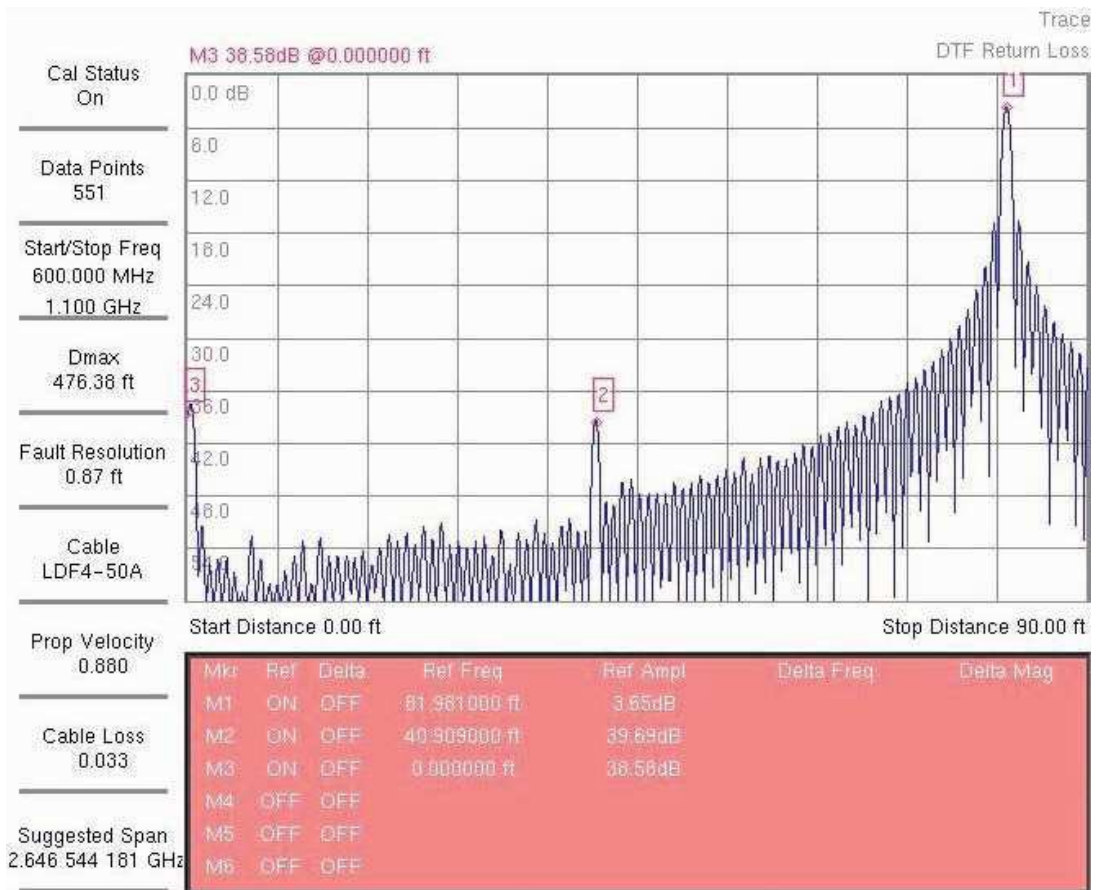
Rozlišení chyby počítáme podle

$$\gamma_{RF} = 150 \frac{v_p}{\Delta f} [m] \quad (34)$$

kde γ_{FR} je rozlišení chyby [m]

v_p je přenosová rychlost [m.s⁻¹]

Δf rozdíl frekvencí [MHz]



Obrázek č. 12 - Měření DTF

Použijeme-li data z obr. 12 zjistíme po dosazení, že

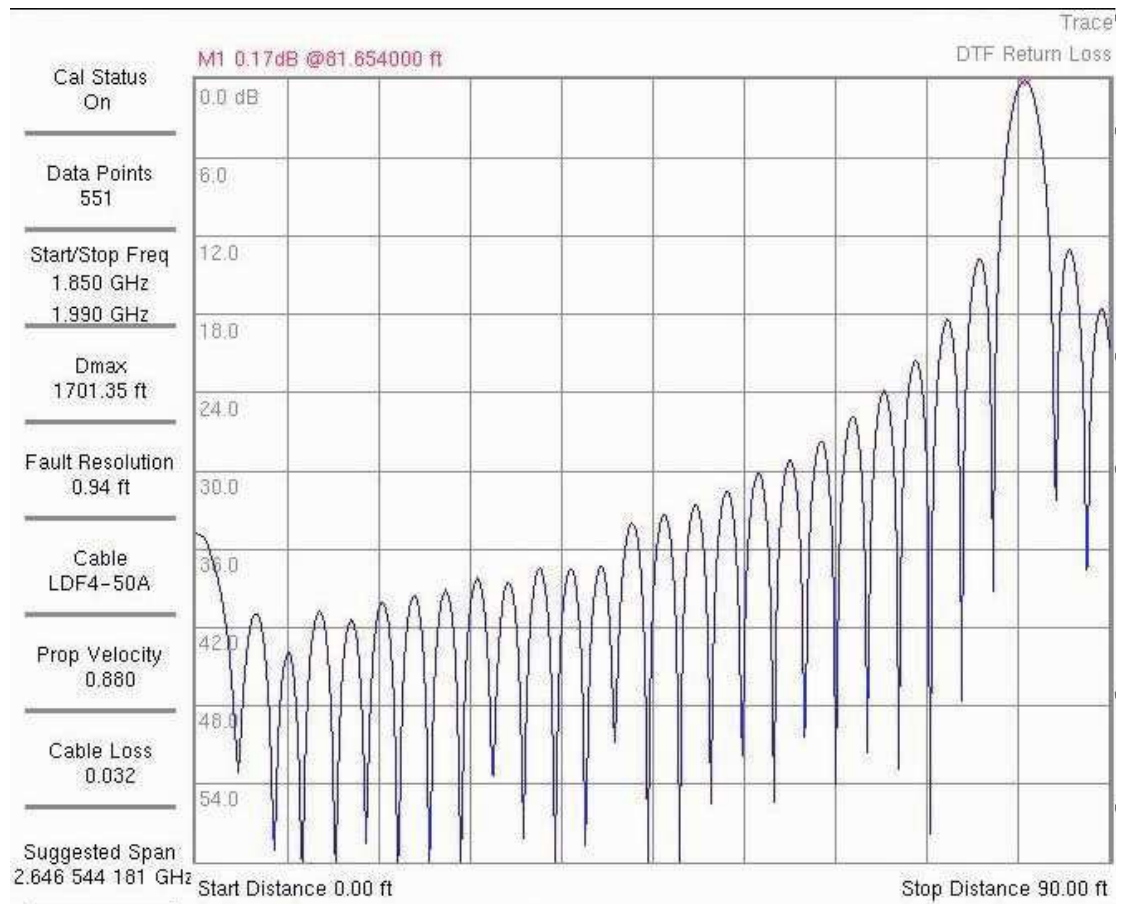
$$\gamma_{RF} = 150 \frac{0,88}{1100 - 600} = 0,264 \text{ [m]} \quad (35)$$

Další zajímavou hodnotou je D_{\max} [m], což je maximální horizontální vzdálenost, jakou dokáže přístroj změřit v závislosti na počtu dat (Data Points) a rozlišení chyby. V našem případě :

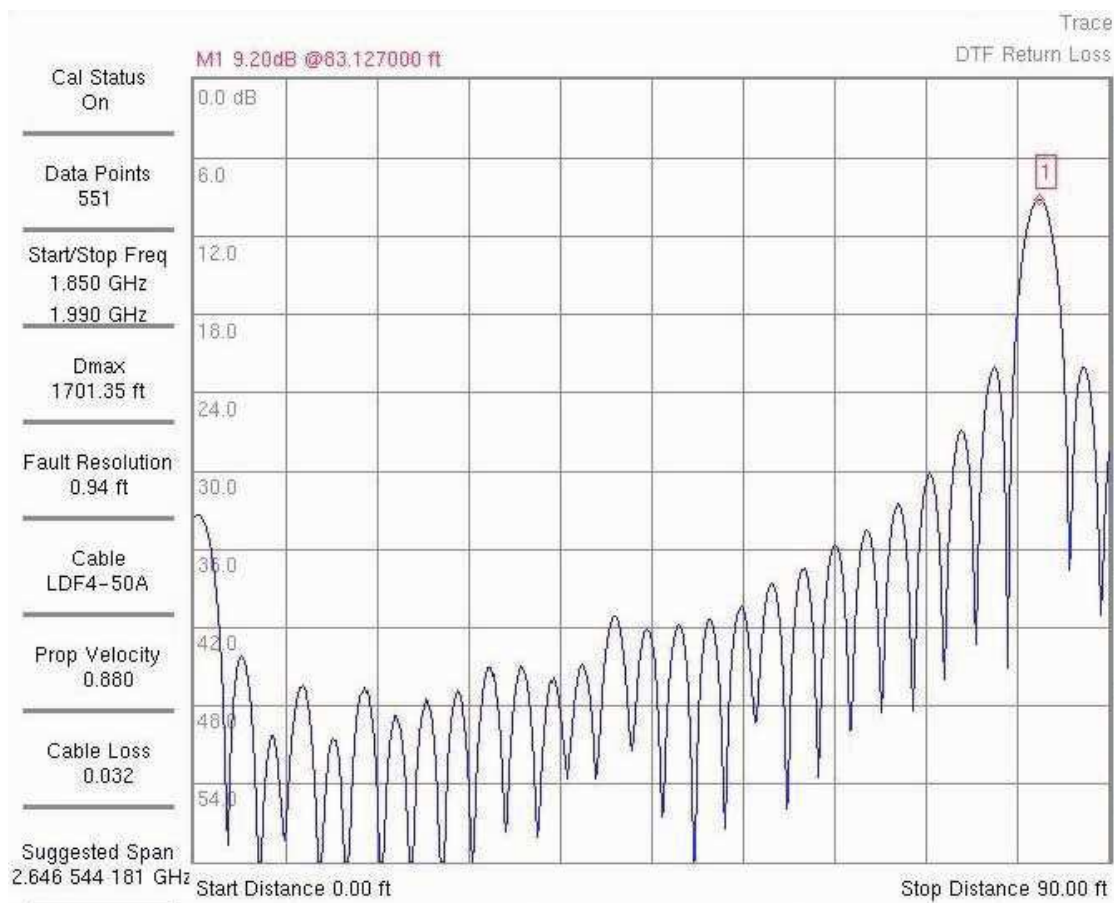
$$D_{\max} = (\text{množství dat} - 1) \cdot \gamma_{RF} = (551 - 1) \cdot 0,264 = 145,2 \text{ m} \quad (36)$$

3.9 Interpretace měření DTF

V ideálním případě by měření DTF bylo prováděno bez frekvenčně selektivních částí v cestě a jen se zakončením kabelu. Ve většině případů to není běžné, takže je potřebné porozumět tomu, jak provádět měření s rozdílnými částmi - komponenty v cestě a na konci kabelu.

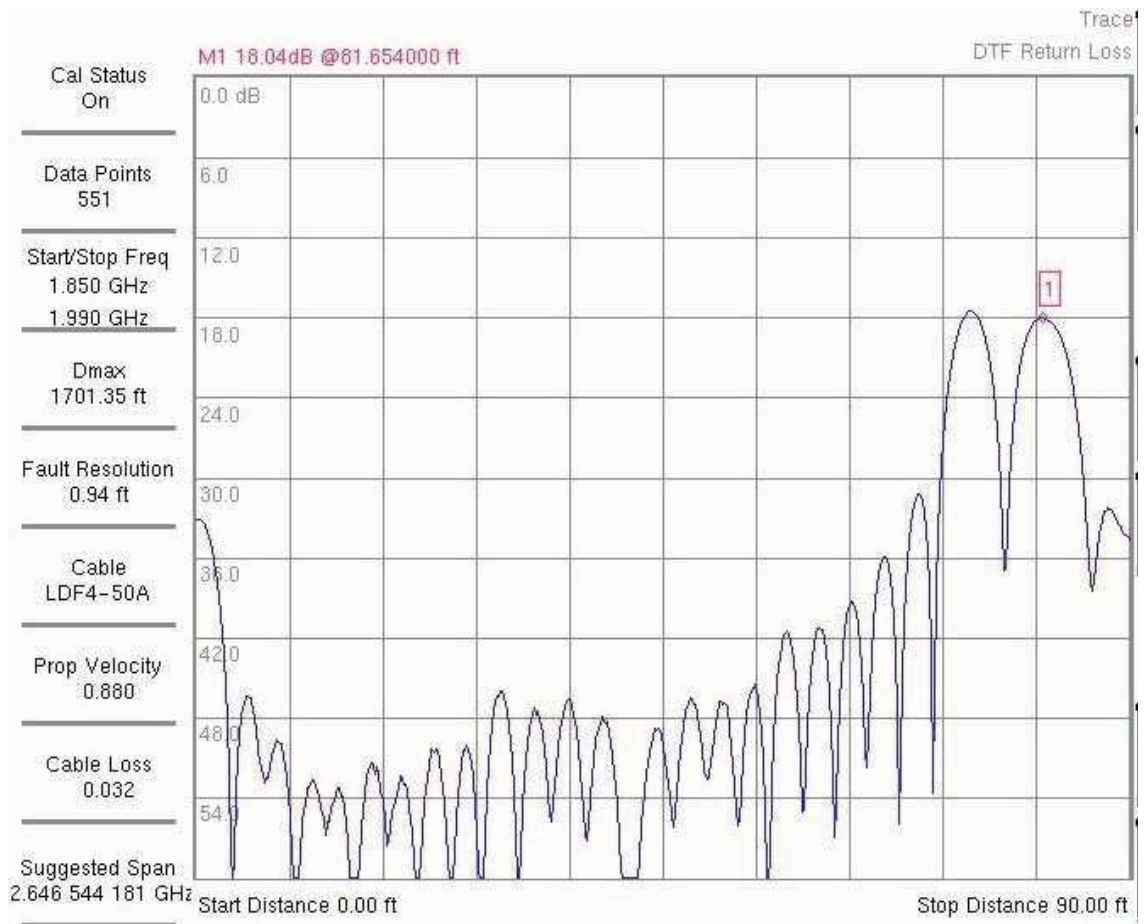


Obrázek č. 13 - Indikace zkratu DTF na kabelech (nezatížených)



Obrázek č. 14 - Indikace zkratu DTF na kabelech zatížených anténou

Na obr. 13 a 14 jsou vidět grafy měření DTF se stejným nastavením přístroje. Dva 12-ti metrové kabely pod označením LDF4-50A jsou spojeny dohromady a zakončeny otevřeným koncem (tj. jsou nezatížené), to je vidět na obr.13. Kabely na konci zatížené anténou jsou na obr. 14. Jediný rozdíl mezi grafy je velikost maxima amplitudy na konci kabelu.

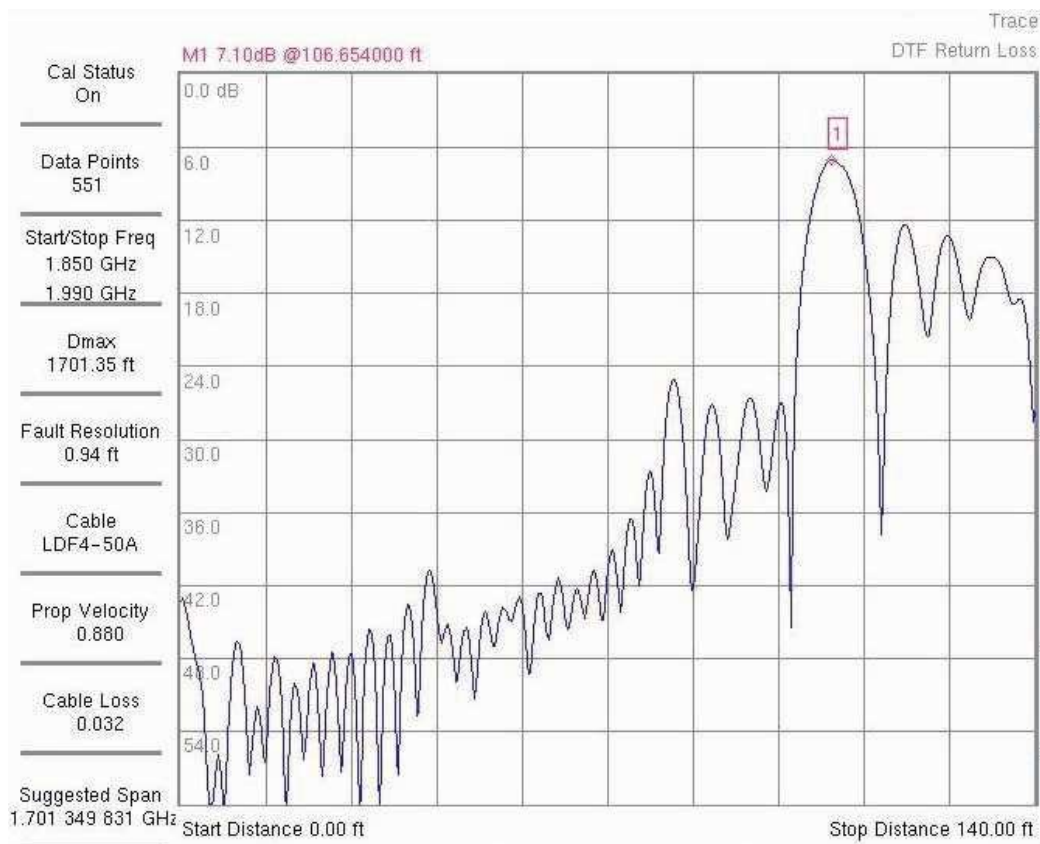


Obrázek č. 15 - Indikace zkratu DTF na kabelu před anténou

Na obr. 15 je vidět poškození kabelu před anténou ve vzdálenosti cca 2,5 m.



Obrázek č. 16 - 2-portové měření na TMA



Obrázek č. 17 - Měření DTF přes TMA

Na obr. 17 je ukázáno, jak elektrická vzdálenost zesilovače TMA (Tower Mount Amplifier), z obr. 16 ovlivňuje měřenou vzdálenost systému. Graf na obr. 16 ukazuje výsledek měření na 2-portovém dvojitým výstupu LNA (duplexer Low Noise Amplifier). Obr.č.17 ukazuje měření DTF ve frekvenční oblasti s TMA v cestě. Konec systému měření (v grafu Stop Distance 140.00 ft) je podle výsledku měření ve 32 m, protože TMA se projeví v DL (DownLink) a UL (UpLink). Konec stejného systému bez zesilovače TMA je podle měření ve vzdálenosti jen 25 m (Stop Distance 90.00 ft). [4]

4 Praktický návod měření na koaxiálních kabelech a anténách

4.1 Specifikace měřené technologie

Tento návod je určen pro měření koaxiálních kabelů a antén s přístrojem Site Master S332C Anritsu.



Obrázek č. 18 – Přístroj pro měření koaxiálních kabelů Site Master S332C Anritsu.

Měření se provádí na koaxiálních svodech a anténách podle potřeby (jako celku při výstavbě nové stanice nebo rekonfigurace, nebo části anténního systému při řešení provozní závady). Anténní systém bývá připojen do technologie BTS (Nokia, Huawei, Nortel) nebo MW (Ericsson Traffic Node a Mini Link) a také do GPS (Nortel). (Pozn. u technologie MW a GPS se měří pouze kabel, bez připojené antény).



Obrázek č. 19 – Ukázka jednoduchého anténního systému

4.2 Požadovaná měření

- 1) Měření antény se svodem (PSWR)
- 2) Útlum kabelu (CL, hodnoty v dB, požadovaná hodnota celého svodu včetně anténních konektorů a připojovacích kabelů, tzv. jumperů).
- 3) Impedance koaxiálního kabelu v závislosti na délce (DTF, hodnoty v dB)

4.3 Postup měření

Po zapnutí přístroje nastavíme požadovaný kmitočet podle typu měřené technologie.

Druh technologie	Začátek kmitočtového pásma	Konec kmitočtového pásma
MW	340 MHz	360 MHz
CDMA	440 MHz	480 MHz
GSM	880 MHz	960 MHz
GPS	1570 MHz	1575 MHz
GSM 1800 (DCS)	1710 MHz	1990 MHz

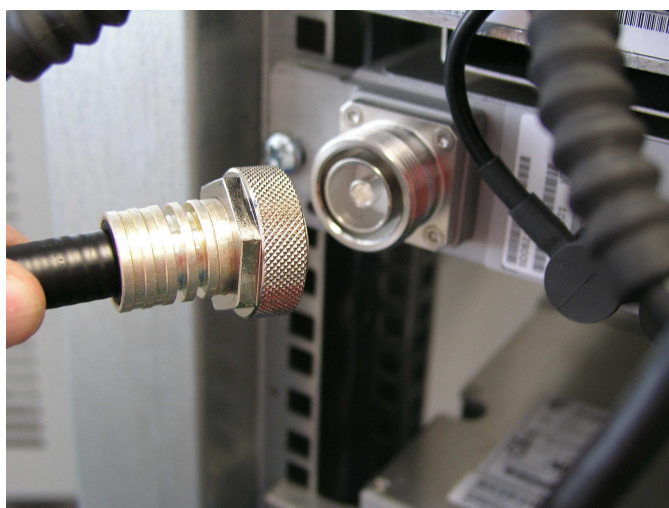
Tabulka č. 2 – frekvenční pásmo jednotlivých technologií.

Provedeme kalibraci přístroje. Kalibrace se provádí pomocí tří odporů (Open, Short a Load), které připojujeme na konec testovacího pohyblivého koaxiálního kabelu na který posléze napojujeme měřený systém. Přístroj si sám určuje pořadí kalibračních odporů a po kalibraci je připraven k měření.



Obrázek č. 20 – Kalibrační odpory

Po ukončení kalibrace je přístroj připraven k měření. Nyní odpojíme konektor anténního systému z technologie a připojíme pomocí vhodné redukce k měřicímu přístroji.



Obrázek č. 21 – Připojení měřicího přístroje

1) Měření antény se svodem

Měření antén včetně koaxiálních kabelů. Toto měření se neprovádí u MW, GPS technologie. Měření provádíme na konektoru kabelu nejbližší u BTS s připojenou anténou. Na přístroji nastavíme druh požadovaného měření - SWR (hodnota je bez rozměru). Požadované hodnoty jsou pro každý typ antény uvedeny v katalogu výrobce (většinou v rozmezí od 1,1 do 1,3). V příloze č.1 uvádím katalogový list běžné antény GSM.

2) Měření útlumu koaxiálního kabelu (včetně jumperů)

Na přístroji nastavujeme druh měření Cable Loss, to znamená, od konektoru u antény (u MW, GPS vnější jednotky) až po konektor u vlastní technologie. Při tomto měření musí být vzdálený konektor odpojen od GSM antény nebo ML a GPS od vnější jednotky. Požadovaná hodnota útlumu kompletního svodu pro GSM, DCS a CDMA je maximálně 2.5 dB. Pro MW do 16 dB a pro GPS do 10 dB.

3) Měření impedance koaxiálního kabelu v závislosti na délce kabelu

Na přístroji nastavujeme DTF (Distance To Fault). Při větších délkách kabelu je nutné upravit "Frequency Span" (Při délkách kabelů větších než 80m opravíme frekvenční rozsah kabelu). U tohoto měření se musí také nastavit typ kabelu a jeho rychlost šíření. Hodnoty kabelu jsou uvedené v katalogovém listu, viz. příloha č.2. Před měřením nastavíme přibližnou délku kabelu (od počáteční hodnoty 0 m do předpokládané délky navýšené o cca 5 m).

Při tomto měření musí být na vzdáleném konektoru připojen kvalitní zatěžovací odpor jehož parametr je $>30\text{dB}$. Zároveň s tímto měřením ověříme označení kabelu (sektor a TRx nebo Dx), tj. jestli nedošlo k prohození nebo záměně kabelů. Požadovaná hodnota je lepší než -30 dB pro koaxiální kabely a lepší než -26 dB pro konektory (lepší pro -30 dB znamená např. -31 dB , -32dB , -33dB a pod.).



Obrázek č. 22 – Ukázka zatěžovacího odporu

Pokud jsou na lokalitě použité anténní předzesilovače (MHA), jak je ukázáno na obr. 23 je nutné je podle potřeby při měřeních odpojit a odpojené kabely propojit vzájemně spojkou (tzv. bypasseem), nebo rozpojit anténní systém a měřit ho jako dvě samostatné části.



Obrázek č. 23 – Ukázka předzesilovačů

Po dokončení každého měření, výsledky ukládáme do paměti přístroje, kde zadáme název měřené lokality, měřené pásmo a popis měřené části sektoru s azimutem (např. CBUCV - GSM – 1.sektor TRx). Následně můžeme měřicí protokoly z přístroje získat např. pomocí programu Site Master SW tools v.6.40. V příloze č.3 je ukázán výpis měřicího protokolu. Při měření křížových diversitních antén je nutné ostatní systémy odpojit, aby nedošlo ke zkreslení měření nebo ke zničení přístroje.

4.4 Popis menu měřicího přístroje Site Master S331C

Hlavní menu - po zapnutí se zobrazí funkční klávesy hlavního menu (MAIN)

(MAIN)

- **FREQ** menu pro frekvence
- **DIST** menu pro vzdálenosti
- **SCALE** menu pro měřítko zobrazení
- **OPT** menu pro volby

Menu pro frekvence - nastavuje hraniční hodnoty frekvence. (FREQ)

(FREQ) zobrazení funkčních kláves popsaných dále.

- **F1** parametrem F1 se nastaví dolní hranice frekvenčního rozsahu
- **F2** parametrem F2 se nastaví horní hranice frekvenčního rozsahu. Po potvrzení zadání parametru stisknem ENTER
- **MRKS** volba menu pro markery
- **MAIN** návrat do hlavního menu

Menu pro markery - nastavuje hodnoty markerů (MRKS)

(MRKS) zobrazení funkčních kláves popsaných dále.

- **M1** přepíná marker M1 ze stavu ON do stavu OFF a naopak. Pokud je marker vypnutý, způsobí jeho zapnutí zpřístupnění zadávání vstupního parametru M1 a zobrazení hodnot SWR a RL. Po zadání vstupních hodnot stiskneme ENTER.
- **M2** přepíná marker M2 ze stavu ON do stavu OFF a naopak. Pokud byl marker vypnutý, způsobí jeho zapnutí zpřístupnění zadávání vstupního parametru M2 a zobrazení hodnot SWR a RL. Po zadání vstupních hodnot stiskněte ENTER.

- **M1PEAK** umísťuje marker M1 na frekvenci nejvyšší hodnoty SWR nebo RL.
- **M2PEAK** umísťuje marker M2 na frekvenci nejvyšší hodnoty SWR nebo RL.
- **MAIN** návrat do hlavního menu

Menu pro vzdálenosti - nastavuje přístroj do módu Distance To Fault. (DIST)

(DIST) zobrazí funkční klávesy popsané dále.

- **D1** udává dolní mez rozsahu vzdáleností k poruše. Po zadání vstupních hodnot stiskneme ENTER.
- **D2** udává horní mez rozsahu vzdáleností k poruše. Po zadání vstupních hodnot stiskněte ENTER.
- **MRKS** volba menu pro markery
- **MORE** volba přídatného menu pro vzdálenosti

Přídavné menu pro vzdálenosti - umožňuje nastavení parametrů kabelu, tj. ztráty a relativní rychlost šíření vln v koaxiálním kabelu. Výběr tohoto menu zobrazí funkční klávesy popsané dále.

- **LOSS** (ztráta) – vstupní údaj pro parametr ztrát v kabelu. Zadáme ztráty na jednotku délky pro testovaný typ kabelu. Po zadání vstupních hodnot stiskneme ENTER.
- **PROP V** (relativní rychlost šíření vln) – zadávání parametru pro relativní rychlost šíření vln. Po zadání vstupních hodnot stiskneme ENTER.
- **CABLE** zpřístupňuje seznam běžných koaxiálních kabelů. Pomocí šipek vybereme vhodný typ kabelu a po zadání stiskneme ENTER.
- **MAIN** návrat do hlavního menu

Menu pro měřítko - umožňuje změnu měřítka zobrazení. (SCALE)

(SCALE) zobrazí funkční klávesy popsané dále.

- **TOP** nastavuje horní mez měřítka.. Po zadání vstupních hodnot stiskneme ENTER.
- **BOTTOM** nastavuje dolní mez měřítka.. Po zadání vstupních hodnot stiskněte ENTER.
- **LIMIT** přepíná limity ze stavu ON do stavu OFF a naopak, po zapnutí této volby zpřístupňuje zadávání parametrů pro limity.
- **MAIN** návrat do hlavního menu

Menu voleb - umožňuje výběr voleb přístroje. (OPT)

(OPT) zobrazí funkční klávesy uvedené dále.

- **B1 MODE** přepínáme obrazovku z módu Return Loss (RL), tj. útlum odrazu, do módu Standing Wave Ratio (SWR), tj. poměr stojatých vln
- **B2 LIMIT BEEP ON/OFF** zapínáme (vypínáme) zvukový signál při překročení limitu. Při volbě ON zazní zvukový signál je-li naměřená hodnota vyšší než hodnota limitu
- **B3 KEYBD LOCK ON/OFF** zapínáme (vypínáme) blokování klávesnice, abychom zabránili nežádoucímu vstupu údajů. V režimu blokování se po stisku jakékoli klávesy zobrazí na levém okraji obrazovky blokovací symbol. Výjimkou jsou klávesy – ON/OFF, RUN/HOLD, MAIN, OPT a B3
- **B4 SINGLE SWP ON/OFF** zapínáme nebo vypínáme jednorázové měření. Při nastavení ON musí být přístroj manuálně spouštěn klávesou RUN/HOLD
- **MORE** přídatné menu pro volby

Přídavné menu pro volby (MORE)

(MORE) rozšířené menu

- **B5 UNITS** přepínání mezi metrickými a SAE jednotkami
- **B6 FIXED CW** zapínáme (vypínáme) pevnou CW funkci. Při zapnutí je hodnota CW funkce pevně stanovena. Při vypnutí se vytvoří úzké pásmo frekvencí okolo vybrané frekvence
- **B7 PRINTER** zobrazuje typy tiskáren které jsou k dispozici např. 1) žádná, 2) HP DeskJet 750 Color, 3) HP DeskJet 340 Black. Výběr provedeme šipkami a stiskneme ENTER
- **MAIN** návrat do hlavního menu

Kalibrace přístroje (START CAL)

(CAL) - po zapnutí a proběhnutí testu přístroje, je nutné přístroj nastavit a zkalibrovat pro měření. Postup je následující:

1. Zapneme přístroj a necháme dokončit testy
2. Stiskneme **FREQ** a pomocí **F1** a **F2** nastavíme krajní hodnoty frekvencí podle typu technologie kterou chceme měřit např.:

- Rozsah GSM: 880,00 MHz – 960,00 MHz

- Rozsah DCS: 1710,00 MHz – 1990,00 MHz

3. Stikneme MAIN pro návrat do hlavního menu
4. Stikneme START CAL (číslice 3)
5. Vybereme CAL A nebo CAL B a stiskneme ENTER
6. Na displeji se objeví „Connect OPEN, pres ENTER“. Na měřící kabel našroubujeme konektor označený OPEN a stiskneme ENTER.
7. Na displeji se objeví „Connect SHORT, pres ENTER“. Na měřící kabel našroubujeme konektor označený SHORT a stiskneme ENTER.
8. Na displeji se objeví „Connect LOAD, pres ENTER“. Na měřící kabel našroubujeme konektor označený LOAD a stiskneme ENTER.
9. Tím je kalibrace hotova a přístroj je připraven k měření.

Měření stojatých vln – Standing Wave Ratio (SWR)

Po nastavení požadovaných frekvencí a kalibraci přístroje můžeme začít měřit.

1. V hlavním menu stiskneme OPT pro zobrazení menu voleb
2. V tomto menu stiskneme B1 pro výběr typu měření
3. Šípkami vybereme SWR a stiskneme ENTER
4. Dále nastavíme B2 OFF, B3 OFF, B4 OFF a stiskneme MORE
5. Zde nastavíme B5 METRIC, B6 ON a stiskneme MAIN pro návrat do hlavního menu
6. Stiskneme DIST a v tomto menu nastavíme požadované vzdálenosti D1 a D2 (obvykle D1=0m a D2=nejdelší délka koaxu +5m). Údaje potvrdíme stiskem ENTER
7. Pak už jen sledujeme měření (měření musíme vždy nechat proběhnout až do konce tj. musejí se dotočit přesýpací hodiny)
8. Pokud je křivka mimo displej nebo naopak příliš nízká, stiskněte tlačítko AUTO SCALE (klávesa 2), přístroj si sám upraví měřítko.

Měření útlumu odrazu – Return Loss (RL)

Po nastavení požadovaných frekvencí a kalibraci přístroje můžeme začít měřit.

1. V hlavním menu stiskneme OPT pro zobrazení menu voleb
2. V tomto menu stiskneme B1 pro výběr typu měření
3. Šípkami vybereme RL a stiskneme ENTER
4. Dále nastavíme B2 OFF, B3 OFF, B4 OFF a stiskneme MORE
5. Zde nastavíme B5 METRIC, B6 ON a stiskneme MAIN pro návrat do hlavního menu
6. Stiskneme FREQ

7. Pak už jen sledujeme měření. Zde měření probíhá stále dokola (bez přesýpacích hodin)
8. Pokud je křivka mimo displej nebo naopak příliš nízká, stiskněte tlačítko AUTO SCALE (klávesa 2), přístroj si sám upraví měřítko.

Ukládání a zobrazování výsledků měření

Pokud chceme prezentovat výsledky měření postupujeme následovně:

1. Po změření stiskneme SAVE DISPLAY (klávesa 9)
2. Přístroj požaduje paměťové místo kam chceme údaj uložit
3. Zadejte číslo paměťového místa v rozsahu 1-40 a stiskněte ENTER
4. Prohlížet uložené průběhy můžeme tlačítkem RECALL DISPLAY (klávesa 0)
Pro přenos uložených výsledků použijeme program SITE MASTER SOFTWARE TOOLS
5. Připojíme Site Master k počítači pomocí sériového portu a spustíme program
6. Stiskneme ikonu:
7. Zobrazí se okno:
8. Zde zadáme paměťová místa která chceme přenést do počítače např. (1-40 nebo 1-9)
9. Stiskneme OK
10. Počítač přenese data a otevře všechna přenesená okna
11. Okna uložíme (pokud budeme chtít později importovat do MS Word, ukládáme ve formátu .WMF). Ukládá se vždy jen aktivní okno !!!
12. Nebo stiskneme ikonu a průběh se uloží do Clipboardu jako obrázek.
13. Pak už jen stačí v MS WORD (např.) stisknout CTRL+V a obrázek se vloží do dokumentu.

Symbole displeje:

Přístroj je v módě HOLD - pro návrat stiskněte RUN/HOLD.

Přístroj je v módu blokování klávesnice - pro vypnutí blokování stiskněte B3.

Zamknutá indikace chyb - zkontrolujte baterii, pokud je nabitá volejte servis.

Porucha procesoru - symbol se objeví při frekvenci, která zapříčiní přeplnění vf vstupu.

Teplota [°C] - při provádění kalibrace si přístroj zaznamená okolní teplotu. Pokud se teplota vychýlí mimo rozsah indikátor začne blikat.

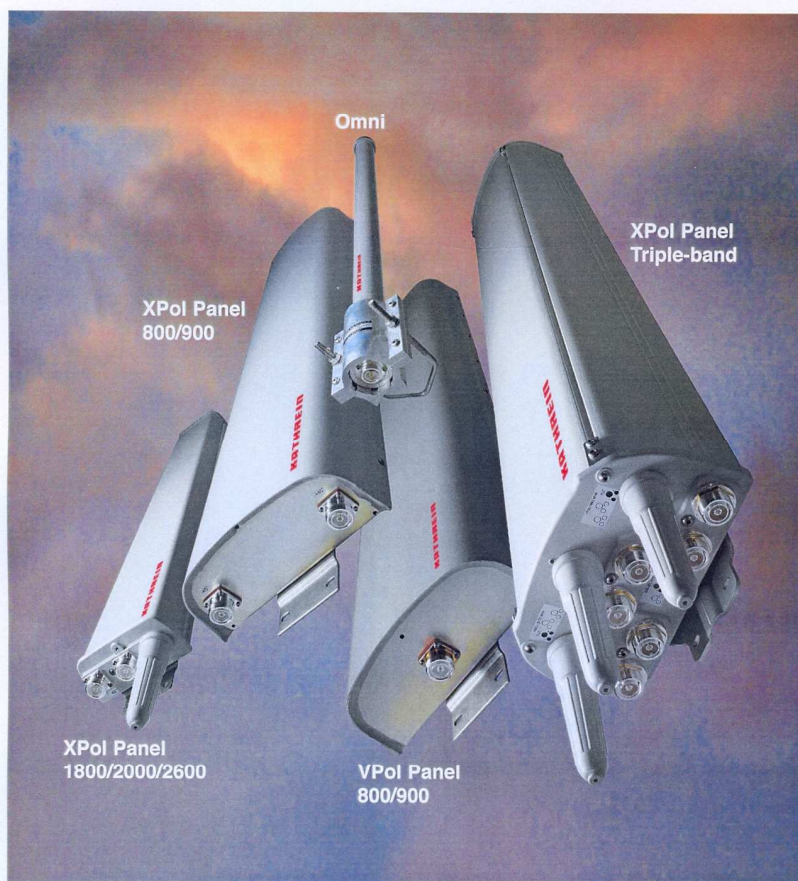
Indikátor stavu baterie - pokud je celý černý je baterie zcela nabitá. [5]

5 Závěr

V bakalářské práci byla popsána problematika měření koaxiálních kabelů a antén a navržen postup pro kontrolu anténních systémů nebo pro vyhledání případné závady. Frekvenční rozsah měření je v pásmu od 300 MHz do 2 GHz a je dán rozsahem používané technologie pro mobilní základnové stanice. Součástí práce je ukázka výsledku měření a katalogový list běžně používaných kabelů a antén.

Kabelové a anténní systémy jsou velmi důležité pro celkový provoz mobilní sítě. Malé změny v anténním systému mohou ovlivnit úroveň signálu, pokrytí signálem určité oblasti a mohou být příčinou zhoršené kvality hovoru, nebo jeho přerušení. Z tohoto důvodu je doporučeno při jakémkoliv větším zásahu do anténního systému (může jít o novou výstavbu, rekonfiguraci – tj. změnu antén či kabelů, apod.) proměřit celý anténní systém. U závad na technologii, která je v provozu a vysílá, se provede nezbytné měření na poškozené části. Pomocí základních typů měření, tj. měření RL a VSWR jsou určeny vlastnosti systému. Pokud dojde ke zhoršení parametrů, je možné použít měření DTF pro ověření systému, monitorování a nalezení závady v čase.

Vzhledem k neustálému vývoji mobilních telekomunikačních technologií se zvyšuje frekvenční pásmo a tím i potřeba nových měřících přístrojů. Pro úsporu provozních nákladů a počtu umístěných antén jsou osazovány antény s křížovou diversitou nebo antény které v sobě obsahují i dva až tři systémy (GSM, DCS a UMTS).



Obrázek č. 24 – Typy vyráběných antén

6 Použité zdroje

- [1] Václav Havel a kolektiv Úvod do teorie elektromagnetického pole. Plzeň: Vydavatelství PF v Plzni, 1984.
- [2] RNDr. Arnošt Hladík, CSc. Teorie elektromagnetického pole. Praha: Vydavatelství UK v Praze, 1984
- [3] Prof. Ing. Dušan Černohorský, CSc., Doc. Ing. Zdeněk Nováček, CSc. Antény a šíření rádiových vln. Brno: Vydavatelství VUT Brno, 2001
- [4] Převzato a upraveno z Anritsu[®] Data Book – Understanding Cable & Antenna Analysis by Stefan Pongratz USA, 2007, www.us.anritsu.com.
- [5] Převzato a upraveno z Anritsu[®] User's guide
- [6] <http://www.kathrein.de/en/mcs/index.htm>
- [7] <http://www.rfsworld.com/>

7 Přílohy

Příloha č. 1 – katalogový list antény

Příloha č. 2 - katalogový list koaxiálního kabelu, 2 listy

Příloha č. 3 – ukázka měřícího protokolu

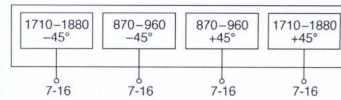
Příloha č. 1 – katalogový list antény

Dual-band Panel	<input type="checkbox"/> 870–960	<input type="checkbox"/> 1710–1880
Dual Polarization	<input checked="" type="checkbox"/> X	<input checked="" type="checkbox"/> X
Half-power Beam Width	<input type="checkbox"/> 65°	<input type="checkbox"/> 60°

KATHREIN
Antennen · Electronic

XXPoI Panel 870–960/1710–1880 65°/60° 17.5/18dBi 6°T

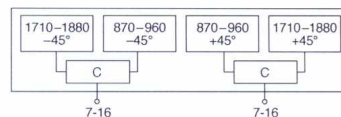
Type No.	741 344	
Frequency range	<input type="checkbox"/> 870–960 870 – 960 MHz	<input type="checkbox"/> 1710–1880 1710 – 1880 MHz
Polarization	+45°, –45°	
Gain	2 x 17.5 dBi	
Half-power beam width	Horizontal: 65°	Horizontal: 60°
Copolar +45°/–45°	Vertical: 7°	Vertical: 6.5°
Electrical tilt	6°, fixed	
Front-to-back ratio, copolar	> 30 dB	
Isolation, between ports	> 30 dB (GSM 900 – GSM 900) > 30 dB (GSM 1800 – GSM 1800) > 30 dB (GSM 900 – GSM 1800)	
Impedance	50 Ω	
VSWR	< 1.5	
Intermodulation IM3 (2 x 43 dBm carrier)	< –150 dBc	
Max. power per input	400 W	200 W (at 50 °C ambient temperature)
Input	4 x 7-16 female	
Connector position	Bottom	
Wind load (at 150 km/h)	Frontal / lateral / rearside: 470 / 280 / 1040 N	
Height/width/depth	2580 / 262 / 116 mm	





800-960 – 1710-1880 XXPoI

XXPoI Panel 870–960/1710–1880 C 65°/60° 17.5/17.5dBi 6°T

Type No.	741 336	
Frequency range	<input type="checkbox"/> 870–960 870 – 960 MHz	<input type="checkbox"/> 1710–1880 1710 – 1880 MHz
Polarization	+45°, –45°	
Gain	2 x 17.5 dBi	
Half-power beam width	Horizontal: 65°	Horizontal: 60°
Copolar +45°/–45°	Vertical: 7°	Vertical: 6.5°
Electrical tilt	6°, fixed	
Front-to-back ratio, copolar	> 30 dB	
Isolation, between ports	> 30 dB	
Impedance	50 Ω	
VSWR	< 1.5	
Intermodulation IM3 (2 x 43 dBm carrier)	< –150 dBc	
Max. power per input	250 W	150 W (at 50 °C ambient temperature)
Input	2 x 7-16 female	
Connector position	Bottom	
Wind load (at 150 km/h)	Frontal / lateral / rearside: 470 / 280 / 1040 N	
Height/width/depth	2580 / 262 / 116 mm	
Integrated combiner	The insertion loss is included in the given antenna gain values.	



Příloha č. 2 - katalogový list koaxiálního kabelu, strana 1

Technical Data Sheet		SCF12-50J	
1/2" CELLFLEX® Superflexible Foam-Dielectric Coaxial Cable			
Product Description			
CELLFLEX® 1/2" superflexible cable			
			
Features/Benefits			
<ul style="list-style-type: none"> • Low Attenuation The low attenuation of CELLFLEX® coaxial cable results in highly efficient signal transfer in your RF system. • Complete Shielding The solid outer conductor of CELLFLEX® coaxial cable creates a continuous RFI/EMI shield that minimizes system interference. • Low VSWR Special low VSWR versions of CELLFLEX® coaxial cables contribute to low system noise. • Outstanding Intermodulation Performance CELLFLEX® coaxial cable's solid inner and outer conductors virtually eliminate intermods. Intermodulation performance is also confirmed with state-of-the-art equipment at the RFS factory. • High Power Rating Due to their low attenuation, outstanding heat transfer properties and temperature stabilized dielectric materials, CELLFLEX® cable provides safe long term operating life at high transmit power levels. • Wide Range of Application Typical areas of application are: feedlines for broadcast and terrestrial microwave antennas, wireless cellular, PCS and ESMR base stations, cabling of antenna arrays, and radio equipment interconnects. 			
Technical Features			
Cable Type	Foam-Dielectric, Superflexible		
Size	1/2"		
Jacket	Standard		
Return Loss (VSWR) Performance	Standard		
Maximum Return Loss, dB (VSWR)	Contact RFS for your VSWR performance specification for your required frequency band.		
Impedance, ohm	50 +/- 1		
Maximum Frequency, GHz	11,7		
RFS The Clear Choice™		SCF12-50J	Print Date: 09.10.2006
Please visit us on the internet at http://www.rfsworld.com		Radio Frequency Systems	

All information contained in the present datasheet is subject to confirmation at time of ordering.

Příloha č. 2 - katalogový list koaxiálního kabelu, strana 2

Technical Data Sheet

SCF12-50J (Cont.)

1/2" CELLFLEX® Superflexible Foam-Dielectric Coaxial Cable



SCF12-50J/JFN ATTENUATION AND AVERAGE POWER

Frequency MHz	Attenuation dB/100 m	Attenuation dB/100 ft.	Average Power kW
0.5	0.229	0.070	20.5
1	0.324	0.099	20.5
1.5	0.397	0.121	20.5
2	0.458	0.140	18.8
10	1.03	0.314	8.37
20	1.46	0.446	5.90
30	1.80	0.548	4.80
50	2.33	0.710	3.70
88	3.11	0.949	2.77
100	3.33	1.01	2.59
108	3.46	1.05	2.49
150	4.10	1.25	2.10
174	4.43	1.35	1.95
200	4.76	1.45	1.81
300	5.89	1.79	1.47
400	6.85	2.09	1.26
450	7.29	2.22	1.18
500	7.71	2.35	1.12
512	7.81	2.38	1.10
600	8.50	2.59	1.01
700	9.23	2.81	0.934
800	9.92	3.02	0.869
824	10.1	3.07	0.855
894	10.5	3.21	0.818
900	10.6	3.22	0.816
925	10.7	3.27	0.803
960	11.0	3.34	0.787
1000	11.2	3.41	0.770
1250	12.7	3.86	0.682
1500	14.0	4.26	0.616
1700	15.0	4.57	0.575
1800	15.5	4.72	0.557
2000	16.4	5.01	0.525
2100	16.9	5.15	0.511
2200	17.3	5.28	0.498
2400	18.2	5.55	0.474
3000	20.7	6.30	0.417
3500	22.6	6.88	0.382
4000	24.4	7.44	0.353
5000	27.8	8.48	0.310
6000	31.0	9.44	0.278
7000	34.0	10.4	0.254
8000	36.8	11.2	0.234
9000	39.6	12.1	0.218
10000	42.3	12.9	0.204
11700	46.6	14.2	0.185

Standard Conditions:

For attenuation: VSWR 1.0, ambient temperature 20° C (68° F).

For average power: VSWR 1.0, ambient temperature 40° C (104° F),

inner conductor temperature 100° C (212° F). No solar loading.

All information contained in the present datasheet is subject to confirmation at time of ordering.

RFS The Clear Choice™

SCF12-50J

Print Date: 09.10.2006

Please visit us on the internet at <http://www.rfsworld.com>

Radio Frequency Systems

Příloha č. 3 – ukázka měřicího protokolu

