

# 基于OFDM的星地一体化通信用户接收终端钟差同步校正

罗瑞雪, 李 昱, 王 鑫, 马 冲, 宋广磊

(国网新疆电力有限公司信息通信公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 为了提升星地一体化通信用户接收终端钟差的同步校正准确度, 提出基于正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术的星地一体化通信用户接收终端钟差同步校正方法。解析星地一体化通信过程中相对论效应产生的通信钟差干扰; 根据校正的需求, 求解接收信道的最优方向角, 优化用户接收终端的接收信道; 在此基础上, 结合OFDM信号特点, 根据通信信号的发射周期, 将信号划分为不同的时间窗; 建立同步校正的度量函数, 估计OFDM信号的符号起始位置, 通过预估误差补偿实现了对钟差的同步校正。经过实验测试可知, 应用该方法进行OFDM信号校正处理后, 通信信号波形更加规律; 应用该方法进行钟差校正后钟差值较小, 提升了星地一体化通信用户接收终端钟差同步校正的准确度。

**关键词:** 钟差同步校正; 用户接收终端; 星地一体化; OFDM; 通信时钟; 时钟误差

中图分类号: TM73

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024031

## Clock Synchronization Correction of User Receiving Terminals in Satellite Ground Integrated Communication Based on OFDM

LUO Ruixue, LI Yu, WANG Xin, MA Chong, SONG Guanglei

State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Information and Communication Company, Urumqi 830000, China

**Abstract:** In order to improve the accuracy of clock synchronization correction for the receiving terminal of integrated satellite ground communication users, a clock synchronization correction method for the receiving terminal of integrated satellite ground communication users based on Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technology was proposed. Analyzed the communication clock bias interference caused by relativistic effects in the process of integrated satellite ground communication. According to the calibration requirements, solved the optimal direction angle of the receiving channel and optimized the receiving channel of the user's receiving terminal. Based on this, combined with the characteristics of OFDM signals, the signal was divided into different time windows according to the transmission period of the communication signal. Established a measurement function for synchronous correction, estimated the symbol starting position of OFDM signals, and achieved synchronous correction of clock bias through error compensation estimation. After experimental testing, it was found that applying this method for OFDM signal correction processing resulted in a more regular waveform of the communication signal. After applied this method for clock bias correction, the clock bias was relatively small, which improved the accuracy of clock bias synchronization correction for satellite ground integrated communication user receiving terminals.

**Keywords:** clock offset synchronization correction, user receiving terminal, integration of satellite and ground, OFDM, communication clock, clock error

## 0 引言

星地一体化通信将卫星通信与地面通信融为一体,实现了大范围的高效数据信息传输。然而卫星和用户接收终端之间的路径问题,导致在星地一体化通信的用户接收终端中存在一定的时钟误差<sup>[1]</sup>。在星地一体化通信系统中,时钟误差可能来源于多个方面,包括地面站和卫星之间的相对运动(多普勒效应)、时钟源的不稳定性以及信号传输过程中的时延变化等。基于此,为了实现更优的星地一体化通信,对时钟误差(简称钟差)进行同步校正受到了领域内的广泛关注。对此很多研究人员提出了钟差同步校正方法。

参考文献[2]设计了结合贝叶斯网络以及加权最小二乘法的钟差同步校正方法,分析了通信协议并解析其中影响钟差的强非线性特征,利用解析结果构建贝叶斯网络。通过网络的耦合运算迭代,估计其线性消元系数。结合加权最小二乘法,对特征部分进行闭式定位,从而同步校正相应的钟差。在实际应用中,该方法对特征部分进行闭式定位,难以灵活适应星地一体化通信场景干扰下的时钟误差,影响了校正结果的准确度。参考文献[3]设计了基于神经网络自适应控制的钟差同步校正方法。解析各传输节点之间的理论钟差值,结合传输链路中的时延误差,建立基于卡尔曼滤波的钟差模型。在该模型中添加神经网络自适应控制算法,求解需校正的钟差值。但其应用到星地一体化通信场景中,在卫星信号受到干扰时,依赖输入信号进行优化训练的神经网络的自适应能力将受到严重影响,从而导致钟差同步校正的准确度下降。参考文献[4]设计了基于精确时间协议(Precise Time Protocol, PTP)的钟差同步校正方法。在控制算法的基础上,改进其中的时钟伺服模式,并结合PTP计算通信过程中的网络时间比例系数以及积分系数。在此基础上,求解钟差校正的极限阈值,由此推导出需校正的补偿偏差,实现了钟差校正。PTP对网络环境的要求较高,如果遇到突发的网络拥堵现象,将大幅度降低钟差同步校正的准确度。参考文献[5]设计了基于电力线载波通信协议的钟差同步校正方法。综合分析电力线载波通信协议中的多级中继定时,利用其中的介质层协议,将通信载波扩展为信标帧的数据域。在扩展所得的数据域中分析时钟误差的累积因素。在此基础上通过整合载波信号的采样时间,估计钟差校正的下行逐级校正确认帧,实现对钟差的同步校正。但该方法依赖通信协议而没有根据通信信号的发射周期划分信号时间窗,容易在

星地一体化通信场景中出现误差估计偏差,影响后续校正结果的准确度。参考文献[6]设计了基于分数型锁相环的钟差同步校正方法。采集分析通信数据的时间戳,结合数据时间戳间隔的时钟同步算法,设计相应的高频率分数型锁相环。通过调节锁相环的时钟变量,计算出最优的时钟误差调整参数,以此实现对钟差的同步校正。该方法使用的分数型锁相环的结构相对复杂,往往需要通信路径中多个组成部分的精确配合,如果各部分配合性能不佳,将在很大程度上降低钟差同步校正的准确度。

考虑到上述文献所提出的时钟同步校正方法无法满足当前星地一体化通信场景下时钟同步校正准确度的需求,因此,本文以国网新疆电力有限公司的星地一体化高精度位置服务系统建设实施项目为依托,结合正交频分复用的多载波传输技术,设计了一种基于OFDM的星地一体化通信用户接收终端钟差同步校正方法。该方法通过解析星地一体化的钟差值干扰,优化了接收信号;结合OFDM通信特征,创新性地将计算的通信钟差值整合到划分的时间窗中,以累加后的时间窗作为钟差同步的判决变量,实现了准确度较高的钟差同步校正。

## 1 星地一体化通信用户接收终端钟差同步校正方法设计

### 1.1 星地一体化钟差误差源分析

在星地一体化通信中,钟差的产生有着多种误差源。针对这一问题,本文对造成星地一体化通信用户接收终端钟差的误差源分别进行了解析。

由于卫星相对于地面站以高速运动,卫星上搭载的时钟与地面上的时钟所受到的引力并不相同,产生了相对论效应下的钟差<sup>[7-9]</sup>。针对这一特性,解析相对论效应产生的通信钟差干扰。

计算由相对论效应引起的距离误差,如式(1)所示<sup>[10-11]</sup>

$$\Delta H = -\frac{2\sqrt{bG\epsilon}}{d} \sin \lambda \quad (1)$$

式中, $\Delta H$ 表示距离误差, $\lambda$ 表示卫星的偏近点角, $b$ 表示卫星轨道长半径, $\epsilon$ 表示地球质量, $G$ 表示万有引力常数, $d$ 表示引力波速度。

此外,卫星在太空中将会进行一定的旋转操作,产生载波相位观测的钟差<sup>[12-13]</sup>。针对这一特性,本文计算星地一体化通信中,相位缠绕误差导致的钟差,如式(2)所示

$$\Delta\varphi = Z(d) \arccos\left(\frac{\beta}{|A|}\right) \quad (2)$$

式中,  $\Delta\varphi$  表示相位缠绕误差,  $A$  表示有效偶极向量,  $Z$  表示载波相位观测值,  $\beta$  表示卫星到用户接收终端的单位向量。

在星地一体化通信的过程中, 通信信号的传播将穿过大气环境中的电离层和对流层。在这一过程中, 受到高能粒子等物质的影响, 在用户接收终端将产生一定的钟差。对这一误差源进行计算, 如式 (3) 所示

$$\begin{cases} \Delta\Psi_1 = -\frac{1}{f^2} \int_j N_e dj \\ \Delta\Psi_2 = n_1 \lambda + n_2 \lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\Delta\Psi_1$  和  $\Delta\Psi_2$  分别表示电离层和对流层产生的钟差值,  $j$  表示星地一体化通信在电离层中的传播路径,  $f$  表示信号频率,  $N_e$  表示电离层中的高能粒子密度,  $n_1$  和  $n_2$  分别表示对流层的干延迟和湿延迟,  $\lambda$  表示星地一体化通信在对流层的倾斜路径。

通过上述步骤分析星地一体化通信过程中, 用户接收终端的误差源, 并进行了相应的量化计算。

## 1.2 优化用户接收终端的接收信道

基于上述解析的星地一体化通信钟差干扰与信道传输情况有关, 因此本文对用户接收终端中的通信接收信道进行了优化。

当卫星端广播发射出通信波束后, 定义通信数据的源节点, 以及在用户接收终端中的目的节点。根据连接两个节点与地心之间的三角关系, 从而得到通信信道的最优方向角, 如图1所示<sup>[14-16]</sup>。

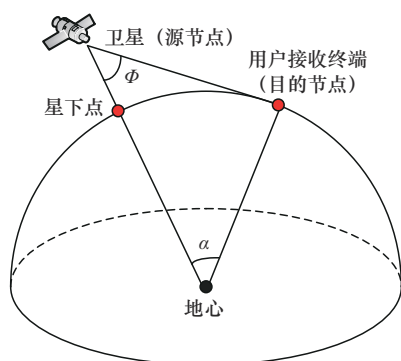


图1 通信信道的方向角示意

利用图1所示的用户接收终端的目的节点与星下点之间的弧线长度, 计算接收信道的圆心角 $\alpha$ , 如式 (4)

$$\alpha = \frac{180l}{\pi R} \quad (4)$$

式中,  $l$  表示弧线长度,  $R$  表示球半径。

在圆心角的弧度范围内, 构建接收信道的中继节点。本文结合余弦定理, 在圆心角的范围内耦合上述计算所得的通信钟差值, 求解接收信道的最优方向角 $\Phi$ , 如式 (5) 所示

$$\Phi = \arcsin\left(\frac{R \sin(180l/\pi R)}{T_H \sqrt{d+R} \cdot T_1 \sqrt{2R \cos \alpha + R^2}}\right) \quad (5)$$

利用求解得到的最优方向角, 筛选出中继节点利用率最大化的接收信道。连接选定的中继节点与源节点、目的节点, 构建用户接收终端的接收信道<sup>[17-19]</sup>。接收信道的表达式如下

$$y = \sqrt{E_0} (d^2 + h^2) X + \left(\frac{nS}{D}\right) \zeta \quad (6)$$

式中,  $y$  表示优化的接收信道,  $E_0$  表示卫星广播通信子载波的最大发射功率值,  $X$  表示目的节点,  $D$  表示源节点,  $S$  表示通信时隙,  $\zeta$  表示加性噪声。

通过上述步骤, 完成在用户接收终端对钟差值的解析, 以及接收信道的优化建立。

## 1.3 针对OFDM同步校正通信接收终端钟差

在优化的用户接收终端接收信道中, 通过解析每个通信信号发射周期的钟差状态, 以卫星地面基准站作为时间校正基准, 利用电力北斗星地一体化高精度位置服务系统的全国参考站网, 针对OFDM同步校正通信信号生成钟差同步校正数。

由于星地一体化通信OFDM信号与传统的单载波信号不同, 容易产生子载波间干扰, 因此需要更精细的钟差同步算法来减少干扰的影响。同时, 钟差同步算法需要确保校正窗口能够准确对齐到OFDM信号符号的起始点。根据以上OFDM信号特点, 本文根据通信信号的发射周期, 将其划分为不同的时间窗。将计算的通信钟差值整合到划分的时间窗中, 并在给定的范围内累加信号的时间窗, 降低载波干扰<sup>[20-22]</sup>。以累加后的时间窗作为钟差是否同步的判决变量, 保证校正窗口能够准确对齐到OFDM符号的起始点。判决变量的定义如式 (7) 所示

$$M = \sum_{i=1}^{L-1} r |B - 1|^2 \quad (7)$$

式中,  $M$  表示判决变量,  $r$  表示累加时间窗范围系数,  $B$  表示时间窗的窗口宽度。

根据定义的钟差同步判决变量, 建立同步校正的度量函数。以判决变量在信号中的最大定时估计点作为函数的零值, 结合计算的通信钟差的指数项, 则同步校正

度量函数的表达式如下

$$W(t) = \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}-1} r(M + \frac{N}{2})^T \quad (8)$$

式中,  $t$  表示通信信号的时间窗节点,  $W(t)$  表示相应时间节点下的同步校正度量函数,  $N$  表示信号符号的开始位置。

在该函数的表达式中添加 OFDM 信号符号, 以地面基准站的时钟零均值作为钟差时间基准进行钟差估计。首先估计 OFDM 信号的符号起始位置, 其中, OFDM 信号符号的表达式如下<sup>[23-26]</sup>

$$s = \begin{cases} \sum_{n=1}^{N-1} x e^{\frac{2\pi(m+N)}{N}}, & M \in N-1 \\ \sum_{n=1}^{N-1} x e^{\frac{2\pi(m-N)}{N}}, & M \notin N-1 \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $s$  表示 OFDM 信号符号,  $x$  表示卫星广播的原始通信信号,  $e$  表示自然常数,  $m$  表示 OFDM 信号循环前缀的采样长度。

将 OFDM 信号符号作为未知数代入同步校正度量函数中, 得到估计的 OFDM 信号符号起始位置。在此基础上, 得到同步校正后的通信信号, 如图2所示。

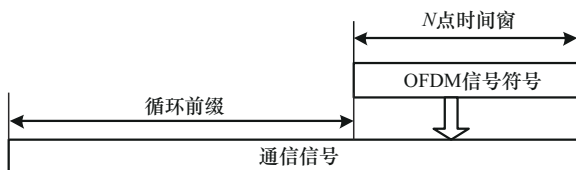


图2 OFDM同步校正信号示意

如图2所示, 通过在原始的星地一体化通信信号的基础上添加融合预估钟差值的 OFDM 信号符号, 得到钟差同步校正后的通信信号。校正后的 OFDM 信号表达式如式 (10) 所示

$$F(t) = I_0 \sum_{k=0}^{N-1} (De^{2\pi f} + X) \quad (10)$$

式中,  $F(t)$  表示同步校正钟差的 OFDM 信号,  $I_0$  表示 OFDM 信号的复包络。

通过上述步骤, 实现基于 OFDM 的对星地一体化通信用户接收终端钟差的同步校正。

## 2 通信钟差校正测试

### 2.1 星地一体化通信

本次测试以国网新疆电力有限公司开展的星地一体化高精度位置服务系统建设实施项目为依托, 对其通信

用户接收终端的钟差进行同步校正测试。

该项目已建成的基准站包含亚米级、分米级、厘米级和后处理毫米级等多个精度。各基准站之间的组网形式如图3所示。

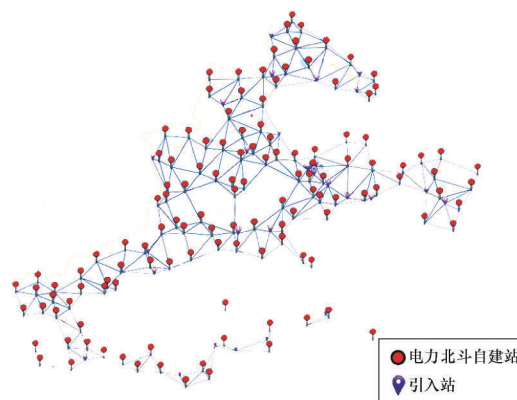


图3 星地一体化通信基准站组网形式

基于如图3所示组网的基准站, 建立星地一体化通信的电力北斗精准服务网。在此基础上, 构建星地一体化通信的服务架构, 如图4所示。

如图4所示, 星地一体化通信采用星上处理模式, 在通信服务架构中, 观测站运维模块、星地一体化服务解算模块以及播发及终端定位模块为通信架构的核心服务模块。以该架构中的观测站运维系统作为星地一体化通信用户接收终端开展钟差的同步校正测试。

### 2.2 接入卫星选择

根据本次测试的需求, 为星地一体化通信服务架构选择合适的接入卫星。

为实现星地一体化增强数据的上行, 本次测试选择中国空间技术研究院设计制造的中星6D卫星接入通信服务架构中。该卫星平台为东方红四号增强型, 以三轴实现卫星稳定, 轨道位置在 125°E。通过双线极化的 Ku 频段覆盖本次测试的通信范围。将该卫星接入星地一体化通信的过程中需要调制解调器等设备, 本次测试所选用的各设备参数见表1。

利用上述参数的设备将选择的中星6D卫星接入通信服务架构中。其中, OFDM 波形相关参数见表2。

在此通信环境下, 对网络用户模块的用户接收终端钟差进行同步校正。

### 2.3 钟差同步校正分析

依托星地一体化通信环境, 采用本文所设计的校正方法对其用户接收终端的钟差进行同步校正。根据本文



图4 星地一体化通信服务网络架构组成

表1 星地一体化通信设备参数

| 设备        | 参数                                                                                                                                                                                | 数量/台 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 服务器       | 12台:8核16 GB                                                                                                                                                                       | 19   |
|           | 3台:2核4 GB                                                                                                                                                                         |      |
|           | 4台:4核8 GB                                                                                                                                                                         |      |
| 调制解调器(网管) | 工作频段:950~1 950 MHz<br>地面接口协议:传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)/互联网协议(Internet Protocol, IP)<br>调制方式:出境支持正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)<br>符号速率:0.3~1 Mbit/s | 1    |
| 调制解调器(业务) | 工作频段:950~1 950 MHz<br>地面接口协议:TCP/IP<br>调制方式:出境支持QPSK<br>符号速率:0.3~1 Mbit/s                                                                                                         | 1    |
| 网管服务器     | 内存:16 GB<br>网络接口:100 M/1000 M传输速率网络接口<br>硬盘控制:支持硬盘阵列<br>电源:双电源<br>输入电压:100~240 VAC, 50/60 Hz                                                                                      | 1    |
| 网络优化设备    | 内存:16 GB<br>网络接口:100 M/1000 M传输速率网络接口<br>硬盘控制:支持硬盘阵列<br>电源:双电源<br>输入电压:100~240 VAC, 50/60 Hz                                                                                      | 1    |
| 交换机       | 包转发率:252 Mbit/s<br>接口类型:支持10/100/1000Base-T以太网端口<br>接口数目:24口<br>传输速率:支持100/1 000 Mbit/s<br>MAC地址表:16 K                                                                            | 1    |

表2 星地一体化通信 OFDM 波形参数

| 参数     | 数值         |
|--------|------------|
| 子载波数量  | 512 个      |
| 符号周期   | 20 $\mu$ s |
| 循环前缀长度 | 1/16       |
| 调制方式   | 16QAM      |
| 子载波间隔  | 15 kHz     |

方法分析星地一体化通信的干扰对通信信号造成的抖动,如图5所示。

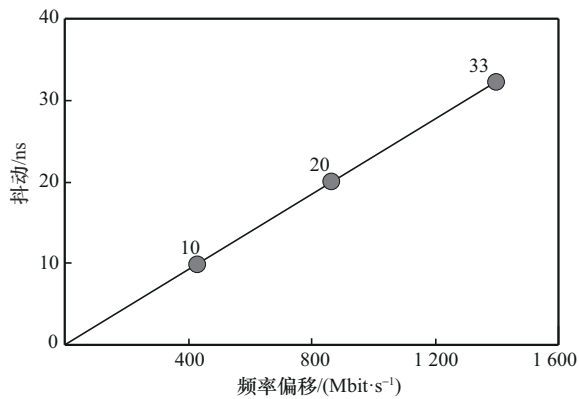


图5 信号干扰抖动

由图5可知,星地一体化通信在用户接收终端中的信号抖动与信号频率偏移参数之间呈线性关系。根据这一特性,采用本文方法对接收终端的通信钟差进行分析,并通过OFDM同步校正通信信号。经校正处理后,通信信号波形如图6所示。

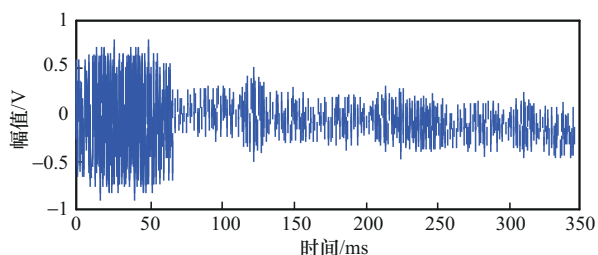


图6 OFDM信号波形

如图6所示,根据本文方法校正后的OFDM信号在信号的首端呈现出星地一体化通信信号的初始波形,信号幅值较为规律,稳定实现了对星地一体化通信的钟差同步校正。

## 2.4 校正准确度分析

采用参考文献[3-5]所提出的钟差同步校正方法作为对照组,与本文方法对比分析在实践应用中的校正准确度。

经过测试,得到不同方法对同一通信场景下的钟差同步校正结果如图7所示。

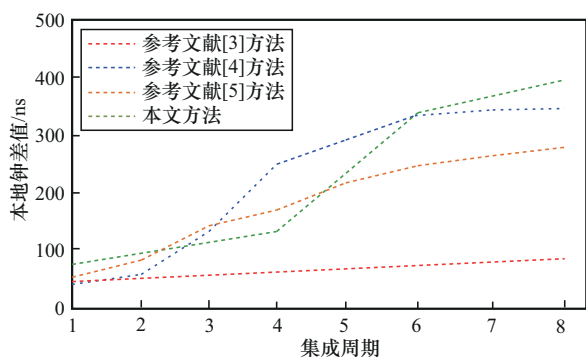


图7 校正后钟差值对比

在本次测试中,通过在用户接收终端测定通信的钟差值来分析各方法的应用性能。分析图7可知,随着星地一体化通信的集成周期不断增加,本文所提方法所表现出的钟差值最小,表明该方法校正后的通信钟差有着大幅度降低。其他几种方法均与本文方法的校正结果有着较大的差距。

由此可见,本文所设计的钟差同步校正方法在星地一体化的实践应用中表现出了准确度和有效性更高的用户接收终端钟差同步校正性能。

## 3 结束语

本文面向星地一体化通信领域用户通信终端存在的钟差问题,设计了基于OFDM的钟差同步校正方法。实

验表明,该方法具有较高准确度的同步校正结果,应用性能良好。

在后续的研究工作中,还需针对星地一体化的通信环境参数进行解析,从而推导出更加精确的钟差值,以便后续的同步校正工作,进而提高星地一体化通信的整体质量。

## 参考文献:

- [1] 李振海,唐金锐,熊斌宇,等.基于新息加权自适应UPF算法的智能变电站PTP主时钟源校准新方法[J].电网技术,2022,46(5): 1662-1671.  
LI Z H, TANG J R, XIONG B Y, et al. A New calibration method of PTP main clock source in smart substation based on innovation weighted adaptive UPF algorithm [J]. Power Grid Technology, 2022, 46 (5): 1662-1671.
- [2] 王鼎,高卫港,聂福全,等.校正源存在下抑制部分同步时钟偏差和传感器位置误差的时差定位闭式解[J].航空学报,2023,44(16): 210-233.  
WANG D, GAO W G, NIE F Q, et al. A closed-form solution for TDOA source localization with calibration emitter in presence of partial synchronization clock biases and sensor location uncertainties [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(16): 210-233.
- [3] 徐顾钰,李岩松,胡杰祥,等.基于RBF-PID的互感器校验主从时钟误差修正算法[J].电子测量与仪器学报,2023,37(11): 152-160.  
XU G Y, LI Y S, HU J X, et al. Error correction algorithm of master-slave clock for transformer calibration based on RBF-PID[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(11): 152-160.
- [4] 程顺岭,李常贤,赵科.基于PTP协议的列车通信网络时间同步优化研究[J].电子测量技术,2022,45(18): 91-98.  
CHENG S L, LI C X, ZHAO K. Research on time synchronization optimization of train communication network based on PTP protocol [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(18): 91-98.
- [5] 王清,荆臻,代燕杰,等.基于电力线载波通信协议的时钟同步方法研究[J].电测与仪表,2022,59(10): 184-190.  
WANG Q, JING Z, DAI Y J, et al. Research on clock synchronization method based on power line communication protocol[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(10): 184-190.
- [6] 张仕奇,田恒.基于分数型锁相环的宽带电力线载波通信时钟同步方法[J].电子测量技术,2022,45(1): 49-55.  
ZHANG S Q, TIAN H. Clock synchronization method of broadband power line carrier communication based on fractional phase locked loop[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(1): 49-55.
- [7] 方子涵,李旦,蒋鹏,等.无线传感器网络中延迟补偿的分布式时钟同步算法[J].仪器仪表学报,2021,42(12): 92-100.

- FANG Z H, LI D, JIANG P, et al. Distributed clock synchronization algorithm for delay compensation in wireless sensor networks[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2021, 42 (12): 92-100.
- [8] 彭逸飞, 涂晓东, 许都, 等. 时间触发以太网与时间敏感网络时钟同步失效对比分析[J]. 电子科技大学学报, 2023, 52 (5): 718-727.
- PENG Y F, TU X D, XU D, et al. Comparative analysis of clock synchronization failure between time-triggered Ethernet and time-sensitive network[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2023, 52 (5): 718-727.
- [9] 朱锦锟, 金添, 唐宇航, 等. 面向多目标多用户的雷达通信一体化恒模波形设计[J]. 电子与信息学报, 2023, 45 (11): 3821-3829.
- ZHU J K, JIN T, TANG Y H, et al. Multi-objective and multi-user radar communication integrated constant modulus waveform design [J]. Journal of Electronics and Information, 2023, 45 (11): 3821-3829.
- [10] 胡泽林, 叶启彬, 黄驿轩, 等. 基于频分多址的多用户OFDM通信雷达一体化方案[J]. 电子科技大学学报, 2023, 52 (2): 196-202.
- HU Z L, YE Q B, HUANG Y X, et al. Multi-user OFDM communication radar integration scheme based on frequency division multiple access[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2023, 52 (2): 196-202.
- [11] 陈永, 詹芝贤, 蒋丰源. 基于卡尔曼滤波的高速铁路时间同步网时间补偿[J]. 铁道学报, 2023, 45 (7): 81-91.
- CHEN Y, ZHAN Z X, JIANG F Y. Time compensation of high-speed railway time synchronization network based on Kalman filter [J]. Journal of Railway, 2023, 45 (7): 81-91.
- [12] 方子希, 李国彦, 吴海燕, 等. 星地一体化网络干扰建模与性能分析[J]. 无线电工程, 2022, 52 (12): 2109-2115.
- FANG Z X, LI G Y, WU H Y, et al. Interference modeling and performance analysis of satellite-ground integrated network[J]. Radio Engineering, 2022, 52 (12): 2109-2115.
- [13] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向6G的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33 (6): 891-901.
- SUN S H, DAI C Q, XU H, et al. Research on 6G-oriented satellite-ground integration networking[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33 (6): 891-901.
- [14] 何琪, 宫在晓, 李风华, 等. 浅海大孔径时钟同步阵列的信道匹配阵形校准[J]. 声学学报, 2023, 48 (1): 5-15.
- HE Q, GONG Z X, LI F H, et al. Channel matching array calibration of weak synchronous array with large aperture clock in shallow water[J]. Acta Acoustica Sinica, 2023, 48 (1): 5-15.
- [15] 胡超, 王潜心. 顾及BDS-3星钟约束的GNSS超快速轨道钟差解算方法[J]. 测绘学报, 2024, 53 (3): 413-424.
- HU C, WANG Q X. Calculation method of GNSS ultra-fast orbit clock error considering BDS-3 satellite clock constraint[J]. Acta Surveying and Mapping, 2024, 53 (3): 413-424.
- [16] 王鼎, 高卫港, 聂福全, 等. 校正源存在下抑制部分同步时钟偏差和传感器位置误差的时差定位闭式解[J]. 航空学报, 2023, 44 (16): 210-233.
- WANG D, GAO W G, NIE F Q, et al. Closed-form solution of TDOA location for restraining partial synchronous clock deviation and sensor position error in the presence of calibration source[J]. Acta Aeronautical, 2023, 44(16): 210-233.
- [17] 冯宇, 王博龙, 程硕, 等. 基于时间敏感网络的变电站通信网络低时延控制方法[J]. 计算技术与自动化, 2024, 43(2): 52-56.
- FENG Y, WANG B L, CHENG S, et al. Low delay control method of substation communication network based on time-sensitive network[J]. Computing Technology and Automation, 2024, 43(2): 52-56.
- [18] 郭仲杰, 许睿明, 程新齐, 等. 面向亿级CMOS图像传感器的高速全并行两步式ADC设计方法[J]. 电子学报, 2023, 51(8): 2067-2075.
- GUO Z J, XU R M, CHENG X Q, et al. Design method of high-speed fully parallel two-step ADC for billion-level CMOS image sensor[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(8): 2067-2075.
- [19] 徐兰生, 张雄. GPS辅助测距下的无线传感器网络时间同步误差分析[J]. 传感技术学报, 2023, 36(9): 1467-1472.
- XU L S, ZHANG X. Error analysis of time synchronization in wireless sensor networks with GPS-assisted ranging[J]. Journal of Sensing Technology, 2023, 36(9): 1467-1472.
- [20] 张万杰, 李宏梅, 李艳, 等. 基于数据多重模糊过滤的电网信号弱区域通信系统设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(18): 183-186.
- ZHANG W J, LI H M, LI Y, et al. Design of weak area communication system of power grid signal based on data multiple fuzzy filtering[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(18): 183-186.
- [21] 李振海, 唐金锐, 熊斌宇, 等. 基于新息加权自适应UPF算法的智能变电站PTP主时钟源校准新方法[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1662-1671.
- LI Z H, TANG J R, XIONG B Y, et al. A new calibration method of PTP main clock source in smart substation based on innovation weighted adaptive UPF algorithm[J]. Power Grid Technology, 2022, 46(5): 1662-1671.
- [22] 罗艳飞, 冯智波, 谭家乐, 等. 基于FPGA的LEO卫星通信大频偏时钟恢复算法设计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(21): 43-48.
- LUO Y F, FENG Z B, TAN J L, et al. Design of large frequency offset clock recovery algorithm for LEO satellite communication based on FPGA[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46 (21): 43-48.
- [23] 习延鹏, 刘剑, 肖楠. 基于MVDR算法的卫星通信地球站天线组阵抗干扰仿真研究[J]. 电光与控制, 2024, 31(6): 47-55.

XI Y P, LIU J, XIAO N. Simulation study on anti-jamming of satellite communication earth station antenna array based on MVDR algorithm[J]. Electro-optic and Control, 2024, 31(6): 47-55.

- [24] 何遵文, 杜川, 张焱, 等. 多场景卫星通信信道动态建模与仿真实现[J]. 电波科学学报, 2023, 38(1): 87-95.

HE Z W, DU C, ZHANG Y, et al. Dynamic modeling and simulation of multi-scene satellite communication channel[J]. Journal of Radio Science, 2023, 38(1): 87-95.

- [25] 李荣春, 周鑫, 王庆林, 等. 基于GPU的卫星通信基带处理高吞吐率并行算法[J]. 计算机工程与科学, 2023, 45(10): 1720-1730.

LI R C, ZHOU X, WANG Q L, et al. GPU-based parallel algorithm for high throughput of satellite communication baseband processing [J]. Computer Engineering and Science, 2023, 45(10): 1720-1730.

- [26] 颜培杰, 储飞黄, 王梦阳. 基于“电磁陷阱”的自适应卫星通信干扰策略[J]. 兵工自动化, 2024, 43(4): 33-39.

YAN P J, CHU F H, WANG M Y. Adaptive satellite communication jamming strategy based on "electromagnetic trap" [J]. Ordnance Automation, 2024, 43(4): 33-39.

#### [作者简介]



罗瑞雪 (1994- ), 女, 本科, 中级工程师, 主要研究方向为电力通信新技术应用。

李昱 (1996- ), 男, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为电力通信新技术应用。

王鑫 (1988- ), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信新技术应用。

马冲 (1993- ), 女, 本科, 中级工程师, 主要研究方向为电力通信新技术应用。

宋广磊 (1990- ), 男, 本科, 中级工程师, 主要研究方向为电力通信新技术应用。