

带内同频道数字音频广播关键技术进展¹

于云华*** 刘扬* 石寅*

*(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

** (石油大学信息与控制工程学院 东营 257061)

摘要 基于编码正交频分复用的数字音频广播 (DAB) 具有鲁棒性高和激光唱盘 (CD) 音质等优良性能。带内同频道 (IBOC) 制式的 DAB 能够在已有的模拟广播频道内同播模拟和数字两种信号, 完全兼容现有的模拟接收机, 以较低成本实现向全数字化 DAB 的平滑过渡。作者论述了 FM IBOC DAB 的频谱分析, 综述了混合模式 FM IBOC DAB 的发射 (接收) 机的基本结构和感知音频编码、前向纠错编码、OFDM、第一邻频道干扰消除、时间延迟分集和音频混合等关键技术。提出了发展我国的 IBOC DAB 的一些建议。

关键词 数字音频广播, 带内同频道, 同播

中图分类号 TN930

1 引言

正如数字技术应用于众多的其它传统领域后使得系统性能大幅度提升一样, 数字处理技术应用于音频广播, 带来了高稳定的接收效果和高保真的音质; 同时又发展出文字信息、静止画面、股票、电视节目介绍等诸多图文并茂的广播数据业务和视频图文信息。数字音频广播 (Digital Audio Broadcasting, DAB)^[1-4] 是一种全数字方式多载波无线传输系统。DAB 采用了先进的数字处理新技术实现无线信道信号传输: (1) 与时间有关的衰落, 采用时间交织技术; (2) 与频率有关的衰落, 采用多载波和频率交织技术; (3) 对于多径衰落和多谱勒频移, 采用编码正交频分复用 (COFDM) 技术和插入保护间隔技术; (4) 对于传输差错, 采用了在数据流里人为加进差错保护的冗余的可删除型卷积编码等前向纠错编码 (FEC) 技术; (5) 超出单个发射台的覆盖范围, 采用同步网 (SFN) 技术等^[4-28]。与传统的模拟广播相比, DAB 具有极强的多径衰落抑制能力、先进的纠错性能、类激光唱盘 (CD) 音质、系统容量大和覆盖范围广等突出的优点。

DAB 孕育着新的巨大的市场商机。近年来欧洲及加拿大等一些国家已经在一定范围内试播 DAB, 甚至进入商业化试运营。然而, 由于广播仅占用有限的频率资源, DAB 研制中对频率资源的不同占用方式导致了 DAB 不同的制式: 以欧洲 Eureka-147 DAB^[4] 为代表的专用频率制式和以美国 IBOC (In-Band On-Channel) DAB^[5-8] 为代表的带内同频道 (IBOC) 制式。

作为典型的 DAB 系统, Eureka-147 DAB 源于 20 世纪 80 年代末, 到 90 年代初已发展相当成熟。经欧洲电信标准协会 (ETSI) 标准化后, 于 1995 年秋在英国和瑞典正式投入使用。虽然专用频率信道的方式已在一些国家中试用, 但 Eureka-147 DAB 接收机的价格一直居高不下, 而且与现有 AM, FM 模拟广播不兼容, 使 Eureka-147 DAB 的推广和普及十分艰难。

而具有鲜明特色的美国的 IBOC DAB 系统是在现有模拟广播发射系统的基础上, 增加少量设备和投资就可以实现数字音频广播。IBOC DAB 与当前正在使用的模拟广播电台使用相同载波频率, 依靠频率分隔和调制方式的不同, 同播模拟和数字两种节目。IBOC DAB 的显著优点是: 不仅兼容了原有的模拟广播频率, 不需重新规划和分配新的频道; 而且发射塔和天线等都可以得到重新利用。2002 年 10 月 10 日, 美国联邦通信委员会 (FCC) 正式批准了在 FM

¹ 2003-01-19 收到, 2003-04-11 改回
国家自然科学基金专项基金资助项目 (No.90207008)

频段和 AM(日间) 频段采用 IBOC 技术进行数字声音广播的方案^[29]。IBOC DAB 确保了与原有模拟广播接收机的兼容性, 成为美国 DAB 发展的主流。作为技术最发达的美国各大公司(例如全美最大的广播商 iBiquity Digital^[29], TI 等著名公司)均在全力研究和开发 IBOC 制式 DAB 中不同于欧洲 DAB 的关键技术及其相关芯片。

本文主要介绍 FM IBOC DAB 的结构原理、关键技术和研究进展。

2 FM IBOC DAB 的频谱结构分析

FM 广播所使用的频段是实现 DAB 的理想频段, 如果频率太低, 会产生超视距传输问题; 若频率太高, 则会增加由于移动接收引起的多普勒频移。FM IBOC DAB 系统将数字音频信号放在与模拟信号相同的频带内或相邻的频带内, 实现同一 FM 广播节目的模拟信号和数字信号混合播模式 (Hybrid mode), 而且还可以在将来升级为性能增强的全数字广播模式 (All-Digital mode)。

图 1 所示是某一 FM Hybrid IBOC 信号的功率谱。其中, 虚线表示的三角形是模拟 FM 信号的频谱, FM 两边的实线矩形表示 DAB 第一数字边频。FM 频道间隔为 200kHz, 从中心频率 (0Hz) 算起, 该信号的带宽为 $\pm 200\text{kHz}$ 。FM IBOC DAB 主要有 Hybrid, Extended Hybrid 和 All-Digital 3 种工作模式^[5,30]。图 2 是 All-Digital 模式下 DAB 的功率谱密度, 中间的 FM 频谱由 DAB 第二数字边频替换。

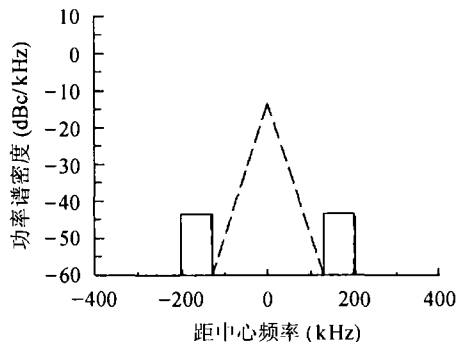


图 1 FM IBOC Hybrid 模式中 FM 和 DAB 功率谱

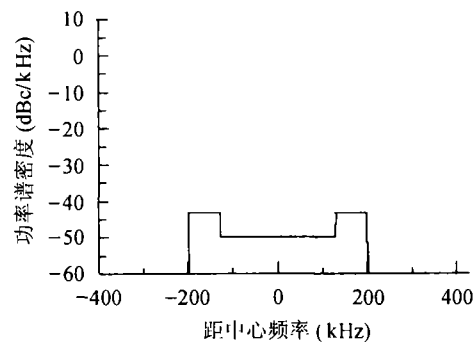


图 2 FM IBOC All-Digital 模式中 DAB 功率谱

以平均斜率为 0.36dB/kHz 的 FM 三角形功率谱密度为例^[5], FM 的总功率 P_{total} 为

$$P_{\text{total}} = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\text{peak}} 10^{-0.36|f|/10} df = 24.1275 P_{\text{peak}}$$

则有

$$10 \lg(P_{\text{peak}}) = 10 \lg(P_{\text{total}}) - 10 \lg(24.1275) = 10 \lg(P_{\text{total}}) - 13.8 \text{ (dB)}$$

这表明, FM 功率谱密度峰值位置低于总载波功率参考值 (0dB)13.8dB 处, 如图 1 中所示的 -13.8dB 的位置。

FM 两侧的 Hybrid IBOC DAB 功率低于 FM 总功率 25dB。假定 DAB 有 ± 95 个副载波, 有效奈奎斯特带宽为 726.75Hz。则 1kHz 带宽中的 DAB 功率谱密度为

$$10 \lg(\text{PSD}_{\text{DAB}}) = 10 \lg \left[\frac{10^{-25/10}}{95 \times 0.72675} \right] = -43.4 \text{ (dB/kHz)}$$

3 FM Hybrid IBOC DAB 发射机基本结构和关键技术

图 3 是 FM IBOC Hybrid DAB 发射机功能框图。音频源输出的模拟信号在演播室经过脉冲编码调制 (PCM), 得到取样的离散化音频信号, 一方面经过时间分集延迟^[5](Time Diversity Delay, TDD) 后, 采用已有的模拟 FM 激励器 (Analog FM exciter) 处理和 FM 高功率放大 (FM HPA), 以备合成; 另一方面经过音频编码器压缩编码, 采用前向纠错编码^[9-11](FEC) 与交织^[12](Interleaving), OFDM^[6,13-15] 调制、上变频 (Up-converter) 和 DAB 功率放大 (DAB HPA) 等处理。最后由合成器^[19](Combiner) 将两路信号合成, 通过广播天线发射。

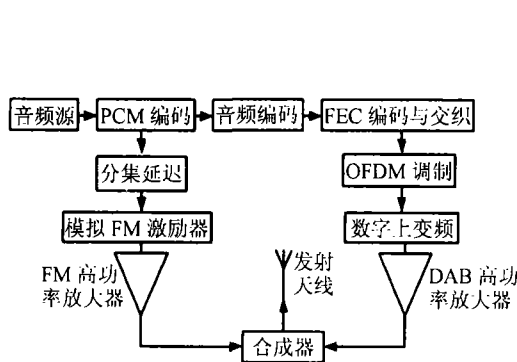


图 3 FM IBOC Hybrid DAB 发射机功能框图

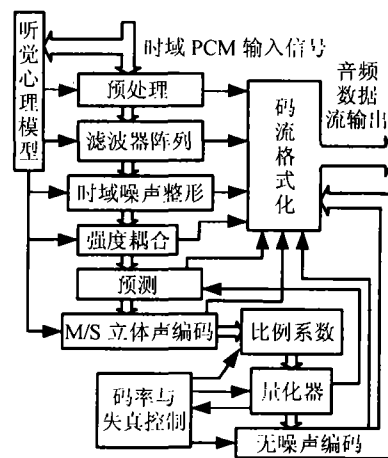


图 4 MPEG 2 AAC 编码器原理框图

3.1 高压缩比、高性能的音频编码技术

理论研究表明, 信息的冗余度在时域和频域都存在, 利用人耳听觉的心理声学特性, 即频谱掩蔽特性和时间掩蔽特性, 编码时降低信号的冗余度, 在解码时可以重建。欧洲 Eureka-147 DAB 采用了掩蔽型自适应通用子带综合编码和复用^[4](MUSICAM) 方法, 即 MPEG 1 声音标准的 Layer II。而 FM IBOC DAB 采用了 iBiquity Digital 发明的更为先进的感知音频编码 (PACTM) 专利技术^[17-19]。PACTM 在综合了 MPEG 2 先进音频编码 (即 MPEG 2 AAC) 等许多现代音频编码算法的基础上, 对平稳信号, 采用包含高分辨率 MDCT 滤波器的增强型滤波器阵列技术; 对非平稳信号, 采用小波变换技术。PACTM 提供 20Hz 到 20kHz 的音频信号带宽, 采用高达 20 的压缩比对数据率为 15Mbps 的 CD 进行编码, 使得音频音质在各种比特率下得到显著提高, 可与 CD 音质相比。

图 4 所示是基于 MPEG 2 AAC 方法的编码器原理框图。滤波器阵列采用改进离散余弦变换 (MDCT) 和时域混叠抵消 (TDAC) 技术将时域 PCM 输入信号分解成亚取样频谱分量, 变为系统内部的频域信号。然后采用时域噪声整形 (TNS) 技术对频谱进行同址滤波, 使编码器对量化噪声的细微时域结构进行控制以充分利用掩蔽效应。高数据率的多声道信号可以采用强度耦合进行联合立体声编码, 低数据率时 MPEG 2 AAC 编码器采用中间信息 M 和旁边信息 S 代替 L 和 R 的方法进行 M/S 立体声编码。在长变换块中采用预测器来预测连续各帧音频数据频谱分量的自相关性, 用预测残差代替目标频谱系数输入到量化器中, 可以进一步降低静态信号的冗余, 显著提高编码效率。量化器采用非线性量化和内环、外环两层迭代循环来实现最佳量化。量化后的频谱值、差分比例系数和方向信息等使用霍夫曼 (Huffman) 编码。

3.2 超强纠错的前向纠错编码与交织技术

在 FM IBOC DAB 中采用了码率兼容删除型卷积码 (RCPC)^[9,20,21]。RCPC 充分利用了信道干扰的非均匀特性,使得不同重要性的数据相应于不同的差错保护类型,使用不同的删除矢量,实现了不等差错保护。图 5 是一个基于存储深度为 6、约束长度为 7 和 $2^6 = 64$ 状态的 RCPC 编码器原理图。

在给定的逻辑帧期间,若送入卷积编码器 I 个比特的码矢量 $(a_i)_{i=0}^{I-1}$,则编码器产生码字 $(X_{0,i}, X_{1,i}, X_{2,i}, X_{3,i})_{i=0}^{I+5}$,其中

$$\begin{aligned} X_{0,i} &= a_i \oplus a_{i-2} \oplus a_{i-3} \oplus a_{i-5} \oplus a_{i-6}, & X_{1,i} &= a_i \oplus a_{i-1} \oplus a_{i-2} \oplus a_{i-3} \oplus a_{i-6} \\ X_{2,i} &= a_i \oplus a_{i-1} \oplus a_{i-4} \oplus a_{i-6}, & X_{3,i} &= a_i \oplus a_{i-2} \oplus a_{i-3} \oplus a_{i-5} \oplus a_{i-6} \end{aligned}$$

式中 $i = 0, 1, 2, \dots, I + 5$ 。当 $i = I, I + 1, \dots, I + 5$ 时, $a_i = 0$ 。

$(X_{0,i}, X_{1,i}, X_{2,i}, X_{3,i})_{i=0}^{I+5}$ 每个码字被排列为串行母码字 $U = (u_0, u_1, \dots, u_{4I+23})$, 其中 $u_i = X_{\text{int}(i/4), \text{mod}(i/4)}$ 。

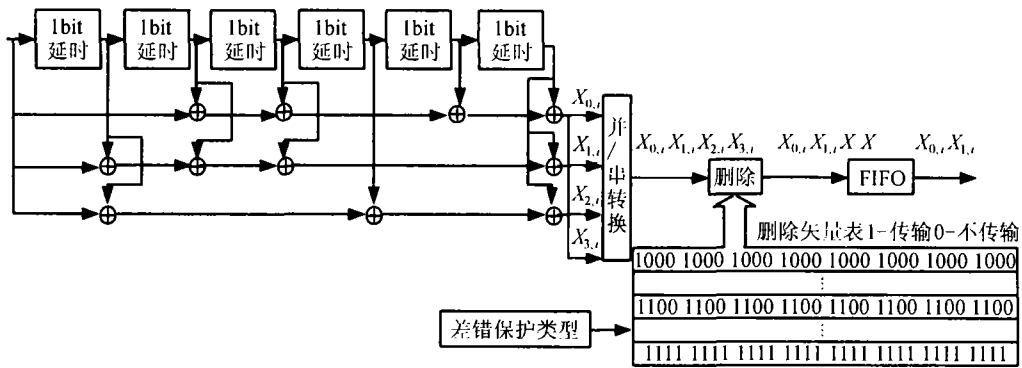


图 5 基于存储深度为 6、约束长度为 7 和 64 状态的 RCPC 编码器原理图

将串行母码 U 的前 $4I$ bit 分割为 128bit 的连续的块,每个块再分为 4 个连续的子块,每个子块 32bit。同一块的所有子块采用相同的由删除标志 $PI(0 \leq PI \leq 24)$,对应于删除矢量 VPI 确定的规则进行删除, $VPI = (V_{PI,0}, V_{PI,1}, \dots, V_{PI,31})$ 。串行母码 U 的后 24bit 采用删除矢量 $VT(1100\ 1100\ 1100\ 1100\ 1100\ 1100)$ 进行删除,即可得到 12bit 的尾部比特。编码率 $R = 8/(8 + PI)$,随着不同的删除矢量(对应不同的 PI 值)而变化,实现了码率兼容删除型卷积编码。

有人对互补删除卷积码^[22](CPCC)的构造方法进行了研究和仿真。另外,通过对各种编码方法的比较可知,无论调制方式(单载波或多载波)与信道(AWGN 或多径)特性如何, Turbo 编码^[2,24]将提供接近最佳的特性。

移动无线电信道的传输函数在相对宽的时域和频域范围内具有好的传输质量;而在相对窄的范围具有大的传输衰减和很大的群时延失真,时常出现信号中断。为了使被解码的比特序列中的差错分布均匀,提高信道编码的纠错能力,采取了时间交织和频率交织技术。值得注意的是, DAB 中调谐时间与交织深度不可兼得,深度交织增强信号的鲁棒性,但使调谐时间延长;短交织可以快速调谐,却会使音频信号中断。

3.3 先进的 COFDM 调制技术

在要求传输的总数据率 (M) 和射频总带宽 (B) 都相同的情况下,若采用多载波(假设为 K 个)在 t_1 的时间里同时传输 K 个符号,则每个载波的带宽为 B/K ,数据率为 M/K ,符号持

续期 $T_s = K \cdot T'_s = K \cdot [t_1/K] = t_1$ ；而基于模拟单载波窄带传输方法的模拟制式广播的符号持续期 $T'_s = [t_1/K]$ 。相比之下，多载波的持续期加长，可以有效地减弱多径传播时反射波导致的符号间干扰 (ISI)。DAB 选择的 COFDM 就是基于最小间隔正交副载波群的多载波调制技术，图 6 是 COFDM 调制器的原理图。其中 Z_k 是经差分编码及数字调制的复数元， f_k 是副载波频率， $k = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm K/2$ 。

COFDM 信号 $S(t)$ 是连续信号，时域表达式为 $S(t) = \frac{1}{K_T} \sum_{k=0}^{K_T-1} A_k(t) \cdot e^{j[\omega_k t + \Phi_k(t)]}$ 。

若采用取样频率 $1/T$ 对 $S(t)$ 取样，并考虑到每个副载波所携带的信号分量在一个符号周期里 $A_k(t)$ 可取定值 A_k ， $\Phi_k(t)$ 可取定值 Φ_k ，则有： $S(nT) = \frac{1}{K_T} \sum_{k=0}^{K_T-1} A_k \cdot e^{j[(\omega_0+k\Delta\omega)nT+\Phi_k]}$ 。令符号间隔 $T_s = K_T T$ ，且多个副载波间彼此满足正交性： $\Delta f = 1/T$ ， $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ 。则可得

$$\begin{aligned} S(nT) &= \frac{1}{K_T} \sum_{k=0}^{K_T-1} A_k(t) \cdot e^{j[(\omega_0+k\Delta\omega)nT+\Phi_k]} = \frac{1}{K_T} \sum_{k=0}^{K_T-1} A_k(t) \cdot e^{j\Phi_k} \cdot e^{j[(\omega_0+k\Delta\omega)nT]} \\ &= \frac{1}{K_T} \sum_{k=0}^{K_T-1} A_k(t) \cdot e^{j\Phi_k} \cdot e^{j[(\omega_0+2\pi nk)/K_T]} \end{aligned}$$

令 $\omega_0 = 0$ (不影响数学分析)，则可简化为 $S(nT) = \frac{1}{K_T} \sum_{k=0}^{K_T-1} A_k(t) \cdot e^{j\Phi_k} \cdot e^{j2\pi nk/K_T}$ ，该式是信号 $A_k \cdot e^{j\Phi_k}$ 的离散傅里叶逆变换 (IDFT)，采用高效的快速傅里叶逆变换 (IFFT) 算法便可产生。

图 7 是利用 IFFT 构成的 OFDM 调制器方框图。由 IFFT 产生的离散数字信号 $U(n) = S(nT)$ ，需要加入持续期为 T_g 的保护间隔，才能完全消除符号间干扰 (ISI)；然后经过 D/A 转换为连续形式 $U(t)$ ，再经过频谱搬迁，变为宽带的射频信号 $S(t)$ ，包括许多个 DQPSK 调制的副载波。

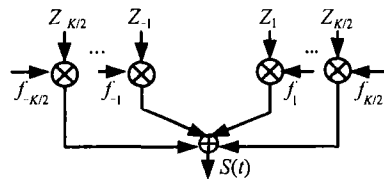


图 6 COFDM 调制器原理图

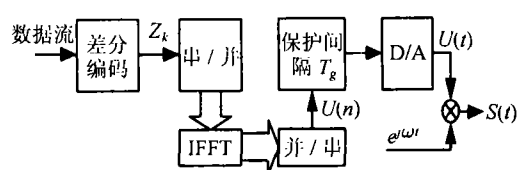


图 7 IFFT 构成的 OFDM 调制器方框图

OFDM 系统参数 (如副载波数目、载波频率间隔、保护间隔和符号持续期等) 的选择是非常关键的。表 1 和表 2 分别归纳了美国 iBiquity Digital 公司的 iDABTM 系统中 Extended Hybrid(包括 Hybrid) 模式和 All-Digital 模式下的频率分配、OFDM 副载波和功率谱密度等之间的关系^[29,30]，其中的载波间隔 $\Delta f=363.373\text{Hz}$ ，副载波计数从 0 到 ± 546 。文献 [30] 较详细地讨论了 FM IBOC DAB 的各种工作模式、逻辑信道和频率分配等问题。

表 1 FM IBOC DAB Extended Hybrid(包括 Hybrid) 模式频谱和副载波分配表

数字边频	频率分区 数目	副载波范围	副载波频率范围 (Hz) (距中心频率)	频带宽度	功率谱密度 (dBc/ 副载波)
第一上主边频	10	356 到 546	129361 到 198402	69041	-45.8
第一下主边频	10	-356 到 -546	-129361 到 -198402	69041	-45.8
第一上扩展边频	4	280 到 355	101744 到 128997	27253	-45.8
第一下扩展边频	4	-280 到 -355	-101744 到 -128997	27253	-45.8

表 2 FM IBOC DAB All-Digital 模式频谱和副载波分配表

数字边频	频率分区数目	副载波范围	副载波频率范围 (Hz) (距中心频率)	频带宽度	功率谱密度 (dBc/副载波)
第一上主边频	10	356 到 546	129361 到 198402	69041	-35.8
第一下主边频	10	-356 到 -546	-129361 到 -198402	69041	-35.8
第一上扩展边频	4	280 到 355	101744 到 128997	27253	-35.8
第一下扩展边频	4	-280 到 -355	-101744 到 -128997	27253	-35.8
第二上主边频	10	0 到 190	0 到 69041	69041	-40.8, -45.8, -50.8, -55.8
第二下主边频	10	-1 到 -190	-363 到 -69041	68678	-40.8, -45.8, -50.8, -55.8
第二上扩展边频	4	191 到 266	69404 到 96657	27253	-40.8, -45.8, -50.8, -55.8
第二下扩展边频	4	-191 到 -266	-69404 到 -96657	27253	-40.8, -45.8, -50.8, -55.8

4 FM Hybrid IBOC DAB 接收机基本结构和关键技术

FM IBOC DAB 接收机的处理过程基本上与发射机的处理相逆。图 8 是 FM IBOC Hybrid DAB 接收机原理功能框图。高频载波信号经射频 (RF) 前端和调谐电路处理后, 得到中频 (IF) 信号; 然后经过中频带通滤波 (IF BPF) 和 A/D 转换; 转换后的信号经过直接数字化下变频 (Digital Down Conversion, DDC) 处理, 形成了混合同步正交基频信号。混合基频信号经过 FM 分离模块处理后, 形成模拟 FM 分量和数字 DAB 分量, 分别进行与发射机相对应的 OFDM 解调 (采用结合 CSI 估计自适应调节的 Viterbi 信道解码^[25])、FEC 解码和解交织和音频解码等处理^[26]。为避免重复, 下面主要介绍 FM IBOC DAB 中独具特色的第一邻频道干扰消除 (First-Adjacent Canceling, FAC)^[5,27,28]、TDD 和音频混合 (Audio blend)^[5,30,31] 等关键技术。

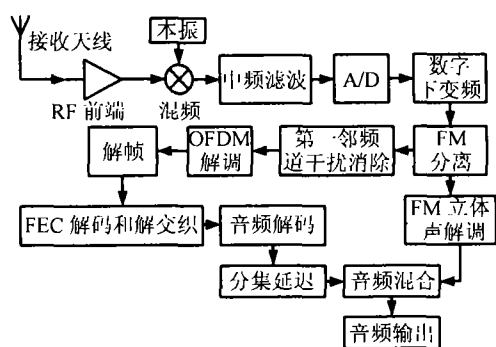


图 8 FM Hybrid IBOC DAB 接收机功能框图

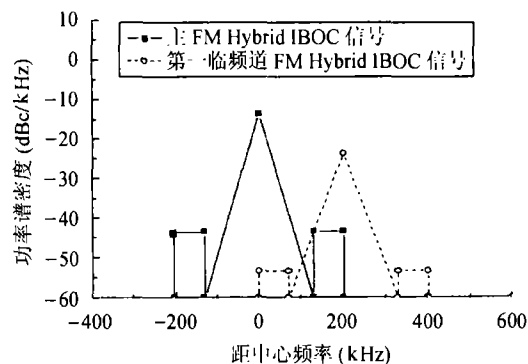


图 9 第一邻频道对主频道的干扰频谱图

4.1 第一邻频道干扰消除技术

大量的模拟和分析表明, 工作于 Hybrid 模式的 FM IBOC DAB 中的数字边带 DAB 信号位于距模拟主 FM 中心频率 129kHz 到 197kHz 之间时, 对其模拟主 FM 性能影响最小。但是, 相邻频道之间的干扰却总是存在的。图 9 显示了基于频道间隔为 200kHz 体制的第一邻频道 (距主 FM 中心频率 +200kHz 处, 虚线部分) 对于主 FM 频道 (实线) 的干扰情况。尽管规定 FM 电台的地理位置的分布应当保证接收的干扰频道功率值至少低于接收的主电台覆盖边缘期望功率值 6dB (即 $D/U \geq 6\text{dB}$), 但是第一邻频道对于主 FM 频道中数字边带的干扰是毁灭性的。图 9 中虚线三角形全部覆盖了主 FM 的上数字边带部分 (其实干扰是相互的: 主 FM 中的实线三角形也同样覆盖了虚线的下数字边带); 同样, 如果考虑到距 FM 中心频率 200kHz 处的邻频道干扰, 则主 FM 频道中下数字边带部分也将全部被干扰淹没。

要消除第一邻频道干扰，首先应当采用冗余的数字双边带传送技术，尽管会使传输容量和速率降低，但可以显著地减少或消除第一邻频道干扰。同时，研究表明，只要保证电台的频道分割和地理布局最优化，就不可能同时出现 ± 200KHz 第一邻频道干扰，这就可以保证数字双边带中至少有一个边带未受其干扰。而且，信道编码可以采用 CPPC，在每个数字边带可进行独立解码，这种联合传输编码技术在两个边带未被干扰完全损害时可以提高实际的编码增益。

4.2 时间延迟分集与音频混合技术

在严重衰落或高电平干扰存在时，DAB 中会产生典型的数字信号无法恢复的时间间隙，即峭壁效应。FM Hybrid IBOC DAB 在同播的模拟 FM 信号和数字 DAB 信号之间使用了时间延迟来支持时间分集接收，即使在高速移动接收中数字信号失败时，接收机也可以无缝地切换至模拟信号。同时，结合时间分集延迟技术和音频混合技术，可以在进行数字音频调谐时，使接收机输出模拟音频；一旦数字音频调谐完成，将模拟信号混合到数字部分，克服了接收机数字快速调谐过程中的哑音问题。

图 10 是时间延迟分集与混合技术原理图。在发射信号中，模拟 FM 信号相对于 DAB 数字信号被延迟 Delay 时间，这个延迟使信号在信道传输时增加了时间散布。假设由于严重衰落在某一时刻损伤了 DAB 数字信号的 5 和 6 部分，同时损伤模拟 FM 信号的 1 和 2 部分。在接收机中，将 DAB 数字信号相对于模拟 FM 信号被延迟 Delay 时间，使得两信号时间准确对齐。由于 DAB 数字信号的 5 和 6 部分受到损伤而不可恢复，但模拟 FM 信号的 5 和 6 部分没有受到损害，接收机可以从 DAB 数字信号的 4 部分开始平滑地混合 (Blend) 进模拟 FM 信号。等待 DAB 数字信号恢复良好后，接收机将重新平滑地切入数字信号。在将来的 FM IBOC DAB 的 All-Digital 模式中，也可以采用时间分集技术实现 DAB 双数字频道互为冗余备份和快速数字调谐。

研究表明^[5]，采用时间分集技术时，DAB 数字信号和模拟 FM 信号中断的概率是没有采用时的概率的平方。由于严重损伤导致信道中断的自相关函数为 $R(t) = E\{X(t) \cdot X(t - \tau)\}$ ，其中 $X(t)$ 是信道丢失概率的随机过程， τ 是时间分集延迟。不采用时间分集的信道中断概率为 $p = E\{X(t)\}$ ，自相关函数 $R(\tau)$ 表示采用时间分集技术后改善信道中断的概率。图 11 所示是 $p=0.04$ 的例子。

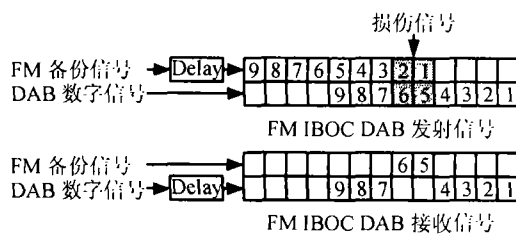


图 10 音频混合和时间分集延迟原理图

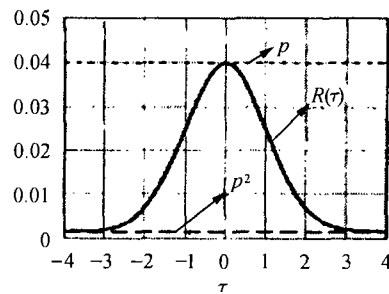


图 11 严重损伤导致信道丢失地自相关函数

5 结论与建议

DAB 接收机的实现方案选择及其对应芯片实现是 DAB 新技术产生经济效益的核心, 是知识产权的主体, 是当前该领域国际竞争的焦点。面对这一新兴领域, 本课题组已经组织研究人员, 全面研究和确定具有我国独立知识产权的实现方案, 开发相应芯片设计的核心技术。作者认为, 我国的研究目标应该高起点, 瞄准 IBOC DAB 制式, 掌握了较为复杂的 IBOC DAB 核心技术, 即使要开发专用频率信道方式的 DAB 也会容易的多。同时, 考虑到中国的国情, 作者建议, 我国目前宜于开发和推广 IBOC 制式的 DAB:

(1) 专用频率信道方式的 Eureka-147 DAB, 技术成熟, 并且已经标准化。但由于频段独占, 并与现有的 AM, FM 模拟广播不兼容; 对应的 DAB 接收机的价格昂贵, 使其推广和普及受限。根据作者调研可知, 1992 年 6 月广电部通过在我国开展 DAB 重大科研的可行性报告, 1996 年 5 月国家科委通过实施方案, 1996 年北京广播电视研究所组建中国 DAB 实验室, 到 1998 年基本完成了对 Eureka-147 DAB 的测试和技术跟踪。但是, Eureka-147 DAB 系统在广东、香港和新加坡等地的试验效果不尽人意。

(2) IBOC 制式 DAB 采用同信源单数字频道和现有的模拟广播信号进行数字化后互为冗余备份, 或同信源双数字频道互为冗余备份的方式, 可以平滑地、无缝地从现有模拟广播向全数字化 DAB 过渡, 对潜在的广大用户、广播制造商、运营商和半导体厂商具有强大的吸引力。

(3) 中国正处于经济高速发展时期, 部分人群的消费能力提高, 具有多媒体广播功能的 DAB 具有与 CD 机或高保真卡带机直接抗衡的音质, 是迅速增加的驾车人士通过空中电波享受现代文明的首选, 这需要迫切发展 DAB 事业; 同时也必须照顾到广大用户的接受能力, IBOC DAB 不仅兼容模拟收音机, 而且其接收机在批量生产后售价能控制在数百元人民币内, 汽车配备和家庭使用是完全可以接受的。同时, IBOC DAB 发射系统只需在现有模拟广播发射系统的基础上增加少量设备和投资就可以实现 DAB 广播。

(4) 美国在 FM 频段和 AM(日间) 频段采用 IBOC 技术进行数字音频广播的方案已被美国联邦通信委员会 (FCC) 正式批准。采用 IBOC DAB 方案能够与国际行业协会新标准接轨, 与国际同步接轨, 提供了可以进入国际市场的有利条件。

参 考 文 献

- [1] D. M. L. Witherow, P. A. Laven, Digital audio broadcasting—the future of radio, International Broadcasting Convention, Sept. 14–18, 1995, Conference Publication, IEE, 1995, No.413, 57–61.
- [2] A. Anderson, E. Andrews, G. W. Chambers, Development of a compact DAB receiver design for the consumer market, International broadcasting Convention, Sept. 12–16, 1996 Conference Publication, IEE, 1996, No.428, 267–271.
- [3] W. H. W. Tuttlebee, D. A. Hawkins, Consumer digital radio: from concept to reality, Electronics & Communication Engineering Journal, 1998, 10(4), 263–276.
- [4] W. Hoeg, T. Lauterbach, Digital Audio Broadcasting: Principles and Applications, Chichester, West Sussex, England, John Wiley & Sons Ltd, 2001, 1–242.
- [5] B. W. Kroeger, P. J. Peyla, Compatibility of FM hybrid In-Band On-Channel (IBOC) system for digital audio broadcasting, IEEE Trans. on Broadcasting, 1997, 43(4), 421–430.
- [6] P. Scalart, M. Leclere, Performance analysis of a COFDM/FM in-band digital audio broadcasting system, IEEE Trans. on Broadcasting, 1997, 43(2), 191–198.
- [7] D. D. Kumar, In-Band On-Channel digital audio broadcasting method and system, US006246698B1, Jun. 12, 2001.
- [8] B. W. Kroeger, D. M. Cammarata, FM In-Band On-Channel digital audio broadcasting method and system, US006430227B1, Aug. 6, 2002.

- [9] B. W. Kroeger, Denise Cammarata, Robust modem and coding techniques for FM hybrid IBOC DAB, *IEEE Trans. on Broadcasting*, 1997, 43(4), 412-420.
- [10] A. K. Agarwal, Method and apparatus for adaptive control of forward error correction codes, US006477669B1, Nov. 5, 2002.
- [11] B. Chen, C. W. Sundberg, An integrated error correction and detection system for digital audio broadcasting, *IEEE Trans. on Broadcasting*, 2000, 46(1), 68-78.
- [12] R. P. Voith, S. Sudhaman, Method and apparatus for interleave/de-interleave addressing in data communication circuits, US005886998A, Mar. 23, 1999.
- [13] P. Dambacher, COFDM combined encoder modulation for digital broadcasting sound and video with PSK, PSK/AM and QAM techniques, US5521943A, May 28, 1996.
- [14] T. Seki, N. Taga, OFDM transmission/reception system and transmitting/receiving apparatus, US005694389A, Dec. 2, 1997.
- [15] A. Mueller, Method for digital data transmission in the zero symbol of COFDM modulation method, US005617411A, Apr. 1, 1997.
- [16] E. B. Kpodzo, G. A. Nease, High power combiner apparatus, US006384695B2, May 7, 2002.
- [17] J. D. Johnston, Method and apparatus for coding audio signals based on perceptual model, US005285498A, Feb. 8, 1994.
- [18] J. L. Hall, J. D. Johnston, Perceptual coding of audio signals, US005341457A, Aug. 23, 1994.
- [19] D. W. Moses, Simultaneous transmission of data and audio signals by means of perceptual coding, US05473631A, Dec. 5, 1995.
- [20] B. W. Kroeger, R. R. Stehlik, Digital audio broadcasting using puncturable convolutional code, US006345377B2, Feb. 5, 2002.
- [21] S. Y. Chung, H. L. Lou, Multilevel RS/convolutional concatenated coded QAM for hybrid IBOC-AM broadcasting, *IEEE Trans. on Broadcasting*, 2000, 46(1), 49-59.
- [22] B. Chen, C-E. W. Sundberg, Optimal complement punctured convolutional codes for use in digital audio broadcasting and other applications, US006347122B1, Feb. 12, 2002.
- [23] R. Maerkle, C-E. W. Sundberg, Turbo codes for hybrid In-Band On-Channel digital audio broadcasting systems, *Global Telecommunications Conference: 2001, Globecom'01, IEEE*, 2001(12), 941-945.
- [24] M. Eroz, Forward error correction scheme data channels using universal turbo codes, US006730722B1, Aug. 6, 2002.
- [25] B. Chen, C-E. W. Sundberg, List Viterbi algorithms for continuous transmission, *IEEE Trans. on Communications*, 2001, 49(5), 784-792.
- [26] T. R. Beale, Memory efficient time de-interleave, de-puncture and Viterbi decoder circuitry, US005943371A, Aug. 24, 1999.
- [27] B. W. Kroeger, J. S. Baird, Method and apparatus for reduction of FM interference for FM In-Band On-Channel digital audio broadcasting system, US006259893B1, Jul. 10, 2001.
- [28] M. Sarraf, M. H. Zarrabizadeh, Method and apparatus for estimating power of first adjacent analog FM interference in an In-Band On-Channel (IBOC) communication system, US006445693B1, Sept. 3, 2002.
- [29] iBiquity Digital Corporation, <http://www.iBiquity.com/digitalradio>, Nov., 2002.
- [30] iBiquity Digital Corporation, IBOC FM Transmission Specification Appendix A, Aug., 2001, 6-27.
- [31] I. Tsujimoto, Time diversity transmission-reception system, US005859870A, Jan. 12, 1999.

PROGRESS ON KEY TECHNIQUES OF
IN-BAND ON-CHANNEL DIGITAL AUDIO BROADCAST

Yu Yunhua* ** Liu Yang* Shi Yin*

**(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)*

*** (College of Info. and Control Eng., University of Petroleum, Dong Ying 257061, China)*

Abstract A Digital Audio Broadcasting(DAB) system, which is based on advanced technique of Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing (COFDM), can provide improved performance of high robustness and virtual CD-like quality. In-Band On-Channel(IBOC) digital audio systems have the capability of simultaneously transmitting both analog and digital signals (in hybrid mode)within the allocated channel mask, allowing full compatibility with existing analog receivers, and will accomplish smooth transition from analog broadcasting to all-digital mode DAB at low cost. The authors analyze the spectrum of Frequency Modulation (FM) IBOC DAB, and presents basic structures of FM IBOC DAB transmitting system and receiver, introducing key technologies of Perceptual Audio Coder(PAC), Forward Error Coding(FEC), OFDM, First-Adjacent Canceling(FAC), Time Diversity Delay (TDD)and Audio Blend(AB). By careful comparison and analysis, some advice on development of Chinese IBOC DAB is given.

Key words Digital Audio Broadcasting(DAB), In-Band On-Channel(IBOC), Simultaneous transmission

于云华: 男, 1969 年生, 博士生, 目前主要从事数字音频广播系统和特种高速集成电路设计的研究.

石 寅: 男, 1951 年生, 研究员, 博士生导师, 目前从事高速数模混合系统电路研究.