

参量扬声器 DSB 法的互调失真研究

张德银

(中国民航飞行学院航空工程学院, 四川广汉 618307)

摘要: 参量扬声器是近年来出现的一种新的声源。根据宽带参量阵理论的“Berkstay 远场解”, 对参量扬声器的一种信号处理方法——DSB(Double Side Band)法的互调失真问题进行了理论与实验研究。研究发现, DSB 法除了存在幅值失真、谐波失真外, 还存在互调失真, 且实测互调失真较理论预测的复杂。在此基础上指出, “Berkstay 远场解”只能在一定程度上作为参量扬声器信号处理的理论依据, 寻找更为精确的自解调理论模型是解决参量扬声器信号处理问题的根本途径。

关键词: 参量扬声器; DSB 法; 互调失真

中图分类号: TN643

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-04-0495-03

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.04.013

Sound distortion of DSB method for parametric loudspeaker

ZHANG De-yin

(Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: The parametric loudspeaker is a novel sound source. The sound distortion of the Double Side Band (DSB) method, which is one of the signal processing methods of the parametric loudspeaker, is investigated by theoretical derivation and experimental measurement according to the broad band parametric theory of “Berkstay’s Far Field Solution”. The results show that intermodulation distortion exists in the DSB method, besides amplitude distortion and harmonic distortion, and the measured sound distortion is more complicated than the theoretical one. Based on this findings, it is indicated that the “Berkstay’s Far-Field Solution” can only be used in the qualitative analysis of the signal processing of the parametric loudspeaker to a certain extent, and the ultimate way to solve the signal processing problems of the parametric loudspeaker is to establish a more precise self-demodulation model.

Key words: parametric loudspeaker; DSB method; intermodulation distortion

1 引言

参量扬声器是一种利用超声波在空气中的非线性传播效应产生高指向性可听声的新概念声源^[1,2]。其发展最早可以追溯到参量声学阵理论的研究上。1963 年, Westervelt 提出了参量声学阵的概念, 1965 年, Berkstay 在 Westervelt 双频参量阵理论的基础上, 发展出了更为精确、完整的宽带参量阵理论, “Berkstay 远场解”, 为参量扬声器的信号处理提供了直接的理论依据^[3]。其后, 日本 Yoneyama 等最先尝试利用参量声学阵原理制作参量扬声器, 但由于未能有效解决参量扬声器声音失真、高效率功率放大、实时信号处理等关键问题, 而被迫放弃了该项技术的研究^[4]。近年来, 由于数字信号处理技术的发展,

以前很难实现的参量扬声器的实时信号处理有了新的解决途径, 参量扬声器也受到了电声业界人士的高度重视, 甚至有人以“声音战争”来形容其对传统扬声器造成的强大冲击^[5]。

在参量扬声器的诸多关键技术中, 信号处理占有极为重要的位置, 可以说是其“灵魂”所在。作为一种最为常用的参量扬声器信号处理方法, DSB 法存在一个 12dB/oct 的幅值失真及谐波失真, 这已成为共识^[3,4,6,7], 目前已有有人针对低频谐波失真进行了研究^[8], 但针对 DSB 法互调谐波失真的相关研究却进展甚少。本文将围绕该问题, 从理论及实验两个层面对之展开深入研究。

2 DSB 法互调失真理论分析

2.1 DSB 法的自解调模型

目前, 几乎所有的参量扬声器信号处理方法皆是建立在“Berkstay 远场解”基础上的^[6]。根据“Berkstay 远场解”^[3]可知, 对于一个平面波, 在传

收稿日期: 2009-01-20; 修回日期: 2009-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(60302001)和民航科技基金(MHRD0712)

作者简介: 张德银(1971-), 男, 四川简阳人, 工学博士, 副教授, 研究方向为微型传感器原理、制造工艺和应用研究; 飞机电子系统和电源系统故障诊断。

通讯作者: 张德银, E-mail: morrisvip@cafuc.edu.cn

播距离 $x=0$ 处, 如果一个声源的声压为:

$$p_1(t) = p_0 E(t) \cos \omega_c t \quad (1)$$

式中: $p_1(t)$ 也称原波声压, p_0 为原波声压幅值, $E(t)$ 为调制包络函数, ω_c 为载波角频率。则原波在空气中将通过非线性传播效应将产生二次波:

$$p_2(\tau) = \frac{\beta p_0^2 S}{8\pi \rho_0 c_0^4 z \alpha_0} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} E^2(\tau) \quad (2)$$

式中: β 为非线性系数, S 为声源面积, ρ_0 为密度平衡值, c_0 为声波传播速度, α_0 为声衰减系数, z 为声波传播距离, $\tau = t - z/c_0$ 为延迟时间。

可将式(2)中的二次波视为宽带参量阵在空气中自解调产生的高指向性可听声。对于 DSB 法而言, 其包络函数可表达为:

$$E(t) = 1 + mf(t) \quad (3)$$

式中: m 为调制系数, $f(t)$ 为宽带参量阵的输入音频信号。将式(3)代入式(2)可得到 DSB 法的自解调理论模型为:

$$p_2(\tau) = \frac{\beta p_0^2 S}{8\pi \rho_0 c_0^4 z \alpha_0} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} [2mf(t) + m^2 f^2(t)] \quad (4)$$

2.2 互调失真分析

对于任一宽带信号, 可将其分解为正弦级数形式, 即输入信号可表示为:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n a_i \sin \omega_i t \quad (5)$$

式中: ω_i 为第 i 个信号成分的角频率, a_i 为第 i 个信号成分的幅值。将式(5)代入式(4)可得:

$$p_2(\tau) = \frac{\beta p_0^2 S}{8\pi \rho_0 c_0^4 z \alpha_0} \frac{d^2}{d\tau^2} \left\{ 2m \sum_{i=1}^n a_i \sin(\omega_i \tau) + m^2 \left[\sum_{i=1}^n a_i \sin(\omega_i \tau) \right]^2 \right\} \quad (6)$$

将式(6)中二次导数求出并作三角函数变换可得:

$$p_2(\tau) = -\frac{\beta p_0^2 S m}{4\pi \rho_0 c_0^4 z \alpha_0} \sum_{i=1}^n a_i \omega_i^2 \sin \omega_i \tau - \frac{\beta p_0^2 S m^2}{16\pi \rho_0 c_0^4 z \alpha_0} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j (\omega_i - \omega_j)^2 \cos[(\omega_i - \omega_j)\tau] + \frac{\beta p_0^2 S m^2}{16\pi \rho_0 c_0^4 z \alpha_0} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j (\omega_i + \omega_j)^2 \cos[(\omega_i + \omega_j)\tau] \quad (7)$$

由式(7)可知, 当输入信号为宽带信号时, DSB 法和自解调信号 $p_2(\tau)$ 主要由基频项 $\sum_{i=1}^n a_i \omega_i^2 \sin \omega_i \tau$ 、差频项 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j (\omega_i - \omega_j)^2 \cos[(\omega_i - \omega_j)\tau]$ 及和频项 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j (\omega_i + \omega_j)^2 \cos[(\omega_i + \omega_j)\tau]$ 构成。基频项中的 ω_i^2 将导致 12dB/oct 的幅值失真(可简单地采用一个双

积分器进行补偿^[4,6]), 而当和频项中的 $\omega_i = \omega_j$ 时将出现二次谐波, 从而引起谐波失真。同时可以看出: 当 $\omega_i \neq \omega_j$ 时, DSB 法产生的自解调信号是存在互调失真的, 且互调失真由和频及差频引起。由于 $(\omega_i - \omega_j)^2$ 小于 $(\omega_i + \omega_j)^2$, 因此和频项的幅值将大于差频项幅值, 即互调失真主要由和频引起。

当取 $\rho_0 = 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $c_0 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $z = 2 \text{ m}$ 、 $\beta = 1.2$ 、 $p_0 = 1.7 \text{ Pa}$ 、 $S = 0.09 \text{ m}^2$ 、 $m = 0.8$ 、 $\alpha_0 = 0.032$ (超声频率近似取为 40kHz)时, 对参量扬声器同时输入 2.5kHz、4.1kHz 的双频信号时, 根据式(7)可计算得到理论上自解调信号中基频、差频及和频的声压幅值, 如图 1 所示。

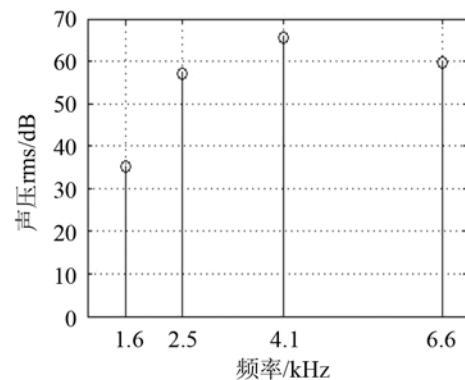


图 1 自解调信号理论频谱

Fig. 1 Theoretical spectrum of self-demodulation signal

由式(7)及图 1 可知, 理论上采用 DSB 法进行信号处理并输入 2.5kHz、4.1kHz 双频信号时, 参量扬声器的自解调信号(即可听声)中只含有 2.5kHz、4.1kHz 基频, 1.6kHz 差频及 6.6kHz 和频, 且 6.6kHz 和频幅值大于 1.6kHz 差频幅值约 14.62dB。

3 DSB 法互调失真实验测试

如图 2 所示, 参量扬声器的测试系统主要由以下几部分组成: (1) 信号发生器 1 台: 由 1 台 YB1639 信号发生器、1 台 Agilent 35670A 动态信号分析仪、1 台电脑组成; (2) 信号处理系统 1 套: 即声频定向扬声器 DSP 系统; (3) 功率放大器 1 台: 声频定向扬声器 D 类功放或日本 NF HSA4011 功放; (4) 换能器 1 个: 300mm×300mm PVDF 膜平面换能器^[9]; (5) 传声器 1 个: 频率响应为 20Hz~16.2kHz; (6) 信号采集设备 1 个, 采样频率最高可达 19200kHz; (7) 数据显示与储存设备: 由 1 台 TDS1012 示波器、1 台 Agilent 35670A 动态信号分析仪及 1 台电脑组成。

由于双频输入在很大程度上能反映出宽带输入时的互调失真情况, 因此对宽带信号互调失真的研究可采用双频输入进行。采用 DSB 法时, 实际

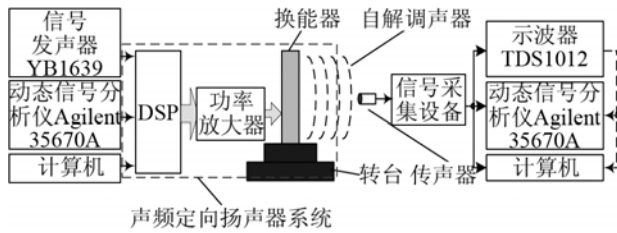


图2 测试系统装置图
Fig.2 Setup of measurement system

测量时向参量扬声器输入了 2.5kHz、4.1kHz 的双频信号，测得的自解调信号频谱如图 3 所示(由于频率采样点较稀疏，故标定点与实际频率有少许误差，但不影响结果分析)。对比图 1 及图 3 可以发现：

(1) 理论预测自解调信号仅由 2.5kHz、4.1kHz 基频，6.6kHz 和频及 1.6kHz 差频组成，实测自解调信号除了这些频率成分外，还存在 5kHz、8.2kHz 二次谐波，以及由于以上信号作用产生的 3.2kHz(1.6kHz 差频的二次谐波)、3.4kHz(5kHz-1.6kHz)、5.7kHz(4.1kHz+1.6kHz)等频率的信号，情况远较理论预测的复杂。

(2) 当理论及实测的 4.1kHz 基频皆接近 65dB 时，2.5kHz 理论值较实测值小约 0.61dB，6.6kHz 和频的理论值较实测值大约 5.33dB，1.6kHz 差频值理论值较实测值小约 10.72dB。

(3) 理论预测的 6.6kHz 和频较 1.6kHz 差频为大，与实测结果一致。

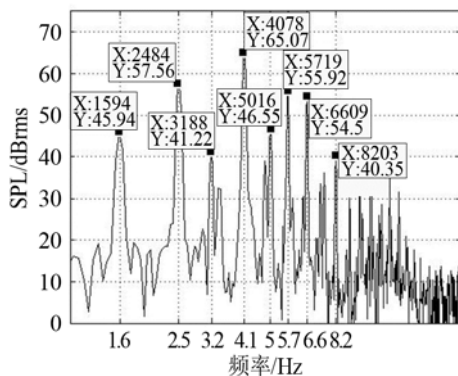


图3 自解调信号实测频谱
Fig.3 Measured spectrum of self-demodulation signal

4 结论

本文对参量扬声器一种最常用的信号处理方法——DSB 法的互调失真进行了理论研究与实验研究，得到了以下结论：

(1) 从理论及实验两个层面证明了 DSB 法除了存在幅值失真、谐波失真外，还存在互调失真；

(2) 根据“Berkay 远场解”理论预测的基频与实测基频幅值较为吻合；

(3) “Berkay 远场解”理论预测的和频、差频幅值与实测结果差异较大，但和频大于差频的定性预测与实验结果一致；

(4) 理论预测自解调信号仅由基频、和频及差频组成，但实验结果显示自解调信号除了这些信号外，还存在基频的二次谐波、差频的二次谐波，以及这些信号交互作用产生的其它频率成分导致的互调失真，远较理论预测结果复杂。

这种理论与实测结果的差异很可能是由于“Berkay 远场解”在进行非线性近似时只取了二阶近似造成的，因此“Berkay 远场解”只能在一定程度上作为参量扬声器信号处理的理论依据，寻找更加精确的自解调理论模型是解决参量扬声器信号处理问题的根本途径。其主要途径在于在充分考虑参量阵非线性声场吸收、非线性及散射等效应的的基础上，采用高阶近似解析求解非线性声场理论模型，如 KZK 方程等，以实现理论上对自解调声场的精确描述。

参 考 文 献

- [1] 陈敏, 徐利梅, 黄大贵, 张德银. 声频定向扬声器的研究进展[J]. 电声技术, 2006, (11): 17-22.
CHEN Min, XU Limei, HUANG Dagui, ZHANG Deyin. Research development of audio directional loudspeaker[J]. Audio Engineering, 2006, (11):17-22.
- [2] 杨益, 阎兆立. 超指向性扬声器的阵列设计与研究[J]. 声学技术, 2008, 27(3): 433-438.
YANG Yi, YAN Zhaoli, et al. Design and research of an ultrasonic transducer array applied in audio beam loudspeaker[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(3): 433-438.
- [3] Berkay H O. Possible Exploitation of Non-Linear Acoustics in Underwater Transmitting Applications[J]. J. Sound Vib., 1965, 2(4): 435-461.
- [4] Pompei F J. The Use of Airborne Ultrasonics for Generating Audible Sound Beams[J]. Journal of Audio Engineering Society, 1999, 47(9): 726-731.
- [5] Schwartz E I. The Sound War[J]. Technology Review, 2004, 107(4): 50-54.
- [6] James J, Norris J O. HSS white paper[Z]. USA: American Technology Corporation, 2007.
- [7] Min Chen, Da-Gui Huang, Li-Mei Xu, et al. Research on a Novel Audio Beam Loudspeaker Based on Digital Signal Processor[A]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation [C]. Niagara Falls, Canada, 2005, 466-470.
- [8] 宗丰德, 张志良. 扬声器低频谐波失真的数值分析[J]. 声学技术, 2003, 22(2): 83-86.
ZONG Fengde, ZHANG Zhiliang. Numerical analysis of total harmonic distortion of a loudspeaker in low frequency range[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(2): 83-86.
- [9] 陈敏, 徐利梅, 黄大贵, 张德银. 谐振频率可调式 PVDF 膜声频定向换能器[J]. 压电与声光, 2007, 29(1): 53-55.
CHEN Min, XU Limei, HUANG Dagui, ZHANG Deyin. Audio Directional PVDF Film Transducer with Tunable Resonance Frequency[J]. Piezoelectrics & Acoustoptics, 2007, 29(1): 53-55.