

# ATSC 的 HDTV 信道编码的性能分析

张建文, 王宏远

(华中科技大学电信系信号与信息处理, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 本文在对 ATSC 信道编码标准的总结基础上, 在 AGWN 信道中对纠错编码的性能进行了分析. 得到 RS 编码的编码增益, 交织编码和 RS 编码结合的纠错能力. 并分析了 TCM-8VSB 对 4VSB 性能的改善. 得到 ATSC 信道编码参数是一组优化的参数的结论.

**关键词:** ATSC; HDTV; 信道编码; RS 编码; TCM; 8VSB

**中图分类号:** TN911.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 09-1243-03

## Channel Code Performance of ATSC HDTV

ZHANG Jian-wen, WANG Hong-yuan

(Department of E&I, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** This paper analyses the error correcting code performance in the AGWN channel, then deduces the code gain of RS code, and the error correcting capability of the combination of RS code and interleave. This paper also analyses the improvement of TCM-8VSB relative to 4VSB, and draws the conclusion that the parameters in ATSC channel code standard are optimal.

**Key words:** ATSC HDTV; channel-code; RS-code; TCM; 8VSB

### 1 引言

世界上先后提出了三种数字化的高清晰度电视方案<sup>[1]</sup>, 近年来随着数字信号处理技术和大规模集成电路技术的发展使全数字化的高清晰度电视成为可能. 世界各国在选用时基本上考虑的是美国 ATSC 的 HDTV 标准和欧洲的 DVB 标准. 就地面广播(DTTB)而言, 两者在信源编码后使用了相似的信道纠错编码. 但测试表明 ATSC 标准在加性白噪声环境中频带利用率, 峰值功率/平均功率, 脉冲噪声上有比 DVB-T 更好的表现, 更加适用于多频网络<sup>[2]</sup>.

### 2 ATSC 的 HDTV 信道编码和性能

#### 2.1 ATSC 信道编码标准

由信源编码得到的 MPEG-2 传输包送入 8-VSB 传输处理部分, 然后送往信道中传输. 传输处理部分又分为两个步骤: 数据随机化器(Data Randomizer), 里德-所罗门编码器(Reed-Solomon Encoder), 数据交织器(Data Interleaver), 网络编码器(Trellis-Encoder), 段同步和场同步的插入(Segment Sync and Field Sync Insert)是数据处理部分. 然后数据以一定的数据结构送到后面的信号处理部分, 将数据映射成适于在地面信道中传输的信号发射出去. 本文所论及的是数据处理.

由图 1 可知 ATSC 的信道编码分为五个步骤.

数据随机化作用于 VSB 数据帧中除段同步, 场同步和 FEC 外的所有数据. 当输入的数据为常数或中断时, 在信道中传输的是随机数据, 避免长串的连 0 或连 1, 对系统性能没有

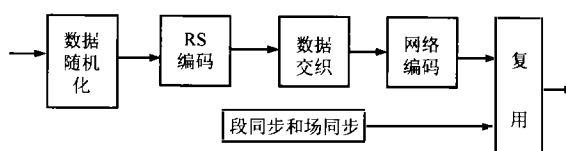


图 1 8-VSB 传输框图

贡献. 伪随机序列(PRS)由 16 个比特的线性反馈移位寄存器(LFSR)产生. 它和数据帧锁定, 在每个数据帧的第一个数据分段的分段同步期间初始化为 F180 (HEX). 随机化是将其的 8 个输出端作为随机化字节引出, 各自独立的和相应的输入数据字节作异或运算.

里德-所罗门(RS)编码以其纠正连续错误的能力而著称. 在 ATSC 标准中是 RS(207, 187), 每 187 数据字节经过 RS 编码形成 187 数据字节在前的 207 个字节的数据段(Data Segment). 如果在数据处理中要将并行的 8 比特做串行处理, 并串转换的顺序是高位在前.

ATSC 所用数据交织是 52 个数据段的段间数据交织. 交织单位是字节. 交织深度 1/6 场(约 4ms). 进行交织的应该是数据而不包括段和场同步.

ATSC 的网络编码(TCM)由 2/3 速率的卷积码和 8-VSB 构成. 编码器是四状态的, 因此输入两比特中一比特经 1/2 速率卷积编码, 另一比特没有编码. 卷积编码后得到的符号映射到 8-VSB 电平信号. TCM 中还有段内交织处理. 交织方法是 12 个 TCM 编码器并列. 每个 TCM 编码器每次输入一个字节, 一个 TCM 编码器每次编码两个比特, 所以一次输入后每个 TCM

收稿日期: 2000-08-03; 修回日期: 2001-02-22

编码器要四次来处理数据.输出复用器依次从每个 TCM 编码器读出一个符号,每 12 个符号重复一次.在每段的边界上要超前 4 个 TCM 编码器,以便于段同步插入.

同步插入包括段同步的插入和场同步的插入.段同步是四个特殊符号 1001.场同步是一个和数据段大小相等的数据块.每 828 个符号要加一个段同步.这样,每数据段 832 个符号,与输入的 188 字节的 MPEG-2 TS 包相对应.场同步每 312 个数据段插入一次,一帧数据由 624 个数据段组成.

以上具体结构图示见参考文献 3.

2.2 信道编码的性能分析

在地面广播信道中的干扰除了多径干扰,脉冲噪声、邻频干扰,主要是加性白噪声.

对多径干扰,脉冲干扰用 RS 编码和卷积交织来克服. ATSC 标准中的 RS 编码(207,187)是(255,235)的截短码,信息元 287 个字节,校验位 20 个字节,码距 21,最大纠错能力是  $t = 10$  个字节,所以它是 MDS 码,如果解码器中有另外的错误定位能力,(207,187)RS 码可以纠最多  $x(x < 2t)$  个删除错误,同时纠  $y(y = \lceil (2t - x)/2 \rceil)$  个字节错误[4].数据交织是克服突发错误(如脉冲干扰)的有效方法,ATSC 标准用段间的交织和段内的交织.前者是同步交织器,交织器延时  $51 \times 208 = 10608$ ,存储量 5302 字节.由于交织深度是 52,所以和 RS 编码相结合的纠错能力是 520 字节.TCM 编码交织深度是 12,由于是符号间交织,一字节对应 4 个符号,所以纠突发错误能力是  $520 \times 12 \times 4 = 24960$  个符号.而在 DVB-T 系统中使用由 RS(255,239)截断得到的 RS(204,188),纠错能力是  $t = (255 - 239)/2 = 8$  个字节.DVB-T 中用 12 个 RS 块的交织编码而没有用 TCM,所以纠突发错误的的能力是  $8 \times 12 \times 8 = 768$  比特.所以单从利用信道编码纠突发错误的的能力来说,ATSC 是远远优于 DVB-T 的.

对邻频干扰,除了加强纠错能力,还对信号的频谱处理,使用 NTSC rejection filter. AGWN 是传输系统中考虑的主要干扰.下面的 RS 码的编码增益和 8VSB-TCM 的性能的讨论就是主要针对 AGWN 信道的.

如果不经过信道编码和调制,信源编码得到的数据在 AGWN 信道中传输,解码端对信号的信噪比有一个最低要求,对数字通信而言,这个信噪比的最低值对应信道中的误码率.对视频信号要求的信噪比是通过实验得到的,在文[7]中定义了 Threshold Of Visibility(TOV),当主观上的感觉达到阈值时的传输信噪比就是系统要求的 TOV.测试得到的数据是当误码率(BER) $3 \times 10^{-6}$ 对应 TOV 的误码率.再考虑数据加上信道编码后传输,对信道中数据的误码率要求有所降低,这个降低值的大小用来衡量信道编码的性能.对 RS 编码而言,设输入误码率为  $P_a$ ,对  $GF(2^m)$ 上的码长为  $n = 2^m - 1$  符号,信息长为  $k$  个符号的 RS 编码,因为每个符号是  $m$  个比特,所以 RS 译码输入的误符号率是:

$$P_{si} = 1 - (1 - P_a)^m \tag{1}$$

RS 码是 MDS 码,所以最小汉明距离  $d = 2t + 1 = n - k + 1$ ,可以纠正任意  $t$  个符号错误,所以 RS 的译码错误概率是:

$$P_e = \sum_{k=t+1}^N C_M^k P_{si}^k (1 - P_{si})^{N-k} \tag{2}$$

这样译码器输出的误符号率是:

$$P_{so} = 1/N \times \sum_{k=t+1}^N \beta_i C_M^k P_{si}^k (1 - P_{si})^{(N-k)} \tag{3}$$

其中  $\beta_i$  为  $i$  个符号错引起 RS 码错误时,译码后平均的错误符号个数<sup>[9]</sup>,  $i - t \leq \beta_i \leq i + t$ .译码器输出的误比特是:

$$P_{bo} = 1 - (1 - P_{so})^{1/m} \tag{4}$$

ATSC 中用到的(207,187)RS 码,虽然是(255,235)的缩短码,但是在解码的时候是对 207 个字节为一块来解码的,所以可以认为  $n = 207, k = 187$ .这样经过 RS(207,187)前后的误码率曲线如图 2(取  $\beta_i = i$ ).从曲线上可以得到 ATSC 要求的 TOV 所对应的误码率为  $3 \times 10^{-6}$ 时,输入的误码率是  $1.73807 \times 10^{-3}$ .对应的 TCM 解码器输出的误符号率是:

$$P_{si} = 1 - (1 - 1.73807 \times 10^{-3})^8 = 1.38 \times 10^{-2} \tag{5a}$$

如果没有用 RS 编码则要求 TCM 解码器输出的误符号率是:

$$P_{si} = 1 - (1 - 3 \times 10^{-6})^8 = 2.4000 \times 10^{-5} \tag{5b}$$

现在考虑调制方法对 TOV 或误码率的改善. ATSC 用 8-VSB TCM,其信号集按照 Ungerboeck 的结论,是将 4-VSB 的信号集扩展一倍得到,故应和 4-VSB 进行性能比较.

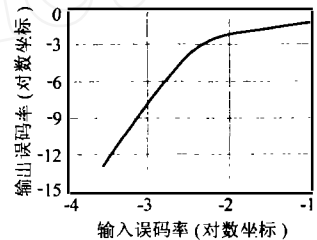


图 2 RS 码对误码率的改善(单位都为 bit(s)<sup>-1</sup>)

对多进制的调制方式,符号错误概率和信噪比间有固定的关系  $P_e = f(P_{sn}/N)$ .

MVSB 是对数字基带信号进行数字残留边带调制.因为残留边带的调制制度增益和解调制度增益都是  $1^{[5]}$ ,其基带信号是和 MPAM 相类似.所以有 8-VSB 的误符号率:

$$P_e = (M - 1)/M \times \text{erfc}(\sqrt{(3 \times \log_2 M)/(M^2 - 1) \times (P_{sn}/N)}) = (8 - 1)/8 \times \text{erfc}(\sqrt{(3 \times \log_2 8)/(8^2 - 1) \times (P_{sn}/N)}) \tag{6}$$

同样,对 4-VSB 而言有:

$$P_e = (4 - 1)/4 \times \text{erfc}(\sqrt{(3 \times \log_2 4)/(4^2 - 1) \times (P_{sn}/N)}) \tag{7}$$

8-VSB 和 4-VSB 的误符号率和信噪比的曲线如图 3 所示.可以看到由于 MVSB 调制的一维星座图中信号的最大幅度一定时,信噪比小时由于误符号率都很大,两者性能相差不大,但是当信噪比较大时,由于 8VSB 的星座点间距比 4VSB 的小,4VSB 性能优于 8VSB.

ATSC 标准中采用 2/3 速率的卷积码和结合 8VSB 的 TCM 调制,若收端采用维特比译码,按照搜索最似然路径进行,错误是偏离正确路径引起的.设首次错误事件概率为  $P_d$ ,距离生成函数

$$T(D) = \sum_{k=D_{free}}^{\infty} A_k \times D^k \tag{8}$$

则当  $D^k = P_k$  时  $P_d < T(D)$ .其中,  $A_k$  表示重量为  $k$  的路径数

目,  $P_k$  是由全零序列错成重量为  $k$  的序列的概率. 这样  $P_d < \sum A_k \times P_k$ , 由于错误路径的和正确路径的距离  $d \geq D_{free}$ , 一般情况下, 只要  $d$  稍大,  $P_k$  就很快减小, 所以取

$$P_d \approx A_{df} \times P_{df} \quad (9)$$

$A_{df}$  是重量为  $D_{free}$  的路径数,  $P_{df}$  是译到这些路径的概率.

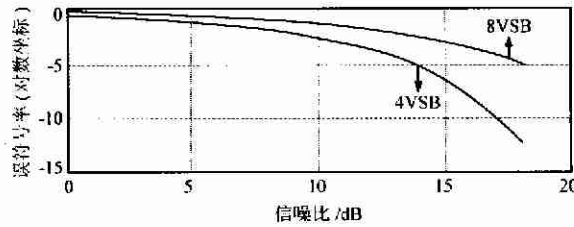


图 3 8-VSB 和 4-VSB 的误符号率和信噪比关系  
 $M$  进制的星座点和最小距离  $\Delta$  之间的关系为:

$$3/(M^2 - 1) = (\Delta/2)^2 \quad (10)$$

$\Delta$  是  $M$  进制两信号的电平的最小距离, 对  $m = 3$  的卷积码距离为  $D_{free}$  的路径都是 3 段转移路径. 这样错误路径每段和原路径的距离是  $a_i \times \Delta$  ( $i = 1, 2, 3$ ), 而且每段都判到这条错误路径时才将正确路径判到这条错误路径. 这样, 对 8VSB 有

$$A_{df} = 1 \quad (11)$$

由式(6),(7)和(11)

$$P_{df} = ((M-1)/M)^3 \times \prod_{i=1}^3 \text{erfc}(\sqrt{(a_i \times \Delta/2)^2 \times \log_2 M \times (P_{sur}/N)}) \quad (12)$$

所以, 误符号率  $P_e = P_d \approx A_{df} \times P_{df} = 1 \times P_{df} = p_{df}$  (13)

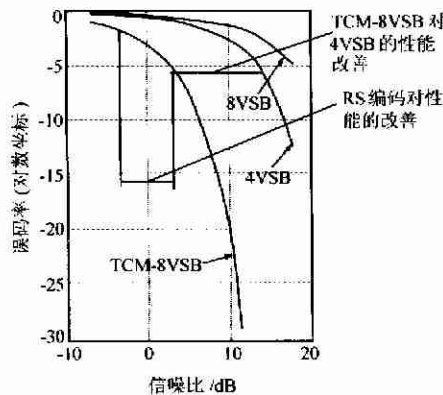


图 4 TCM-8VSB 和 4VSB, 8VSB 性能对比

由式(6),(7)和(14)得到的图 4 是 TCM-8VSB 和 4VSB, 8VSB 的性能曲线. 由式(14), 可以得到 TCM-8VSB 当误符号率为  $2.4 \times 10^{-5}$  和  $1.38 \times 10^{-2}$  时式(5)信噪比分别为 2.5520dB 和 -3.1811dB. 这两个误符号率是前面提到的在 RS 解码前后要求的值. 也就是说 RS 编码的编码增益是  $2.5520 - (-3.1811) = 5.7331$ dB, 如图 4 所示. 同样, 当误符号率为  $2.4 \times 10^{-5}$  时, 4VSB 要求信噪比是 13.3604dB, 所以 TCM-8VSB 对 4VSB 性能改善是  $13.3604 - 2.5520 = 10.8084$ dB, 如图 4 中所示.

### 3 结束语

如果考虑充分利用信道编码的纠错能力, 如果图 4 中  $2.4 \times 10^{-5}$  的误码率不是 TCM-8VSB 对 4VSB 的性能改善的最大值, 那么如果找出最大值就可以得到新的参数. 由于式(7)、(13)两式的反函数是比较复杂的, 所以根据两式计算在  $P_{sur}/N$  位于 0~10dB 之间时, 两个函数在各个点上的值. 将这些值以横坐标为基准进行比较, 可以看到标准中选的点是这个区间中 TCM-8VSB 对 4VSB 性能改善最优点之一(误差范围内有多个这样的点). 如果考虑这个区间左边的区域, 从图上看有可能得到好一些的点, 但是这一部分的误码率比较高, 这样的点不合适. 所以 ATSC 信道编码标准中的参数是根据实际条件得到的一组比较优化的参数. 它充分利用了信道编码的纠错能力, 在克服白噪声干扰和突发脉冲干扰上有较好的性能.

### 参考文献:

- [1] Mark S Richer. The Vision of HDTV [R].
- [2] Performance Comparison of ATSC 8-VSB and DVB-T COFDM Transmission Systems for Digital Television Terrestrial Broadcasting [Z]. <http://www.atsc.org/pub/Perf-Comp/ICCE99paper.PDF>.
- [3] ATSC Standard Document A53.pdf [S]. <http://www.atsc.org/Standards/A53/>
- [4] 黎洪松. 数字视频技术及其应用 [M].
- [5] 曹志刚. 现代通信原理 [M].
- [6] 樊昌信. 通信原理 [M].
- [7] Grand Alliance HDTV Specification 2.0 [S].
- [8] John G Proakis. Digital Communication [M].
- [9] ETSI ETR 290. DVB 测试指南 [S].

### 作者简介:



张建文 男, 1975 年 11 月出生于湖北黄石, 1998 年进入华中理工大学(现华中科技大学)电信系攻读硕士学位. 现从事 HDTV 地面传输系统中信道编码的研究. Email: zhjw@chinaren.com.



王宏远 男, 1946 年生于河南郑州. 华中科技大学电信系教授, 博士生导师. 现主要从事数字视频的研究.