

面向星地融合网络的CPM信号研究进展

潘子豪, 谢琛, 王桁, 郭道省

(陆军工程大学, 江苏南京 210007)

摘要: 围绕6G的“全覆盖”愿景, 星地融合作为核心技术之一, 是未来无线通信系统发展的方向。建设星地融合网络、实现星地深度融合需要设计合理的物理层波形。针对星地融合信息传输面临的问题, 分析连续相位调制(Continuous Phase Modulation, CPM)信号在频谱效率、能量效率上的显著优势与应用价值, 从时频域的角度综述移动通信系统中CPM信号接收技术的研究进展, 以期为后续星地融合中CPM相关研究提供支撑。

关键词: 6G; 星地融合; 连续相位调制

中图分类号: TN393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023005

Research Status of CPM for Satellite-Terrestrial Integrated Network

PAN Zihao, XIE Chen, WANG Heng, GUO Daoxing

Army Engineering University, Nanjing 21007, China

Abstract: Around the vision of "full coverage" of the new generation of mobile communication system (6G), satellite-terrestrial integration, as one of the key technologies, is the development direction of the future wireless communication system. The construction of satellite-terrestrial integration network and deep integration need reasonable waveforms at physical layer. In view of the problems of transmission in satellite-terrestrial integration, the significant advantages and practicability of continuous phase modulation (CPM) signal in spectral efficiency and energy efficiency were analyzed. The research progress of CPM signal at receiver in mobile communication system from the time and frequency domain were discussed, which provided support for CPM related research in satellite-terrestrial integration in the future.

Keywords: 6G, satellite-terrestrial integrated network, continuous phase modulation

0 引言

近年来, 随着人类生产、活动空间的不断扩大, 陆海空以及航天领域对移动通信网络系统的需求日益增加。随着5G商业化落地, 6G的研究正在全球兴起。与5G相比, 6G网络将是卫星网络与地面网络深度融合的一体化网络, 服务范围将涵盖城市、山区、沙漠、海洋、深地、天空、太空等更广阔的区域^[1]。为满足全覆盖的通信需求, 6G不仅局限于陆地移动通信网络, 也将借助卫星、无人机等非陆地网络, 对地面网络进行有益的延伸和补充。因此, 将卫星网络与地面网络融合构建任意位置无缝连接的星地融合网络无疑是6G发展的核心研究内

容之一^[2]。

星地融合网络以地面网络为基础, 以卫星网络为延伸^[3], 为天基、空基、陆基等各类用户的活动提供无盲区的信息保障, 形成全球无缝立体覆盖。在实际应用场景中, 传输过程受外界环境因素影响较大, 信道不稳定的情况时有发生, 甚至可能会发生链路中断。因此, 物理层波形设计作为实现星地融合网络的基础工作, 决定着其信息传输性能的高低, 需要引起高度重视。相比蜂窝网络和卫星网络, 星地融合网络更容易受到环境干扰和安全威胁。考虑到各种实际因素的影响, 物理层波形设计和优化需要考虑以下5个因素。

收稿日期: 2022-10-19; 修回日期: 2023-01-30

通信作者: 郭道省, xyzg@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61971440)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61971440)

(1) 频谱效率。随着无线通信业务的增长, 频谱资源匮乏的问题日益严重, 由于频谱的不可再生特性, 无线通信发展的瓶颈之一就是频谱资源的不足。

(2) 发射频谱约束性。带外杂散用来评估不同节点在相邻频率部署时的干扰情况, 通常用带外泄漏比定量描述。在共信道场景中, 选择恰当的波形有效抑制带外泄漏, 可以显著降低相邻信道之间的干扰。

(3) 低功耗原则。在发射端, 峰均功率比是发射机峰值功率与均值功率的比值, 是衡量波形能量效率的典型指标, 对发射机的能耗影响很大。在实际系统设计中, 需要尽可能提高功率放大器的效率, 使信号在失真范围内尽可能靠近饱和工作点。当回退值较大时, 功放效率低, 减小系统覆盖范围, 不利于上行链路传输, 避免较大的功率回退值对上行节能终端具有重要意义。在接收端, 通信系统的设计要考虑整体性, 接收机实现越复杂, 所需有源器件数目越多, 将降低系统整体的功率效率。

(4) 低时延原则。5G/6G的一个显著特点是低时延, 更准确地说是保障/确定性时延。从用户角度来说, 时延包括发送时延、传播时延、处理时延和排队时延。为提高节点传输和工作的效率, 在时延敏感场景下要遵循低处理时延准则。

(5) 移动通信鲁棒性。在新型网络环境, 部分节点具有高动态性, 应对相对位置的快速变化仍然是移动通信系统的局限。

1 波形与调制方式选择

1.1 问题与挑战

随着5G移动通信的商业化, 无线通信的频带利用率越来越受到关注。由于频谱是不可再生资源, 随着卫星、无人机及多种多样的联网设备数量急剧增加, 星地融合各个平台可用的频谱资源越来越多地被挤压, 使得某些频段上的频谱资源日趋紧张。解决该问题的突破口之一就是在波形设计中寻求具有高效带宽效率的调制方式。

与地面上基站能够连接到电网不同, 无人机和卫星以及部署在偏远地区的物联网节点等是由电池和/或太阳能供电的^[2]。一方面, 无人机驱动飞行的能量占据能量消耗的主导地位, 卫星能量消耗受强辐射和空间变温影响; 另一方面, 电池容量和太阳能转化能力有限, 节点其他功能如传输、处理和感知均会受到限制。因此, 在星地融合网络中, 提高能效以延长这类电池供电设备的使用寿命是一个关键而又具有挑战性的问题, 低功耗将是波形设计的一个核心指标。

相比具有良好视距的卫星通信, 星地融合网络面临复杂的信道环境。以无人机平台为例, 由于无人机高动态和低空特性, 无线信道不仅表现出频率选择性, 而且具有显著的时间选择性^[4]。因此, 信号传输会经历双选信道。实际中, 信道状态信息是未知的, 为消除信道影响, 在接收端需要进行信道估计和均衡。

1.2 潜在的解决方案

针对频带资源受限的通信频段, 连续相位调制(Continuous Phase Modulation, CPM)的频谱紧凑, 功率谱主瓣能量高, 旁瓣衰落特性好, 频谱泄漏较小, 对同频段其他信号的干扰小, 有益于邻频信号在有限频带内更好地相互兼容。CPM高效的带宽利用率能够满足严格的兼容性约束要求, 已经在下一代全球导航卫星系统、我国的北斗卫星导航信号中获得了应用^[5]。

在卫星、无人机等电池供电设备中, 一个关键因素就是能效。CPM作为在能效上具有独特优势的调制方式, 在相同频谱效率下比线性调制方案的功率效率更高^[6]。更重要的是CPM具有恒包络特性, 能够工作在廉价的非线性功放的饱和点上。然而, 在很多研究中, 放大器的线性度往往会被忽略, 实际上它可以导致5 dB甚至更大的功率回退^[7], 这将直接降低设备的功率效率。因此, 相比其他调制方式, CPM信号在功率效率方面具有显著的优势。

CPM优异的特性使其在星地融合的带宽、能量受限场景中, 具有很高的应用价值。然而, 综合考虑波形设计的原则, CPM虽然具有优异的谱效、能效, 但是在衰落信道中的传输是一个极具挑战性的问题。一般情况下, CPM方案的带宽和功率效率越高, 接收机实现的复杂度越高^[8], 这将在一定程度上抵消CPM的恒包络特性带来的能效增益。本文研究并整理了不同的CPM接收方案对衰落信道的处理方法, 以期为后续星地融合中CPM相关研究指明方向。

2 CPM信号接收技术现状

2.1 CPM定义与通信系统模型

如图1所示, 在发送端, 信息比特序列 $m=(m_0, m_1, \dots, m_k)$ 经过编码、符号映射后输入调制模块中得到CPM信号

$$x(t, \mathbf{a}) = \sqrt{\frac{E_s}{T}} \exp(j\varphi(t, \mathbf{a})), \quad 0 \leq t \leq NT \quad (1)$$

其中, E_s 和 T 分别是符号能量和符号持续时间, $\mathbf{a}=(a_0, a_1, \dots, a_N)$ 是映射后的符号序列, 相位是CPM携带信息的部分, 定义为

$$\varphi(t, \mathbf{a}) = 2\pi h \sum_{i=-L+1}^N a_i g(t-iT) \quad (2)$$

发送的CPM信号受衰落信道 $h(t, \tau)$ 和高斯白噪声的影响,在接收端经过带通滤波器和采样得到接收信号

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l)x(n-l) + w(n), 0 \leq n \leq N \quad (3)$$

在接收端,如图2(a)所示,由于信号受到信道畸变的影响,需要利用均衡器恢复受损的信号,输出符号硬判决结果,或者输出软信息作为下一个模块的输入。当采用信道编码时,如图2(b)所示,接收端可以采用Turbo均衡技术,通过软入软出(Soft Input Soft Output, SISO)均衡器和译码器交互软信息提升系统性能。由于CPM具有记忆特性,很多针对线性调制的均衡技术无法解决CPM的问题,为对CPM信号的研究提供进一步思路,本文从时频域的角度将CPM的均衡技术分为时域均衡和单载波频域均衡,分别进行分析。

2.2 CPM时域均衡

2.2.1 基于数据辅助的方法

为实现衰落信道下CPM信号的相干检测,可以周期性地插入相位状态已知的CPM导频符号。这种传输方式能够使接收机按照一定规律周期性地从接收信号中提取信道响应。

参考文献[9]在平坦瑞利快衰落信道下,提出一种导频符号辅助的均衡技术。在插入导频数据之前,其开发了一种预编码技术,能够提供3 dB的编码增益。接收端估计器由前端滤波器和插值滤波器组成,完成信道估计

后与接收信号一起馈送到基于维特比算法的相干CPM解调器。为解决插入导频的间隔设计问题,参考文献[10]在平坦瑞利快衰落信道下发现存在一个与归一化最大多普勒频移成正比的最小导频插入间隔,即有效消除信道影响时导频间的最小符号数目。通过导频符号得到初始信道估计后,利用局部B样条插值获取整个序列的信道估计,该方法很好地权衡了估计精度和复杂度,相比传统的维纳滤波器,大大简化了复杂度。

上述采用数据辅助的方式进行信道估计会造成很大的开销^[12]。一种有效的替代方案是盲均衡方法,该方法不借助训练序列,仅仅利用接收序列追踪信道变化,完成对信号的最佳估计。

2.2.2 基于统计量的方法

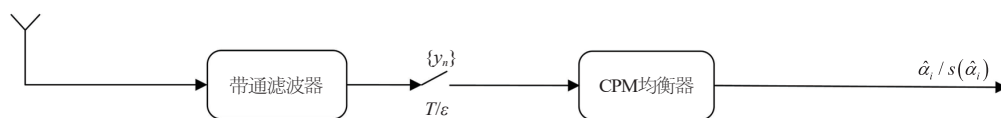
参考文献[11]将Tong-Xu-Kailath(TXK)算法应用到CPM中,提取信号的二阶统计量进行信道估计。由于平稳信号的二阶统计量不足以识别完整的信道特征,基于高阶统计量的方法可以反映信道的平均特征。在信道输入信号为非高斯分布的情况下,高阶累积量包含了信道的完整信息。参考文献[12]采用基于高阶统计量的特征向量方法,从四阶交叉累积矩阵中提取信道信息。然而,基于统计量的方法在帧长较短时无法抑制噪声带来的误差,估计精度会变差。

2.2.3 基于隐马尔可夫模型的方法

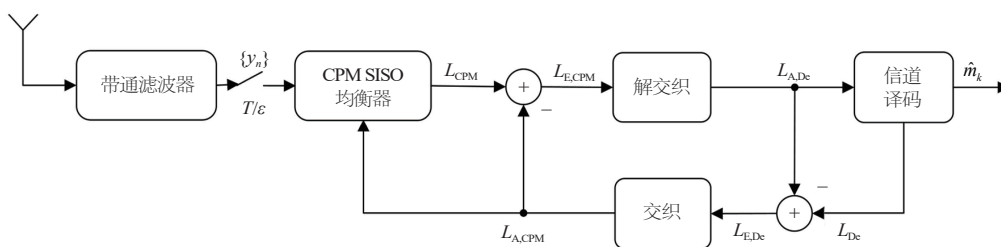
利用CPM与多径衰落信道的记忆特性,可以构建一个联合网格,该网格采用隐马尔可夫模型(Hidden



图1 通信系统发送端



(a) CPM均衡器



(b) CPM的Turbo接收

图2 通信系统接收机

Markov Model, HMM) 来描述, 将盲均衡转换为HMM的问题。采用期望最大化 (Expectation-Maximization, EM) 算法是实现HMM中未知参数估计的常用方法。参考文献[13]在信道参数模型和调制方案均已知的假定下, 针对时不变信道引入线性FIR信道的约束, 提出了Batch-BW (BBW) 算法, 并在此基础上研究了两种算法以应对信道冲激响应随时间变化的情形。一种是将接收信号分成多个子块, 当前子块估计的信道响应用作下一个子块的初始估计, 称为分段Batch-BW (SBBW) 算法; 另一种是在估计公式中直接利用信道的时变特性, 将信道响应用多项式表示并使用一阶近似, 推导了时间相关的BW (TDBW) 算法, 在深衰落中具有更强的鲁棒性。参考文献[14]利用BW算法直接估计信道参数, 对接收序列在所有可能发送的序列下的似然概率求平均完成EM算法的期望步骤, 之后最大化平均似然函数得到参数的最大似然估计, 反复迭代这两步直至算法满足预定的收敛准则。在此基础上针对CPM信号推导了近似的克拉美罗下界, 该下界更松但是便于计算。

在所有可能发送的序列中, 大部分序列对应的概率可以忽略, 在执行期望步骤时, 没有必要计算所有可能发送的序列的似然概率。参考文献[15]利用维特比算法执行期望步骤, 得到一组幸存路径的概率, 计算对数似然函数的期望值, 实现GMSK的联合信道估计和均衡, 称作期望最大化维特比算法。在此基础上, 针对高阶CPM盲均衡中存在的均衡性能较差以及算法不容易收敛等问题, 参考文献[16]将信道译码的SOVA内嵌到EM迭代算法中, 并结合Turbo均衡思想, 提出一种新的CPM信号盲Turbo均衡算法。该系统包括两个嵌套的迭代过程, 内层迭代是信道估计和均衡器的迭代过程, 外层迭代是Turbo均衡迭代过程, 通过CPM的SISO盲均衡器和SISO译码器交互软信息以改善系统性能。

2.2.4 基于马尔可夫链蒙特卡罗的方法

参考文献[17-18]针对最小高斯频移键控 (GMSK) 建立一种非线性信号模型代替传统方法的有限脉冲响应模型, 提出一种基于吉布斯采样的贝叶斯均衡器估计GMSK信号后验符号概率。该方法基本思想是根据未知量的联合后验分布生成遍历随机样本, 然后对适当的样本进行平均, 得到未知量的估计值, 并将先验符号概率作为输入, 后验符号概率作为输出, 具有软输入软输出的形式。因此, 它可以与软信道译码算法结合使用, 实现迭代联合均衡并译码, 即通过Turbo均衡进一步提升性能。

2.2.5 自适应均衡

针对时变信道, 将基于数据辅助的方法融入基于网格的技术中, 可以实现自适应均衡, 确保追踪信道变

化。一种结构是前向自适应。参考文献[19]针对平坦瑞利衰落信道下的MSK信号, 基于线性调制中最优的前向/后向自适应算法^[20], 推导证明存在最优的前向自适应算法, 并且为了简化计算, 通过“截断”, 将树图折叠为格状图, 只考虑最近的 $L+1$ 个符号间隔来计算分支度量。虽然通过“截断”的方式将树图折叠为网格图的实现不再是最优, 但因为信道相关程度量级随时间增加而减小, 随着截断长度增加算法近似程度更加精确。参考文献[21]在此基础上提出减少状态数的前向自适应 (RS-A-SISO) 均衡算法, 首先通过建立CPM与信道的联合网格大幅度减少了状态数, 在训练序列上采用RLS算法初始化前向信道估计, 在前向信道估计采用LMS算法更新抽头系数; 其次为减少网格搜索过程中遍历的状态数, 使用前向判决反馈结构^[22], 该结构与前向自适应算法具有一致性; 最后, 在频率选择性瑞利衰落信道下采用了多个估计器、单个估计器以及多步估计3种不同信道估计方式。参考文献[23]采用该简化状态的A-SISO, 利用密度演化技术获取RA-SISO的信噪比门限。

另一种结构是前向/后向自适应。参考文献[24]为了处理参数向量, 在参考文献[20]提出的双向估计基础上, 推导了树图上每条边的广义后验概率作为分支度量。该分支度量由所有包含该分支对应符号的可能序列做平均运算得到, 其中最小二乘度量项由参数向量的前向估计、后向估计和惩罚项组成, 引入惩罚项可以在前向/后向估计过程不匹配的情况下提高最小二乘度量值。参考文献[25]针对高阶CPM信号盲均衡在时变频率选择性衰落信道下均衡性能差、复杂度高以及收敛速度慢等问题, 在参考文献[20]基础上建立一种新的基于FABA-SISO且适用于高阶部分响应CPM信号的自适应盲均衡算法。将时变信道建模为高斯马尔可夫模型 (GM), 对网格每个状态同时利用过去、现在和将来的观察数据进行Kalman滤波信道估计, 有效改善了信道估计的精度。此外, 在执行网格搜索的BCJR算法的前向/后向自适应递归过程中使用逐次幸存路径处理来简化搜索路径, 得到的网格状态数和信道估计器数相比原始算法有明显降低。在信道发生变化尤其是在变化较快的多径衰落信道下, 所提算法的估计精度、收敛速度和误码率性能均优于参考文献[21]提出的基于LMS的前向自适应算法。

2.3 CPM单载波频域均衡

对于宽带通信, 多径效应造成频率选择性衰落, 假设信道抽头系数为 L , 时域上的接收算法处理复杂度下界随着 L 呈线性增长, 而单载波频域均衡 (Single-Carrier Frequency Domain Equalization, SC-FDE) 在信道已知的

条件下,复杂度下限随着 L 呈对数增长的趋势^[26]。相比同为频域接收的OFDM, SC-FDE具有相似的性能和复杂度,但是比OFDM更适合使用功率高效的非线性功率放大器,而不是昂贵的线性放大器,且对频率同步的敏感性更低。CPM均衡方法特性见表1。

参考文献[27]首次将单载波频域均衡用在二进制CPM信号中,分别采用Gram-Schmidt正交化和Laurent两种不同的分解方式离散化CPM信号,相比Laurent分解, Gram-Schmidt正交表示的性能更优但复杂度更高。但该方法在最小均方差(Minimum Mean Square Error, MMSE)下不是最优的,且不具备Turbo均衡功能。参考文献[28]对CPM信号采用Laurent分解,在频域上实现线性和判决反馈,并采用Turbo均衡的方案,实现了CPM信号在频域中的MMSE均衡。虽然参考文献[28]在MMSE准则下实现最优的频域均衡,但要求每个多径时延为半个符号周期的整数倍,且面临大矩阵求逆。因此,参考文献[29]以CPFSK信号为例,利用伪符号之间的相关性,在几乎没有增加计算复杂度的条件和MMSE准则下设计一种对信道冲激响应没有特殊要求的SC-FDE,提高了频域均衡的性能,并通过反馈判决滤波器进一步逼近最大似然估计的解。除此之外,参考文献[28]虽然实现了Turbo均衡,但是由于CPM固有记忆特性会发生突发差错,CPM信号的概率只在特定时刻被传递给频域均衡器以中断误差传播,仅获得一个微小的迭代增益。参考文献[30]提出一种利用CPM的软信息辅助FDE,采用FDE的双迭代CPM结构,具有更快的迭代收敛速率,并且避免了求逆运算。

除了采用 Laurent分解和Gram-Schmidt正交的方式表示CPM信号,参考文献[31]用两个正交的基函数表示CPM,并基于此提出一种降低复杂度的接收机。参考文献[32]利用CPM多相表示,基于过采样实现CPM均衡,在此基础上,又推导了一种低复杂度的MMSE-FDE。为进一步实现复杂度和性能的权衡,参考文献[33]基于循环

块推导了CPM的分数间隔表示,实现了高效的频域均衡器,性能与参考文献[27]中均衡器相当,复杂度与参考文献[32]类似,且证明了参考文献[30]中频域均衡器是该文献提出的分数间隔均衡器的近似版本。参考文献[34]针对SOQPSK信号,将二进制CPM信号的PAM分解扩展到三进制的SOQPSK信号。

上述单载波频域均衡是在信道状态信息已知的条件下提出的,当信道未知时,可以通过插入独特字(Unique Word, UW)估计信道^[35]。参考文献[36]在此基础上,使用B样条函数利用插值法在频域上实现信道估计。参考文献[37]推导了有信道模型参数和没有信道模型参数的最小二乘信道估计,在完成均衡后,使用参考文献[38]提出的简化MAP算法对CPM进行解调。参考文献[39]采用叠加导频信号的方式,在参考文献[40]线性调制估计方法的基础上,提出一种线性最小二乘频域信道估计方法,用于具有叠加导频信号的CPM分组传输,并推导一种不同于传统的基于分解^[27-28]的频域判决反馈均衡器,所需的FFT、IFFT和矩阵计算的数量显著减少。

将SC-FDE技术的调制方式从线性调制扩展到非线性调制具有重要的意义,虽然目前关于CPM信号的在频域上的信道估计和均衡技术研究较多,但是相比时域均衡,对CPM应用频域均衡技术的研究大多停留在二进制CPM或者某类特殊的CPM信号,缺乏普适性,需要进一步深入探索。

3 面向未来星地深度融合网络的CPM波形设计

CPM信号具有庞大的参数集,主要包括3个参数,调制指数、进制数和关联长度。调制指数决定了相位状态的间距,直接影响误码率性能,并且调制指数越小的CPM占用的带宽越窄^[41]。进制数决定一个CPM符号包含的比特数,影响误码率和频谱占用率。关联长度作为CPM的记忆长度,较大的关联长度具有更快的旁瓣衰落速率,即更高的频谱效率。除了调节参数,为提高CPM

表1 CPM均衡方法特性

均衡方法分类		参考文献	特点	缺点
时域均衡	数据辅助	[9-10]	利用已知的导频提供信道估计,通过设计导频位置及插值算法完成序列的信道估计	插入额外的数据会造成开销增大,尤其在时变信道下需要插入多个导频
	盲均衡	统计量	[11-12] 根据接收信号,利用统计量提取信道信息	适合帧长较长的应用场景,在短帧条件下,统计量不足以抑制噪声带来的误差
		HMM	[13-16] 将CPM与信道建模成HMM,将信道估计和均衡转为求解HMM的问题	复杂度较高,与记忆长度呈指数关系 $O(M^L)$,有一定概率得到局部极大值解
		MCMC	[17-18] 基于MCMC,对信道进行隐式估计	仅针对GMSK做了研究,不能保证适用于所有CPM信号
	自适应均衡	[19-25]	利用CPM和信道的联合网格,基于数据辅助的思想,将信道估计器嵌入分支度量的计算中	复杂度高,与记忆长度或序列长度呈指数关系 $O(M^L)$ 或 $O(M^N)$
单载波频域均衡		[27-40]	通过加入循环前缀能够有效对抗多径衰落,处理复杂度较低	(1) CPM在频域均衡前需要线性化表示; (2) 需要加入额外的相位过渡符号保证相位连续; (3) 额外的符号会增加开销

的频谱效率,有研究对CPM基带调频脉冲信号进行了新的探索,例如采用椭圆球面波函数^[42]、洛伦兹函数^[43-44]生成频率脉冲函数。在面向星地融合中带宽受限的应用场景时,CPM可根据用户的使用需求、业务类型等为用户自适应匹配调制参数、脉冲信号,提供合适的组合。

为简化接收机,实现智能通信,将人工智能与星地融合通信系统有机融合,可显著提升通信系统的效能。机器学习,特别是深度学习,作为人工智能的一种主流方法,近年来因其在计算机视觉和自然语言处理方面的巨大成功而备受关注。在无线通信物理层中,完全数据驱动的深度学习网络需要庞大的数据集和很长的训练时间。将基于数据与传统的基于模型驱动的方式相结合的深度学习用于通信的物理层成为了当前的研究热点,有望实现CPM的高效接收。

4 结束语

面向6G移动通信网络,星地融合是大势所趋。目前衰落信道下CPM受接收结构复杂的限制较大,一定程度上抵消了其优异的功率效率,如何权衡CPM处理的复杂度和性能是未来需要解决的问题。

参考文献：

- [1] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望. 物联网学报[J]. 2020, 4(3): 3-19.
SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Space-air-ground integrated networks: review and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [2] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. Science China Information Sciences, 2020, 64(1): 1-74.
- [3] LIU J, DU X Q, CUI J H, et al. Task-oriented intelligent networking architecture for the space-air-ground integrated network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5345-5358.
- [4] DARSENA D, GELLI G, IUDICE I, et al. Equalization techniques of control and non-payload communication links for unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Access, 2018(6): 4485-4496.
- [5] 倪育德, 邹玲, 刘瑞华, 等. 北斗系统C波段导航信号调制方式及性能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(12): 3800-3810.
NI Y D, ZOU L, LIU R H, et al. C-band navigation signal modulation mode and performance evaluation of BeiDou system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(12): 3800-3810.
- [6] CHAMAA M E, LANKL B. Noncoherent symbol detection of short CPM bursts in frequency-selective fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(2): 771-782.
- [7] A product development flow for 5G/LTE envelope tracking power amplifiers[EB]. 2017.
- [8] XI Z P, ZHU J, FU Y M. Low-complexity detection of binary CPM with small modulation index[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(1): 57-60.
- [9] HO P, KIM J H. Pilot symbol-assisted detection of CPM schemes operating in fast fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1996, 44(3): 337-347.
- [10] BROWN C, VIGNERON P J. Signal recovery for CPM in frequency flat fast fading channels[C]//Proceedings of MILCOM 2012 - 2012 IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-6.
- [11] NEUGEBAUER S P, DING Z. Blind SIMO channel estimation for CPM using the Laurent approximation[C]//Proceedings of 2004 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2004.
- [12] KAMMEYER K D, KUHN V, PETERMANN T. Blind and nonblind turbo estimation for fast fading GSM channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(9): 1718-1728.
- [13] ANTON-HARO C, FONOLLOSA J A R, FONOLLOSA J R. Blind channel estimation and data detection using hidden Markov models[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(1): 241-247.
- [14] CIRPAN H A, TSATSANIS M K. Blind receivers for nonlinearly modulated signals in multipath[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(2): 583-586.
- [15] NGUYEN H, LEVY B C. Blind and semi-blind equalization of CPM signals with the EMV algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(10): 2650-2664.
- [16] 钟凯, 彭华, 葛临东. 基于隐马尔科夫模型的CPM信号盲Turbo均衡算法[J]. 通信学报, 2015, 36(3): 227-235.
ZHONG K, PENG H, GE L D. Blind Turbo equalization algorithm based on hidden Markov model for continuous phase modulation signals[J]. Journal on Communications, 2015, 36(3): 227-235.
- [17] WANG X D, YANG Z G. Turbo equalization for GMSK signaling over multipath channels[C]//Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221). Piscataway: IEEE Press, 2001: 2641-2644.
- [18] YANG Z, WANG X. Turbo equalization for GMSK signaling over multipath channels based on the Gibbs sampler[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(9): 1753-1763.
- [19] HANSSON A, CHUGG K M, AULIN T. On forward-adaptive versus forward/backward-adaptive SISO algorithms for Rayleigh fading

- channels[J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(12): 477-479.
- [20] ANASTASOPOULOS A, CHUGG K M. Adaptive soft-input soft-output algorithms for iterative detection with parametric uncertainty[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(10): 1638-1649.
- [21] CHUNG K, CHUGG K M, HEO J. Reduced state adaptive SISO algorithms for serially concatenated CPM over frequency-selective fading channels[C]//Proceedings of GLOBECOM'01. IEEE Global Telecommunications Conference (Cat. No.01CH37270). Piscataway: IEEE Press, 2001: 1162-1166.
- [22] COLAVOLPE G, FERRARI G, RAHELI R. Reduced-state BCJR-type algorithms[C]//Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Communications. ICC 2000. Global Convergence Through Communications. Conference Record. Piscataway: IEEE Press, 2000: 460-464.
- [23] CHUNG K, HEO J. RS-A-SISO algorithms for serially concatenated CPM over fading channels and density evolution analysis[J]. Electronics Letters, 2003, 39(22): 1597.
- [24] HANSSON A, AULIN T. Generalized APP detection of continuous phase modulation over unknown ISI channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(10): 1615-1619.
- [25] 钟凯, 彭华, 葛临东. 基于FABA-SISO的时变频率选择性衰落信道CPM信号盲均衡[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2672-2677.
- ZHONG K, PENG H, GE L D. Blind equalization based on FABA-SISO for continuous phase modulation signals over time-varying frequency-selective fading channels[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(11): 2672-2677.
- [26] SUN P, WANG Z Y, SCHNITER P. Joint channel-estimation and equalization of single-carrier systems via bilinear AMP[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(10): 2772-2785.
- [27] TAN J, STUBER G L. Frequency-domain equalization for continuous phase modulation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(5): 2479-2490.
- [28] PANCALDI F, VITETTA G M. Equalization algorithms in the frequency domain for continuous phase modulations[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(4): 648-658.
- [29] 刘永鑫, 赵明, 周世东. CPFSK信号的频域均衡算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(10): 91-94.
- LIU Y X, ZHAO M, ZHOU S D. Frequency-domain equalization for CPFSK[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(10): 91-94.
- [30] OZGUL B, KOCA M, DELIC H. Double turbo equalization of continuous phase modulation with frequency domain processing[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(2): 423-429.
- [31] BROWN C, VIGNERON P J. Equalisation for continuous phase modulation using basis functions[C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. Proc SPIE 8061, Wireless Sensing, Localization, and Processing VI. [S.l.:s.n.], 2011: 63-73.
- [32] VAN T W, HORLIN F, NSENGA J, et al. Low-complexity linear frequency domain equalization for continuous phase modulation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1435-1445.
- [33] CHAYOT R, THOMAS N, POULLIAT C, et al. A new exact low-complexity MMSE equalizer for continuous phase modulation[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(11): 2218-2221.
- [34] 兰笑. SOQPSK信号的频域均衡技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- LAN X. Research for SOQPSK signal with frequency domain equalization technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [35] VAN T W, HORLIN F, RAMON V, et al. Novel block constructions using an intrafix for CPM with frequency domain equalization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(3): 951-955.
- [36] BROWN C, VIGNERON P J. Channel estimation and equalisation for single carrier continuous phase modulation[C]//Proceedings of 2011 - MILCOM 2011 Military Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 334-340.
- [37] CHAYOT R, THOMAS N, POULLIAT C, et al. Channel estimation and equalization for CPM with application for aeronautical communications via a satellite link[C]//Proceedings of MILCOM 2017 - 2017 IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 888-893.
- [38] COLAVOLPE G, BARBIERI A. Simplified iterative detection of serially concatenated CPM signals[C]//Proceedings of GLOBECOM '05. IEEE Global Telecommunications Conference, 2005. Piscataway: IEEE Press, 2015: 5.
- [39] PARK C H, HEATH R W, RAPPAPORT T S. Frequency-domain channel estimation and equalization for continuous-phase modulations with superimposed pilot sequences[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 4903-4908.
- [40] MAZZENGA F. Channel estimation and equalization for M-QAM transmission with a hidden pilot sequence[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2000, 46(2): 170-176.
- [41] XI Z P, ZHU J, FU Y M. Low-complexity detection of binary CPM with small modulation index[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(1): 57-60.
- [42] 杨大伟, 王红星, 刘传辉, 等. 基于零阶椭圆球面波信号的连续相位调制及性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(8): 2311-2320.
- YANG D W, WANG H X, LIU C H, et al. Continuous phase modulation based on zero order PSWF signal and its performance analysis[J].

Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(8): 2311-2320.

- [43] KASSAN K, FARÈS H, GLATTLI D C, et al. Performance vs. spectral properties for single-sideband continuous phase modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(7): 4402-4416.
- [44] FARÈS H, GLATTLI D C, LOUET Y, et al. Power spectrum density of single side band CPM using lorentzian frequency pulses[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(6): 786-789.

[作者简介]



潘子豪（1998-），男，陆军工程大学硕士生，主要研究方向为信道估计与均衡。



谢琛（1990-），男，陆军工程大学博士生，主要研究方向为无人机集群通信。



王析（1983-），女，博士，陆军工程大学副教授，主要研究方向为卫星通信。



郭道省（1973-），男，博士，陆军工程大学教授，主要研究方向为卫星通信、通信抗干扰、空天地一体化网络、物理层安全、无人机通信等。