

DESIGNING A DIRECTIONAL ACOUSTIC TRANSMITTER

David Hladký

Master Degree Programme (5), FEEC BUT

E-mail: xhladk08@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Jan Mikulka

E-mail: mikulka@feec.vutbr.cz

Abstract In this paper the parametric transmission of sound through an amplitude-modulated ultrasonic wave, using automatic demodulation in a non-linear environment is discussed. Methods for the processing of the transmitted signal are presented; these techniques employ modified amplitude modulation to suppress the environmental effects, which otherwise distort the signal. A special emphasis is placed on the mathematical instruments describing the parametric sound beam transmission in a non-linear medium. Within our research, we fabricated a parametric speaker consisting of 50 ultrasonic acoustic transducers with the resonant frequency of 40 kHz. The functionality of the acoustic source was verified via measurement of the spatial radiation characteristics and through determination of the total harmonic distortion (THD). In order to control the parametric speaker, a digital element comprising a sampler, a transducer of the input transmitted signal, and a microcontroller to preprocess this signal and to facilitate the amplitude modulation of the ultrasonic carrier wave is designed. The applied algorithms were analyzed to establish their computational intensity; such an analysis enabled us to select a microprocessor basis suitable for the implementation of the signal processing algorithms.

Keywords: Parametric acoustic array, parametric loudspeaker, amplitude modulation, STM32F411

1. ÚVOD

V lineární akustice, lze jen s velkými obtížemi realizovat zvukové zařízení, které dokáže směrově vysílat zvukovou vlnu. Aby bylo možné vysílat v určitém směru zvukovou vlnu, je nutné využít jevů vyskytujících se v nelineární akustice, zejména jevu, který se nazývá parametrické akustické pole (PAP). Pomocí PAP je možné vysílat zvukovou vlnu v úzkém svazku do určitého místa v místnosti anebo určité skupině osob. Tento fenomén se využívá v zařízeních pro přenos parametrického (směrového) zvuku. Tato zařízení nalézají uplatnění především ve veřejných prostorách, jako jsou galerie, odchodní centra a muzea, kde je potřeba předat zvukovou informaci pouze určité osobě či skupině osob. Výhodou těchto zařízení je, že dokáží přenášet zvuk s vysokou směrovostí na rozdíl od klasické reproduktorové soustavy. Značnou nevýhodou zmíněných zařízení je jejich celkové harmonické zkreslení (THD) vysílané akustické vlny a tudíž nutnost předzpracovat vstupní signál. Při konstrukci těchto zařízení je potřeba použít amplitudový modulátor a zařízení pro přenos parametrického zvuku tzv. parametrický reproduktor, který se skládá ze značného množství ultrazvukových akustických měničů. Cílem tohoto článku je popsat základní princip parametrické akustiky a technik předzpracování signálu pomocí amplitudové modulace a předložit konkrétní návrh řešení zařízení pro parametrický přenos zvuku.

2. PRINCIP PARAMETRICKÉHO AKUSTICKÉHO POLE A PARAMETRICKÉ AKUSTIKY

Prvním, kdo teoreticky popsal princip parametrické akustiky, byl v roce 1963 P. J. Westervelt [1]. Svým teoretickým popisem objasnil, jakým způsobem dochází ke vzniku slyšitelné zvukové složky ze dvou ultrazvukových vln o úhlovém kmitočtu ω_1 a ω_2 , přičemž $\omega_1 > \omega_2$. Jestliže se

z intenzivního ultrazvukového zdroje vygenerují dvě ultrazvukové vlny o úhlovém kmitočtu ω_1 , ω_2 a jsou následně vyslány skrze nelineární prostředí (např. vzduch), dochází k jejich vzájemné interakci a vznikají sekundární vlny, které tvoří součet a rozdíl původních dvou vln. Výsledkem nelineární interakce je rozdílová složka, odpovídající rozdílu $\omega_1 - \omega_2$, která se šíří ve stejném směru jako původní vlny a zachová si jejich směrovost (čím má zvukový svazek vyšší frekvenci, tím více je užší), což je výhodou ve srovnání s lineární akustikou. Výše zmíněný jev se nazývá parametrické akustické pole.

Z teoretického popisu PAP vyšel H. O. Berktaý [2] a provedl jednoduchý pokus, kdy z ultrazvukového zdroje vyslal amplitudově modulovaný signál. Výsledkem tohoto experimentu bylo, že autodemodulovaný signál $p(\tau)$ v jisté vzdálenosti od zdroje ultrazvukového vlnění odpovídá přibližnému řešení Berktaýově rovnice (1). Tedy, že autodemodulovaný signál je roven druhé derivaci kvadrátu obálkové funkce $E(\tau)$ amplitudově modulovaného signálu (AM). V rovnici (1) je symbol β koeficient nelinearity prostředí (pro vzduch $\beta = 1,2$), d značí průměr apertury zdroje ultrazvuku, r je vzdálenost od zdroje ultrazvuku, p_0 odpovídá akustickému tlaku nosného signálu generovaného z ultrazvukového zdroje, c_0 označuje rychlost šíření zvuku, α_0 vyjadřuje absorpční koeficient nosného signálu na dané frekvenci. Hustotu prostředí označuje symbol ρ_0 , τ odpovídá retardovanému času.

$$p(\tau) \approx \frac{\beta p_0^2 d^2}{16 \rho_0 c_0^4 r \alpha_0} \frac{d^2}{d^2 \tau^2} E^2(\tau). \quad (1)$$

3. TECHNIKY AM PRO PŘEDZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU

Z Berktaýovy rovnice (1) je patrné, že výsledný autodemodulovaný signál neodpovídá původnímu signálu a je značně zkreslený v důsledku druhé derivace a kvadrátu obálkové funkce $E(\tau)$ AM, výše popsaný jev je způsoben nelinearitou prostředí. Hlavním úkolem technik pro předzpracování vstupního signálu je upravit obálkovou funkci $E(\tau)$ tak, aby bylo dosaženo co možná nejmenšího zkreslení THD výsledného autodemodulovaného signálu. S ohledem na dosažené výsledky, především malá výpočetní náročnost a nízké THD, byly vybrány pro ověření funkce zařízení dvě amplitudové modulace a to jednostranná AM bez potlačené nosné (SSB-C) viz rovnice (2) a pokročilá AM [3] [4] podle rovnice (3). Každá z uvedených technik AM upravuje jiným způsobem modulační obálku $E(\tau)$. Obě dvě modulace vycházejí z kvadraturní AM. Symbol m v rovnici (2) a (3) značí hloubku modulace, signál $g(\tau)$ označuje vstupní signál, ω_c je úhlový kmitočet nosného signálu. V rovnici (2) vystupuje signál $\hat{g}(\tau)$, který odpovídá vstupnímu signálu $g(\tau)$ po Hilbertově transformaci.

$$u_{AM}(\tau) = m \left[g(\tau) \cos(\omega_c \tau) \pm \hat{g}(\tau) \sin(\omega_c \tau) \right] + \cos(\omega_c \tau), \quad (2)$$

$$u_{AM}(\tau) = \left[1 - \frac{1}{2} m^2 g^2(\tau) - \frac{1}{8} m^4 g^4(\tau) \right] \sin(\omega_c \tau) + \left[1 + m g(\tau) \right] \cos(\omega_c \tau). \quad (3)$$

4. ZAŘÍZENÍ PRO PŘENOS PARAMETRICKÉHO ZVUKU

Z předložených poznatků bylo zkonstruováno zařízení pro přenos parametrického zvuku. Zařízení se skládá ze tří základních částí. První část tvoří digitální amplitudový modulátor, v němž jsou implementovány výše uvedené amplitudové modulace, které je možné pomocí přepínačem přepnout, v závislosti na měření vlivu a zkreslení dané AM. Hilbertova transformace v rovnici (2), byla implementována pomocí FIR filtru typu III. Základní částí digitálního modulátoru tvoří A/D převodník typu MCP3201, dále pak mikrokontrolér řady STM32F411 a výstup je zpětně rekonstruován pomocí D/A převodníku typu MCP4291. Druhá část se sestává z výkonového audio zesilovače s TDA7293, který pracuje ve třídě AB. Posledním stupněm je parametrický reproduktor, který se

sestává z matice 50 ultrazvukových měničů typu BPU-1640TOAH12, jenž jsou poskládány těsně vedle do matice 5×10 . Celkové blokové schéma je uvedeno, viz obrázek 1.

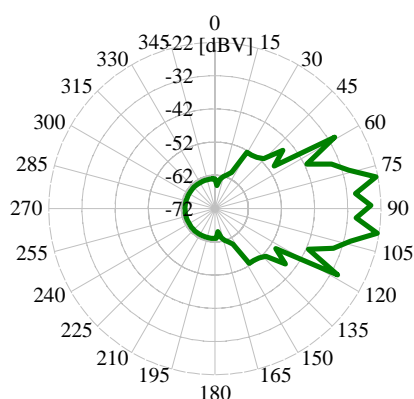


Obrázek 1: Blokové schéma digitálního amplitudového modulátoru

5. MĚŘENÍ VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY PARAMETRICKÉHO REPRODUKTORU

Vyzařovací charakteristika parametrického reproduktoru, viz obrázek 2, byla změřena pomocí digitálního osciloskopu Agilent DSOX3034A, který byl použit jako spektrální analyzátor, ze kterého se odečítal útlum přijaté modulační složky vyzářeného zvuku z parametrického reproduktoru. Parametrický reproduktor byl umístěn ve vzdálenosti 1,5 m od elektretového mikrofону typu PMOF-6027PN. Signál z mikrofónu byl zesílen pomocí dvou kaskádně řazených operačních zesilovačů typu OPA2604, celkové zesílení signálu bylo 61,5 dBV. Zesílený signál byl následně veden do výše zmíněného osciloskopu. Ke generování signálu pro parametrický reproduktor byl použit generátor Agilent 33511B, který měl v sobě implementovanou pokročilou AM s nosným kmitočtem 40 kHz a modulačním kmitočtem 1 kHz. Měření probíhalo v bez odrazové komoře na Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky.

Vyzařovací charakteristika parametrického reproduktoru $f_{\text{nosná}} = 40 \text{ kHz}$, $f_{\text{modulační}} = 1 \text{ kHz}$



Obrázek 2: Vyzařovací charakteristika (vlevo) a fyzická realizace parametrického reproduktoru (vpravo)

6. ZÁVĚR

V předloženém článku byl prezentován teoretický popis parametrického akustického pole a parametrické akustiky, dále pak techniky AM pro předzpracování vstupního signálu pro parametrický reproduktor a konkrétní řešení digitálního AM modulátoru v podobě blokového schématu. Poslední část článku uvádí praktické měření vyzařovacích charakteristik parametrického reproduktoru. Při bližším pohledu na vyzařovací charakteristiku, viz obrázek 2, jsou patrné výběžky na úhlech 60° a 120° , tyto výběžky jsou pravděpodobně způsobeny odrazy od stěn komory. Další měření budou provedena v otevřeném prostoru, aby se potlačil výše zmíněný jev.

REFERENCE

- [1] WESTERVELT, Peter J. *Parametric Acoustic Array*. B.m.: Department of Physics, Brown Univesity, Providence, Rhode Island. 1965
- [2] WOON-SENG, Gan, Yang JUN a Kamakura TOMOO. A Review of Parametric Acoustic Array in Air. *Applied Acoustics*. 2012, roč. 12, s. 1211–1219. ISSN 0003-682X.
- [3] WOON-SENG, Gan, Ee-Leng TAN a Sen M. KUO. *Audio projection* [online]. 2010. Dostupné z: <http://eeeweba.ntu.edu.sg/DSPLab/audiobeam/docs/sp.pdf>
- [4] TAN, Ee-Leng, Woon-Seng GAN, PeiFeng JI a Jun YANG. *Distortion Analysis and Reduction for the Parametric Array* [online]. 2010. Dostupné z: http://eeeweba.ntu.edu.sg/dsplab/audiobeam/Publication/2008_C3.pdf