

数字音频广播(DAB)技术

李 栋

DAB
Digital Audio Broadcasting

北京广播学院出版社

数字音频广播 (DAB) 技术

李 栋

《中国新闻科技》杂志社 编辑

北京广播学院出版社

(京)新登字 148 号

数字音频广播 (DAB) 技术

李 栋

《中国新闻科技》杂志社编辑
凯乐斯制版 (北京) 有限公司制版
北京广播学院出版社出版发行
北京市朝阳区定福庄南里 7 号
(邮编: 100024 电话: 65779405 或 65779140)

中国科学院印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本: 889×1194mm 1/16 印张: 7.75 字数: 200 千字

1998 年 7 月第一版 1998 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 7-81004-699-3/G·402

定价: 30.00 元

序 言

数字音频广播 (DAB) 是继调幅和调频广播之后的第三代广播, 与现行模拟广播相比音质更好 (CD 质量), 可保证高速移动状态下的接收质量, 有较强的抗干扰和在恶劣环境下接收的能力, 发射功率小, 频谱利用率高, 易于实现一个频道多套节目和多种业务的广播。可明显提高投资效率, 是广播技术和广播事业发展中的一个新的里程碑。

国际上早在 80 年代初期就已经开始考虑数字音频广播技术, 但是直到 80 年代末该技术才开始为世人瞩目。近年来由于数字技术在信源编码方面取得了突破, 使得比特率降低到原来的 1/7, 音质不受影响; 同时, 通过信道编码及合适的调制方法, 解决了由于多径传播造成的衰落和移动接收出现的多普勒频移等问题, 这就为 DAB 的实现创造了条件, 为推广应用开辟了广阔的前景。此外, 超大规模集成电路、计算机和多媒体技术等的发展都为 DAB 提供了足够的技术支持和发展基础。

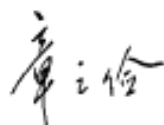
1996 年 12 月 15 日中国首座数字音频广播先导网开通了, 该网由佛山主发射台和中山发射台、广州发射台组成, 1997 年 7 月 1 日正式投入试播。这标志着我国的 DAB 广播事业已开始启动, 这是我国广播事业发展中的一件大事, 必将大大促进我国数字音频广播 (DAB) 技术、事业和产业的迅速发展。为了迎接我国数字音频广播大发展局面的到来, 《中国新闻科技》杂志从 1997 年 1 月起组织了“数字音频广播 (DAB) 技术系列讲座”, 由北京广播学院李栋教授主讲, 受到业内各方面人士的欢迎与好评。为了满足广大读者和业内技术研讨会、技术培训的需要, 李栋教授和《中国新闻科技》杂志社合作将这些讲座汇编成书, 由北京广播学院出版社出版发行, 为我国 DAB 的发展做了一件有益的工作。

这是一部关于数字音频广播 (DAB) 的较全面的专著, 它介绍了 DAB 的特点, 信源编码方法, 信道编码方法, 调制方法, 复合方式, 传输模式, 工作频段, 比特差错保护, 发射及接收, 附加数据业务, 测量技术等各方面的技术内容。数字音频广播是新技术, 因而本书还具有内容新颖的特点。

本书较深入地接触到一些关键技术 (例如 COFDM) 的实质内容, 而又采用由浅入深的表述方式, 通过一些简明的例子或层次分明的叙述, 逐步引向真实的 DAB 技术内容。这样做有利于引导对此领域不熟悉的读者较顺利地进入与深入其中。本书没有为了追求“浅”而舍弃或回避实质的技术内容, 也没有为了保持“水平”, 而省略一些“入门”性质的内容。这对于国内的大多数读者也许是有利的。

本书内容充实, 信息量大, 对问题的具体叙述与大量数据的穿插运用, 有助于读者获得生动而有用的信息。特别是本书由一人撰写, 避免了重复, 因此内容的系统性好, 缺漏少。李栋教授从事 DAB 方面的研究和教学工作多年, 积累和整理了大量最新参考文献, 掌握了较全面的专业知识, 因此本书具有较高的水平。

我高兴地将《数字音频广播 (DAB) 技术》一书推荐给广播电视技术领域中的工程技术人员和广大读者, 希望大家从中得到收益和启迪, 以便更有力地推动我国 DAB 的技术进步和事业发展。



1998 年 5 月 18 日

前 言

广播是我们生活中的良师益友。现在我们每天收听的调幅广播和调频广播，传送的都是模拟信号，属于模拟广播。模拟广播受调制方式和带宽所决定，有很多缺点。主要问题是传输过程中会产生噪声和失真的积累、由电波多径传播产生衰落，严重影响传输质量。

数字声音广播，简称 DAB (Digital Audio Broadcasting)，是新一代的广播，是数字广播系统。这种新的传输系统抗干扰性能好，可以消除传输过程中的噪声和失真的积累，传输中出现的差错可以被修正；数字的传输系统需要的发射功率小，有利于节约能源和降低电磁污染、改善环境保护；数字的传输系统允许同步网运行，提高了频谱利用率；这种新的系统是一种多媒体广播系统，它既可以用来传送声音广播节目，又可以传送数据业务、静止和活动图像等；这种系统既可以固定和便携接收，也可以移动接收。总之，DAB 是广播技术发展中的一个新的里程碑。DAB 技术已经引起世界各国科技界、广播界、电子工业界的广泛关注和极大兴趣。

DAB 技术已经在欧洲正式使用，我国在珠江三角洲建设的第一个 DAB 先导网已在 1996 年底正式投入试验播出。模拟广播向数字广播发展是必由之路。

为了适应我国 DAB 事业的发展需要，使读者全面了解 DAB 技术，作者从 1997 年 1 月起，在《中国新闻科技》杂志上举办了为期 2 年的《数字音频广播技术》专题讲座，到 1998 年底共有 24 讲。这 24 讲的主要内容是：

第 1 讲，“DAB 的特点和能力”，是关于 DAB 的概述。主要介绍 DAB 发展概况；所使用的源编码方法和 COFDM 传输方法；DAB 不同的覆盖方式、传输模式和工作频段；DAB 的数据业务；DAB 的未来发展。

第 2 ~ 4 讲，“DAB 的信源编码”，详细说明了信源编码的任务和理论基础；介绍了 MUSICAM 编码方法和编、解码器，介绍了联合立体声编码和低取样频率低比特率编码方法。

第 5 ~ 7 讲，“DAB 的传输方法”，详细讨论和分析了 COFDM 编码与调制方法。主要内容涉及到移动无线电信道的特性；COFDM 的特征；借助 FFT 算法实现 OFDM 调制；保护间隔的作用；OFDM 系统参数的确定与 DAB 工作模式；信道编码（卷积码）和解码方法、原理；可删除型卷积编码原理；四相差分相移键控调制方法；时间交织、频率交织；DAB 传输帧结构等。

第 8 讲，“DAB 复合信号的组织及节目传输机理”，主要讨论 DAB 的数据结构。介绍了 DAB 公共交织帧结构、快速信息块结构、复合结构及复合结构信息；流模式和包模式数据传输；快速信息数据信道；节目伴随数据 (PAD) 等。

第 9 ~ 10 讲，“DAB 的比特差错保护”，主要讨论了关于 DAB 的数据进行信道编码时所实施的差错保护，包括音频业务的不均匀差错保护；数据业务的保护；DAB 的覆盖退出性能。

第 11 讲，“循环冗余校验 (CRC) 及其在 DAB 中的应用”，讲述了 CRC 的数学关系、CRC 计算的实施和 CRC 在 DAB 系统中的应用。

第 12 ~ 13 讲，“DAB 发射机”，主要讨论了 DAB 发射机的定义和任务；COFDM 信号的特点和对发射机的要求；频率变换方法；非线性校正方法；输出带通滤波器；DAB 发射机实例；发射天线等。

第 14 ~ 15 讲，“DAB 同步发射网”，主要讨论了同步发射网及 DAB 同步工作能力的基础；网络增益与功率节约；同步网的频率节约；同步网规划的若干参数；DAB 工作频率；同步网基准模

型；单频网（SFN）的设计；同步网中覆盖空隙的填充；DAB 与其它无线电业务的相容相；同步网同步运行的保证等。

第 16 讲，“DAB 同步网节目和数据的馈送”，主要讨论 DAB 同步网中的各发射台如何得到信号源。介绍了 ETI 数据流的馈送；已处理好的 DAB 信号（COFDM 信号）的馈送；直接传送 MUSICAM 数字节目；SCPC 技术；在馈送网络和发射台的时延均衡。

第 17 讲，“DAB 接收机”，主要讨论了 DAB 接收机的基本构成和工作原理；DAB 接收机例；新一代的 DAB 接收机。

第 18 ~ 19 讲，“DAB 的数据广播业务”，主要内容包括：DAB 数据业务传输概论；DAB 传送数据的特殊性能；PAD 的编码与应用；不同类型的数据业务例；数据接收机。

第 20 讲，“DAB 的数据加密和能量扩散”，主要讨论了数据流的加密和解密原理；伪随机比特序列的控制字的管理；使用权的管理；使用权接口；能量扩散和解扩散。

第 21 讲，“节目信息与调谐信息”，主要讨论了节目信息和调谐信息的传输机理，介绍了节目和信号群；信号群名称和节目名称；节目语言种类识别；日期和时钟时间；发射节目编号；节目类型识别；通告识别；关于其它信号群的节目信息；频率信息；地区识别；发射机识别和接收机的定位；业务启动信息。

第 22 讲，“DAB 中的多声道声音编码”，主要讨论了多声道扩展的技术问题，介绍了多声道数据流的格式。

第 23 讲，“DAB 电视系统”，主要讨论了基本要求；DAB 传送活动图像的可能性。介绍了 DAB-TV 系统配置；在 DAB 复合信号中 MPEG 数据流的置入；通过 DAB 系统传送 TV 的试验系统；DAB-TV 使用的频率；DAB-TV 的应用；DAB 与 DVB-T 的关系；DAB 系统—将来的地面电视传输系统。

第 24 讲，“DAB 测量技术”，主要讨论了影响 DAB 覆盖的一些参数的测量方法和应注意的问题。同时，还介绍了衰落信道模拟器和 DAB 测量车。

为适应今年下半年全国数字技术卫星教育、第七届北京国际广播电视与电影设备展览会（BIR-TV'98）的需要以及各地方与部门新技术培训的需要，《中国新闻科技》杂志社将作者所做的讲座全文（包括已经发表和将要陆续发表的）汇编成书—《数字音频广播 DAB 技术》。由北京广播学院出版发行。本书涉及到 DAB 整个系统的几乎全部的技术。编写过程中，作者注重知识、信息和实用。其读者对象是广播电视通信领域的工程技术人员、大专院校相关专业师生。

《中国新闻科技》杂志社技术编审教授级高级工程师杨景礼同志，对本书的每一讲做了认真审阅并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢！

原广播电影电视部科技委副主任章之俭教授专为本书写了序言，作者在此表示衷心感谢！

限于作者水平，加之讲座篇幅有限，许多问题不可能展开讨论和透彻分析，况且技术还在不断发展中，其中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。



1998 年 5 月 20 日

目 录

第 1 讲: DAB 的特点和能力	1
第 2 讲: DAB 的信源编码 (上)	4
第 3 讲: DAB 的信源编码 (中)	7
第 4 讲: DAB 的信源编码 (下)	11
第 5 讲: DAB 的传输方法-COFDM (一)	14
第 6 讲: DAB 的传输方法-COFDM (二)	20
第 7 讲: DAB 的传输方法-COFDM (三)	26
第 8 讲: DAB 复合信号的组织及节目传输机理	32
第 9 讲: DAB 的比特差错保护 (上)	37
第 10 讲: DAB 的比特差错保护 (下)	41
第 11 讲: 循环冗余校验 (CRC) 及其在 DAB 中的应用	44
第 12 讲: DAB 发射机 (一)	46
第 13 讲: DAB 发射机 (二)	49
第 14 讲: DAB 同步发射网 (一)	53
第 15 讲: DAB 同步发射网 (二)	57
第 16 讲: DAB 同步网节目和数据的馈送	60
第 17 讲: DAB 接收机	65
第 18 讲: DAB 的数据广播业务 (一)	70
第 19 讲: DAB 的数据广播业务 (二)	75
第 20 讲: DAB 的数据加密和能量扩散	80
第 21 讲: 节目信息与调谐信息 (业务信息)	83
第 22 讲: DAB 中的多声道声音编码	88
第 23 讲: DAB 电视系统	94
第 24 讲: DAB 测量技术	99
附录 1 缩略语全称与中英文对照	105
附录 2 本书参考文献	111

在过去的几十年中，调频(FM)广播曾以最好的声音广播质量受到听众的欢迎。但是，这种模拟的窄带传输方法的主要问题是多径传播缺乏抵抗能力。尤其在移动接收时，由于无线电信道的频率选择性和时间选择性，多径传播会产生严重的衰落现象，损害接收质量。

为了改进调频广播的技术质量，虽然采用了不少新的方法和技术，收到了一定的成效，但都有一定的局限性，并不能彻底改变FM广播的固有弱点。人们从理论和实践中已经认识到，现在模拟方式的FM广播已经没有进一步根本改善的可能性。此外，随着人们物质文化生活水平的提高，也对广播质量提出了更高的要求，例如要求达到CD质量水平。

数字音频广播(DAB)就是适应社会发展，体现科技进步的产物，它是一种新的广播系统。DAB是以数字技术为手段，由广播机构向移动、固定或便携式接收机传送高质量的声音节目和数据业务。DAB除了声音信号外，传送任何形式的数据信号都是可能的，例如广播电文，静止画面、计算机程序等，甚至可以对移动的TV接收机传送电视节目。因此，现在已开始称DAB为数字多媒体广播(DMB)。

DAB 发展概况

DAB技术是欧洲开发的尤里卡高科技项目之一(尤里卡147-DAB)。经过多年试验，不断改进，DAB已

第一讲

DAB 的特点和能力

是一项成熟的技术，并经标准化后，于1995年秋在英国和瑞典正式投入使用。欧洲其它一些国家也正在做实施准备。整个欧洲DAB频率分配任务已经完成；对DAB推广应用起决定作用的用户终端设备的开发和生产，也以惊人的速度发展：设备功能越来越齐全、体积越来越小、价格越来越可以接受。

我国政府已将DAB列入国家重点科技产业工程之一，广电部与欧共体合作在珠江三角洲建设的中国第一个DAB先导网，已经开始试验广播。北京地区的先导网也正在建设之中，还准备在其它地区建DAB先导网。预计，DAB技术在我国的推广应用可能要早于高清晰度电视。

合适的源编码方法

为了能够以窄的带宽对数字信号进行有效传输，以节约频谱和传输费用，首先要进行所谓源编码，剔

除语言和音乐信号中包含的“冗余”部分和对声音重放没有关系的人耳听不出的“不相关”部分，实现有效的数据压缩。

在DAB中应用了简称为MUSICAM(掩蔽型自适应通用子频带集成编码与复用)的编码方法。它可以把一套立体声节目的数据率，由 $2 \times 768 \text{ kb/s}$ 降低到 $2 \times 96 \text{ kb/s}$ ，人们听不出数据率压缩后的节目与原版节目的差别，达到CD质量水平。

虽然有不同的信源编码方法，但MUSICAM方法在主观质量、数据率、处理过程中所需的时延和编码器复杂性等方面，提供了最佳的折衷，是

适合于DAB使用的编码方法。

在DAB系统中，对声音比特率安排了特别宽的范围，并且有多种声音模式。由于比特率决定声音质量，因此，一般来说，比特率越低，可能感觉出码率压缩的节目同原版节目有差别的概率越大。在DAB中，可提供使用的总数据率，可以按照不同的需要和标准进行灵活分配。随着技术的发展，今天使用 192 kb/s 的高级立体声节目，在可预见的时间内，进一步降低数据率，使用 160 kb/s 也许就够了。

对多径传播不敏感的COFDM传输方法

在模拟广播中，通常使用一个载波传送一套节目，是窄带传输系统。这种系统当由于电波多径传播出现衰落时，常常会使信号中断。

√DAB使用了COFDM(编码正交频分复用)传输方法，它是一种多载

波宽带传输系统。这种方法与无线电信道的传输特性相适应,能使由于多径传播这种物理条件造成的无线电信号的失真得到补偿。

COFDM 包括信道编码和调制两个重要部分。

为了防止传输差错,经过数据压缩的数据流,首先要进行信道编码,即人为加进冗余。然后,经信道编码的信息要被分配到频谱成正交关系的许多副载波上传送(例如 1536 个副载波,每个相距 1KHz)。这些副载波被数字信息调制,采用的是四相差分相移键控的调制方法。所有这些已调副载波叠加在一起,就形成包含数字信息的所谓 COFDM 基带信号(中心频率通常为 2.048MHz)。然后,再采取频谱搬迁的办法,将其变换到射频范围,形成带宽为 1.536MHz 的“DAB 频率块”,经功率放大后,通过天线发射。在一个“DAB 频率块”上,通常可以同时传送 6 套 CD 质量的立体声节目和其它数据业务。

为了能够修正传输过程中可能出现的突发性的比特差错(比特块差错),DAB 采取了双重的预防措施,即“时间交织”和“频率交织”技术,使本来相邻的信息单元在时域和频域都尽可能远地分开来传送,接收端经过去交织恢复信息原有的顺序,同时就把可能出现的“块差错”拆开为相距较远的单个比特差错,容易予以修正。

此外,在 COFDM 传输方法中,为了防止具有较大时延差的多径传播的信号,在接收机相遇时产生符号间干扰,人为将符号持续其延长一个被称为“保护间隔”的时间长度。经过这样处理后,只要到达接收

机天线的多径信号之间的时延差不超过保护间隔,那么所有的多径信号(包括直达的、绕路的或由

同步网中其它发射台来的)都会对总的接收信号做出有益贡献。

由于 COFDM 是多载波宽带系统,虽然不能排除在特定的条件和环境下也会出现个别载波或相邻若干个载波的衰落,但它们仅携带很少的信息,出现传输差错完全能够修正。出现宽带衰落的可能性很小,除非在很长的隧道和山谷,电波完全被遮挡。为了使读者对 DAB 发射系统有一个整体概念,图 1 给出 DAB 发射系统原理方块简图。图中在这一讲未涉及到的部分,留作以后解释。

DAB 不同的覆盖方式

DAB 信号可以用不同的覆盖手段传送到用户的接收机,例如通过地面同步网、本地电台、卫星和电(光)缆网。

1. 数字的同步网

与 FM 广播的根本区别在于,DAB 可以单频网(SFN)同步运行。实现多套节目(例如 6 套 CD 质量的立体声节目)的大面积覆盖,只需一个 DAB 频率块。采用同步网技术,在相同的频谱宽度内,与传统的方法相比通常可传送 3 倍多的节目,或者说在传送相同数量的节目时,所需的频谱宽度仅为传统方法的 1/3。同步网的覆盖区域越大,DAB 系统频谱利用越经济。

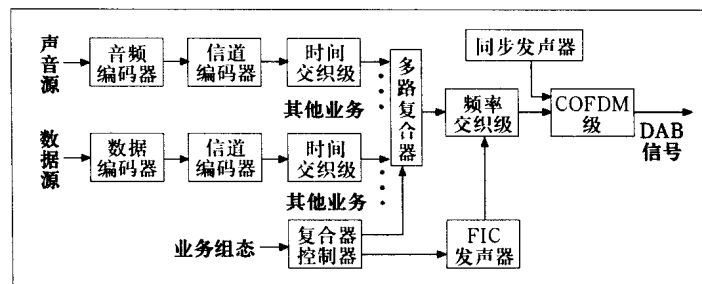


图 1 DAB 发射系统原理

所谓单频网,是指同步网中的所有发射机都工作于中心频率相同的 DAB 频率块,调制信号也必须精确同步,也就是说,每个比特在网中所有发射机必须真正一致。在这种情况下,特别在每个发射台覆盖区边缘,许多发射台的信号相互补充,因此,提高了传输可靠性。在网中发射台之间的距离和布局满足一定的条件下,各发射台发射的功率是相助的。因此,DAB 同步网中发射台的发射功率不需要很大,通常约 1KW 和几百瓦。

2. 本地电台

对于一个城市来说,使用一个 DAB 发射机覆盖也就够了。当本地电台不可能提供多达 6 套节目的话,可以用较少量的节目并同时提高整个信号的差错保护度(即人为提高冗余度、降低信道编码率),来占满 DAB 可提供的整个数据容量。这样,就可以进一步降低传输的剩余误码率,扩大发射台的作用距离,扩大覆盖面积。

3. 卫星

DAB 应用的 COFDM 传输方法,本来就是为可支持移动接收的直播卫星而设计的。

卫星传送的优点是有相当大的覆盖区域。对于全国性节目来说,通过卫星进行全国的覆盖可能是最经济的方案,可以节约可观的无数个

地面同步网建设、节目和数据馈送以及维护、运行的费用。

4. 电(光)缆网

由于DAB技术的强大能力,其信号能很好地适合于在电(光)缆网中传输。

最简单的方法是,将由空中接收的DAB信号直接变为电缆工作频率继续传送给用户。但这种方法的缺点(就在电缆中传输而言)是频谱利用不经济。原因是在电缆中传送,不像在空中无线传送要求那样高的差错保护度,可用的容量还可以进一步提高,例如,在电缆网中一个DAB频率块上可以传送9套CD质量的立体声节目,同时,还有更多的容量用于传送数据业务。

然而对于小型电缆分配网来说,将DAB信号变换成另外的标准,涉及到费用问题。

不论采用什么方案,在电缆网中可以与直接接收地面电台一样,使用相同的DAB接收机。

DAB 的传输模式 和工作频段

欧洲在开发DAB时,提出过下列要求:

- 1.可工作在30MHz~3GHz的频率范围;
- 2.在行车速度直到约200Km/h可移动接收;
- 3.能强有力对抗多径接收产生的衰落,特别在同步网中。

然而事实表明,由于物理条件

的限制,用一个唯一的传输模式去覆盖宽的频率范围,并满足其它要求,实际上是

不可能的。因此,DAB规定了工作于不同频段的四种传输模式,如表1所示。

DAB 的数据业务

DAB在传送具有CD质量的声音节目的同时,还可以附加传送数据业务。数据业务可以与声音广播节目有关的(称为节目伴随数据,简称PAD),也可以是独立的数据业务。

PAD含有关于正在广播的声音节目的重要信息,例如它可以是介绍节目概况的广播电文或关于节目主持人的信息等。此外,利用PAD还可以进行多种控制。

DAB的独立数据业务,可以为固定接收、移动接收和职业性领域的用户传送他们需要的各种信息。

数据广播将是一个五彩缤纷的世界。

DAB 未来可向多声道 环绕声扩展

人们早就认识到,双声道的立体声对于传送和表现声音信号来说,

表1 DAB 的传输模式和工作频段

	模式 I	模式 II	模式 III	IV
带宽	1.536MHz	1.536MHz	1.536MHz	1.536MHz
载波总数	1536	384	192	768
总的调制符号持续期	1264 μ s	312 μ s	156 μ s	623 μ s
保护间隔	246 μ s	62 μ s	31 μ s	123 μ s
发射台间最大距离(SFN)	-75Km	-20Km	-10Km	-40Km
频率范围(移动接收)	\leq 375MHz	\leq 1.5GHz	\leq 3GHz	\leq 750MHz
应用	仅地面	卫星和地面	卫星, 有可能地面	仅地面

绝不是最好的方案。DAB技术已经考虑了未来的发展,在实现多方面兼容的条件下,可以传送多声道环绕声。它也能向多语言扩展,以满足各种不同的需要。

DAB 是透明的 数据传输系统

DAB系统传送的数据流,不受内容的限制。也就是说,它既可以是声音广播节目,也可以是其它数据甚至电视节目。因此,DAB是一个“数据透明”的传输系统。DAB传输系统为移动工作的接收机传输宽带的数据流,特别适合于新的多媒体业务,目前还没有可以与其相比的其它系统。

DAB将以很快的速度向多媒体广播(DMB)发展,将成为未来特别是移动接收多媒体系统的一个重要部分。

这一讲主要给读者一个关于DAB技术的概况,从下一讲开始,我们将深入介绍和讨论DAB所涉及到的有关技术细节问题。

信源编码的任务

广播系统由模拟向数字化过渡,首先是实现演播室的数字化,即节目的记录、存储、交换都是以数字的形式进行。

但是,如果将演播室经过模/数转换的PCM(脉冲编码调制)信号直接进行传送,将会占用极大的信道宽度,频谱利用极不经济。例如,一套立体声节目,进行A/D转换,若取样频率为48KHz,每取样值按16比特线性量化,则数据率为

$$2 \times 48 \times 10^3 \times 16 = 2 \times 768 \text{Kb/s}$$

考虑到为了能够纠正传

输差错,人为加入一定的冗余,设信道编码率 $R=1/2$,则实际上在传输信道中要传送的数据率为

$$2 \times 768 \text{Kb/s} \times 2 = 2 \times 1536 \text{kb/s}$$

如果频带利用率按 $(2\text{b/s})/\text{Hz}$ 计,那么传送一套这样的立体声节目所需的射频带宽为

$$\frac{2 \times 1536 \text{Kb/s}}{(2\text{b/s})/\text{Hz}} = 1.536 \text{MHz}$$

这相当于现行约7.5个模拟调频广播电台所占用的实际带宽。可以看出,这在实际上是不能被人们接受的。

此外,与高的数据率直接相联系的是,通过线路(微波、电缆、光缆、卫星)传输时传输费用高,节目存储时需要大的存储容量。

因此,必须应用相应的技术,来降低数字信号源的数据率,也称为数据压缩或码率压缩,这就是源编码的任务。

在进行信源编码时,既希望最

第二讲

DAB 的信源编码(上)

大限度地降低码率,又希望尽可能不要对节目造成损伤,以便听不出数据压缩的节目与原版节目的差别。二者是相矛盾的,只能根据不同节目的特点和不同的需要折衷选择合适的压缩程度。

信源编码的理论基础

上面我们谈的是声音信号码率压缩的必要性,现在谈谈码率压缩的可能性。

码率压缩是通过降低声音信号中的冗余和丢掉声音信号中的不相关成分来实现的,这是源编码的基础。

如果信号部分可以通过另外的部分重建,或可以通过另外的形式表达,我们说信号中有冗余。在编码时丢掉信号中的冗余,那么在解码时信号可以完整地重建。

凡是不能被人耳感觉到的信号部分,称之为不相关部分,它们对声

音信号的确定或音色和发音位置确定没有作用,可以将其行丢掉而不必传送。

在进行数据率有效压缩时,充分利用了人耳听觉的生理声学和心理声学现象,主要表现在频谱掩蔽效应和时间掩蔽效应。

1. 频谱掩蔽效应

在安静的环境中,人耳刚刚能感觉到的最小声音强度,称为静听阈(门限),是随频率变化的,如图1所示。人耳对频率为3~4KHz附近的声音信号最敏感,对太低和太高的频率的声音感觉都很迟钝。

当有一个强度为70dB、频率为1KHz的纯音出现时,

静听阈曲线将变为同听阈曲线,如图1所示。0.5KHz以下和5KHz以上部分,由于与1KHz相距较远,听觉门限不受影响而保持不变,或者说在这些部分同听阈曲线与静听阈曲线重合;在0.5KHz~5KHz之间,形成新的听阈曲线。处于同听阈以下的声音事件(不管是声音信号还是噪声),由于被70dB强的1KHz信号所掩蔽都听不到,当然也就不必传送。通常我们称此时的1KHz纯音为掩蔽音,而处于同听阈曲线以下的声音事件称为被掩蔽音。

如果有多个频率成分的复杂信号存在,那么频谱的总的同听阈与频率的关系,取决于各掩蔽音的强度、频率和它们之间的距离。凡是处于总的同听阈以下的声音信号部分,由于掩蔽效应都不能被人耳听到,都不需要传送;而处于总的同听阈以上的信号部分,在传送时,可按照使量化噪声起码保持在同听阈以下

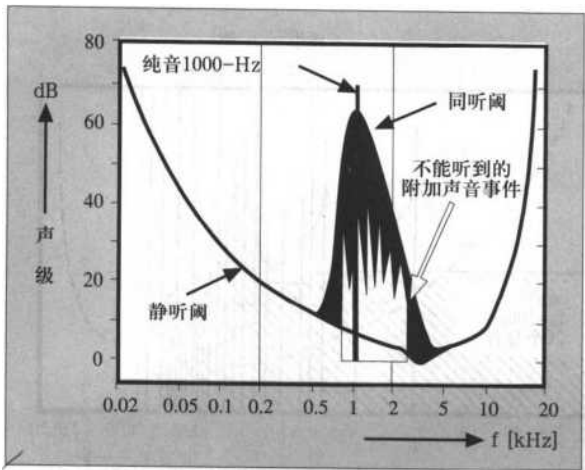


图1 频谱掩蔽特性(静听阈和同听阈)

的原则被量化。

以dB表示的信号强度与最小同听阈之差,称为信号掩蔽比(SMR);以dB表示的信号强度与量化噪声之差,称为信噪比(SNR);以dB表示的最小同听阈与量化噪声之差,称为掩蔽噪声比(MNR)。三者的关系是:

$$MNR(dB) = SNR(dB) - SMR(dB)$$

2. 时间掩蔽效应

在时域中,在听到强信号之前的短暂时间内,业已存在的弱音可以被掩蔽而听不到。这种现象称为前掩蔽;强音和弱音同时存在时,弱音被强音掩蔽,称为同期掩蔽;当强音消失后,经过较长的持续时间,才能重新听到弱音信号,这种现象称为后掩蔽。

图2示出典型的时间掩蔽过程。在前掩蔽期间,具有典型的听阈上升的趋势,且持续时间较短;在后掩蔽期间,具有同听阈下降的趋势,且持续时间较长。

在编码时,将时间上彼此相继的一些取样值归并成块,以降低码率,就是基于人耳的时间掩蔽特性而采取的策略。

子频带编码

所谓子频带编码,是指使用多相滤波器组,将宽带的声音信号,由时域变为频域,被分割为许多子频带。然后,对各子频带的音频取样值分别进行数据率降低的编码。这种数据压缩,对于各子频带来说是分别受控的,由每个子频带中的最

小同听阈来确定各子频带取样值的必要的量化。图3画出一个短时间段内典型声音信号的频谱及其总的同听阈。图中阴影部分表示各子频带中的最大量化噪声。

在每个子频带中,量化噪声的高度与同听阈值越接近,说明数据率压缩越充分,然而人耳感觉出码率压缩的节目与原版节目有差别的概率就越大;当各子频带中量化噪声的强度远低于各自的最小同听阈时,即留有大的“净空”,这时虽然没有充分进行数据压缩,但码率压缩的节目与原版节目的差别越小,越可以保持高的声音质量。因此,可以根据不同的节目材料(例如是语言节目还是高级音乐节目)和不同的需要(直接播出还是用于存储、压缩后期

制作、交换)有相应的量化要求,有不同的压缩后的数据率。

人耳对音频信号的低频率范围的频率分辨能力要高于高频率范围。因此,对子频带的分割理想情况是,各子频带的宽度不一致,随着频率的升高,子频带的带宽也增加。但是,这样做就会增加信号处理的复杂程度。因此,在子频带编码方法中,通常各子频带宽度是相等的。

此外,子频带数量越多,在保持相同的音质下,所需的数据率越低;当传输中出现比特差错时,影响越小,仅限制在很窄的子频带内,干扰作用大大减弱。而在宽带系统中,比特差错的影响会延伸至整个音频范围。

DAB 使用的源编码方法 — MUSICAM 及其技术特征

DAB 使用的源编码方法叫做掩蔽型自适应通用子频带集成编码与复用,简称 MUSICAM 编码方法。

这种编码方法属于子频带编码,它是将宽带的声音信号的频谱分割为宽度均为750Hz的32个子频带,利用人耳听觉的心理声学现象和音频信号的统计的内在联系,确定并清除语言和音乐信号中的冗余和不相关部分,来实现有效的数据压缩。

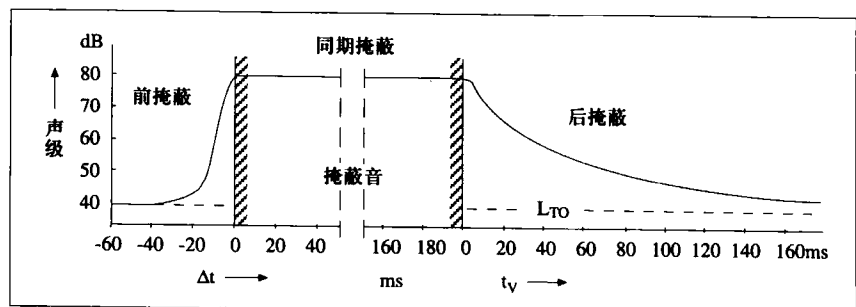


图2 时间掩蔽特性

ALY obat ready fanso & f... (handwritten notes)

MUSICAM 编码方法与 ISO 11172-3 Layer 2 是一致的, 即国际标准 MPEG1 的声音编码部分的第 2 层(第 1 层是 MUSICAM 的简化版本, 第 3 层是 MUSICAM 子带编码与 ASPEC 变换编码的结合)。

在 CD 中, 一套立体声节目所需的数据率为 1411.2 kb/s, 经过 MUSICAM 编码, 可以使数据率降为 2x96kb/s, 重放仍具有 CD 的质量, 即达到了“透明”。

在 DAB 系统中, 根据不同的需要, 安排了 32kb/s ~ 384kb/s 共 14 种不同的经过压缩的声音比特率, 还

可以有不同的声音模式(单声道、双声道、立体声、联合立体声)。

今天, 能够做到数据率有效压缩且仍具有较高的声音质量, 是微电子技术和计算机技术发展和进步带来的结果。

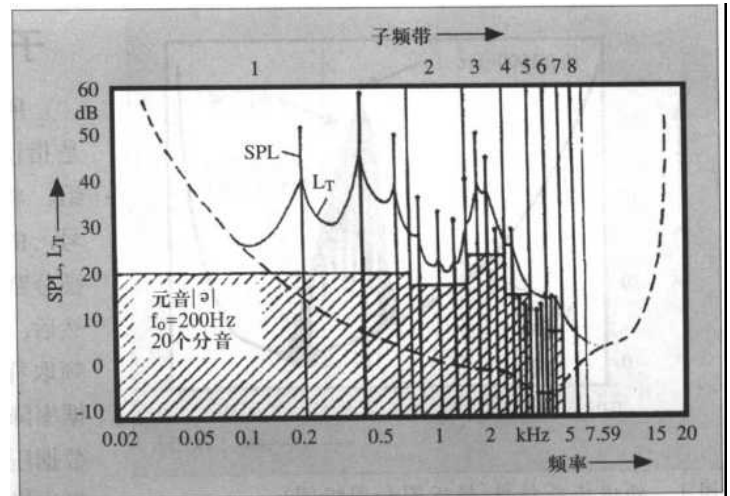


图 3 一个典型元音的幅度谱 SPL 和闻听阈 LT

MUSICAM 编码器

图 1 所示是 MUSICAM 编码器原理方块图。编码器的输入信号是每声道为 768Kb/s 的数字化声音信号 (PCM 信号), 其输出信号是经过压缩编码的数字音频信号, 称为 MUSICAM 信号, 其总数据率视不同需要可处于 32Kb/s ~ 384Kb/s。

需要指出的是, 不论工作在何种声音模式 (单声道、双声道、立体声、联合立体声), 总比特率都是指, 音频帧中占绝对多数的声音取样值本身以及后面将要提到的一些辅助信息和附加信息的总和。

下面分别说明编码器主要功能块的作用和工作原理。

1、滤波器组

MUSICAM 编码器的滤波器组由具有特殊相位关系和相等带宽 (750Hz) 的多相滤波器构成, 它的配置对声音信号的编码质量有决定性影响。它的作用是将宽带的时域中的 PCM 信号变为 32 个子频带, 每子频带为 750Hz 窄带频域中的数字信号。滤波器组中各个滤波器都是由一个基本滤波器演变来的。很显然, 最低频率的子频带滤波器为低通滤波器, 其它为带通滤波器。

如果第 i ($i=0, 1, 2, \dots, 31$) 个滤波器的脉冲响应为 $h_i(m)$, 那么第 i 个子频带输出的第 n 个样值可表述为:

$$Y(i, n) = \sum_{m=0}^{511} h_i(m) \cdot X(32n-m)$$

式中 $X(32n-m)$ 表示滤波器输入离散信号, $n=0, 1, 2, \dots, 511$ 。

第三讲

DAB 的信源编码(中)

2、快速傅利叶变换(FFT)

FFT 是完成离散傅利叶变换的快速算法。

为了准确地模拟在低频率范围内听觉分析所需的频谱准确度, 输入的 PCM 信号同时还送入快速傅利叶变换器。这样, 既可以通过多相滤波器组使信号具有高的时间分辨率, 又可以使信号通过 FFT 具有高的频率分辨率。足够高的频率分辨率可以实现尽可能低的数据率, 而足够

高的时间分辨率可以确保在短暂冲击声音信号情况下, 编码的声音信号也有足够高的质量。

FFT 的变换长度 $N=1024$ 。设输入信号为 $X(i)$, 经与海宁窗函数 $W(i)$ 相乘后, 进行 FFT 运算, 得到频域里的信号 $X(k)$:

$$W(i) = \frac{8}{3} \times 0.5 \times (1 - \cos \frac{2\pi i}{N})$$

式中 $0 \leq i \leq N-1$,

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} W(i) \cdot X(i) \cdot e^{-j2\pi ki/N}$$

式中 $0 \leq k \leq N/2$ 。

FFT 的输出值送入心理声学模型进一步处理。

在取样频率 $f_s=48\text{KHz}$ 时, 通过 FFT 得到的频率分辨率为 $f_s/1024=46.875\text{Hz}$ 。

3、心理声学模型

心理声学模型是模拟人耳听觉掩蔽特性的一个数学模型, 它根据 FFT 的输出值, 计算信号掩蔽比 (SMR)。计算步骤是:

每子频带最大声级的确定; 静听阈的确定; 信号中的音调成分 (类似正弦波) 和非音调成分 (类似噪声) 的确定; 从掩蔽音中抽取一部分, 得

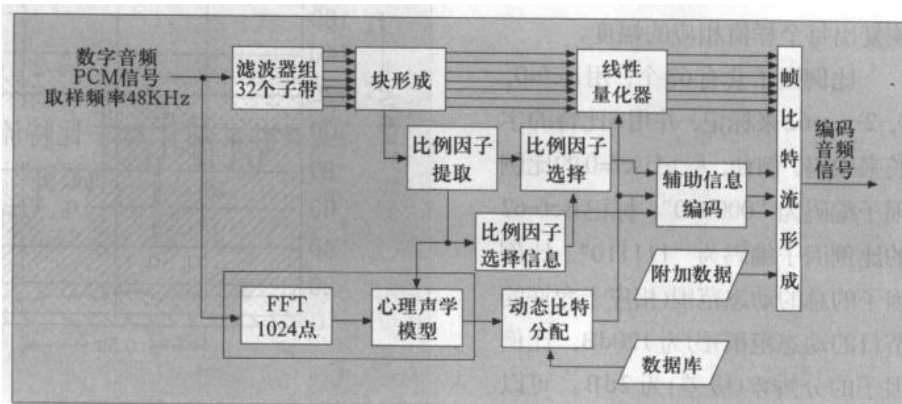


图 1 MUSICAM 编码器原理方框图

表1 部分比例因子

标记 iscf	比例因子	标记	比例因子
0	2.000000000000000	56	0.00000480621738
1	1.58740105196820	57	0.00000381469727
2	1.25992104989487	58	0.00000302772723
3	1.000000000000000	59	0.00000240310869
4	0.79370052598410	60	0.00000190734863
5	0.62996052494744	61	0.00000151386361
6	0.500000000000000	62	0.00000120155435

到相关掩蔽音；计算相关掩蔽音各自的同听阈；由各同听阈确定总听阈，由此确定总的掩蔽阈；各子频带最小掩蔽阈的确定；计算各子频带被称为“块”的每12个连续的抽样值的最大声级与最小总听阈二者以dB表示的差值，即得到SMR。

4、比例因子(SCF)的确定及其编码

比例因子是一个无量纲的系数。

鉴于人耳听觉的时间掩蔽特性，将每个子频带中相连续的12个抽样值归并成一个块，在抽样频率为48KHz时，这个块相当于 $\frac{12 \times 32}{48} = 8\text{ms}$ ，在这样的块上计算每子频带的比例因子，可得到比例因子低的数据率和整个块中存在的量化噪声的不可听性之间的最佳折中。

滤波器组的输出值在量化之前首先被归一化，通过同时传送相应的比例因子，在解码器就可以正确恢复出每个样值相应的幅度。

比例因子共有63个，用 iscf=0, 1, 2……62 来标记，并用6比特的字长来编码。例如，标记 iscf=0 的比例因子编码为“000000”，标记 iscf=62 的比例因子编码为“111110”。比例因子的总的动态范围(相应于允许的节目的动态范围)约为120dB，比例因子的分辨率(级差)为2dB。可以通过下式计算出任何一个比例因子

标记 iscf 所对应的数值：

$$2 \times 2^{-\text{iscf}/3}$$

只有被分配到某一子频带的比特数不为零时，该子频带的比例因子才被

传送。

5、比例因子选择信息(SCFSI)及其编码

MUSICAM 的音频帧长(24ms)相应于36个相连续的子频带抽样值，因此，每个子频带每帧原则上应传送3个比例因子。但是，为了降低用于传送比例因子的数据率，采取了一种附加的编码措施。

统计试验表明，不仅在同一个8ms的时间块内相邻子频带的比例因子有很大的依赖关系，而且在同一个子频带中时间上彼此相连续的8ms时间块内的比例因子也有很大的依赖关系。

第一种依赖关系的特征是，在较高频率时频谱能量是典型下降。

因此，比例因子从低频子频带到高频子频带出现连续下降；第二种是基于时间性的依赖关系，在一个子频带中一帧时间内彼此相连续的块的比例因子差别很小，出现大于2dB的差别的概率小于10%。

比例因子的附加编码措施，一方面是基于上述的统计联系，另一方面是基于人耳听觉的时间掩蔽特性：一帧24ms之内的三个相连续的比例因子总是共同地被考虑。如果它们分别用 iscf₁、iscf₂ 和 iscf₃ 表示，根据 dscf₁=iscf₁-iscf₂ 和 dscf₂=iscf₂-iscf₃，将差值分为5个等级，并根据它们的不同组合来确定传送三个、两个或一个比例因子。同时，每子频带每帧还需要传送所谓“描述每子频带传送的比例因子的数量和位置的信息”，这种信息称为比例因子选择信息(SCFSI)。

在静态信号时，每子频带每帧多数情况下只需传送一个比例因子。但在短暂的冲击信号时，多数情况下三个比例因子都要传送。采用这种附加编码措施后，平均而言用于传送比例因子所需的数据率可以由

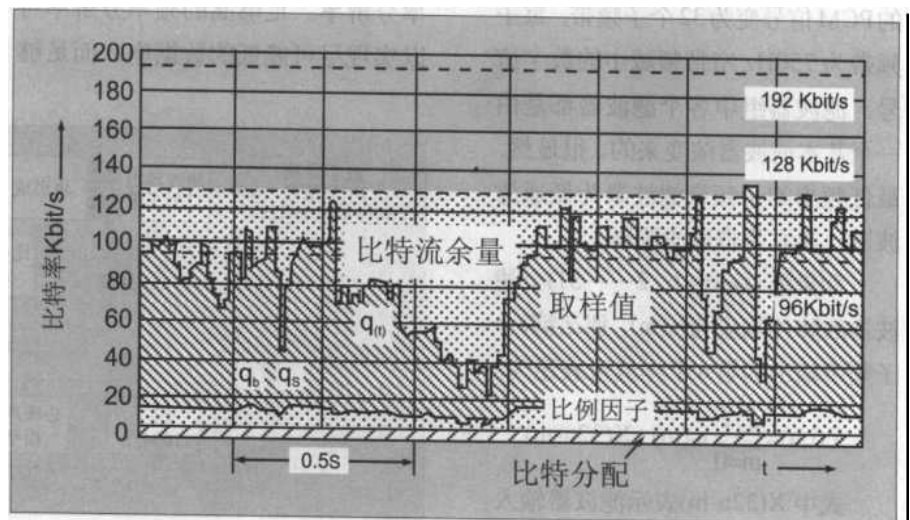


图2 比特率分布实例

22.5kb/s 降低至 7.5kb/s。

比例因子选择信息仅2比特,可编码为“00”、“01”、“10”和“11”,分别代表传送三个、仅传送第1个和第3个、仅传送第1个、仅传送第1个和第2个比例因子(在后文图3中可形象看出)。

当然,不需要传送比例因子的子频带,也不需要传送比例因子选择信息。

6、动态比特分配信息及其编码

将比特分配给每个子频带的基本原则是,使音频帧期间的总的噪声掩蔽比达到最小。提供使用的数据率,扣除用于传送比例因子、比例因子选择信息、动态比特分配(BAL)、数据帧头与必要的差错检测和附加数据后,用作传送音频取样值。

为了同时满足比特率和掩蔽要求,比特分配器应考虑来自滤波器组的输出样值和来自心理声学模型的信号掩蔽比(SMR)。

所谓“动态比特分配”,就是根据每个新的同听阈的计算来变化子频带信号的分辨率(即量化的粗细),使音频数据以相应的比特分配进行量化,由于音频信号是不断变化的,因此得到一个动态比特率。图2所示是在4秒的一段时间内比特率的分布实例。

每个子频带只允许有限的量化数量。对于低频率子频带(0~2号子频带)来说,比特分配(BAL)信息为4比特,因此,这4比特不同的编码可用来表明3、7、15、31、63、127、255、511、1023、2047、4095、8191、16383、32767、65535等15种不同的音频取样值量化级;对于3~10号子频带而言,比特分配信息虽也为4比

特,但它用来说明3、5、7、9、15、31、63、127、255、511、1023、2047、4095、8191、65535等15种不同的音频取样值量化级;对于第11~22号中音频子频带而言,比特分配信息仅3比特,用来表明3、5、7、9、15、31、65535等7种不同的音频取样值

量化级;对于高音子频带(23~26号)而言,比特分配信息仅2比特,用来表明3、5、65535等三种不同的音频取样值量化级;27~31号子频带没有比特分配信息,实际上不使用。

量化的粗细不同,有不同的量化噪声,即有不同的信噪比。(见表2)

需要说明的是,比特分配是一个迭代过程,从初始状态(分配给声音取样值的比特数为零、比例因子的比特数为零,比例因子选择信息的比特数为零)开始,每次迭代包括下列步骤:确定所有子频带的掩蔽噪声比(MNR)的最小值;提高有最小MNR的子频带的量化精度;计算

表2 信噪比与量化级

量化级	信噪比 (dB)	量化级	信噪比 (dB)
0	0.00	255	49.89
3	7.00	511	55.93
5	11.00	1023	61.96
7	16.00	2047	67.98
9	20.84	4095	74.01
15	25.28	8191	80.03
31	31.59	16383	86.05
63	37.75	32767	92.01
127	43.84	65535	98.01

该子频带的MNR;根据所需的附加比特数不断修改子频带取样值比特数,剩余比特数adb用下式表示:

$$adb=cb-(bbal+bsel+bscf+bspl+banc)$$

式中各项代表的意义是:

cb: 可用比特数;

bbal: 比特分配所需的比特数;

bsel: 比例因子选择信息比特数;

bscf: 比例因子比特数;

bspl: 子频带样值比特数;

banc: 附加数据业务所需的比特数。

只要adb不小于一次循环内bspl、bsel和bscf的任何可能的增加,迭代过程就一直重复进行下去。

动态比特分配信息只需每24ms传输一次,需要的比特率仅为3.4kb/s。

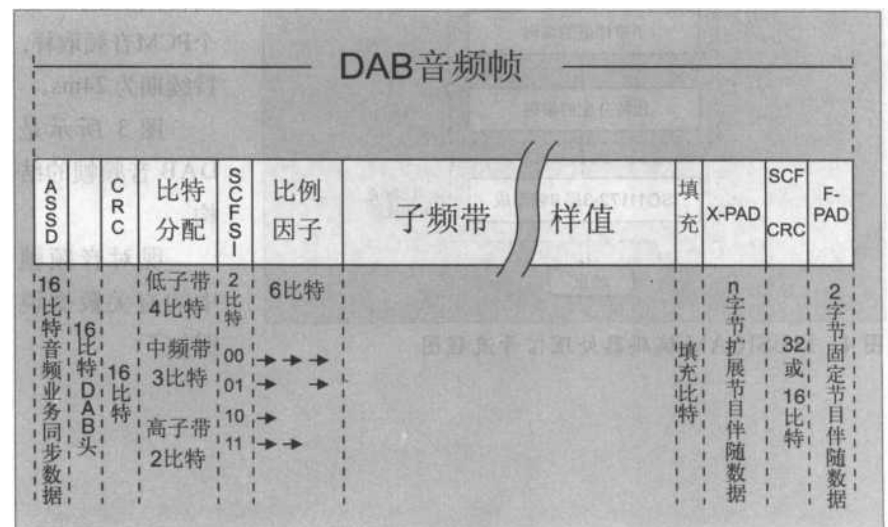


图3 DAB 音频帧的结构

7、子频带取样值的量化和编码

子频带取样值的量化和编码步骤如下:

每子频带12个连续的样值都除以比例因子进行归一化,得到用X表示的值,按以下步骤进行量化:

- (1) 计算 $A \cdot X + B$ (A和B为量化系数,见表3);
- (2) 取N个最高有效位(N为分配给各子频带的比特数);
- (3) 反转N个最高有效位(码位倒置)。

表3 量化系数

量化级	A	B	量化级	A	B
3	0.750000000	-0.250000000	1023	0.999023438	-0.000976563
5	0.625000000	-0.375000000	2047	0.999511719	-0.000488281
7	0.875000000	-0.125000000	4095	0.999755859	-0.000244141
9	0.562500000	-0.043750000	8191	0.999877930	-0.000122070
15	0.937500000	-0.062500000	16383	0.999938965	-0.000061035
31	0.968750000	-0.031250000	32767	0.999969482	-0.000030518
63	0.984375000	-0.015625000	65535	0.999984741	-0.000015259
127	0.992187500	-0.007812500			
255	0.996093750	-0.003906250			
511	0.998046875	-0.001953125			

8、音频比特流的格式化

MUSICAM 编码器中的帧形成

器将比特分配、比例因子选择信息、比例因子、量化的子频带样值、帧头信息、用于差错检测的码字(CRC)、与节目有关的附加数据(PAD)等组合在一起,格式化为ISO11172-3层II的比特流,再分为音频帧,每个音频帧对于48KHz取样频率而言,相当于1152个PCM音频取样,持续期为24ms。

图3所示是DAB音频帧的结构。

现对音频帧中的有关数据说明如下:

(1) 音频业务同步数据(ASSD) 可用于需要保护的同步DAB音频帧的数据,共16比特。

(2) DAB 帧头 包含与DAB音频解码器有关的状态信息,共16比特。

(3) 循环冗余校验(CRC) 16比特的奇偶校验字,用于对DAB帧头、比特分配和比例因子选择信息的传输差错检测。

(4) 音频数据 包括比特分配信息、比例因子、比例因子选择信息、子频带样值编码信息。

图3中的其它数据等今后涉及到时再进一步解释。

9、编码器处理信号流程

以上我们从电路的联系方面,介绍了MUSICAM编码器各主要功能块的作用原理。为了使读者有一个系统概念,给出如图4所示的MUSICAM编码器处理信号的流程图。

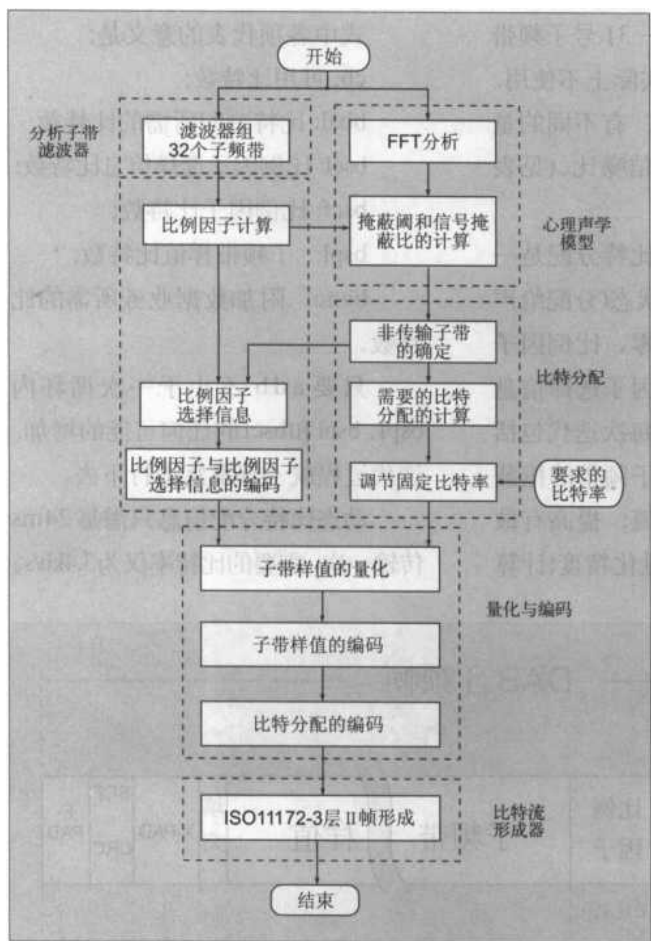


图4 MUSICAM 编码器处理信号流程图