

声场控制技术及其应用

梁 华

(同济大学声学研究所)

1989年11月25日收到

随着多功能厅堂的发展和数字信号处理技术及其电声硬件设备的迅速进步,引入电声设备以支援和控制厅堂的声场或音质,即所谓声场控制 (*Active Field Control*),是近年来厅堂音质设计中的一个引人注目的发展动向。本文阐述有关声场控制技术的原理、分类和特性,并介绍它们的典型的应用实例。

厅堂音质设计是建筑声学设计的一个重要内容。近年来,在厅堂音质设计中有两个引人注目的发展动向,一是利用计算机的室内声场模拟,在建筑声学上实现音质设计;二是利用引入电声设备支援和控制声环境,即所谓声场控制。本文着重叙述有关声场控制技术,并阐述它的原理和各种使用方法。

厅堂的声场控制之所以日益引起人们的注目和应用,主要是由于多功能厅堂的日益需要与发展,以及数字信号处理技术的进步和电声硬件设备的发展。

厅堂音质如何适应多种用途,通常有三种方法:一是采用兼顾不同使用要求的折衷办法,选取适中的混响时间或以主要用途确定最佳混响。二是安装可变换的部件,例如在部分墙面和天花板上安装可旋转或推拉的构件,根据使用要求,使构件的吸声面或反射面外露或遮挡,以达到调整混响时间的目的。三是利用电声的方法进行声场的控制和调整。第一种方法显然难以很好地满足各种不同的要求,第二种方法则存在构造和使用复杂,费用大的缺点。因此,人们越来越重视调整灵活、使用方便的电声控制方法。数字信号处理技术及其硬件设备的发展,为这种声场控制技术的应用和发展创造了十分有利的条件。

声场控制 (*Active Field Control*, 简称 *AFC*) 目前尚无统一的定义,但它与扩声技术

不同。扩声系统是将较弱的声源所发生的声音进行接收、放大,并通过扬声器传播到厅内的全体听众;而声场控制则是对厅堂的声场或音质进行电声控制,以获得所需的某种声场和音响效果。一般地说,它是使用建筑声学 and 电声技术两方面的方法,对室内声场或音质进行能动的控制的一种技术,它涉及到广播、音频工程、建筑声学和录音技术等^[1,3,6]。

一、声场控制的分类

声场控制按其控制对象,可分为三类:

(1) 声场合成:在消声室或强吸声的房间内创造任意的声场

(2) 声场支援:根据既成的室内音响条件进行音响的音量感、混响感和空间感等的控制

(3) 声场效果:主要是在剧场厅堂内获得一定声场的演出效果

其中,在声场合成方面,有 *SFS* (*Sound Field Synthesis*) 的多声道声场合成, *SFR* (*Sound Field Reproduction*) 的多声道声场放音,此外还有各种声场模拟技术。在声场支援方面,它是存在原声场,而对它进行改善、增强和控制的支援,因此通常所说的厅堂声场控制(狭义的)一般就是指声场支援。它的应用实例很多,其中有 *P. H. Parkin* 的 *AR* (*Assisted Resonance*, 受援共振)系统以及飞利浦公司的 *MCR* (*Mu-*

表 1 声场控制技术的种类与应用

	构成技术/对象厅堂		应用(控制对象、目的)
声场合成	SFS (多声道声场合成)		自然乐器的研究、开发和选定 声场研究(物理量和心理量的对应) 教育目的(各种条件下的演奏体验) 音响设计(室形状与主观评价)
	SFR (多声场声场重放)		特殊图象(立体电影,多路幻灯) 广播(卫星广播,聆听条件的改善) 录音、放音(临场感的重现)
声场支援	AR (受援共振系统) AA (受援音响系统) MCR (多路混响增强系统) ERES (电子反射能系统) RODS (混响请求系统) Delay/Rev (延迟混响系统)等	多功能厅堂 历史建筑物 多功能体育馆 扇形厅堂 教堂、礼堂 音乐练习室	扩大用途 保存内装与改善音质的兼顾 控制响度感、混响感(包括会议厅) 增强空间感 附加、调整管风琴混响 改变演奏条件
	Delta-Stereophony (德尔他立体声) VISION-Stage (幻象舞台)	歌剧厅 剧场 室外音乐厅	增强直达声 改善声象定位 附加混响,控制早期反射声
	录音演播室(演播室侧) 录音演播室(控制室侧) 影剧院(舞台) 影剧院(挑台下)		演奏性支援:录音条件的控制 各种条件下的监听 替代、改善音响反射板的效果 改善音质条件
声场效果	SICS (声像控制系统) SES (空间效果系统)等	音乐剧场 舞剧场 特殊电影院 气象放映馆	声象控制和环绕感的控制 舞台空间的演出音质 提供更为自然而强烈的效果 视觉和听觉两方面的同步控制

表 2 心理量与物理量和建筑条件的关系

心理量	物理量	建筑条件
音量感	直达声的声级 扩散声的声级·时间密度 声能密度(E)	声源-接收点的距离 房间容积(V) 内装材料的种类、面积
混响感	混响时间(T_{60}) 平均吸声系数($\bar{\alpha}$)	房间容积(V) 室内表面积(S) 内装材料的种类、面积
空间感	侧向反射声相对量(侧向效应, LE) 双耳间相关系数($IACC$)	房间形状 吸声材料的配置

Multiple-Channel Amplification of Reverberation, 多路混响增强)系统, C. Jaffee 的 ERES (Electronic Reflection Energy System, 电子反射能系统)等,此外还有使声像准确定位的德尔他立体声(Delta-Stereophony)和 VISION-Stage 系统等。在声场效果方面,它已突破以往

的音响效果的范畴,而是给室内整个空间以激烈而自然的变化。例如日本科学博览会钢铁馆的 SICS (Sound Image Control System, 声像控制系统)和东京银座季节剧场的 SES (Spatial Effect System, 空间效果系统)等。表 1 表示声场控制技术的种类与应用示例。

厅堂音质好坏的最终标准是听众（也包括演讲者和演员）的主观感受。音质设计就是找出与这些主观感受相对应的客观指标（物理参数），并通过设计使得到的客观指标符合良好音质的要求。构成厅堂音响效果，亦即主观印象的三要素：音量感、混响感、空间感，它们与物理量和建筑条件的对应关系如表 2 所示。

声场控制是用电声方法来控制这些物理量，使之达到与建筑条件相对应的音响效果。因此，作为声场控制技术的基本要求，应满足如下三点要求：（1）听觉上的自然性；（2）系统的稳定性；（3）参量的控制性（包括操作方便）等。

二、声场控制的基本部件

声场控制技术的发展与数字信号处理和硬件设备技术的发展有着密切的关系。目前，所用的数字信号处理及其硬件基本组成有三种，

如图 1-3 所示。图 1 为实时 FIR 滤波器，是进行反射声数据卷积的声场控制基本部件。声场控制系统的设计者通过将反射声数据写入该部件 ROM/RAM 中，即可对时间、空间、频率在各

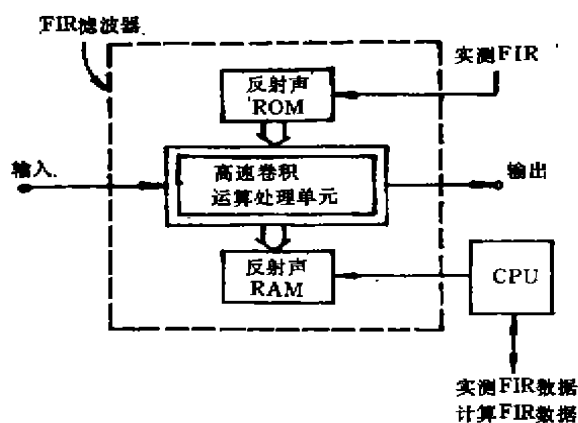


图 1 卷积运算处理单元
（实时 FIR 滤波器）

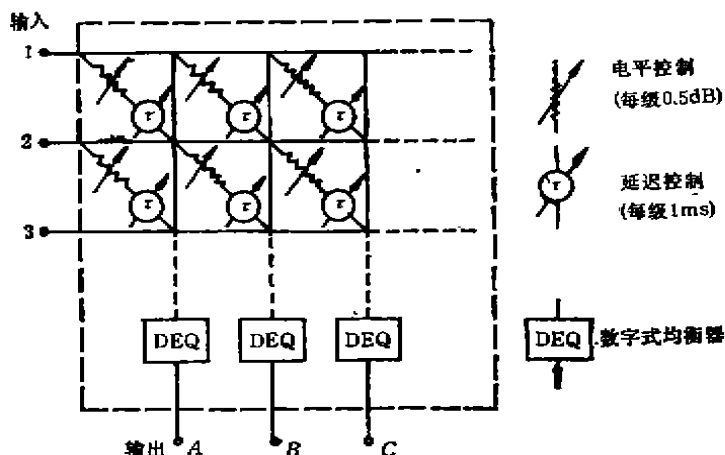


图 2 L/D-EQ 矩阵单元
（ $m \times n$ 型）

个范围内进行各种声场的控制。

图 2 是所谓 L/D-EQ（声压级/延迟/均衡）矩阵单元，它对于 m 输入、 n 输出的所有交叉点（ $m \times n$ ）设置延迟和声压级设定调节，并在各输出端设有参量型均衡器。这些参量全由中央处理器 CPU 控制。这种矩阵单元不仅用

于声场控制，在扩声系统的输出控制等也有广泛的应用。图 3 为通用声场处理器（SFP），它具有随时控制各种参量的特点。它是将输入信号作为厅堂座席的声音，通过 CPU 实时控制直达声（DR）、一次反射声（FR）、早期反射声（ER）和混响声（RV）等各参量。在实际声场

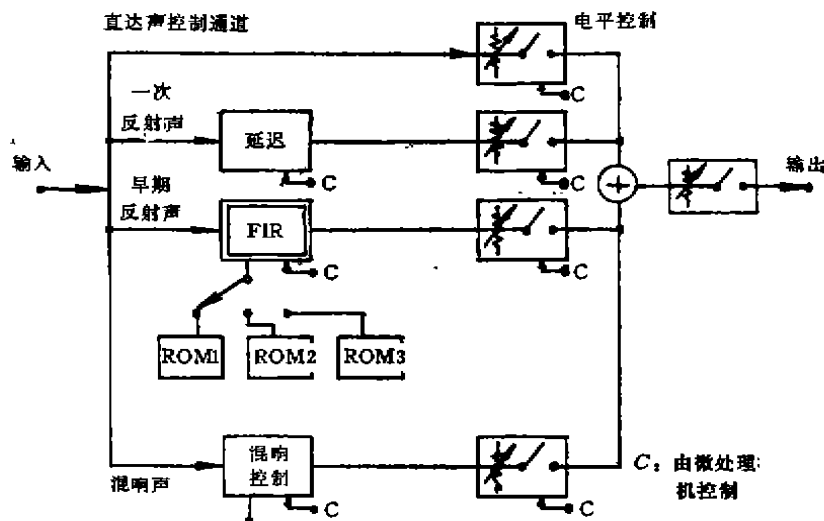


图3 通用 SFP (声场处理器)

控制中,往往是以上几种基本单元的组合。

三、声场合成

声场合成包括多声道声场合成 (SFS) 和多声道声场重放 (SFR) 等。图4是一种多声道声场合成 (SFS) 的构成方式。它的基本思想是将原声场接收点的空间划分成有限个部分空间,然后将包含对应空间的立体声的反射声构造做成方向脉冲响应 (DIR),并与输入信号卷积,得到该方向的信号 $F_i(t)$,再由对应设置的扬声器 $s_p(t)$ 放声,进行空间合成从而创造出所期望的声场。图5是这种 SFS 的构成系统框图。各部分的增益、声压级、均衡以及反射声模式全由 CPU 控制。RAM/ROM 的反射声结构数据是在存在地板反射面的半消声室中进行。它的主要技术关键:一是 DIR 的测量或预测的精度;二是 FIR 滤波器的计算容量和速度,即进行计算的反射声数目;三是对应各部分空间的声空间合成,为此必须很好地考虑扬声器的配置。

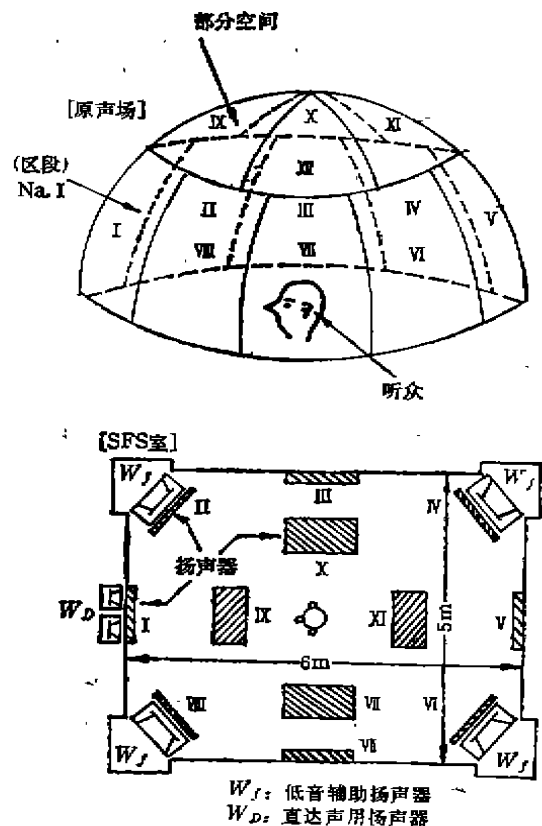


图4 SFS 室的扬声器排列与空间划分

四、声场支援

声场支援是近来十分活跃的领域。所谓声应用声学

场支援就是在既成的厅堂内进行音质的电声控制或支援,因此它就需要设法控制表2所示的

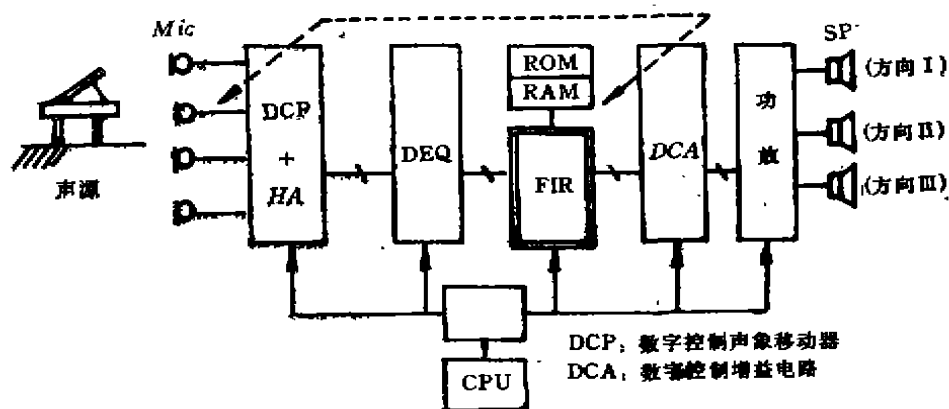


图5 SFS系统构成

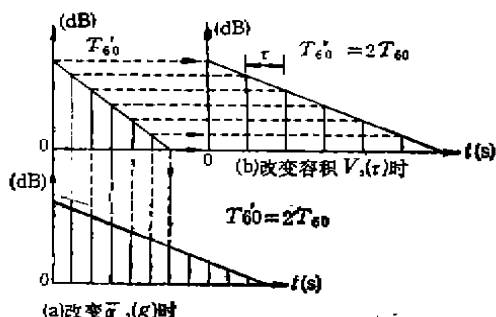


图6 改变混响的两种方法

各物理参数。例如若要控制或增大大厅堂的混响时间，则由混响时间式 $T_{60} = \frac{0.161V}{A}$ 可见，减小室内吸声量 A 或者增大房间容积 V 都可使混响时间增长。所以，如图6所示有两种改变混响的方法。一是如图6下部所示利用减小吸声量亦即减小各反射声的衰减率的方法。在声场控制中的AR系统和MCR系统（见后述）就是利用此法来延长混响时间。另一是如图6右部所示利用增加容积亦即降低反射声密度的方法。这时系统的环路增益不变，即反射声的强度没有增加。但后一种方法若使反射声间隔太大则会产生听觉上的不自然感，故其混响时间的延长有其上限。有时两种方法综合使用，例如日本的AA系统。

下面列举几个有名的声场支援的实例。

① 受援共振（AR）系统^[1,4]

这是1964年P. H. Parkin等为了改进伦

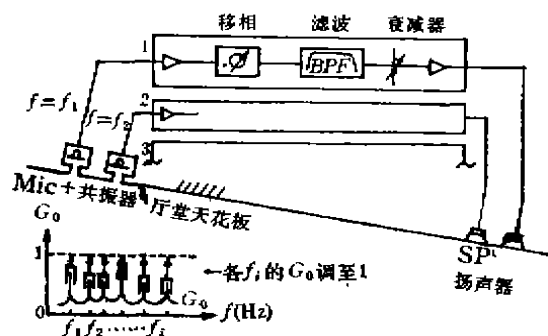
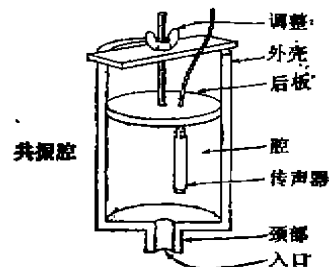


图7 AR系统与共振腔

敦的英国皇家节日音乐厅的低频混响不足而提出并采用的一种声场支援系统。如图7所示，它由许多路传声器-放大器-滤波器-移相器-扬声器组成，各滤波器分别调整在房间的规范振动频率模式 $f_1, f_2, f_3, \dots$ 上，各频率 f_i 的回路增益分别调整接近于1，并使整个系统的增益稳定。AR系统实际上是一种频率分割系统，为了防止各路交错而要用特性陡削的滤波器，为此将每一路的传声器分别装在每个亥姆霍茨共振腔内，如图所示。系统共用168个通



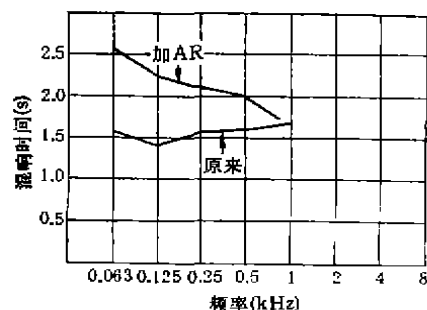


图8 英皇家节日音乐厅使用 AR 系统的效果

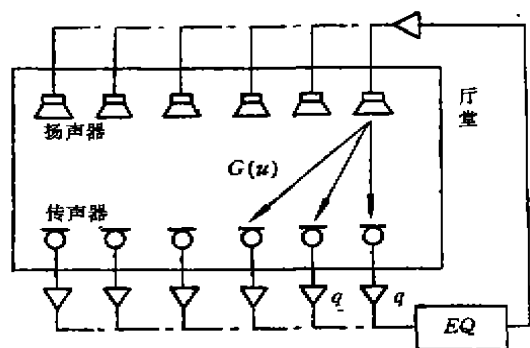


图9 MCR 基本系统组成

表3 MCR 系统的应用与效果

	ELA studio, Eindhoven 1977 年	POC 会议中心 Eindhoven 1981	Hans Rosbaud studio Südwestfunk, Baden-Baden 1981	Claude Debussy Theatre, Palais des Festivals, et des Congres, Cannes 1983
厅堂容积 (m^3)	1300	4000	6100	12000
四周表面积 (m^2)	800	1900	2100	5500
平均吸声系数	0.4	0.25	0.3	0.25
无 MCR 时混响时间 (s)	0.65	1.15	1.5	1.45
有 MCR 时混响时间 (s)	1.1	1.7	2.1	2.0
通路数	90	90	70	66
混响声场的增加 (dB)	2.4	2.3	1.9	1.85
带宽 (Hz)	90—5000	70—6000	70—6000	140—6000
最大声压级 (dB)	109	112	109	110

路,结果如图8所示在低频的混响时间大约延长1.5倍,获得了显著的音响效果。

② 多路混响增强 (MCR) 系统^[2]

这是飞利浦公司 N.V. Franssen 提出的声场支援系统。如图9所示,它与 AR 不同,不用窄带滤波器,而采用宽带系统,该系统通过 N 个环路增益 q 的系统并接,并使各环路增益为 $1/\sqrt{N}$,以确保系统稳定和防止染色与啸叫。各路互为独立系统,且各传输特性可通过均衡调节至大致相同。表3列出了使用 MCR 系统的四个实例及其效果。例如1981年该系统运用于飞利浦公司的 POC 会议中心(约有4800座位),结果使混响时间从1.1s延长至1.7s,混响声的声级也提高了2.3 dB。

应该指出,上述两种系统都可以用 FIR 滤波器实现。而且 FIR 滤波器的自由度大,它还可以控制侧向效应 LE 和 D 值等参数。

应用声学。

至于在声场控制中往往采用多声道方式,其直接目的并不是使声场均匀化或增加反射声数目,而主要是为了防止啸叫(确保系统稳定性)和减少声染色(提高自然性)。

③ 电子反射声能 (ERES) 系统^[3,7]

上述两个系统都着重控制混响时间,ERES 系统则着重控制早期反射声,它是由美国 C. Jaffe 开发的。在大型厅堂和扇形厅堂中,往往是前面座席由侧面来的近次反射声感到不足,而且在一般厅堂的一楼前半部中间座位上的近次反射声也显缺乏,影响了音响效果。ERES 系统如图10所示,为了补充这种近次反射声,在管弦乐演奏时指挥者的后上方约6米处,用单点传声器对管弦乐拾音,而用设置在天花板和墙壁上的扬声器放音。该系统所用的传声器为压力区传声器,扬声器使用球形扬声器,使之指向性尽可能宽,以着重补充中、高频声的反射

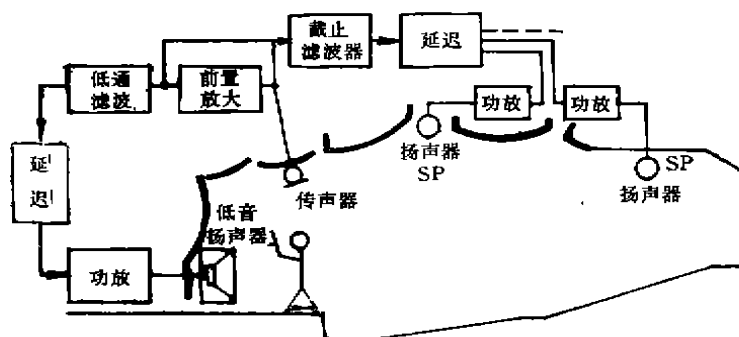


图 10 ERES 原理图

表 4 AR 系统与 ERES 系统的比较

	AR 系统	ERES 系统
音响效果	延长混响时间(中、低频)	① 附加 20ms 早期反射声; ② 附加 200ms 低频多重延迟
建筑效果	增大房间容积 V	缩小房间容积 $V(W)$
传声器	装在 90—200 路共振腔体内	单点压力区传声器(在指挥者后上方)
调整	扬声器和传声器的位置、系统增益	延迟滤波器
扬声器	装在天花板和墙壁	装在天花板、墙壁、舞台后部
应用	多功能厅堂、音乐厅,尤其对风琴音乐有效	改善大型厅堂、扇形厅堂的一楼的临场感

声成分。

ERES 系统还附加一个新功能,即低频声能的增强。它是通过电路进行约 200ms 的低频多重延迟,产生多次反射声群,然后在舞台后部(反射板前)用低音扬声器放音,从而增强低频声能,它与前述的中、高频声补偿相辅相成。

有趣的是,ERES 系统与上述的 AR 系统相反,它起着缩小房间容积的效果,而 AR 系统则有扩大房间容积的作用。关于 ERES 和 AR 两系统的比较如表 4 所示。

利用这种控制早期反射声系统,不仅可以控制空间感和房间形状效果,以及改善舞台和挑台下的声场,而且还可以控制和改善剧场舞台上的声像定位。日本雅马哈公司开发的 AA 系统和日本银座季节剧场的 VISION-Stage 都是这方面取得较好效果的例子,它们所用的基本部件就是图 1—3 所示的部件。

此外,声场控制技术在声场效果方面也获

得了很多应用,限于篇幅,此不赘述。

上面列举的只是声场控制的若干典型实例,正如表 1 所示,声场控制的应用远不止此,但从这些示例已可见声场控制技术的概貌。声场控制技术是近年来一项十分引人注目的新技术。可以预料,随着人们对声场和音质的要求的不断提高,以及多功能厅堂的广泛应用和数字信号处理技术与设备的迅猛发展,声场控制技术也将获得进一步的发展和应用。

参 考 文 献

- [1] Parkin, P. H. and Morgen, K., *J. Acoust. Soc. Am.*, 48, (1970), 1025—1035.
- [2] Koning, S. H. de, *Philips Tech. Rev.* 41, 12—13, 1983/84, 12—23.
- [3] Sound tract, *Progressive Architecture*, 2, 1983, 129—135.
- [4] Charles, J. G., *Applied Acoustics*, 21 (1987), 199—223.
- [5] Steinke, G., *J. A. E. S.*, 31, (1983), 500—511.
- [6] 川上福司, *放送技術*, 40—12(1987), 128—135.
- [7] 永田徳, *音響技術*, 13—4(1984)88—92.