

# QPSK 调制与 FEC 差错控制在 DVB 系统中的应用

梁军杰 左金明

(解放军信息工程学院信息科学系, 郑州 450002)

**摘要** 在简要介绍 DVB 接收系统基本结构的基础上, 分析了 DVB-S 标准下数字卫星接收机中可变码率的 QPSK 解调和 FEC 方式的差错控制技术. 最后结合自行开发的 DVB 数字卫星接收机对包含解调与 FEC 功能的两种集成电路芯片作了比较.

**关键词** QPSK 前向纠错 差错控制

中图分类号: TN941 文献标识码: B 文章编号: 1006-8961(2000)03-0260-04

## The QPSK Modulation and FEC Error Correction in DVB Receiver System

LIANG Jun-jie, ZUO Jin-ming

(Department of Information Science, Information and Engineering Institute, Zhengzhou 450002)

**Abstract** Based on a brief discussion of the basic structure of the DVB receiver, this paper analyses the variable rate QPSK demodulation and FEC error correction in the digital satellite receiver and compares two types of integrated circuit chips applied in the DVB receiver made by ourselves.

**Keywords** QPSK, FEC, Error correction

## 0 引言

直接广播卫星(DBS)作为信息高速公路通向家庭的新成员,从诞生之日起就以数字视频广播(DVB)业务向有线电视业务发出了强有力的挑战.发展至今,已有有线广播电视呈二分天下之势.为了进一步挖掘 DVB 业务的市场潜力,欧洲广播联盟(EBU)相继制定了 DVB-C, DVB-S 和 DVB-T 标准,规范了 DVB 系统中的基本结构和原理.这些标准至今已成为事实上的国际标准,得到了广泛的认可和应用.按标准规定, DVB 系统中广泛采用 QPSK 调制解调技术和前向纠错(FEC)的差错控制方式<sup>[1]</sup>.下面我们将分析 DVB 系统中这两项技术并将其应用到自行研制开发的 DVB 接收机中.应用过程中对两种有 QPSK 解调及差错控制功能的芯片作出了比较.

## 1 DVB 系统中的可变码率 QPSK 解调与差错控制

DVB 系统分为发送和接收两部分,二者在原理和电路上有相似之处,我们主要介绍 DVB 接收系统. DVB 接收系统用于接收通过静止卫星传送的数字视频广播信号,遵照 DVB-S 标准.接收机将天线收下的卫星信号调谐、下变频、A/D 转换、解调、前向纠错、解复用后得到 MPEG-II 格式的视、音频数据流. MPEG-II 数据流再由接收机中 MPEG-II 解码器解码输出视、音频信号.如图 1 所示.

由框图可见, DVB 接收系统中数字处理模块的核心是经 A/D 转换后数字信号的 QPSK 解调、FEC 和 MPEG-II 解复用、解码.由于 MPEG-II 格式数据处理可参见 MPEG-II 标准,本文不再赘述.下面主要分析 DVB 接收机中的 QPSK 解调及 FEC 控制.

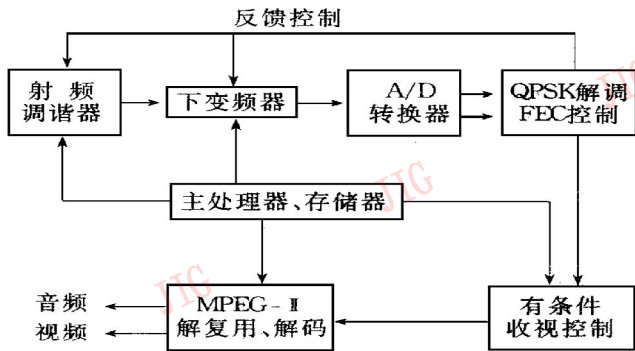


图 1 DVB 接收系统框图

### 1.1 QPSK 解调

当前, 卫星通信主要是工作在功率受限情况下, 因而采用的应该是功率利用率高的数字调制方式. 另外, 卫星信道的非线性要求所采用的调制最好是恒包络调制. 因而, DVB-S 标准规定, DVB 系统中采用绝对映射(不进行差分编码)格雷码相位逻辑的 QPSK 调制方式. 发端经过加扰、RS 编码、卷积交错、卷积编码后的 I、Q 两路基带信号调制前要通过平方根升余弦匹配滤波器进行整形. 该滤波器的传输函数为:

$$H(f) = \begin{cases} 1, & |f| < f_N(1 - \alpha) \\ \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{2f_N} \left| \frac{f_N - |f|}{\alpha} \right|}, & f_N(1 - \alpha) \leq |f| \leq f_N(1 + \alpha) \\ 0, & |f| > f_N(1 + \alpha) \end{cases}$$

其中,  $\alpha = 0.35$  为滚降系数,  $f_N = 0.5/T_s = 0.5R_s$  为 Nyquist 频率,  $T_s$  和  $R_s$  分别为 QPSK 符号周期和码率.

DVB 接收机中 QPSK 解调器如图 2 所示.

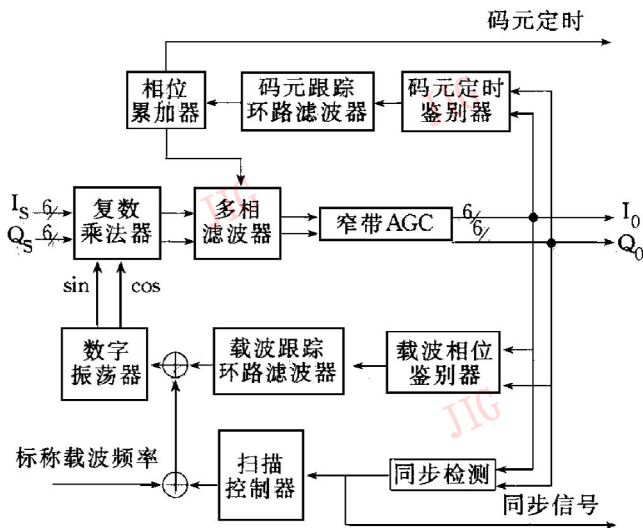


图 2 QPSK 解调器

由 A/D 转换器产生的数据采样经过 AC 耦合使 DC 偏移达到最小后, 即作为两路基带信号以固定速率输入到解调器. 在相位跟踪过程中, 复数乘法器和数控振荡器(NCO)可以消除和  $I_s$ 、 $Q_s$  输入信号有关的载波频率偏移, 而较大的频偏则由数字 AGC 和外部模拟调谐电路来消除. 多相滤波器对频率调整后的基带信号起到平方根升余弦滤波的作用. 滤波后的基带信号进入数字窄带 AGC. AGC 使信号优化定标至  $\pm 0.5\text{dB}$  的精度, 保证了下级 Viterbi 译码的 FEC 性能. 载波频率可通过编程控制, 以 20 比特的精度送入解调电路.

自动扫描控制电路用于初始捕获过程中的载频搜索. 主控处理器通过一个 20 位和一个 16 位寄存器存放可编程改变的搜索初始频率和搜索步长. 自动扫描电路将通过锁频标志在搜索范围内按步长逐一检测各频率, 一旦提取到载波, 则停止扫描进入相应的解调状态. 由于系统需要窄带预采样滤波, 并且 LNB 有可能发生几兆赫兹的较大频偏, DVB 解调器中提供了高分辨率的载频测量功能, 以周期性地对前端调谐器频率漂移进行补偿. DVB 主控处理器周期性读取频率寄存器的值并计算出相应的调谐器频率修正量.

采用 QPSK 解调时, 其误码率为:

$$P_{\text{QPSK}} = 0.5 \text{erfc} \left| \sqrt{\gamma/2} \right|$$

其中  $\gamma = E_b/N_0$  为 QPSK 码元在加性高斯白噪声信道条件下的信噪比<sup>[1]</sup>.

### 1.2 差错控制

与模拟传输相比, 数字通信的一个突出优点就是容易对传输信息的差错进行控制. DVB 系统中主要采用前向纠错的差错控制方式, 其纠错编码采用外码为 RS 码、内码为卷积码的级联码. 在发端, MPEG-II 编码后的 DVB 信号进入 QPSK 调制器之前, 要经过数据加扰、RS 外码编码、卷积交错、卷积内码编码, 以提高数字信号在卫星信道中的抗干扰能力.

对 MPEG-II 数据流扰乱的目的是使二进制数据序列中的 0 和 1 出现的概率近似相等, 且限制 0 游程和 1 游程的最大长度. 这样可以方便收端从信号中提取定时信息, 提高准确性. 另外, 经扰乱后的数字基带信号具有伪随机特性, 使信号频谱扩散, 可以降低对使用同一卫星转发器的其它信号的干扰. 扰乱又可称为调制前编码. DVB-S 标准中使用特征多项式为  $1 + x^{14} + x^{15}$  的 15 级反馈移位寄存器实现发端加扰和

收端解扰. DVB 系统中 MPEG-II 数据流按 188 字节固定长度打包, 这 188 字节中第一个是同步字节 47H. 每个加扰周期对 8 个 MPEG-II 数据包进行加扰. 加扰前先将初始序列(100101010000000)加载到伪随机序列寄存器中, 同时将第一个 MPEG-II 数据包的同步字节 47H 极性反转, 变成 B8H, 作为加扰后数据包的同步字节. 随后加扰过程只对其余  $188 \times 8 - 1 = 1503$  字节. 因而加扰周期是 1503 字节, 加扰后数据包是 1504 字节. 收端则是提取同步字节 B8H 后, 将其反转为 47H, 再对紧接的 1503 字节进行解扰, 输出 MPEG-II 数据包.

DVB 系统发送端对数据加扰后即进行 RS 外码编码. DVB-S 标准中规定 DVB 系统使用的外码为 RS(204, 188,  $T=8$ ), 由 RS(255, 239,  $T=8$ ) 缩短得到, 其生成多项式为

$$g(x) = (x + \lambda^0)(x + \lambda^1) \dots (x + \lambda^{15})$$

其中  $\lambda$  为  $GF(2)$  上本原多项式  $p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + x^1$  的根.

在收端, RS 译码器对去交错后的每 204 字节译码, 输出长为 188 字节的数据块提供去扰器. 由于 RS(204, 188,  $T=8$ ) 可纠连续 8 个字节的突发错误, 误码率可从 Viterbi 译码输出的  $3.2 \times 10^{-4}$  降至 RS 译码输出的  $1.0 \times 10^{-10}$ .

DVB 系统中还采用了交错技术, 将卫星信道上可能出现的较长突发错误扩散到多个码字中, 以提高系统的纠错性能. DVB 系统中采用的是深度  $L=12$  的卷积交错. 发端交错器有 12 条支路, RS 编码后的长度  $N=204$  字节的码流在切换开关的控制下进到各路先入先出移位寄存器中. 发端第  $j(0, 1, \dots, 11)$  支路由  $M \cdot j$  个移位寄存器组成,  $M=N/L=17$ . 收端去交错也是 12 路移位寄存器, 第  $j(0, 1, \dots, 11)$  支路有  $M \cdot (11-j)$  个移位寄存器. 卷积交错使 DVB 系统 RS 外码中的连续突发错误随机分布到多个码字中, 然后在 RS 译码时将其消除. 这使 DVB 系统 RS 外码具备纠正近百个字节连续突发错误的能力, 纠错性能得到很大提高.

DVB-S 标准规定 DVB 系统采用的内码为码率  $r=1/2, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 6/7, 7/8$  可选, 约束长度  $k=7$ , 由(2, 1, 6)非系统卷积码得到的收缩卷积码. DVB 接收机中对内码采用去收缩 Viterbi 软判决译码. Viterbi 译码器在提取到 QPSK 锁相信号后, 按  $3/4, 2/3, 5/6, 7/8, 1/2$  的顺序自动搜索正确的码率, 再依据 Viterbi 软判决算法进行译码. 在二进制

对称信道中, 若信道误码率  $P_e \ll 1$ , 则 Viterbi 译码器输出误码率:

$$P_{me} \approx \frac{1}{K_0} \cdot B_{d_{free}} \cdot \left| 2 \cdot \sqrt{P_e \cdot (1 - P_e)} \right|^{d_{free}} \\ \approx \frac{B_{d_{free}}}{K_0} \cdot 2^{d_{free}} \cdot P_e^{d_{free}/2}$$

其中  $d_{free}$  是卷积码自由距离,  $K_0$  是一个码字中的信息位数,  $B_{d_{free}}$  是卷积码序列中所有码重为  $d_{free}$  的码字中非 0 信息元的总数<sup>[21]</sup>. 若码率选为  $3/4$ , 则  $d_{free}=5, K_0=1, B_{d_{free}}=1$ , 当信道误码率  $P_e=0.01$  时, Viterbi 译码输出误码率  $P_{me}=3.2 \times 10^{-4}$ , 提高了两个数量级.

由上可知 DVB 系统通过差错控制可以将信号误码率从 0.01 降至  $10^{-10}$  数量级上, 使系统性能达到准无误码的水平.

## 2 QPSK 解调与差错控制在实际系统中的实现

实际 DVB 接收系统中主要由天线、馈源、射频调谐器、下变频器、A/D 转换器、QPSK 解调器、FEC 译码器、MPEG-II 解复用解码器、主处理器和存储器等. 在研制 DVB 卫星接收机过程中, 我们选用了两种集成了 A/D 转换器、可变码率 QPSK 解调和 FEC 译码功能的单片集成电路芯片: SGS-THOMSON 公司的 STV0199 和 HYUNDAI 公司的 HDM8513. 两者的共同特点是功能强大、集成度高:

- (1) 具有符合 DVB-S 标准的可变码率 QPSK 解调模块和 FEC 纠错译码模块;
- (2) 具有单路单载波和多路单载波兼容性;
- (3) 双路数字 AGC 控制调谐器输出和带宽内功率最优化;
- (4) 大范围连续可变符号率;
- (5) 自动载频搜索;
- (6) 片上错误监视等功能.

芯片内 A/D 转换电路和 QPSK 解调模块将信号处理成待译码信号, 再由芯片内 FEC 纠错译码模块完成 Viterbi 译码、卷积去交错、RS 译码、去扰, 得到 MPEG-II 数码流交由下级 MPEG-II 解复用、解码芯片处理. 纠错译码模块性能直接影响 MPEG-II 解码后得到的视、音频信号质量. STV0199 和 HDM8513 的纠错译码模块均由 3 部分组成:

- (1) Viterbi 译码器;
- (2) 字同步提取及去交错电路;
- (3) RS 译码器及去扰器.

功能框图见图 3:

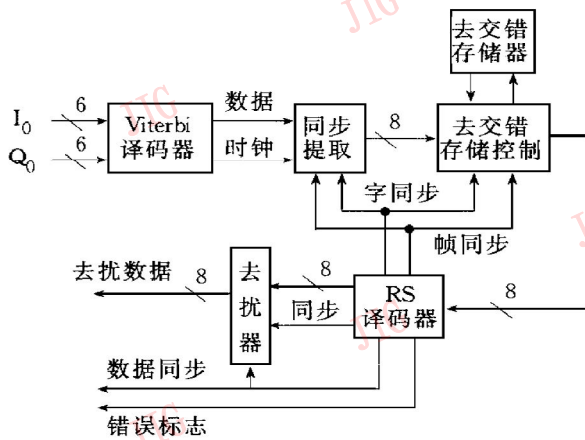


图3 纠错译码电路模块

经过比较, STV0199 和 HDM 8513 的纠错译码性能相差无几, 都具有将信号误码率从  $10^{-2}$  降到  $10^{-10}$  以下的能力, 达到 DVB 系统准无误码率的要求。

这两种芯片也有不同. HDM 8513 的优势在于符号率动态范围更大, 达到  $1\text{M} \sim 55\text{M}$  符号/s, 而 STV0199 仅有  $1\text{M} \sim 45\text{M}$  符号/s. 考虑性价比和购买途径等因素后, 实际 DVB 接收系统中我们使用的是 STV0199. 经调试, 利用 0.6m 天线接收 Ku 波段卫星信号即可获得良好的收视效果。

### 3 结束语

数字式调制技术主要有 PSK、FSK、ASK、CPM

及它们的组合. 对于 DVB 系统, 主要利用恒包络、互调干扰小的 QPSK. 这种调制方式是综合考虑卫星通信功率利用率、频带利用率和抗干扰性能的较好选择. 而以卷积码为内码, RS 码为外码的级联码理论上可达到距离香农极限仅 4dB 的优良性能. 实际 DVB 接收系统已经充分证明了采用可变码率 QPSK 调制方式和卷积码与 RS 码级联的前向纠错方式完全可使卫星信道中系统误码率达到准无误码的水平, 满足数字视频广播的需要. DVB 系统调制与差错控制仍在发展, 其方向是在二者分别优化的基础上, 进一步优化组合, 以获得更优性能. 目前, 网格编码在卫星通信中的研究进展很大, 已有实际应用. 基于网格编码的调制与差错控制方式在不增加带宽的条件下可获得 3~6dB 的净编码增益, 这无疑会带来更好的收视效果<sup>[3]</sup>.

### 参考文献

- 1 European Telecommunication Standard: ETS 300 421.
- 2 刘玉君. 信道编码. 河南: 河南科学技术出版社, 1992.
- 3 王秉钧, 田宝玉等. 数字卫星通信. 北京: 中国铁道出版社, 1998.

梁军杰 解放军信息工程学院信息科学系硕士研究生. 研究方向为数字信号处理.

左金明 副教授, 解放军信息工程学院信息科学系第一教研室有线电视加、解扰课题组组长. 主要从事视频加、解扰技术领域的研究工作.