

高精度星地测距的多址干扰并行对消技术

张国亭^{1,2}, 董光亮², 刘保国², 郭永强², 曾富华³

(1 国防科技大学空天科学学院 长沙 410073;

2 北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094;

3 中国西南电子技术研究所 成都 610036)

摘要: 目前, 在航天测控系统中广泛采用扩频体制, 但随着多通道扩频技术和多站测距系统的发展, 测控系统面临的测量环境越来越复杂, 对伪距测量精度产生较大影响。其中, 多站测距系统中存在的强信号干扰和多址干扰, 会导致测距精度下降。本文提出了一种基于并行干扰对消的高精度星地测距技术, 通过信号处理重构和对消接收信号中的干扰信号, 得到纯净的期望信号, 从而抑制码分多址带来的测量误差, 以提升测量精度, 并通过仿真和试验验证了算法的可行性和优越性。

关键词: 高精度测距; 测控系统; 并行干扰对消; 非相干扩频

中图分类号: TN98; V556 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2023)04-0010-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230510003

引用格式: 张国亭, 董光亮, 刘保国, 等. 高精度星地测距的多址干扰并行对消技术[J]. 遥测遥控, 2023, 44(4): 10-15.

High-precision ranging technique based on parallel interference cancellation for TT&C systems

ZHANG Guoting^{1,2}, DONG Guangliang², LIU Baoguo², GUO Yongqiang², ZENG Fuhua³

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;

3. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The spread spectrum technique is widely used in the field of aerospace TT&C systems. However, with the development of multi-channel spread spectrum and multi-station ranging technology, the TT&C systems have large effects on the accuracy of pseudo-range measurements in increasingly complex measurement environment. The strong signal interference and multiple access decline the ranging accuracy in multi-station ranging systems. A high-precision ranging technique based on parallel interference cancellation is proposed. To suppress the measurement errors caused by code division multiple access and improve the ranging accuracy, the multiple access interferences is reconstructed and canceled to obtain pure desired signals. The simulations and experiments verify that the algorithm have superior feasibility and superiority.

Keywords: High-precision ranging method; TT&C system; Parallel interference cancellation; Non-coherent spread spectrum

Citation: ZHANG Guoting, DONG Guangliang, LIU Baoguo, et al. High-precision ranging technique based on parallel interference cancellation for TT&C systems[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(4): 10-15.

引 言

目前, 航天测控系统常用的星地测距方法主要有三种, 即侧音测距、伪码测距以及音码混合测距^[1,2]。伪码测距又分为相干扩频测距和非相干

扩频测距两种体制, 非相干扩频测控体制因其能够通过双向伪距测量实现多目标测控而被广泛应用^[3,4]。在工程设计中, 往往忽略多通道扩频接收信号伪码之间的码分多址干扰, 认为其对应答机进行伪距测量的影响较小^[5]。然而, 随着多通道扩

频技术的发展和多站测距系统的应用,测控通信系统中的干扰已经越来越复杂,对于接收机的伪距测量会造成一定的影响^[6,7]。即使采用优选算法对直接序列扩频码组进行优化,依然会存在相互干扰^[8,9]。特别是在高密度信号环境下,干扰信号的数量和功率都会增加,可能导致伪距误差进一步增大,进而影响定位定轨精度^[10-12]。

在多站测距系统中,一方面测距设备接收到的不同地面站上行信号功率不均衡,可能会存在强信号干扰;另一方面卫星与地面站相对运动会带来多址干扰信号与期望信号频率和相位的随机变化,当频率相干或相位对齐时,多址干扰效应会显著影响测距精度^[13,14]。非相干延迟锁定环鉴相器受多址干扰影响,输出信号会产生明显的扭曲。理论上,当多址干扰信号与期望信号的载波相位差为 0° 或 180° 时,即相位对齐时对码跟踪误差影响最大。对于高精度星载测距设备而言,其伪距测量精度需达到亚纳秒级别,因此多址干扰所引起的测量误差不容忽视。基于此,本文提出一种基于并行干扰对消的高精度星地测距技术,通过消除接收信号中的多路干扰信号,得到相对纯净的期望信号,从而抑制码分多址带来的测量误差,提升测量精度。

1 多址干扰引起的测距误差

多址干扰引起的跟踪误差取决于四个因素:(1)干扰用户与期望用户的信号功率比。干扰信号相对于期望信号的功率越大,跟踪误差越大。(2)延迟锁定环路的早迟相关间隔。相关间隔越窄,跟踪误差越小。(3)期望信号的自相关函数在码片间隔处的相关值。其与自相关峰值差距越小,跟踪误差越大。(4)期望信号与多址干扰的互相关函数在码片间隔处的差值。该差值体现了互相关函数的起伏特性,起伏越大,跟踪误差越大。

根据文献[13],存在多个多址干扰信号条件下,最大跟踪误差 ε 可以表示为:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=2}^K |a_i d_i (s_{k,i} - s_{k-1,i}) d \cos(\theta_i - \theta_1)|}{2a_1 d_1 (1 - r_1)} \quad (1)$$

式中, $d_i \in \{1, -1\}$ 表示第*i*路扩频多址信号的调制数据; a_i 、 θ_i 分别为第*i*路扩频多址信号的幅度和相位值; d 为锁定环的早迟相关间隔; r_1 为期望信号的自相关函数在码片间隔处的相关值; $s_{k,i}$

表示第*i*路扩频码与期望信号扩频码的互相关函数在码片间隔处的取值;整数 k_i 为码片间隔计数值。

下面对某型号非相干扩频应答机的上行测距码进行仿真,通过两组仿真来呈现不同参数设置对伪码跟踪误差的影响。

仿真1参数为:星载设备进行多站同时测距,此时上行信号中有测距1、测距2、测距3、自校4共4个测距信号。其中,测距通道1功率比其他通道小2 dB,码环的超前滞后间距分别设置为1/8、1/4、1/2、1个码片。当测距1信号与其他通道信号的载波相位差为 0° 或 180° ,并且4个通道的频率相同时,测距1的伪码跟踪误差引起的测量误差最大。仿真结果如图1所示。

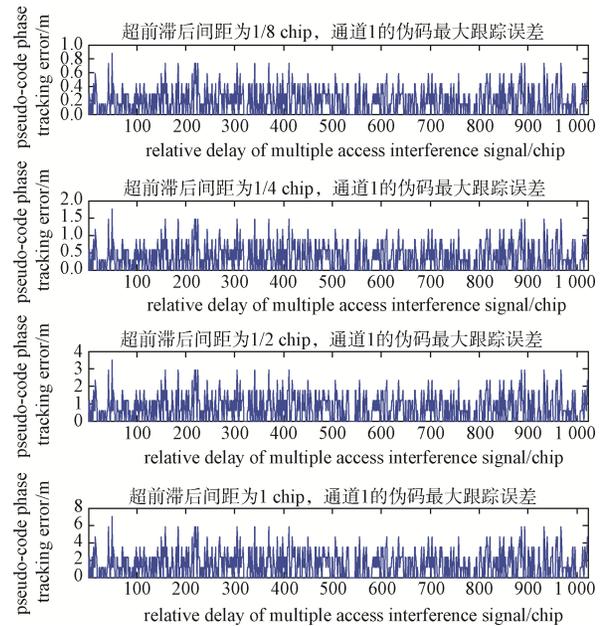


图1 多站多址测距精度仿真图(最差情况下,功率相差2 dB)

Fig. 1 Simulation of ranging accuracy with multiple stations and access (with 2 dB power gap at worst)

仿真2参数为:星载设备进行多站同时测距,此时上行信号中有测距1、测距2、测距3、自校4总共4个测距信号。其中,测距通道1功率与其他通道相等,码环的超前滞后间距分别设置为1/8、1/4、1/2、1个码片。当测距1信号与其他通道信号的载波相位差为 0° 或 180° ,并且4个通道的频率相同时,测距1的伪码最大跟踪误差仿真结果如图2所示。

根据以上对多站多址条件下的测距精度仿真

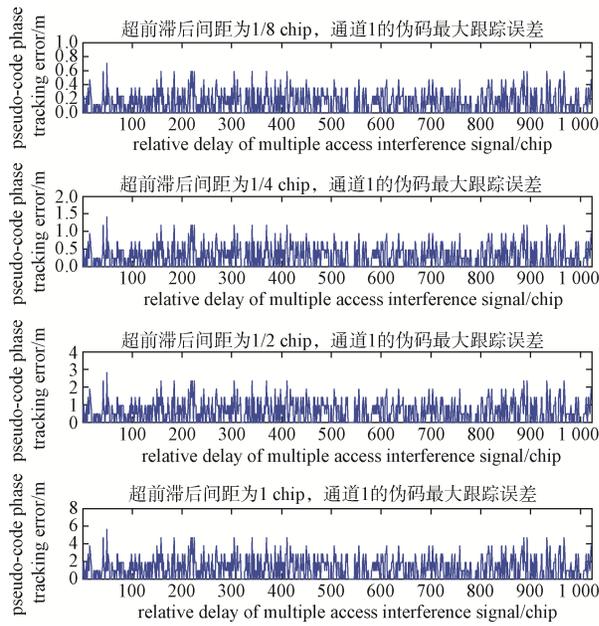


图 2 多站多址测距精度仿真图(最差情况下, 功率相当)

Fig. 2 Simulation of ranging accuracy with multiple stations and access(with equivalent power at worst)

结果表明: 当接收信号中存在多路多址干扰信号时, 每路多址干扰对期望接收信号所造成的影响是独立的, 多路干扰导致的伪码跟踪误差等效于多个单路干扰误差的线性叠加。具体而言, 当干扰信号相对期望信号的载波相位差是慢变量且其值为 0° 或 180° 时, 对期望信号的伪码跟踪产生显著的影响。而当载波相位差为快变量且其变化速率(即载波频差)远大于环路滤波带宽时, 对期望信号的伪码跟踪影响较小。根据仿真结果表明: 多址干扰信号与期望信号的相位差为 0° 或 180° 时, 多址误差达到最大, 然而卫星信号之间的实际相位差是变化的, 不可能恒定保持 0° 或 180° 。由于各站之间的载波相位和码相位是随机的, 出现载波相位差为 0° 或 180° 是小概率事件, 采取更改伪码型和降低码环跟踪带宽等措施也可以在一定程度上抑制多站多址引起的测距随机误差。但这些措施也会不可避免地影响期望信号的质量, 因此有必要通过信号处理技术将多址干扰进一步消除。

2 基于并行干扰对消的高精度测距方法

为了抑制特定频率多址干扰信号对测距信号的影响, 可以采用多相关器技术来减小多址干扰引起的测距误差。常见的多相关器算法包括 ELS

(Early Late Slope, 早晚坡)技术, Double Delta(双三角)技术和高分辨相关器技术等。其中, 高分辨相关器技术采用细时延相关方式提高相位分辨率, 同时为了解决工程应用中环路捕获和跟踪能力问题, 采用粗时延加细时延嵌套处理方式。这种方式在航天测控低信噪比下, 因噪声性能恶化原因一般不使用; Double Delta 技术捕获性能较好, 但是相位分辨率较差。因此, 工程一般采用 ELS 算法, 本文对此进行重点分析。该技术是利用本地扩频码进行线性组合来构造码鉴别器, 并采用传统的伪码跟踪延迟锁定环形式来实现, 可通过增加相关器数量提升对伪码相位误差更高的估计精度^[15-17]。

如图 3 所示为多相关器技术原理图, 其中, E_1 、 E_2 、 L_1 和 L_2 分别代表四个相关器的相关值, 相关峰两侧的坡度可以表示为:

$$S_E = \frac{E_1 - E_2}{d_1}, S_L = \frac{L_1 - L_2}{d_2} \quad (2)$$

因此, 可利用坡度信息对准时码信号的相位进行估计:

$$\varepsilon = \frac{L_1 - E_1 - \frac{d}{2}(S_E - S_L)}{2(S_E + S_L)} \quad (3)$$

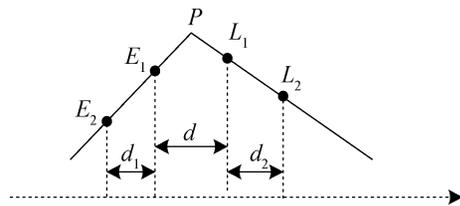


图 3 多相关器技术原理图
Fig. 3 Multi-correlator technique schematic

与多相关器方法不同, 并行干扰对消(Parallel Interference Cancellation, PIC)方法需要用到其他 $K-1$ 路多址信号的相关信息来跟踪每一路信号。PIC 算法的工作原理是: 首先采用传统的相关方法对每一路信号进行初始跟踪, 然后利用初始跟踪结果对每一路信号的基带数据进行重构, 在此基础上计算每路卫星信号的多址干扰分量, 进而通过延时相消扣除这些干扰信号。由于每一路信号的多址干扰分量的计算都与其他 $K-1$ 路信号相关, 因此对所有 K 路信号进行多址干扰重构时需要进行 $K(K-1)$ 路相关运算。

设接收信号表达式如下:

$$R(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{2P_k} a_k(t) \cos(\omega_c t + \theta_k) \quad (4)$$

式中, K 表示 K 路多址扩频信号, P_k 表示第 k 路信号功率, $a_k(t)$ 为第 k 路信号伪码, θ_k 为信号载波相位初值。实现多址信号的重构,即通过估算获得 P_k 、 $a_k(t)$ 、 θ_k 取值的过程。

与ELS等多相关器算法相比,并行干扰对消算法具有更高的复杂度和资源需求;但是,并行干扰对消是一种多址干扰消除算法,相比于多相关器算法的多径抑制能力,其得到的期望信号更为纯净,对测距精度影响更小,具有更良好的实用效果和使用价值^[18,19]。

下面搭建仿真环境来验证并行干扰对消算法的效果,通过仿真地面测距系统和星上应答机系统来构建星地闭环测距场景,模拟信道噪声及多普勒频率参数,地面信号包含应答机下发测量信号和地面系统实时校正标校信号两部分,互为多址干扰。仿真条件设定信号载噪比为 50 dB/Hz。考虑校正信号和测量信号频率相同时影响最大,设定两者载波频率相同;标校信号和测量信号时延按照 1 个码周期变化遍历不同互相关特性下的影响^[20,21]。对于该种情况,采用多相关器算法对测量信号的跟踪测量系统差和随机差进行仿真,结果如图 4 所示。

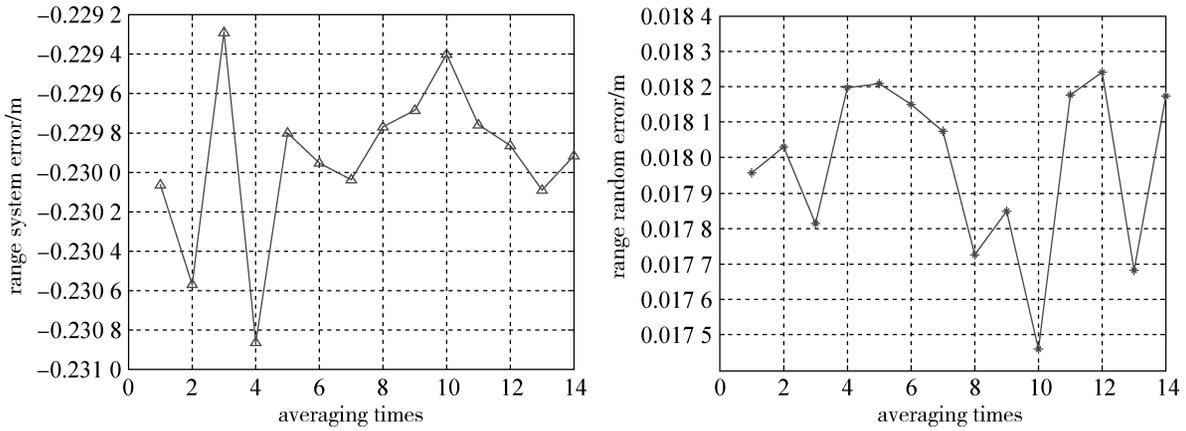


图 4 采用多相关器算法的测距系统差和随机差

Fig. 4 Ranging system error and random error with multi-correlator algorithm

相同条件下,采用并行干扰对消技术重新对测量信号的跟踪测量系统差和随机差进行仿真,结果如图 5 所示。

应用后,测距系统误差由原有的约 23 cm 降低到约 7 mm,精度提高近 2 个数量级,多址干扰明显被抑制,测距精度提升效果明显。

比较图 4 和图 5 可以发现:并行干扰对消技术

综上所述,可以通过以下途径减小多址干扰

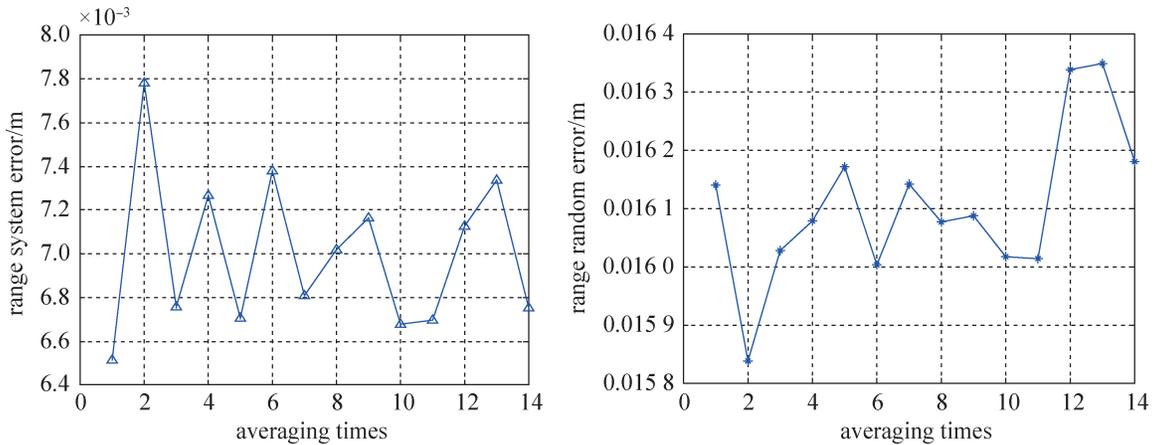


图 5 采用并行干扰对消技术的测距系统差和随机差

Fig. 5 Ranging system error and random error after parallel interference cancellation

对测距的影响: 一是合理配置标校信号和下行信号的比例关系, 根据下行信号的载噪比控制标校信号的载噪比; 二是采用并行干扰对消技术减小多址干扰对标校信号和测控信号影响; 三是合理配置标校信号频率和下行信号频率。通过以上技术可以把多址干扰影响降到最低, 对测距精度的影响控制在厘米量级。

表 1 测距随机误差测试结果
Table 1 Test results of ranging error

| 测量通道 S/Φ /(dB/Hz) | 统计点数 | 遥测测量功率比 | 并行干扰对消前 | | 并行干扰对消后 | |
|------------------------|------|---------|-------------|-------|-------------|-------|
| | | | 均值/m | 方差/mm | 均值/m | 方差/mm |
| 50 | 200 | 4:1 | 4 010.525 1 | 7.5 | 4 010.528 2 | 1.7 |
| | | 1:1 | 4 010.535 3 | 7.3 | 4 010.528 3 | 1.9 |

从上表可以明显看出并行干扰对消算法的优势, 以遥测测量功率比 4:1 为例, 未采用并行干扰对消时的测距误差方差为 7.5 mm, 使用并行干扰对消后的测距误差方差为 1.7 mm。结果表明: 采用基于并行干扰对消的高精度测距技术后, 测距随机误差有明显降低, 验证了该技术的可行性。

4 结束语

本文提出的并行干扰对消技术是一种多址干扰消除算法, 主要思想是通过多个跟踪单元完成对多路信号的初始跟踪估计, 然后对每一路信号的基带数据进行重构, 分解出每路信号中的多址分量, 通过延时相消完成对码分多址干扰信号的消除。仿真与试验结果表明: 与多相关器算法相比, 并行干扰对消在抑制多址干扰、测距系统差等方面具有更优的效果和更高的使用价值。

参考文献

[1] 刘嘉兴. 飞行器测控通信工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
[2] 王琦, 吴斌. 航天测控系统中伪码测距精度分析[J]. 无线电工程, 2009, 39(1): 39-44.
WANG Qi, WU Bin. Analysis on precision of pseudo noise code ranging in space TT&C systems[J]. Radio Engineering of China, 2009, 39(1): 39-44.
[3] 张玉虎. 非相干扩频测控体制的多址干扰效应研究[J]. 上海航天, 2014, 31(5): 31-36.
ZHANG Yuhu. Research on multi-address effect in non-coherent spread spectrum TT&C system [J]. Aerospace Shanghai, 2014, 31(5): 31-36.

3 试验验证结果

利用试验样机, 以某频段为例对基于并行干扰对消的高精度测距技术的性能开展试验验证, 主要实验参数: 测量通道上行频段和下行频段为 S 频段; 码环带宽(双边)为 1.2 Hz; 载波环路带宽(双边)为 200 Hz。测试结果如表 1 所示:

[4] 李常青, 许利, 罗霞. 扩跳频测控系统中非相干测速技术的实现[J]. 无线电工程, 2021, 51(1): 38-43.
LI Changqing, XU Li, LUO Xia. Realization of non-coherent velocity measurement technology in DS/FH hybrid spread spectrum system[J]. Radio Engineering, 2021, 51(1): 38-43.
[5] NEE VAN R D J. Spread-spectrum code and carrier synchronization errors caused by multipath and interference [J]. IEEE Trans on AES, 1993, 29(4): 1359-1365.
[6] 李奇, 徐慨, 杨海亮. 干扰信号检测技术研究[J]. 信息通信, 2018(6): 28-31.
LI Qi, XU Kai, YANG Hailiang. Research on interference signal detection technology[J]. Information & Communications, 2018(6): 28-31.
[7] 张爱民, 王星全, 张德兴, 等. 卫星直扩通信系统干扰检测技术研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(17): 7-9, 14.
ZHANG Aimin, WANG Xingquan, ZHANG Dexing, et al. Research on detection of narrow-band interference in DSSS system of satellite[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(17): 7-9, 14.
[8] 谢超, 焦诚, 王乾. 一种跳时直接序列码分多址导航信号测距码优选方法[C]//第十二届中国卫星导航年会论文集, 2021: 1-6.
[9] 魏子超. 串联扩频多址技术增强方案研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
[10] 楚恒林, 范建军, 张天桥. 多址干扰抑制技术在卫星导航系统的应用研究[J]. 无线电工程, 2015, 45(7): 50-53.
CHU Henglin, FAN Jianjun, ZHANG Tianqiao. Multi-access interference suppression in satellite navigation system[J]. Radio Engineering, 2015, 45(7): 50-53.
[11] 薛敦伟, 李志强, 张北江, 等. 扩频测控系统干扰容限

- 的分析[J]. 遥测遥控, 2011, 32(1): 15-17,21.
- XUE Dunwei, LI Zhiqiang, ZHANG Beijiang, et al. Analysis of jamming threshold for spread spectrum TT&C systems[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2011, 32(1): 15-17, 21.
- [12] 马璇. TDRSS单址链路多址干扰抑制技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [13] 李星, 王飞雪, 欧钢, 等. 卫星导航系统中多址干扰引起的伪码跟踪误差的分析[J]. 信号处理, 2008(5): 885-888.
- LI Xing, WANG Feixue, OU Gang, et al. Study on PN code tracking error caused by multi-user interference in satellite navigation system[J]. Signal Processing, 2008 (5): 885-888.
- [14] 王永民, 苟彦新, 孟相如. 基于干扰抵消的多用户检测[J]. 无线电通信技术, 2004(4): 8-10.
- WANG Yongmin, GOU Yanxin, MENG Xiangru. Multi-user detection based on interference cancellation[J]. Radio Communications Technology, 2004(4): 8-10.
- [15] 李井源, 朱祥维, 王飞雪. 利用多相关器的伪码测距多址干扰抑制算法性能分析[J]. 信号处理, 2014, 30(12): 1510-1516.
- LI Jingyuan, ZHU Xiangwei, WANG Feixue. Performance analysis of multiple-access interference suppression algorithms for PN code tracking using multicorrelator[J]. Signal Processing, 2014, 30(12): 1510-1516.
- [16] 赵宏杰, 李常青, 钟育民, 等. 基于多用户检测的扩频测控多址干扰抑制方法[J]. 遥测遥控, 2017, 38(6): 30-39.
- ZHAO Hongjie, LI Changqing, ZHONG Yumin, et al. Multiuser detection techniques for multiple access interference suppression in spread-spectrum TT&C Systems [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017, 38(6): 30-39.
- [17] 李志舜. 异步CDMA系统多址干扰抑制算法的研究及实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [18] 龙斌, 杨俊武, 王宏伟, 等. 码间多址干扰对三星上升段测控影响分析[J]. 无线电工程, 2020, 50(2): 148-152.
- LONG Bin, YANG Junwu, WANG Hongwei, et al. Analysis of influence of inter-symbol multiple access interference on ascent stage TT&C of three satellites[J]. Radio Engineering, 2020, 50(2): 148-152.
- [19] 操长礼, 汪筱阳, 王小旗, 等. 一种快速自适应干扰抵消的方法研究[J]. 现代雷达, 2022, 44(11): 51-55.
- CAO Changli, WANG Xiaoyang, WANG Xiaoqi, et al. A Study on a fast adaptive interference cancellation method[J]. Modern Radar, 2022, 44(11): 51-55.
- [20] 管吉兴, 鲁振兴, 张焱, 等. 一种低复杂度联合过程估计干扰抵消方法[J]. 无线电工程, 2021, 51(7): 546-550.
- GUAN Jixing, LU Zhenxing, ZHANG Yan, et al. A low complexity joint process estimator for interference cancellation. radio engineering, 2021, 51(7): 546-550.
- [21] 李清伟. 基于波形设计的认知CDMA抗干扰方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

[作者简介]

张国亭 1974年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为航天测控技术。

董光亮 1966年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为航天测控技术。

刘保国 1969年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为航天测控技术。

郭永强 1979年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为航天测控技术。

曾富华 1983年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天测控技术。

(本文编辑: 傅 杰)