

应用 VDE 的 QPSK-CPM 扩频系统多用户检测算法

吴飞宇¹ 向前² 张倩武¹ 张希岩² 殷惠惠²

(1.上海大学通信与信息工程学院 上海 200444; 2.上海航天电子技术研究所 上海 201109)

摘要: 连续相位调制扩频信号因为扩频序列随机变化,可以适应多用户通信,逐渐被应用到卫星通信中。甚高频数据交换系统随机接入信道采用了 QPSK-CPM 扩频调制方案,针对 QPSK-CPM 扩频系统的多用户检测问题,提出一种基于干扰消除检测的新型多用户检测算法,该算法通过对接收用户信息进行串行干扰消除级联一次迭代消除的方法来对多用户信息进行检测,且该算法能够有效消除用户的多普勒频偏及减小用户功率差带来的性能损失。通过对新算法仿真验证,结果表明,新算法比传统干扰消除检测算法具有更好的检测性能,在实时通信船舶数量达到 800 艘时,8 个用户以内的混叠信息解帧率可达 90%。

关键词: 连续相位调制扩频;多用户检测;甚高频数据交换系统;卫星通信;串行干扰消除

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

QPSK-CPM spread system multi-user detection algorithm for VDE

Wu Feiyu¹ Xiang Qian² Zhang Qianwu¹ Zhang Xiyan² Yin Huihui²

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Continuous phase modulation spread signal is gradually applied to satellite communication because the spread spectrum sequence changes randomly and can be adapted to multi-user communication. Random access channel of VDE system uses QPSK-CPM spread modulation scheme. A new multiuser detection algorithm based on interference cancellation detection is presented for QPSK-CPM spread spectrum system. The algorithm detects multi-user information by cascaded one-iteration elimination of successive interference cancellation for receiving user information. The algorithm can effectively eliminate the user's doppler frequency offset and reduce the performance loss caused by user power difference. The simulation results show that the new algorithm has better detection performance than the traditional interference cancellation detection algorithm. When the number of real-time communication ships reaches 800, the deframe rate of overlapping information within 8 users can reach 90%.

Keywords: continuous phase modulation spread; multi-user detection; very high frequency data exchange system; satellite communication; successive interference cancellation

0 引言

甚高频数据交换系统(very high frequency data exchange system, VDES)是新一代的海上数据交换系统,为全球海洋船舶与卫星通信提供服务需求^[1-2]。甚高频数据交换(very high frequency data exchange, VDE)是 VDES 系统中的一个子系统, VDE 具有很高的带宽,船舶可以获取的信息极为丰富,不仅位置安全信息可以由此传递,港口作业、货运信息也可以借此传递。VDE 信号具有 12 个信道^[3],其中数据确认信令信号和随机接入信道(random access channel, RAC)必须使用 Link ID 20 物理层帧格式,

Link ID 20 物理层帧格式选用的是正交相移键控-连续相位调制扩频(quadrature phase shift keying-continuous phase modulation spread, QPSK-CPM)扩频调制方式,由于在随机接入时会出现多用户竞争的情况,提升 QPSK-CPM 扩频多用户检测能力可以有效提升用户随机接入的能力,提升 VDE 通信整体性能,为未来复杂、多功能的海上 VDE 通信应用打下了坚实基础。

对 CPM 扩频序列的多用户检测研究,早期研究是把 CPM 信号分解成一个连续相位编码器(continuous phase encoder, CPE)和无记忆调制器(memory modulator, MM)后进行多用户检测^[4]。郑洪明等^[5]设计了一种利用最大后

验估计(maximum A posterior, MAP)和软输出维特比算法(soft output viterbi algorithm SOVA)和 Turbo 迭代检测算法来检测多用户,该算法把 CPM 调制器作为内码与 Turbo 译码器进行级联进行迭代,产生很好的增益效果,但是由于该算法处理过程复杂,而且检测性能随 Turbo 交织长度的变化也会带来检测性能的差异。COTTAYELLUCCI 等在文献[6-7]中阐述了在直接扩频序列系统中运用最小线性均方误差(linear minimum mean squared error, LMMSE)的方法进行多用户检测,并进行了仿真验证,得到了很好的解码率性能。后来 MULLER 在文献[8]中利用了 LMMSE 的方法对 CPM 扩频系统对多用户进行检测,但是在论文中只阐述了在理想高斯白噪声信道条件下使用该方法的可行性,只对理论进行了推导分析,没有进行仿真验证,也没有考虑频率偏移和用户功率差对解调性能带来的影响。文献[9]用针对正交扩频序列的多用户检测技术来对特殊的 CPM 扩频序列进行多用户检测,也取得了不错的效果。本文将介绍干扰抵消类算法对扩频调制系统的多用户检测原理,在此基础上设计一种适用于 QPSK-CPM 扩频调制系统的检测算法,完成对多用户信号的检测。

1 QPSK-CPM 扩频系统发射模型

VDE 星载部分(satellite component of the VDE, VDE-SAT)一个时隙长度是 26.67 ms, Link ID 20 一帧共有 5 个时隙,持续 133.35 ms, 263 个符号长度。帧格式如图 1 所示, A 为数据帧的上升沿,共持续 0.41 ms; B 为同步字符序列,共 48 个符号,用来进行频偏补偿^[10]; C 包含数据和导频,其中导频主要用于相位追踪; D 是符号的下降沿,持续时间为 0.41 ms, E 是帧保护间隔。持续时间 8 ms。

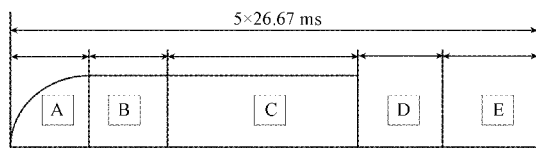


图 1 Link ID 20 数据帧格式

数据帧经过 QPSK-CPM 扩频调制后被送入发射端, 单个用户 QPSK-CPM 扩频调制如图 2 所示。

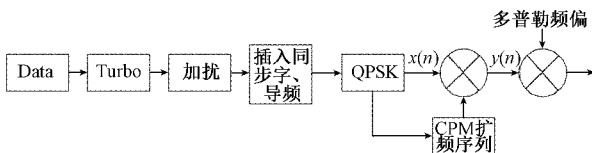


图 2 单个用户 QPSK-CPM 扩频调制图

图 2 中的 CPM 扩频序列是对 CPM 序列进行 16 倍扩频 4 倍过采样后的序列, CPM 扩频序列分为 CPA 扩频序列和 CPE 扩频序列。CPA、CPE 扩频序列分别有 4 列序列, 每一个符号分别经过 CPA、CPE 扩频调制后拼接组成

{CPA、CPE} 调制序列, 这样每一个符号共有 16 种调制波形可选择。经过 CPM 扩频调制后得到的发射信号可表示为:

$$y(n) = \begin{cases} x(n) \cdot CPA(l_a, p_a(n)) \\ x(n) \cdot CPE(l_c, p_c(n)) \end{cases} \quad (1)$$

其中, l_a, l_c 分别是符号对应的 CPA 和 CPE 序列中的行标, 每一个符号映射行标数为 32, 所以经过 QPSK-CPM 调制后一个符号调制长度为 64 个符号 {CPA、CPE}。 p_a, p_c 对应 CPA 和 CPE 序列的列标, 其值是由 QPSK 差分计算得到的。计算规则如下:

$$q = \begin{cases} 0 & \text{QPSK input bit equal 11} \\ 1 & \text{QPSK input bit equal 01} \\ 2 & \text{QPSK input bit equal 00} \\ 3 & \text{QPSK input bit equal 10} \end{cases} \quad (2)$$

$$p_a(n) = \begin{cases} 0, & n = 0 \\ (q(n) - q(n-1)) \% 4, & n > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$p_c(n) = \begin{cases} (q(n+1) - q(n)) \% 4, & n < BL - 1 \\ 0, & n = BL - 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中, BL 是一帧数据的长度。

每一个符号的 CPM 扩频序列各不相同, 其中某一个符号调制的 CPM 扩频序列波形如图 3 所示, 左侧的 4 条虚线是 CPA 扩频 4 倍过采样后的序列, 右侧 4 条实线是 CPE 扩频 4 倍过采样后的序列。从图 3 中可以看到, 一个给定符号的 CPA、CPE 扩频序列非常相似。在每一段 CPA 扩频序列中其头部有些许波形差异, CPE 扩频序列尾部有些许差异。这些差异被称为保护间隔, 是为了防止符号跳变导致相位不连续^[11]。针对多用户混叠信号的检测就是根据这些保护间隔的差异来进行区分的。

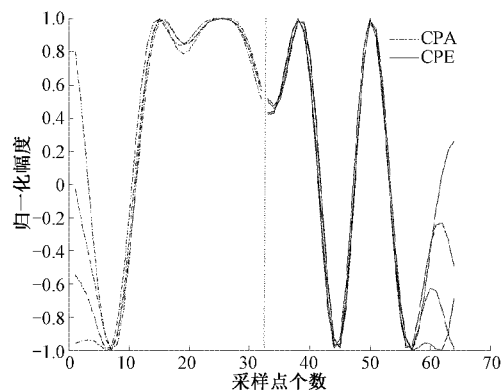


图 3 部分 CPM 扩频序列

2 QPSK-CPM 扩频系统多用户接收模型

2.1 多用户接收模型

信号在传输过程中会产生多普勒频率偏移^[12], 接收信号在经过下变频和低通滤波, 在经过模数转换器采样后, 其接收模型^[13]可以表示为:

$$r(t) = S(t) + N(t) = \sum_{k=1}^K A_k s_k(t - t_k) e^{j\omega_k(t - t_k)} + n(t) \quad (5)$$

其中, A_k 是每个用户信号的幅度, t_k 是用户信号到达接收机的延迟时间, ω_k 是每个用户的频率偏移, 根据 VDES G1139 标准, 多普勒频率偏移最大不超过 4 kHz, $n(t)$ 是加性高斯白噪声, $s_k(t)$ 是用户经过 CPM 扩频后的信号。可以表示为:

$$S_k(t) = \sum b_{k,m} c_{k,m}(t - mT_s) \quad (6)$$

其中, $b_{k,m}$ 是用户在时刻 m 的符号, $c_{k,m}$ 是用户在时刻 m 的 CPM 扩频码片, T_s 是符号周期。

2.2 用户混叠分析

当船舶发出的信息进入 QPSK-CPM 扩频接收系统时, 如果进行多用户检测, 可以对混叠的用户信息进行检测, 从而解析出用户发送的原始重要信息, 根据解析的信息优先级首先对高优先级用户进行通信, 保证用户最快获取所需求信息。多用户检测可以有效提高用户接入数量, 同时保障用户重要信息不丢失从而保证船舶航行安全。

根据 VEDS G1139 标准, VDE 随机接入信道 RAC 在 1 min 内船舶要向卫星发送 3 次, 每次约 36 帧。当大量需要通信的船舶向卫星发送消息时, 会造成接收机收到的用户信息发生混叠现象。图 4 仿真了不同实时通信船舶数量与不同用户混叠概率曲线图。可以看到, 当只有 100 艘通信船舶时, 单个用户和 2 和用户信息混叠的概率最大, 达到了 60%。随着船舶数量的增加, 单个用户的概率越来越小, 多个用户混叠的概率越来越大。当实时通信船舶数量达到 700 艘时, 7 个用户和 8 个用户信息混叠的概率最大。

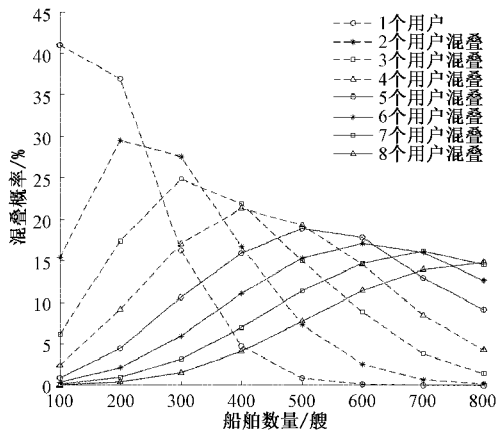


图 4 不同船舶数量时不同用户混叠概率曲线图

3 多用户检测原理

3.1 常见干扰消除类算法

串行干扰消除检测^[14 15] (successive interference cancellation, SIC) 算法的基本原理是对用户信号解调后进行重构消除。SIC 按照功率大小依次解调用户, 然后一次

一个的将他们从接收信号中除去。串行干扰消除检测算法首先要估计每个用户的功率, 然后对用户按照功率大小依次排序。SIC 先对功率最大的用户信号进行解调, 解调完成后用解调后的数据重构该信号, 然后用接收信号减去该重构信号, 对次功率强用户信号进行解调、重构、消除, 直至最小功率用户被解调出来。串行干扰消除检测器对目标用户强的用户信号进行了消除, 而对目标用户弱的用户信号没有消除, SIC 算法对扩频码的要求比较高, 要求扩频码互相关性很弱, 自相关性很强^[16]。

并行干扰消除检测^[17-18] (parallel interference cancellation, PIC) 算法不同于 SIC 算法, 并行干扰消除算法不需要考虑每个用户的功率大小, 直接对每个用户进行解调, 当所有用户解调结束后, 对所有用户信号进行重构, 同时消除目标用户外的所有用户信号干扰, 然后对目标用户进行解调。PIC 算法因为不考虑用户功率大小, 一般采用多级检测来消除前一级带来的错误蔓延, 这种干扰消除检测器同样要求扩频码互相关性很弱自相关性很强。

3.2 适应 QPSK-CPM 扩频系统的新型检测算法

如图 5 所示, 假设接收数据有多个附加多普勒频偏的用户信号, 首先对每个用户的功率进行估计, 按照功率大小依次进行排序。对功率最大的用户进行频偏估计与补偿, 频偏估计利用同步字采用频域载波估计方法, 可估计的频率值为:

$$\hat{f} = A_{\max} R_s / 4N \quad (7)$$

式中: A_{\max} 是快速傅里叶变换最大值对应的位置, R_s 是接收信号的符号速率, N 是进行快速傅里叶变换的 4 096 个点。

经过频偏补偿后, 补偿后的信号频率偏移缩减到 R_s/N Hz 以内, 接下来对信号进行解扩解调。其解扩解调原理是利用 CPM 序列的保护间隔不同, 解扩解调后的信息数据是软信息, 包含幅度值和频偏值, 接下来利用导频对信号进行相位追踪, 解 QPSK 映射后的信号就是用户软输出信号。因为软输出信号也附带幅度值和频偏值, 所以重构后的信号也会将用户信号的频偏和功率重新复原, 这样在进行干扰消除时就会把误差传播概率降低, 防止高功率用户信号的幅度和频偏对低功率信号的解调带来较大干扰。最高功率用户信号解调好后, 依次按照功率大小对其他用户进行解调重构消除。这一步骤都是如图 5 中的第一级干扰消除模块内进行的。当所有的信号都被解调、重构后, 送入第二级干扰消除模块。

在第二级干扰消除模块中, 也是依次按照功率大小对用户进行解调。其原理是当解调目标用户 r_i 时, 消除该用户外的所有用户信息, 即:

$$r_i(t) = r(t) - \sum_{k \neq i}^K a_k s_k(t - t_k) e^{j\omega_k t} \quad (8)$$

例如对最高功率用户解调时, 首先消除其他所有的用户信息, 再进行解调重构, 接着按照式(8)对次高功率用户

信息外的用户信息进行消除,然后送入解调重构步骤,接着对下一个用户进行解调。如此操作直至所有用户信息都被解调完成。同时,在第二级干扰消除模块输出时,输出的也是软信息,便于送入解扰码和 Turbo 译码模块进行译码判决。输出的软判决信息如式(9)所示,其中 $\rho_{k,i}$ 是 CPM 扩频码之间的互相关系数。

$$\hat{b}_k = \text{soft} \left\{ \text{sgn} \left[r_i - \sum_{k=i}^K \rho_{k,i} \hat{b}_k \right] \right\} \quad (9)$$

此检测算法针对复杂的 CPM 扩频系统,利用了 CPM 扩频序列保护间隔的不同对多用户信号进行检测。新算法

在第一级增加了 SIC 模块,可以有效地对不同功率目标的用户进行检测,防止由于不同用户功率相差较大对低功率用户解调带来较大干扰。因为 CPM 扩频序列互相关性很强,软信息重构可以有效的消除每个用户之间的多普勒频偏和功率,降低功率和频偏混叠对解扩解调的影响。因为 SIC 只消除比目标用户外高的用户功率信息,这对高功率用户信号来说很容易出现解调错误,因此在 SIC 后加入了第二级干扰消除模块,该模块可以有效解决第一级干扰消除模块中未解调的低功率用户信息的叠加对高功率用户信息解调的影响,提高用户解调性能,把错误蔓延至更小。

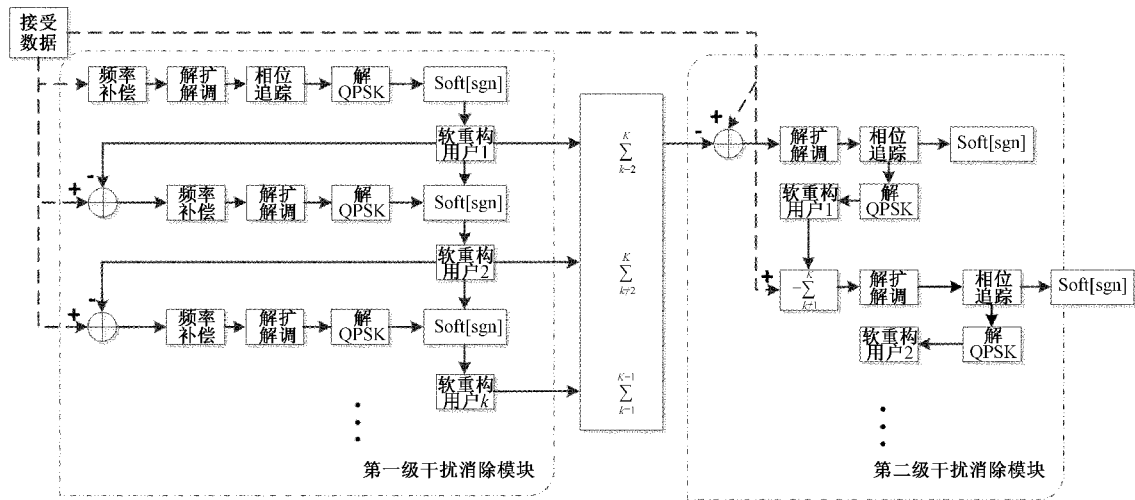


图 5 本文多用户检测算法框图

4 仿真性能分析

为了验证本文所提出检测算法的有效性,对该算法进行了仿真。接收系统框图如图 6 所示,多用户检测器输出软信息,经过去除同步字和导频后,进行软解扰最终送入 Turbo 译码模块进行译码后输出数据, Turbo 译码采用最大后验概率算法^[10]。图 7 是本文检测算法与传统 SIC 和 PIC 的仿真性能比较。本次仿真系统中共有 8 个用户,每个用户的功率差为 1 dB,最高功率用户与最低功率用户之间的功率差为 8 dB,延迟时间差为 0.4 ms,每个用户的频率偏移在 4 kHz 内随机产生。从图中仿真结果可以看出,同一种检测算法,误帧率随着信噪比的增加逐渐减小,但 SIC 和 PIC 对误帧率的影响不是很明显。3 种算法中, PIC 检测器对此系统检测性能最差, SIC 次之,这是因为当用户混叠时, CPM 扩频序列的互相关性很强,不能够满足 SIC 和 PIC 对扩频码的互相关性很弱的要求。本文检测算法对多用户检测的性能最好,当相同误帧率时,本文算法比 SIC 要好约 6 dB(误帧率为 10^{-1})。

根据前文图 4 不同通信船舶数量与用户混叠曲线图,图 8 仿真了使用本文新算法对多用户混叠进行检测,不同船舶数量时不同信噪比的条件下的用户误帧率曲线。该仿真模型中设置每个用户的功率差为 1 dB,延迟时间差为

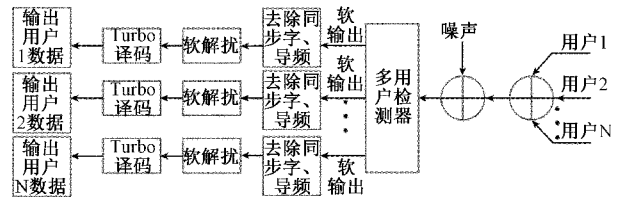


图 6 接收系统框图

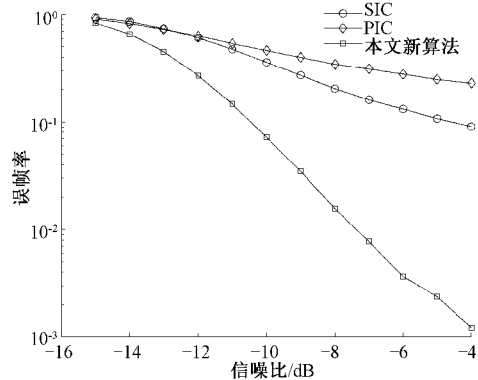


图 7 8 个用户时不同检测算法信噪比与误帧率的曲线图

0.4 ms,多普勒频偏在 4 kHz 内随机产生。从图中可以看到,相同信噪比条件下,实时通信船舶数量增加,误帧率会

升高,这是因为随着船舶数量增加,多个用户发生混叠的概率逐渐变大,从而导致用户检测性能变弱。随着信噪比的升高,实时通信船舶数量一定时,误帧率也会相应的逐渐降低。从图中可以直观的看出,在信噪比为-12 dB时,800艘船舶进行通信时,8个用户内的解帧率也可以达90%(误帧率为 10^{-1})。

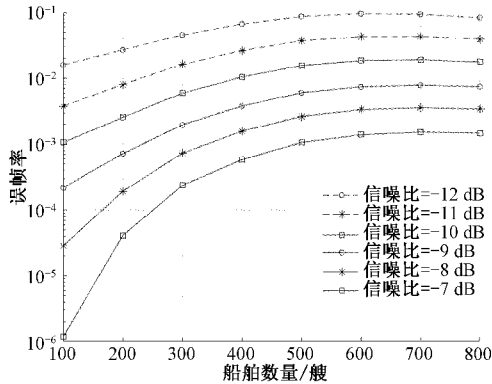


图 8 本文算法不同信噪比下船舶数量与误帧率的曲线图

5 结 论

本文先对 QPSK-CPM 扩频系统调制进行了描述,后建立了多用户数字接收模型。介绍了 SIC 和 PIC 两种通用的多用户检测算法,针对 QPSK-CPM 扩频系统,设计了一种新型的多用户检测算法,建立了系统仿真模型。通过仿真验证,证实了该检测算法对 QPSK-CPM 扩频系统的多用户检测明显优于 SIC 和 PIC,在解帧率性能上具有更好优势。同时,该检测算法能够满足多艘船舶进行实时通信,保障了船舶在海洋作业的需求。

参考文献

- [1] 胡旭,林彬,王珍.基于 VDES 的空天地海通信网络架构与关键技术[J].移动通信,2019,43(5):2-8.
- [2] 李明明,石会鹏,韩锐,等.VDE-SAT 与陆地移动通信系统间同频干扰研究[J].中国无线电,2021(4):38-42.
- [3] LAZARO F, RAULEFS R, WANG W, et al. VHF data exchange system (VDES): An enabling technology for maritime communications[J]. CEAS Space Journal, 2018, DOI: 10.1007/s12567-018-0214-8.
- [4] 王冰.连续相位调制低复杂度解调算法研究[D].成都:电子科技大学,2018.
- [5] 郑洪明,施卫香,毕光国,等.一种应用 CPM 扩频调制的 Turbo CDMA 系统[J].电子学报,2002,30(10):1466-1469.
- [6] COTTAYELLUCCI L, MULLER R R, DEBBAH M. Asynchronous CDMA systems with random spreading—Part I: Fundamental limits [J]. IEEE Transactions on information Theory, 2010, 56(4): 1477-1497.

- [7] COTTAYELLUCCI L, MULLER R R, DEBBAH M. Asynchronous CDMA systems with random spreading—Part II: Design criteria [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(4): 1498-1520.
- [8] MULLER R R. Multiuser detection for continuous phase CDMA[C]. 2011 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, 2011, 9, DOI: 10.1109/APWC.2011.6046787.
- [9] NICOLO M, GIULIO C, STEFANO B. CPM-based spread spectrum systems for multi-user communications [J]. IEEE Trans. Wireless Communications, 2013, 12(1):358-3.
- [10] 范家辉,王建新.VDES 中频偏估计与相位跟踪算法研究[J].电子测量技术,2020,43(23):51-56.
- [11] RALF M, LAME A. Spectral efficiency of random CDMA with constant envelope modulation[J]. AEUE-International Journal of Electronics and Communications, 2011, 65(8):701-706.
- [12] 李可,孙志国,宁晓燕,等.正交调制通信系统对多普勒频移响应分析[J].哈尔滨工程大学学报,2019,40(7):1361-1366.
- [13] 姜春晓,王佳蔚.高动态卫星 DSSS 信号 Turbo 迭代捕获算法[J].通信学报,2021,42(8):15-24.
- [14] 孙佩,袁伟娜,程华.一种新的基于异步 NOMA 的串行干扰消除算法[J].华东理工大学学报(自然科学版),2019,45(5):783-788.
- [15] 赵旦峰,王杨,钱晋希.MIMO 系统中一种改进的迭代串行干扰消除算法[J].信号处理,2012,28(10):1423-1426.
- [16] 黄坤.直接序列扩频系统中多用户检测技术的研究[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [17] 刘松柏.一种提高并行干扰消除算法性能的方法[J].兵器装备工程学报,2018,39(6):171-173.
- [18] 徐伟,许庆帅,国强,等.一种译码纠错反馈的并行干扰消除算法[J].无线电工程,2018,48(8):666-673.
- [19] 王璇,杜军.MAP 译码器的免归一化处理信息更新算法[J].电讯技术,2021,61(10):1238-1242.

作者简介

吴飞宇,硕士研究生,主要研究方向为卫星通信算法、数字信号处理等。

E-mail: feiyu7723@163.com

向前,研究员,主要研究方向为通信算法、数字信号处理等。

E-mail: 53811808@qq.com

张倩武,副教授,主要研究方向为光纤通信,光接入网,数字信号处理等。

E-mail: zhangqianwu@shu.edu.cn

张希岩,硕士研究生,主要研究方向为通信算法,数字信号处理等。

E-mail: zhangxiyan@sast804.com

殷惠惠,中级工程师,主要研究方向为数字信号处理等。

E-mail: 1840513481@qq.com