

利用限幅器改善 Rayleigh 衰落信道中 Turbo 乘积编码 PSAM 系统的性能¹

刘 伟 张 海 林 刘 增 基

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

摘 要 该文研究了 Rayleigh 衰落信道中 Turbo 乘积编码辅助符号调制 (TPC-PSAM) 系统的性能并提出一种利用软信息限幅来改善的 TPC-PSAM 性能的新方法。通过对不同的 Rayleigh 衰落信道中 TPC-PSAM 系统的性能仿真, 结果表明在 10^{-4} 误比特率下, 这种新方法对 TPC-PSAM 的性能有 5~8dB 的改善。

关键词 Rayleigh 衰落信道, 引导符号辅助调制, Turbo 乘积码, 迭代译码

中图分类号 TN914, TN911.3

1 引 言

随着无线多媒体和无线 Internet 技术的发展, 无线通信系统中越来越需要采用高频带利用率的 QAM 调制技术。无线信道的衰落导致 QAM 系统非常高的误码率, 严重限制 QAM 系统性能的提高, 同时由于无线信道的时变特性, 信道估计技术在无线 QAM 系统中是必需的。引导符号辅助调制技术 (Pilot Symbol Assisted Modulation, PSAM) 是无线通信中常用的信道估计技术^[1], 在无线 QAM 系统采用高效的纠错编码技术也是提高系统性能的重要手段。Turbo 乘积码 (Turbo Product Code, TPC) 是一种高效的纠错编码, 它在高码率下比 Turbo 码更加接近信道编码定理的理论极限^[2], 将 TPC 应用于 Rayleigh 衰落信道是一个应用研究。本文研究的 TPC-PSAM 系统在 Rayleigh 衰落信道中的译码问题是非高斯加性噪声中的译码问题, 经检索, 非高斯加性噪声中 TPC 的译码尚未曾在文献中出现过, 本文提出的利用对软信息限幅来改善 Rayleigh 衰落信道中 TPC-PSAM 系统性能的新方法尚未在文献中出现。通过对不同衰落的 Rayleigh 信道中 TPC-PSAM 系统性能的数值仿真, 结果表明, 在 10^{-4} 误比特率下, 这种新方法比传统的迭代译码信噪比大约有 6~8dB 的改善。

本文的内容是如下安排的, 第 2 节介绍 Rayleigh 衰落信道中 TPC-PSAM 系统模型, 第 3 节介绍 PSAM 信道估计技术, 第 4 节介绍改善 TPC 性能的方法, 第 5 节是数值仿真及其结果, 最后是结论。

2 系统模型

TPC-PSAM 系统模型如图 1 所示。发端首先对信源数据进行 TPC 编码, 然后进行符号映射, 本文选择的映射方式为 QPSK 和 16QAM。引导符号 (Pilot symbols) 被周期地插入到信源符号序列中, 然后经过脉冲成型滤波器发送到信道上。在接收端, 本文假设载波频率和相位可以精确地获得, 从而实现相干解调。接收端首先从匹配滤波器的输出序列中抽取引导符号, 利用引导符号进行信道估计, 根据匹配滤波器的输出和信道估计得到发射信号的估计, 然后对软信息进行限幅, 限幅后的软信息进入 TPC 的迭代译码器, 经过迭代译码后判决输出信源信息序列。

¹ 2002-05-24 收到, 2002-12-30 改回

国家自然科学基金重大项目 (No.90104019)、国防科技预研跨行业基金 (No.51421040101DZ0157) 资助课题

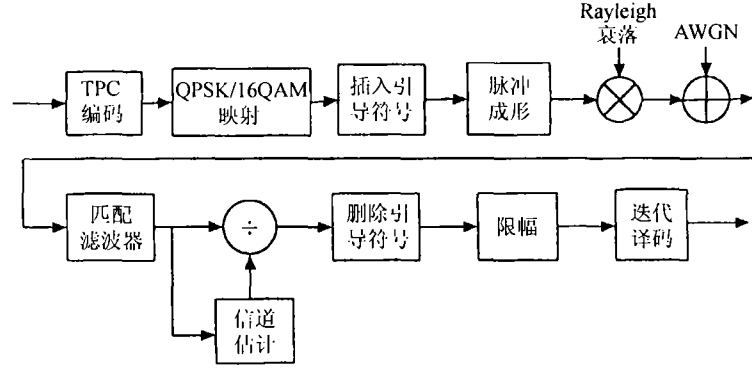


图 1 TPC-PSAM 系统模型

本文假设衰落信道是平坦慢变的 Rayleigh 信道，衰落程度由归一化衰落因子 $f_d T_s$ 确定，其中 f_d 为最大 Doppler 频移， T_s 为符号周期，对于平坦的慢衰落信道有 $f_d T_s < 1$ 。设发端基带信号为 $s(t)$ ，信道输出的信号为

$$r(t) = c(t)s(t) + n(t) \quad (1)$$

其中 $n(t)$ 为复高斯随机过程，其实部和虚部都是均值为零，双边谱密度为 $N_0/2$ 的独立的高斯随机过程。 $c(t)$ 为 Rayleigh 衰落过程：

$$c(t) = X(t) + jY(t) \quad (2)$$

其中 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 是均值为零、方差为 σ_R^2 的独立高斯过程，Rayleigh 衰落过程的功率谱为^[3]

$$C(f) = 1.5 / \left(\pi f_d \sqrt{1 - [(f - f_c)/f_d]^2} \right) \quad (3)$$

其中 $f_c = 1/T_s$ 为载波中心频率。为了保证调制信号通过信道的能量保持不变，信道衰落满足归一化条件：

$$E\{|c(t)|^2\} = 1 \quad (4)$$

3 PSAM 系统中的信道估计

PSAM 技术是发端在信息符号中周期地插入接收端已知的引导符号，接收端利用引导符号实现信道估计。本文假设发送的信号被分成长度为 L 的帧，每帧的第一个符号为引导符号，其余的 $L - 1$ 个符号为信息符号。

假设对匹配滤波器输出信号采样的周期为 T_s ，接收端基带得到离散的复信号为

$$r_k = c_k s_k + n_k \quad (5)$$

其中 $\{s_k\}$ 为包含信息符号和引导符号的 QPSK/16QAM 序列。 $\{c_k\}$ 表示信道的衰落，为均值为零的复高斯随机变量， n_k 是均值为零、方差为 $\sigma_n^2 = N_0/2$ 的复高斯随机变量。接收端利用抽取的引导符号实现信道估计：

$$\hat{c}_i = r_i/p_i = c_i + n_i/p_i \quad (6)$$

其中 c_i 是第 i 帧引导符号处的衰落因子。第 n 帧第 l 个符号处的衰落因子是由 K 个相邻的引导符号估计得到, 估计方法为

$$\hat{c}_n^l = \sum_{k=-\lfloor (K-1)/2 \rfloor}^{\lfloor K/2 \rfloor} f_k^l \hat{c}_{n+k} \tag{7}$$

其中 f_k^l 为插值系数。一种简便选择是 [4]

$$f_k^l = \text{sinc} \left[\left(\frac{l}{K} - k \right) \pi \right], \quad l = 1, 2, \dots, L-1 \tag{8}$$

其中 $\text{sinc}x = \sin x/x$ 。上式选择的插值系数的性能接近最优的 Wiener 滤波插值的结果, 但计算量远小于 Wiener 滤波。

4 Turbo 乘积码的迭代译码

TPC 是一种二维阵列编码技术, 它在高码率情况下比 Turbo 卷积码更加接近 Shannon 信道编码定理的理论极限。乘积码的行码和列码通常是由扩展 Hamming 码或扩展 BCH 码构成, 其结构如图 2 所示。如果乘积码的行码和列码参数分别为 (n_2, k_2, d_2) 和 (n_1, k_1, d_1) , 得到的乘积码的参数为 $(n_1 n_2, k_1 k_2, d_1 d_2)$ 。乘积码的编码方法如下 [5]:

- (1) 将 $k_1 \times k_2$ 个信息比特排成 k_1 行和 k_2 列的信息阵列。
- (2) 用线性分组码 $C_2(n_2, k_2, d_2)$ 对 k_1 行进行编码。
- (3) 用线性分组码 $C_1(n_1, k_1, d_1)$ 对 n_2 列进行编码。

本文采用的 TPC 译码方法是文献 [5] 提出的基于修正 Chase 算法的迭代译码技术, 这种次最优译码方法的计算量较小, 而且译码过程中不需要信道噪声方差的估计值。对于 QPSK 调制, 每个比特的信息量可以直接得到。对于 16QAM 调制, 每个支路都采用 Gray 映射。以 I 支路为例, 比特 x 和 y 映射成 4-AM 方法如图 3 所示。

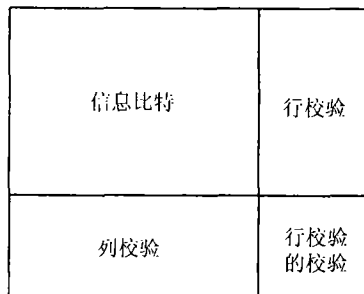


图 2 TPC 的编码方法

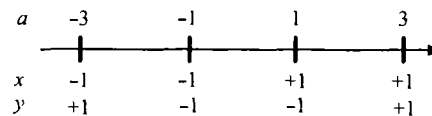


图 3 4-AM 星座映射

利用文献 [6] 的方法可以计算出每个比特信息量, 计算方法如下:

$$\text{LLR}(x) = \begin{cases} 2(r-1), & r > 2 \\ r, & |r| \leq 2 \\ 2(r+1), & r < -2 \end{cases} \quad \text{和} \quad \text{LLR}(y) = \begin{cases} r-2, & r \geq 0 \\ -(r+2), & r < 0 \end{cases} \tag{9}$$

对于 Q 支路, 每个比特对数似然比的计算方法和 I 支路一样。计算出每个比特的软信息后可以实现迭代译码。

本文提出的改进算法是将进入 TPC 译码器的软信息进行限幅, 采用的限幅准则是

$$\text{LLR}_i = \begin{cases} 1.0, & \text{LLR}_i > 1.0 \\ \text{LLR}_i, & |\text{LLR}_i| \leq 1.0 \\ -1.0, & \text{LLR}_i < -1.0 \end{cases} \quad (10)$$

其中 LLR_i 为第 i 个比特的软信息。限幅后的软信息序列进入译码器, 经迭代译码后判决输出。下面分析软信息限幅改善多径信道中 TPC-PSAM 系统性能的原理。

假设信道是 AWGN 信道, 调制方式为 BPSK, 即调制信号 s_k 取自集合 $\{+1, -1\}$, TPC 译码器接收的信号为

$$r_k = s_k + n_k \quad (11)$$

其中 n_k 为零均值方差为 σ_n^2 加性高斯白噪声, 根据高斯随机变量的性质, $|n_k| > 3\sigma_n$ 的概率小于 0.01%, 此时 r_k 的范围基本上在 $[-1 - 3\sigma_n, 1 + 3\sigma_n]$ 之间, 在这种情况下对软信息做如下限幅, 乘积码的性能几乎没有损失。

$$r_k = \begin{cases} 1 + 3\sigma_n, & r_k > 1 + 3\sigma_n \\ r_k, & |r_k| \leq 1 + 3\sigma_n \\ -1 - 3\sigma_n, & r_k < -1 - 3\sigma_n \end{cases} \quad (12)$$

从 (5) 式可得 TPC-PSAM 的译码器在没有限幅器时接收的信号为

$$\hat{s}_k = r_k/c_k = s_k + n_k/c_k \quad (13)$$

此时的加性噪声 $n'_k = n_k/c_k$ 是一个非高斯的随机变量。由于 Rayleigh 信道的衰落效应, 因此在某些信号点上可能存在深衰落。发生深衰落时 c_k 很小, 这样噪声信号 n'_k 被急剧放大 (这些噪声值称为奇异值), 造成该时刻的瞬时信噪比急剧恶化, 从而导致译码器输出误码率的增加。如果对 (13) 式的软信息采取 (12) 式中的限幅, 可以减少噪声奇异值的影响, 改善衰落信号点的瞬时信噪比, 从而改善 TPC-PSAM 系统的性能。随着归一化衰落因子 $f_d T_s$ 的增加, 噪声奇异值的数量逐渐增加, 限幅器对乘积码性能的改进逐渐明显, 数值仿真结果也证明了这一结论。

由于在 TPC-PSAM 中精确估计噪声方差非常困难, 同时当信噪比较大时, $\sigma \ll 1$, 因此在 (12) 式中取 $\sigma \approx 0$, 得到 (10) 式表示的限幅器。当然, 如果限幅器的门限根据信道噪声的方差自适应调节, 系统性能比采用固定限幅门限时的性能更好。

5 数值仿真结果

根据前面介绍的系统模型, 本文对 TPC-PSAM 在 Rayleigh 衰落信道中的性能进行数值仿真。本文选择的 TPC 是 $(64, 57, 4)^2$, TPC 的译码采用文献 [5] 中的方法, 译码迭代次数为 6。符号映射方法有 QPSK 和 16QAM 两种。在 TPC-PSAM 中, 帧长为 8, 帧头为引导符号, 引导符号的能量等于 QPSK/16QAM 信号的平均能量。Rayleigh 衰落信道采用 Jakes 模型 [7], 归一化的衰落因子 $f_d T_s$ 分别为 0.001, 0.01 和 0.05, 数值仿真的结果如图 4 所示。图 4(a)~4(c) 是 QPSK 映射下 TPC-PSAM 的性能, 图 4(d)~4(f) 是 16QAM 映射下 TPC-PSAM 的性能。

在 QPSK 调制方式下, 当归一化衰落因子 $f_d T_s = 0.001$, 从图 4 可以看出, TPC-PSAM 在通常的迭代译码的性能和已知信道参数的 TPC(TPC-CSI) 系统性能接近, 在 10^{-4} 误比特率下, 二者相差不到 3dB。通过对译码器输入的软信息限幅, TPC-PSAM 和 TPC-CSI 的性能都

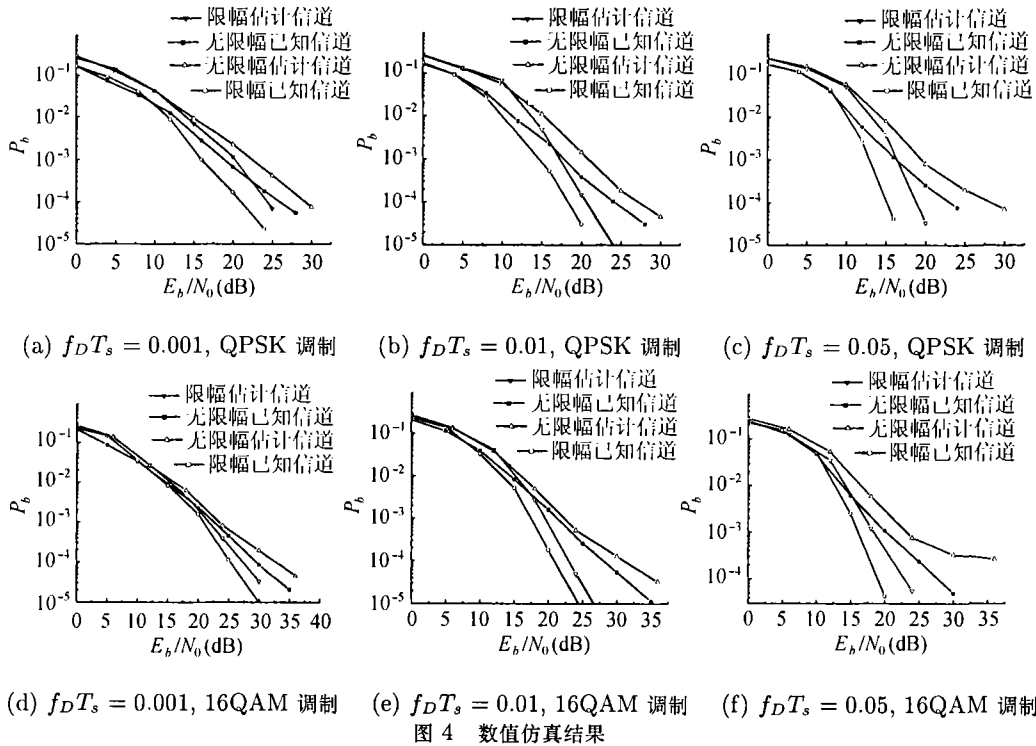


图 4 数值仿真结果

有改进, 在 10^{-4} 误比特率下, TPC-CSI 系统改进 5dB, TPC-PSAM 系统改进为 6dB。随着归一化衰落因子的增加, 软信息限幅对 TPC 性能的改善逐渐增加, 在 $f_d T_s = 0.01$ 下, TPC-CSI 和 TPC-PSAM 估计信道参数系统的改进超过了 7dB, 在 $f_d T_s = 0.05$ 情况下, TPC-CSI 和 TPC-PSAM 估计信道参数系统的改进超过了 10dB, 同时 TPC-PSAM 系统的错误平底 (Error floor) 现象也得到改善。

在 16QAM 调制方式下, 情况和 QPSK 类似, 当归一化衰落因子 $f_d T_s = 0.001$, 在 10^{-4} 误比特率下, 软信息限幅对 TPC-CSI 和 TPC-PSAM 系统性能的改进量分别为 5dB 和 6dB, 改进后二者性能相差不到 2dB。当 $f_d T_s = 0.01$ 时, 在 10^{-4} 误比特率下, 软信息限幅对 TPC-CSI 和 TPC-PSAM 系统性能的改进量都超过了 7dB。当 $f_d T_s = 0.05$ 时, 在 10^{-4} 误比特率下, 软信息限幅对 TPC-CSI 系统的改进超过 10dB, TPC-PSAM 系统在 3×10^{-4} 出现严重的错误平底现象, 通过软信息限幅, 错误平底不但得到抑止, 而且改进的 PSAM 和改进的已知信道参数系统的性能只差 3dB。

6 结 论

根据本文介绍的系统实现方法和相应的数值仿真结果, 可以得出以下结论: (1) 对 TPC 译码器输入的软信息进行限幅, 可以改善 TPC 的性能, 这种改善无论在已知信道参数还是估计信道参数系统中都是存在的。(2) 软信息限幅对 TPC 性能的改善随着归一化衰落因子 $f_d T_s$ 的增加而增加, 这是因为随着 $f_d T_s$ 的增加, Rayleigh 衰落信道中出现深衰落的概率逐渐明显的缘故。本文介绍的利用软信息改善 TPC-PSAM 系统性能的方法实现起来非常容易, 只需在 TPC 的译码器前端加一个限幅器即可, 对于 TPC 在移动通信中使用有一定的实用价值。

参 考 文 献

- [1] J. K. Cavers, An analysis of pilot symbol assisted modulation for Rayleigh channels, IEEE Trans. on Vehicle Technology, 1991, VT-40(4), 686-693.
- [2] H. Nickl, J. Hagenauer, F. Burkert, Approaching Shannon's capacity limit by 0.27dB using simple Hamming codes, Proc. IEEE Int. Symp. on Information Theory 1997, Ulm, Germany, 12.
- [3] T. S. Rappaport, 蔡涛等译, 无线通信原理与应用, 北京, 电子工业出版社, 1999, 132-133.
- [4] Tang Xiaoyi, A. J. Goldsmith, Effect of channel estimation error on M-QAM BER performance in Rayleigh fading, IEEE Trans. on Communications, 1999, COM-47(12), 1856-1864.
- [5] R. Pyndiah, Near-optimal decoding of product codes: block turbo codes, IEEE Trans. on Communications, 1998, COM-46(8), 1003-1010.
- [6] R. Pyndiah, A. Picart, A. Glavieux, Performance of block turbo coded 16-QAM and 64-QAM modulation, Proc. IEEE GLOBECOM'95 Conference, Singapore 1995, 1039-1044.
- [7] W. Jakes, Microwave Mobile Communications, New York, Wiley-IEEE Press, 1994, 165-188.

IMPROVING PERFORMANCE OF TURBO PRODUCT CODED PSAM
USING CLIPPER IN RAYLEIGH FADING CHANNELS

Liu Wei Zhang Hailin Liu Zengji

(The National Key Lab on ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract The performance of Turbo Product Coded Pilot Symbol Assisted Modulation (TPC-PSAM) system is studied and a novel method to improve the performance of TPC-PSAM in Rayleigh fading channels by clipping the soft input information of decoder is presented in this paper. From the numerical simulation in different Rayleigh channels, it is concluded that the TPC-PSAM system with clipping soft information outperforms from 5dB to 8dB over the TPC-PSAM system at the bit error rate of 10^{-4} .

Key words Rayleigh fading channel, Pilot Symbol Assisted Modulation(PSAM), Turbo Product Code(TPC), Iterative decoding

刘 伟: 男, 1969 年生, 博士生, 主要从事无线数据传输和编码调制方面的研究工作.

张海林: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事信道编码、调制和高速数据传输等方面的研究工作.

刘增基: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, ISN 国家重点实验室主任, 主要从事通信网方面的研究工作.