

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802262

# Multi-h CPM 解调算法研究综述

上官泽胤

(航天工程大学 电子与光学工程系 北京 101416)

**摘要:** Multi-h CPM 体制凭借着高效的带宽效率和功率效率,在未来航天遥测领域具有巨大的潜在优势,但是解调技术的高复杂度限制了其广泛应用。为了能在较小性能损失的前提下实现解调结构的简化,在对 Multi-h CPM 体制的特点和发展现状进行了简要介绍之后,重点阐述了 Multi-h CPM 信号的接收机的基本结构,详细总结了其中的载波同步、定时同步、调制指数同步以及序列检测技术的方法来源、发展历程和理论基础,分析了各自的优缺点,最后,提出了 Multi-h CPM 体制的进一步研究方向。

**关键词:** Multi-h CPM; 解调; 载波同步; 定时同步; 调制指数同步; 序列检测

**中图分类号:** TN911.6    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Research on Multi-h CPM demodulation algorithm

Shangguan Zeyin

(Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Multi-h CPM has great potential advantages in future space telemetry due to its high bandwidth efficiency and power efficiency, but the high complexity of demodulation technology limits its wide application. In order to simplify the demodulation structure under the premise of less performance loss, after a brief introduction of the characteristics and development status of Multi-h CPM system, the basic structure of the receiver for multi-h CPM signal is emphasized. Carrier synchronization, timing synchronization, modulation index synchronization and sequence are summarized in detail. The origin, development process and theoretical basis of detection technology are analyzed. The advantages and disadvantages of each method are analyzed. Finally, the further research direction of Multi-h CPM system is proposed.

**Keywords:** Multi-h CPM; demodulation; carrier synchronization; timing synchronization; modulation exponential synchronization; sequence detection

## 0 引言

连续相位调制体制(continuous phase modulation, CPM)是一类相位连续且包络恒定的调制方案的总称,其凭借较高的频带利用率和受信道非线性影响小等优点,广泛应用于通信领域<sup>[1-3]</sup>。而在此基础上发展起来的 Multi-h CPM 体制虽然具有比 Sing-h CPM 更加优异的性能,但却并没有得到广泛的应用。这是因为多进制、更大的关联长度和多调制指数,在提高了 Multi-h CPM 的频谱效率和功率效率的同时,造成了其解调设备的复杂程度呈指数倍增长,工程上不易实现。自 Multi-h CPM 体制提出之后的十几年里,Multi-h CPM 的解调问题受到了国内外学者的广泛关注。本文在总结前人研究的基础上,对 Multi-h CPM 解调算法中的同步和序列检测技术,进行了总结与分析,讨

论各自的优缺点,并展望了 Multi-h CPM 的进一步发展方向。

## 1 Multi-h CPM 体制概述

通信系统采用何种调制方式,对系统性能影响很大。连续相位调制 CPM 是一种高效的调制技术,如在 21 世纪初应用于第二代数字蜂窝移动通信系统(global system for mobile communication, GSM)标准的高斯最小频移键控信号(Gaussian filtered minimum shift keying, GMSK),就是 CPM 调制方式的一种<sup>[4]</sup>,CPM 调制具有如下特点。

首先,CPM 信号的包络是恒定的,使得其对带限非线性信道或非线性失真不敏感,信号传输的准确性和功放效率较高<sup>[5]</sup>。这一特性使其可使用性价比高且简单廉价的 C 类功放,来降低发射端的功率,如应用于数字调频地面无线

通信系统和蓝牙系统。这是 CPM 相比较于其他调制方式的一大优势。

其次, CPM 信号的信息存储于相位的变化之中。CPM 信号具有相位连续的特点, 不存在高频分量的影响。一个 CPM 信号通常由 4 个参数来确定: 发送数据的进制数  $M$ 、关联长度  $L$ 、调制指数  $h$  和相位脉冲函数  $g(t)$ 。通过对这些参数进行合理的设计, 可以很好地控制信号的功率和频谱性能。与传统的线性调制相比, 在同样的码元速率下, CPM 信号的频谱更加紧凑, 频带利用率更高, 这是 CPM 被广泛应用的另一个原因。

此外, CPM 信号本身具有相位网格结构, 可以看作是一种集调制和信道编码为一体的网格编码的调制方式。CPM 直接将编码效应综合到了信号调制中, 使调制信号具有一定的编码增益, 从而大大提高了传输效率<sup>[5]</sup>。

作为 CPM 体制庞大家族的一员, Multi-h CPM 具备上述 CPM 的优良特性。此外, 区别于一般单调制指数 CPM, Multi-h CPM 具有  $N_h (N_h \geq 2)$  个随时间逐符号循环变化且在每个符号间隔内保持不变的调制指数。多调制指数的循环作用, 使得信号的频谱更加紧凑, 带外滚降速度更快, 频带利用率更高, 同时又增加了译码过程中序列间的最小欧氏距离, 提高了误码率性能<sup>[6-8]</sup>。这些特性使得 Multi-h CPM 体制应用前景更加广阔。2003 年, 美国的先进靶场遥测计划项目 (ARTM) 将 Multi-h CPM 调制体制定为遥测新体制研究的第 2 步目标 (Tier II), 来取代沿用了数十年的 PCM/FM 调制体制。具体参数为进制数  $M = 4$ , 即  $\alpha = \{\pm 1, \pm 3\}$ ; 调制指数  $h_1 = 4/16, h_2 = 5/16$ , 随时间循环变化; 关联长度  $L = 3$ ; 码元信号的波形  $g(t)$  采用余弦型。同年, 美国军事卫星通信标准 MIL-STD-188-181B 将 Multi-h CPM 信号应用到特高频军事通信系统中<sup>[9-10]</sup>, 在 2005 年, Multi-h CPM 体制被写入 IRIG-106 标准中, 并且其频谱效率大约是传统的 PCM/FM 体制的 3 倍<sup>[11]</sup>。此外, 作为大容量的卫星通信系统, 美国宽带全球卫星通信 (WGS) 也采用了调制指数为 6/15 和 7/15 的 Multi-h CPM 信号, 进而取代国防卫星通信系统 (DSCS)<sup>[12]</sup>。此外, 近年来, 出现了 Multi-h CPM 与其他新技术相结合的趋势, 如研究将 Multi-h CPM 技术与 Turbo 乘积码、正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplex, OFDM)、扩频等技术联合应用, 极大的拓展了 Multi-h CPM 的研究领域, 推动了 Multi-h CPM 信号的快速发展。

然而, 由于 Multi-h CPM 信号相位的连续性, 相当于人为引入码间串扰, 使得同步变得更加困难; Multi-h CPM 信号多调制指数的循环作用, 又大大增加了序列检测的复杂程度。因此, Multi-h CPM 的解调技术一直是研究的热点内容。

## 2 Multi-h CPM 解调技术研究现状

Multi-h CPM 接收机原理框图如图 1 所示。

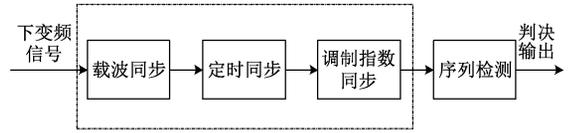


图 1 Multi-h CPM 接收机原理

可见, Multi-h CPM 信号的解调由同步及序列检测两大模块组成。其中, 同步又包括载波同步、定时同步和调制指数同步。下面分别对这两大模块进行介绍。

### 2.1 Multi-h CPM 同步技术研究现状

在 Multi-h CPM 的解调过程中, 同步问题的解决是序列检测模块正常运行的前提条件, 同步的质量好坏将直接影响整个接收系统的误码性能。因此, Multi-h CPM 同步技术的研究是 Multi-h CPM 接收机设计的重难点。Multi-h CPM 的同步过程主要包括载波同步、定时同步及其特有的调制指数同步。

#### 1) 载波同步

由于接收信号的载波频率与本地振荡器频率之间存在频率偏差, 以及接收机与发射机两端多普勒频移的影响, 接收信号会产生频率漂移, 从而影响解调性能。因此, 必须通过估计并矫正载波频偏, 来消除对系统性能的影响。

经典的基于快速傅里叶变换 (FFT) 鉴频的载波频率同步算法可以应用于 Multi-h CPM 的载波频偏估计<sup>[13]</sup>, 但该算法存在局限性。这主要是因为 FFT 算法对抑制载波信号的频率估计精度较低, 容易产生鉴频误差, 对误码性能产生较大影响。此外, 在信噪比较低的传输系统中, 该算法的误码率性能会明显恶化。尽管增加 FFT 点数可以一定程度改善误码率性能, 但同时会造成系统的捕获时间成倍增加。

2015 年, 杨春等<sup>[14]</sup>在文献[15]的基础上提出了一种适用于 Multi-h CPM 信号的基于最大似然 (maximum-likelihood, ML) 准则的载波频率同步算法。算法通过对载波频率和调制指数同步偏差的边缘联合似然函数化简, 获得了 Multi-h CPM 信号载波频率估计。其载波频率估计性能良好, 符号定时偏差和调制指数同步偏差不敏感。但是该算法的复杂程度较高, 不易于工程实现。

大多数情况下, 本地恢复的载波频率与实际的载波频率不会完全相同, 载波频率同步产生的残留载波频偏仍会导致接收信号的相位出现漂移, 从而造成接收机与发射机两端相位不同步。Multi-h CPM 信号通过积分器使得相位变得更加平滑, 但同时造成提取载波相位误差信息变得更加困难。钟声<sup>[16]</sup>在文献[17]的基础上, 提出适用于 Multi-h CPM 信号的基于调幅脉冲 (pulse amplitude-modulated, PAM) 分解的载波相位同步算法。其基本原理是利用部分 PAM 脉冲进行载波相位估计, 大大降低了复杂度。

#### 2) 定时同步

在接收数字信号时, 为了使匹配滤波器能够在准确的

判决时刻对接收码元进行判决,必须明确接收码元的起止时刻,而判决时刻的超前或滞后都会严重影响系统的误码性能。Multi-h CPM 独有的多个调制指数,大大增加了定时同步的难度。因此,定时同步是 Multi-h CPM 同步过程中的重要环节。

对于 sing-h CPM 而言,定时同步算法已经比较成熟,如基于差分-鉴相定时同步算法<sup>[18-19]</sup>,基于 ML 的非数据辅助定时同步算法<sup>[20]</sup>等。然而这些算法并不一定适用于 Multi-h CPM 信号。2008 年, Perrins 等<sup>[21]</sup>提出了基于线性分解的定时同步算法,其估计算法的不足是存在假锁现象。2011 年, Kulikov 等<sup>[22]</sup>提出了基于迟/早门-网格自同步定时同步算法,尽管不会出现假锁现象,但是同步设备的复杂度将随着进制数以及关联长度的增大,呈指数倍增长,不易于工程实现。

2015 年,钟声<sup>[6]</sup>在文献<sup>[17]</sup>的基础上,将其推广到适用于 Multi-h CPM 信号的基于 ML 的非数据辅助定时同步算法,引入量化函数,降低了实现复杂度。该方法在多进制  $L=3$  时码间串扰严重,针对该问题,他提出一种粗定时同步辅助细定时同步的解决方案,实现了算法的改进,但是大大增加了同步的复杂度。

### 3) 调制指数同步

由于 Multi-h CPM 特殊的表达形式,调制指数同步是 Multi-h CPM 接收机独有的同步结构。调制指数同步误差会影响维特比译码中路径的正确合并,造成译码误差的累积,严重影响接收端的误码率性能,甚至使得系统无法正常运行。调制指数同步算法主要分为两类:

第 1 类为通过直接估计调制指数值来实现同步,如 Mazur 等<sup>[13]</sup>提出的 P 次幂-锁相环同步算法,但其估计性能较差。刘璐<sup>[23]</sup>对传统的基于周期性的调制指数同步算法和基于高阶统计量的调制指数同步算法进行研究并改进,但是该算法仅适用于全响应的 Multi-h CPM 信号。

第 2 类为通过估计调制指数同步误差值来实现同步。比如, Ginesi 等<sup>[24]</sup>提出的基于 ML 定时符号-调制指数同步算法和 Wang 等<sup>[25]</sup>提出的基于 PAM 分解的调制指数同步算法都具有不错的估计性能,但是缺点是实现结构都较为复杂。

2015 年,杨春等<sup>[26]</sup>提出了一种基于 ML 的调制指数同步误差和残留定时误差联合估计的方法,分别利用残留定时误差近似为 0 的特性和滤波器冲击响应量化函数来降低算法的复杂程度,该算法在性能损失较小的条件下简化了实现结构。

## 2.2 Multi-h CPM 序列检测研究现状

Multi-h CPM 的接收信号不仅由当前符号决定,还取决于以前的所有符号。鉴于 Multi-h CPM 信号独特的记忆特性,一般采用最大似然序列检测法(maximum-likelihood sequence detection, MLSD),通过选择与接收信号  $r(t)$  的欧氏距离最小的路径作为判决路径,来实现

Multi-h CPM 信号的最佳序列检测。该解调结构主要包括前端的匹配滤波器组和后端的 Viterbi 检测器<sup>[27]</sup>。其基本框图如图 2 所示。

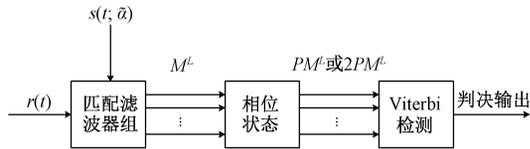


图 2 Multi-h CPM 信号 MLSD 算法原理

在此基础上,很多学者进行了大量研究来降低其复杂度,所选角度大致可以分为简化前端匹配滤波器组数目和简化 Viterbi 检测算法中网格状态两大类。

### 1) 基于匹配滤波器组简化的序列检测算法

简化匹配滤波器组主要通过降低相关器的个数来实现。由于发送信号空间的维数决定了相关器数目,因此可以用维数较低的子空间来近似代替原始信号空间来减少匹配滤波器的个数。

Aulin 等<sup>[28]</sup>提出了一种频率脉冲截断法。其基本思想将频率脉冲截断,使截断之后的关联长度  $L'$  变成比原关联长度  $L$  小的一个值,这样就可以明显地降低复杂度。Simmon<sup>[29]</sup>提出一种基于 Sinc() 函数分解的简化的接收机结构。该结构采用时移的 Sinc() 函数作为基函数来构成子空间,使得匹配滤波器组可以由两个低通滤波器加子区间采样器结构俩代替,这大大降低了接收机的复杂性。但这两种算法对接收机的误码性能影响比较大。

Tang 等<sup>[30-31]</sup>提出了一种基于 Walsh 函数分解的序列检测算法。该算法的基本原理是将接收信号映射到一个基于 Walsh 方程的信号空间,然后将每个接收到的信号波形与所有可能的信号映射进行比较,最终获得解调数据。尽管该算法能够降低匹配滤波器的个数,但是该算法的缺陷在于解调的性能和复杂度取决于 Walsh 空间的维数。即维数越高,性能越好,但解调越复杂,反之则相反。

2005 年, Perrins 等<sup>[32]</sup>在文献<sup>[33-34]</sup>的基础上,提出任何多进制 Multi-h CPM 可以视为一组 PAM 脉冲的加权叠加。然后, Perrin 等<sup>[35]</sup>利用某些波形能量占优的 PAM 脉冲的加权和形式来近似 Multi-h CPM 信号,将文献<sup>[32]</sup>的分解算法应用到 Multi-h CPM 最佳接收机的结构中。另外, Perrin 等<sup>[36]</sup>介绍了 3 种处理 PAM 脉冲的方法,来进一步完善基于 PAM 分解的 Multi-h CPM 信号的次优接收机。这 3 种方法分别为直接利用能量占优的部分脉冲、平均不同调制指数脉冲、平均相同脉冲持续时间的脉冲。但是,同 Walsh 分解类似,该方法解调性能和复杂度取决于 PAM 脉冲如何选取利用,存在改进的空间。

### 2) 基于网格状态简化的序列检测算法

简化网格状态主要是通过合理的分类合并网格状态或预处理等处理方式,来减少 Viterbi 算法所需搜索的网格状态数,或者进一步提高网格图的搜索速度,从而降低接收端

的复杂度,主要有以下几种方法。

Bixio 等<sup>[37]</sup>提出了倾斜相位的方法,对 CPM 信号的形式作了改进处理。基本思想是将每一时刻的相位作平移,新的相位轨迹上的每一个点表示的不再是之前 ML 网格的绝对相位,而是相对于最小值的相对值。处理之后得到的倾斜相位网格与传统相位网格是等价的,但经倾斜相位处理之后的相位状态数与调制指数的分子  $m$  无关,始终为  $p$  个。也就是说,在解调的过程中可以避免当调制指数的分子为奇数时,信号的相位状态还要区分奇数时刻还是偶数时刻,可以明显地简化解调过程。

Svensson<sup>[38-39]</sup>在倾斜相位法的基础上,提出了基于判决反馈的减状态序列检测算法(reduced state sequence detection, RSSD)。算法通过将网格状态的进行合理合并,进一步简化 CPM 信号的网格状态图。同时在检测时引入判决反馈,排除因算法额外引入的路径的影响,大大减少了维特比译码器的网格状态数,降低了接收机的复杂性。即使当原始状态数成倍增加时,算法计算量的增加也不是很明显。RSSD 的另一个优势是,状态数可以不受调制指数的影响。因此,在选择调制参数时,不必考虑解调时的复杂度,就可以选择任意的调制指数。RSSD 方法的提出,为更多的 CPM 调制方案可以被实际应用奠定了坚实基础。文献<sup>[40]</sup>详细介绍了将 RSSD 算法推广应用到 Multi-h CPM 接收机的简化算法中。

### 3 结 论

在航天遥测领域,研究和发展高效的 Multi-h CPM 调制体制来取代沿用数十年的 PCM/FM 体制已经成为一项重要的课题,而解调的高复杂度是制约其应用最重要的因素。通过本文研究不难发现如下几点问题。

1) 由于 Multi-h CPM 信号的记忆特性,传统的同步以及序列检测算法并不适用或者效果不尽理想。而最适用于 Multi-h CPM 记忆特性的基于最大似然的同步算法和序列检测算法,虽然具有不错的解调性能,但是实现结构过于复杂,无法实际应用。

2) 同步是 Multi-h CPM 信号解调的重点和难点,仍有很大的研究空间。在同步方面的研究主要分为 3 个方向:(1) 在牺牲较小的同步性能的前提下对基于最大似然的同步结构进行减复杂度优化;(2) 将已经相对成熟的 Single-h CPM 同步算法推广应用于 Multi-h CPM 信号中;(3) 研究载波、定时以及调制指数的联合估计算法,寻求结构更加简单且性能更加稳定的同步技术。此外,基于数据辅助的同步技术大大增加了信号带宽的使用,得不偿失,本文未作详细讨论。

3) 在序列检测方面的研究主要是对基于最大似然结构的减复杂度优化,主要分为两类:一类是通过对信号近似分解来减少前端匹配滤波器的数量,其中,发展较为成熟且效果最好的是 PAM 分解法;另一类是对后端网格状态的简

化来降低接收机的复杂度,其中最具代表性的是 RSSD 法。

由于实际应用的迫切需求,Multi-h CPM 解调算法的研究一直是比较热的研究方向,降低复杂度是研究的重点,但尝试的结果仍未能达到理想的效果。因此,本文的研究分析对 Multi-h CPM 体制的发展具有一定的参考意义。

### 参考文献

- [1] SALEEM S, STUBER G L. Trellis termination of Multi-h CPM and the Diophantine Frobenius problem[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2011:1352-1357.
- [2] VOGLEWEDE P E. Frequency hopping with Multi-h CPM[C]. IEEE MILCOM, 2003:1089-1094.
- [3] PARK C, WOMACK B. Frequency domain processing for cyclic prefix-assisted Multi-h CPM block transmission[C]. IEEE MILCOM, 2011:329-333.
- [4] XIONG F Q. Digital Modulation Techniques [M]. Boston: Artech House, 2000.
- [5] 伞亮.下一代移动通信系统中连续相位调制技术的研究[D].北京:北京邮电大学,2009.
- [6] 王鹏,吴岭,谷源涛,等.Multi-h CPM 信号的低复杂度软判决算法[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(12):4869-4873.
- [7] 刘璐,王世练,钟声,等.基于 PAM 分解的 Multi-h CPM 低复杂度解调方法[J].西安邮电学院学报,2012,17(5):1-4,9.
- [8] CARIOLARO G, ERSEGHE T, LAURENT N, et.al. New results on the spectral analysis of Multi-h CPM signals[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(7): 1893-1903.
- [9] PAUL E. Frequency hopping with multi-h CPM (MIL-STD-188-181B) [C]. IEEE Military Communications Conference, 2003, 1089-1094.
- [10] Interoperability standard for single-access 5 kHz and 25 kHz UHF satellite communications channels[S]. Department of Defense Interface Standard MIL-STD-188-181B, 1999.
- [11] 张茹.CPM 低复杂度序列检测算法及其 FPGA 实现[D].北京:中国工程物理研究院,2015.
- [12] KUMAR R. Wideband global satellite (WGS) system[C]. Proceeding of the IEEE Aerospace Conference, 2005: 1410-1417.
- [13] MAZUR B A, TAYLOR D P. Demodulation and carrier synchronization of Multi-h phase codes [J]. IEEE Transactions on Communication, 1981, 29(3): 1041-1045.
- [14] 杨春,钟声,谢滔,等.非数据辅助的多指数连续相位调制信号的载波频率估计算法[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(3):973-978.

- [15] MENGULI U. Synchronization Techniques for Digital Receivers [M]. New York: Plenum Press, 1997.
- [16] 钟声. Multi-h CPM 同步及序列检测技术研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2014.
- [17] SAYAK B. Reduced-complexity joint frequency, timing and phase recovery for PAM based CPM receivers[D]. Kansas: University of Kansas, 2009.
- [18] 钟烈, 赵民建, 钟杰, 等. 一种多进制连续相位调制信号的符号定时跟踪方法[J]. 电路与系统学报, 2012, 17(3): 1-5, 9.
- [19] KIM I, LEE Y H. Differential detection based timing recovery for continuous phase modulation[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, 1999: 108-112.
- [20] TANG W Y, SHWEDYK E. Reduced-complexity non-data-aided timing recovery for PAM-based M-ary CPM receivers[J]. IEEE Transactions on Communication, 2012, 4(6): 87-96.
- [21] PERRINS E, BOSE S, WYLIE-GREEN M P. Timing recovery based on the PAM representation of CPM[C]. IEEE Military Communications Conference, 2008: 1-8.
- [22] KULIKOV G V, UNGER A U. Phase and clock synchronization of the Viterbi demodulation of continuous-phase modulation signals [J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2011, 56(6): 656-662.
- [23] 刘璐. Multi-h CPM 低复杂度解调算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [24] GINESI A, MENGALI U, MORELLI M. Symbol and super baud timing recovery in Multi-h continuous-phase modulation [J]. IEEE Transactions on Communication, 1999, 47(1): 664-666.
- [25] WANGY G, LIU A J, ZHANG Y X. Reduced-complexity super baud timing recovery for PAM-based Multi-h CPM receivers [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2013: 3900-3904.
- [26] 杨春, 钟声, 谢顺钦, 等. 低复杂度的 Multi-h CPM 调制指数同步算法[J]. 兵工自动化, 2015, 34(9): 45-50.
- [27] 郑海荣. 多调制指数连续相位调制解调算法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [28] AULIN T, SUNDBERG C-E, SVENSSON A. Viterbi detectors with reduced complexity for partial response continuous phase modulation[C]. Proceedings of the National Telecommunications Conference (NTC'81), 1981: A7. 6. 1-A7. 6. 7.
- [29] SIMMONS S J. Simplified coherent detection of CPM[J]. IEEE Transaction on Communications, 1995, 43(2): 726-728.
- [30] TANG W, SHWEDYK E. A CPM receiver based on the Walsh signal space [C]. IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers & Signal Processing, IEEE, 1995.
- [31] TANG W, SHWEDYKA E. Practical receiver for Multi-h continuous phase modulation [C]. Processing of 18th Biennial Symposium, 1996: 335-338.
- [32] PERRINS E, RICE M. PAM decomposition of M-ary multi-h CPM [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(12): 2065-2075.
- [33] 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.
- [34] MENGALI U, MORELLI M. Decomposition of M-ary CPM signals into PAM waveforms [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(5): 1265-1275.
- [35] PERRINS E, RICE M. A new performance bound for PAM-based CPM detectors[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(10): 1688-1696.
- [36] PERRINS E, RICE M. Reduced-complexity detectors for Multi-h CPM in aeronautical telemetry [J]. Aerospace & Electronic Systems Transactions on IEEE, 2007, 43(1): 286-300.
- [37] BIXIO E, RIMOLDI. A decomposition approach to CPM[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1988, 34(2): 260-270.
- [38] SVENSSON A. Reduced state sequence detection of full response continuous phase modulation [J]. Electronics letters, 1990, 26(10): 652-654.
- [39] SVENSSON A. Reduced state sequence detection of partial response continuous phase modulation[J]. IEE Proceedings-I, 1991, 138(10): 256-268.
- [40] 钟凯, 葛临东, 巩克现. 基于 Laurent 分解的多指数 CPM 低复杂度序列检测算法[J]. 信号处理, 2011, 27(5): 715-720.

### 作者简介

上官泽胤, 硕士研究生, 主要研究方向为测控通信技术。

E-mail: 191984065@qq.com