

# 一种纠突发错误的有效方法\*

王贺明

(郑州工学院)

**摘 要:** 为了实现恶劣环境下的计算机通信, 本文在分析复数旋转码的基础上, 提出了在复数旋转码中采用交错收发数据的数据处理方法。分析结果表明, 复数旋转码采用交错收发数据之后, 具有很强的纠突发错误能力, 为 HF 和电话模拟信道的计算机通信提出了一种有效的纠突发错误方法。

**关键词:** 计算机通信, 突发错误, 复数旋转码, 差错控制

**中图分类号:** TP274

在计算机的远程通信和近程通信中无论是使用无线信道或是使用有线信道, 信道中心然存在噪声干扰, 所以, 通信过程中不可避免要出现数据传输错误。数据传输的错误有两种, 一种是随机错误, 另一种是突发错误。对于既有随机离散分布错误, 又有突发高密度错误的混合信道而言, 对数据传输质量损伤严重的主要是那些密集性的突发错误<sup>[1]</sup>。特别是高频无线信道和电话模拟信道的突发性干扰尤为严重。

差错控制是提高传输可靠性的重要手段, 因此探索各种形式的检错码和纠错码, 一直是近年来信息、通信以及计算机技术中的一个十分活跃的领域<sup>[2]</sup>。现今世界范围内, 凡使用循环码(如 BCH 码)对通信系统, 包括计算机网络进行差错控制的, 大都仅限于检错, 个别的纠一位或两位错, 纠三位以上的情形尚属少见<sup>[3]</sup>。

复数旋转码自 1983 年由西南交通大学靳蕃教授发明以来, 由于在编译码方面具有良好的模块结构、很强的自适应性和多位纠错能力以及码结构简单、使用方便等特点一直受到国内外通信理论界及工程界的重视, 同时, 复数旋转码可以最大限度的利用计算机存储容量大、运算速度快的特点来发挥自身的长处。因此, 本文把复数旋转码作为差错控制的基本码, 采用复数旋转码同交错发送数据相结合的方法, 以此来探讨计算机通信中纠正长突发错误的有效途径。

---

\* 收稿日期: 1993-05-11

1 复数旋转码编译码原理

在计算机与计算机之间的通信中, 将被传送的内容用 0, 1 码表示, 这些 0, 1 码被称为信息元, 传送时, 将信息元分成组, 每组按一定的编码规则附上对应的监督元, 当信息元和监督元从发送端送到接收端后, 接收端按一定的译码规则对经过传输信道受到噪声干扰的信息元按约好的规则进行译码, 如果信息元传输出错, 译码中便会发现且进行纠错。复数旋转码就是具备这种纠错能力的线性分组码。

下面简述复数旋转码的编、译码原理和方法。

1.1 复数旋转码的编码

本文选用  $p=3$  ( $p$  是复数旋转码所取信息元方阵的阶数) 的信息元方阵, 即:

$$M_3 = \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ G & H & I \end{bmatrix} \tag{1}$$

然后根据下式

$$n_{i,j} = \begin{cases} \bigoplus_{k=0}^{p-1} m_{(1+LK)_{modp}}, K & L=0, 1, \dots, p-1 \\ p-1 \\ \bigoplus_{s=0}^{p-1} m_{s,i} & (\text{当 } L=p \text{ 时}) \end{cases} \tag{2}$$

产生以下监督矩阵:

$$N_{3,4} = \begin{bmatrix} n_{0,0} & n_{0,1} & n_{0,2} & n_{0,3} \\ n_{1,0} & n_{1,1} & n_{1,2} & n_{1,3} \\ n_{2,0} & n_{2,1} & n_{2,2} & n_{2,3} \end{bmatrix} \tag{3}$$

可以将复数旋转码的编码结构用图 1 表示:

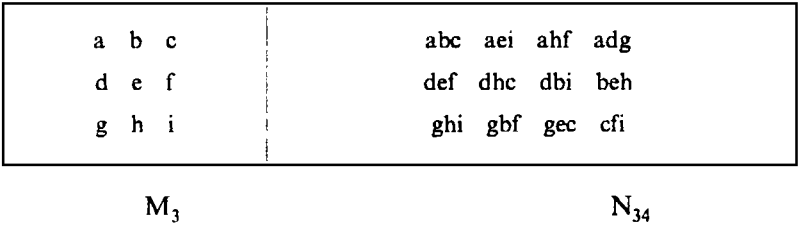


图 1  $p=3$  阶复转码编码结构

图 2 是一个  $p=3$  的信息元方阵  $M_3$  及其根据式 (2) 所产生的监督矩阵  $N_{3,4}$  的具体编码示意图

## 1.2 复数旋转码的译码

1	0	1	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0	1
1	0	0	1	0	1	0

图 2  $p=3$  阶复转码编码具体实例

信息元方阵  $M_3$  及监督元矩阵  $N_{3,4}$  经过信道传输后, 由于信道存在噪声干扰, 接收端接收到受到噪声干扰的信息矩阵记为  $M'_3$ , 接收到受到噪声干扰的监督矩阵记为  $N'_{3,4}$ , 然后将  $M'_3$  用式 (2) 编码产生又一个监督矩阵  $N'_{3,4}$ , 将  $N'_{3,4}$  与  $N''_{3,4}$  按对应位进行模 2 和计算, 由此产生伴随式矩阵  $S_{3,4}$ , 根据  $S_{3,4}$  中“1”出现的位置及个数判断或纠正信息阵  $M'$  中受信道干扰所出现的错误码元。其方法与过程如下:

如果  $M'$  中第  $i$  行,  $k$  列信息码元变化, 则  $N''$  中  $n_{i+(p-k) \cdot L, L}$  ( $L=0, 1, \dots, 2t_c-1$ ,  $t_c$  为选定  $p$  值后复数旋转码的纠错能力) 共  $2t_c$  个监督元随  $i$  变化, 在  $S_{pq}$  相应  $2t_c$  个位置上出现“1”。如将  $S_{pq}$  的第  $L$  列集资逆向旋转  $LK$  次 ( $L=0, 1, \dots, 2t_c$ ), 则  $2t_c$  个“1”会旋转到同一  $i$  行上来。经  $LK$  次逆向旋转,  $2t_c$  个“1”所在行即是错误码元所在行,  $k$  即是错误码元所在列, 在  $M'$  中变化了的码元的位置便可准确确定。位置确定之后, 对该位置上的码元取反, 受到噪声干扰的码元便可得到纠正。

图 3 是  $p=3$  的信息元矩阵编码、译码过程

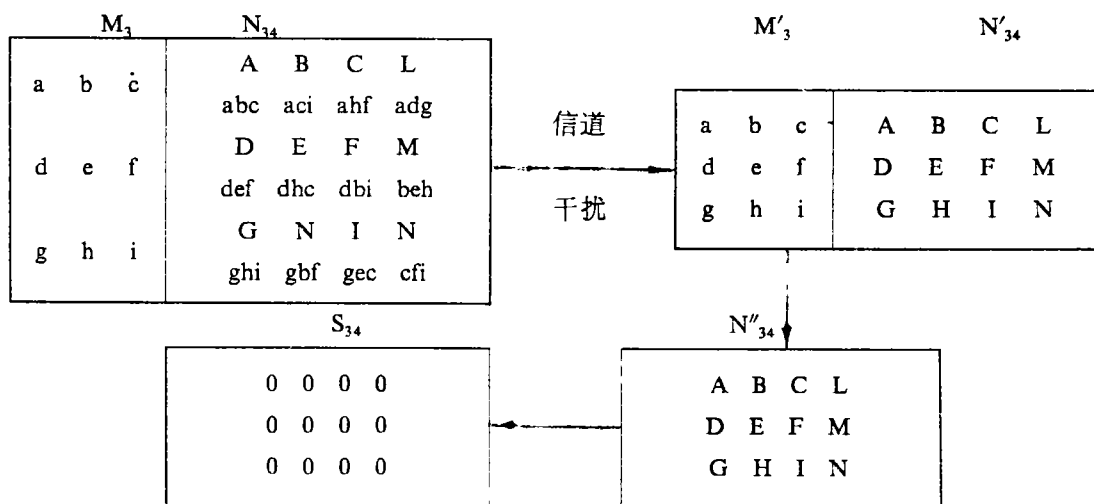


图 3 编译码全过程

## 2 纠突发错误方案

## 2.1 复数旋转码三维阵的定义与结构

定义: 根据复数旋转码的定义, 元素  $m_{ik}$  构成  $p \times q$  阶旋转阵, 把由  $p \times q$  个元素组

成的  $p \times q$  阶旋转阵看成是页, 则元素  $m_{i,k,r} [m_{i,k,r} \in GF(q), (i=0, 1, \dots, p-1, k=0, 1, \dots, q-1, r=0, 1, \dots, \infty)]$  构成  $p \times q \times r$  阶三维阵, 由定义可知,  $p \times q \times r$  三维阵是由  $r$  页  $p \times q$  阶复数旋转码组成, 如图 4 所示。

$$\begin{bmatrix} m_{0,0,r} & m_{0,1,r} & \dots & m_{0,p-1,r} \\ m_{1,0,r} & m_{1,1,r} & \dots & m_{1,p-1,r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{p-1,0,r} & m_{p-1,1,r} & \dots & m_{p-1,p-1,r} \end{bmatrix}$$

.....

$$\begin{bmatrix} m_{0,0,1} & m_{0,1,1} & \dots & m_{0,p-1,1} \\ m_{1,0,1} & m_{1,1,1} & \dots & m_{1,p-1,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{p-1,0,1} & m_{p-1,1,1} & \dots & m_{p-1,p-1,1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} m_{0,0,0} & m_{0,1,0} & \dots & m_{0,p-1,0} \\ m_{1,0,0} & m_{1,1,0} & \dots & m_{1,p-1,0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{p-1,0,0} & m_{p-1,1,0} & \dots & m_{p-1,p-1,0} \end{bmatrix}$$

图 4 复转码三维阵结构

## 2.2 纠突民错方案

根据上面定义,  $r$  页 ( $r$  在理论上可取任意大, 实际应用视具体要求而定) 复数旋转码组成复数旋转码三维阵  $M_{p,q,r}$ , 每一页信息元根据编码规则产生一页对应的监督矩阵  $N_{p,q,i}$ ,  $r$  页信息元将产生  $r$  个监督矩阵  $N_{p,q,r}$ , 把三维信息阵  $M_{p,q,r}$  与三维监督阵  $N_{p,q,r}$  按对应关系组成下列新的三维阵, 如图 5 所示。

在数据向接收端发送前, 使用交错处理将复转码三维阵以页为单位排成行,  $r$  页复数旋转码排成  $r$  行, 如图 6 所示。

每一行有  $(p+q) \times p$  列, 发送端发送这些码字时从每行每次取一个码元, 直到把  $r$  行的第一个码元取完, 然后再取每一行的第二个码元, 其顺序如下:

$$\begin{aligned} & (m_{0,0,0}, m_{0,0,1}, \dots, m_{0,0,i}, m_{0,1,0}, m_{0,1,1}, \dots, m_{0,1,i}, m_{0,2,0}, m_{0,2,1}, \dots, m_{0,2,i}, m_{0,3,0}, m_{0,3,1}, \dots, m_{0,3,i}, m_{0,4,0}, \\ & m_{0,4,1}, \dots, m_{0,4,i}, \dots, m_{0,p-1,0}, m_{0,p-1,1}, \dots, m_{0,p-1,i}, N_{0,0,0}, N_{0,0,1}, \dots, N_{0,0,i}, N_{0,1,0}, N_{0,1,1}, \dots, N_{0,1,i}, \dots \\ & N_{0,q-1,0}, m_{1,0,0}, m_{1,0,1}, \dots, m_{1,0,i}, m_{1,1,0}, m_{1,1,1}, \dots, m_{1,1,i}, m_{1,2,0}, m_{1,2,1}, \dots, m_{1,2,i}, \dots, m_{1,p-1,0}, N_{1,0,1}, N_{1,0,2}, \\ & \dots, N_{1,0,i}, N_{1,1,0}, N_{1,1,1}, \dots, N_{1,1,i}, \dots, N_{1,q-1,0}, \dots, m_{p-1,0,0}, m_{p-1,0,1}, \dots, m_{p-1,0,i}, m_{p-1,1,0}, m_{p-1,1,1}, \\ & \dots, m_{p-1,1,i}, m_{p-1,2,0}, m_{p-1,2,1}, \dots, m_{p-1,2,i}, m_{p-1,3,0}, m_{p-1,3,1}, \dots, m_{p-1,p-1,0}, N_{p-1,0,0}, N_{p-1,0,1}, \dots, N_{p-1,0,i}, \\ & N_{p-1,1,0}, N_{p-1,1,1}, \dots, N_{p-1,1,i}, N_{p-1,2,0}, N_{p-1,2,1}, \dots, N_{p-1,2,i}, \dots, N_{p-1,q-1,0}) \end{aligned}$$

接收端收到此序列之后, 将其序列仍排成复数旋转码三维阵, 其目的在于恢复复数旋转

码阵以便于使用复数旋转码的译码方法进行检错和纠错。

$$\begin{bmatrix} m_{0,0,r} & m_{0,1,r} & \cdots & m_{0,p-1,r} & n_{0,0,r} & n_{0,1,r} & \cdots & n_{0,q-1,r} \\ m_{1,0,r} & m_{1,1,r} & \cdots & m_{1,p-1,r} & n_{1,0,r} & n_{1,1,r} & \cdots & n_{1,q-1,r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m_{p-1,0,r} & m_{p-1,1,r} & \cdots & m_{p-1,p-1,r} & n_{p-1,0,r} & n_{p-1,1,r} & \cdots & n_{p-1,q-1,r} \end{bmatrix}$$

.....

$$\begin{bmatrix} m_{0,0,1} & m_{0,1,1} & \cdots & m_{0,p-1,1} & n_{0,0,1} & n_{0,1,1} & \cdots & n_{0,q-1,1} \\ m_{1,0,1} & m_{1,1,1} & \cdots & m_{1,p-1,1} & n_{1,0,1} & n_{1,1,1} & \cdots & n_{1,q-1,1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m_{p-1,0,1} & m_{p-1,1,1} & \cdots & m_{p-1,p-1,1} & n_{p-1,0,1} & n_{p-1,1,1} & \cdots & n_{p-1,q-1,1} \end{bmatrix}$$

.....

$$\begin{bmatrix} m_{0,0,0} & m_{0,1,0} & \cdots & m_{0,p-1,0} & n_{0,0,0} & n_{0,1,0} & \cdots & n_{0,q-1,0} \\ m_{1,0,0} & m_{1,1,0} & \cdots & m_{1,p-1,0} & n_{1,0,0} & n_{1,1,0} & \cdots & n_{1,q-1,0} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m_{p-1,0,0} & m_{p-1,1,0} & \cdots & m_{p-1,p-1,0} & n_{p-1,0,0} & n_{p-1,1,0} & \cdots & n_{p-1,q-1,0} \end{bmatrix}$$

图 5 信息元与监督元三维阵

$$\begin{aligned}
 & m_{0,0,0}, m_{0,1,0}, \cdots, m_{0,p-1,0}, N_{0,0,0}, N_{0,1,0}, \cdots, N_{0,q-1,0}, \\
 & m_{1,0,0}, m_{1,1,0}, \cdots, m_{1,p-1,0}, N_{1,0,0}, N_{1,1,0}, \cdots, N_{1,q-1,0}, \\
 & \cdots \cdots \cdots \\
 & m_{p,0,0}, m_{p,1,0}, \cdots, m_{p,p-1,0}, N_{p,0,0}, N_{p,1,0}, \cdots, N_{p,q-1,0}, \\
 & m_{0,0,1}, m_{0,1,1}, \cdots, m_{0,p-1,1}, N_{0,0,1}, N_{0,1,1}, \cdots, N_{0,q-1,1}, \\
 & m_{1,0,1}, m_{1,1,1}, \cdots, m_{1,p-1,1}, N_{1,0,1}, N_{1,1,1}, \cdots, N_{1,q-1,1}, \\
 & \cdots \cdots \cdots \\
 & m_{p,0,1}, m_{p,1,1}, \cdots, m_{p,p-1,1}, N_{p,0,1}, N_{p,1,1}, \cdots, N_{p,q-1,1}, \\
 & \cdots \cdots \cdots \\
 & m_{0,0,i}, m_{0,1,i}, \cdots, m_{0,p-1,i}, N_{0,0,i}, N_{0,1,i}, \cdots, N_{0,q-1,i}, \\
 & m_{1,0,i}, m_{1,1,i}, \cdots, m_{1,p-1,i}, N_{1,0,i}, N_{1,1,i}, \cdots, N_{1,q-1,i}, \\
 & \cdots \cdots \cdots \\
 & m_{p,0,i}, m_{p,1,i}, \cdots, m_{p,p-1,i}, N_{p,0,i}, N_{p,1,i}, \cdots, N_{p,q-1,i},
 \end{aligned}$$

图 6 复数旋转码交错码阵

复数旋转码交错处理过程如图 7 所示。

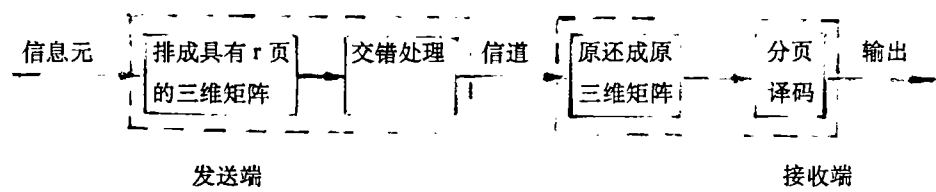


图 7 复转码三维阵交错处理

3 纠突发错误能力分析

当复数旋转码的信息阵的阶数取  $p$  时，复数旋转码可纠  $t_c$  位 $[TT3-[c]=(p+1)/2]$ 错误码元<sup>[4]</sup>。复数旋转码经三维组合后，发送时又按复数旋转码三维阵的纵、列、行顺序发送，所以，当信道中出现  $x$  位突发错误时，落在每一页复转码中只有  $N$  位 $(N=x/r)$  错误码元， $r$  在这里指的是复数旋转码三维阵的纵向列数。因为每一页复数旋转码的纠错能力为  $t_c$  位，所以只要  $N \leq t_c$ ，则由信道干扰产生的连续性突发错误可全部得到纠正，若将  $N$  取最大值  $N=t_c$ ，则复数旋转码三维阵的纠突发错能力为：

$$t_b = r t_c \tag{4}$$

例如，取  $p=5$  的  $(55, 25, 7)$  复转码，其纠错能力为  $t_c=3$  位，若取三维阵纵向列数为 10，则  $p=5$  的复数旋转码三维阵可纠  $t_b = r t_c = 10 \times 3 = 30$  位连续突发错。

从以上分析可知，若要抗击较长突发错误，在选定复数旋转码的阶数  $p$  值之后可选择大的  $r$  值。

又例如，杭州一用户提出利用 HF 信道进行计算机通信时，每分钟通过 8K 字节的信息，当突发错误  $\leq 10\text{ms}$  时应能正常工作。选  $p=5$  的  $(55, 25, 7)$  复转码作为页码，考虑到附加的监督元，取信息传输速率为 2400bps。当出现突发错误时，10ms 的突发干扰将会引起 24 位码元的错误，这时只要取 8 页复数旋转码 $(r=t_b/t_c)$ 组成三维阵，用于提出的纠 10ms 以内的突发错误的问题便可解决。

以上所采用的交错处理数据的方法用 TURBO PASCAL 语言编制了复数旋转码编、译码程序，取  $p=5$  的  $(55, 25, 7)$  复转码作页码，三维阵纵向列数取 8，用计算机模拟 24 位突发错误，在 AST486 微计算机上运行实验了 1000 次，所有的突发错误全部得到纠正，其实验结果证明了纠突发错方案的正确性。

4 结束语

本文提出了复数旋转码三维阵结构，从而可以方便地使用交错处理数据的方法，无论是从理论分析还是编程仿真都有力地证明了复数旋转码采用交错处理方法后对于提高其纠

突发错能力是十分显著的。

本文提出的差错控制方案不仅可用于突发干扰信道的计算机通信, 同时也可用于混合信道的计算机通信。

本文在撰写过程, 始终得到了西南交通大学靳蕃教授的指导和帮助, 在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- 1 李希武. 采用级性码充分发挥扩散卷积码对突发错误的纠正能力. 通信技术与发展. 1992. 4
- 2 靳蕃. 新型复数旋转码的特性分析. 通信学报. Vol. 7 No. 2, 1986. 3
- 3 彭晓红. 复数旋转码的译码原理分析. 西南交通大学学报, No. 2. 1987
- 4 靳蕃. 信息论与编码. 中国铁道出版社. 1991
- 5 王贺明. 史燕. 电话网上实现数据通信的若干分析. 西南交通大学研究生学报, No. 2, 1992
- 6 王新梅. 纠错码与差错控制. 人民邮电出版社. 1989
- 7 Jin Fan. An Investigation on New Complex Rotary codes, International Symposium on Information Theory, Brighton England, 1985
- 8 H.J. Matt and J.L. Massey. Determining the Burst Error-Correcting limit of Cyclic code, IEEE Trans IT pp. 289-297, 1980

## An Effective Method of Correcting Burst Error

Wnag Heming

(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** In this paper, based on the analysing of complex rotary codes, a processing approach is proposed which adopts transposed transmitting-receiving method in complex rotary codes, to realize computer communication in bad conditions. The result shows that the method has a powerful capability to correct burst error. It provides an effective error control method for HF and telephone simulated channels' computer communication.

**Keywords:** Computer communication, burst error, complex rotary codes, error control.