

T-TCM 系统中的 SNR 失配分析

闫涛 茹乐 张曦 杜兴民
(空军工程大学工程学院 西安 710038)

摘要: 该文基于 AWGN 信道研究了 SNR 失配对 T-TCM 系统性能的影响。蒙特卡洛仿真结果表明, SNR 欠估计偏差不大于 4dB 时, T-TCM 系统性能基本不受影响, 更大的 SNR 估计偏差则会导致系统性能迅速下降; 而 SNR 过估计始终不会造成系统性能折损。该文结合雅可比对数式及迭代译码算法的特点从理论上给出了解释, 进一步提出无需 SNR 估计的 T-TCM 译码方案, 在保证性能没有损失的前提下降低了 T-TCM 的应用要求与实现复杂度。

关键词: Turbo 网格编码调制; SNR 失配; S-Log-MAP 算法; 雅可比对数式

中图分类号: TN919

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0061-05

On SNR Mismatch in T-TCM Systems

Yan Tao Ru Le Zhang Xi Du Xing-min
(Engineering Institute, Air force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In this paper, impact of SNR mismatch on the T-TCM performance is investigated in AWGN. The Monte Carlo simulation results indicate that when the under-estimate SNR offset is no more than 4dB, the T-TCM performance will not be badly affected, but greater offset can lead rapid performance degradation; Otherwise the overestimate of SNR will never lower the performance. A theoretical explanation is given by analyzing the Jacobian logarithm formula and iterative decoding algorithm, and based on the explanation a new T-TCM decoding scheme without SNR estimation is further proposed, with which the T-TCM systems have no performance loss and can be more conveniently applied and easily implemented.

Key words: Turbo trellis coded modulation; SNR mismatch; S-Log-MAP algorithm; Jacobian logarithm formula

1 引言

Turbo 码^[1]以接近 Shannon 理论极限的优越性能获得了广泛而持续的关注。由于 Turbo 译码过程中需要已知信道的信噪比信息, 所以 SNR 估计成为 Turbo 编译码系统设计过程中需要仔细考虑的问题之一, 而在实际的应用中往往不能完全精确地得到信道的 SNR 信息, SNR 失配对系统性能的影响也因此引起了工程技术人员的关注。诸多文献[2-4]分析了 SNR 失配对 Turbo 码性能的影响, 结果表明, SNR 估计偏差在-2dB 至 6dB 之间 Turbo 码的性能折损是基本可以容忍的, 即在这样的信噪比误差范围内 Turbo 码的译码性能变化并不十分敏感。

随着对高效、高可靠性数字通信系统需求的迅猛增长, 如何在数据源功率和带宽有限的条件下使信息传输的误码率最小成为目前通信领域最为关心的问题, 高性能的纠错码与高效的多进制调制技术结合也因此成为研究的热点问题之一。Goff 等人首先提出了基于比特交织的 Turbo 码高效调制(BITCM)方案^[5], 取得了优异的 BER 性能; Robertson 与 Wozz 使用 TCM 好码作为 Turbo 码的成员码, 提出了称之为 Turbo 网格编码调制(T-TCM)的 Turbo 码高阶调制方

案^[6]。与面向 BPSK 调制方式的二元 Turbo 码相同, 结合多进制调制方式的 BITCM 与 T-TCM 系统依然将信道的信噪比作为译码算法的一个参量, 因此信噪比的估计误差会影响系统的 BER 性能。文献[7,8]分析了 SNR 失配对 BITCM 系统性能的影响, 而关于 T-TCM 系统中 SNR 失配问题的分析至今没有相关文献可以参考。

本文在 AWGN 信道下分析研究了 SNR 失配对 T-TCM 系统性能的影响, 并根据迭代译码算法的特点从理论上给出解释, 提出了一种无需 SNR 估计的 T-TCM 译码方案。文章安排如下, 第 2 节仿照二元 Turbo 码的 Log-MAP 算法结构构造了基于符号的对数域 T-TCM 一般译码算法(S-Log-MAP 算法); 第 3 节借助蒙特卡洛仿真研究了 SNR 失配对于 T-TCM 系统性能的影响, 并从理论上分析了原因, 在此基础上提出无需 SNR 估计的 T-TCM 译码方案; 第 4 节是结束语。

2 联合信道信噪比的 T-TCM 译码算法

Robertson 等人在文献[9]中详细阐述了 T-TCM 的译码算法, 但是推导过程非常复杂, 而且其简化的对数域算法并未给出。为便于分析信道信噪比在算法中的数学表述关系, 本文按照标准二元 Turbo 码的 Log-MAP 算法结构给出 T-TCM 基于符号的对数域译码算法, 为区别记作 S-Log-

MAP 算法。

考虑一般情况, 设 $d_k = i$ ($i = 0, 1, \dots, 2^m - 1$) 表示 k 时刻进入 T-TCM 编码器的 m 个二进制比特, x_k 为对应于 d_k 的调制符号输出; 进入 AWGN 信道经过理想的同步解调抽样后, 对应的接收信号为 y_k 。为表述方便, 设 y_1^N 表示 T-TCM 译码器接收到的受噪声污染的信息符号序列, N 为符号序列长度, 则 $y_1^N = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ 。MAP 算法是基于最大后验概率的最优译码算法, 它充分利用整个接收信息序列以完成对当前信息的判决, 不同于二元 Turbo 码, 在 T-TCM 系统中, 传输的信息可看作多个二进制比特构成的信息符号(即 d_k), 而译码的最终目标是完成对 d_k 的检测与判决。仿照二元 Turbo 码的似然比定义, 选择 $d_k = 0$ 作为参考, T-TCM 关于编码信息 $d_k = i$ 的对数似然比可以表示为

$$L(d_k = i) = \ln \frac{P\{d_k = i | y_1^N\}}{P\{d_k = 0 | y_1^N\}} = \ln \frac{\sum_M \sum_{M'} \gamma_i(y_k, M', M) \alpha_{k-1}(M') \beta_k(M)}{\sum_M \sum_{M'} \gamma_0(y_k, M', M) \alpha_{k-1}(M') \beta_k(M)} \quad (1)$$

译码器按对数似然比最大进行判决。与二元 Turbo 译码类似, 这里 $\gamma_i(y_k, M', M)$ 表示编码器状态转移 $M' \rightarrow M$ 所对应的分支度量; $\alpha_k(M)$ 与 $\beta_k(M)$ 仍然定义为前向状态度量和后向状态度量, 同样可以按照 RSC 码的网格图进行递推得到。借助雅可比对数公式, 对数域内的对数似然比与状态度量可以按照式(2)–式(4)计算, 式中 $\tilde{\gamma}_i(y_k, M', M)$, $\tilde{\alpha}_k(M)$ 和 $\tilde{\beta}_k(M)$ 分别对应于对数域内的分支度量与状态度量。

$$L(d_k = i) = \max_{(M, M')}^* (\tilde{\alpha}_{k-1}(M') + \tilde{\gamma}_i(y_k, M', M) + \tilde{\beta}_k(M)) - \max_{(M, M')}^* (\tilde{\alpha}_{k-1}(M') + \tilde{\gamma}_0(y_k, M', M) + \tilde{\beta}_k(M)) \quad (2)$$

$$\tilde{\alpha}_k(M) = \max_{M'}^* (\tilde{\alpha}_{k-1}(M') + \tilde{\gamma}_i(y_k, M', M)) \quad (3)$$

$$\tilde{\beta}_{k-1}(M') = \max_M^* (\tilde{\beta}_k(M) + \tilde{\gamma}_i(y_k, M', M)) \quad (4)$$

值得指出的是, 当存在并行路径时, 参与式(3)与式(4)状态度量递推的分支度量应为对应当前状态转移下所有存在的并行分支度量值在雅可比对数公式下的运算结果。其中雅可比对数公式 \max^* 定义为

$$\max^*(u_1, u_2) \triangleq \ln(e^{u_1} + e^{u_2}) = \max(u_1, u_2) + \ln(1 + e^{-|u_1 - u_2|}) \quad (5)$$

由上述算法可以看出, 雅可比对数式是 S-Log-MAP 算法的核心, 而分支度量是 T-TCM 译码最基本的量度, 状态度量的递推与对数似然比的计算均是在分支度量的基础上得到的。分支度量与接收信息和外信息有关, 在迭代译码过程中按照定义^[9]可以将其分解为 3 部分

$$\gamma_i(y_k, M', M) = p(y_k | d_k = i, S_k = M, S_{k-1} = M') \cdot P(d_k = i | S_k = M, S_{k-1} = M') \Pr(S_k = M | S_{k-1} = M') \quad (6)$$

其中 $P(d_k = i | S_k = M, S_{k-1} = M')$ 为 1 或 0, 表示信息比特组 d_k 与编码器状态转移 $M' \rightarrow M$ 是否相关; $\Pr(S_k = M | S_{k-1} = M')$ 为该状态转移条件下 $d_k = i$ 的先验信息, 即

$$\Pr(S_k = M | S_{k-1} = M') = \Pr(d_k = i) \quad (7)$$

这一项在迭代译码过程中使用外信息进行更新。 $p(y_k | d_k$

$= i, S_k = M, S_{k-1} = M')$ 表示 $P(d_k = i | S_k = M, S_{k-1} = M')$ 为 1 时输入信息比特组为 $d_k = i$ 时的条件概率函数。在 AWGN 信道下, 分支度量在对数域可以简化为

$$\tilde{\gamma}_i(y_k, M', M) = -|y_k - x_k|^2 / 2\sigma_n^2 + \ln \Pr(d_k = i) \quad (8)$$

式(8)忽略了对译码性能没有影响的常数项, σ_n^2 表示由信道估计得到的高斯白噪声的方差。可以看出, 在 T-TCM 迭代译码过程中, S-Log-MAP 算法的分支度量由两部分构成: 接收信息符号与原信息符号之间的平方欧氏距离构成的最大似然信息以及外信息构成的先验信息, 表征信道信噪比的噪声方差将影响最大似然信息在整个算式中的权重, 这与二元 Turbo 码的 Log-MAP 算法是相同的。

在二元 Turbo 码中, 信噪比作为系统信息的一个权值还将影响到外信息的产生, 而在 T-TCM 系统中情况有些不同。结合式(6)与式(7), 计算对数似然比信息的式(1)最终可以分解为

$$L(d_k = i) = \ln \frac{\Pr(d_k = i)}{\Pr(d_k = 0)} + \ln \frac{\sum_M \sum_{M'} p(y_k | d_k = i, M', M) \alpha_{k-1}(M') \beta_k(M)}{\sum_M \sum_{M'} p(y_k | d_k = 0, M', M) \alpha_{k-1}(M') \beta_k(M)} = z_k^i + w_k^i \quad (9)$$

构成 $L(d_k = i)$ 的第 1 部分是另外一个成员译码器提供给本地成员译码器关于输入信息符号 $d_k = i$ 的外信息, 记作 z_k^i ; w_k^i 则表示本地成员译码器将要提供给另外一个成员译码器关于 $d_k = i$ 的外信息。可以看出, S-Log-MAP 算法的对数似然比仅包含两项, 这与二元 Turbo 码的情况是不同的, 这是因为在 T-TCM 系统中, 信息比特与校验比特共同映射到一个星座符号, 在信道中是作为一个整体进行传输的, 因此无法将两部分的先验信息进行剥离, 信道信噪比也不会像二元 Turbo 码一样直接通过对系统信息的加权影响对数似然比与外信息之间的构成关系。

3 SNR 失配对 T-TCM 系统性能的影响分析

3.1 SNR 失配对 T-TCM 系统性能的影响

本文借助蒙特卡洛仿真研究 SNR 失配对 T-TCM 系统性能的影响, 建立模型如图 1 所示。AWGN 信道实际信噪比对应的高斯噪声方差为 σ_n^2 , 随机的二进制信息序列作为仿真的信源进入 T-TCM 编码器完成编码调制后输出至 AWGN 信道, 受到噪声污染的调制信号在理想同步状态下进行解调并抽样输出, T-TCM 译码器根据解调器输出的符号序列与信道估计得到的高斯噪声方差 $\hat{\sigma}_n^2$ 按指定的迭代次数完成 T-TCM 系统的译码, 其中成员译码器采用 S-Log-MAP 算法。

为便于分析, 定义 SNR 估计偏移 $10 \lg(\sigma_n^2 / \hat{\sigma}_n^2)$ 来表征估计 SNR 与实际信道 SNR 的误差大小即 T-TCM 系统的 SNR 失配程度, 不失一般性, 本文分别选取带宽效率为 2bit/(s·Hz) 和 3 bit/(s·Hz) 的两种 T-TCM 系统进行定点信噪比仿真, 两种系统的具体构成如表 1 所示, 其中 m 与 \tilde{m} 分

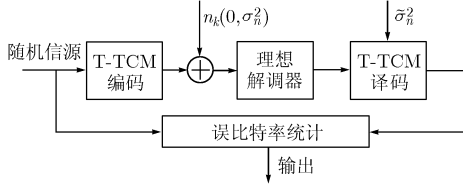


图 1 T-TCM 系统 SNR 失配的蒙特卡洛仿真模型

表 1 仿真选取的两种 T-TCM 系统详细构成

带宽效率 bit/(s·Hz)	\tilde{m}/m	$H^p(D)$	$H^p(D)$	$H^p(D)$	状态数	编码 码率	调制 方式
2	2/2	11	01	04	8	2/3	8PSK
3	2/3	21	02	04	16	3/4	16QAM

别表示输入 T-TCM 编码器的信息比特数目及参与校验比特生成的信息比特数目, 这样的构成充分考虑了编码约束度、码率、调制方式及并行分支等因素可能带来的影响。

图 2(a), 图 2(b)分别为 AWGN 信道下两种不同构成的 T-TCM 系统 BER 性能随 SNR 估计偏移的变化曲线, 选取的信息帧长为 1500bit, 迭代译码 4 次, 奇偶交织器采用具有伪随机特性的线性同余式^[10]设计, 这里使用 E_s/N_0 衡量 AWGN 信道的实际信噪比。由图可以看出, SNR 欠估计时, T-TCM 的系统性能随着 SNR 估计误差的增大而逐渐下降, 当 SNR 估计偏差不大于 4dB 时, 系统的误比特率基本不会增加; 当出现 SNR 过估计时, T-TCM 系统性能并未下降, 与正确 SNR 估计下的 BER 性能保持一致, 本文在更大的 SNR 估计偏差下进行了大量的仿真, 结果同样表明 SNR 过估计不会带来系统性能的折损。

3.2 原因分析与理论解释

分析 T-TCM 的译码算法可知, 在所有的译码量度中直接与信噪比相关的只有分支度量, 因此 SNR 失配通过分支度量间接作用到状态度量、对数似然比、外信息等变量, 从而最终影响系统的 BER 性能。与二元 Turbo 码的 Log-MAP 算法相同, S-Log-MAP 算法在完成 T-TCM 译码的过程中使用了大量的雅可比对数公式, 通过雅可比对数公式, S-Log-

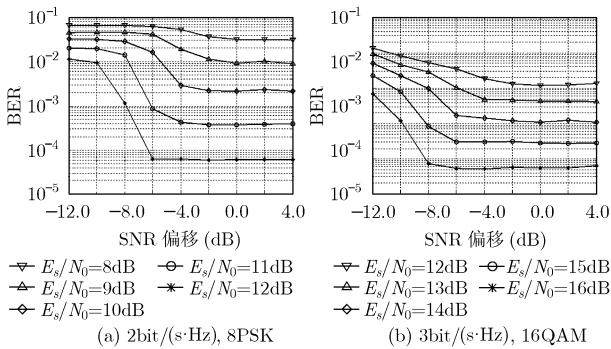


图 2 SNR 失配对 T-TCM 系统性能的影响

MAP 算法完成状态度量的积累、对数似然比的计算, 从而选择正确的转移路径。转移路径的选择错误会导致最终的译码判决出错, 由译码算法可知, 状态度量的递推结果直接影响转移路径的选择, 而状态度量根据分支度量递推得到, 所以译码判决出错最终源自于由于 SNR 估计错误造成的分支度量计算偏差。

式(8)表明, 若不考虑外信息(即首次迭代译码的情况), 对数域分支度量将随着信道估计得到的信噪比呈线性变化, 因此有必要分析输入变量的线性改变对雅可比对数式计算结果的影响。为表述方便, 这里引入函数 $\psi(|u_1 - u_2|)$ 表示式(5)中的第 2 项 $\log(1 + e^{-|u_1 - u_2|})$, 这一项不妨称之为补偿值, 设 k 为非零实数, 则

$$\begin{aligned} \max^*(ku_1, ku_2) &= \max(ku_1, ku_2) + \log(1 + e^{-|ku_1 - ku_2|}) \\ &= k \max(u_1, u_2) + \psi(|ku_1 - ku_2|) \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知, 雅可比对数式虽然不随 k 单调变化, 但实数 k 不会影响 \max 函数对变量 u_1, u_2 的选择与判决, 因此在算法运算过程中因 SNR 估计误差产生的译码错误只能来自于作为补偿值的非线性函数 $\psi(|u_1 - u_2|)$ 。

图 3 给出了 T-TCM 译码过程中前向状态度量的递推运算示意图, 其中 α_k^i 表示 k 时刻的状态度量, γ_k^i 表示与之相关的 k 时刻分支度量。由于 α_k^i 为上一时刻的递推结果, 因此它与以前各个时刻的分支度量值均存在关联, 为使问题分析简单化, 假设参与递推计算的所有 α_k^i 相等, 这也是递推运算刚开始进行时的情况。由上面的分析可知, 当估计得到的 SNR 与实际信道的 SNR 不匹配时, 分支度量 γ_k^i 将随之线性增大或减小, 以 γ_k^1, γ_k^2 为例, 两者同时线性变化虽然并不影响对中间变量 $r_1 = \gamma_k^1 + \alpha_k^1$ 与 $r_2 = \gamma_k^2 + \alpha_k^2$ 的选取结果, 但由非线性函数 ψ 计算得到的补偿值却会将误差通过 α_{k+1}^m 传递给下一次递推运算; $k+1$ 时刻, 带有误差的 $\alpha_{k+1}^m, \alpha_{k+1}^n$ 分别与 SNR 失配条件下的 $\gamma_{k+1}^m, \gamma_{k+1}^n$ 相加后进行取大操作, 此时有可能造成状态度量错选, 其结果会继续影响下一次递推。后向状态度量的递推以及对数似然比的计算与前向状态度量的递推具有相同的运算结构, 事实上, 对于图 3 中的运算, 若去掉非线性函数 ψ , 当发生 SNR 失配时, 所有变量均线性变化, 不会影响最后的译码判决, 这说明 SNR 失配引起的译码错误最终是由非线性函数 ψ 导致的。

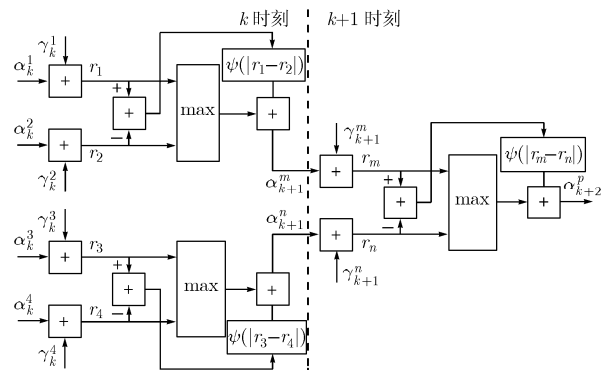


图 3 前向状态度量递推运算示意图

为说明欠估计与过估计对 T-TCM 系统性能的影响不同, 图 4 给出了函数 $\psi(|u_1 - u_2|)$ 随 $|u_1 - u_2|$ 的变化曲线, 根据函数 ψ 的曲线变化情况将其大致划分为 3 个区间: 非敏感区、敏感区和超敏感区, 如图 4 示意。若正确估计信道的 SNR, 在算法运算过程中函数 ψ 将根据两个输入变量之间的距离落入相应区间内曲线上的某一点, 但是当发生 SNR 估计错误时, 输入变量之间的距离会因此改变, 从而使函数 ψ 的值发生变化, 在不同的区域函数值对输入变量距离变化的敏感性不同。当 SNR 欠估计时, 随着 $1/2\sigma_n^2$ 减小, 进入或从某一状态出发的分支度量之间的差值变小, 函数 ψ 向敏感区域移动, 造成较大的补偿值误差, 进而容易错选转移路径; 当发生 SNR 过估计时, $1/2\sigma_n^2$ 偏大使函数更易落入非敏感区, 由于此区间补偿值很小, 对转移路径的选择产生的影响也较小, 事实上在式(10)中, 当 $|k|$ 增加到一定程度, $\psi(ku_1 - ku_2)$ 的值相对于 $k \max(u_1, u_2)$ 是可以忽略的, 因此从整体上看 SNR 过估计造成的系统性能损失要小于欠估计的情况, 这也是二元 Turbo 码 SNR 过估计可以容忍的范围大于欠估计情况的原因。与 Turbo 码情况不同的是, T-TCM 系统在 SNR 过估计的情况下始终不会造成性能折损, 这是因为在 Turbo 迭代译码过程中, 信道信噪比通过系统信息的加权影响了对数似然比与外信息的构成关系, 当 SNR 过估计超过一定范围时会造成对数似然比、系统信息和外信息之间的比例严重失衡, 此时从对数似然比分离出来的外信息不再可靠, 因此系统性能将迅速下降; 而从式(9)可以看出, 在 T-TCM 系统中, 对数似然比与外信息之间的构成关系与信道信噪比无关, 故 SNR 过估计的结果只能通过线性改变分支度量的值使译码过程中的各种变量成比例增大, 不会对译码性能产生影响。

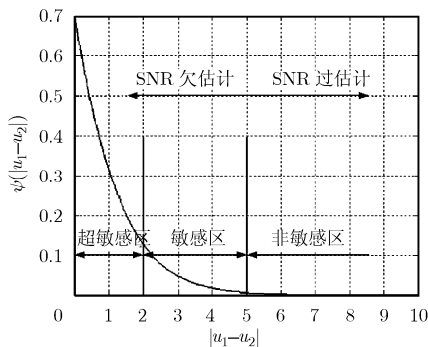


图 4 $\psi(|u_1 - u_2|)$ 函数的曲线图

3.3 无需 SNR 估计的 T-TCM 译码

本节给出无需 SNR 估计的 T-TCM 译码方案。由以上分析可知, SNR 失配影响 T-TCM 系统性能的根本原因在于雅可比函数补偿值的引入, 若在算法中忽略补偿值即采用对

应的 S-Max-Log-MAP 简化算法, 系统的 BER 性能将不会受到 SNR 估计失配的影响, 仿真结果验证了本文的推测, 大量的仿真数据表明, 在 S-Max-Log-MAP 算法下, T-TCM 系统的性能不再受 SNR 估计误差的影响。既然此时 T-TCM 的性能与 SNR 参数无关, 因此可将式(8)中的 $1/2\sigma_n^2$ 使用常数代替, 以降低 T-TCM 系统在工程应用中的要求及实现复杂度。为简便, 不妨令 $1/2\sigma_n^2 = 1$, 图 5 为 T-TCM 系统在该条件下的 BER 性能与采用 S-Log-MAP 算法、SNR 信息已知条件下的性能比较, 这里采用的 T-TCM 详细构成依然是表 1 给出的两种组合。可以看出, 两种条件下的系统 BER 曲线基本一致, 这说明无 SNR 信息的 T-TCM 译码并没有造成性能折损, 此时简化的 S-Max-Log-MAP 算法之所以与 S-Log-MAP 算法具有相同的性能是因为 T-TCM 系统正常工作的信道状况要好于二元 Turbo 码, 而在 SNR 较高的情况下, 两种算法是趋于一致的。

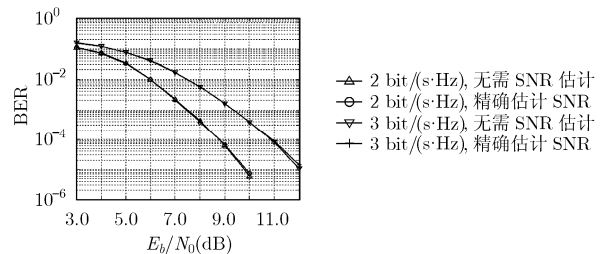


图 5 有无 SNR 信息的 T-TCM 性能比较

4 结束语

本文在 AWGN 信道下研究了 T-TCM 系统中的 SNR 失配问题, 仿真结果表明, 在 SNR 欠估计偏差不大于 4dB 的范围内, T-TCM 系统的 BER 性能基本不受影响, 更大的 SNR 偏差则会导致系统性能迅速下降; 而 SNR 过估计始终不会造成系统性能的折损。对此本文结合雅可比对数式及迭代译码算法的特点从理论上给出了解释, 并进一步提出无需 SNR 估计的 T-TCM 译码方案, 与 SNR 信息已知的 T-TCM 译码相比, 该方案在保证没有系统性能折损的情况下, 使 T-TCM 系统摆脱了信道估计的约束, 大大降低了其使用要求与实现复杂度。

参考文献

- [1] Berrou C, Glavieux A, and Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes[C]. IEEE International Conference on Communication, Geneva, 1993: 1064-1070.
- [2] Jordan M and Nichols R. The effects of channel characteristics on turbo code performance[C]. In Proc. Milcom'96, McLean, VA, Oct. 1996: 17-21.
- [3] Summers T A and Wilson S G. SNR mismatch and online estimation in turbo decoding[J]. IEEE Trans. on

- Communication*, 1998, 46(4): 421-423.
- [4] Worm A, Hoeger P, and When N. Turbo-decoding without SNR estimation[J]. *IEEE Communication Letters*, 2000, 4(6): 193-195.
- [5] Goff S Le, Glavieux A, and Berrou C. Turbo-codes and high spectral efficiency modulation[C]. In Proc. ICC'94, New Orleans, USA, 1994: 645-649.
- [6] Robertson P and Worz T. Coded modulation scheme employing turbo codes[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(18): 1546-1547.
- [7] Sun M, Li Y, and Sun S. SNR mismatch in bit-interleaved Turbo-coded modulation[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(19): 1392-1394.
- [8] Sun M, Li Y, and Sun S. Impact of SNR estimation error on turbo code with high-order modulation[C]. Vehicular Technology Conference (VTC), Milan, Italy, 2004, Vol.3: 1320-1324.
- [9] Robertson P and 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.
- [10] Takeshita O Y and Costello D J. On deterministic linear interleavers for Turbo codes[C]. 35th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing, Illinois, USA, 1997: 711-712.
- 闫 涛: 男, 1979 年生, 博士生, 主要从事保密通信与抗干扰技术研究.
- 茹 乐: 男, 1978 年生, 副教授, 博士, 研究方向为宽带无线通信技术.
- 张 曦: 男, 1979 年生, 博士, 讲师, 研究方向为通信侦察识别与干扰技术.
- 杜兴民: 男, 1941 年生, 教授, 研究领域为信息安全与通信对抗技术.