

Během předposledního květnového víkendu se podařilo uskutečnit radioamatérskými prostředky první oboustranné spojení odrazem VKV signálů od měsíčního povrchu u nás vůbec. Naše prvenství je i v prvním spojení tohoto druhu v ZST. Následující článek přináší přehled předpokladů, které je nutno splnit pro úspěšné zvládnutí mechanismu šíření odrazem VKV signálů od měsíčního povrchu a jejich konfrontace s dosaženými praktickými výsledky.

Radiové spojení odrazem elektromagnetických vln od povrchu Měsíce, označované často zkratkami EME (Earth—Moon—Earth, tj. Země—Měsíc—Země) či MB (Moon Bounce — měsíční odraz), jež lze považovat za historicky první radiovou komunikaci, přesahující hranice pozemskosti, oslavilo v tichosti třicáté výročí (1946—1976) příjmu prvních odrazů od měsíčního povrchu, umožněných rozvojem radiolokační techniky po druhé světové válce. Od té doby byly radiové odrazy od Měsíce podrobeny rozsáhlému studiu postupně prakticky v celém běžně užívaném kmitočtovém rozsahu od 50 MHz do 10 GHz.

První radioamatérské pokusy s odrazem radiových signálů od Měsíce byly realizovány již v roce 1953, k prvnímu EME spojení došlo sice až v r. 1960, ale pokud je známo, bylo to vůbec první oboustranné spojení mezi dvěma stanicemi o různých stanovištích.

Přesto, že dnes již lze považovat výstavbu zařízení pro EME spojení za špičkovou záležitost jen výjimečně, uchoval si tento druh spojení vzrušující nádech kosmické komunikace.

Poměry na trase EME

Spojení EME je vlastně odrazem radiových vln od pasivního reflektoru kulového tvaru, průměru asi 3476 km (přibližně 1/4 průměru Země), vzdáleného od Země v perigeu asi 356 000 km a v apogeju asi 406 000 km. Radiový signál, vyslaný k povrchu Měsíce se tedy vrací přibližně za 2,4...2,7 s a jeho časový průběh a kmitočet závisí na řadě činitelů, kteří byli a jsou předmětem studia při zkoumání vlastností měsíčního povrchu jakožto odrazné plochy a parametrů celé přenosové cesty Země—Měsíc—Země. Útlum této trasy při příjmu odražených signálů toutéž anténou lze snadno vyjádřit (z radiolokační rovnice) např. ve tvaru

$$\left(\frac{P_p}{P_v}\right) = \left(G_i \cdot \frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \cdot \left(\frac{S_{ef}}{4\pi r^4}\right) = \left(\frac{S_a \cdot \eta}{\lambda}\right)^2 \cdot \left(\frac{S_{ef}}{4\pi r^4}\right), \quad (1)$$

kde P_p je výkon přijatého odraženého signálu na svorkách antény (W),

P_v je výkon vyslaného signálu na svorkách antény (W),

G_i je zisk antény vůči isotrovnímu zářiči,

λ je vlnová délka,

S_{ef} je efektivní (ekvivalentní) odrazná plocha Měsíce (m^2),

r je vzdálenost Měsíce od Země (m),

S_a je plocha ústí antény (m^2) pro antény s plošným reflektorem, resp. součín $S_a \cdot \eta$ je efektivní

(ekvivalentní) plocha lineární antény,

η je účinnost antény (činitel využití S_a) s plošným reflektorem (zrcadlem), u lineární antény je $\eta = 1$.

Přitom platí vztah

$$S_a \cdot \eta = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_i.$$

Vidíme, že poměr výkonů vyslaného a odraženého signálu je dán ve vztahu (1) součinem dvou výrazů (v závorkách), kde hodnotu prvního výrazu můžeme ovlivnit velikostí antény a použitým kmitočtem, zatímco hodnotu druhého výrazu ovlivnit nelze. Kromě toho hodnotu S_{ef} neznáme a musíme ji určit měřením poměru P_p/P_v za různých podmínek. Z řady měření plyne, že střední hodnota S_{ef} je přibližně kmitočtově nezávislá a poměr P_p/P_v pro zisk antény $G_i = 1$ lze vyjádřit vztahem

$$b = 10 \log \frac{P_p}{P_v} = 207 + 20,5 \cdot \log f, \quad [\text{dB}, \text{MHz}] \quad (2)$$

kteří platí pro perigeum. V apogeju jsou hodnoty b asi o 2,2 dB vyšší. Tato základní střední hodnota útlumu je ovšem ovlivňována řadou dalších jevů.

Při měřeních bylo zjištěno, že ani na vysokých kmitočtech se neprojevuje na povrchu Měsíce přítomnost koherentní odrazné plochy, a že se tedy měsíční povrch chová jako množina velkého počtu odrazných (rozptylových) ploch, i když některá měření v kmitočtové oblasti 400 až 1000 MHz vykazovala možnost přítomnosti takové plochy. Zajímavé je, že z časového průběhu impulsních odrazů vyplývá, že i když krátký impuls doznívá po odrazu několik ms, max. amplitudu odrazu určuje poměrně malá plocha z povrchu Měsíce, odpovídající efektivní kruhové odrazné ploše o průměru asi 410 km. Uvedené skutečnosti způsobují vzhledem k libraci („kolébání“) Měsíce tzv. librační únik, který se projevuje jako rychlý únik a má za následek tzv. „drop-out“ (výpadky) přijímaného signálu, je-li jeho poměr $s/\bar{s}$ malý. Rychlost tohoto úniku bývá řádu vteřin při kmitočtech okolo 100 MHz a roste s kmitočtem tak, že na 10 GHz odpovídá kmitočtům více než několik desítek Hz. Obálka odraženého signálu přitom vykazuje převážně Rayleighovo rozložení amplitud (Riceovo rozložení, signalizující přítomnost koherentní odrazné plochy, bylo zjištěno jen při některých měřeních).

Dalším jevem, silně se projevujícím na časovém průběhu odraženého signálu především na nižších kmitočtech (řádů 100 MHz) je Faradayova rotace, která

stáčením polarizační roviny radiové vlny při průchodu ionosférou způsobuje pomalý, hluboký únik při lineární polarisaci antén. Nepříznivě působí též vlivy tzv. scintilace, kdy nehomogenity v ionosféře způsobují vícecestné šíření procházejícího signálu a tím interferenční úniky. Zmíněné vlivy ionosféry se zmenšují v noci v zimním období, které je tak nejvhodnější dobou pro EME spojení na kmitočtech až do několika set MHz. S rostoucím kmitočtem se tyto jevy uplatňují stále méně a okolo 1000 MHz je lze již úplně zanedbat.

Posledním rušivým jevem, který se naopak s rostoucím kmitočtem uplatňuje stále více, je Dopplerův efekt, způsobující posuv přijímaného kmitočtu o hodnotu $\Delta f = 2v/\lambda$ vůči kmitočtu vysílače. Rychlost v je vzájemná rychlost Měsíce vůči Zemi. Dopplerův posuv kmitočtu je tedy nejvyšší při východu a západu Měsíce a v našich zeměpisných šířkách je na kmitočtu 433 MHz max. asi 1 kHz. Protože však šířka propustného pásma přijímače bývá většinou pod 1 kHz, je třeba na vyšších kmitočtech Dopplerův posuv kmitočtu při ladění přijímače uvažovat.

Pro představení velikosti požadavků na zařízení uvedeme rozbor EME spoje na 433 MHz, který bude na konci článku srovnán s praktickými výsledky. Předpokládejme, že se jedná o spojení mezi dvěma stanicemi, které současně vidí Měsíc. Požadovaný přijímaný výkon na svorkách přijímací antény je určen vztahem

$$P_p = P_{p \min} \cdot (s/\bar{s}) = k T_s B (s/\bar{s}), \quad (3)$$

kde $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Ws/°K je Boltzmannova konstanta,

B je ef. šířka pásma přijímače v Hz

$s/\bar{s}$ je poměr signálu k šumu na vstupu přijímače (ant. zesilovače),

T_s je šumová teplota přijímače při nasměrování antény na Měsíc, kterou určíme ze vztahu

$$T_s = T_a + (b_k \cdot F_p - 1) \cdot T_0 \quad (4)$$

kde T_a je šumová teplota antény ve °K, závislá na kmitočtu a nasměrování antény vůči obloze,

b_k je útlum napáječe (koax. kabelu) mezi anténou a anténním zesilovačem, vyjádřený jako poměr výkonů,

T_0 je teplota okolí a anténního napáječe,

F_p je činitel šumu ant. zesilovače včetně vlivu následujícího přijímače.

Bližším rozбором zjistíme, že zejména na vyšších kmitočtech začíná mít při malé hodnotě F_p velikost útlumu kabelu b_k zásadní význam, a proto dáváme ant. zesilovač přímo k napájenému prvku antény, např. k primárnímu zářiči u parabolické antény.

Pro rychlý výpočet útlumových poměrů upravíme vztahy (1) až (4) na praktický vztah

$$s/\bar{s} = P_v + G_{vi} + G_{pi} - b - P_{p \min} \quad (5)$$

do kterého všechny veličiny dosazujeme v dB a dBW. G_{vi} a G_{pi} jsou zisky vysílací a přijímací antény vůči isotrovnímu zářiči. Ze vztahu (5) často určujeme referenční hodnotu součtu $P_v + G_{vi} + G_{pi}$ pro poměr $s/\bar{s} = 0$ dB a $P_{p \min}$.