

O Fresnelových zónách

Jindra Macoun, OK1VR

S rozvojem radiokomunikace na dm a cm vlnách se objevily problémy, které se na nižších kmitočtových pásmech prakticky neuplatňovaly. K řešení problémů vyvolaných kvazioptickým („jakooptickým“) šířením těchto velmi krátkých elmag. vln přispěla teorie vlnové optiky, kterou počátkem 19. století, tedy právě před 200 lety rozvíjel francouzský vědec – fyzik A. J. Fresnel (1788 – 1827) [1]. V odborném názvosloví se tak objevily nově, v oblasti šíření elmag. vln do té doby nepoužívané pojmy, jakými jsou i Fresnelovy elipsy. Ty jsou však jen přesnějším označením Fresnelových zón, známých z teorie vlnové optiky. Záměrem článku je tento pojem a jev s ním spojený přístupně vysvětlit, i když je v současné době dobře probírána na desítkách webových stránek.

Za běžných, standardních podmínek šíření je pro spolehlivou radiokomunikaci na UHF a SHF pásmech podél zemského povrchu nezbytným předpokladem přímá viditelnost mezi anténami takového (v podstatě směrového) spoje. Přerušení přímé viditelnosti vede obvykle k prudkému poklesu intenzity elmag. pole. Avšak ani přímá viditelnost mezi oběma anténami směrového spoje dokonalé spojení, resp. bezchybný přenos datových informací nezaručuje.

Jestliže se UHF a SHF elmag. vlny šíří kvaziopticky, mohou na přijímací anténu dopadnout nejen vlny přímé, ale i vlny od různých překážek odražené. Jejich fáze i amplituda se zpravidla liší od fáze i amplitudy vlny přímé. Liší-li se v místě příjmu fáze vlny odražené o 180°, ale její amplituda je s amplitudou vlny přímé téměř shodná, pak přijímaný signál zeslábně, až vymizí, přestože je mezi anténami přímá viditelnost. („Proč vás vůbec neslyšíme, když vás vidíme?“ ozve se občas i na radioamatérských UKV pásmech během PD.) Naopak odražená vlna může být s přímou vlnou ve fázi, je-li zpožděna o 360° (popř. o další násobky), což znamená, že přijímaný signál může být silnější, než kdyby byla přijímána pouze vlna přímá. Tyto jevy jsou způsobeny **rozdílnou délkou drah přímé a odražené vlny** mezi oběma anténami.

Fresnelova elipsa

Při dané vzdálenosti (d) mezi vysílací a přijímací anténou směrového spoje lze pro každý kmitočet definovat **rozhraní**, ze kterého je odražená vlna fázově zpožděna právě o jednu (o 180°) nebo o více půlvln. **Takové rozhraní**, které můžeme také definovat jako **geometrické místo bodů**, ve kterých je na daném kmitočtu **součet vzdáleností** (d_1 , d_2) **k oběma anténám konstantní, je elipsa**, v jejíchž **dvou ohniscích jsou obě antény** (obr. 1). Oblast ohraničená touto elipsou se obecně nazývá **Fresnelovou zónou** (nebo také Fresnelovým pásmem) [2, 7, 8].

Je-li tento součet vzdáleností (vyjádřený v příslušné vlnové délce) právě jen o **jednu půlvlnu** ($0,5 \lambda$) delší než nejkratší, tzn. přímá spojnice mezi anténami, leží všechny body tohoto rozhraní na elipse, která ohraničuje **1. Fresnelovu zónu**. Prostorový útvar, který vznikne rotací Fresnelovy elipsy kolem osy procházející středem obou antén, je pak **1. Fresnelův rotační elipsoid**.

Tento prostorový útvar ohraničuje oblast, ve které by neměly být žádné terénní nebo umělé překážky (stavby, stromy apod.), na kterých by mohlo docházet k odrazům (ale i ohybům a rozptylům),

ovlivňujícím intenzitu i kvalitu přenášených signálů. Proto se při plánování směrových spojů požaduje mimo jiných podmínek také **„čistota 1. zóny“**.

Jsou-li antény směrového spoje umístěny ideálně např. na věžích v rovinném (přesněji plochém) terénu, je malou poloosou uprostřed tohoto elipsoidu určena jejich minimální výška (h) nad terénem. **Za méně příznivých terénních poměrů a při větších vzdálenostech je třeba vzít ještě v úvahu terénní řez mezi anténami, popř. i zemské zaoblení (obr. 3).**

● **Délka malé poloosy** 1. Fresnelovy zóny, tzn. polovina maximálního průměru ($2r$) **ve středu elipsoidu** 1. zóny se určí podle vzorce:

$$r = \sqrt{d \lambda / 4} \quad (1)$$

kde d je vzdálenost mezi anténami a λ je vlnová délka, odpovídající provoznímu kmitočtu.

Tak např. pro $d = 10$ km a $\lambda = 1$ m (0,3 GHz) činí tento poloměr 50 m, takže minimální výška antén nad plochým terénem by měla být 50 m. Na desetkrát vyšším kmitočtu, tzn. na 0,1 m (3 GHz) bude při stejné vzdálenosti antén $r =$ jen 16 m. Se stoupajícím kmitočtem tedy klesají nároky na výšku antén nad terénem i s existujícími překážkami.

Pro správný výpočet je nezbytné uvážit všechny délkové míry ve shodných jednotkách, tzn. v metrech nebo ve vlnových délkách. Je-li $\lambda = 1$ m, jsou oba výsledky shodné: $r = 50$ m, nebo $r = 50 \lambda$.

Stejnou informaci o maximálním poloměru 1. zóny uprostřed trasy d získáme i z výrazu:

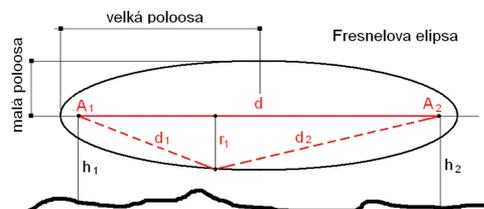
$$r = 8,657 \sqrt{d f} \quad [\text{m}; \text{km}, \text{GHz}] \quad (2)$$

● **Délka malé poloosy** (poloměr r) prvního ($n = 1$), ale i dalších ($n > 1$) Fresnelových elipsoidů v **libovolné vzdálenosti od obou antén**, tzn. minimální výška přímého paprsku nad rovinným terénem nebo jinými překážkami se určí podle vzorce

$$r_n = \sqrt{[d_1 d_2 n \lambda / (d_1 + d_2)]} \quad (3)$$

kde d_1 a d_2 jsou vzdálenosti uvažovaného bodu od obou antén.

Uvážíme-li, že ve výše zmíněném případě činí vzdálenost mezi anténami, tzn. oběma ohnisky tohoto Fresnelova elipsoidu 10 km, čili $10\,000 \lambda$ a maximální průměr (jen) 50 λ při $f = 0,3$ GHz, pak na ilustračním obrázku Fresnelovy elipsy, nakresleném v poměrném měřítku, nelze její rozměrové parametry pro její „štíhlost“ prakticky vůbec znázornit. Proto jsou doprovodné obrázky k těmto textům vždy zkrácené. Rozměry d a r jsou v různém měřítku, takže elipsy jsou tam podstatně „širší“. Ohniska jsou pouhých 0,25 λ



Obr. 1. Geometrie Fresnelovy zóny ve svislé rovině, kolmé k zemskému povrchu. Energie elmag. vln se mezi anténami A_1 a A_2 přenáší celým prostorovým svazkem, který má tvar elipsoidu a je ohraničen 1. Fresnelovou elipsou, kde platí: $d_1 + d_2 = d + \lambda/2$

od konců velké (podélné) osy elipsy, aby i tam byla splněna podmínka, že součet délek od každého bodu 1. Fresnelovy elipsy k oběma ohniskům je právě o $0,5 \lambda$ delší než jejich přímá spojnice. (Na každé straně spoje se délka $0,25 \lambda$ uplatní po odrazu zpět dvakrát, tedy $0,5 \lambda$.) Poloměr elipsy v rovině každého ohniska pak činí téměř $0,5 \lambda$, protože vzdálenost k anténě v „protiohnisku“ je prakticky stejná jako celková délka trasy spoje.

Z okolí ohnisek by se odrazy uplatnily jen se všesměrovými anténami, např. s anténami instalovanými v přístupových bodech „uprostřed“ WiFi sítí. U typických směrových spojů vybavených směrovými anténami se vliv blízkého rozhraní Fresnelovy zóny poblíže ohniska prakticky neuplatní.

● Představy o rozměrech Fresnelových zón jsou názornější, jsou-li vzdálenosti antén (d) i maximální poloměry (r) jednotlivých zón uprostřed prvního (r_1) i dalších (r_n) elipsoidů vyjádřeny ve vlnových délkách [λ]. Uvádí se [3, 5], že **poloměry první Fresnelovy zóny (r_1) zmenšené na 60 % ($0,6 r_1$) vymezují prostor zvláště citlivý na přítomnost překážek** (tab. 1).

Výše zmíněné vzorce pro průměry elipsoidů a odvozené výšky antén nerespektují zakřivení zemského povrchu, které se může od určitých vzdáleností i terénních profilů uplatnit, a do profilu směrového spoje by se mělo znázornit tzv. **parabolou dohledu**.

● Orientační informaci o dosahu přímé viditelnosti na „ideálně“ zakřiveném kulovém zemském povrchu, tzn. o optické vzdálenosti obzoru nabízí vzorec

$$d_1 = 3,57 \sqrt{h} \quad [\text{km}; \text{m}] \quad (4)$$

Např. z výšky $h = 10$ cm dohlédneme nad vodní hladinou do vzdálenosti $d_1 = 1130$ m. Z výšky 1 m do vzdálenosti 3,57 km nebo na stejně umístěnou anténu protistanice vzdálené $2 \times 3,57$ km, tedy asi 7 km. Pokud by se pro tuto vzdálenost měla sestavit 1. Fresnelova zóna např. na

Tab. 1. Maximální poloměry 1., 2. a 3. Fresnelovy zóny (r_1 , r_2 , r_3) uprostřed celkové vzdálenosti (d) obou antén. **0,6 r_1 je doporučený bezpečný poloměr 1. zóny, resp. minimální výška přímého paprsku nad překážkami**

| Vzdálenost antén d [λ] | r_1 | r_2 | r_3 | 0,6 r_1 [λ] |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------|
| 10 | 1,58 | 2,29 | 2,83 | 0,96 |
| 30 | 2,74 | 3,87 | 4,74 | 1,64 |
| 100 | 5,0 | 7,07 | 8,66 | 3,0 |
| 300 | 8,66 | 12,24 | 15,0 | 5,2 |
| 1000 | 15,8 | 22,36 | 27,38 | 9,48 |
| 3000 | 27,38 | 38,72 | 47,43 | 16,43 |
| 10 000 | 50,0 | 70,7 | 86,6 | 30,0 |



435 MHz ($\lambda = 0,69$ m) tak, aby se právě dotýkala země (vodní hladiny), pak by každá z antén měla být ve výšce $1 + 34,5$ m. Což však neznamená, že níže umístěné antény spojení neumožní.

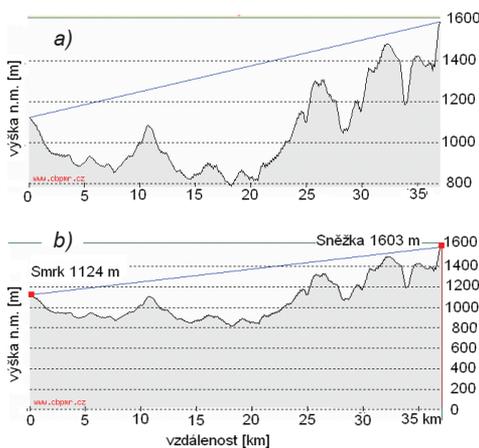
● K výpočtu poloměru volných Fresnelových zón jsou dnes na webových stránkách k dispozici počítačové programy realizované tzv. kalkulátory, které nahradily starší grafické pomůcky – (např. spojnicový nomogram pro určení 1. volné Fresnelovy zóny na obr. 2). Obvykle jsou připojeny ještě kalkulátory – pro útlum tras směrových spojů, pro rádiovou a optickou dohlednost, popř. i pro celkovou energetickou bilanci celého směrového spoje, zahrnující parametry antén, vysílačů, přijímačů a druhu přenášených informací [3, 4, 5].

Podrobnější informace k teorii Fresnelových zón a vlnové optiky spolu s nezbytným matematickým aparátem jsou na webových stránkách [6, 7] a v publikacích [10, 11].

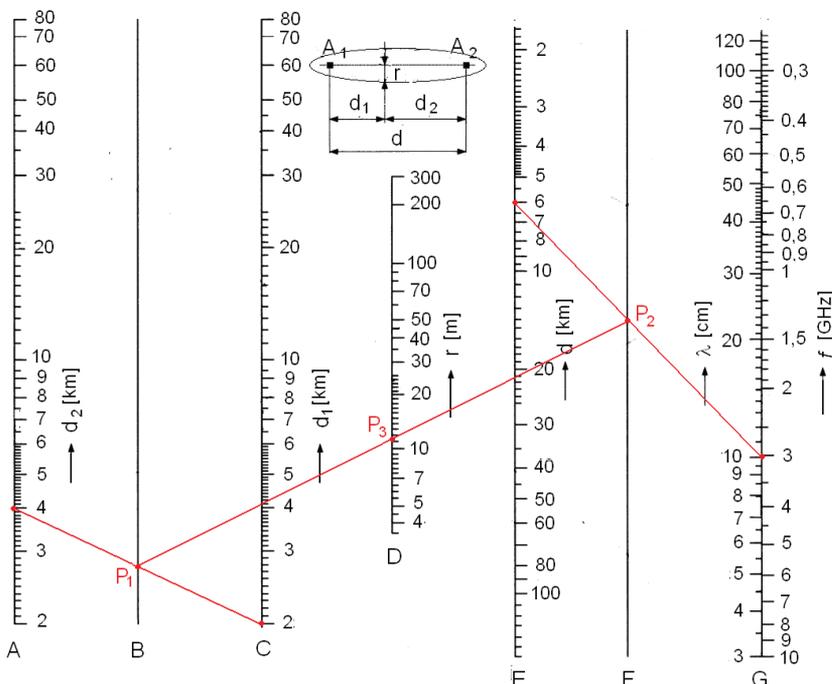
Terénní profil směrového spoje

Pro návrh konkrétního směrového spoje včetně Fresnelovy zóny musí být obvykle ještě znám reálný **terénní profil** mezi anténami. K jeho sestavení se dříve používalo topografických map s dostatečně hustou sítí vrstevnic, které umožnily více či méně přesný, ale pracný odečet **výškopisu** podél uvažované trasy.

Dnes, kdy jsou již všechny mapové podklady digitalizovány, existují pro stanovení výškopisu v libovolné oblasti a podél libovolně dlouhé trasy dostupné počítačové programy, které vypočtou a znázorní přesný profil zadané trasy, popř. i se zakřivením zemského povrchu, které se u delších tras již může uplatnit. Jeden z uživatelsky nejlepších programů uvádíme v doporučených webových stránkách – [8!!]. Jeho aplikace se využívá především jako nástroj pro ověřování viditelnosti mezi různými (terénními) stanicemi radiostanic, komunikujících na amatérských VKV a UKV pásmech, ale i pro posouzení dohlednosti mezi turisticky zajímavými objekty a kopci (obr. 3 a, b). Výškopis, resp. výškový profil libovolné trasy lze nyní vytvořit i na známém mapovém serveru www.mapy.cz [9] podle návodů „plánování tras a měření“. Ze znázorněného terénního profilu je pak



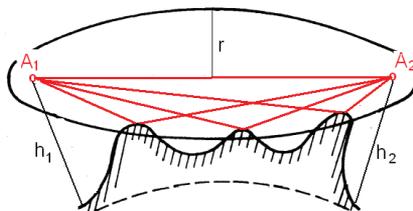
Obr. 3 a, b. Terénní profily 39,5 km dlouhé trasy mezi dvěma známými vrcholy podle [8] na rovném (a) a zakřiveném (b) zemském povrchu



Obr. 2. Spojnicový nomogram pro určení poloměru 1. Fresnelovy zóny (r_1) v libovolném místě celkové trasy (d).

Znázorněný příklad: P_1 : $f = 3$ GHz ($\lambda = 10$ cm), $d = 8$ km. P_2 : $d_1 = 6$ km, $d_2 = 2$ km. P_3 : $r_1 = 11,6$ m

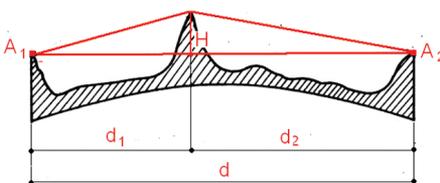
možné posoudit, zda splňuje požadavky na směrový spoj, limitovaný podmínkami volné Fresnelovy zóny.



Obr. 4. Terénní překážky nemají zasahovat do prostoru 1. Fresnelova elipsoidu. Tento požadavek splní odpovídající výška antén h_1 a h_2 nad zemí, popř. i s přihlédnutím k zakřivení zemského povrchu na delších trasách

Ohyb na ostrých překážkách

Šíří-li se velmi krátké vlny v nerovném kopcovitém terénu **bez přímé viditelnosti obou antén**, je fyzikální obraz šíření elmag. vln značně komplikovaný. Velmi krátké vlny mají kromě přímočarého šíření ještě schopnost **ohýbat se kolem ostrých překážek**, jakými jsou např. i horské hřebeny vhodných tvarů (obr. 5). Pak lze přijímat rádiové signály i ve stínu takových překážek, které nejenže rádiovou komunikaci nepřerušují, ale mohou naopak vyvolat difrakci elmag. vln daleko za optický obzor, kde by byl příjem bez této překážky za normálních podmínek šíření VKV již nemožný. Prochází-li tato „založená“ spojnice obou antén rádiového



Obr. 5. Směrový spoj, jehož antény leží ve stínu ostré překážky

spoje těsně nad překážkou (H je efektivní výška překážky), může být v případě ostrého hřebenu intenzita elmag. pole v místě příjmu až o 6 dB větší než bez takové překážky. Podobně se chovají i vlny světelné, kdy se difrakce na polorovinně ostrého břitu nazývá difrakcí optickou, resp. Fresnelovou.

V praxi se při šíření s nepřímou viditelností častěji uplatní kopcovité překážky, které jsou spíše zaoblené než klínovitě ostré. Vliv takových překážek na šíření elmag. vln se řeší podobně jako difrakce elmag. vln na kouli.

Tyto výpočty jsou velmi složité, i když i zde pomáhají graficky znázorněné vztahy mezi počítanými parametry [10].

Charakter překážek v kopcovitém terénu bez přímé viditelnosti obou antén lze posoudit také pomocí zmíněného výškopisného programu [8] a [9].

Doporučené webové stránky

- [1] http://cs.wikipedia.org/wiki/Augustin-Jean_Fresnel
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_zone
- [3] http://www.i4wifi.cz/?inc=inc/_doc/calc/calc.htm
- [4] <http://www.bezdratovepripojeni.cz/clanky/jak-na-wifi>
- [5] <http://www.racom.eu/cz/products/m/ray/calcul.html>
- [6] http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=def&src=fresnelova_zona&bck=2-1-A
- [7] <http://physics.fme.vutbr.cz/...ka/Difrakce/KapD03.pdf>
- [8] <http://www.cbpmr.cz/vyskopis.html>
<http://www.cbpmr.cz/vyskopis-cr-s-malym-rozsirenim-22.html>
- [9] www.mapy.cz

Doporučená literatura

- [10] Prokop, J.; Vokurka, J.: Šíření elektromagnetických vln a antény. SNTL/ALFA 1980 (s. 160 – 164, popř. až 170).
- [11] Procházka, M.: Antény – Encyklopedická příručka. 3. rozšířené vydání. BEN, 2006 (s. 286 – 288).

