

ANALÝZA RUŠENÍ V RÁDIOVÉM SYSTÉMU OFFSET

Petr Johanides

Katedra komunikačních a informačních systémů, Fakulta VT, UO v Brně

Abstrakt

Příspěvek se zabývá problematikou rádiové komunikace řízení letového provozu, využívající systém Offset s kmitočtově-prostorovou vysílací diverzitou. Vzhledem k používané amplitudové modulaci byl pro potřebu analýz i simulací aplikován tzv. záznejový signál. Jsou uvedeny základní výsledky analyticko-početních řešení včetně simulací tohoto signálu a jeho zobrazení v časové i kmitočtové oblasti v prostředí Matlab/Simulink. Získané výsledky odhalují potenciální slabiny systému offset a dávají návod jak tyto eliminovat.

1 Úvod

Rádiový systém Offset je určen pro řízení letového provozu v oblastech, kde dochází k výpadkům standardního rádiového spojení s letouny vlivem zaclonění přímé rádiové trasy. Pro řízení je používáno hovorové spojení přenášené amplitudovou modulací AM (7K00A3E). Systém používá modifikovanou techniku výběrového příjmu signálů na palubě letounu. Modifikace spočívá ve využití prostorově-kmitočtové diverzity 2 až 5-ti pozemních vysílačů řízení letového provozu a palubního jednonálového rádiového přijímače, který umožňuje ve společném 25 kHz přijímacím traktu zpracování signálů všech pozemních vysílačů. Hodnoty kmitočtových rozestupů – offsetu nosných pozemních vysílačů jsou standardizovány dle ICAO [1], tab. 1.

Tabulka 1: Hodnoty kmitočtových parametrů systému Offset

Počet nosných N	Offset Δf [kHz]	Nestabilita vysílačů δf_v [kHz]	Dopplerovský kmitočet δ_D [Hz]
2	10	± 2	± 200
3	7,5	$\pm 0,65$	
4	5	$\pm 0,5$	
5	4	$\pm 0,04$	

Stupeň technického řešení přijímačů a mnohdy i vysílačů způsobují, že se při vedení rádiového provozu v systému Offset vyskytuje rušení.

2 Analýza systému a jeho model

Při analýze řešení problémů i simulaci byl aplikován tzv. záznejový signál [2], reprezentující obálku $U_{Z,N}(t)$ výsledného součtu přijímaných signálů jednotlivých N vysílačů. Výsledný záznejový signál nemodulovaných nosných lze zapsat v rekurentní podobě jako:

$$U_{Z,N}(t) = \sqrt{U_N^2 + 2U_N U_{Z,N-1}(t) \cos[(N-1)\cos \Delta\omega t + \varphi_N - \varphi_{\Sigma N-1}] + U_{Z,N-1}^2(t)} \quad , \quad (1)$$

kde

$$\varphi_{\Sigma N-1} = \arctg \frac{U_{Z,N-2}(t) \sin \varphi_{\Sigma N-2} + U_{N-1} \sin((N-2)\Delta\omega_{N-1}t + \varphi_{N-1})}{U_{Z,N-2}(t) \cos \varphi_{\Sigma N-2} + U_{N-1} \cos((N-2)\Delta\omega_{N-1}t + \varphi_{N-1})} \quad , \quad (2)$$

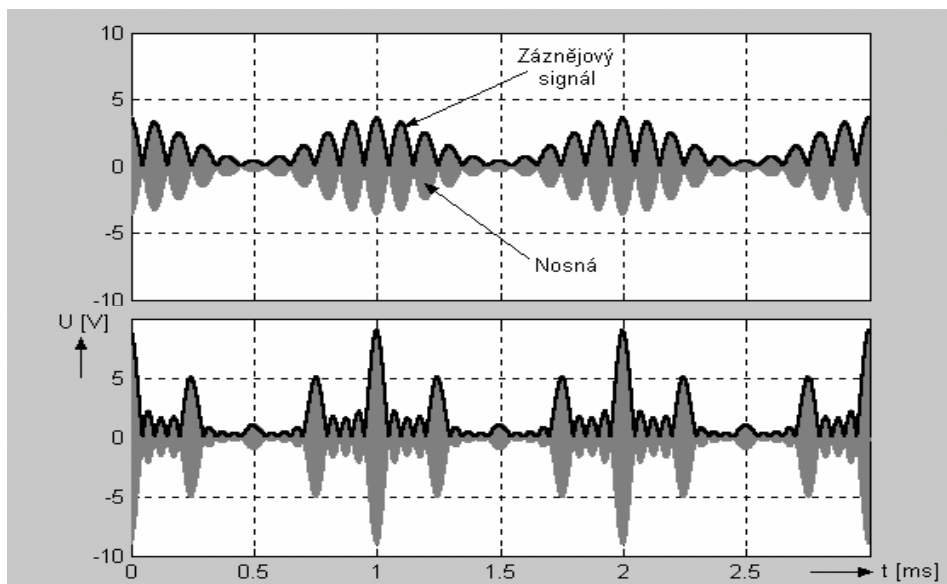
kde U_N a φ_N jsou amplituda a počáteční fáze signálu přijímané nosné N . vysílače, $U_{Z,N-1}(t)$ a $U_{Z,N-2}(t)$ jsou záznejové signály předchozích dílčích součtů a $\Delta\omega$ je standardizovaný kmitočtový rozestup – offsetový kmitočet jednotlivých nosných pozemních vysílačů, tab. 1.

Vzhledem k amplitudové modulaci v systému Offset, byly potom v (1) a (2) původní amplitudy nosných U_N nahrazeny obálkou $U_N(t)$ reprezentující signály s amplitudovou modulací, tj.:

$$U_N = U_N(t) = U_{M,N} (1 + m \cos \Omega t) , \quad (3)$$

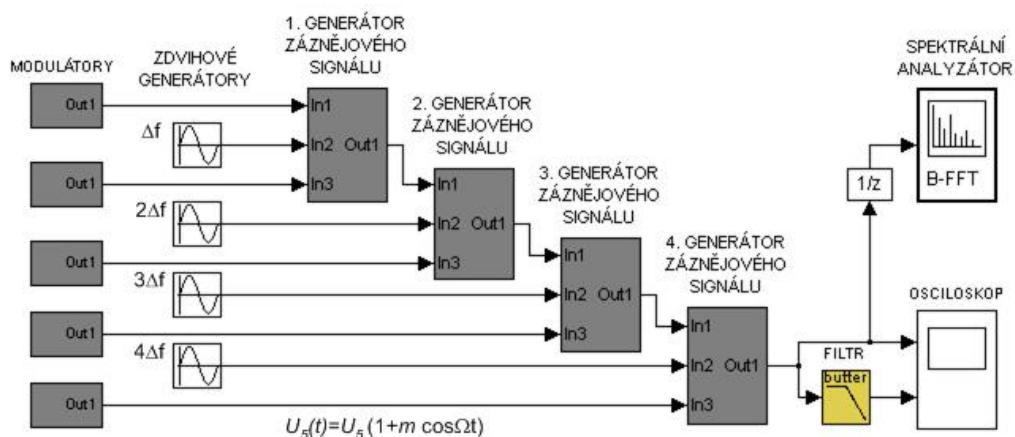
kde $U_{M,N}$ je amplituda N -té nosné, m je hloubka amplitudové modulace ($m = 0,85$), Ω je úhlový modulační kmitočet ($F=1 \text{ kHz}$).

Názorné ověření, že záznějový signál je v daném případě ekvivalentem obálky a reprezentuje demodulovaný signál systému Offset, je na obr. 1; zde je vykreslen v prostředí Matlab současně časový průběh záznějového signálu s použitím vztahů (1) ÷ (3) a časový průběh sumy přijímaných amplitudově modulovaných signálů N pozemních vysílačů systému Offset. Zavedení záznějového signálu umožní v dalším zjednodušení analytického aparátu včetně snížení nároků na operační rychlost.



Obrázek 1: Záznějové signály a přijímané signály od 2 a 5-ti pozemních vysílačů

Vzhledem k výše uvedenému byl pro potřeby analýzy rušení vytvořen model kaskádního generátoru modulovaných záznějových signálů, obr. 2, doplněný o osciloskop a spektrální analyzátor.



Obrázek 2: Struktura měřicího pracoviště pro ověření vlastností systému Offset.

Souběžné sledování záznějových signálů v časové ale zejména kmitočtové oblasti umožní názorné doplnění výsledků dalších analyticko-početních řešení, při ověřování příčin rušení v systému Offset.

3 Výsledky analýz a simulací

V příspěvku je dále prezentován zejména 3. kmitočtový systém Offset, jako potencionální představitel tohoto systému. Vzhledem k rozsahu příspěvku jsou dále uvedeny výsledky dvou základních variant, tj. případy se synchronizovanými (ideální případ) a nesynchronizovanými (reálný případ) vysílači a modulátory.

3.1 Synchronizované vysílače a modulátory (ideální případ)

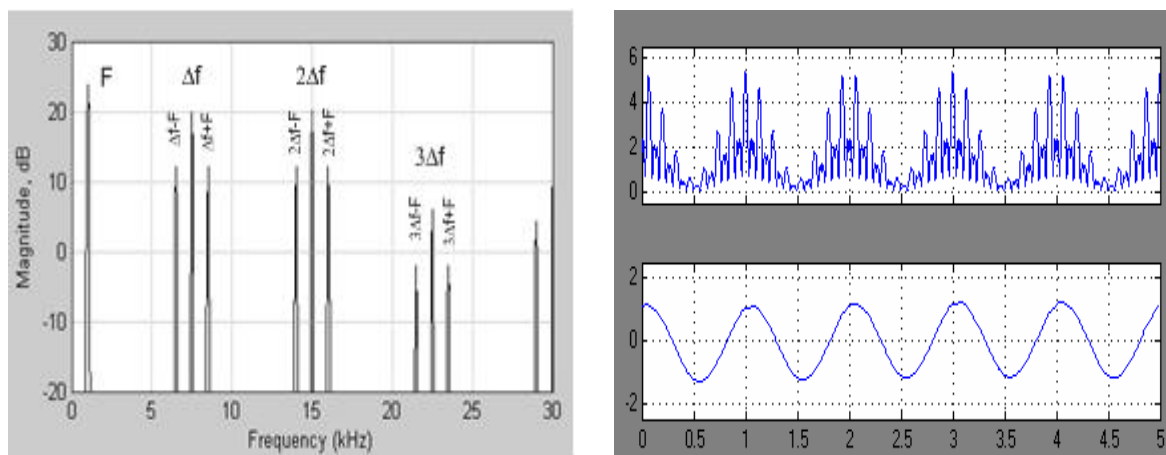
Analytické vyjádření záznějového signálu $U_{z,3}(t)$ s jeho následným rozvojem do řady umožňuje ohodnocení spektra na výstupu demodulátoru přijímače. Záznějový signál v případě 3. kmitočtového systému Offset je ve tvaru:

$$U_{z,3}(t) = U + mU \cos \Omega t + \frac{2U_1U_2}{U} \left[\cos \Delta\omega t + \frac{m}{2} \cos(\Delta\omega \pm \Omega)t \right] - \frac{a_0U_3}{U} \left[\cos 2\Delta\omega t - \frac{m}{2} \cos(2\Delta\omega \pm \Omega)t \right] + \dots \quad (4)$$

Z rozvoje (4) je zřejmé, že kromě stejnosměrné složky $U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}$ demodulovaný signál obsahuje:

- modulační signál s úhlovým kmitočtem Ω a amplitudou mU a
- amplitudově promodulovaný signál offsetového kmitočtu $\Delta\omega$ (včetně jeho vyšších harmonických) modulačním signálem o kmitočtu Ω .

Výsledky získané simulací v prostředí Matlab/Simulink s využitím modelu na obr. 2 jsou uvedeny na obr. 3.



Obrázek 3: Záznějový (demodulovaný) signál v spektrální a časové (ms) oblasti 3 kmitočtového systému Offset s $\Delta f = 7,5 \text{ kHz}$, $F = 1 \text{ kHz}$, časová oblast bez a s filtrací s $f_h = 3 \text{ kHz}$.

Porovnáním výsledků provedené analýzy a simulace je zřejmá shoda obou použitých metod. Amplitudově promodulovaný offsetový kmitočet včetně jeho harmonických způsobují rušení projeví se pískotem, pokud horní mezní kmitočet f_h podetekčního filtru leteckého přijímače přesáhne hodnotu standardního telefonního kanálu (cca 3 kHz), či bude srovnatelný s hodnota offsetového kmitočtu Δf či dokonce $N \Delta f$.

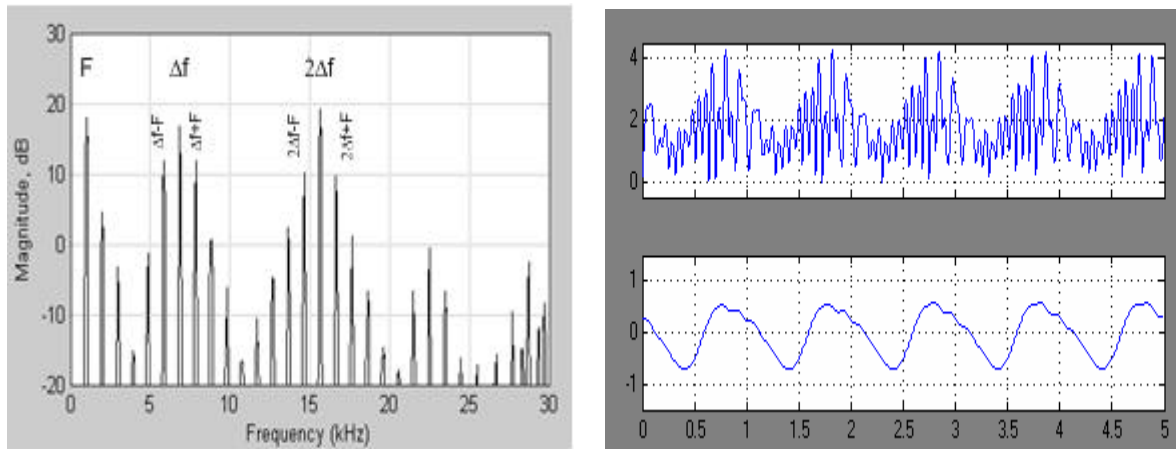
3.2 Nesynchronizované vysílače a modulátory (reálný stav)

Analytické vyjádření záznějového signálu pro tento případ je ve tvaru:

$$\begin{aligned}
 U_{Z3}(t) = & U_0 + 2mU_1U_2 \cos \Omega t + U_1U_2 [\cos \Delta\omega_2 t \pm m \cos(\Delta\omega_2 \pm \Omega)t] + \\
 & + a_0U_3 [\cos 2\Delta\omega_3 t + m \cos(2\Delta\omega_3 \pm \Omega)t] - \\
 & - a_1U_3 \left[\cos(2\Delta\omega_3 \pm \Delta\omega_2)t - \frac{m}{2} \cos(2\Delta\omega_3 \pm \Delta\omega_2 \pm \Omega)t \right] + \dots, \quad (5)
 \end{aligned}$$

kde $\Delta\omega_N = |\Delta\omega - \delta\omega_N|$ reprezentuje kmitočtovou odchylku offsetového kmitočtu $\Delta\omega$ N -tého vysílače od své jmenovité hodnoty vlivem jeho kmitočtové nestability $\delta\omega_N$, včetně doplerovského kmitočtu $\delta\omega_D$, zatímco součinitelé a_N jsou početně určené binomické koeficienty mocninné řady, závislé na vzájemném poměru amplitud nosných jednotlivých vysílačů.

Analyticko-početní řešení bylo opět ověřeno simulací jako v předchozím případě. Dosažené výsledky jsou uvedeny na obr. 4.



Obrázek 4: Záznějový signál ve spektrální a časové (ms) oblasti 3. kmitočtového systému Offset s $\Delta f = 7,5 \pm 0,65 \text{ kHz}$, $F = 1 \text{ kHz}$ a $\Delta\phi = \pi/2,5$; časová oblast bez a s filtrací s $f_h = 3 \text{ kHz}$

Obě použité metody shodně ukazují, že spektrum záznějového signálu je ve srovnání s předchozím případem obohaceno o řadu parazitních kmitočtových složek, spadajících i do pásma standardního telefonního kanálu, kde je nelze odfiltrovat a ruší tak rádiový příjem. Jejich kmitočet závisí na kmitočtové stabilitě vysílačů, jejich amplituda na poměru amplitud nosných jednotlivých vysílačů.

Složitější situace však nastává v případě, kdy vlivem konečné doby šíření signálů komunikačním prostředím přichází tyto absolutně rozfázovány, čímž je dále vyjádřeno, že fázové přírůstky na N trasách jsou rovnoměrně rozloženy, tj.:

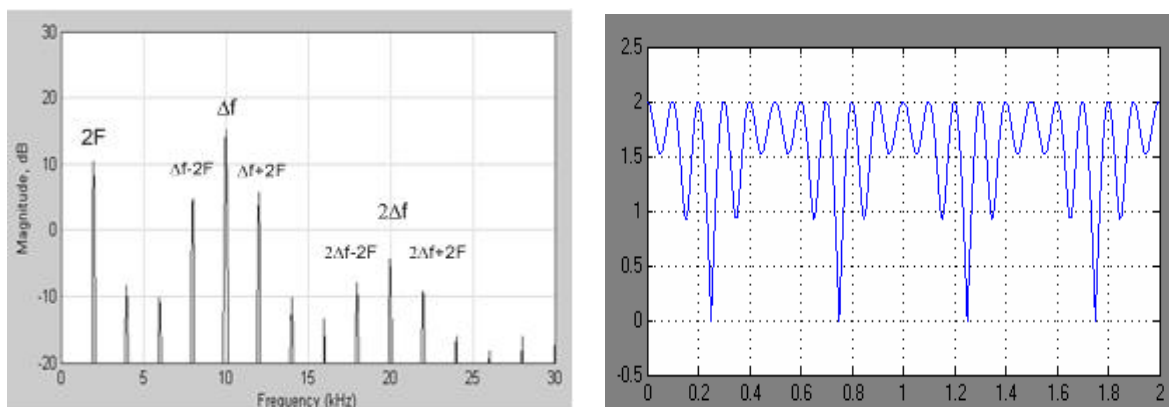
$$\phi_n(\tau) = \frac{2\pi}{N}(k-1) \quad \text{pro } k = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

Vzhledem k již poměrně těžkopádnému matematickému aparátu analytického řešení 3. kmitočtového systému Offset, je dále uveden výsledek analýzy při tzv. absolutním rozfázování modulátorů vysílačů 2. kanálového systému. Podle (5) je tento fázový přírůstek π .

Za předpokladu stejné energetické bilance obou rádiových tras lze záznejový signál opět rozložit do řady a zapsat ve tvaru:

$$U_{z2}(t) = \sqrt{2}U \left[1 + \frac{m^2}{2}(1 + \cos 2\Omega t) + \left(1 - \frac{m^2}{2} \right) \cos \Delta\omega t - \frac{m^2}{4} \cos(\Delta\omega \pm 2\Omega)t + \dots \right] \quad (6)$$

Výsledky simulace ověřující analytické řešení (6) jsou uvedeny na obr. 5.



Obrázek 5: Záznejový signál v kmitočtové a časové (ms) oblasti 2. kmitočtového systému Offset s absolutně rozfázovanými modulátory ($\Delta f = 10 \text{ kHz}$, $F = 1 \text{ kHz}$, $\phi = \pi$).

Obě použité metody shodně ukazují, že záznejový a tedy ani nemodulovaný signál neobsahuje požadovaný informační signál o kmitočtu F , ale pouze jeho 2. harmonickou a dále offsetový kmitočet Δf , promodulovaný sudými harmonickými informačního signálu; dochází tak ke ztrátě modulace. Uvedený postup lze aplikovat i na více jak 2. kmitočtové systémy Offset.

Závěr

Výsledky analýzy i simulace shodně prokázaly, že rušení se projevuje hvizdy a brumy, dále dochází ke snižování srozumitelnosti až po úplnou ztrátu spojení či falešnou ztrátu spojení. Lze konstatovat, že:

- rušení hvizdy vzniká zejména vlivem nedostatečné podetekční filtrace v přijímači, hvizdy jsou potom způsobeny pronikáním offsetových kmitočtů na výstup přijímače;
- rušení brumy vzniká zejména vlivem nedostatečné stability nosných pozemních vysílačů;
- pokles srozumitelnosti až po úplnou ztrátu modulace je zapříčiněn dodatečnou časovou diverzitou modulačního signálu, respektive obálky nosných vlivem průchodu signálu různými telekomunikačními a rádiovými kanály;
- falešná ztráta spojení vzniká nevhodným subsystémem tzv. *poměrového squelche*, odpojujícím nízkofrekvenční trakt přijímače vlivem pronikajících offsetových kmitočtů.

Literatura

- [1] ICAO: ANNEX 10, Aeronautical Telecommunications. Volume III – Communications systems.
- [2] Čiřťjakov, N.I. aj: Radioprijomnyje ustrojstva. Radio i svjaz 1986.
- [3] Hernando, J. M. – Pérez-Fontán, F.: Introduction to Mobile Communications Engineering. Artech House 1999.
- [4] Bartsch, H. J.: Matematické vzorce. Praha 1996.