

DOI:10.19651/j.cnki.cmt.2107329

串行级联连续相位调制性能仿真分析

刘铭权 叶展

(南京信息工程大学 电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要: 连续相位调制(CPM)是一类包络恒定的调制方式,具有较高的频谱利用率和功率利用率。其恒包络特性可以在调制中很好的适应非线性放大器。这使得连续相位调制可以在诸如卫星通信、深空通信等通信领域中得到很好的应用。为提高系统性能,使用串行级联码与连续相位调制技术结合的系统模型。由于传统译码算法复杂度高的问题,使用改进的 Max-Log-APP 算法进行译码。在加性高斯白噪声信道下,针对译码迭代次数和 CPM 参数众多互相关联的问题,设计了一种参数优化方法。结果表明,在低信噪比的情况下,优化参数后的系统误比特率能有 1 dB 左右的性能提升。

关键词: 连续相位调制;串行级联卷积码;Max-Log-APP 算法;迭代译码

中图分类号: TN911.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Simulation analysis of serially concatenation convolutional code performance

Liu Mingquan Ye Zhan

(School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Continuous phase modulation is a kind of modulation with constant envelope, which has high frequency spectrum utilization and power utilization. Its constant envelope property can be well adapted to nonlinear amplifier modulation. So continuous phase modulation can be used in satellite communication, deep space communication and other communication fields. In order to improve the system performance, a system model combining serial cascade code and continuous phase modulation is used. Due to the high complexity of the traditional decoding algorithm, the improved Max-Log-APP algorithm is used for decoding. In the additive Gaussian white noise channel, a parameter optimization method is designed to solve the problem of the correlation between decoding iterations and CPM parameters. The results show that under the condition of low SNR, the system performance can be improved about 1 dB by optimizing the bit error rate.

Keywords: continuous phase modulation; serially concatenation convolutional code; Max-Log-APP algorithm; iterative decoding

0 引言

在通信条件比较恶劣的环境中,如在卫星通信和深空通信中,接收机一般处于较低的信噪比并且功率和频谱都受到限制的工作环境下,所以需要信道编码和调制技术来保证信息的高效可靠传输^[1]。

近年来,随着低密度奇偶校验码(low density parity check, LDPC)研究的深入,使用 LDPC 编码的 SCCPM 系统也受到很多关注。文献[2]提出了使用 LDPC 和高斯滤波最小频移键控(Gaussian filtered minimum shift keying, GMSK)相结合的方案,在其低频通信中能使串行级联连续

相位调制(serially concatenated continuous phase modulation, SCCPM)系统性能获得一定增益。但是 LDPC 编码只有在码长较长时才能体现其性能优势,且编码和硬件实现都较为复杂。文献[3]提出一种改进的非相干软输入软输出算法,能克服突发译码错误的问题。但也增加了系统的时间和空间复杂度,不利于系统实现。文献[4]提出了一种多路并行架构的 LDPC 编码器,降低了其编码的硬件实现复杂度。但是其编码器吞吐量不高,难以在高频通信中得到应用。文献[5]提出了一种改进的置信度传播(belief propagation, BP)算法,简化了算法复杂度,但是相比于 Max-Log-APP 算法,改进后的 BP 算法仍需要更多的迭代

次数才能实现算法的收敛,增加了系统的反应时间。

使用低阶相移键控(PSK)等调制方式,直接矩形波发送,会由于频谱拖尾导致带宽效率不高。采用成形滚降的方式可以有效提高带宽效率,但带来的后果是信号不再是恒包络,经过非线性放大器后误码率性能损失严重。而要保证误码性能,必然显著降低功放的功率利用率。连续相位调制(continuous phase modulation, CPM)有带宽利用率高的特性⁶。另外,根据 Rimoldi 证明,CPM 可以等效成两个结构,即用于实现编码的连续相位编码器(continuous phase encoder, CPE)和用作调制的无记忆调制器(memoryless modulator, MM)。连续相位编码器具有类似于卷积码编码器的结构,两者可以等效。基于此,串行级联连续相位调制(SCCPM)可由串行级联卷积码(serial cascade convolution code, SCCC)改进得到⁷。利用 CPM 信号所具有的网格结构特性,使用网格编码调制,就可以把 CPM 用作系统的内码。由 CPM 和卷积码串行级联构成的 SCCPM 系统可以获得较好的系统性能。

针对 SCCPM 系统译码算法时间和空间复杂度高的问题,在译码算法选择上,本文使用改进的 Max-Log-APP 算法,减少算法中大量的指数复杂运算,以少量的性能损失来提高系统反应速度。对于 SCCPM 系统中大量的设计参数,提出了一种联合的优化参数的方案,首先通过仿真确定最合适的译码迭代次数。然后根据 CPM 参数中各个参数对其它参数的影响程度分别进行仿真,从而得到误比特率性能更好的联合参数。结果表明,优化参数后的 SCCPM 系统有着更好的误比特率性能和更快的响应时间。

1 CPM 仿真算法选择与系统结构设计

1.1 MAP 类算法和维特比算法

在有 两个分量译码器的级联码系统中,主要使用有包括最大后验算法(maximum a posteriori probability, MAP)算法、对数域上改进的 Log-APP 算法、进一步简化运算的次优 Max-Log-APP 算法和在传统维特比算法上进行修正的软输出维特比算法(soft output Viterbi algorithm, SOVA)。SOVA 算法有较低的复杂度,易于仿真实现。但 SOVA 算法存在软判决信息误差,使得其误码

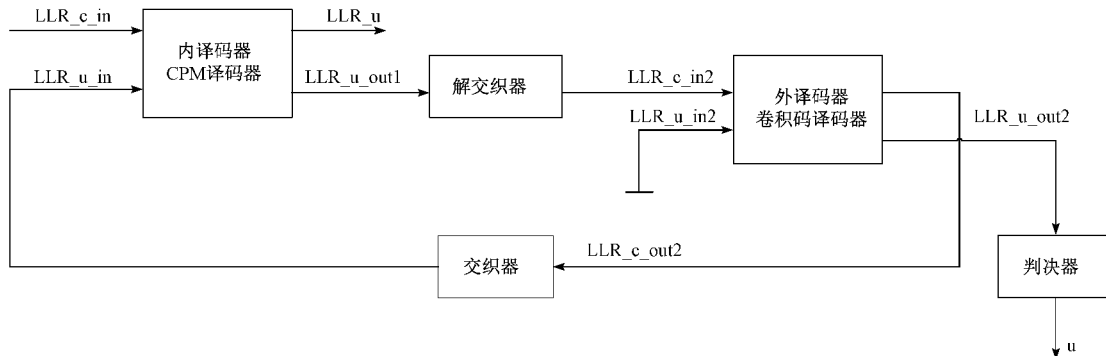


图 3 SCCPM 译码结构

率性能较差。许多文献中使用 Log-APP 算法,但其系统复杂度较高。本文使用 Max-Log-APP 算法以降低系统复杂度。

1.2 Max-Log-APP 算法

算法可以分为 3 步:前向迭代 α 、后向迭代 β 和后验值的计算。本文中,内译码器和外译码器均使用 Max-Log-APP 算法进行迭代译码。

$$\alpha_k(s) = \max(\alpha_{k-1}(s') + \gamma_k(s', s)) \quad (1)$$

$$\beta_{k-1}(s) = \max(\beta_k(s') + \gamma_k(s', s)) \quad (2)$$

$$\gamma_k(s', s) = \ln(P(u_k) * P(y_k | u_k)) \quad (3)$$

$$L(u_k) = \max_{(s', s)}(\alpha_{k-1}(s') + \beta_{k-1}(s) + \gamma_k(s', s)) - \max_{(s', s) \neq (u_k)}(\alpha_{k-1}(s') + \beta_{k-1}(s) + \gamma_k(s', s)) \quad (4)$$

其中, (s', s) 表示了状态的转移; y 表示译码器的输出序列; $L(u_k)$ 是作为译码判决的软信息。

1.3 CPM 的编码与调制

如图 1 所示,连续相位编码器(CPE)和一个无记忆调制器(MM)构成了内码的编码和调制功能,采用这种方式编码就可以和调制分开来研究¹⁸。



图 1 CPM 系统的分解结构

如图 2 所示,在系统发送端进行编码、交织和映射,构成 SCCPM 编码结构¹⁹。信息序列 D 采用卷积码编码,生成码字序列 C 。接着进行交织得到序列 U_1 ,通过映射器后,将得到的 CPM 信息符号 U_2 进行连续相位编码得到输出 U 。

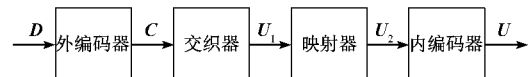


图 2 SCCPM 编码结构

1.4 系统译码结构与交织器的选择

如图 3 所示,SCCPM 译码结构中,内译码器和外译码器通过外信息的迭代来实现译码性能的优化。其中交织器和译码算法的选择对整个系统的误比特率性能会有很大的影响。交织器的设计主要有规则交织器和伪随机交织器。

其中规则交织器在低重码字较多时,对系统的性能提升不明显,而伪随机交织器由于交织形式的随机性,可能导致错误序列的离散程度不够,存在性能的不确定性。本文考虑使用的 S-随机交织器在交织和解交织时则具有较好的距离特性和离散特性。

2 系统参数分析与选择

传统的硬判决译码会造成信息的损失,而采用软判决方式,通过软信息在译码器之间的迭代来改善误比特率性能^[10]。另外,采用迭代译码可以降低系统的复杂度,而采用最大似然译码方式其系统复杂度较高。因为前者与信息序列呈线性关系,而后者与码字长度呈指数关系。

本文采用基于后验概率的 MAP 类译码算法,在译码过程中,首先计算每个数据比特的后验概率。在每一时刻,译码比特的选择则是寻找其中具有最大后验概率的比特,使系统的误比特率最小^[11]。根据最大似然原理和贝叶斯公式可知,MAP 类算法时最接近最大似然算法的次最优算法。

SCCPM 系统仿真参数众多,各参数之间互相影响,CPM 系统虽然具有较高的频谱效率和功率利用率,但是二者本身是互相矛盾的^[12]。本文主要讨论了不同的卷积码约束长度、调制指数、交织长度、迭代次数、基带成型脉冲、关联长度在加性高斯白噪声信道下对系统误比特率性能的影响。

2.1 不同约束长度的卷积码

卷积码的约束长度 K 会影响外译码器的复杂度,当 $K=4$ 时,外译码器会有 2^{K-1} 个状态,即 8 个状态。随着 K 的增大,SCCPM 系统外译码器的复杂度会快速增加^[13]。

2.2 调制指数和关联长度

在二进制 SCCPM 系统中,调制指数和关联长度都会影响 SCCPM 内译码器的复杂度,当关联长度为 L 且调制指数为 Q/P 时,内译码器有 $P \times 2^{L-1}$ 个状态。

2.3 参数选择和优化方案

连续相位调制(CPM)的参数众多,且参数对系统的影响程度各不相同,本文采用如图 4 所示的方法,对系统的各个参数给与初始值固定。因为迭代次数受其他参数的影响小,所以先研究不同迭代次数的对系统性能的影响。选择最优的迭代次数后,进行下一个参数的仿真。外码的约束长度对外译码器的状态数和复杂度影响较大,对内译码器的影响较小,所以固定迭代次数后可以对不同的卷积码生成多项式进行仿真,确定最优参数。按照仿真参数对其他参数的影响程度大小进行仿真优化,对其他参数影响小的参数先进行仿真。当所有参数都完成优化选择后,即可得到性能比较优异的系统误比特率性能。

3 SCCPM 仿真结果

串行级联连续相位调制(SCCPM)在实际中常使用次

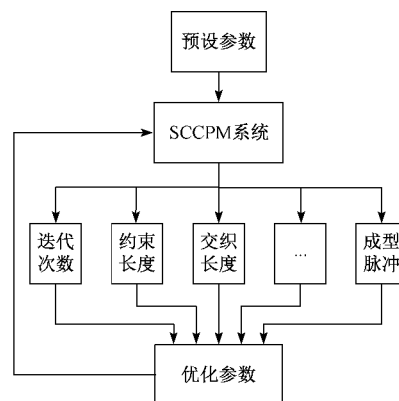


图 4 SCCPM 系统优化方案

优迭代译码器。本文使用 Max-Log-APP 算法、AWGN 信道模型,通过 MATLAB 分析影响系统性能的参数,其中预设译码迭代次数为 4 次、卷积码生成多项式为 $(15, 17)$,调制指数 (h) 为 $1/2$ 、交织器长度为 1024 、关联长度 (L) 为 1 、基带成型脉冲为升余弦(rising cosine, RC)脉冲。

3.1 SCCPM 系统中迭代译码次数

SCCPM 系统采用迭代译码的方式对系统性进行优化,迭代次数的选择可以很大程度上影响系统的性能^[14]。如图 5 所示,显示了在预设参数和不同迭代次数情况下,系统误比特率随信噪比的变化。

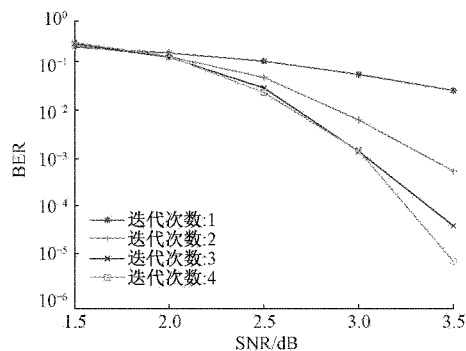


图 5 迭代次数对 SCCPM 系统性能的影响

通过观察图 5,可以看出随着迭代次数的增加,SCCPM 系统的误比特率曲线不断下降。当信噪比增大时,误比特率性能可以得到很好地改善。但是随着迭代达到一定次数,误比特率性能的改善将很不明显,这是因为码字间的最小距离导致的,也就是出现了错误平台。所以,迭代次数并不是越多越好,考虑到迭代次数过多会使系统译码工作量大量增加,可以使用预设若干次迭代来减少系统运算量。

在本文中,经过 4 次迭代译码后系统误比特率性能已经十分优异,所以考虑使用 4 次迭代译码。

3.2 SCCPM 系统中卷积码的约束长度

系统外码采用约束长度分别是 3、4、5 的卷积码,码率为 $1/2$ 。生成多项式分别为 $(7, 5)$ 、 $(15, 17)$ 、 $(37, 21)$ 。迭

代次数为 4 次。

如图 6 所示,当其他参数保持固定时,随着信噪比的增大,不同约束长度 SCCPM 系统的误比特率性能都得到很大改善。当信噪比较小时,约束长度较小时系统性能更好。但随着信噪比的增加,约束长度大的系统性能会更好。另外,图 6 中当高信噪比时约束长度为 4 和约束长度为 v ,系统性能相差不大。

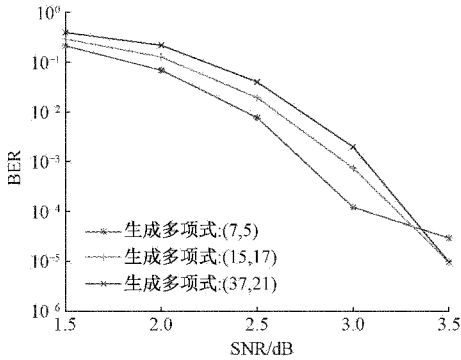


图 6 约束长度对 SCCPM 系统性能的影响

3.3 SCCPM 系统中交织器的交织长度

交织器作为影响 SCCPM 系统误比特性能的重要因素之一,其作用是使突发错误分散开,从而转变成影响较小的伪随机错误^[15]。通过打乱数据来降低码元之间的相关性从而提高了抗干扰性^[16]。S-随机交织器满足经过交织后比特距离至少为 S,从而获得比伪随机交织器更好的系统性能,其中 S 的选择与交织长度有关。

对预设参数下,交织长度分别为 128、256、512、1 024、2 048、4 096,采用卷积码生成多项式为 (15, 17),迭代次数为 4 次的系统进行仿真。

如图 7 所示,大的交织长度可以很好地改善 SCCPM 系统的误比特率性能,当较低信噪比时,交织长度的大小对系统误比特率性能的提升效果并不明显。在信噪比较大时,大的交织长度往往会提供更好的系统性能。但是,当交织长度达到 2 048 时,继续增加交织长度对系统误比特率性能的提升十分不明显,这也从侧面验证了错误平层的存在。选择合适的交织长度不仅可以提高系统性能,也可以减少系统的工作量。

3.4 连续相位调制(CPM)的调制指数

调制指数是决定 CPM 信号相位函数如何随时间变化的关键因素之一,它的取值影响着信号的带宽,也对系统的性能产生影响。图 8 中,SCCPM 系统在预设参数下,仿真调制指数为 1/3、1/2 和 3/4 情况下的 SCCPM 系统性能。

如图 8 所示,随着调制指数增大,系统的误比特率性能更好。但是大的调制指数会降低系统的带宽利用率。并且随着调制指数的增大,连续相位编码器的编码网格状态数增大,将导致系统译码的时间和计算复杂度增

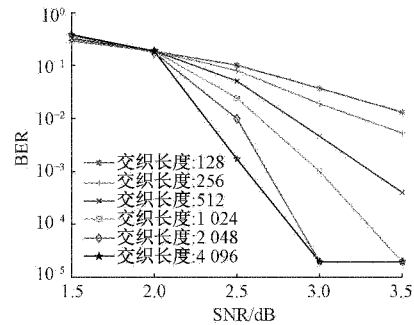


图 7 交织长度对 SCCPM 系统性能的影响

大^[17-18]。所以对系统性能和复杂度之间进行考虑,可以选择调制指数为 1/2 作为优化后的参数。

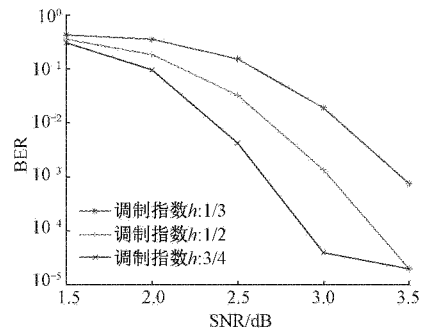


图 8 调制指数对 SCCPM 系统性能的影响

3.5 连续相位调制(CPM)的关联长度

CPM 的关联长度是脉冲函数的参数,对码间干扰有着很大的影响,选择大的关联长度会伴随着码间干扰的增强。从而影响系统性能。如图 9 所示,在 SCCPM 系统在预设参数下,4 次迭代译码,调制指数为 1/2。仿真关联长度为 1、2 和 3 的情况下 SCCPM 系统的性能。

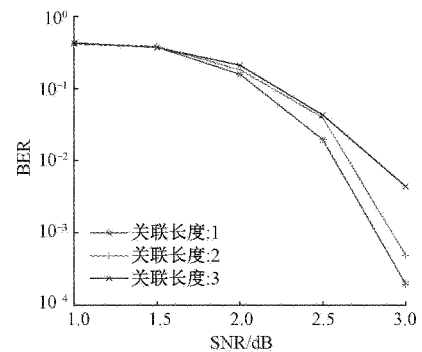


图 9 关联长度对 SCCPM 系统性能的影响

另一方面,CPM 关联长度的增加会使 CPM 的自由距离变小。系统的误比特率性能随着关联长度的增加而降低。但相应的,关联长度的增加可以使频带利用率提高。

3.6 连续相位调制(CPM)基带成型脉冲

CPM 信号常用的基带脉冲波形有矩形脉冲 (rectangular pulse, REC)、RC 和 GMSK。在预设参数中,

更改关联长度为 2, 仿真上述 3 种脉冲形式对系统性能的影响。

如图 10 所示, 在关联长度为 2 时, 升余弦脉冲(2RC)比最小频移键控脉冲(2GMSK)的误比特率性能略差。而且, 考虑到带宽利用率, 选择最小频移键控脉冲更优。在高信噪比情况下, 相比于 2RC 和 2GMSK, 矩形脉冲(2REC)的误比特率明显更高, 并且矩形脉冲的带宽利用率最低。

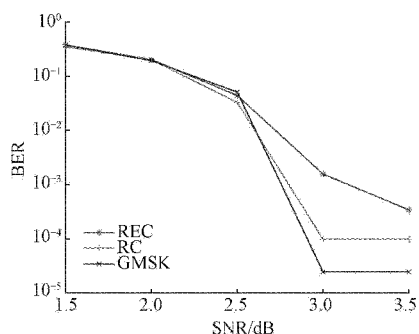


图 10 基带成型脉冲对 SCCPM 系统性能的影响

3.7 优化参数选择

在 SCCPM 系统中, 影响系统性能的参数很多, 仿真单个参数的变化反映其对系统性能的影响, 为如何优化选择参数提供了参考。如图 11 所示, 是考虑优化参数选择之后的系统误比特率性能。在 4 次迭代下, 外码使用的卷积码生成多项式为(15,17), 交织长度为 1 024。可以看出此时系统误比特率性能比较优异。

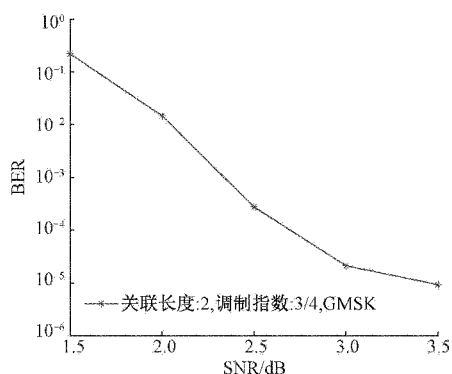


图 11 一种参数优化选择后的系统性能

4 结 论

与 APP 类算法相比, SOVA 算法有实现简单的优点, 但其精度低的缺点会使译码出现较高的错误率, 在低信噪比的条件下其性能会有 2 dB 左右的损失, 不利于在条件恶劣的通信条件下使用。所以本文使用 Max-Log-APP 算法进行系统的译码。相比于 Log-APP 算法, 虽然系统的误比特率性能有 0.2 dB 左右的下降。然而可以使系统译码时免于进行大量的指数运算, 减少系统反应时间和工程复杂

度, 以便于硬件实现。对影响 SCCPM 接收端译码性能的参数进行了仿真, 包括卷积码约束长度、译码迭代次数、交织器交织长度、CPM 调制指数、关联长度和基带成型脉冲。通过仿真具体分析这些参数, 可以发现:

1) SCCPM 系统译码时, 迭代次数并不是越多越好, 当迭代次数达到一定次数时, 系统误比特率性能会趋于收敛。本文在 4 次迭代的情况下, 系统误比特率性能已经得到很大改善。

2) 在选择 SCCPM 系统的外码时, 选择约束长度为 4 的卷积码是比较合适的。

3) 交织长度在一定程度上的增加对系统性能有很大改善, 但是过大的交织长度会增加系统的复杂度。

4) 随着调制指数和关联长度增大, 将会提高系统的误比特率。但是大的调制指数和关联长度又会增加系统的频带利用率。两者需要折中考虑, 根据实际误码率要求选择合适的参数。

总的来说, 与传统的如正交相移键控(quadrature phase shift keying, QPSK)调制方式相比, 在低信噪比时, 采用 CPM 调制的误比特率性能并不优异, 但对于如深空通信、卫星通信等环境下, 由于使用 CPM 调制能使非线性功率放大器工作在接近饱和状态, 有很高的功率利用率, 即在恶劣通信环境下, 使用 CPM 调制的误比特率性能将优于传统的调制方案。使用卷积码与 CPM 级联的 SCCPM 有着高的编码增益, 对其进行参数优化选择以使 SCCPM 系统获得更好的误比特率性能有着重要意义。

参考文献

- [1] 刘蒙蒙, 余忠洋, 路清雅, 等. 一种高效的串行级联非递归 GMSK 系统设计[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(1): 82-87.
- [2] KUMAR A, BAH L R, GUPTA R, et al. Performance enhancement of GMSK and LDPC based VLF communication in atmospheric radio noise[C]. 2013 National Conference on Communications(NCC), 2013: 1-5.
- [3] SHEN C, BING L, BAI B. Design of LDPC coded CPM over burst-error channels[C]. 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2016: 1-5.
- [4] 石硕, 王瑞雪, 李慧, 等. LDPC 码的多路并行编码器实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 83-89.
- [5] 马慧, 吴彦鸿, 王宏艳. 低复杂度 LDPC 优化译码算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(8): 1-5.
- [6] 上官泽胤. Multi-h CPM 解调算法研究综述[J]. 电子测量技术, 2019, 42(5): 60-64.
- [7] 王雪宝, 高俊, 窦高奇, 等. SCCPM 系统编译码发展与研究[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(9): 1-4.
- [8] 李强, 严庆, 罗胜. 基于符号频域均衡的 CPM 迭代检

- 测算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(7): 1550-1556.
- [9] CHENG Y, HE Y, CHEN T, et al. Coded CPM applying to SCCPM scheme [C]. 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2017: 211-213.
- [10] 戚宗峰, 李保国, 雷菁. 短波信道下 Turbo 码性能仿真分析[J]. 通信技术, 2015, 48(5): 519-523.
- [11] 付婉, 杨茂辉, 胡明亮, 等. Turbo 码译码算法理论推导及误码性能分析[J]. 电子测量技术, 2018, 41(11): 10-14.
- [12] BENADDI T, POUILLIAT C, BOUCHERET M L, et al. Design of unstructured and protograph-based LDPC coded continuous phase modulation [C]. IEEE International Symposium on Information Theory, IEEE, 2014: 1982-1986.
- [13] 孙景华, 李梦良, 吴小钧. 连续相位调制和 Turbo 乘积码的串行级联系统设计 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(4): 88-93.
- [14] 山甜, 薛鸿民, 邓志龙. Turbo 码在短波通信系统中的应用研究 [J]. 科技资讯, 2020, 18(24): 49-51, 63.
- [15] WANG M, ZHANG M, YU K, et al. Application of bit interleaving to convolutional codes for short packet transmission [C]. 2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS), IEEE, 2019: 425-429.
- [16] 贾明俊, 陆安江. 一种新型数字交织技术的设计与仿真 [J]. 现代信息技术, 2019, 3(5): 53-55.
- [17] 马子骥, 卢浩, 董艳茹. 一种基于环的串行级联 CPM 方法 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2018, 30(5): 655-660.
- [18] 张凯. 低复杂度的连续相位调制与 LDPC 联合迭代译码算法 [J]. 电讯技术, 2015, 55(12): 1309-1394.

作者简介

刘铭权, 硕士研究生, 主要研究方向为信号处理、无线通信、卫星通信等。

E-mail: 1564025309@qq.com

叶展, 博士, 教授, 主要研究方向为无线通信、卫星通信、信号处理等。

E-mail: yezhi5223@163.com