超指向性扬声器的系统设计与测试

杨 益[1], 温周斌[2], 冯海泓[1], 付 奇[2]
(1. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032; 2. 中国科学院嘉兴中心声学所分中心, 浙江 314050)

摘要: 超指向性扬声器是一种利用声波在空气中传播的非线性由不可听超声产生可听声的参量阵装置,这种声源相比相同大小的传统扬声器,可以产生非常强的指向性、像聚光灯光束一样的宽带可听声束。文章介绍了超指向性扬声器的基本原理,给出了一个基于模拟电路的系统实现方案,并着重介绍了基于所完成的工程样机所做的频率响应、总谐波失真和指向性测试及相关实验分析,还讨论了进一步工作的发展方向。

关键词: 超指向性扬声器;声学测量;指向性;参量阵
中图分类号: TB556 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3630(2008)-01-0066-05

Design and test of the audio beam loudspeaker

YANG Yi[1], WEN Zhou-bin[2], FENG Hai-hong[1], FU Qi[2]
(1. Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200032, China; 2. Institute of Acoustics, Jiaxing Research and Commercialization Center for Technology, Chinese Academy of Sciences, Zhejiang 3140500, China)

Abstract: A device known as a parametric array employs the nonlinearity of the air to create an extremely directional audible sound from inaudible ultrasound. Comparing with the traditional loudspeakers of similar size, the extremely directional beams over a broad range of audible frequencies can be fromed. In this paper, an analog system is introduced after outlining a basic theoretical analysis of the audio beam loudspeaker. Detail results of acoustic measurements such as frequencies response, directionality and total harmonic distortion, are analyzed and interpreted. The further work is also put forward.

Key words: audio beam loudspeaker; acoustic measurement; directionality; parametric array

1 引 言

Westervelt[1]于 1962 年提出参量阵的概念,参量阵发射超声信号,经过传播介质的非线性作用产生高指向性的低频信号,它最初应用于水声领域。Bennett 和 Blackstock[2]于 1975 年首次在空气中由超声信号成功地解调出音频信号,Yoneyama[3]于 1983 年首次运用大型阵列实现超指向性扬声器,并对解调出来的音频信号的失真和指向性进行了分析,Pompei [4]于 1999 年在提出了对调制信号进行预处理的方法,进而进一步减少了解调信号的失真。目前, 美国 American Technology Corporation(2001 年)、美国 Holosonic Research Labs(2003 年)和德国 Sennheiser 公司(2006 年)实现了超指向性扬声器真正意义上的商品化,并将其推广运用到各个不同领域。最近超指向性扬声器运用到了更多领域如,个人私密通讯[5]、主动噪声控制(ANC)[6]、非法武器探测[7]和陆地探雷等[8]。我国在该领域起步较晚,尚未见有成熟的商品化技术报道。

本文将首先介绍超指向性扬声器的基本原理,进而将给出了一个基于模拟电路和压电陶瓷传感器阵列的系统实现方案,并着重介绍了所完成的工程样机所做的频率响应、总谐波失真和指向性测试及相关实验分析。

收稿日期: 2007-07-18; 修回日期: 2007-08-16
作者简介: 杨益(1983-), 男, 江苏人, 博士生, 研究方向: 信号与信息处理。
通讯作者: 杨益, E-mail: renxing926@hotmail.com

2　理论原理

2.1　声学理论

20 世纪 60 年代，Westervelt[1]给出了关于两个平面波在不均匀介质中传播时产生的二阶量关系具体的理论推导。设定 f_1、f_2 为发出的两个频率相差不大的超声信号，称为原波(primary wave)。不妨假设 $f_1>f_2$，这两个信号经过超声传感器后发出，由于空气的非线性作用，如果只考虑二阶量的话，就得到了差频信号 f_1-f_2、和频信号 f_1+f_2，再加上两个原来的信号。根据介质中声吸收原理，吸收与信号频率的平方成正比的，所以和频信号 f_1+f_2 与超声信号 f_1、f_2 会很快衰减，最后只剩下差频信号 f_1-f_2。

1965 年，Berktay[9]提出了一个更精确完整的关于参量阵的解释。他没有局限于分析原波是两个单频率的形式，而是更进一步地使用了调制中包络的概念(这是非常有实际意义的，因为在空气中做为扬声器使用时通常不会仅仅发出单个频率)。最终的解调信号将由这个包络决定。假定输入信号有式(1)的形式：

$$P_i(t)=P_0E(t)\cos(\omega_c t) \tag{1}$$

其中 ω_c 为载波频率，$E(t)$ 为任意的包络函数，P_0 是信号幅度。对沿着发射轴上的一点，解调后的音频信号远场的声压形式为：

$$P(t)=\frac{\beta P_0^2 a^2 m}{16\rho_0 c_0^4 r\alpha}\frac{d^2}{dt^2}E^2(t) \tag{2}$$

其中，β 是非线性系数，a 是有效声源半径，m 是调制系数，ρ_0 是传播介质的密度，c_0 是空气中声音传播的速度，r 是发射阵列的半径，α 是载波频率 ω_c 在空气中的衰减系数，P_0 和 $E(t)$ 同公式(1)。

归纳一下 Berktay 的结论就是：参量阵解调后的信号是与包络平方对时间的两次微分成正比：

$$P(t)\propto\frac{d}{dt^2}E^2(t) \tag{3}$$

可以看出，非线性作用下的自解调过程，能够将包络信号 $E(t)$ 解调出来。如果包络信号 $E(t)$ 是一个音频信号，则得解调出的也是可听的音频信号。超指向性扬声器正是基于上述原理实现的。但是，包络信号的平方会产生新的频率分量，也就会使最后解调出来的音频声出现谐波失真。因此，就必须对调制方式进行研究，并且采取一些预处理措施以减小失真。

同时为了说明用此方法产生的音频具有超指向性，现用 40kHz 和 41kHz 通过空气非线性作用产生的差频 1kHz，其 -3dB 角如下式[10]：

$$\theta_{-3dB}=\sqrt{2\alpha_T/k} \tag{4}$$

其中 $\alpha_T=\alpha_{41kHz}+\alpha_{40kHz}-\alpha_{1kHz}=2.49dB/m$，而 $k=18.47$ 为差频 1kHz 的波数。于是 $\theta_{-3dB}=0.519^o$，可见相对于一般的 1kHz 声源具有很高的指向性。

2.2　信号调制与预处理

信号调制方式可分为双边带调制、抑制载波的双边带调制和单边带调制等。为了简单说明这三种方式，假定载波信号是 40kHz，包络信号是 4kHz，图 1 是三种调制方式产生的信号的频谱，从中可以看出调制方式的区别，而样机采用的是双边带调制方式。

设包络信号为：$E(t)=1+m\sin(\omega t)$，则根据公式(2)解调后的信号为：

$$P(t)=\frac{d}{dt^2}[1+m\sin(\omega t)]^2$$
$$=-2m\omega^2\sin(\omega t)+2m^2\omega^2\cos(2\omega t) \tag{5}$$

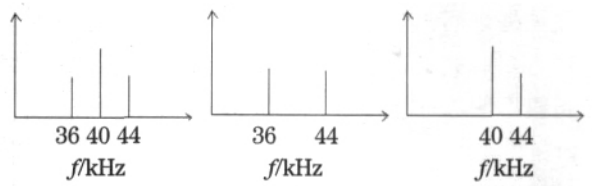

图 1　(a)双边带调制　(b)抑制载波的双边带调制　(c)单边带调制
Fig.1　(a)DSB　(b) DSB-SC　(c) SSB

通过公式(5)可以看出，对于调制到载波上的单频信号，解调出的信号中出现了二次谐波成分，且强度和调制度 m 的平方成正比。而原信号的强度与 m 成正比。因此，只要调制度 m 取得足够小，就可以抑制二次谐波的能量，但同时也降低了调制到载波上的信号能量。另外通过公式(5)可以发现解调后的信号强度与频率的平方成正比，对于一个宽带信号而言，解调后信号的高频部分得到加强而低频部分得到抑制，相当于对音频调制信号做了一次高通滤波。

为了使解调后的信号更好的还原原始的音频调制信号，需要在调制前先对音频调制信号做预处理。作为公式(3)的逆过程，预处理方法如公式(6)，即信号先经过两次积分，再进行开方运算：

$$E(t)=[1+m\iint x(t)\,dt^2]^{1/2} \tag{6}$$

实现框图如图 2 所示。

但公式(6)的预处理方式存在一个缺陷，就是在固定调制度 m 的情况下，当信号能量较强时，[1+m

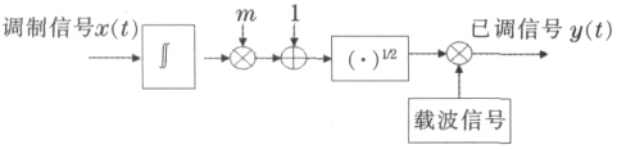

图 2 预处理的双边带调制方式

Fig.2 The frame of preprocessing DSB

$\int x(t)\,dt$ 容易出现负值，而如果 m 值取得较小，则降低调制到载波上的信号能量。为了解决以上矛盾，可采用如下预处理公式[5]

$$E(t)=[-c+\int x(t)\,dt^2]^{1/2} \tag{7}$$

其中 c 是一个变量，跟踪信号能量峰值的变化，当信号能量增强时，该变量及时跟踪，信号能量减弱时，该变量则缓慢衰减。但是，开方运算引入了新的无限次谐波，而换能器的带宽并不是无限的，所以并不是所有的谐波分量都能辐射出去，最后的解调信号也会产生失真。仿真实验表明，利用一个开方后信号的前五次或前六次谐波就能恢复一个理想的开方信号。但是，这六个谐波频率也很有可能进入到音频范围，产生失真。例如，一个 5kHz 单频信号经过开方预处理后，以双边带方式调制到 40kHz 的载波信号，得到的已调信号频谱如图 3，开方后的频谱延伸到整个频带。为了得到理想的开方信号，35kHz、30kHz、25kHz、20kHz、15kHz 和 10kHz 信号都必须通过换能器发射出去，而 20kHz、15kHz 和 10kHz 已经在音频信号范围内了，是能够被人听见的，这样就产生了失真。这些分析将会在下面测试环节中得到证实。

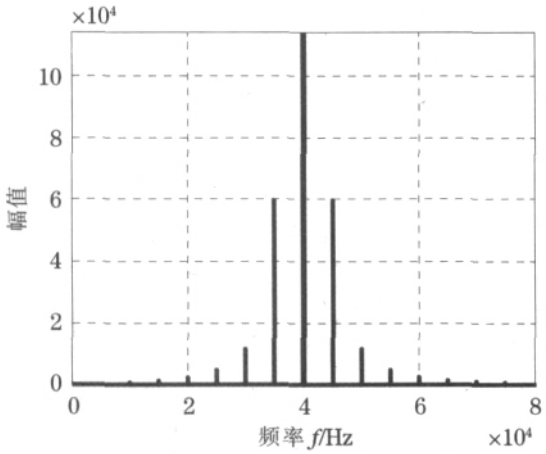

图 3 40kHz 载波信号调制开方 5kHz 信号的调制频谱

Fig.3 The spectrum of a squared 5kHz modulated by 40kHz in theory

这种预处理调制方式的失真是与换能器的带宽和中心频率密切相关的。要减少失真就应该尽可能的增大换能器带宽，并且选择合适的中心频率。一般来说，换能器的中心频率 fs 与载波频率 fc 应该相等，即 fs=fc。Pompei[4]通过实验证明，预处理过程有效的减小了谐波失真。

3 实 现

为便利起见，用一般的模拟电路和压电陶瓷传感器阵列完成了图 4 所示的超指向性扬声器样机系统，它包括预处理电路、载波信号发生器、功率放大器和超声传感器阵列四大部分。

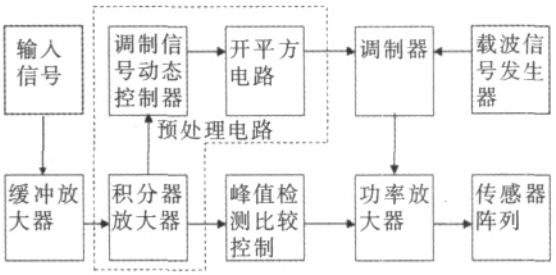

图 4 样机实现框图

Fig.4 The frame of the sample's realization

4 测 试

实验环境如图 5 所示，被测样机放置在全消声室内的固定支架上，接收传感器（标准传感器 B&K4191）悬挂于空中的钢丝绳下，信号源和音频测量分析仪（B&K2012）等设备均放置在消声室隔壁的控制室内，信号线通过布置在两室墙壁之间的空心管连接消声室内的被测样机和接收传感器。

对三台工程样机分别进行了各种性能测试，下面以一台样机为例给予报告。

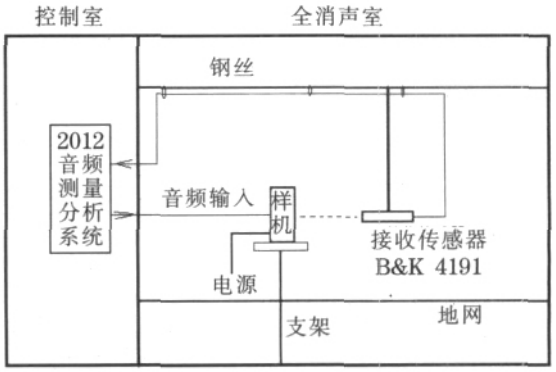

图 5 性能测试实验框图

Fig.5 The frame of then experiment system

4.1 频响曲线

测量传感器距离样机 1.0m，音频输入（Vrms）500mV，测试结果曲线，如图 6 所示。在 100Hz～

13kHz 的音频范围内声压级(SPL)变化不超过±3dB。

4.2　总谐波失真(THD)

以图 7 所示的样机谐波失真为例。测量传感器距离样机 1.0m，音频输入(Vrms)500 mV，为了便于对比分析，图中还画出了二次谐波、三次谐波、四次谐波的曲线和计算到四次谐波的 THD 曲线。由图可以看出，在 1kHz 处的 THD 最小为 4.9%，而在 20kHz、10 kHz、8kHz 的 THD 异常的大，进一步分析可以看出 20kHz 的二次谐波特别大，10kHz 的四次谐波特别大，8kHz 时四次谐波特别大。

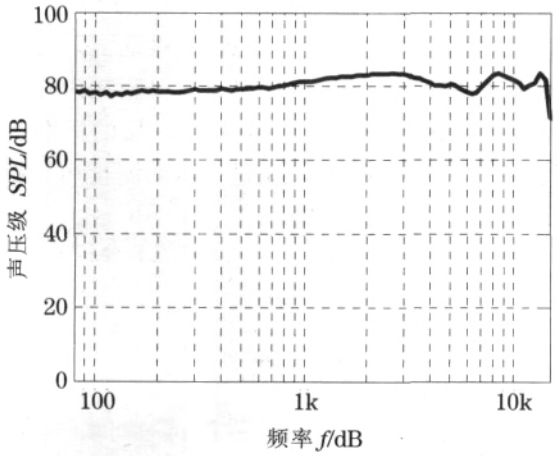

图 6　频响曲线

Fig.6　SPL curve

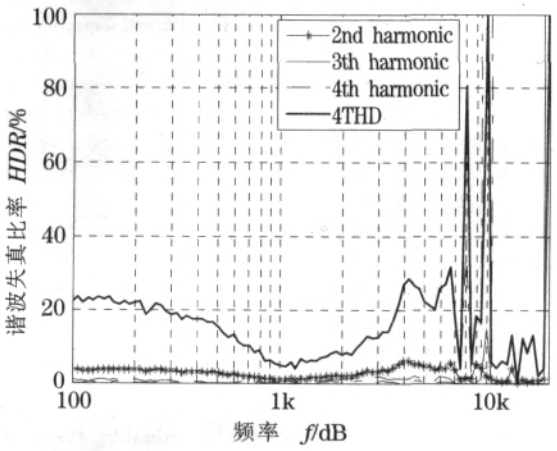

图 7　谐波失真曲线

Fig.7　Harmonic Distortion Ratio curve

实验所用标准传感器 B&K4191 其频率范围为 3.15Hz~40kHz，传感器测量时将采集这一频段的所有信号。而音频信号分析仪计算谐波失真时将传感器检测到的超声信号当成音频信号的谐波分量计算。也即计算 20kHz 的谐波失真时，能量非常强的 40kHz 的超声载波信号将被错误地当成 20kHz 的二次谐波。同样地，在计算 10kHz 的谐波失真时，40kHz 的超声信号也将被错误地当成 10kHz 的四次谐波。虽然 8kHz 的四次谐波也很大，但原因与 10kHz 与 20kHz 不同，因为 8kHz 的四次谐波值是 32kHz，而调制波中含有 32kHz 的成分(见 2.2 节叙述)，因此计算 8kHz 的谐波时，调制波的 32kHz 被错误当作 8kHz 的四次谐波。

为了证明 2.2 节的理论分析的正确性和解释 8kHz 信号四次谐波较大的现象，又做了一个证明性实验，即输入 5kHz 的信号，使用标准接收传感器在距离样机 2m 处，测试样机所发射的信号。标准接收传感器所测量到的信号的频谱如图 8 所示(下图为上图信号平滑后的结果)，可以看到信号中包含有 40kHz、35kHz、30kHz、25kHz、20kHz、15kHz、10kHz 和 5kHz 多个峰值，其中 40kHz 载波 SPL 为 130dB，解调出的 5kHz 信号的 SPL 仅为 85dB，而 5kHz 的 7 次谐波位置 35kHz 的 SPL 却高达 100dB，这个 35kHz 分量显然不是由 5kHz 的谐波分量，它应为调制波信号。

由图 7 还可以看出样机在低频段(600Hz 以下)和 4kHz~7kHz 的 THD 也比较大，其中低频段失真大是因为样机采用的调制方式在空气中的解调是与频率相关(类似通过了一个高通滤波器)。而 4kHz~7kHz 的 THD 较大是因为所选用的超声传感器组成的阵列在此频率段频响不够好的原因，从图 6 的 1 号样机频响曲线也可看出，4kHz~7kHz 的 SPL 比较小，从图 7 也可看出此频段上的二次谐波分量也略比其他频段二次谐波分量高。

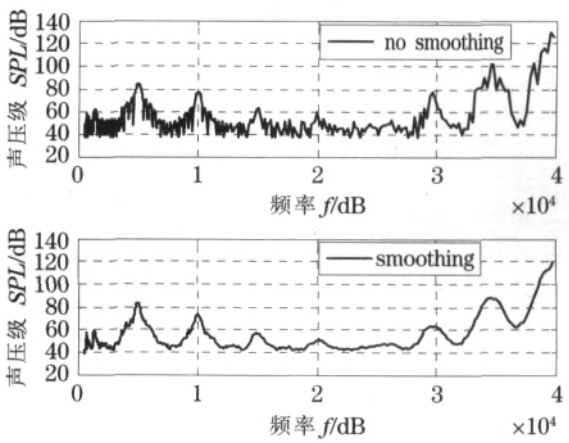

图 8　f=5kHz 单频音频，输出波形频谱

Fig.8　The spectrum of a squared 5kHz modulated by 40kHz in test

4.3　指向性

实验中测试了 1kHz、3kHz、5kHz、10kHz 四种输入频率时的样机的水平指向性图，测量传感器距离样机 1.0m，音频输入(Vrms)500mV，测试时以 5°

为步进，转动样机而保持测量传感器不动，测试样机正前方 180° 开角。结果如图 9，样机 6dB 角小于 5°。

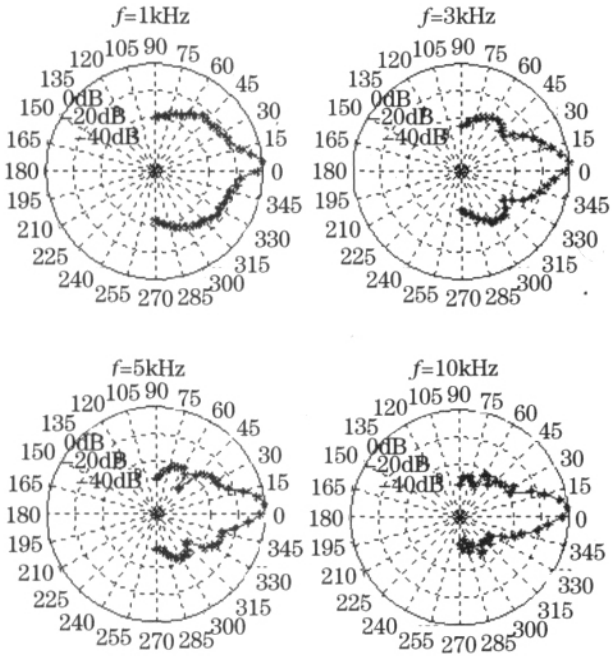

图 9 指向性图

Fig.9 Directional cirle

除了在消声室内进行的精确实验测试之外，还进行了独立试听效果测试实验。如图 10 所示，三台样机并列放置在实验桌上，样机间距约 2 米左右，由于超指向性扬声器的超指向性特点，三人可以各自欣赏自己前方扬声器播放的音频音乐或电台节目，相互之间互不干扰。

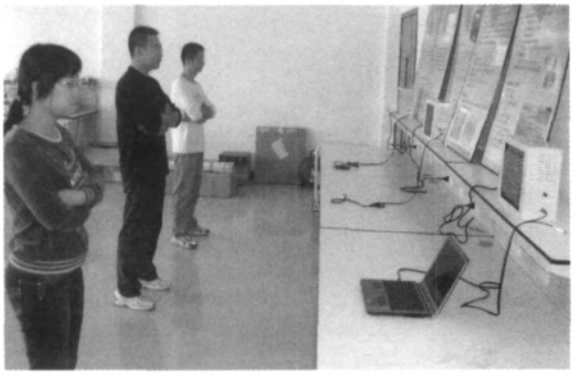

图 10 实际运用图

Fig.10 The figure used in real world

5 结 论

本文介绍了超指向性扬声器的基本原理，给出了一个具体的系统实现方案，并介绍了针对工程样机所做的频率响应、总谐波失真和指向性测试结果，结果表明该样机在可听声范围内具有很强的指向性、良好的频响特性和较小的 THD。

由于样机系统是基于一般的 AB 类功率放大器，并采用很普通的压电陶瓷超声传感器，因而样机发射的音频功率相对还比较小，下一步既可选择发射电压响应更高一些、频率响应更好一些的压电陶瓷传感器，也可考虑由单个压电式传感器组成阵列的方式，改用聚偏氟乙烯(PVDF)膜传感器(阵列)，以获得更大的音频发射功率。并将采用数字系统[10]代替模拟系统，以获得更灵活、性能更好的解调信号预处理效果。同时为了进一步分析超声在空气中解调出音频的过程，我们会使用专用的标准超声传感器在音频解调路径上做进一步的测量和分析。

致谢

中国科学院声学研究所的李晓东研究员和杨军研究员给予理论指导，作者对他们深表谢意。

参 考 文 献

[1] Westervelt P J. Parametric acoustic array[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1963, 35(4): 535-537.

[2] Bennett M B, Blackstock D T. Parametric array in air[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1975, 57(3): 562-568.

[3] Yoneyama M, Fujimoto J, Kawamo Y, Sasabe S. The audio spotlight: an application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design[J]. J. Acoust.Soc.Am, 1983, 73(5): 1532-1536.

[4] Pompei F J. The use of airborne ultrasonics for generation audible sound beams[A]. presented at the 105th convention of the audible engineering society[J]. J. Audio Eng. Soc, 1998, 726-731.

[5] Li Xiaodong. Apparatus and method of generating directional acoustic wave[P]. US 0124739 A1, 2004.

[6] Laura A Brooks, Anthony C Zander, Colin H Hansen. Investigation into the feasibility of using a parametric Array Control Source in an Active Noise Control System[A]. presented at the Proceedings of ACOUSTICS[C]. 2005.

[7] Anjani Achanta, Mark McKenna, Joseph Heyman NonLinear Acoustic Concealed Weapons Detection[A]. Proceedings of the 34th Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop[C]. 2005.

[8] Robert W. Haupt, Kenneth D. Rolt. Standoff Acoustic Laser Technique to Locate Buried Land Mines[J]. The Lincoln Laboratory Journal, 2005, 15(1).

[9] Berktay H O. Possible exploitation of nonlinear acoustics in underwater transmitting applications[J]. J Sound Vibration, 1965, 2(4): 435-461.

[10] Yang J, Ga W S, Er M H. Steering of directional sound beams[P]. WO 03/019125 A1, 2003.