

千兆以太网中 8B/10B 线路码的功率谱分析¹

孔令讲 范录宏 周正欧

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘 要 该文根据有限状态机模型, 采用 Cariolaro 算法 (1983) 即状态转移矩阵求解法分析了千兆以太网中 8B/10B 线路码的功率谱, 给出了 $P=0.5$ 时的闭合解析式及功率谱曲线。

关键词 有限状态机, 8B/10B, 线路码, 功率谱, 状态转移

中图分类号 TN913.2

1 引 言

近年来计算机网络得到了飞速发展, 用户对数据传输速率的期望越来越高, 因此高速大容量的光纤数字传输系统的研究受到普遍的重视。最近面市的千兆以太网^[1,2]和 Fiber Distributed Data Interface(FDDI) 都采用了 Fiber Channel 光纤传输标准及 8B/10B 编码方式。

在光纤数字传输系统中, 线路码的研究是一个重要的课题, 它直接关系到系统的抗干扰等性能。线路码的作用就是将待传输的数字信号 (一般为 PCM) 进行线路编码, 使其频谱与传输媒质相匹配, 以实现媒质的最优利用。

mB/nB 线路码型是光纤数字传输系统最常用的一类线路码, 其中 1B/2B, 2B/3B, 3B/4B 常用于低速率光纤数字传输。而用于高速率传输的有 5B/6B, 5B/7B, 6B/8B, 7B/8B 等, 但通常只有到上百兆。而千兆以太网采用 8B/10B 来实现高速数字信号的传输是一新的进展。由于在编解码的芯片制作上抛弃了传统的用 ROM 进行码表存储的实现方法, 而改用组合逻辑电路实现编解码的快速变换, 使工作速率得以大幅度提高。

8B/10B 虽然已用于千兆以太网中, 但它的连续功率谱尚未见有文献对此做研究。

线路码的连续功率谱是一个很重要的特性, 根据它可以知道信号功率的分布, 从而确定信道的带宽, 并考虑信道带宽和传输网络的传输函数, 对信道进行正确的设计以防止码间干扰。文献 [3] 研究了 4B/5B 连续功率谱, 并给出了功率谱密度曲线。文献 [4] 也研究了 7B/8B 的连续功率谱, 并给出了不同 P 值下的功率谱密度曲线。

本文根据有限状态机模型, 采用 Cariolaro 算法 (即状态转移求解法)^[5] 分析了 8B/10B 线路码的连续功率谱, 给出了 $P=0.5$ 时的闭合解析式及其功率谱曲线。

2 功率谱分析

要对 8B/10B 线路码进行功率谱分析, 必须先建立其模型。由于 8B/10B 码属块码编码, 所以我们采用典型的块码编码器模型。如图 1 所示:

图中各符号含义如下: $Z(T)$ 为一离散时间集 $\{\dots - T, 0, T, 2T, \dots\}$, T 是一个信息单位的时间。源符号序列 $a_n(t)$, $t \in Z(Ts)$, Ts 为源符号周期, $a_n(t)$ 二进制时为 $\{0, 1\}$ 。源块码序列 A , 数据长度为 M , $A(t) = [A^1(t) \cdots A^M(t)]$, $t \in Z(T)$, $T = MTs$ 。编码输出块序列 C , 长度为 N , $C(t) = [C^1(t) \cdots C^N(t)]$, $t \in Z(T)$, $T = NTc$ 。编码符号序列 $c(t)$, $t \in Z(Tc)$ 。出于同步原因, 通常有 $T = MTs = NTc$ 。

¹ 1998-12-28 收到, 1999-11-10 定稿
信息产业部“九五”预研项目资助

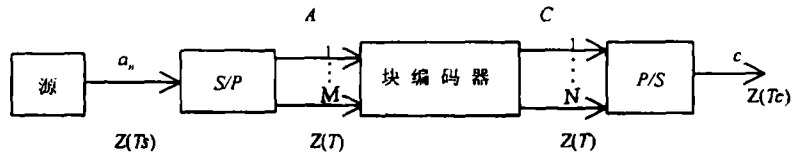


图 1 块码编码器框图

模型中各符号序列关系描述如下:

(1) 串-并转换 输入 $a(t), t \in Z(Ts)$, 输出 $A(t), t \in Z(T)$, $A^i(t) = a(t + (i - 1)Ts)$, $1 \leq i \leq M, t \in Z(T)$.

(2) 块编码器 输入源信息块为 $A(t)$, 输出编码信息块为 $C(t)$, $t \in Z(T)$, 编码器状态为 $S(t) \in \xi = \{\sigma_1 \cdots \sigma_I\}$, $S(t + T) = g(S(t), A(t))$, $C(t) = h(S(t), A(t))$, $g(\cdot, \cdot), h(\cdot, \cdot)$ 为适当的映射.

(3) 并-串转换 输入编码块序列 $C(t), t \in Z(T)$. 输出为编码符号序列 $c(t), t \in Z(Tc)$, $C^j(t) = c(t + (j - 1)Tc)$, $1 \leq j \leq N, t \in Z(T)$.

由此可看出, S/P , P/S 都是线性变换, 计算时较易处理, 而编码器都是非线性变换, 直接求相关函数比较困难. 因此为简化计算, 采用一个我们熟悉的有限状态机 (Finite state sequential machine) 模型来描述它, 并推导它的状态转移图 (图 2).

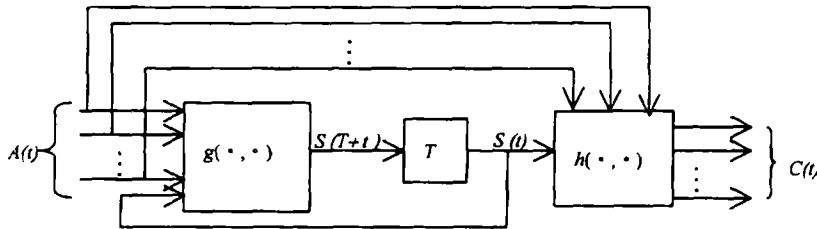


图 2 有限状态机 (FSSM) 模型框图

模型输入分两部分, 输入 $A(t), S(t)$, 输入 $S(t + T)$ 和 $C(t)$ 的无记忆部分, 以及有记忆的 $S(t + T) \rightarrow S(t)$, 为了用矩阵表示, 记输入 $A(t) \in \{\alpha_1 \cdots \alpha_k\}$, 其中输入 α_u 可写成行向量, 输出 $C(t) \in \{\gamma_1 \cdots \gamma_J\}$.

对状态转移函数 $g(\cdot, \cdot)$ 有 $S(t + T) = g\{S(t), A(t)\}$, 对输出函数 $h(\cdot, \cdot)$ 有 $C(t) = h\{S(t), A(t)\}$, 对状态 σ_i 可写为行向量形式, 定义转移状态 $\sigma_j \triangleq g(\sigma_i, \sigma_u)$ 含义为当输入 σ_u , 当前状态为 σ_i 条件下, 转移到状态 σ_j , 由此以各种状态为顶点可画出状态转移图, 也可列出状态转移表, 为此定义状态转移矩阵 $E_u(I \times I)$:

$$E_u(i, j) \triangleq \begin{cases} 1, & g(\sigma_i, \sigma_u) = \sigma_j; \\ 0, & \text{其它.} \end{cases}$$

输出矩阵 $\Gamma_u(I \times N)$, $\gamma_{iu} \triangleq h(\sigma_i, \sigma_u)$.

一般输入集 $\{0, 1\}$, 假设输入序列 $a(t)$ 是一个平稳无记忆的源, 且 $P = P\{a(t) = 1\}$, $q = 1 - p$, 则可定义 $q_u = p^{M_u} q^{M - M_u}$ 为源码字的概率, 其中 M_u 为源码字中 1 的个数. Paz 等已证明, 状态序列是一个无记忆的马尔可夫链, 其转移概率矩阵为

$$\Pi = \sum_{u=1}^K q_u E_u.$$

就 8B/10B 线路码而言，我们选用 Triquint 公司的 TQ9303 中所采用的 8B/10B 线路码进行分析。见文献 [6]。

设 σ_1 表示运行数字和为负的状态， σ_2 表示运行数字和为正的状态；并假设输出码运行数字和为 0 时状态保持不变，则状态转移表如表 1 所示。其状态转移图如图 3 所示。

表 1 状态转移表 (文献 [6])

U	α_u	σ_1	σ_2
1	00000000	1001110100 σ_1	0110001011 σ_2
2	00000001	0111010100 σ_1	1000101011 σ_2
3	00000010	1011010100 σ_1	0100101011 σ_2
4	00000011	1100011011 σ_2	1100010100 σ_1
5	00000100	1101010100 σ_1	0010101011 σ_2
6	00000101	1010011011 σ_2	1010010100 σ_1
7	00000110	0110011011 σ_2	0110010100 σ_1
8	00000111	1110001011 σ_2	0001110100 σ_1
⋮	⋮	⋮	⋮
256	11111111	1010110001 σ_1	0101001110 σ_2

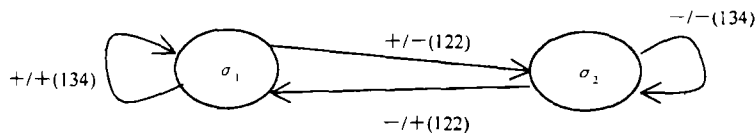


图 3 8B/10B 状态转移图

注：图中 +/- 表示输入状态 / 输出状态，(⋯) 表示状态转移数。
状态转移矩阵如表 2。

表 2 状态转移矩阵

$E_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$E_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$E_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$E_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
$E_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$E_6 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$E_7 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	⋯
$E_{256} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$			

输出矩阵如表 3。

表 3 输出矩阵

$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} 1001110100 \\ 0110001011 \end{bmatrix}$,	$\Gamma_2 = \begin{bmatrix} 0111010100 \\ 1000101011 \end{bmatrix}$,	$\Gamma_3 = \begin{bmatrix} 1011010100 \\ 0100101011 \end{bmatrix}$
$\Gamma_4 = \begin{bmatrix} 1100011011 \\ 1100010100 \end{bmatrix}$,	$\Gamma_5 = \begin{bmatrix} 1101010100 \\ 0010101001 \end{bmatrix}$,	$\Gamma_6 = \begin{bmatrix} 1010011011 \\ 1010010100 \end{bmatrix}$
$\Gamma_7 = \begin{bmatrix} 0110011011 \\ 0110010101 \end{bmatrix}$,	...	$\Gamma_{256} = \begin{bmatrix} 1010110001 \\ 0101001110 \end{bmatrix}$

当 $p = q = 0.5$ 时,

$$\Pi = \sum_{u=1}^{256} q_u E_u = \begin{bmatrix} 0.5234375 & 0.4765625 \\ 0.4765625 & 0.5234375 \end{bmatrix}$$

由

$$\left. \begin{array}{l} \pi = \pi \Pi \\ \sum_{i=1}^2 \pi_i = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow \pi = \frac{1}{2} [1, 1],$$

最后可求出 $p=0.5$ 时的连续功率谱为

$$\begin{aligned} |W_c(f)| = \frac{1}{512000} \times & \left(5256842e^{10\alpha} - 192e^{28\alpha} - 192e^{-8\alpha} - 192e^{-9\alpha} \right. \\ & - 248368e^{13\alpha} - 53336e^{17\alpha} + 32448e^{21\alpha} + 18485e^{19\alpha} + 18485e^{\alpha} \\ & - 16139e^{2\alpha} - 53336e^{3\alpha} - 109658e^{4\alpha} - 105095e^{5\alpha} - 124010e^{6\alpha} \\ & - 248368e^{7\alpha} - 1169481e^{9\alpha} + 32448e^{-\alpha} + 16512e^{-2\alpha} \\ & + 608e^{-3\alpha} - 2176e^{-4\alpha} - 1472e^{-5\alpha} - 594931e^{8\alpha} \\ & + 384e^{6\alpha} - 271808e^{20\alpha} - 105095e^{15\alpha} - 109658e^{16\alpha} \\ & - 16139e^{18\alpha} - 594931e^{12\alpha} - 1169481e^{11\alpha} - 192e^{29\alpha} \\ & - 124010e^{14\alpha} - 2176e^{24\alpha} + 608e^{23\alpha} - 1472e^{25\alpha} \\ & \left. + 384e^{26\alpha} + 16512e^{22\alpha} - 2718087 \right) / (64e^{10\alpha} - 3)(-64 + 3e^{10\alpha}), \end{aligned}$$

其中 $\alpha = j2\pi f$.

其功率谱曲线见图 4, 同时也画出了 p 为其他值时的曲线。为作比较, 也在图 5 给出了 AMI 和修正双二进制码及 3B/4B 码的功率谱曲线。由此可见, 8B/10B 码大部分能量集中在码速的二分之一处, 对高频和低频分量有较好的抑制特性, 由于其冗余度较小, 再加上器件工艺特性的提高, 所以 8B/10B 码适合于千兆以太网中的高速数据传输。

3 结 束 语

本文利用美国 Triquint 公司的 8B/10B 编码表, 给出了状态转移图, 状态转移矩阵, 利用 Cariolaro 算法计算了 $p=0.5$ 时 8B/10B 码的功率谱, 并画出了功率谱密度曲线, 分析了千兆以太网应用 8B/10B 码的原因。

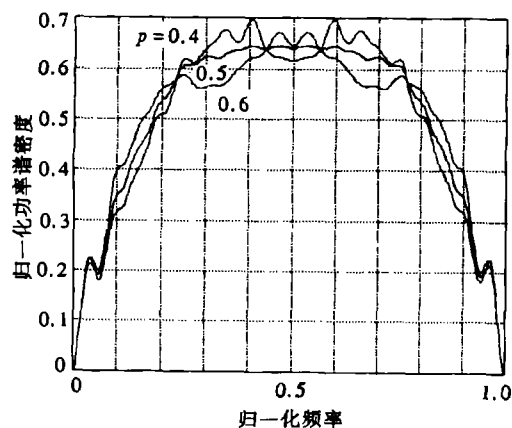


图 4 8B/10B 的功率谱

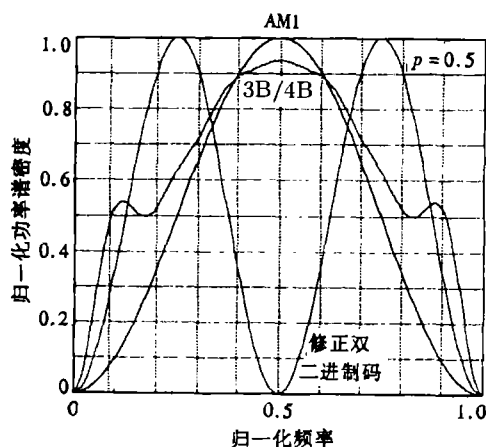


图 5 AMI, 3B/4B, 修正双二进制码功率谱

参 考 文 献

- [1] 突破网络传输瓶颈, 每周电脑, 1998 年 6 月 8 日.
- [2] 迈向千兆网, 计算机世界, 1998 年 8 月 31 日.
- [3] Takasaki Y. Digital Transmission Design and Jitter Analysis. Boston: Artech House 1991, 37-43.
- [4] Fair J, Grover W D. Guided scrambling: A new line coding technique for high bit rate optic transmission systems, IEEE Trans. on Communication, 1991, 39(2): 289-296.
- [5] Cariolaro L. Analysis of codes and spectra calculation. Int. J. Electronics, 1983, 55(1): 35-79.
- [6] Telecom Datacom & System Timing, Triquint Databook, 1998.

THE POWER SPECTRUM ANALYSIS OF 8B/10B LINE CODE
IN GIGABIT ETHERNET

Kong Lingjiang Fan Luhong Zhou Zhengou

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract On the base of a finite state sequential machine, the well known Cariolaro's algorithm is used, namely the transition probability matrix method, to analyze the power spectrum of 8B/10B line code used in gigabit ethernet, and to give the closed-form solution and the curve of the power spectrum density.

Key words FSSM, 8B/10B, Power spectrum, Line code

孔令讲: 男, 1974 年生, 博士生, 现主要从事信号处理、数据传输、光通信方面的研究.

范录宏: 男, 1966 年生, 讲师, 博士生, 现主要从事信号处理、高速 A/D、D/A 转换、光纤数据传输等领域的教学和研究.

周正欧: 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事信号处理、数据通信、光纤数据传输等领域的教学和研究.