

一种基于脉冲前导的数字相控阵距离校零方法

王 威¹, 马雪韵², 任 颖¹, 李智猛¹

(1 北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094;
2 大唐可再生能源试验研究院有限公司 北京 100052)

摘要: 数字相控阵设备使用了高速 AD、FPGA 等大量数字器件, 每次设备上电重启后, 数字器件频率参考时钟的初始相位存在随机性, 由此带来的时延抖动导致设备距离零值发生变化。在工程应用中, 一般会在每次设备上电重启后实施一次系统校零, 以确保测距零值的正确性, 但这一处理无疑增加了系统工作的复杂性。提出了一种通过添加前导脉冲控制实现固定传输时延的方法, 采用该方法后无需每次上电重复实施系统校零, 简化了设备使用模式。仿真测试结果和工程实践验证了方法的有效性。

关键词: 相控阵; 测距; 距离零值; 零值校准

中图分类号: V556; TN821+.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)05-0016-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230510001

引用格式: 王威, 马雪韵, 任颖, 等. 一种基于脉冲前导的数字相控阵距离校零方法[J]. 遥测遥控, 2023, 44(5): 16-21.

A calibration method of ranging zero values based on introducing pulse for the digital array

WANG Wei¹, MA Xueyun², REN Ying¹, LI Zhimeng¹

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;
2. Datang Renewable Energy Test and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100052, China)

Abstract: A large number of digital devices are used for the digital phased array device, such as high-speed AD and FPGA. When the device is powered on or restarted each time, there is randomness for the initial phase of the digital device frequency reference clock, which results in time delay jitter and causes changes of ranging zero values of the device. In engineering applications, a system zero value calibration is usually performed when the device is powered on or restarted each time, it can ensure the accuracy of the ranging zero value. However, this processing undoubtedly increases the complexity of the system work mode. This paper proposes a method to achieve fixed transmission delay by adding preamble pulse control. After adopting this method, it is not necessary to repeat zero value calibration every time the power is turned on, which simplifies the use mode of equipment. The simulation test results and engineering practice have verified the effectiveness of this method.

Keywords: Phased array; Ranging; Ranging zero values; Zero values calibration

Citation: WANG Wei, MA Xueyun, REN Ying, et al. A calibration method of ranging zero values based on introducing pulse for the digital array[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(5): 16-21.

引 言

使用数字相控阵多波束系统实现多目标同时测控, 已逐渐成为测控通信的主流趋势^[1-3]。数字相控阵测距原理是通过目标与数字相控阵设备之间进行双向相干/非相干无线电测距信号的转发与收发时延测量, 并进行距离零值补偿后, 实现目

标与数字相控阵天线相位中心之间的距离测量, 最终根据测距值解算目标位置, 并用于后续的目标设备精密控制^[4,5]。数字相控阵多波束天线包含丰富的微波器件、线缆以及每次开机相位随机分布的多通道数字采样设备, 其中变频器、放大器、衰减器、A/D 等设备, 由于器件不一致性、制造公差、装配误差、环境变化等多种原因, 各通道之

间会出现较大的幅度起伏、相位抖动和时延抖动,而时延抖动会造成数字相控阵系统多通道距离零值的抖动,最终影响测距精度。一般通过偏馈校准^[6]、无线校准^[7-11]等方法对时延进行多通道对齐,但这些方法无法解决设备上电导致的时延不确定性的问题,每次上电都需要进行零值校准,给设备的使用带来了不便^[12-15]。本文提出了一种基于脉冲前导的数字相控阵系统距离零值校准技术,通过前导脉冲控制各通道发射与接收的信号相位并提前校准,可有效抑制距离零值抖动对测距精度的影响。在模拟环境下进行了工程测试与数据分析,分析结果表明采用该方法无需每次上电复位即可满足距离零值校准需求。

1 数字相控阵距离零值

图1所示为典型数字相控阵系统距离校准链路,其中测距基带用于产生上行校准信号 $s_0(t)$,经校准变频器校准功分器进入天线阵元各接收通道,二者统称为校准设备,在工程上有成熟的方案令其获得相对稳定的距离零值,记为 d_i ,校准变频器和校准功分均为射频设备,距离零值较为固定, d_i 可通过矢量网络分析仪测得。 N 个接收通道对校准信号分别进行变频、模数转换后发送到多通道信号合成单元进行数字波束合成,每个接收通道对应的距离零值为 d_i ,数字相控阵系统距离零值为 N 条校准闭环支路合成后的综合距离零值,多通道信号合成后将合成信号发送至测距基带进行距离零值解算,该链路一般采用光纤传输数字信号,记该段距离零值为 d_r 。

校准变频器接收基带校准信号 $s_0(t)$,并上变频到频率 f ,输出射频校准信号 $s(t)$:

$$s(t) = A_0 s_0(t - \tau_0) \exp[j2\pi f(t - \tau_0) + \varphi_0] \quad (1)$$

式中, A_0 、 τ_0 、 φ_0 分别为校准变频器引入的幅度变化、传输延时、相位变化,通常认为是慢变的可测量。

校准功分器对射频校准信号 $s(t)$ 进行功分处理,输出 N 路射频校准信号 $s_i(t)$,经过耦合支路馈入至数字相控阵对应阵元的变频与AD接收支路:

$$s_i(t) = A_i A_0 s_0(t - \tau_0 - \tau_i) \exp[j2\pi f(t - \tau_0 - \tau_i) + \varphi_i + \varphi_0] \quad (2)$$

式中, A_i 、 τ_i 、 φ_i 分别为校准功分引入的幅度变化、传输延时、相位变化,通常认为是慢变的可测量; $i=1, \dots, N$ 。

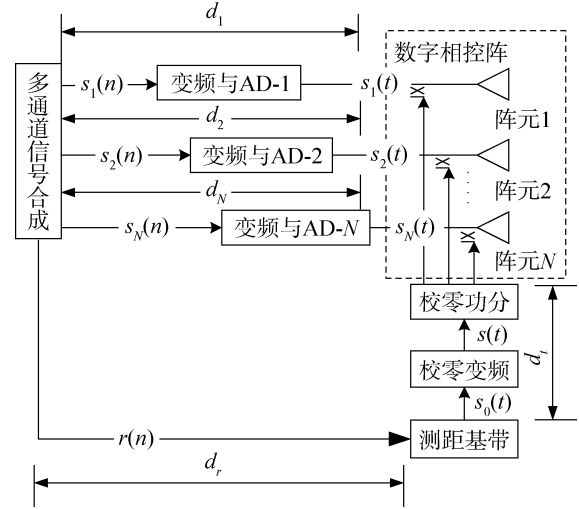


图1 数字相控阵测距原理

Fig. 1 Scheme of digital array ranging

第 i 个阵元的变频与AD接收支路对 $s_i(t)$ 进行变频与AD接收,形成数字域校准信号 $s_i(n)$:

$$s_i(n) = C_i s_0(nT - \tau_i) \exp(j\psi_i) \quad (3)$$

式中,

$$C_i = B_i A_i A_0 \quad (4)$$

$$\tau_i = \tau_0 - \tau_i - \delta_i \quad (5)$$

$$\psi_i = \nu_i + \varphi_i + \varphi_0 - 2\pi f \tau_i \quad (6)$$

其中, B_i 、 δ_i 、 ν_i 分别为第 i 个阵元的变频与AD接收支路新引入的幅度变化、传输延时、相位变化; C_i 、 τ_i 、 ψ_i 分别为第 i 条校准闭环支路的总幅度变化、传输延时、相位变化; $i=1, \dots, N$; T 为采样周期。

结合图1分析可知,数字相控阵系统距离零值应为 N 条校准闭环支路合成后的综合距离零值。为实现 N 条校准闭环支路合成,首先需要对 C_i 、 τ_i 、 ψ_i 进行补偿,即通过通道间均衡对各条校准闭环支路之间幅度/相位/时延不一致性进行检测与补偿,多通道校准合成后的信号送入测距基带,最后由距离零值检测单元完成综合距离零值的检测^[16-19]。

各校零闭环支路之间幅度/相位/时延不一致性的检测通过与测距基带的输出校准信号相关处理来完成:

$$R_{s_i, s_0} = s_i(nT - K) \times s_0(nT) \quad (7)$$

式中: K 为数字延迟量, T 为采样周期; $i=1, \dots, N$ 。

时延 τ_i 检测值为 R_{s_i, s_0} 的最大值匹配,即:

$$\tau_i = \max |R_{s_i, s_0}|_K \quad (8)$$

相位 ψ_i 检测值为 R_{s_i, s_0} 最大值的相位,即:

$$\psi_i = \text{angle}(\max |R_{s_i, s_0}|_K = \tau_i) \quad (9)$$

幅度 C_i 检测值为 Rs_p, s_0 最大值, 即:

$$C_i = \text{amp}(\max |Rs_p, s_0|_{k=s_i}) \quad (10)$$

以阵元数量 30 的相控阵系统实测为例, 未进行上电补偿之前的通道间检测结果如图 2 所示。从图中可以看出, 各通道的幅相时延具有较大的差异。对通道的幅相时延进行补偿后, 消除通道之间的差异, 补偿之后的结果如图 3 所示, 此时通道之间的时延差异小于 3 ns。

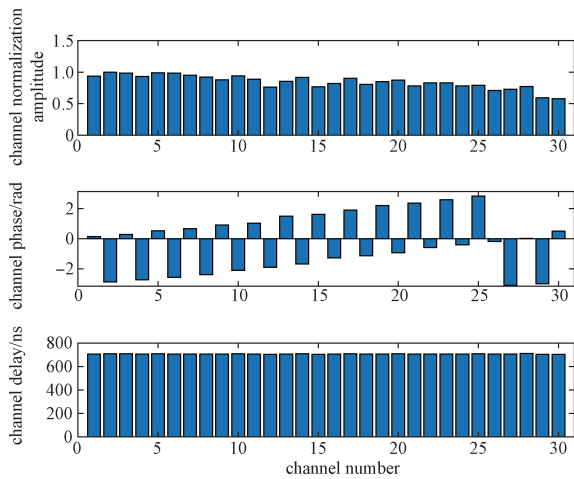


图 2 通道标定之前幅相时延检测结果

Fig. 2 Results of amplitude, phase and time delay of every channel before calibration

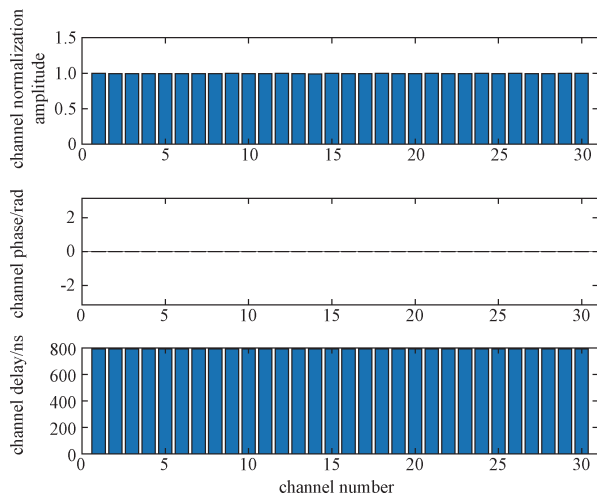


图 3 通道补偿之后幅相时延检测结果

Fig. 3 Results of amplitude, phase and time delay of every channel after calibration

建模仿真与工程实测结果表明, 根据式(7)~式(10)进行各校零闭环支路之间幅度/相位/时延不一致性的检测与补偿, 再进行多通道合成后, 在设备不掉电的条件下可将距离零值的时延检测精

度 $\Delta c_{0-均衡}$ 控制在 $\pm 3\text{ns}$ 以内(对应 $\Delta R_{0-均衡} = 0.9\text{ m}$ 的距离检测精度)。

该方法存在一个问题: 数字相控阵系统接收通道的高速 AD、FPGA 等器件每次上电后时钟相位存在随机性, 带来时延的不确定性, 需每次设备上电都进行测距校零, 给工程应用带来了不便。

2 基于脉冲前导的距离校零方法

数字相控阵设备每次上电重启后, 多个通道的数字器件时钟输出频率参考信号的相位会存在半个周期的随机性, 使收发时延值 $\Delta\tau_0$ 发生变化, 从而导致两次上电的设备距离零值产生随机抖动 ΔR_0 , 影响零值修正的有效性, 最终造成测距精度下降甚至错误。 ΔR_0 与 $\Delta\tau_0$ 关系如下:

$$\Delta R_0 = \Delta\tau_0 \times c \quad (11)$$

$\Delta\tau_0$ 与处理时钟的时钟周期和光纤传输时延抖动相关, 经过对一款实际设备多次上电测试结果表明, 采用常规的 10 MHz 基准, 时延抖动最大值 $\Delta\tau_{0-max}$ 为 48 ns, 即对应最大距离零值随机抖动 $\Delta\tau_{0-max} = 14.4\text{ m}$, 从而会造成测距值 R_i 修正精度急剧下降甚至测距结果错误。

本文提出了一种通过添加前导脉冲来实现固定传输时延的方法, 采用该方法后无需每次上电重新实施系统校零。如图 4 所示, 前导脉冲由测距

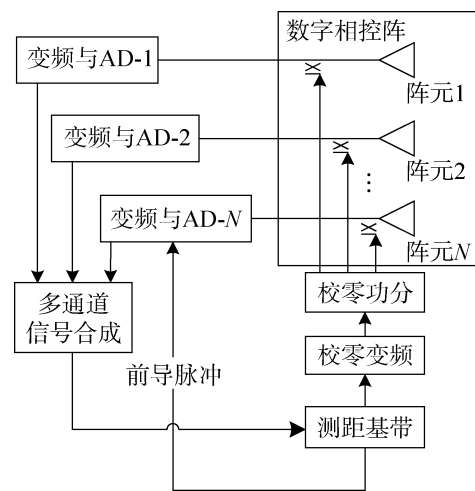


图 4 基于脉冲前导的距离校零方法原理框图

Fig. 4 Scheme of the ranging zero values calibration method based on introducing pulse

基带产生, 距离校零和测距功能在前导脉冲控制下完成。该方法的基本原理在于通过控制相控阵多个通道的 A/D 采样时钟在加去电时初始相位均

与前导脉冲保持同步，不发生随机跳变，在接收端，由基带产生一个与前导脉冲仅存在一定时间延迟的同步脉冲，完成各接收通道数据的初相对齐，从而消除了各通道A/D在加去电时初始相位抖动带来的通道时延抖动。

该方法的具体实现步骤如下。

① 测距基带产生以秒为周期的前导脉冲信号，将该脉冲信号发送给按各AD接收支路，如图5所示。

② 各AD接收支路在前导脉冲控制下定时进行各通道数据成帧与传输，具体是在前导脉冲控制下使用采样时钟与时序控制送来的复位信号同步，保证每次加电时信号时延一致。

③ 测距基带产生与前导脉冲滞后一定时间 T_0 的同步脉冲(T_0 必须大于传输时延)，以同步脉冲为基准完成接收信号的对齐。

④ 对对齐后的信号进行距离校零。

⑤ 完成校零后，在前导脉冲对齐下进行测距。

通过上述处理，可使每次加电时前导距离零值检测、各变频与AD接收支路引入的时延固定，即确保每次设备上电时数字相控阵距离零值固定不变，有效确保数字相控阵测距精度。

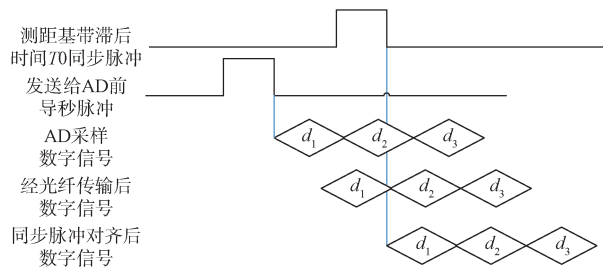


图5 脉冲前导信号对齐时序图

Fig. 5 Sequence diagram of the introducing pulse alignment

3 校准精度分析

综上所述，该方法的校准精度主要由多通道合成的时延补偿精度、前导距离零值检测精度决定。本节通过理论分析和实验仿真对新方法的校准精度进行深入分析。仿真实验设定相控阵天线为30阵元平面阵。系统采用的校零信号调制方式为BPSK，扩频序列为1023码长的PN码，扩频前符号速率为3 kbps。时延检测误差与信号的信噪比相关，通常校零信号信噪比较高，图6仿真了不同

C/N_0 下时延误差与信噪比的关系。可以看到在 $C/N_0 > 50$ dBHz的情况下，多通道合成的时延补偿误差 $\Delta\zeta_{均衡}$ 小于3 ns(对应 $\Delta R_{均衡} = 0.9$ m的距离检测精度)。

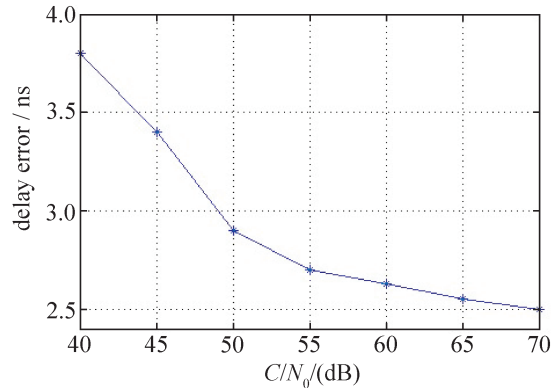


图6 时延补偿误差与信噪比的关系图

Fig. 6 Diagram of the relationship between delay compensation error and signal-to-noise ratio

前导脉冲由数字相控阵系统的10 MHz基准定时产生，图7给出了一个典型的10 MHz基准信号相噪特性^[20]。

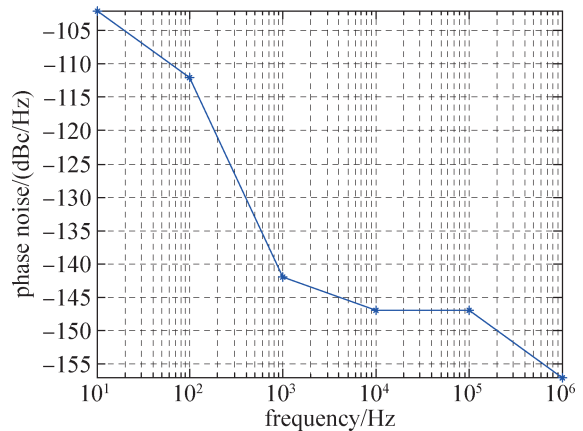


图7 数字相控阵10 M基准信号相噪特性图

Fig. 7 Phase noise characteristic diagram of digital phased array 10M reference signal

设 $(S/N)_0$ 为相噪特性曲线下的面积积分(单位为dBc)，则10 MHz信号主谱对相噪的信噪比 S/N 为：

$$S/N = -(S/N)_0 - 3 \approx 78.4 \text{ dB} \quad (12)$$

10 M基准的相位抖动为

$$\varphi_{抖动} = 10^{-(S/N)/20} \cdot 180/\pi = 0.0069^\circ \quad (13)$$

则10 MHz基准的时间抖动为：

$$\tau_{抖动} = \varphi_{抖动} / 360 \cdot (1/f) = 1.9 \text{ s}^{-1} \quad (14)$$

前导脉冲由该 10 MHz 基准进入数字化终端的倍频等链路产生, 按工程经验其时间控制精度恶化不超过 50 倍, 即:

$$\tau_{\text{前导抖动}} = \tau_{\text{抖动}} \cdot 50 = 95 \text{ s}^{-1} \quad (15)$$

对应距离变化不超过:

$$\Delta R_{0-\text{前导抖动}} = \tau_{\text{前导抖动}} \cdot c = 0.0285 \text{ m} \quad (16)$$

上述分析表明: 引入前导脉冲后可有效解决距离零值随机抖动对测距精度的影响。

从而, 该技术的校准精度为:

$$\Delta R_0 = (\Delta R_{0-\text{合成}}^2 + \Delta R_{0-\text{前导抖动}}^2)^{1/2} = (0.9^2 + 0.0285^2)^{1/2} = 0.9005 \text{ m} \quad (17)$$

在工程实践中构建了相应的模拟测试系统, 并对该方法进行了模拟测试。测试分析结果表明: 多次上电重启后零值校准抖动值 $\Delta R_0 \leq 0.9 \text{ m}$ (考虑到设备测试误差, 该结果与理论分析保持一致), 而不采用该方法的零值校准抖动值最大达到 12 m。因此, 本文方法能有效解决上电带来的零值抖动, 设备上电重启后无需再次进行标校。

4 结束语

数字相控阵设备由于器件不一致性、制造公差、装配误差、环境变化等多种原因, 各通道会出现较大的幅度起伏、相位抖动和时延抖动, 而时延抖动的存在会影响数字相控阵信号测距时多通道距离综合零值抖动, 最终影响测距精度。设备每次重启上电后, 高速串行闭环校零链路传输时延并非恒定值, 会导致测距精度下降甚至测距结果错误。针对该问题, 本文提出了一种通过添加前导脉冲来实现固定传输时延的方法, 仿真测试结果和工程实践验证了方法的有效性。

参考文献

- [1] 王晓波, 王轶, 李铁, 等. 数字多波束相控阵天线在测控系统中的应用研究[J]. 遥测遥控, 2018, 39(1): 35-40.
WANG Xiaobo, WANG Yi, LI Tie, et al. Research on application of digital multi-beam array antenna in aerospace TT&C system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(1): 35-40.
- [2] ZHANG Hongtao, WANG Wei, JIN Mouping, et al. An active phased array antenna for broadband mobile satellite communications at Ka-band[C]//CIE International Conference on Radar (RADAR), 2016: 1-3.
- [3] CHEN Peng, HONG Wei. Research advances in phased array antennas for satellite communications[C]//12th European Conference on Antennas and Propagation, 2018: 1-3.
- [4] 丁溯泉, 房鸿瑞. 伪码测距在深空探测任务中的应用[J]. 遥测遥控, 2012, 33(3): 1-5.
DING Suquan, FANG Hongrui. Application of pseudo-noise ranging in deep space exploration missions[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2012, 33(3): 1-5.
- [5] 陈略, 唐歌实, 韩松涛, 等. 深空测控再生伪码测距技术研究[J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(3): 12-15.
CHEN Lue, TANG Geshi, HAN Songtao, et al. Regenerative PN ranging technology for deep space applications [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2012, 31(3): 12-15.
- [6] 牡丹. 偏馈法距离校零误差校正[J]. 电讯技术, 2015, 55(10): 1152-1156.
DU Dan. Error correction of zero range calibration by feed set-off[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(10): 1152-1156.
- [7] 文龙, 龙斌, 陈颖. 一种无塔校准方法研究[J]. 计测技术, 2007, 27(4): 39-41.
WEN Long, LONG Bin, CHEN Ying. Research on a kind of tower-less calibration method[J]. Metrology & Measurement Technology, 2007, 27(4): 39-41.
- [8] 刘晓, 敦书波, 姜海玲. 一种大型相控阵天线校准方法[J]. 无线电工程, 2021, 51(2): 145-148.
LIU Xiao, DUN shubo, JIANG Hailing. A large phased array antenna calibration method[J]. Radio Engineering of China, 2021, 51(2): 145-148.
- [9] YANG Yinghui, LING Senyin, CHEN Peng, et al. Automatic calibration switch array of phased array antenna [C]//International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2019: 1-3.
- [10] WANG Manlin, CHEN Jienan, TAO Jiyun, et al. Over-the-air antenna array calibration for mmwave hybrid beamforming systems based on monte carlo markov chain method[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(5): 6068-6079.

- [11] GU Qiang, DAI Chengran, ZHANG Chuanfang, et al. Analysis of amplitude-phase error of phased array calibration in mid-field[C]//Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, 2014: 280-283.
- [12] KIM J, TAPLEY B D. Simulation of dual one-way ranging measurements[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2003, 40(3): 419-425.
- [13] MISTRA P, ENGE P, et al. Global positioning system-signals, measurements and performance[M]. Second Edition. USA:Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [14] 吴伟仁,董光亮,李海涛. 深空测控通信系统工程与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- WU Weiren, DONG Guangliang, LI Haitao. Engineering and technology of deep space measurement and control communication system[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [15] 孟泽民,徐兆斌,金小军,等. 微小卫星星间测距在轨零值标定方法及应用[J]. 宇航学报, 2016, 37(10): 1239-1245.
- MENG Zemin, XU Zhaobin, JIN Xiaojun, et al. Zero value calibration method and application for microsatellite inter satellite ranging in orbit[J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(10): 1239-1245.
- [16] 钱晔东. 测控应答机零值测量方法误差研究[D]. 上海: 复旦大学, 2008.
- [17] ELLISON S M, MGHABGHAB S R, NANZER J A. Multi-node open-loop distributed beamforming based on scalable, high-accuracy ranging[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(2): 1629-1637.
- [18] 张家沂. 宽带阵列天线数字波束形成系统设计与研制[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [19] 刘瑞华,董立尧,翟显. 北斗卫星导航系统空间信号用户测距误差计算方法研究[J]. 中国空间科学技术, 2017, 37(4): 41-48.
- LIU Ruihua, DONG Liyao, ZHAI Xian. Research on the calculation method of user ranging error for BeiDou satellite navigation system space signal[J]. China Space Science and Technology, 2017, 37(4): 41-48.
- [20] 陈莉,王跃科,张传胜. 相位噪声引起的双向单程测距误差研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(2): 99-104.
- CHEN Li, WANG Yueke, ZHANG Chuansheng. Research on the phase-noise-induced error in dual one-way ranging[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(2): 99-104.

[作者简介]

- 王 威 1986年生, 硕士, 助理研究员。
马雪韵 1987年生, 本科, 高级工程师。
任 颖 1984年生, 硕士, 助理研究员。
李智猛 1991年生, 博士, 助理研究员。

(本文编辑: 杨秀丽)