

FIR 一致校验码在数字有线电视中的应用

刘 刚, 吴晓丽, 葛建华
(西安电子科技大学, 陕西 西安 710071)

摘 要:论述了在数字有线电视系统中的一种用于包同步提取和错误检测的方法,此方法基于一类线性分组码,其一致校验结构源于本原多项式产生的 PN 伪随机序列,其一致校验运算可以用 FIR 滤波器简单实现。

关键词:循环码; 对偶码; 伪随机序列; FIR 数字滤波器

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2003)03-0058-03

本文论述了一类线性分组码,其一致校验运算可以用 FIR 滤波器简单实现,此类码可用于数字有线电视系统中提取包同步及进行错误检测。在同步建立阶段,用来提取包同步;同步建立以后,用于检测接收信息是否有误。文中首先概述了 FIR 一致校验码的基本原理,然后具体分析 FIR 一致校验码在数字有线电视系统中的应用,最后给出其硬件实现电路。

1 FIR 一致校验码

设 $g(x)$ 是定义在 $GF(2)$ 上的多项式, $g(x) = 1 + g_1x + g_2x^2 + \dots + g_{r-1}x^{r-1} + x^r$, 由 $g(x)f(x) = 1$ 导出 $\frac{1}{g(x)}$ 的幂级数展开式为

$$\frac{1}{g(x)} = f(x) = \sum_{j=0}^{\infty} f_j x^j \quad (1)$$

其中, $f(x)$ 是一周期序列, 设周期为 P , $P \leq 2^r - 1$ (当且仅当 $g(x)$ 为本原多项式时 $P = 2^r - 1$, 此时 $f(x)$ 是一个伪随机序列)。

记 $f(x)$ 的前 P 项截短多项式为 $f^p(x) = \sum_{j=0}^{p-1} f_j x^j$, 则 $f(x)$ 可另表示为

$$f(x) = f^p(x) \sum_{j=0}^{\infty} x^{jp} = \frac{f^p(x)}{1 - x^p} \quad (2)$$

以下差分方程式与式(1)等价

$$y_j = w_j - \sum_{i=1}^r g_i y_{j-i} = \sum_{i=0}^{\infty} f_i w_{j-i} \quad (3)$$

式(3)描述的是 1 个输入为 w_j , 输出为 y_j , 冲激响应为 f_j 的线性时不变因果系统。

同理, 由 $g(x)e(x) = a(x)$ 导出有理多项式

$$\frac{a(x)}{g(x)} = e(x) = \sum_{j=0}^{\infty} e_j x^j \quad (4)$$

若取 $f(x) = 1/g(x)$, 迟延幂级数 $e(x) = \sum_{j=0}^{\infty} f_{j+m} x^j = \frac{a(x)}{g(x)}$, m 为非负整数, 则与式(4)的等价差分方程为

收稿日期: 2002-09-03

作者简介: 刘 刚(1977-), 男, 陕西三原人, 博士生, 主要从事数字通信研究;

葛建华(1961-), 男, 江苏南通人, 教授, 博士生导师, 主要从事数字通信研究。

$$y_i = \sum_{m=0}^{\deg \text{rec}(a)} a_m w_{j-m} - \sum_{l=1}^r g_l y_{j-l} = \sum_{l=0}^{\infty} e_l w_{j-l} \quad (5)$$

同样, $e(x)$ 的截短幂级数 $h(x) = \sum_{j=0}^k f_{j+m} x^j = \frac{a(x) - x^{k+1} b(x)}{g(x)} \quad (6)$

若取 $\frac{b(x)}{g(x)} = \sum_{j=0}^{\infty} f_{j+m+k+1} x^j$, 则式(6)的等价差分方程表示为

$$y_j = \sum_{m=0}^{\deg \text{rec}(a)} a_m w_{j-m} - \sum_{l=0}^{\deg \text{rec}(b)} a_l w_{j-(k+1)-l} - \sum_{l=0}^{\infty} g_l y_{j-l} = \sum_{l=0}^k h_l w_{j-l} \quad (7)$$

它实际上就是一个冲激响应为 h_i 的 FIR 滤波器。

总结以上3个幂级数的关系(如图1所示)可得:

1) $h^{k+1}(x)$ 是由 $f(x)$ 的子序列

$(f_m \sim f_{m+k})$ 构成的。 $\frac{a(x)}{g(x)}$ 从多项式 f

(x) 的第 f_m 项开始, $\frac{b(x)}{g(x)}$ 从 $f(x)$ 第

f_{m+k+1} 项开始。因此, 先把 $\frac{b(x)}{g(x)}$ 移动 k

+1 位(乘以 x^{k+1}), 再与 $\frac{a(x)}{g(x)}$ 相减,

就可以得到 $h^{k+1}(x)$ 。

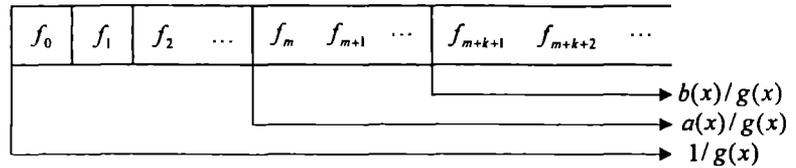


图1 $\frac{1}{g(x)}$ 、 $\frac{a(x)}{g(x)}$ 和 $\frac{b(x)}{g(x)}$ 的关系图

2) $a(x)/g(x)$ 的前 r 项为 $f_m \sim f_{m+r-1}$, 而 $b(x)/g(x)$ 从 f_{m+k+1} 项开始, 由于 $a(x)/g(x)$ 的阶数小于 r (假设采用系统码, 且其校验位个数小于信息位, 即 $r < k$), 所以 $a(x)/g(x) - x^{k+1} b(x)/g(x)$ 不会有重叠。

3) $g(x)$ 一旦选定, 满足表达式 $h^{k+1}(x) = \frac{a(x) - x^{k+1} b(x)}{g(x)}$ 的多项式 $a(x)$ 、 $b(x)$ 就很容易确定下来了。

因为, 在实际中, 满足 $g(x)$ 能整除 $a(x) - x^{k+1} b(x)$ 这一条件的多项式 $a(x)$ 、 $b(x)$ 很少。

这里 h^{k+1} 是一个 k 阶多项式, 其中 $h_0 = h_k = 1$, 则与以下一致校验矩阵 H 对应的线性分组码, 其伴随式的计算可以用 FIR 滤波器来简单实现, 由此, 称此类线性码为 FIR 一致校验码。

$$H = \begin{bmatrix} h_k & k_{k-1} & \dots & \dots & \dots & h_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_k & \cdot & \cdot & \dots & h_1 & h_0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \dots & & & & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_k & \dots & h_{r-1} & h_{r-2} & h_{r-3} & \dots & h_0 \end{bmatrix}$$

2 FIR 一致校验码在数字有线电视系统中的应用

FIR 一致校验码已应用在基于 MPEG2 数据流的数字有线电视标准 J. 83 中, 该标准中, 1 个 MPEG2 数据包由 188 Byte 组成, 其中, 1 Byte 用于同步提取和错误检测, 其余 187 Byte 用于数据传输。标准中采用 FIR 一致校验码的倍集码, 即码字由 FIR 一致校验码加上 1 个常向量 $\sigma(x)$ 得到。码字序列经过 FIR 滤波器得到伴随式序列 $S(x)$, $S'(x)$ 再与同步图样 $s(x)$ 求相关, 利用相关峰检测方法就可以建立包同步和检测误码。

标准中 FIR 一致校验码的生成参数如下:

$$g(x) = 1 + x + x^5 + x^6 + x^8$$

$$a(x) = 1$$

$$b(x) = 1 + x + x^3 + x^7$$

$$\sigma(x) = 1 + x + x^2 + x^5 + x^6 \quad (\text{对应于 '67H'})$$

$$s(x) = 1 + x + x^2 + x^6 \quad (\text{对应于 '47H'})$$

2.1 包同步提取及错误检测

设发送码字记为 $c_i(x)$, 码字序列表达为 $w(x) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i x^i$, 经过冲激响应为 $h^{k+1}(x)$ 的 FIR 滤波器后, 得

到其伴随式序列 $S'(x) = h^{k+1}(x)w(x) = \sum_{i=0}^{\infty} (y_i(x) + x^k s(x))x^{in}$, (假设 $y_i(x)$ 的阶数小于 k)。由于发送码字中周期地加了阶数小于 r 的多项式 $\sigma(x)$, 因此伴随式序列 $S'(x)$ 就会周期地出现多项式 $S(x)$ 。通过伴随式序列 $S'(x)$ 与同步图样 $S(x)$ 求相关, 就可以建立和跟踪同步。

由于采用系统码, 同步建立后, 码字的信息位就可以由序列 $w(x)$ 直接恢复, 同时, 可以通过判断 $s(x)$ 是否出现在预期位置, 来检测接收数据是否有误。

2.2 电路实现

包同步检测电路有两大部分组成: 伴随式计算及同步序列相关。接收码组经 FIR 滤波器后, 输出长为 r 的伴随式序列, 随后进入同步序列相关器, 与同步图样 $s(x)$ 求相关, 利用相关峰检测方法建立和跟踪包同步。包同步建立以后, 通过判断峰值是否出现在预期位置来检测接收数据是否有误。包同步检测电路原理如图 2 所示。在实际应用中, 包同步检测是一个自适应的过程, 在捕获状态, 当且仅当连续在预期位置捕获数个相关峰时, 进入同步状态; 在同步状态, 失步数次之后, 就要重新进入捕获状态, 建立新的同步。

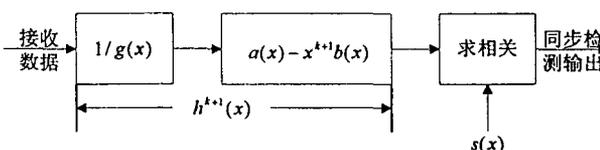


图 2 包同步检测电路

2.3 FIR 一致校验码的优点

这种用 FIR 滤波器进行包同步检测的方法有如下优点:

1) 利用 FIR 滤波器计算伴随式是一个自同步的过程, 错误传播限制在有限长度内。为了简单起见, 假设反馈电路 $1/g(x)$ 的起始状态非零, 输入全零码字, 并且没有同步偏移, 则反馈电路输出一个 PN 序列, 它是具有一定时延 M 的幂级数 $f(x)$, M 值由反馈电路的起始状态决定, 若令反馈电路输出为 $c(x)/g(x)$, 其中 $c(x)$ 的阶小于 $g(x)$ 的阶 r , 经过 m 步移位后 ($m < n$), FIR 滤波器电路 $a(x) - x^{k+1}b(x)$ 输出的多项式的阶为 $(r-1) + (k+1) = n$, 这是由于 $g(x)$ 能整除 $a(x) - x^{k+1}b(x)$ 的缘故。也就是说, 即使反馈电路 $1/g(x)$ 处于非零状态, 在一个码长时间内, 译码器的输出都会过渡到全零。这一结论同样适于非零序列输入, 非零同步偏移的情况。

2) 由式(7)确定的滤波器的阶数为 $\|a(x)\| + \|b(x)\| + \|g(x)\|$, 而并非 $\|h^{k+1}(x)\|$, 其中 $\|\cdot\|$ 表示多项式的汉明距离。这一点是非常重要的, 因为 $a(x)$ 、 $b(x)$ 、 $g(x)$ 的阶数比 $h^{k+1}(x)$ 的阶数小的多, 从这一点来看, FIR 一致校验的码实现复杂度小于 CRC 码。

参考文献:

- [1] Richard B. Well Applied coding and information theory for engineers[M]. Prentice Hall, 1999.
- [2] Chris Heegard, Andrew J. King FIR parity check codes[J]. IEEE Trans Communication, 2000, 48(7): 1103 - 1113.
- [3] Yang - Ho Choi. Coset codes with maximum capability of synch - correction[J]. IEEE Electronics Letters, 1999, 35(18): 1535 - 1536.
- [4] 林可祥, 汪一飞. 伪随机码的原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1978.

(编辑: 门向生)

An Application of FIR Parity Check Codes in Digital Cable Television System

LIU Gang, WU Xiao-li, GE Jian-hua

(National key lab of ISN, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: This paper describes a method used for packet synchronization and error detection in the synchronous digital cable television system. The method relies upon a class of linear block codes whose parity check structure is based on a pseudonoise sequence generated by a primitive polynomial. This structure allows for the computationally efficient implementation of the parity check by FIR filter.

Keyword: cyclic codes; dual codes; pseudonoise sequence; FIR digital filters