

文章编号: 2095-4980(2018)02-0277-06

多进制部分响应 Multi-h CPM 的软输出维特比算法

赖鹏辉¹, 马艳敏¹, 王世练^{*1}, 谢顺钦², 高 凯¹

(1.中国人民解放军国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410005;
2.中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为降低多调制指数连续相位调制(Multi-h CPM)信号解调和级联译码的复杂度和时延, 提出了一种适用于多进制部分响应 Multi-h CPM 信号的低复杂度软输出维特比(LC-SOVA)算法。针对倾斜相位(TP)+频率脉冲截断(FPT)低复杂度 Multi-h CPM 解调, 在维特比检测中对每个状态存储并不断更新符号软信息, 通过舍弃度量较小的路径来降低更新软信息的运算量, 且软信息更新过程可以并行处理, 复杂度降低一半, 时延与维特比算法等价。仿真结果表明, 所提 LC-SOVA 算法具有通用性, 适用于多进制部分响应 Multi-h CPM 信号的软信息计算, 在级联低密度奇偶校验码(LDPC)系统中, 该算法与 Max-log-MAP 算法相比信噪比损失几乎可以忽略不计。

关键词: 多指数连续相位调制; 软输出维特比; 脉冲截断; 倾斜相位; 低复杂度

中图分类号: TN911.3

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201802.0277

Low complexity soft-output Viterbi algorithm for nonbinary partial response Multi-h CPM

LAI Penghui¹, MA Yanmin¹, WANG Shilian^{*1}, XIE Shunqin², GAO Kai¹

(1.School of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410005, China;
2.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: To reduce both the complexity and the delay of demodulation and decoding for Multi-h Continuous Phase Modulation(Multi-h CPM) signal, a Soft Output Viterbi Algorithm with Low Complexity(LC-SOVA) is proposed, which can be utilized to M-ary Multi-h CPM signal with partial phase response. Based on the tilt phase-frequency(FPT) and pulse truncation low complexity demodulation of Multi-h CPM signal, the symbol soft information in the Viterbi states is stored and updated by discarding the smaller path to reduce the computational complexity. In the proposed algorithm, the soft information update process can be processed in parallel with half computation compared with the existing SOVA algorithm, and the time delay is equivalent with that of the Viterbi algorithm. The simulation results show that the proposed LC-SOVA algorithm is generally applied to any Multi-h signal and its performance degradation can be neglected compared to the Max-log-MAP algorithm.

Keywords: Multi-h Continuous Phase Modulation; Soft Output Viterbi; pulse truncation; tilt phase; Low Complexity

近年来, 在远距离测控领域, 对信息传输速率的要求越来越高, 具有高频谱效率的信号体制越来越成为关注的热点。具有恒定包络的连续相位调制信号就是其中被关注的最热门调制方式之一。Multi-h CPM 信号具有若干个随着时间循环变化的调制指数, 通过选择合适的调制指数不仅能有效增大 CPM 信号的最小欧式距离, 实现频谱效率和功率效率的有效折衷, 还可以使频谱更加紧凑, 带外滚降速度更快, 进一步提高带宽利用率^[1-2]。2004 年, 一种具有 2 个调制指数的部分响应 CPM 信号, 被先进靶场遥测计划组织(Advanced Range Telemetry Management, ARTM)作为第二代遥测新体制(Tier2)信号, 写入了 ARIG106-04 标准中, 其频带利用率为现有 PCM/FM 信号的 3 倍^[3]。

收稿日期: 2017-10-24; 修回日期: 2017-11-29

*通信作者: 王世练 email:wangsl@nudt.edu.cn

虽然 Multi-h CPM 在频谱效率和功率效率上存在较大优势,但是其最佳相干检测的复杂度太高,使其很难在现有硬件平台中实现。Multi-h CPM 信号的低复杂度解调算法主要有脉冲幅度调制(Pulse Amplitude Modulation, PAM)分解算法^[4-6]、倾斜相位(Tilted Phase, TP)^[7]、频率脉冲截断(Frequency Pulse Truncation, FPT)^[3,8]等方法, PAM 分解算法能够有效地降低解调复杂度,但是 PAM 分解算法需要计算大量复杂的伪符号,其匹配滤波器组比 Viterbi 算法更加复杂,对不同调制指数的 CPM 信号适应性也较差。采用基于 TP+FPT 的 Multi-h CPM 解调方法在相同解调性能下和 PAM 分解复杂度相近,实现起来相对简单^[9]。

针对 Multi-h CPM 级联编码的解调译码,文献[7]指出 CPM 调制可以看作连续相位编码器(Continuous-Phase Encoder, CPE)与无记忆调制器(Memoryless Modulation, MM)级联,而 CPE 有递归卷积码特性,因此可以参考卷积码译码或类卷积码(Turbo 码)译码^[10]对 CPM 进行软判决译码。文献[11]首次提出一种针对 Turbo 码的 MAP 算法的实现,即基于最小误符号率(Bahl Cocke Jelinek Raviv, BCJR)算法,为了降低 Turbo 码译码的复杂度和时延,Log-MAP 算法^[12]、Max-Log-MAP 算法^[13]等简化算法相继被提出。目前在 CPM 通信系统中使用得较多的软判决算法也是 BCJR 算法或类 BCJR 算法^[14-15]。但是 BCJR 算法前向、后向的递推过程将会造成等于 Viterbi 算法 3 倍的时延,而且不能并行实现,对于遥测遥控应用场景来说是非常致命的。Hagenauer 等在文献[16]中首次提出了和 Viterbi 算法时延相同的软判决的 Viterbi 算法(SOVA)并将其应用在卷积码的译码中。文献[17]将传统 SOVA 算法进行了修正,并证明修正后的算法能达到和 Max-log-MAP 算法相同的性能。Ling Cong 等在文献[18]中将 SOVA 算法扩展到多进制并应用到 Turbo 码译码中。文献[19]提出一种基于 SOVA 算法的多进制 CPM 迭代译码体制,但是不迭代的情况下性能较差,而多次迭代会大大增加译码时延。文献[20]提出了一种针对二进制全响应 Multi-h CPM 的 SOVA 算法。目前为止,适合多进制部分响应 Multi-h CPM、具有和 Max-log-MAP 算法性能相近的 SOVA 算法尚未见诸文献。

针对多进制部分响应 Multi-h CPM 级联编码系统,本文提出的 LC-SOVA 算法具有普适性,能够和倾斜相位+频率脉冲截断低复杂度解调算法联用。该算法通过舍弃度量较小的路径来降低更新软信息的运算量,算法适合并行处理,复杂度降低一半,时延与维特比算法等价。仿真表明,级联 LDPC 编码系统中该算法与 Max-log-MAP 算法接近。

1 Multi-h CPM 信号模型

Multi-h CPM 信号的基带信号表示为:

$$s(t, \alpha) = \sqrt{\frac{E_s}{T}} \exp\{j[\psi(t, \alpha) + \psi_0]\} \quad (1)$$

$$\psi(t, \alpha) = 2\pi \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n h_n q(t - nT) \quad (2)$$

式中: E_s 为信号单个码元能量; T 为码元周期; $\alpha = (\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots)$ 为发送的 M 进制信息符号序列,即 $\alpha_n \in \{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1)\}$; ψ_0 为初始相位。 $h_n = K_n / P$ 为调制指数,在每个码元周期内保持不变,若干调制指数 $\{h_0, h_1, \dots, h_{N_h-1}\}$ 以 N_h 为周期循环变化, N_h 是调制指数个数。 $q(t)$ 为 CPM 相位波形,满足 $q(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$, 频率脉冲 $g(t)$ 可以是矩形脉冲(REC)、升余弦脉冲(RC)或高斯脉冲(GMSK),其在时间间隔 $(0, LT)$ 内受限,并满足 $\int_0^{LT} g(\tau) d\tau = q(LT) = \frac{1}{2}$ 。

Multi-h CPM 可以分解为:

$$\psi(t, \alpha) = \theta_n + \theta(t; \tilde{\alpha}_n) \quad (3)$$

前一项为相位状态,且有 $\theta_n \in \left(0, \frac{\pi}{P}, \frac{2\pi}{P}, \frac{3\pi}{P}, \dots, \frac{(2P-1)\pi}{P}\right)$, 后一项为相关状态,其由 $\tilde{\alpha}_n = (\alpha_{n-L+1}, \dots, \alpha_{n-1}, \alpha_n)$ 决定。

因此可定义 Multi-h CPM 信号的网格状态为:

$$\sigma_n = \{\theta_n, \tilde{\alpha}_n\} = \{\theta_n, \alpha_{n-L+1}, \dots, \alpha_{n-1}, \alpha_n\} \quad (4)$$

CPM 信号的复基带接收模型为:

$$r(t) = s(t; \alpha) + n(t) \quad (5)$$

式中 $n(t)$ 为加性高斯白噪声。

最大似然序列检测(Maximum Likelihood Sequence Detection, MLSD)输出为:

$$\tilde{\alpha} = \arg \max_{\tilde{\alpha}} \left\{ -\int_{-\infty}^{\infty} |r(t) - s(t; \tilde{\alpha})|^2 dt \right\} = \arg \left\{ \max_{\tilde{\alpha}} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{\infty} r(t) e^{-j\psi(t, \tilde{\alpha})} dt \right\} \quad (6)$$

在时间间隔 $[nT, (n+1)T]$ 内, 有:

$$\operatorname{Re} \int_0^{(n+1)T} r(t) e^{-j\psi(t, \tilde{\alpha})} dt = \underbrace{\operatorname{Re} \int_0^{nT} r(t) e^{-j\psi(t, \tilde{\alpha})} dt}_{\lambda(n+1)} + \underbrace{\operatorname{Re} \int_{nT}^{(n+1)T} r(t) e^{-j\psi(t, \tilde{\alpha})} dt}_{\Delta\lambda} \quad (7)$$

$$\Delta\lambda = \operatorname{Re} \int_{nT}^{(n+1)T} r(t) e^{-j\psi(t, \tilde{\alpha})} dt = \operatorname{Re} \left[e^{-j\theta_n} \int_{nT}^{(n+1)T} r(t) e^{-j\theta(t, \tilde{\alpha}_n)} dt \right] \quad (8)$$

计算得到的累积度量 λ 和度量增量 $\Delta\lambda$ 用于下一部分的 Viterbi 算法。最终可得到解调序列。

2 多进制部分响应 Multi-h CPM 的 SOVA 算法

2.1 基于倾斜相位-频率脉冲截断的 Multi-h CPM 低复杂度解调算法

Rimoldi 在文献[7]中提出倾斜相位的算法使得 CPM 的相位状态和网格状态各减少一半。Aulin 在文献[8]中提出的频率脉冲截断的算法使 RC 成型的部分响应长度较大的 CPM 信号的解调复杂度呈几何下降。设 TP+FPT 下的相位状态为 \mathcal{G}'_n , v_n 为倾斜项造成的相位偏移, 关联状态为 $\mathcal{G}(t; \tilde{\alpha}'_n)$, 其中 $\tilde{\alpha}'_n = (\alpha_{n-L'+1}, \dots, \alpha_{n-1}, \alpha_n)$, 则倾斜相位-脉冲截断下 Multi-h CPM 的网格状态可定义为:

$$\sigma'_n = \{ \mathcal{G}'_n, \tilde{\alpha}'_n \} = \{ \mathcal{G}'_n, \alpha_{n-L'+1}, \dots, \alpha_{n-1}, \alpha_n \} \quad (9)$$

式(9)可以化为:

$$\Delta\lambda = \operatorname{Re} \int_{nT}^{(n+1)T} r(t) e^{-j\psi(t, \tilde{\alpha})} dt = \operatorname{Re} \left[e^{-j(\mathcal{G}'_n + v_n)} \int_{nT}^{(n+1)T} r(t) e^{-j\mathcal{G}(t, \tilde{\alpha}'_n)} dt \right] \quad (10)$$

表 1 为 Multi-h CPM(3RC, $M=4$)信号 TP+FPT 和 MLSD、选取 12 个主脉冲的 PAM 分解的解调复杂度、性能损失的对比。图 1 给出了 TP-FPT 解调性能和 MLSD 解调性能对比(参数 1 为 $h=[4,5]/16$, 3RC, $M=4$, 参数 2 为 $h=[5,6]/16$, 3RC, $M=4$, 联合下界表示 CPM 信号解调性能的理论最佳情况, 由文献[3]的式(11)计算而来)。

表 1 TP-FPT 解调复杂度
Table1 Demodulation complexity of TP-FPT

algorithm	number of phase states	number of match filter	number of grid states	loss of performance
TP-FPT	16	16	64	0.02 dB
PAM12	32	28	64	0.1 dB
MLSD	32	64	512	-

2.2 多进制部分响应 Multi-h CPM 的 SOVA 算法

基本原理

文献[20]提出了二进制全响应 Multi-h CPM 的 SOVA 算法。该算法将传统的 SOVA 算法基本原理和 Multi-h CPM 结合起来, 用路径的度量差来更新软判决值, 提高了解调性能。但是这种算法在多进制或部分响应 Multi-h CPM 信号中不适用, 而且文献[17]已经证明这种传统的 SOVA 算法不能达到接近 Max-log-MAP 的性能。

文献[18]介绍了应用在 Turbo 码译码中, 性能接近 Max-log-MAP 算法的多进制 SOVA 算法。现将描述适应多进制部分响应 Multi-h CPM 的 SOVA 算法需要的变量定义如下:

假设在译码过程中, 信息序列为 $u=(u_1, u_2, \dots, u_k)$,

其中 $u_j \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ 。编码后序列为 $c=s(u)=(c_1, c_2, \dots, c_N)$, 其中 $c_i \in \{U_0, U_1, \dots, U_{M-1}\}$ 。MAP 算法中, 每个符号的对数似然比为:

$$A_{i,\mu} = \ln \left[P(u_i = \mu | r) / P(u_i = 0 | r) \right] \quad (11)$$

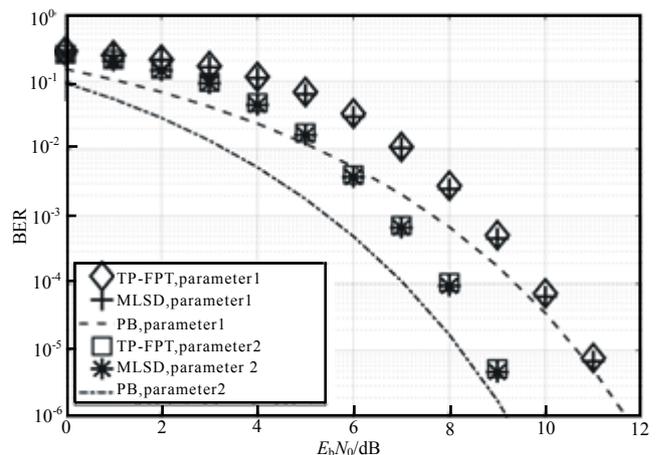


Fig.1 Demodulation performance of TP-FPT

图 1 TP-FPT 解调性能

由公式 $\ln\left(\sum_{i=1}^N \delta_i\right) \approx \max_{i \in [1, N]} \{\delta_i\}$, Max-log-MAP 算法将该式简化为:

$$A_{i,\mu} \approx \ln\left[\max_{c=s(u):u_i=\mu} P(c|r)\right] - \ln\left[\max_{c=s(u):u_i=0} P(c|r)\right] \quad (12)$$

在高斯信道中, 如果信号等概发送, 可得:

$$A_{i,\mu} \propto -\min_{c=s(u):u_i=\mu} \|r-c\| + \min_{c=s(u):u_i=0} \|r-c\| \quad (13)$$

定义 $L_{i,\mu}$ 为 $u_i = \mu$ 时最有可能码字序列欧氏距离和全局最大似然码字的差为:

$$L_{i,\mu} = \min_{c=s(u):u_i=\mu} \|r-c\| - \min_{c=s(u)} \|r-c\| \quad (14)$$

经过简单的计算可得:

$$A_{i,\mu} \propto L_{i,0} - L_{i,\mu} \quad (15)$$

因此可以通过得到 $L_{i,\mu}$ 来获取 $A_{i,\mu}$ 。

k 时刻的每个状态 s_k 中需要存储传统 Viterbi 算法中的累积度量 $\Gamma(s_k)$ 和一个大小为 $\delta \times M$ 的可靠性度量矩阵 $\hat{L}(s_k) = [\hat{L}_{j,\mu}(s_k)] (j=k-\delta+1, \dots, k; \mu=0, 1, \dots, M-1)$, 其中 δ 为译码窗长度。根据 CPM 状态转移的特性, 由于 k 时刻状态的输入符号不同, 每个状态有 M 条路径转移出去, 在 $k+1$ 时刻每个状态有 M 条路径汇入, 编号为 m , $m \in 0, 1, \dots, M-1$, 对于部分响应 CPM 汇入每个状态的 M 条路径所对应的符号是相同的。定义 $k+1$ 时刻通过编号为 m 的路径汇入状态 s_{k+1} 得到的累积度量为 $\Gamma(s_k^m, s_{k+1})$, TP+FPT 低复杂度解调之后 $\Gamma(s_k^m, s_{k+1})$ 可由 $\Gamma(s_k)$ 和式(10)计算得到。路径 m 和幸存路径的度量差定义为 $\Delta_m = \Gamma(s_{k+1}) - \Gamma(s_k^m, s_{k+1})$

2.3 多进制部分响应 Multi-h CPM 的低复杂度 SOVA 算法流程

多进制部分响应 Multi-h CPM 的 SOVA 简化算法流程如下:

1) 初始化 0 时刻所处状态的累积度量 $\Gamma(s_0)=0$, 其他状态的累积度量 $\Gamma(s_0)=-\infty$, 每个状态下的 $\hat{L}(s_0)$ 中所有元素初始化为 $+\infty$ 。

2) k 时刻, 假设每个状态中已经存储了可靠性矩阵 $\hat{L}(s_0)$ 和累积度量 $\Gamma(s_k)$, 计算 $k+1$ 时刻汇入每个状态 M 条路径的累积度量 $\Gamma(s_k^m, s_{k+1})$, 选取其中最大的赋值给 $\Gamma(s_{k+1})$, 再根据 Δ_m 定义计算 Δ_m 。

文献[19]中 SOVA 算法需要比较进入每个状态的 M 条路径, 并求出它们与度量最大的路径(即幸存路径)的度量差 Δ_m 。本文提出只需考虑幸存路径和度量较大路径即竞争路径, 例如当 $M=4$ 时只需考虑幸存路径和度量第二大的路径, 记录下 2 条路径编号, 并计算出对应的 Δ_m (幸存路径对应的 $\Delta_m = 0$)。

3) 设幸存路径对应的输入符号为 ν (对于部分响应 CPM 信号, 汇入每个状态的 M 条路径对应的符号相同), 用式(16)初始化 $\hat{L}_{k+1,\mu}(s_{k+1})$, 用式(17)更新已经存储在每个状态中可靠性向量 $\hat{L}(s_k)$ 中的元素。将得到的 $\hat{L}_{k+1,\mu}(s_{k+1})$ 和更新过的 $\hat{L}(s_k)$ 存储到新的可靠性向量 $\hat{L}(s_{k+1})$ 中。

$$\hat{L}_{k+1,\mu}(s_{k+1}) = \begin{cases} 0, \mu=\nu \\ +\infty, \mu \neq \nu \end{cases} \quad (16)$$

$$\hat{L}_{j,\mu}(s_{k+1}) = \min_{m \in 0, \dots, M-1} \left\{ \hat{L}_{j,\mu}(s_k^m) + \Delta_m \right\} \quad (17)$$

文献[19]在步骤 2) 中保留了进入每个状态的所有路径, 证明了这样能够达到接近 Max-log-MAP 算法的性能, 但是这样会使式(17)的计算复杂度十分庞大。本文由于在步骤 2) 只保留了少数几条度量较大的路径, 运算量大大减少, 当 $M=4$ 时对式(17)降低了原先的一半的运算量。最终的仿真结果也表明这样处理对性能的影响几乎可以忽略不计。

4) 若 $k < \delta$ 转到 2), 若 $k \geq \delta$ 找到累积度量 $\Gamma(s_{k+1})$ 最大的状态, 输出该状态下的 $\hat{L}_{k-\delta+1,\mu}(s_{k+1})$, $\hat{L}_{k-\delta+1,\mu}(s_{k+1})$ 输出之后可以将该时刻所有状态下的 $\hat{L}_{k-\delta+1,\mu}(s_{k+1})$ 所占空间释放。

5) 格雷映射中将 '00' 表示为 '0', '01' 表示为 '1', '11' 表示为 '2', '10' 表示为 '3', 可根据公式 $\ln\left(\sum_{i=1}^N \delta_i\right) \approx \max_{i \in [1, N]} \{\delta_i\}$ 将每个符号软信息转化为 2 个比特软信息。

3 仿真分析

按图 2 所示系统仿真所提出算法性能, LDPC 编码采用 CCSDS 深空标准中推荐的码字, 码长为 8 176, 码率为 7/8, 迭代次数为 20, δ 选为 30。以 $h=[9,10]/16, 3RC, M=4$ 与 $h=[4,5]/16, 3RC, M=4$ 两组信号为例进行了性能仿真, 仿真结果如图 3 所示。结果表明 Multi-h CPM 经过 LDPC 信道编码性能提高了约 3 dB, 所提出的 SOVA 修正后没有性能损失, 该算法具有接近 Max-log-MAP 算法的性能。

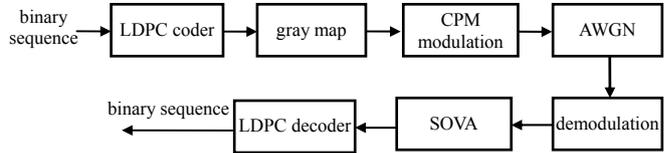


Fig.2 System simulation model
图 2 系统仿真模型

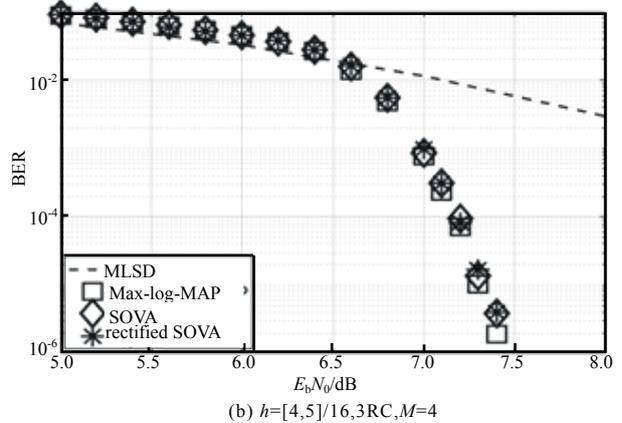
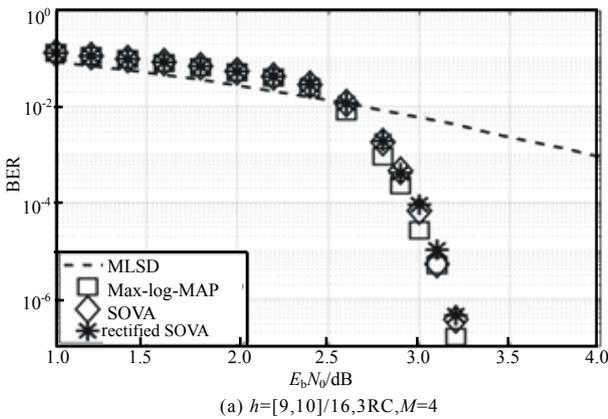


Fig.3 Error performance of SOVA&LDPC
图 3 SOVA+LDPC 误码性能

4 结论

本文提出了一种低时延、低复杂度的多进制部分响应 Multi-h CPM 的软输出维特比算法, 主要工作及得出的结论如下: 提出了一种与倾斜相位-频率脉冲截断算法联用且适用于多进制部分响应 Multi-h CPM 信号的低复杂度软判决维特比算法。对文献[19]中应用于 Turbo 码的多进制 SOVA 算法进行了优化, 运算复杂度降低一半。经优化后的 SOVA 算法继承了文献[1]中算法低时延、可并行的优点, 译码性能与 Max-log-MAP 算法性能接近。

参考文献:

- [1] ANDERSON J B,AULIN T,SUNDBERG C E. Digital phase modulation[M]. Germany:Ships Green, 1986:412.
- [2] TRANTER W H,TAYLOR D P,ZIEMER R E,et al. Continuous phase modulation part II:partial response signaling[M]. USA:Wiley-IEEE Press, 2007:245-260.
- [3] PERRINS E,RICE M. Reduced-complexity detectors for multi-h CPM in aeronautical telemetry[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2007,43(1):286-300.
- [4] PERRINS E,RICE M. PAM decomposition of M-ary multi-h CPM[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005,53(12): 2065-2075.
- [5] LAURENT P. Exact and approximate construction of digital phase modulations by superposition of Amplitude Modulated Pulses (AMP)[J]. IEEE Transactions on Communications, 1986,34(2):150-160.
- [6] MENGALI U,MORELLI M. Decomposition of M-ary CPM signals into PAM waveforms[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995,41(5):1265-1275.
- [7] RIMOLDI B E. A decomposition approach to CPM[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1988,34(2):260-270.
- [8] SVENSSON A,SUNDBERG C E,AULIN T A. Class of reduced-complexity Viterbi detectors for partial response continuous phase modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 1984,32(10):1079-1087.
- [9] 谢顺钦. 低信噪比下 Multi-h CPM 的接收关键技术研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院研究生院, 2017. (XIE Shunqin. Research on key technology of Multi-h CPM under low signal-to-noise ratio[D]. Mianyang,Sichuan,China: Graduate School of China Academy of Engineering Physics, 2017.)

- [10] LIN S,COSTELLO D J. Error control coding[M].2nd ed. New York:Prentice-Hall, Inc, 2004.
- [11] BAHL L,COCKE J,JELINEK F,et al. Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate (Corresp.)[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974,20(2):284–287.
- [12] ROBERTSON P,HOEHER P,VILLEBRUN E. Optimal and sub-optimal maximum a posteriori algorithms suitable for turbo decoding[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2012,8(2):119–125.
- [13] ERFANIAN J,PASUPATHY S,GULAK G. Reduced complexity symbol detectors with parallel structure for ISI channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1994,42(234):1661–1671.
- [14] LIU X,ZHAO S,MA X. A low complexity detection/decoding algorithm for NB-LDPC coded PRCPM system[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V, 2015.
- [15] XUE R,XIAO C L. An improved iterative decoding method for LDPC coded CPM systems in Rayleigh fading channel[C]// International Conference on Communications and Information Technology. [S.l.]:IEEE, 2012:341–346.
- [16] HAGENAUER J,HOEHER P A. Viterbi algorithm with soft-decision outputs and its applications[C]// Global Telecommunications Conference, 1989, and Exhibition. Communications Technology for the 1990s and Beyond. Beijing:IEEE, 1989:1680–1686.
- [17] FOSSORIER M P C,BURKERT F,LIN S,et al. On the equivalence between SOVA and Max-log-MAP decodings[J]. IEEE Communications Letters, 1998,2(5):137–139.
- [18] CONG L,WU X,YI X. On SOVA for nonbinary codes[J]. IEEE Communications Letters, 2002,3(12):335–337.
- [19] LIU X,ZHAO S,MA X. A low complexity detection/decoding algorithm for NB-LDPC coded PRCPM system[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V, 2015.
- [20] WANG Peng,WU Ling,GU Yuantao,et al. Low complexity soft-decision algorithm for Multi-h CPM[J]. Journal of Central South University, 2013,44(12):4869–4873.

作者简介:



赖鹏辉(1994–), 男, 江西省广昌县人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信,email: lai_nudt@sina.com.

马艳敏(1994–), 女, 山东省滨州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信.

王世练(1979–), 男, 江苏省徐州市人, 博士, 教授, 主要研究方向为无线通信、遥测遥控、通信对抗.

谢顺钦(1987–), 男, 贵州省贵定市人, 博士, 主要研究方向为遥测新体制的接收关键技术.

高 凯(1978–), 男, 江苏省连云港市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为电路与系统、信号与信息处理、抗干扰通信等.

2018年6月20日至23日,将在首都北京举办“第九届国际微波论坛 IMWF”,论坛由新加坡国立大学陈志宁教授、美国IBM沃森研究中心刘兑现研究员及东南大学洪伟教授共同发起。本届论坛由中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室、中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室、中国传媒大学、五院西安分院空间微波技术重点实验室联合主办。本届论坛旨在为国内学术界提供一个开放和自由交流的国际平台,将邀请十余位IEEE Fellow、知名专家一起探讨世界微波与天线、遥感与通信领域最新技术动态及未来发展趋势,力求促进合作与共同发展。欢迎广大技术人员参会,会议联系人:李王哲 18500033966, wzli@mail.ie.ac.cn