

一种应用于 FM IBOC DAB 系统的比特交织编码调制方案^①

冯云飞^② 李建平 董 跃

(中国传媒大学信息工程学院 北京 100024)

摘 要 提出了一种适用于 FM IBOC 广播系统的比特交织编码调制方案。此方案结合互补增信删余卷积码(CPPC)和基于迭代译码的比特交织编码调制(BICM-ID)算法。互补增信删余卷积码能有效抵抗 FM IBOC 系统中面对的第一邻频干扰和无线信道噪声、衰落等干扰。同时,运用基于软判决反馈迭代译码的比特交织编码调制算法,可以不通过扩展频带来提高 FM IBOC 广播系统在瑞利信道中的编码增益。仿真结果表明,本方案能有效提高 FM IBOC 广播系统的接收性能。

关键词 FM IBOC DAB, 带内同频(BOC), 第一邻频干扰, 互补增信删余卷积码(CPPC), 基于迭代译码的比特交织编码调制(BICM-ID), 衰落信道

0 引 言

Hybrid IBOC DAB 是由美国研究的带内同频(in-band on-channel, IBOC)数字音频广播(digital audio broadcasting, DAB)系统。它利用目前使用的调幅或调频广播电台,将数字信号放在与模拟信号相同的频带内或相邻的频带内,实现 AM/FM 的数字化。这种广播系统的最大特点是不改变广播电台原来的工作频率和广播业务,不需要新的频率分配,过渡期内,模拟和数字节目可以同时广播,很容易实现模拟到数字信号的转变。

FM IBOC DAB 系统 Hybrid (混合方式)广播中为数字音频数据所分配的带宽非常有限。为了在这种频带受限的系统中提高编码增益而不通过扩展频带来实现,人们通常使用一种编码调制方案——网格编码调制(trellis-coded modulation, TCM)^[1]。TCM 是解决带宽要求和纠错能力之间矛盾的一个理想方案,它将纠错码技术与调制技术有机结合,在不增加系统带宽要求的条件下,通过扩展符号映射空间来达到提高编码增益的目的。TCM 使得编码器和调制器级联后产生的编码信号序列具有最大的欧式自由距离^[2,3]。理论和实践均已表明 TCM 在加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)信道中可以产生最佳的性能^[4]。然而,在将 TCM 用于移动衰落信道时却发现其性能变得很差,由于在瑞利衰

落信道中,编码性能更多地依赖于最小汉明距离而不是信道符号的最小欧式距离^[3-5]。因此,有必要考虑一种用于 FM IBOC Hybrid 广播系统的新的编码调制方案。

1992 年 Zehavi 在 TCM 的基础上通过在编码器后引入比特交织器和比特映射器提出了比特交织编码调制(bit-interleaved coded modulation, BICM)^[6]算法,该算法相对于 TCM 在无线信道下的性能有显著提高^[2]。本文将 BICM 技术运用到 FM IBOC DAB 系统中,主要研究在快衰落信道中 BICM 技术提高 FM IBOC 系统可靠接收性能的效果。本文分析了 FM IBOC DAB 系统中信号的信道干扰情况,介绍了系统中采用的纠错编码方案,即采用一种新类型编码——互补增信删余卷积码(complementary punctured-pair convolutional codes, CPPC)^[7-9],并对在瑞利信道下受到第一邻频干扰时形成不同码率的双边带删除卷积码进行仿真分析。然后介绍了比特交织编码调制的系统的发送和软判决反馈译码算法,通过仿真比较,可以看出应用在 FM IBOC 系统中的比特交织编码调制技术为系统的可靠接收带来的性能提升,并得出相关结论。

1 FM IBOC DAB 信号的信道干扰分析

与模拟兼容的 FM IBOC 技术在原先的模拟 FM

^① 教育部科学技术重点项目(106042)和教育部留学回国人员科研启动基金项目(2007[24])资助。

^② 男,1984 年生,硕士;研究方向:数字广播技术,纠错编码和数字调制技术;联系人, E-mail: phil@cuc.edu.cn; phil628@tom.com (收稿日期:2008-10-13)

频段内传送数字信号,模拟信号有可能对数字信号产生干扰(如第一邻频干扰)。而且数字信号经过无线信道传输后,也会受到无线信道噪声、多径和衰落的影响,这些不利因素都有可能对数字信号恢复困难,使接收质量受到严重影响,而广播系统经常工作在这样的环境中。

在 FM IBOC DAB 系统中,通常频道间隔为 200kHz,数字信号被放置于距 FM 中心载波 101kHz 至 198kHz 之内,因此第一邻频 FM 模拟信号对主频道数字信号的干扰将是一个值得考虑并需要解决的问题。而且第一邻频干扰的情况是多变的,严重时高出主频道数字信号功率 19dB,使得数字边带遭受污染,在接收端恢复困难。对于第一邻频干扰,可以看成功率谱形状为三角形的高斯噪声。如图 1 所示,主频道数字信号的上边带会因为第一邻频的干扰^[10]而遭受污染。

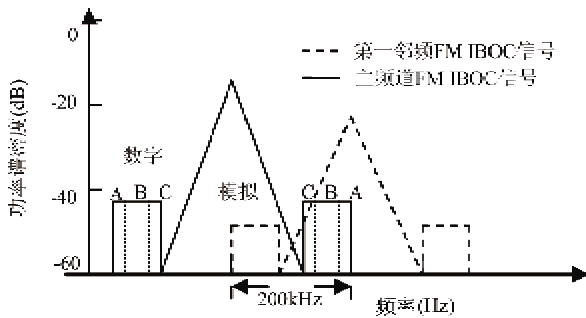


图 1 两个相邻频道的 FM IBOC 信号频谱

一般来说,离 FM 中心主载波越远,OFDM 子载波受干扰的程度就越大。假如将数字频带分为 A、B、C 三个部分,A 频带子载波最易受到第一邻频的干扰,B 频带子载波则相对较小。C 频带子载波一般用在 Extended Hybrid 广播方式中,作为选子载波。

此外,根据无线信道的传播特性,无线信道噪声、多径传播和选择性衰落都会导致数字传输波形变差和码间干扰,使数字信号遭受污染,严重影响信号的接收质量。

2 FM IBOC DAB 系统的纠错编码方案

在 FM IBOC DAB 系统中,因为数字信号的两个边带(上边带和下边带)同时受到第一邻频干扰的可能性很小,而且上下两个边带的频率选择性衰落特性也不尽相同。鉴于上述考虑,一种新类型的删除

卷积码被应用到 FM IBOC DAB 系统中,即互补增信删余卷积(CPPC)码^[7,8]。这种 CPPC 码使得上下边带传送相同内容的业务,这样即使一个边带干扰很严重时,由另一个边带上传送的数据仍能提供质量可靠的广播^[11,12]。这种码由两组删余卷积码组成,而且成对互补,通过不同的删余矩阵 P ,以同样的删余周期从同一个低码率的卷积码(称为母码)中删余得到,并且相互之间没有相同的删余比特。构造一个这样的互补码对,将其中一个安置在 IBOC 的下边带,而将另一个互补的不同的部分安置在上边带,当上下边带结合起来,就是一个码率为 R (双边带码率)的删余卷积码。

在 FM IBOC DAB 系统中,各主业务模式 PM 频带上的主逻辑信道和 MS2、MS3、MS4 模式 SM 频带上的次逻辑信道所采用的母码(未删除卷积码)都是约束长度为 7,生成多项式为 (133, 171, 165) 的卷积码,其自由距离 d_f 为 15,信息错误重量 C_{df} 为 7。

在文献[9]中,经过计算机仿真,找到了可用于 IBOC DAB 系统的 CPPC 码对,如图 2 所示。上边带互补删除矩阵是由下边带删除矩阵按列循环移位得到的(构造 CPPC 码对的一种方法),这样的单边带删除卷积码是等价码,它们的距离特性相同,自由距离 d_f 都为 4,信息错误重量 C_{df} 为 10。对每一个边带来说,增信删余卷积码的码率为 4/5。而当上下边带结合起来时,是一个码率为 2/5 的增信删余卷积码,其删除矩阵为 (11, 11, 10),自由距离 d_f 为 11,信息错误重量 C_{df} 为 8。系统中 CPPC 码联合形成的双边带删除矩阵图样如图 3 所示。

$$PPL = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad PPU = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

下边带 上边带

图 2 FM IBOC 系统中 CPPC 码上、下边带的删除矩阵

$$PPL + PPU = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

图 3 FM IBOC 系统中 CPPC 码联合形成的双边带删除矩阵

如果将删除矩阵表示为

$$P = \begin{bmatrix} G0_0 & G0_1 & G0_2 & G0_3 \\ G1_0 & G1_1 & G1_2 & G1_3 \\ G2_0 & G2_1 & G2_2 & G2_3 \end{bmatrix}$$

那么经图 2 删除矩阵后,实现了 CPPC 码的删除。

其上下边带码元的放置刚好与 CPPC 码对的删除矩阵相对应,上下边带码元的位置如图 4 所示。

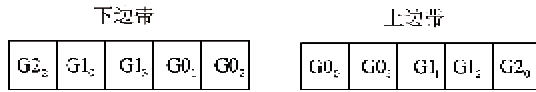


图 4 上下边带码元的放置方式

这样的上下边带码元的位置,实现了 CPPC 码未删除码元在频带上的最佳映射。根据数字边带受

第一邻频干扰程度可知,远离中心载波的频谱子块最易受到干扰,并且在干扰严重时,就有可能被丢弃,那么相当于原先调制在上面的码元被删除。这时,应该保证所保留下来的码元所构成的 CPPC 码对与其它相同码率的 CPPC 码相比,尽可能是最优的,基于这一原则,CPPC 码的码元按照如上形式在频带上进行配置。表 1 和表 2 为 CPPC 码对的下边带或上边带码元遭到删除时,由此联合形成的双边带删除卷积码的距离特性。

表 1 下边带码元遭到删除时的距离特性

被删除码元	下边带删除矩阵	双边带删除矩阵	双边带码率	自由距离 d_f	信息错误重量 C_{inf}
$G2_2$	(0110, 1001, 0000)	(1111, 1111, 1000)	4/9	10	7
$G2_2$ $G1_0$	(0110, 0001, 0000)	(1111, 0111, 1000)	4/8	8	3
$G2_2$ $G1_0$ $G1_3$	(0110, 0000, 0000)	(1111, 0110, 10000)	4/7	7	8
$G2_2$ $G1_0$ $G1_3$ $G0_1$	(0010, 0000, 0000)	(1011, 0110, 1000)	4/6	5	3

表 2 上边带码元遭到删除时的距离特性

被删除码元	上边带删除矩阵	双边带删除矩阵	双边带码率	自由距离 d_f	信息错误重量 C_{inf}
$G2_0$	(1001, 0110, 0000)	(1111, 1111, 0010)	4/9	10	7
$G2_0$ $G1_2$	(1001, 0100, 0000)	(1111, 1101, 0010)	4/8	8	3
$G2_0$ $G1_2$ $G1_1$	(1001, 0000, 0000)	(1111, 1001, 0010)	4/7	7	8
$G2_0$ $G1_2$ $G1_1$ $G0_3$	(1000, 0000, 0000)	(1110, 1001, 0010)	4/6	5	3

图 5 示出了下边带 CPPC 受到第一邻频干扰时的性能。码型采用 FM IBOC 标准,母码码率为 1/3,约束长度为 7,每帧数据包含 80 个信息比特,生成多项式为 (133, 171, 165) 的卷积码, CPPC 码对的下边带码元按表 1 删除后,分别在 IBOC 频谱的下边带受到第一邻频干扰时,采用 16QAM 调制方式,经过瑞利衰落信道, Viterbi 硬判决译码。

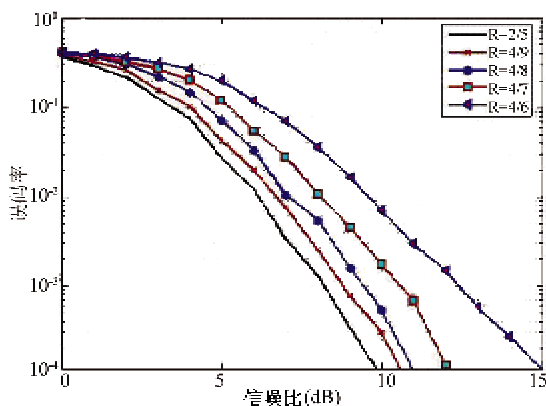


图 5 下边带 CPPC 受到第一邻频干扰时的性能

3 比特交织编码调制的系统

在设计无线通信系统时,要考虑无线频谱资源的有限性,因此一个重要的目标是高效地利用频谱资源。无线信道的信道特性并不理想,因而,如何提高无线信道传输的可靠性也是无线通信系统设计的一个关键目标。

20 世纪 80 年代, Ungerboeck 证明了利用 $R = k/n$ 的卷积编码器,采用集合分割映射的方法将编码比特映射到信号点,即将编码和高阶调制结合在一起的 TCM 技术,可获得编码增益而不牺牲信息速率的带宽。对加性高斯白噪声 (AWGN) 信道来说, TCM 的设计标准是:使编码信号的自由 Euclidean 距离最大^[2,3]。

1992 年 Zehavi 在 TCM 的基础上通过在发端引入比特交织器而提出了比特交织编码调制 (BICM)^[6] 技术。BICM 技术与 TCM 技术一样,是一种将信道编码与调制作为一个整体联合进行设计的差错控制技术,以期同时获得分集增益和编码增益,

从而提高无线信道传输的频谱效率和功率谱效率。

由于 TCM 的分集性比较差,所以在衰落信道下的性能不够好^[6]。交织技术是一种有效的抗衰落的分集技术,它使得通信系统在衰落信道中取得了较大的性能改善。BICM 在编码过程中引入了交织器,使得它在衰落信道下的能力大大提高,实验表明在瑞利衰落信道下 BICM 的性能优于 TCM^[4,6]。

基于上述考虑,我们提出一种应用在 FM IBOC 系统中的 BICM 算法的方案,它结合了互补增信删余卷积码(CPPC)和基于迭代译码的比特交织编码调制(BICM-ID)算法。

3.1 BICM 发送端

BICM 发送端是由编码器、比特交织器 π 和一个无记忆的调制器组成。本文中,我们采用 16QAM 的调制方式,如图 6 所示。在发送端,信息序列通过卷积编码后进行按比特交织。比特交织器(π)的目的则是打乱衰落的信息序列之间的相关性,并且增加码字的最小汉明距离的分集度^[3]。之后,由经交织后的编码序列中的 m 个连续比特组成 v_i , 这里, t 代表传输信号的时间标号。调制器将每个 v_i 映射成复传输信号 $x_i = \mu(v_i)$, 这里, x_i 是从 M 维星座图 γ 中选出, $M = 2^m$ 。 μ 是信号映射方式。

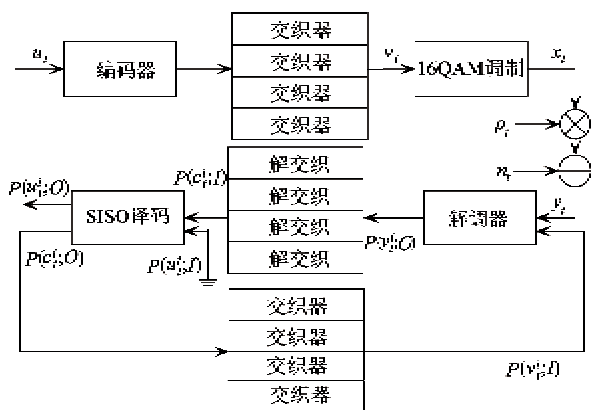


图 6 BICM-ID 的系统结构框图

采用在不存在频率选择性的瑞利衰落信道下,接收的离散基带信号可以表示为 $y_t = \rho_t x_t + n_t$, 这里 ρ_t 是以瑞利规律分布的衰落系数, 并且 $E(\rho_t^2) = 1$, n_t 服从方差为 $N_0/2$ 的高斯白噪声的分布。在加性高斯白噪声(AWGN)信道下, $\rho_t = 1$ 。在本文中, 我们采用有理想的信道状态信息(channel state information, CSI), 因此可以准确地估计出 ρ_t 并且在接收端可被利用。

3.2 传统的 BICM 译码方案

在接收端, 次优的最大似然码元度量 λ 可按式

$$\begin{aligned} \lambda(v_t^i = b) &= \log \sum_{x_i \in \mathcal{X}_b^i} P(y_t | x_i) \\ &\approx \max_{x_i \in \mathcal{X}_b^i} \log P(y_t | x_i) \\ &\sim \min_{x_i \in \mathcal{X}_b^i} \|y_t - \rho_i x_i\|^2 \\ &\quad i = 1, 2, 3, 4; b = 0, 1 \quad (1) \end{aligned}$$

计算。这里 χ_b^i 是 χ 映射中在第 i 比特位置上二进制数值为 b 的子集。也就是说,在计算每个比特量度时,应从子集 χ_b^i 中选出距离最小的那个星座点。把相应的去交织码元度量累加,就得到网格分量度量。最后,用标准 Viterbi 算法译码。

3.3 软判决反馈迭代译码

这一节介绍用软判决的码元度量的迭代译码计算。基于迭代译码的比特交织编码调制 (BICM-ID)^[13] 系统中采用一种次佳的方法, 即将解调和卷积译码作为两个独立的步骤进行。采用软入软出 (soft-input soft-output, SISO) 译码器来代替 Viterbi 译码器, SISO 译码器的输出反馈给解调器进行码元度量的再次计算。在解调器, 接收符号的比特后验概率可以通过下式计算:

$$\begin{aligned}\lambda(v_i^i = b) &= \log P(v_i^i = b \mid y_i) \\ &= \log \sum_{x_i \in \mathcal{X}_b^i} P(x_i \mid y_i) \\ &\sim \log \sum_{x_i \in \mathcal{X}_b^i} P(y_i \mid x_i) P(x_i) \\ i &= 1, 2, 3, 4; b = 0, 1\end{aligned}\quad (2)$$

在第一次解调时,并没用到先验概率 $P(x_i)$ 。因此我们做出同样有可能性的假设:采用式(1)来作为SISO译码器的输入,SISO译码器能产生信息比特和编码比特的后验概率。可以看出,式(1)码元度量就是式(2)的简化。

c_i 代表 v_i 经解交织后的输出, u_i 代表相对应 c_i 的输入符号。我们用 $P(q; I)$ 表示随机变量 q 的先验概率, $P(q; O)$ 表示随机变量 q 的后验概率。迭代译码过程开始后, SISO 模块输出码元的外部后验概率 $P(c_i^i; O)$ 经交织反馈后作为先验概率 $P(v_i^i; I)$ 输入到解调器进行迭代解调译码。因此, 式(2)的先验概率可以通过下面

$$\begin{aligned} P(x_i) &= p(\mu(v_i^i; I)) \\ &= \prod_{i=1}^m P(v_i^i = \tilde{v}_i^i(x_i); I) \end{aligned} \quad (3)$$

计算。这里 $\tilde{v}_t^i(x_t)$ 是对应于映射 $x_t = \mu(\tilde{v}_t)$ 的第 i

个比特的值,即 $\bar{v}_t^i(x_t) \in [0,1]$ 。

根据式(2)和式(3)可以得出迭代时解调器的输出外部后验比特概率的值:

$$\begin{aligned} P(v_t^i = b; O) &= \frac{P(v_t^i = b | y_t)}{P(v_t^i = b; I)} \\ &= \frac{\sum_{x_t \in \mathcal{X}_b^i} P(y_t | x_t) P(x_t)}{P(v_t^i = b; I)} \\ &= \sum_{x_t \in \mathcal{X}_b^i} \left(P(y_t | x_t) \prod_{j=1}^m P(v_t^j = \bar{v}_t^j(x_t); I) \right) \\ &\quad i = 1, 2, 3, 4; b = 0, 1 \quad (4) \end{aligned}$$

因此,在计算某一码元度量时,我们只需要计算在同一信道符号中的其他比特先验概率 $P(v_t^j; I)$ 。新生成的码元度量值再反馈给接收端进行迭代解调和译码。以最后一次迭代的外部比特概率 $P(v_t^i; O)$ 的硬判决结果作为最终的解码输出。

4 仿真结果与分析

这里,主要通过 Monte-Carlo 仿真来评价我们所提出的应用在 FM IBOC 系统中的比特交织编码调制方案提升系统的可靠接收性能的效果。仿真中,主要考虑在快衰落信道中的系统误码性能。

仿真中,码型采用 FM IBOC 标准中的母码码率为 1/3,约束长度为 7,每帧数据包含 80 个信息比特,生成多项式为(133, 171, 165)的卷积码,经删除矩阵为(11, 11, 10)删除后,得到码率为 2/5 的删余卷积码。在 FM IBOC 频谱的条件下,采用 16QAM 调制方式,Gray 映射方式,经过瑞利衰落信道,迭代次数为 10。对比在使用 BICM-ID 前后的误码率特性,仿真结果如图 7 所示。

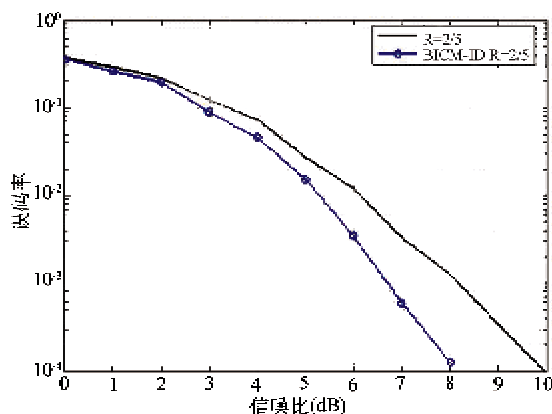


图 7 在 IBOC FM 系统中使用 BICM-ID 算法前后的误码性能比较

图 8 为下边带 CPPC 受第一邻频干扰时使用 BICM-ID 算法前后的误码性能比较。码型采用 FM IBOC 标准,母码码率为 1/3,约束长度为 7,每帧数据包含 80 个信息比特,生成多项式为(133, 171, 165)的卷积码,CPPC 码对的下边带码元按表 1 删除后,分别在 IBOC 频谱的下边带受到第一邻频干扰时,形成不同码率的双边带删除卷积码。在 FM IBOC 频谱的条件下,采用 16QAM 调制方式,Gray 映射方式,经过瑞利衰落信道,迭代次数为 10。

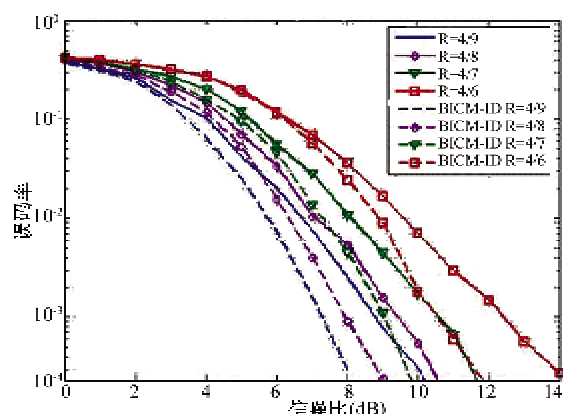


图 8 下边带 CPPC 受到第一邻频干扰时使用 BICM-ID 算法前后的误码性能比较

从图 7 和图 8 可见,在使用 BICM-ID 算法后,系统在瑞利衰落信道下,经 16QAM 调制后的误码性能有了明显提高。在误码率为 10^{-4} 处,大约有了 2dB 的编码增益。即使在受到第一邻频干扰时,使用 BICM-ID 算法后,系统的编码增益仍然可稳定在 2dB。

5 结论

在本文中,通过分析 FM IBOC DAB 系统中信号的信道干扰情况和采用的纠错编码方案——互补增信删余卷积码(CPPC),同时考虑到 FM IBOC DAB 系统 Hybrid (混合方式) 广播中为数字音频数据所分配的带宽非常有限的情况,我们提出一种新的应用在 FM IBOC 广播系统频带上的基于迭代译码的比特交织编码调制(BICM-ID)方案,可以不通过扩展频带来提高 FM IBOC 广播系统在瑞利信道中的编码增益。仿真结果表明,在 FM IBOC 系统中应用比特交织编码调制技术后,系统的接收性能获得明显提升。在使用 BICM-ID 算法后,系统在瑞利衰落信道下,经 16QAM 调制后,在误码率为 10^{-4} 时,基于迭代

译码的 BICM 使系统获得 2dB 的编码增益;并且即使在受到第一邻频干扰时,使用 BICM-ID 算法后,系统的编码增益仍然可稳定在 2dB。因此,BICM-ID 是一种不通过扩展频带来实现的提高编码增益的编码调制方案,可靠适用于 FM IBOC 这种带宽要求高的广播系统中。

参考文献

- [1] Ungerboeck G. Channel coding with multilevel/phase signals. *IEEE Trans Inform Theory*, 1982, 28:56-67
- [2] Li X, Ritcey J A. Trellis-coded modulation with bit interleaving and iterative decoding. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*(S0733-8716), 1999, 17(4): 715-724
- [3] Chindapol A, Ritcey J A. Design, analysis and performance evaluation for BICM-ID with square QAM constellations in Rayleigh fading channels. *IEEE J Select Areas Commun*, 2001, 19: 944-957
- [4] Li X, Chindapol A, Ritcey A. Bit-interleaved coded modulation with iterative decoding and 8PSK signaling. *IEEE Trans On Communication*, 2002, 50(8): 1250-1257
- [5] Divsalar D, Simon M K. The design of trellis coded modulation for MPSK for fading channels: Performance criteria. *IEEE Trans Commun*, 1988,36: 1004-1012
- [6] Zehavi E. 8-PSK trellis codes for a Rayleigh fading channel. *IEEE Trans Commun*, 1992, 40(5): 873-884
- [7] Kallel S. Complementary punctured convolution (CPC) codes and their applications. *IEEE Trans Comm*, 1995, 43(6): 2005-2009
- [8] Hagenauer J. Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications. *IEEE Trans Comm*, 1988, 36(4): 389-400
- [9] Kroeger B W, Cammarata D M. Robust modern and coding techniques for FM hybrid IBOC DAB. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 1997, 43(4): 412-420
- [10] Kroeger B W, Brian W. Method and apparatus for reduction of FM interference for FM in-band on channel digital and broadcasting system. USA Patent No.6259893. 2001-7-10
- [11] Chen B, Sundberg C-E W. Complementary punctured-pair convolutional codes for digital audio broadcasting, *IEEE Trans Comm*, 2000, 48(11):1829-1839
- [12] Maerkle R, Sundberg C-E. W. Channel codes based on hidden puncturing for partial band interference channels. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'03), Anchorage, AK, USA, 2003. 4. 2894-2898
- [13] Li X, Ritcey J A. Bit interleaved coded modulation with iterative decoding. In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'99), Vancouver, BC, Canada, 1999. 858-864

Bit-interleaved coded modulation for FM IBOC broadcasting

Feng Yunfei, Li Jianping, Dong Yue

(School of Information Engineering, Communication University of China, Beijing 100024)

Abstract

A bit-interleaved coded modulation (BICM) scheme was proposed for FM in-band on-channel (IBOC) digital audio broadcasting (DAB) systems, which combines complementary punctured-pair convolutional codes (CPPC) and BICM with iterative decoding (BICM-ID). The CPPC can resist the first adjacent-channel interference, the noise and fading. Meanwhile, by using the BICM-ID algorithm, the scheme can make FM IBOC broadcasting systems yield a better coding gain over Rayleigh fading channels without bandwidth expansion. The simulation results show that the proposed scheme can effectively improve the receiving performance of an FM IBOC system.

Key words: FM IBOC DAB, in-band on-channel (IBOC), first adjacent-channel interference, complementary punctured-pair convolutional codes (CPPC), bit-interleaved coded modulation with iterative decoding (BICM-ID), fading channels