

声频定向扬声器DSB算法的谐波失真

陈敏¹, 黄大贵², 徐利梅¹, 王莹²

(1. 电子科技大学空天科学技术研究院 成都 610054; 2. 电子科技大学机械电子学院 成都 610054)

【摘要】依据一种新型扬声器——声频定向扬声器的基本工作原理,从理论上给出了DSB算法中调制系数对输出信号谐波失真影响的详细推导过程;并指出调制系数越小,失真度越小,但带来的负面效应是小的调制系数将使输出的信号功率相应变小。在此基础上,指出DSB算法本身存在一个12 dB/倍频程的频率响应倾斜,在设计声频定向扬声器时必须采用算法预处理或换能器频响设计的方法对其进行补偿,以获得较好的声音保真效果。

关键词 声频定向扬声器; DSB算法; 谐波失真; 调制系数; 频率响应倾斜

中图分类号 TN64

文献标识码 A

Harmonic Distortion of DSB Algorithm for Audio Directional Loudspeaker

CHEN Min¹, HUANG Da-gui², XU Li-mei¹, and WANG Ying²

(1. Institute of Astronautics and Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The harmonic distortion of the double side band (DSB) algorithm for the audio directional loudspeaker is investigated. The research results show that the harmonic distortion of the DSB algorithm is only influenced by the modulation factor, and is not related to either the modulation signal frequency or the carrier signal frequency. An effective way to obtain a lower harmonic distortion reduce the modulation factor, but it will also result in a lower output signal power. It is necessary and significant for the DSB algorithm to reduce the harmonic distortion and compensate its 12 dB frequency response slope per octave simultaneously.

Key words audio directional loudspeaker; double side band algorithm; harmonic distortion; modulation factor; frequency response slope

声频定向扬声器^[1]是一种利用超声波在空气中传播时的非线性交互作用产生高指向性可听声的一种新型扬声器。与传统扬声器将声音向四周传播不同,该类扬声器可在空间中产生沿一定空间分布的可听声传播区域。在此区域内的人可以清楚地听到扬声器发出的声音,而在此区域外的人则听不到或仅能很微弱地听到扬声器发出的声音。作为一种新型扬声器,声频定向扬声器的研究已受到了电声行业人士的极大关注^[2-4]。在声频定向扬声器的关键技术中,信号处理技术占有十分重要的地位^[3-6]。目前常用的一种信号处理方法是信号进行双边带调制(double side band, DSB),并对信号失真进行补偿^[6]。因此,从理论上弄清DSB算法谐波失真的影响因素及其影响机理是实现信号补偿与参数选优的前提。本文对声频定向扬声器DSB算法的谐波失真影响因

素及其机制进行较为系统的理论分析,从而为声频定向扬声器DSB算法的信号补偿与参数选优提供理论依据。

1 声频定向自解调原理

1.1 参量阵

文献[7]首次提出了参量阵(parametric array)的概念,并对它做出了合理解释,其基本原理如图1所示。换能器向空气介质中发出调制声频信号后的强烈超声波,超声波在沿其传播方向前进的过程中不断通过空气的非线性作用解调出声频信号;不断解调出来的声频波累积叠加起来,形成一个端射式虚拟声源阵列(end-fire virtual array)。该虚拟声源阵列即是参量阵,它使得声频波的能量在声波前进方向上不断得到加强。由于超声波具有很强的指向性,

收稿日期: 2007-12-13; 修回日期: 2008-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(60302001)

作者简介: 陈敏(1974-),男,博士生,讲师,主要从事信号测试及处理、MEMS等方面的研究。

传播主轴方向以外叠加加强效应很微弱，从而最终导致声频波在主传播轴方向上具有很高的指向性。声频定向扬声器正是利用了这种参量阵原理来产生高指向性可听声。

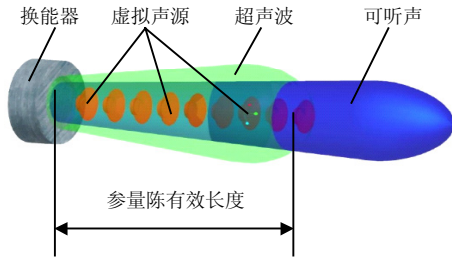


图1 参量阵示意图

1.2 Berkta远场解

声频定向扬声器向空气中发射的是载有声频信号的超声波。该超声波在空气中由于非线性传播作用会自解调出声频信号(可听声)。与文献[7]相比，文献[8]提出了一个更为准确的参量阵理论，并给出了自解调机理的合理解释，即目前声频定向扬声器信号处理算法研究依据的基本理论——“Berkta远场解”。该理论认为：如果基波(或称一次波)声压存在以下形式：

$$P_1(t) = P_0 E(t) \sin(\omega_c t) \tag{1}$$

式中 P_0 为基波振幅； ω_c 为载波角频率； $E(t)$ 为调制包络信号。基波在沿传播方向行进的过程中，由于空气的非线性作用将解调出二次波。解调出来的二次波声压为：

$$P_2(t) = \frac{P_0^2 A}{16\pi\rho_0 c_0^4 z \alpha} \frac{\partial \beta}{\partial t^2} E^2(\tau) \tag{2}$$

式中 A 为基波波束的横截面面积； β 为基波的非线性系数； ρ_0 为环境空气密度； c_0 为声波传播速度； z 为沿波束方向的传播距离； α 为基波的衰减系数； t 为传播时间； $\tau = t - z/c_0$ 为延迟时间。根据式(2)可知，参量阵的解调信号正比于包络平方的二次时间导数，即：

$$P_2(t) \propto \frac{\partial^2}{\partial t^2} E^2(t) \tag{3}$$

式(2)称为“Berkta远场解”，因为它假设声源足够远，以至于可以忽略任何超声波(一次波或称基波)的存在。事实上，该解在近场也是正确的，但此时超声波与解调信号同时存在。

2 DSB谐波失真影响因素及其机理

2.1 调制系数影响

在DSB信号处理方法中，一般可将调制包络信号表达为：

$$E(t) = 1 + m \sin(\omega t) \tag{4}$$

式中 m 为调制系数，或称调制度； ω 为输入信号角频率。

由式(1)可知，当 $P_0 = 1$ 时，载波信号角频率为 $\omega_c = 2\pi \times 40\,000$ rad/s，调制信号角频率为 $\omega = 2\pi \times 3\,000$ rad/s， $m = 1$ ，可以得到如图2所示的已调信号。图2中有上、下两个调制包络，但因为它们是镜像对称的，所以仅考虑上包络。

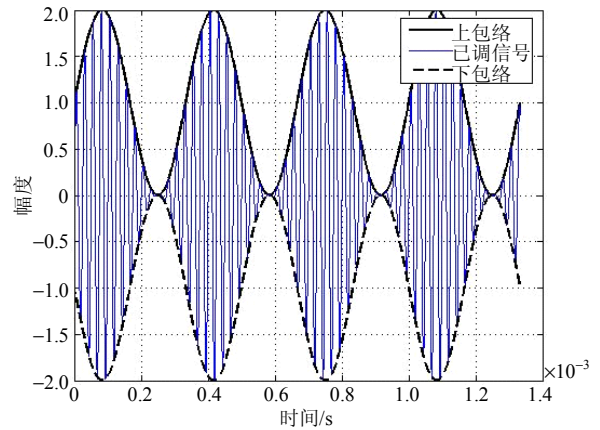


图2 $m = 1$ 时的已调信号

根据文献[8]，采用式(3)可以从理论上推导出该已调信号在空气中自解调后，声频信号(可听声)输出结果为：

$$P_2(t) \propto -2\omega^2 \sin \omega t + 2\omega^2 \cos 2\omega t \tag{5}$$

根据式(5)可知，经DSB算法处理后的信号在空气中将通过非线性传播效应产生两个频率成分的信号，该频率成分分别是原3 kHz基波成分以及其二次谐波6 kHz信号，且二者具有相等的幅值。同时，根据式(5)可以算出相应的谐波系数^[9]：

$$K = \sqrt{\frac{P_2^2 + P_3^2 + \dots + P_n^2}{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + \dots + P_n^2}} \times 100\% \tag{6}$$

式中 P_1 为基波声压的均方根值； P_2 为二次谐波声压的均方根值；其余以此类推， P_n 为 n 次谐波声压的均方根值。谐波系数代表了总谐波失真的大小，谐波系数越大，则总谐波失真越大。

根据式(6)可计算出当 $m = 1$ 时，谐波系数 $K = 70.7\%$ ，说明此时谐波失真已达到了相当高的程度。根据相同原理，可推导出在不产生过调制的条件下，调制系数取任意值时的已调信号在空气中自解调产生的二次波输出为：

$$P_2(t) \propto -2m\omega^2 \sin \omega t + 2m^2\omega^2 \cos 2\omega t \tag{7}$$

根据式(6)、(7)可推导出调制系数取任意值时的谐波系数为：

$$K = \frac{(\sqrt{2}/2 \times 2m^2 \omega^2)^2}{\sqrt{(\sqrt{2}/2 \times 2m\omega^2)^2 + (\sqrt{2}/2 \times 2m^2 \omega^2)^2}} \times 100\% = \frac{m^2}{\sqrt{1+m^2}} \times 100\% \quad (8)$$

由式(8)可知, 谐波失真与调制信号的频率、载波信号频率本身无关。此外, 根据式(8)还可求出调制系数 m 取任意值时的谐波系数曲线, 如图3所示。从图3中可以看出, 随着调制系数 m 的增加, 谐波系数 K 呈单调上升趋势, 也即总谐波失真呈单调增加趋势。理论上调制系数 m 取值越小, 相应的谐波失真就越小。

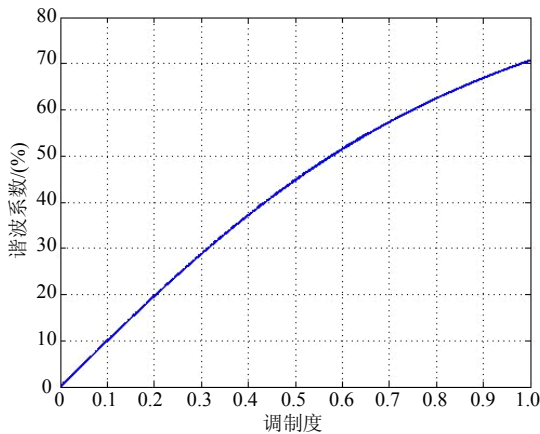


图3 谐波系数随调制度的变化曲线

值得注意的是, 在减小调制系数 m 的同时, 调制于载波上的调制信号幅值也会减小, 最终使得空气中自解调出来的音频信号输出功率减小。根据式(7)可以推导出空气中自解调基波信号的输出功率 P_f 为:

$$P_f \propto \frac{p_c^2}{\rho_0 c_0} A = \frac{2m^2 \omega^4 A}{\rho_0 c_0} \quad (9)$$

式中 p_c 为基波声压的有效值。同理, 可得到二次谐波的输出功率为:

$$P_h \propto \frac{p_c'^2}{\rho_0 c_0} A = \frac{2m^4 \omega^4 A}{\rho_0 c_0} \quad (10)$$

式中 p_c' 为二次谐波声压的有效值。

由式(9)、(10)可知, 当 m 取值下降1倍时, 最后自解调出来的基波功率将降为下降之前的1/4, 而二次谐波功率将下降为原来的1/16。图4所示为式(9)、(10)等号右边表达式的功率比例值。由图中可以看出, 随着调制系数 m 的减小, 不管是基波还是二次谐波, 其输出功率都呈单调下降趋势; 当调制系数为0时, 最后在空气中自解调出来的基波及二次谐波功率也为0。

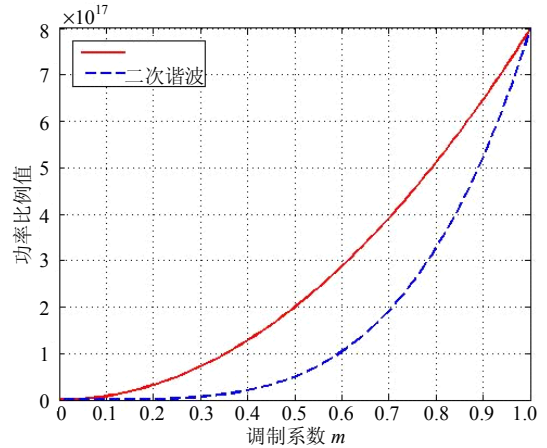


图4 调制系数对输出信号功率的影响

2.2 12 dB/倍频程频率响应倾斜影响

由式(9)、(10)还可得出, 最后在空气中解调出来的信号的功率不仅与调制系数 m 有关, 而且与调制信号的频率 ω 密切相关; 不管是对基波还是对二次谐波, 高频信号比低频信号具有更大的功率输出。

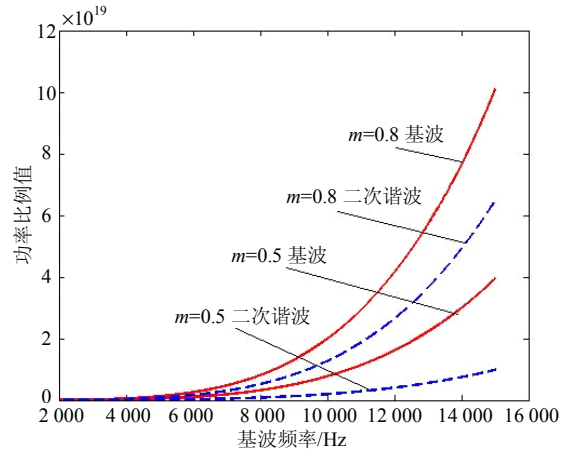


图5 基波频率对输出信号的功率影响

图5所示为当 m 分别为0.8、0.5时空气自解调输出基波、二次谐波的功率比值图。从图中可知, $m=0.8$ 时的基波、二次谐波输出功率都比 $m=0.5$ 时对应的输出功率大, 这与图4所示的调制系数 m 变化后, 基波、二次波输出功率相应产生变化的趋势一致。当 m 一定时, 随着基波频率的增加, 自解调出来的基波功率呈上升趋势。这说明即使是相等功率的声频定向扬声器输入基波信号, 如果基波频率不同, 最后在空气中解调出来的基波、二次谐波信号的功率也不相等, 造成信号的失真。如果对式(9)等号右边的表达式采用分贝形式表示, 则有:

$$10 \lg \frac{2m^2 \omega^4 A}{\rho_0 c_0 W_0} = 10 \lg \frac{2m^2 A}{\rho_0 c_0 W_0} + 40 \lg \omega \quad (11)$$

式中 W_0 为基准功率值, 大小为1 pW。

由式(11)可知, 超声波在空气中的自解过程是非

线性的,它与调制信号的频率密切相关。等值输入不同频率成分的信号在自解调以后,将会得到不同的幅值和功率输出,频率高的成分将得到较高的声压幅值和功率输出。文献[8]也提到了这一点,并预测每倍频程的空气自解调输出信号将有一个12 dB的增量。式(11)给出了相同的理论分析结果($40\lg 2 \approx 12\text{ dB}$)。

空气自解调输出的二次谐波也存在类似的特性。对式(10)等号右边的表达式采用分贝形式为:

$$10\lg \frac{2m^4 \omega^4 A}{\rho_0 c_0 W_0} = 10\lg \frac{2m^4 A}{\rho_0 c_0 W_0} + 40\lg \omega \quad (12)$$

由式(12)可知,对于二次谐波的输出功率存在一个与频率有关的项 $40\lg \omega$,即空气的自解调效应对二次谐波也存在一个12 dB/倍频程的频率响应倾斜。声压同样存在12 dB/倍频程的频率响应倾斜^[10]。

为了使输出信号与输入信号保持较高的保真度,必须对该频率倾斜进行补偿。这种补偿既可在音频信号调制前通过算法进行预处理,也可以通过设计一种具有特殊频率响应的换能器进行相应的补偿,以使声频定向扬声器的输出保持较高的保真度。

3 结 论

声频定向扬声器采用DSB算法进行信号处理时,在理论上对信号谐波失真具有影响的主要因素有调制系数与算法本身带来的12 dB/倍频程的频率响应倾斜。对于调制系数而言,调制系数越小,则失真度越小,但带来的负面效应是基波的输出功率也随之减小。而12 dB/倍频程的频率倾斜则是DSB算法自身的一种缺陷,它不仅影响基波的输出功率,也对谐波产生类似的影响。为了保证基波信号的音质,必须通过信号预处理或换能器频率响应设计对其产生的谐波失真进行校正,虽然该校正对谐波而言是没有太大必要。相对而言,算法预处理比设计

具有相应频率响应补偿的换能器更易于实现。

参 考 文 献

- [1] 陈敏,徐利梅,黄大贵,等. 声频定向扬声器的研究进展[J]. 电声技术, 2006, 259(11): 17-22.
CHEN Min, XU Li-mei, HUANG Da-gui, et al. Progress on audio directional loudspeaker research[J]. Audio Engineering, 2006, 259(11): 17-22
- [2] SCHWARTZ E I. The sound war[J]. Technology Review, 2004, 107(4): 50-54.
- [3] GAN Woon-seng, YANG Jun, TAN Khim-sia, et al. A digital beamsteerer for difference frequency in a parametric array[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2006, 14(3):1018-1024.
- [4] NAKADAI K, TSUJINO H. Towards new human-humanoid communication: listening during speaking by using ultrasonic directional speaker[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain: IEEE, 2005: 1483-1488.
- [5] YANG Jun, GAN Woon-seng, TAN Khim-sia, et al. Acoustic beamforming of a parametric speaker comprising ultrasonic transducers[J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2005, 125(1): 91-99.
- [6] JAMES J, NORRIS J O. HSS white paper[M]. San Diego, California, USA: American Technology Corporation, 2005: 16-19.
- [7] WESTERVELT P J. Parametric acoustic array[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1963, 35(4): 535-537.
- [8] BERKTAY H O. Possible exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications[J]. Journal of Sound and Vibration, 1965, 2(4): 435-461.
- [9] 曹水轩,沙家正. 扬声器及其系统[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1991.
CAO Shui-xuan, SHA Jia-zheng. Loudspeaker and its system[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technique Press, 1991.
- [10] CHEN Min, XU Li-mei, HUANG Da-gui, et al. Experimental verification of square rooting algorithm for parametric loudspeaker with a PVDF film transducer[J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2008, 4(8): 1877-1886.

编辑 黄 莘