

一种适用于流星余迹通信系统的网格编码调制技术

丁梦川¹, 张涛¹, 任文成^{1,2}, 王建亮³, 王伟¹, 杨晓雷¹

(1. 中国电子科技集团公司第54研究所, 石家庄 050081;

2. 通信网信息传输与分发技术重点实验室, 石家庄 050000;

3. 空装驻石家庄地区军代室, 石家庄 050002)

摘要: 流星余迹通信信道具有短时突发传输的特点, 为了在有限的传输时间内尽可能多的传输有用信息, 达到提高传输速率及改善系统可通量的目的, 提出了一种适用于流星余迹通信系统的网格编码调制(TCM)技术; 将8PSK恒包络调制方式与TCM相结合以充分利用系统的发射功率; 为了降低TCM算法的误码率, 将传统TCM中的卷积编码替换为Turbo码, 形成了TTTCM-8PSK算法; 通过选取性能优异的交织参数与码长进一步改善误码性能; 在译码时对迭代的外部信息和分支转移概率进行加权处理, 降低算法的复杂度; 仿真结果表明: 与常用的RS编码及BPSK/QPSK调制方式相比, TTTCM-8PSK算法不仅使流星余迹通信系统的可通量得到了提升, 而且提高了传输可靠性, 为下一代流星余迹通信系统研制提供了理论基础。

关键词: 流星余迹通信; TCM; Turbo码; QPP交织; 外部信息; 分支转移概率

Research on Trellis Coded Modulation Suitable for Meteor Trail Communication System

DING Mengchuan¹, ZHANG Tao¹, REN Wencheng^{1,2}, WANG Jianliang³,
WANG Wei¹, YANG Xiaolei¹

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

2. Science and Technology on Communication Networks Laboratory, Shijiazhuang 050000, China;

3. Military Representative Office of PLA Air Force Stationed in Shijiazhuang Region, Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: Meteor trail communication has the characteristics of short-time burst transmission. In order to transmit as much useful information as possible in a limited transmission time, to improve the transmission rate and the system throughput, the Trellis Coded Modulation (TCM) technology suitable for meteor trail communication channel is proposed. Combine 8PSK constant envelope modulation with TCM to make full use of the transmission power of the system; In order to reduce the bit error rate of TCM algorithm, TTTCM-8PSK algorithm is formed by replacing convolutional coding with turbo coding; The error rate performance is further improved by selecting the interleaving parameters and code length with excellent performance; In decoding, the external information of iteration and branch transition probability are weighted to reduce the complexity of the algorithm. The simulation results show that: Compared with the common RS coding and BPSK/QPSK modulation, the TTTCM-8PSK algorithm not only improves the throughput, but also improves the bit error performance. It can effectively improve the throughput of meteor trail communication system, and provide a theoretical basis for the development of the next generation meteor trail communication system.

Keywords: meteor trail communication; TCM; Turbo code; QPP interleaving; external information; branch transition probability

0 引言

当流星进入地球表面时, 与大气层摩擦燃烧而形成瞬时存在的电离余迹, 该电离余迹对电磁波具有较强的反射作用, 流星余迹通信^[1] (以下简称“流星余迹通信”)正是利用这种电离余迹对电磁波的反射作用而实现的一种无线通信方式。迄今为止, 流星余迹通信在应急救援^[2-3]、数据采集^[4]等民用及军用领域发挥着重要作用。然而随着人们对传输带宽需求^[5]的不断增长, 以短时突发传输为特点的流星余迹通信也面临着一些亟待解决的问题, 其中比较棘手的问题便是如何在有限的传输时间内, 尽可能多地传输有用信息^[6], 提高系统的传输速率,

从而满足用户不断增长的“可通量”^[7]指标需求。这对于开展我国下一代流星余迹通信设备研制及满足未来民用及军用等领域的流星余迹通信设备使用需求具有重要的意义。

网格编码调制(TCM)技术^[8]采用集合分割映射的方法, 能够在不增加带宽和发射功率的条件下传输更多的有用信息, 因此在流星余迹通信系统中具有较高地应用价值。近年来, 国内外有不少研究聚焦于此, ROBERT^[9]等人对流星余迹信道环境下各种调制方式的“可通量”进行了研究, 发现将TCM和高阶PSK调制方式相结合具有优越性能, 其中TCM与QPSK相结合的可通量大约是二进制频移键控

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-10-18。

基金项目: 通信网信息传输与分发技术国家级重点实验室基金(FFX22641X010)。

作者简介: 丁梦川(1998-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事流星余迹通信下的信道编译码技术方向的研究。

通讯作者: 张涛(1968-), 男, 山东德州市人, 研究员, 主要从事无线通信系统方向的研究。

引用格式: 丁梦川, 张涛, 任文成, 等. 一种适用于流星余迹通信系统的网格编码调制技术[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 244-250.

(BFSK) 调制方式的 2.6 倍。刘志雄^[10]等人采用自适应符号速率的技术, 并将更高阶的 16 QAM 调制方式与 TCM 相结合, 发现在流余信道环境中, 可通量性能相较固定符号速率方式得到了 2.37 倍的改善, 然而目前流余系统^[11]功放一般工作在饱和状态, 采用高阶调制方式对功放线性度要求较高, 缺乏工程实用手段, 所以在一般情况下还是以恒包络调制为宜。

近年来, 信道编译码技术^[12-13]取得了长足的进步, 其中 Turbo 码^[14]作为一种非常接近香农容量的信道编码方式, 最初是由 BERROU 等人^[15]提出, 并且研究发现在加性白高斯信道 (AWGN) 环境中、低信噪比条件下 Turbo 码仍具有非常优秀的性能。随后为了能够兼顾编码性能与带宽效率, ROBERTSON^[16]等人将 Turbo 码的迭代译码概念引入到 TCM 技术中去, 研究结果表明与经典的 TCM 和 Ungerboeck 子码相比, 性能有了显著改进, 并且在相同复杂度下, 性能优于 Gray 映射下的 Turbo 码。其中在文献 [10] 中首次提出将 TTCM 编码调制技术应用到流余通信系统, 来提高频谱利用率, 增加流余通信的系统容量, 该技术对增大流星可用数目, 延长流星可用时间^[17]具有重要意义。

本文将 8 PSK 恒包络调制方式与 TTCM 编码调制技术相结合, 并对其在流余信道中的应用进行了研究和性能分析。通过对译码时迭代的外部信息和分支转移概率^[18]进行加权处理, 降低了译码复杂度; 然后采用 8 PSK 恒包络调制技术, 不仅可有效提高传输速率, 而且还充分利用了流余通信系统的功率资源; 最后根据流余信道的特点, 对 QPP 交织参数和码长进行选取, 形成了流余通信系统中的 TTCM-8 PSK 算法。通过性能比较, 发现 TTCM-8 PSK 算法在提升吞吐量的同时, 还提高了传输的可靠性, 验证了该算法在流余通信系统中的可行性。

1 信道模型

流余信道受其自身余迹扩散等物理特性以及风切、电离层和噪声干扰等外界因素的影响, 信道环境十分恶劣, 工作频率仅在 35 ~ 55 MHz 之间, 带宽严重受限。通过 ESHLEMAN 等人研究, 可以根据电子线密度大小把余迹分成欠密类和过密类两种形式, 两者都采用随机突发方式传送信息, 瞬时将信息传送出去, 峰值功率较大。观测发现超过 90% 的流星余迹都属于欠密类余迹, 数量远远大于过密类余迹, 所以本文主要针对稀疏 (单个) 欠密类余迹进行研究。其信号功率与信道设备参数存在以下关系:

$$\frac{P_R(t)}{P_T} = \frac{G_T G_R \lambda^3 q^2 r_e^2 \sin^2 \alpha}{16\pi^2 R_T R_R (R_T + R_R) (1 - \cos^2 \beta \sin^2 \varphi)} \cdot \exp\left(-\frac{8\pi^2 r_0^2}{\lambda^2 \sec^2 \varphi}\right) \cdot \exp\left(-\frac{32\pi^2 D t}{\lambda^2 \sec^2 \varphi}\right) \quad (1)$$

式中, P_T 是发射功率; G_T 、 G_R 是发射天线与接收天线的增益; λ 是工作波长; q 是余迹电子线密度; R_T 、 R_R 是发射点和接收点到余迹处的距离, φ 是入射波与在余迹处反射波夹角的一半; β 是余迹与 φ 所在的传播平面的夹角; α 是入射波电场矢量与在余迹上反射的电场矢量的夹角; r_0^2 是

电子的等效半径; r_0^2 是余迹的初始半径; D 是余迹在空中的扩散系数。

为了更好地理解稀疏欠密类余迹的传播机理, 了解式 (1) 中各参数的物理意义, 作出了流余信道的信号散射路径图:

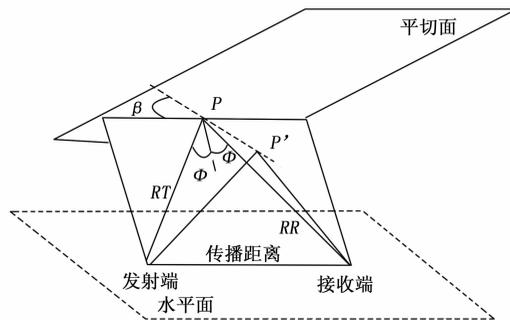


图 1 流余信道信号散射路径图

在本次仿真过程中, 设置发射端与接收端的距离 L 为 800 km, 余迹发生的高度在 85 km, 余迹初始半径在 0.01 ~ 1.2 m 之间, 此时余迹的扩散系数 D 为 1 m²/s, 相关的角度可通过 L 、 R_T 、 R_R 以及地球半径等参数的几何关系计算得到, $P_R(0)$ 是接收信号功率的峰值, 正比于 $\lambda^3 q^2$ 。

经过稀疏欠密类余迹反射后, 接收端的信号功率波形如图 2 所示。

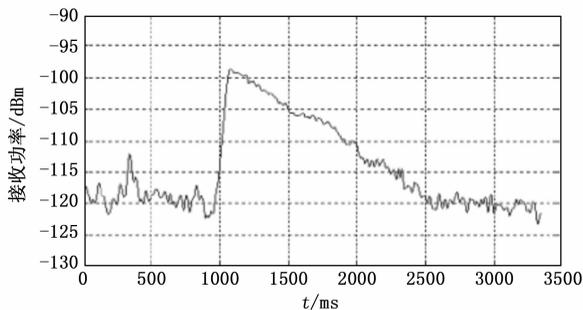


图 2 稀疏欠密类余迹信号波形图

从图 2 中可以看到: 稀疏欠密类余迹接收信号会在很短的时间内功率达到峰值, 然后根据衰减因子进行指数快速衰减, 功率严重受限, 信号时间仅持续几百毫秒。由于信号持续时间很短, 可以看作瞬时功率不变, 因此可选用峰值状态作为信号的瞬时接收状态, 本文基于此信道环境进行仿真分析。

2 算法描述

2.1 TTCM 编码算法

TTCM 是一种拥有高频谱利用率高译码性能的编码调制方式, 它将编码和调制两部分结合在一起, 采用子集划分^[19]的原理来设计合适的星座点映射方式, 使每组信号点之间的最小欧式距离足够大。由于编码的存在, 使信号集生成了冗余; 又采用了集合分割映射的方法, 利用大星座传送小比特数而获取纠错能力, 以此保持符号率和发送功率不变。

传统的 TTCM 编码结构^[20]有两种方式：一种是以 TCM 的结构作为主体，用 Turbo 码来代替 TCM 结构中的卷积编码部分，将编码输出经过适当的删余和复用，再送入符号映射器进行符号映射；另一种是以 Turbo 码的结构作为主体，在 Turbo 码的每一分路中引入 TCM 结构，即将 Turbo 码中的每个分量编码器完成编码后进行符号映射，然后再并行传输，本文主要针对第二种结构进行研究。传统的 TTCM 编码结构如图 3 和图 4 所示。

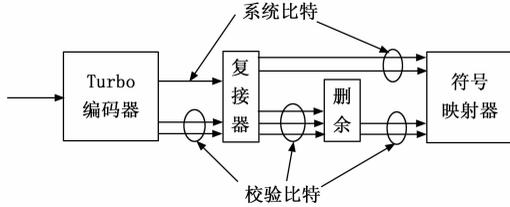


图 3 TTCM1 编码器结构图

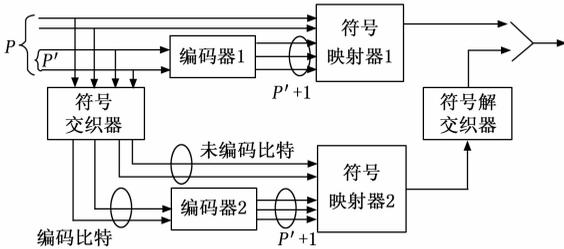


图 4 TTCM2 编码器结构图

从上面两图中可以看到，TTCM 在每一个编码调制间隔内，总共有 P 比特的原始信息输入，其中编码比特为 P' 比特 ($P' \leq P$)，两种结构都通过码率为 $P'/P'+1$ 的卷积编码器。TTCM1 中经过编码输出产生的 $P'+1$ 比特，将从 $2^{P'+1}$ 进制 PSK 中选取集合分割后的固定子集，剩下的未编码比特将从固定子集选取特定的星座点进行映射；TTCM2 的结构类似于 TTCM1 的并行级联形式，将原始信息比特经过符号交织后成为第二路的待编码比特，在映射结束之后再进行符号解交织，最后将两路映射结果交替删余进行输出。值得注意的是，由于输出是两路符号交替删余得到的，所以交织器^[20-21]应该具有奇偶交织的特性，以保证输出能获得全部的原始信息。

递归系统卷积码 (RSC) 码的信息位和校验位是独立进行传输的，在译码时无需进行额外的码字转换，且在任何信噪比下都具有优秀的误比特率性能，因此在上面介绍的两种编码器结构中，采用 RSC 码作为分量编码器。同时，由于 RSC 码的反馈结构可以决定码字之间的最小汉明距离，所以采用能够产生足够大的最小汉明距离的本原多项式作为反馈多项式，其中三次反馈多项式的形式为： $1+x+x^3$ 。本文设计的编码器的生成多项式可以表示为：

$$G(D) = \left[1, \frac{1+D^3}{1+D+D^3}, \frac{1+D^2+D^3}{1+D+D^3}, \frac{1+D+D^2+D^3}{1+D+D^3} \right] \quad (2)$$

上述生成多项式对应的 (3, 2, 3) RSC 码编码如图 5 所示。

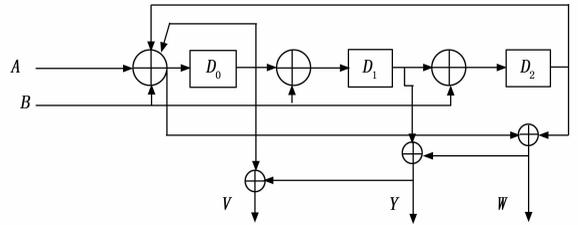


图 5 (3, 2, 3) RSC 码编码框图

图 5 中的编码器由加法器和三级移位寄存器组成，是一个线性系统。其中 A 、 B 为信源序列，每次编码比特为 2 比特， V 、 Y 、 W 为编码输出序列，每次编码输出为 3 比特。

2.2 交织参数的选取

Turbo 码作为 TTCM 编码结构的重要组成部分，可以发现 Turbo 码的性能之所以能够逼近香农限，主要原因之一是采取了随机性编译码的思想，通过在编码器中引入随机交织器，使码字具有近似随机的特性，既可以用来分散某一段突发性的错误；又可以打破低重量的输入序列模式，从而增大输出码字的最小汉明距离。可见交织器的设计在 TTCM 编码调制中占据重要地位。

QPP 交织器^[21]结构简单，自带奇偶交织属性，且具有最大无冲突的特点，所以受到人们的广泛关注。交织位置与初始位置的关系可以表示为：

$$\Pi(i) = (f_1 \cdot i + f_2 \cdot i^2) \bmod K \quad (3)$$

其中： i 为数据初始地址， $\Pi(i)$ 为数据交织之后的地址， K 为输入数据的总长度， f_1 和 f_2 是 QPP 交织器的系数，由输入数据的长度 K 决定，一般 f_1 和 f_2 的取值是通过计算机的迭代搜索得到。但是迭代搜索的时间复杂度较高，且占用较多的存储空间，因此可利用交织前后的距离特性^[22]来进行交织参数的筛选，可以表示为：

$$\forall i, j \in I, |i-j| \leq S, \text{ 满足: } |\Pi(i) - \Pi(j)| \geq S \quad (4)$$

其中： I 为输入的信息序列， j 为数据初始地址， S 为数据地址之间的距离。上式也可以理解为：两个不同位置（距离为 S ）的数据进行交织，交织之后的距离也至少为 S 。

表 1 是在不同码长下，通过搜索得到的 QPP 交织参数 f_1 以及距离 S 。

表 1 几种码长下搜索得到的 S 和 f_1 值

| 码长 K | f_1 | f_2 | S |
|--------|-------|-------|-----|
| 270 | 11 | 135 | 14 |
| 326 | 13 | 163 | 17 |
| 430 | 17 | 215 | 19 |
| 810 | 23 | 405 | 22 |
| 976 | 13 | 488 | 26 |
| 1 290 | 19 | 645 | 31 |

2.3 基于归一化处理的 TTCM 译码算法

TTCM 的译码结构主要分为两部分, 如图 6 所示。

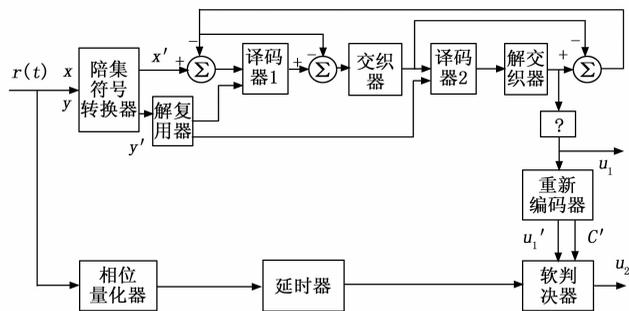


图 6 TTCM 译码结构图

第一部分是编码比特进行译码, 其结构与二进制 Turbo 码的译码结构相似, 区别主要在于接收到的 TTCM 信息没有经过软信息提取, 而是解调后直接送入译码器进行译码, 所以系统信息与校验信息集合在一个符号中不可分割^[23]; 第二部分是对编码比特译完码后, 重新进行 TTCM 编码, 再根据最开始接收到的信息确定未编码比特的信息。

图 6 中 x 、 y 分别表示接收到的 I 路与 Q 路的 8 PSK 符号信息值, 其中接收符号 $r(t)$ 的相位可以表示为:

$$\varphi = \tan^{-1}(y/x) \quad (5)$$

为了对编码比特进行译码, 需要把当前接收的星座点转换到对应的编码比特的星座点上, 可用式 (6) 进行星座点转换:

$$\begin{aligned} x' &= \sqrt{2}\cos(2(\varphi + n\pi/8)) \\ y' &= \sqrt{2}\sin(2(\varphi + n\pi/8)) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, n 的取值主要取决于编码比特的个数以及相应的集合分割映射方式。

TTCM-8 PSK 的译码算法与 Turbo 译码算法类似, 都采用了迭代译码的思想。但是由于 TTCM 中系统信息与校验信息已经集中在一个多进制符号中, 无法将信息比特单独出来提取软判决信息, 所以同 Turbo 码相比, 在译码过程中系统信息与外信息也不可分割, 使译码流程变得复杂。下面详细讲解 TTCM-8 PSK 的逐符号 MAX-LOG-MAP 译码算法, 并采用归一化的方式对算法进行优化。

在第 k 时刻, 接收信息为 i 的符号概率为:

$$P\{u_k = i, r_1^N\} = \max_{\substack{M=1, N \\ M=1, N}} \{\alpha_{k-1}(M') + \beta_k(M) + \gamma_i(M', M)\} \quad (7)$$

其中: r_1^N 表示接收到的信息序列, M 表示当前时刻寄存器状态, M' 表示前一时刻寄存器状态。 $r_i(M', M)$ 表示接收信息为 i 时分支转移概率, $\alpha_{k-1}(M')$ 表示前向递推概率, $\beta_k(M)$ 表示后向递推概率。

对于译码器的输出来说, 在 $Pr\{\mu_k | R^N\}$ 中的分子分母同时除以 $P(\mu_k = 0)$, 不会影响等式, 可得到分支转移概率:

$$\gamma_i(M', M) =$$

$$\frac{P(u_k = i)}{P(u_k = 0)} \cdot \exp\left[-\frac{r_{k,l} \cdot x_l(i, M') + r_{k,q} \cdot x_q(i, M')}{\sigma^2}\right] = \exp\left[-\frac{r_{k,l} \cdot x_l(i, M') + r_{k,q} \cdot x_q(i, M')}{\sigma^2}\right] + \ln \frac{P(u_k = i)}{P(u_k = 0)} \quad (8)$$

式中, $r_{k,l}$ 和 $r_{k,q}$ 分别表示接收信号的同相分量和正交分量。在对分支转移概率 $r_k(M', M)$ 进行 $P(u_k = 0)$ 的归一化修正后, 再取对数运算有:

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}_i(M', M) &= \ln \gamma_i(M', M) = \\ \ln\left\{\exp\left[-\frac{r_{k,l} \cdot x_l(i, M') + r_{k,q} \cdot x_q(i, M')}{\sigma^2}\right] + \ln \frac{P(u_k = i)}{P(u_k = 0)}\right\} &= \\ -\frac{r_{k,l} \cdot x_l(i, M') + r_{k,q} \cdot x_q(i, M')}{\sigma^2} + Pr(u_k = i) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, 最后一项表示先验信息 $L^a(u_k = i)$, 在仿真时可直接对这一项进行调用, 从而进一步降低算法的复杂度。

前向递推概率的计算:

$$\begin{aligned} \alpha_k(M) &= \max_M [\gamma_i(M', M) + \alpha_{k-1}(M')] - \\ &\max_{M, M'} [\gamma_i(M', M) + \alpha_{k-1}(M')] \end{aligned} \quad (10)$$

后向递推概率的计算:

$$\begin{aligned} \beta_{k-1}(M) &= \max_M [\gamma_i(M', M) + \beta_k(M')] - \\ &\max_{M, M'} [\gamma_i(M', M) + \beta_k(M)] \end{aligned} \quad (11)$$

因为系统信息与校验信息都集中在解调之后的信息中, 无法分离开来, 所以可以将译码器的输出减去先验信息的数值当作外部信息:

$$L^c(u_k = i) = 0.75 \cdot \left\{ \ln \frac{P\{u_k = i, r_1^N\}}{P\{u_k = 0, r_1^N\}} - L^a(u_k = i) \right\} \quad (12)$$

在式 (12) 中可以看到对外部信息乘上了一个补偿因子, 这样做相较于 LOG-MAP^[23] 算法, 可以重新获得 0.2 dB 的增益补偿, 为了便于硬件实现且兼顾性能, 一般取值 0.75。于是通过式 (7)、(9) ~ (12) 五组成了 TTCM 第一部分的迭代循环结构。

第二部分的译码方式则相对简单, 将第一部分的译码结果重新进行编码, 可以得到集合分割映射分组之后的星座点信息, 再根据最开始解调之后的信息数据, 来对未编码比特信息进行判决。

3 实验结果及分析

以上对基于流星余迹信道环境下的 TTCM-8 PSK 方案的结构设计从理论角度进行了分析及论证, 本次仿真从实际情况出发, 综合考虑系统的复杂性与可实现性, 设置系统门限误比特率 $P_e = 10^{-6}$, 接收信号功率的初始值 (即峰值) 为系统的发射功率, 此时 $P_R(0) = -108$ dbm, 衰减因子 $\tau = 0.2$, 码元的传输速率 R_s 在 2~12 kBaud 之间, 流星余迹信道持续时间为 200 ms, 因此每帧数据中最多含有 900 比特的有用信息。下面我们通过计算机仿真来对 TTCM-8 PSK 算法进行验证。

3.1 TTCM 与卷积-TCM 性能比较

图 7 是在流余信道下, 分别对 TTCM 和卷积-TCM 的 (3, 2, 2) 四状态卷积码编码器与 (3, 2, 3) 八状态卷积码编码器, 在编码后码长为 1 290 比特下的性能对比图。其中 TTCM 采用本文提出的基于归一化处理的 MAX-LOG-MAP 译码算法。衡量编码性能的主要因素是编码码率和编码增益, 由 TCM 编码器结构 (图 4) 可知, TCM 编码码率恒为 $k/(k+1)$, 因此 TCM 系统的性能提升取决于编码增益。而编码增益与系统中的卷积码编码器相关。

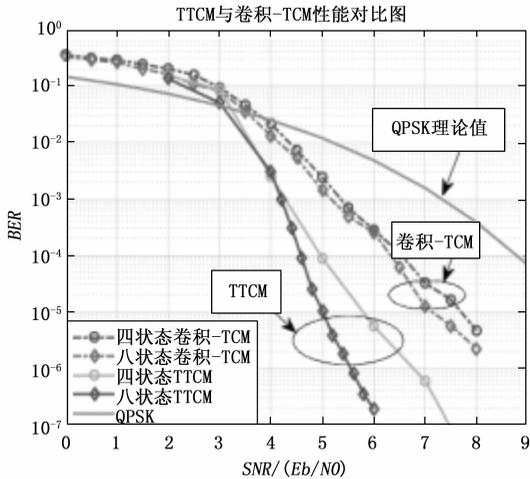


图 7 TTCM 与卷积-TCM 性能对比图

从图 7 可以看到: 在误码率为 10^{-6} 时, 八状态的卷积-TCM 性能比四状态的卷积-TCM 的性能要好 0.5 dB, 比理论上的 QPSK 性能至少要好 3 dB; 而在误码率为 10^{-6} 时, 八状态的 TTCM 性能要比四状态 TTCM 的性能好 1.5 dB。这说明状态数越多, 获得的编码增益就越多。而在相同的状态数下, TTCM 要比选用卷积-TCM 的性能至少改善了 2 dB, 这一方面说明了 TCM 比较依赖信道编码性能, 另一方面体现出 TTCM 性能的优越性。

3.2 TCM 与 Turbo 码性能比较

图 8 是在流余信道下, 2/3-TTCM 算法和 2/3-Turbo 编码方案分别在码长为 1 290、迭代 5 次以及 8 PSK 调制方式条件下的基于归一化处理的 MAX-LOG-MAP 译码算法的性能对比图。TTCM 的优点在于将编码和调制结合在一起, 能够在不增加带宽与发射功率的前提下, 提高有用信息的发送速率。因为子集分割映射的特点, TTCM 相比于采用 Turbo 码, 可以节省设备的发射功率。仿真结果表明: 在 2/3 相同码率且误码率为 10^{-6} 时, TTCM 方案的性能并不比 Turbo 码的性能差, 甚至还要稍好 0.2 dB, 说明了将 TTCM 应用在带宽受限的流余系统中的可行性。

3.3 TCM 交织参数性能比较

基于流余信道, 采用本文提出的译码算法, 码率为 2/3, 当码长 K (即交织长度) 分别为 270 比特和 2 048 比特时, TTCM-8 PSK 算法在采用分组交织器、随机交织器以及本文采用的基于最大距离的 S-QPP 交织器下的译码性能

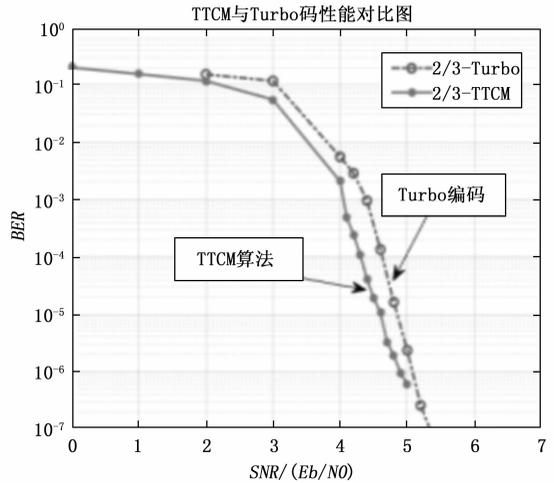


图 8 TTCM 与 Turbo 码性能对比图

如图 9 所示。图 9 表明在相同条件下 S-QPP 交织器的性能最好, 其次是随机交织器和分组交织器, 并且 S-QPP 交织器的性能与交织长度的大小成正比; 图 9 体现了 S-QPP 交织器可以很好的适用于流余信道, 能够达到实用效果。

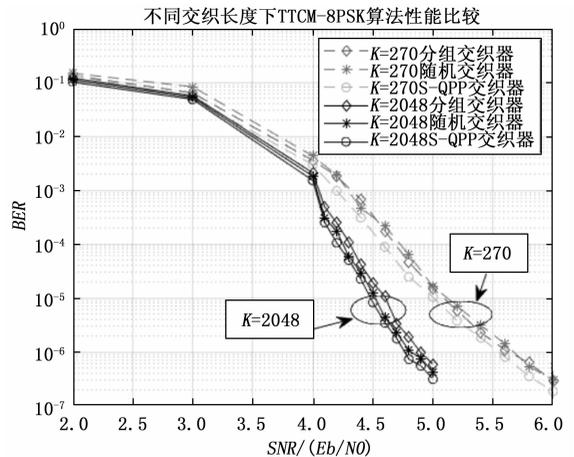


图 9 不同交织长度下 TTCM-8 PSK 算法性能对比图

3.4 TCM 与 RS 码性能比较

RS 码以短码纠错性能好、适合处理成片的突发错误著称, 因此 RS 码是一类非常适用于流余信道中的码字。流余通信系统中功放一般工作在饱和状态, 所以常采用 BPSK/QPSK 等恒包络调制方式。将本文采用的 TTCM-8PSK 方案同 RS-BPSK/QPSK 方案对比, 具体仿真参数设计可见表 2。

从表 2 中可以看到, 在 RS 编码和 TTCM 编码的帧结构设计中, 要保证两种帧映射的符号数目保持一致, 即在相同的传输时间内, 总是能够传输相同的符号个数。其中 TTCM 采用的是 8 PSK 恒包络调制方式, 因此码率固定为 2/3; 而 RS 码为了在流余信道中尽可能多的传输信息比特, 一般采用的码率在 0.95 附近。虽然 RS 码的码率较高, 但是相比于 RS 码采用的 BPSK/QPSK 调制方式, TTCM 采用了更高阶的 8 PSK 调制方式。所以在相同的时间内, TTCM 编码调制方式总是能比 RS 编码方式传输更多的信息比特, 并以此来增大流余系统的可通量。

表 2 TTCM-8PSK 与 RS-BPSK/QPSK 仿真参数设计

| 标号 | 编码类型 | 信息比特长度/bit | 编码比特长度/bit | 调制方式 | 映射符号数 | 波特率/kbps | 传输时长/ms |
|----|-----------|------------|------------|------|-------|----------|---------|
| ① | RS(27,25) | 250 | 270 | BPSK | 270 | 2 | 135.00 |
| | TTCM | 540 | 810 | 8PSK | | | |
| ② | RS(13,12) | 300 | 325 | BPSK | 325 | 4 | 81.25 |
| | TTCM | 650 | 975 | 8PSK | | | |
| ③ | RS(43,40) | 400 | 430 | BPSK | 430 | 6 | 71.67 |
| | TTCM | 860 | 1 290 | 8PSK | | | |
| ④ | RS(21,20) | 600 | 630 | QPSK | 315 | 8 | 39.38 |
| | TTCM | 630 | 945 | 8PSK | | | |
| ⑤ | RS(37,36) | 800 | 850 | QPSK | 425 | 12 | 35.42 |
| | TTCM | 850 | 1 275 | 8PSK | | | |

为方便作图观察, 本文选取标号①、②、③下的仿真参数, 针对稀疏欠密类流余信道进行仿真, 图 10 是 TTCM-8PSK 方案与适用于流余中的 RS 编码方案的性能对比图。

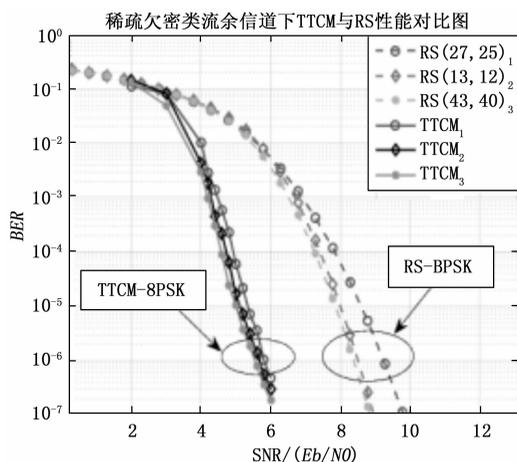


图 10 流余信道下 TTCM 与 RS 性能对比图

从图 10 所示的三组不同波特率下的 TTCM 与 RS 性能对比图可以看到: 对于 TTCM 与 RS 编码来说, 均是码长越长性能越好; 且在误码率为 10^{-6} 时, TTCM 算法相比于 RS 传输方案, 至少能够提升 3 dB 的译码性能; 分别比较三种波特率下的两种传输方案的性能, 发现波特率为 2 Kbps 时, 在 135 ms 内, TTCM 方案提高了 2.16 倍的可通量; 波特率为 4 kbps 时, 在 81.25 ms 内, TTCM 方案提高了 2.17 倍的可通量; 波特率为 6 kbps 时, 在 71.67 ms 内, TTCM 方案提高了 2.15 倍的可通量。说明在带宽和发送功率不变的前提下, TTCM 不仅能够传送更多的有用信息, 提升了系统的可通量, 而且还极大地提高了译码性能, 使流余系统更加可靠。

4 结束语

针对流余信道带宽受限、功率受限的特点, 提出了一种适用于流余通信系统的网格编码调制 (TCM) 技术。根据稀疏欠密类余迹的传播机理, 在 TCM 中引入了 Turbo 码迭代译码的概念, 并通过对分支转移概率和外部信息进行归一化处理, 降低了 TTCM 传输方案的译码算法计算复杂

度, 并获得了部分性能补偿。最后通过仿真对比分析了本文提出的 TTCM-8PSK 算法与目前流余通信系统中常见的 RS-BPSK/QPSK 算法的性能, 研究发现 TTCM-8PSK 方案不仅能够在不占据额外带宽的情况下使目前流余通信系统的可通量提高 2.15 倍以上, 而且在译码性能上也获得了 3 dB 的编码增益, 可有效降低流余设备的接收门限, 提高大气中流星余迹的可用率。

本文对网格编码调制 (TCM) 技术在流星余迹信道中的应用进行了研究, 研究发现采用 TTCM 算法既提升了流星余迹通信系统的可通量, 又提高了传输可靠性。但是系统的可通量仍然有扩增的余量, 未来可以对编码比特进一步删减, 以增大流余系统的可通量。此外还可以选取不同的 TCM 子码形式, 比如: Polar 码、LDPC 码等, 以提高算法在不同流星余迹通信信道条件下的适应性。

参考文献:

- [1] SULIMOV A I, KARPOV A V, LAPSHINA I R, et al. Analysis and simulation of channel nonreciprocity in meteor-burst communications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65 (4): 2009-2019.
- [2] KARPOV A V, SULIMOV A I, SHERSTYUKOV O N. Modern scientific and applied problems of meteor scatter radio propagation [C] //2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP). IEEE, 2019, 1: 6-11.
- [3] 张志峰, 李中学. 应急状况下北斗短报文通信功能的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (10): 276-279, 285.
- [4] 齐涛. 支持流星余迹通信的远程无线网络技术在气象无人机上的应用 [J]. 气象水文海洋仪器, 2016, 33 (4): 59-63.
- [5] 刘立军. 嵌入式网络数字带宽测量监控系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (12): 4157-4159, 4162.
- [6] 孙创. 基于 5G 无线通信技术的城市轨道交通信息传输系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 234-237.
- [7] 任香凝, 王伟, 庞博. 超短波联合超视距通信技术研究 [J]. 无线电通信技术, 2013, 39 (4): 18-21.
- [8] SHARMA J, LALITHA V. Learning to decode trellis coded modulation [C] //2021 National Conference on Communications (NCC). IEEE, 2021: 1-6.

- [9] WOERZ T, SCHWEIKERT R. Performance of punctured pragmatic codes [C] // Proceedings of GLOBECOM'95. IEEE, 1995, 1: 664 - 669.
- [10] 刘志雄. 自适应技术提高流星余迹通信吞吐量的设计与仿真 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [11] 李经安. 基于流星余迹通信的调制解调器设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [12] SINGH J, KAMRA A, SINGH H. Prediction of heart diseases using associative classification [C] // 2016 5th International conference on wireless networks and embedded systems (WECON). IEEE, 2016: 1 - 7.
- [13] 王启玮, 战兴群, 严 凯. LDPC 码的编译码设计与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (3): 728 - 731.
- [14] MANOUCHEHRI S, HAGHIGHAT J, ESLAMI M, et al. A delay-efficient deep learning approach for lossless turbo source coding [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71 (6): 6704 - 6709.
- [15] BERROU C, GLAVIEUX A. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes [J]. IEEE Transactions on communications, 1996, 44 (10): 1261 - 1271.
- [16] ROBERTSON P, WORZ T. Bandwidth-efficient turbo trellis-coded modulation using punctured component codes [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16 (2): 206 - 218.
- [17] 蔡 冰. MLT 中频雷达流星余迹测风技术及太阳活动效应观测研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院国家空间科学中心), 2021.
- [18] 王 俊, 白宝明, 王 晶. Turbo-TCM 编码调制系统的量化性能 [J]. 空间电子技术, 2008 (3): 81 - 85, 102.
- [19] 凡 震. Turbo 码网格编码调制的仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [20] ALJOHANI A, BABAR Z, NG S X, et al. Distributed source-channel coding using reduced-complexity syndrome-based TCM [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20 (10): 2095 - 2098.
- [21] 肖文林, 李晓毅, 邵 平, 等. QPP 交织器的修正量度算法 [J]. 西南科技大学学报, 2012, 27 (2): 61 - 64.
- [22] 王云飞, 郑晨熹. 具有良好 S 距离特性 QPP 交织器的设计 [J]. 信息技术, 2011, 35 (8): 166 - 168, 188.
- [23] ZHOU C, HU W, WANG L, et al. Turbo trellis-coded differential chaotic modulation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 65 (2): 191 - 195.
- [24] 法 [J]. 宇航学报, 2018, 39 (1): 76 - 82.
- [18] 李鹤宇, 王 青. 一种具有实时性的 SIFT 特征提取算法 [J]. 宇航学报, 2017, 38 (8): 865 - 871.
- [19] 刘佳璐. 月面模拟环境的 SIFT 特征提取与匹配方法 [J]. 空间控制技术与应用, 2009, 35 (5): 48 - 51, 60.
- [20] 王金龙, 周志峰. 基于 SIFT 图像特征提取与 FLANN 匹配算法的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (2): 175 - 178.
- [21] SUMANT S, JACOPO V, SIMONE D. Robust model-based monocular pose initialization for noncooperative spacecraft rendezvous [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2018, 55: 1 - 16.
- [22] JMA B, CG C, JK C. Robust detection of lines using the progressive probabilistic Hough transform-science direct [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000, 78 (1): 119 - 137.
- [23] VON, GIOI, RAFAEL, et al. LSD: a fast line segment detector with a false detection control [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 32 (4): 722 - 732.
- [24] SHI J, TOMASI C. Good features to track [C] // Proceedings/CVPR, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2002.
- [25] GARCIA V, DEBREUVE E, NIELSEN F, et al. K-nearest neighbor search: fast GPU-based implementations and application to high-dimensional feature matching [C] // Proceedings of the International Conference on Image Processing, ICIP 2010, IEEE, Hong Kong, 2010.
- [9] RUBLEE E, RABAUD V, KONOLIGE K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF [C] // IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV 2011, Barcelona, Spain, 2011, IEEE, 2011.
- [10] KE N Y, SUKTHANKAR R. PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image [C] // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2004.
- [11] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. Computer Vision & Image Understanding, 2008, 110 (3): 346 - 359.
- [12] 傅兴玉, 尤红建, 付 琨, 等. 利用多尺度 Hough 变换提取高分辨率 SAR 图像建筑物 L 型结构 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2012, 37 (4): 394 - 398, 506.
- [13] MATAS J, GALAMBOS C, KITTLER J. Robust detection of lines using the progressive probabilistic hough transform [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000, 78 (1): 119 - 137.
- [14] HARRIS C G, STEPHENS M J. A combined corner and edge detector [C] // Alvey Vision Conference, 1988.
- [15] CHO D M, TSOTRAS P, ZHANG G, et al. Robust feature detection, acquisition and tracking for relative navigation in space with a known target [C] // Aiaa Guidance, Navigation, & Control, 2013.
- [16] CAPUANO V, ALIMOS R, HO A Q, et al. Robust feature extraction for on-board monocular-based spacecraft pose acquisition [C] // AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.
- [17] 王诗强, 张世杰. 基于纹理边界检测的航天器椭圆特征提取方