

# Dynamická optimalizace šířky stereofonní báze pro FM vysílání.

Ing. Pavel Straňák, development manager

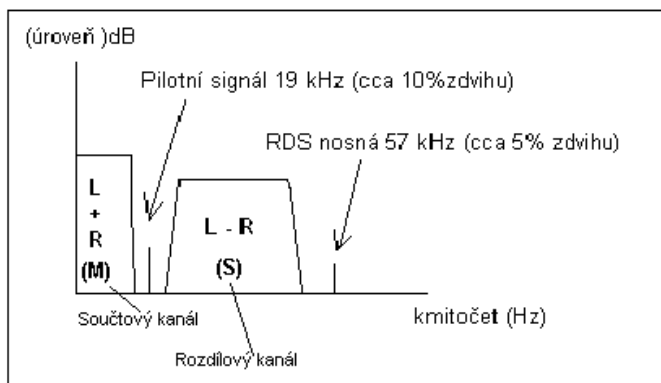
Phobos Engineering s.r.o.

Description of newly developed algorithm for optimization of stereophonnic base for FM radio modulation (87.5 – 108 MHz). Existing stereophonnic multiplex system for FM broadcasting is first discussed. Focus is set to practical problems of signals with non optimal M/S (Middle/Side channel) ratio. Problem is solved by application of newly developed DSP algorithm before modulation processing. Algorithm runs on Analog Devices SHARC ADSP 21161 and use dynamically controled M/S ratio.

## 1. Úvod – stereofonní systém pro FM

Při vysílání FM stereo se dnes běžně aplikuje modulační procesing (jeho cíle a vlastnosti viz [2]). Součástí modulačního procesingu může být i optimalizace šířky stereofonní báze. Důvodů k zásahu do stereofonní báze je několik. Již předem ale upozorňujeme, že tyto zásahy nejsou nutné a tvoří nadstavbu modulačního procesingu, který samotný téměř nutný je.

Spektrum úplného zakódovaného stereofonního signálu v systému s pilotním signálem je znázorněno na následujícím obrázku **obr.1**.



Obr 1: Spektrum zakódovaného stereofonního signálu

### 1.1. Systém stereofonního kódování

Systém s pilotním kmitočtem se používá na celém světě, liší se jen časová konstanta preemfáze, V Evropě je to 50 us, v USA 75 us. (Existovaly i jiné systémy pro stereofonní kódování na FM, například systém s polární modulací, dříve používaný v SSSR. Systém sledoval zjednodušení stereofonního dekodéru v přijímači. Za cenu triviálního dekodéru se ovšem podstatně hůře využíval kmitočtový zdvih vysílače. Ještě v polovině 90. let dodávali někteří výrobci na trh

v Rusku přijímače s dekodérem určeným pro tento, v té době dožívající systém.)

Signálem se spektrem podle obr.1 modulujeme FM vysílač. Normou povolený maximální kmitočtový zdvih modulace je 75 kHz. O jeho dodržení včetně eliminace překmitů se stará modulační procesor.

## 2. Poměry v zakódovaném stereofonním signálu

Pokud ponecháme signál vstupující do modulačního procesoru v původní podobě, tedy bez dodatečného ovlivnění stereofonní báze, procesor provede pouze úrovně-spektrální úpravy signálů levého a pravého kanálu. Pokud jsou signály levého a pravého kanálu například v protifázi, činnosti procesoru se to nezmění. Stereofonní signál se v procesu stereofonního kódování rozkládá na součtový ( $M=L+R$ ) a rozdílový ( $S=L-R$ ) kanál. Pakliže v signálu existuje dokonalá korelace mezi levým a pravým audio kanálem, zakódovaný stereofonní signál se skládá pouze ze součtového kanálu a pilotního signálu, neboť rozdílový kanál se rovná nule.

Pro takový případ  $L=R$  (dokonalá korelace), můžeme psát:  $M = L+L$  a  $S = L-L$ , tedy  $M = 2L$  a  $S = 0$ . Tato situace je ekvivalentní vysílání monofonního signálu a nebo signálu, jehož jediná složka je umístěna uprostřed stereofonní báze a je v obou kanálech soufázová. Signál je v tomto případě přenášén pouze v součtovém kanálu.

Pokud naopak signál obsahuje v levém a pravém audio kanálu signál v protifázi, zakódovaný stereofonní signál se skládá pouze z rozdílového kanálu a pilotního signálu, neboť součtový kanál se rovná nule

Pokud tedy  $L=-R$  (dokonalá protifáze), můžeme psát:  $M = L-L$  a  $S = L-(-L)$ , tedy  $M = 0$  a  $S = 2L$ . Tato situace je ekvivalentní vysílání monofonního signálu v protifázi a nebo signálu, jehož jediná složka je v obou audio kanálech vzájemně protifázová. Signál je v tomto případě přenášén pouze v rozdílovém kanálu.

V reálném stereofonním signálu se situace stále mění, a **po-  
hybuje se někde mezi těmito extrémy.**

Kvůli požadavku kompatibility s reprodukcí na monofonním zařízením se dnes používá téměř výhradně intenzitní stereofonie, ve které se signál umísťuje na stereofonní bázi pouze pomocí změn úrovně, nikoliv pomocí fázových posunů. Všechny složky stereofonního signálu jsou tak v levém a pravém kanálu vzájemně soufázni, liší se pouze úrovní.

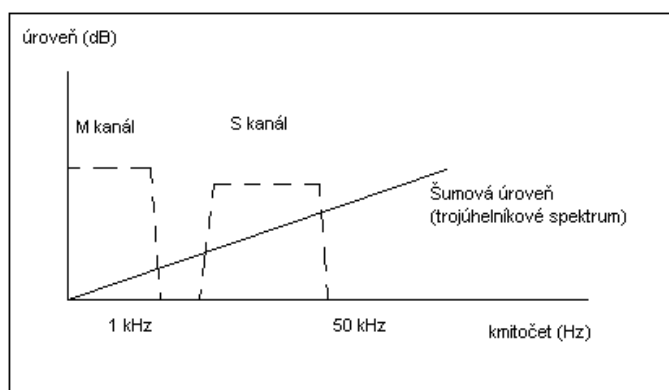
Jedním limitním případem intenzitní stereofonie je signál, obsažený v obou kanálech ve stejné (řekněme jednotkové) úrovni  $L = 1$  a  $R = 1$ . Pro součtový kanál pak platí:  $M = L + R = 1 + 1 = 2$ , pro rozdílový:  $S = L - R = 1 - 1 = 0$

Druhým limitním případem je signál, obsažený pouze v jednom, řekněme levém kanálu. Pro tento případ tedy:  $L=1$ ,  $R=0$ . Pro součtový kanál proto můžeme psát:  $M = L+R = 1 + 0 = 1$ . Pro rozdílový kanál podobně píšeme:  $S = L - R = 1 - 0 = 1$

Pouze v případě, že při výrobě originálního záznamu (na CD) bylo již použito rozšíření stereofonní báze může dojít k tomu, aby většina signálu ležela v rozdílovém kanálu. Nastane to pro signály, které se po rozšíření dostanou vně stereofonní báze. Limitním případem toho je úplná protifáze v levém a pravém kanálu, tedy  $L = -R$ , tedy  $M = 0$  a  $S = 2L$ . Jinými slovy je sice pravděpodobné, že většina signálu se bude vždy nacházet v součtovém kanálu, tedy  $M \geq S$ , není to však úplně jisté. Proto musíme počítat i s možností, kdy se krátkodobě vyskytne většina signálu v rozdílovém kanálu.

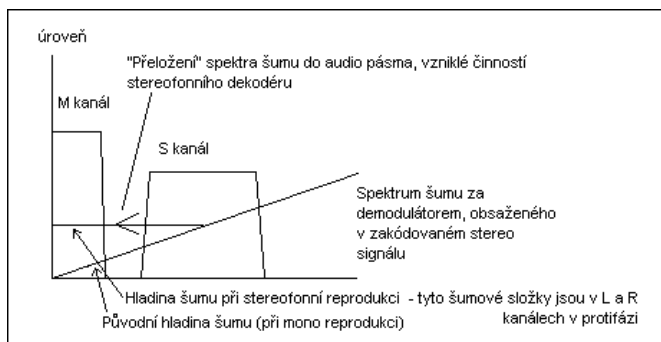
Abychom mohli posoudit požadavky na smysluplnou optimalizaci šířky stereofonní báze, musíme posoudit vliv šířky stereofonní báze na FM příjem, především na mobilních přijímačích, tedy autorádiích.

Šumové spektrum FM modulace za demodulátorem přijímače má tzv. trojúhelníkový průběh. Znamená to, že s kmitočtem úroveň šumových složek roste, viz obr.2.



Obr. 2. „Trojúhelníkové“ šumové spektrum za FM demodulátorem přijímače

Proto je šumem více zasažen přenos rozdílového (S) než součtového (M) kanálu. Stereofonní dekodér ze spektrálního hlediska „překládá“ rozdílový signál do základního pásma zvukového signálu, tedy do oblasti 0 - 15 kHz. Činností stereofonního dekodéru tedy nevzniká pouze stereofonní signál, ale stereofonní signál se zvýšeným šumem, viz obr.3.



Obr. 3. – Šumové poměry při stereofonním dekódování

Tento jev je znatelný především v případě, kdy je přijímaný VF signál slabý a šum se stává významným. Z principu stereofonního dekódování plyne, že šumové složky ze součtového (M) kanálu leží v dekódovaném signálu uprostřed stereofonní báze a v jednotlivých (L,R) zvukových kanálech ve fázi. Šumové složky rozdílového (S) kanálu leží v dekódovaném signálu v jednotlivých zvukových kanálech (L,R) a vzájemně v protifázi. Z uvedených faktů plyne, že odstup signál/šum je u dekódovaného stereofonního signálu vždy horší, než u monofonního signálu, nebo u signálu stereofonního přijímaného ale na monofonním přijímači bez stereofonního dekodéru.

Stereofonní signál indikuje přítomnost pilotního kmitočtu 19 kHz. Tento kmitočet informuje přijímač o stereofonním příjmu a současně slouží k synchronizaci stereofonního dekodéru. Pokud se dekodér aktivuje, dojde k přeložení šumového spektra z oblasti rozdílového kanálu do základního pásma zvukového signálu. Šum je ovšem v oblasti rozdílového signálu obsažen vždy, prakticky nezávisle na úrovni tohoto signálu. Aktivací dekodéru proto dojde k zhoršení odstupů signál/šum v dekódovaném signálu. Objeví se silné šumové složky, které jsou v levém a pravém kanálu v protifázi. Pokud je ve vysílaném signálu hodně stereofonní informace, rozdílový kanál nese silný užitečný signál, který zvýšení šumového pozadí účinně maskuje. Pokud ale vysílaný signál nenese stereofonní informaci, nebo jí nese málo (tedy například dominantní složka signálu se vyskytuje ve středu stereofonní báze), dojde k ničím nemaskovanému zhoršení šumového pozadí.

Protože v případě mobilního příjmu dochází k nedefinovanému kolísání síly přijímaného signálu v závislosti na vzdálenosti od vysílače a profilu terénu, kolísá silně i výsledné šumové pozadí v demodulovaném signálu. Vzhledem k trojúhelníkovému spektru šumu za FM demodulátorem se to projeví velmi silně ve zvukovém signálu za stereofonním dekodérem. Jak již bylo řečeno výše, kritické složky šumu pocházejí z rozdílového kanálu (S) a jsou v levém a pravém zvukovém kanálu vzájemně v protifázi. To vede většinu výrobců mobilních přijímačů (autorádií) k následujícímu řešení:

Aby v závislosti na momentální kvalitě příjmu (která se může měnit i několikrát za sekundu) nedocházelo k silnému kolísání

ní úroveň šumu na zvukovém výstupu přijímače, sleduje se síla VF signálu pomocí obvodu AGC přijímače a v závislosti na ní se nastavuje umělé zhoršení přeslechu mezi zvukovými kanály. Pokud slábně vstupní VF signál, začíná se zavádět řízený přeslech (částečné „zmonění“). Protože, jak již víme, dominantní šumové složky pocházejí z rozdílového (S) kanálu a jsou ve zvukových kanálech v protifázi, částečný přeslech (tedy vlastně částečný součet) způsobí odečtení rušivých šumových složek. Současně s omezením šumového pozadí se však omezí i stereofonní efekt. Nakonec sice na displeji přijímače svítí údaj „stereo“, ale reprodukce je již pouze monofonní. Dochází-li k dalšímu slábnutí vstupního VF signálu, začal by se šum projevovat i přes stoprocentní zavedený přeslech. Dalším krokem je proto omezení šířky pásma zvukového signálu klouzající dolní propustí. Ta omezí reprodukci vyšších kmitočtů a s ní i slyšitelný šum.

Při jízdě ve městě může k aplikaci těchto opatření přijímačem v různé míře docházet téměř stále. V jeden okamžik proto slyšíme precizně dekódovaný signál s plnou separací levého a pravého kanálu (řekněme 45 dB), o několik sekund později například již jen se separací 6 dB. Tato situace se opakuje, jak auto projíždí nehomogenním VF polem. V extrémním případě může dojít až k úplné ztrátě stereofonní separace a k omezování šířky pásma zvukového signálu, viz výše.

Přijímače vybavené touto logikou dnes představují většinu ve střední a vyšší třídě autorádií. V kombinaci s kvalitní vstupní VF částí přijímače to vytváří podmínky pro subjektivně bezchybný příjem v poměrně širokém okolí vysílače, i tam, kde jsou příjmové podmínky skutečně problematické. Vzhledem ke zpracování signálu výše uvedeným způsobem ovšem platí jistá omezení pro smysluplné rozdělení zakódovaného stereofonního signálu mezi součtový a rozdílový kanál.

Protože často dochází k omezení stereofonní separace a tím k „likvidaci“ reprodukce signálu z rozdílového kanálu, nesmí se v rozdílovém kanálu nikdy přenášet většina energie, jinými slovy nelze dopustit stav kdy  $M < S$ . Pokud by tak bylo, každé omezení stereofonní separace, jako odpověď přijímače na slabší signál vyvolá i prudký pokles hlasitosti reprodukce. Původně inteligentní zásahy přijímače do signálu se tak stanou silně slyšitelnými a rušivými.

Navíc musíme počítat i s příjmem na monofonních přijímačích, které reprodukuje pouze součtový kanál. Tam by docházelo trvale k horšímu využití kmitočtového zdvihu, protože v součtovém signálu by leželo méně energie, než v rozdílovém, který monofonní přijímač nereprodukuje vůbec, ale na zdvihu vysílače se podílí.

Z výše uvedených faktů plyne, že průměrná úroveň signálu v součtovém (M) kanálu by měla být stále vyšší, nebo nanejvýše rovná úrovni v rozdílovém (S) kanálu. Otázkou zůstává, jaký je optimální poměr signálů v těchto kanálech z hlediska nejlepšího možného stereofonního efektu a současně maskování dominantního šumu pocházejícího

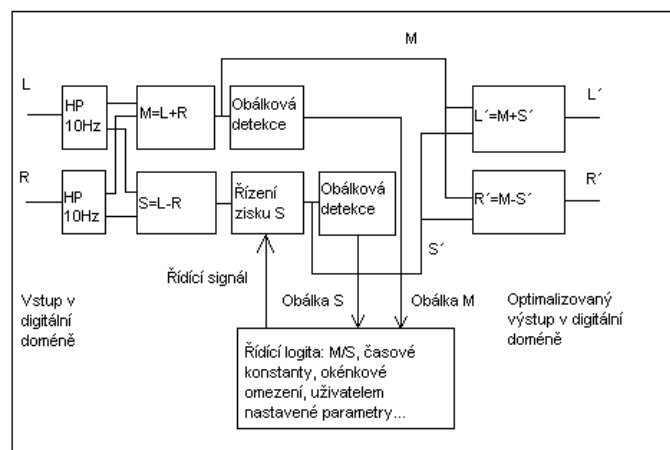
z dekódování rozdílového kanálu. Dále je potřeba vzít v úvahu automatické řízení separace levého a pravého kanálu v autorádiích.

Vezmeme-li toto všechno v úvahu, optimální poměr součtového (M) a rozdílového (S) kanálu vychází asi  $M/S = 1/0,8$ . Vyhovujících výsledků dosáhneme v rozmezí od 1/0,7 do 1/1. Vyšší poměr je ideální pro dosažení ideálního pokrytí území FM vysílačem v případě mobilního příjmu (kvalitní autorádio). Poměr 1/1 je limitním případem pro kvalitně pokryté území, poskytuje silný stereofonní efekt při přijatelném využití vlastností autorádií a monofonních přijímačů. Nižší poměr (S kanál má vyšší úroveň než M kanál) nelze příliš doporučit, pokud vůbec počítáme s možností mobilního příjmu, nebo obecně příjmu ve zhoršených podmínkách (slabé a kolísající VF pole).

### 3. Dynamická optimalizace stereofonní šířky báze pomocí číslicového zpracování v DSP.

Jak již bylo uvedeno v úvodu, u přirozených signálů (hudba z CD) je většinou dodržena podmínka poměru součtového a rozdílového kanálu  $M/S > 1$ . Proto není nutné optimalizovat stereofonní šířku báze vůbec. Pokud ale optimalizaci provedeme, získáme řadu drobných výhod, které mohou ve svém výsledku zajistit lepší pokrytí obsluhovaného území, především při příjmu na mobilní přijímače. Navíc dodáme vysílanému programu i určitou konzistentnost z hlediska stereofonního efektu, pokud se nám podaří udržet poměr  $M/S$  v oblasti optima po většinu doby.

Proces optimalizace musí probíhat před vlastním zpracováním v modulačním procesoru. Pokud je tedy popisovaný algoritmus jeho součástí, musí předcházet zpracování signálu v algoritmech modulačního procesoru. Blokové schéma optimalizačního algoritmu je na obr.4.



Obr.4. – Blokové schéma algoritmu pro optimalizaci stereofonní báze

Na vstupu máme stereofonní signál získaný z digitálního nebo analogového vstupu modulačního procesoru. V obou

případech je potřeba provést filtraci horní propustí, kvůli odstranění případné stejnosměrné složky ze signálu. V případě, že se tak neučiní, stejnosměrná složka ruší významným způsobem určování poměru M/S, zvláště u slabých signálů.

Signál se nyní rozdělí do dvou kanálů, součtového (M) a rozdílového (S), tak, jak bude později zakódován ve stereofonním kodéru. Vztahy pro získání těchto kanálů jsou prosté:  $M=L+R$ ,  $S=L-R$  a aplikují se na každý pár vzorků levého a pravého kanálu signálu po odstranění stejnosměrné složky. Součtový kanál pak prochází na výstup, kde se opět skládá s upraveným rozdílovým kanálem.

U obou kanálů, součtového i rozdílového se provádí obálková detekce (určení maximální hodnoty s určitými časovými konstantami). Z výsledků této detekce se vytváří poměr M/S. Podle velikosti tohoto poměru se pak řídí zesílení S kanálu.

Pokud je například poměr  $M/S < 1/A$ , (kde A je uživatelem nastavitelný parametr optimalizačního algoritmu, pohybující se v rozmezí 0,7.....1) dochází k zeslabování S kanálu, pokud je  $M/S > 1/A$ , dochází k jeho zesílení. Možnost zesílit nebo zeslabit S kanál musí mít své limity, aby regulace nebyla přehnaná. Tyto limity vystupují i jako uživatelem ovlivnitelné parametry optimalizačního algoritmu. Maximální zesílení může být nastaveno v rozmezí 6.....12 dB, minimální zesílení na 0....-9 dB. Znamená to, že signál, který nenese dostatek stereofonní informace bude zesílením S kanálu více roztažen po bázi, dokud míra jeho roztažení nebude taková, že bude dosaženo  $M/S = 1/A$ . Pokud ale nastane požadavek vzrůstu zisku pro zpracování S kanálu nad uživatelem nastavenou hodnotu (např. 6 dB), zastaví se na této hodnotě zisk a dále již nestoupá. Navíc poměry sleduje

„okénkový“ algoritmus, který nedovolí žádné zesílení S kanálu, pokud je detekovaná hodnota S kanálu příliš nízká. I tato hodnota je uživatelem nastavitelná v rozmezí -20.....-45 dB. To je důležité především pokud zpracováváme z podstaty monofonní část programu, například hlas moderátora ze středu stereofonní báze.

Pokud do procesu vstoupí signál s poměrem  $M/S < 1/A$ , začne zisk S kanálu klesat. Klesá dokud nedosáhne uživatelem nastavenou limitu nebo dokud není dosaženo stavu  $M/S=1/A$ . Pokud je uživatelem nastavena limita například 0 dB, znamená to, že systém není schopen zužovat stereofonní bázi a proti signálům, které mají poměr M/S příliš nízký „samy od sebe“ není schopen „zasáhnout“. Pokud ale uživatel nastaví například minimální zesílení na -6 dB, algoritmus potlačí S kanál až na polovinu a tím zajistí dodržení poměru M/S i pro signály, které jsou přicházejí ze zdroje s příliš nízkým poměrem M/S, například z CD, na které byl při výrobě aplikován v nějaké podobě rozšiřovač stereofonní báze.

#### 4. Závěr

Popsaný algoritmus je zpracován ve formě kódu pro DSP SHARC ADSP 21161 firmy Analog Devices. V současné době prochází závěrečnou fází testování v praktickém provozu. Po úspěšném zakončení testů bude součástí příští inovované softwarové verze modulačního procesoru pro FM firmy Phobos Engineering jako zdokonalená náhrada za současné řešení.

#### Reference

- [1] Analog Devices DSP ADSP 21161 data sheets, 2003
- [2] Straňák, P. Modulace FM a distribuce signálu k vysílači *Sdělovací Technika č.4, Praha, 2004.*