

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519099

动态场景下多站时频差定位系统半实物测试方法^{*}

陈云飞 杨光 陈林 郭鸿博 周彬

(中国电子科技集团公司第二十九研究所 成都 610036)

摘要: 针对动态场景下,多观站编队对地表辐射源时差、频差高精度测量和定位的全流程地面内场测试验证难题,提出了一种多站时频差定位系统半实物测试方法。多站编队时频差定位系统与动态场景模拟器、捷变信号发生器、原子钟和系统地检等辅助设备在统一的时频基准和控制指令下协同工作,实现对多站时频差定位系统实装后所面临的时差、频差时变性环境和站间时间同步、频率相参约束条件进行全流程逼真模拟及测试验证。试验结果表明:时差测量精度优于10 ns(r. m. s),频差测量精度优于1 Hz(r. m. s),辐射源距离观测站下点900 km范围内,定位精度优于100 m(CEP)。相比传统外场实装测试,试验时间开销降低约80%,试验成本开销降低约70%,从而极大提升了系统测试效率和测试场景覆盖性,在地面内场实测环境下释放了多站编队协同定位体制的技术和工程风险。

关键词: 动态场景;多站编队;时频差定位系统;半实物测试方法

中图分类号: TN957.2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4020

Semi-physical testing method for multi-station TDOA and FDOA localization systems in dynamic scenarios

Chen Yunfei Yang Guang Chen Lin Guo Hongbo Zhou Bin

(Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China)

Abstract: For the challenges in the ground-based indoor field test and verification of the entire process of high-precision measurement and localization of time difference of arrival (TDOA) and frequency difference of arrival (FDOA) by multi-observation station formations in dynamic scenarios, a semi-physical testing method for multi-observation station localization system of TDOA and FDOA is proposed. The multi-stations localization system of TDOA and FDOA works collaboratively with dynamic scene simulators, agile signal generators, atomic clocks, system calibrations and other auxiliary equipments under a unifield time-frequency reference and control instructions, achieving a full-scale realistic simulation and test verification of the TDOA and FDOA variability environment and inter-station time synchronization and frequency phase consistency constraints faced by the implemented multi-station system. The test result show that the TDOA measurement accuracy is better than 10 ns(r. m. s), the FDOA measurement accuracy is better than 1 Hz(r. m. s), and within a range of 900 km from the radiation source to the observation stations, the localization CEP accuracy is better than 100 meters. Compared with traditional field implementation tests, the test time cost is reduced by approximately 80%, and the test cost is reduced by approximately 70%, thereby greatly improving the system testing efficiency and coverage, and releasing the technical and engineering risks of the multi-station formation collaborative localization system in the ground indoor field measurement environment.

Keywords: motion scenarios; multi-station formations; localization systems of TDOA and FDOA; semi-physical testing method

0 引言

伴随着雷达、通信等辐射源的发展和应用,对辐射源进行发现、分析和监视的手段也应运而生,即为无源侦察^[1-2]。

无源侦察主要包括信号截获与测量、信号分析处理和辐射源定位等技术。其中信号截获与测量是指观测站利用宽频带天线和接收机对信号进行接收和参数测量;信号分析处理主要完成信号调制样式识别、辐射源型号识别、参数估计

收稿日期:2025-06-14

*基金项目:国家自然科学基金联合基金(U21A20455)项目资助

和信号分选等任务; 辐射源定位是指通过单个或多个观测站测量接收到的信号参数以确定辐射源的空间位置。

单站定位的优势在于设备量简单, 无需考虑多站协同定位所需的时间、频率同步和校准策略。文献[3-4]给出了单站干涉仪测向定位方法, 通过二维测向角与地球表面联合解方程实现辐射源高精度定位, 文献[5]提出了一种基于虚拟内插阵列的修正 MUSIC 测向方法, 进一步提升了单站定位空间分辨率。单站定位的劣势在于测向定位通常基线较短, 无法实现广域高精度定位。多观测站协同定位具有瞬时站间长基线(通常为几十公里~百公里)和所需较短的观测时间等特点, 相比单站定位可实现全空域内短时高精度定位。文献[6-14]基于不同观测站数量(双站、三站、多站等)、不同观测站构型、不同辐射源属性(陆地、海面、空中等)和不同定位观测量(时差、频差等)及其组合形式进行定位性能分析。其中, 三站协同定位具有构型简单、共视良好和定位解算方便等优点在工程中应用最广泛。三站时差定位具有运算量小、全空域可定位等优点, 但某些特定信号(如窄带连续波)时差测量精度较低, 且时差定位体制在远区的定位精度退化较为严重, 同时定位精度与观测站构型紧密相关。多普勒频差的引入有助于提升多站远区定位精度, 且其对观测站构型不敏感, 因此基于时差和频差的多观测量融合定位体制可有效确保全空域高精度定位。

随着多站无源定位系统的科研实验和装备试验需求的不断增加, 一般采用外场实装试验的方式进行, 不仅需要花费大量的人力、物力等试验保障, 同时外场试验受气象条件、空间有意无意等电磁干扰环境的影响较大, 试验效率较低, 甚至导致试验结果不及预期。多观测站运动场景下, 需解决多站间和站地之间的时间同步问题, 文献[15]提出了一种硬件同步和软件触发相结合的同步方法, 确保双星在同一时间基准下同步工作。文献[16]提出了一种有效载荷地面测试系统星地时间同步方法, 利用测试局域网中卫星遥测帧广播的频率实现了星地时间同步。对于空间快速运动的多观测站, 时差和频差等观测量呈现时变特性, 而通常时差和频差的高精度测量均需通过百毫秒~秒级信号积累, 若不进行时变性补偿, 将无法获得高精度测量结果, 文献[17]分析了频差估计精度的衰减因子及最优积累时间, 在此基础上提出一种时变补偿的时频差估计方法。文献[18]分析了观测站运动特性对时差、频差时变性影响, 提出了一种基于最小二乘快速补充时差测量方法和基于高阶差分观测量补偿的改进互模糊函数频差测量方法。常规静态测试场景不具备时差和频差的时变性模拟能力, 无法实现对时差、频差测量和定位的全流程测试验证。因此需要将观测站或辐射源搭载于运动平台之上进行试验, 进一步增加了外场试验的难度。

文献[19-20]提出利用计算机模拟时差定位场景, 计算辐射源脉冲到达各个观测站的空间传输时间差, 将其转化成脉冲向各个站发送的延时, 精确控制辐射源信号注入各

站的时间, 实现多站无源定位试验场景和辐射源模拟, 但该方法模拟场景为静态场景, 因此无法模拟各站与辐射源之间的多普勒频率, 不适用于多站时差和频差的融合定位场景, 同时该方法没有考虑运动场景下时差和多普勒频差的时变性, 导致其测试场景无法反映多站时频差定位面临的真实信号环境。

动态场景下多观测站时差、频差高精度测量和辐射源定位全流程地面内场测试验证难题, 目前尚无公开文献开展相关研究, 本文提出了一种运动场景下多站时频差定位系统半实物测试方法, 实现在内场环境下模拟观测站运动场景和观测站接收的辐射源射频信号, 并以雷达辐射源信号为例, 对多站时差、频差测量和定位的全流程进行测试验证。

1 多站时频差定位系统原理

以典型三站时频差定位系统为例, 假设在某一时刻, 如图 1 所示, 3 个观测站对地面辐射源目标信号进行接收处理, 3 个观测站位置矢量为 $\mathbf{p}_m = [x_m, y_m, z_m]^T, m = 0, 1, 2$ 。辐射源的位置矢量为 $\mathbf{p} = [x, y, z]^T, \mathbf{v}_m = [v_{xm}, v_{ym}, v_{zm}]^T, m = 0, 1, 2$, 辐射源的速度矢量为 $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z]^T$ 。

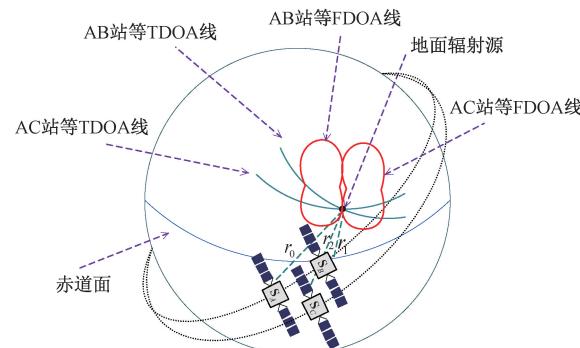


图 1 三站时频差定位模型

Fig. 1 Three-station localization model of TDOA and FDOA

1.1 运动场景时差、频差测量时变性分析

根据图 1 所示模型, 以 A 站为主站, B、C 站为副站, 各站与辐射源的距离和径向速度分别为 r_m 和 $v_m, m = 0, 1, 2$, 副站与主站之间时差、频差、距离差、径向速度差和径向加速度差分别为 $\tau_{m,0}, \Delta f_{dm,0}, \Delta r_{m,0}, \Delta v_{m,0}$ 和 $\Delta a_{m,0}, m = 1, 2$ 。定义信号载频为 f_c , c 为光速。对于时差测量, 速度差时变性影响较大, 需考虑其时变性补偿, 加速度差时变性影响极小可忽略; 对于频差测量, 速度差和加速度差时变性影响均较大, 因此均需考虑其时变性补偿^[18]。

推导得到运动场景下时变的时差和频差为:

$$\tau_{m,0}(t) = \frac{r_m(t) - r_0(t)}{c} = \frac{\Delta r_{m,0} + \Delta v_{m,0}t}{c} \quad (1)$$

$$\Delta f_{dm,0}(t) = f_c \times \frac{v_m(t) - v_0(t)}{c} = f_c \times \frac{\Delta v_{m,0} + \Delta a_{m,0}t}{c} \quad (2)$$

1.2 辐射源分选、关联跟踪方法

1) 多辐射源分选方法

观测站侦收多个辐射源信号脉冲序列通常呈现时频域交错混叠分布特征,信号特征可能呈现参数相近甚至相同的情况,仅仅基于信号参数难以实现多辐射源有效区分。本文基于观测站两两之间的时差测量值将不同辐射源进行区分,从而将不同辐射源信号从交错的脉冲列中分选出来。时差分选的基本流程如图 2 所示。

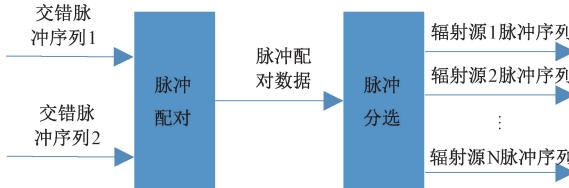


图 2 多辐射源信号分选流程

Fig. 2 Signal sorting process for multi-radiation sources

观测站脉冲序列分别在时差窗内进行脉冲配对,并基于配对结果进行脉冲分选。脉冲分选输出辐射源信号数量和每部辐射源对应的脉冲列。然而,在复杂的电磁环境中,存在多种类型的辐射源。这些辐射源脉冲序列之间相互配对,使得脉冲分选中存在真实时差峰、虚假时差峰和噪声时差峰。脉冲分选算法需消除噪声和虚假时差峰的影响,准确地检测真实时差峰的数量,并从中提取出对应的脉冲列。

2) 多辐射源关联跟踪方法

多辐射源关联跟踪方法如图 3 所示。本文基于椭圆跟踪门的航迹分裂法构建最大似然函数进行航迹关联。若似然函数的值小于一定的阀值,则删除该航迹,定位输出置信度 p_m ,则当前时刻的航迹置信度如下:

$$p_k^{(n)} = \begin{cases} 1 - (1 - p_{k-1}^{(n)})p_m, & \text{第 } k \text{ 次关联上第 } m \text{ 个测量} \\ \alpha p_{k-1}^{(n)}, & \text{第 } k \text{ 次未关联上第 } m \text{ 个测量} \end{cases} \quad (3)$$

其中遗忘因子 $0 < \alpha < 1$,例如取 $\alpha = 0.9$,其意义在于若本次数据有更新,其置信度会上升;若没有更新,其置信度将下降。

本文基于经典卡尔曼滤波跟踪算法属于成熟算法,不再赘述。

1.3 多站时频差定位方法

根据时差和频差测量的结果,主站与各副站之间分别构建等时差和等频差方程,结合地球表面约束方程,构成包含 $2M-1$ 个方程的时频差定位方程组,基于多站时差、频差融合定位方法,计算得到辐射源定位结果。

同理选定第 A 站为主站,B、C 站为副站,副站与主站之间时差、频差、距离差、径向速度差、距离差变化率分别为 $\tau_{m,0}, \Delta f_{dm,0}, \Delta r_{m,0}, \Delta v_{m,0}$ 和 $\Delta \dot{r}_{m,0}, m=1,2$ 分别表示副站 B 和 C,定义 c 为光速, λ 为信号波长,其中 e 为地球第一偏心率, N_r 为地球卯酉曲率半径, h 为辐射源高度, $\dot{r}_m, m=0, 1, 2$ 为 r_m 的一阶导数,即距离变化率,进而三站时频差定位

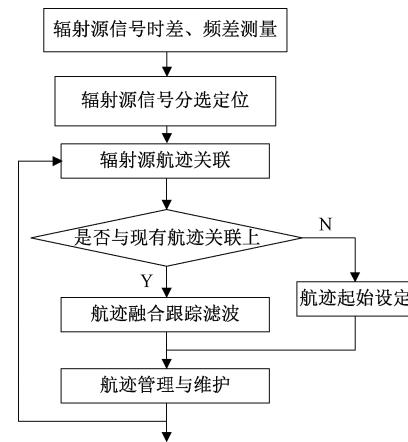


图 3 多辐射源关联跟踪处理流程

Fig. 3 Illustration of pulse pairing and TDOA histogram

方程组如式(4)所示,通过求解方程组得到辐射源的位置 \mathbf{p} ;其中,上角标“T”表示转置。

$$\left. \begin{aligned} \Delta r_{1,0} &= r_1 - r_0 = \| \mathbf{p} - \mathbf{p}_1 \| - \| \mathbf{p} - \mathbf{p}_0 \| = \tau_{1,0}c \\ \Delta r_{2,0} &= r_2 - r_0 = \| \mathbf{p} - \mathbf{p}_2 \| - \| \mathbf{p} - \mathbf{p}_0 \| = \tau_{2,0}c \\ \Delta \dot{r}_{1,0} &= \dot{r}_1 - \dot{r}_0 = \frac{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_1)^T (\mathbf{p} - \mathbf{p}_1)}{r_1} - \\ &\quad \frac{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_0)^T (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)}{r_0} = -\lambda \times \Delta f_{d1,0} \\ \Delta \dot{r}_{2,0} &= \dot{r}_2 - \dot{r}_0 = \frac{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_2)^T (\mathbf{p} - \mathbf{p}_2)}{r_2} - \\ &\quad \frac{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_0)^T (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)}{r_0} = -\lambda \times \Delta f_{d2,0} \\ &\quad \frac{x^2}{(N_r + h)^2} + \frac{y^2}{(N_r + h)^2} + \frac{z^2}{[N_r(1 - e^2) + h]^2} = 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

时差、频差观测量及地球约束方程的数学表达式可表示为:

$$\left. \begin{aligned} f_1(\mathbf{p}) &= \| \mathbf{p} - \mathbf{p}_1 \| - \| \mathbf{p} - \mathbf{p}_0 \| - \tau_{1,0}c \\ &\dots \\ f_{N-1}(\mathbf{p}) &= \| \mathbf{p} - \mathbf{p}_{N-1} \| - \| \mathbf{p} - \mathbf{p}_0 \| - \tau_{N-1,0}c = 0 \\ f_N(\mathbf{p}) &= \frac{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_1)^T (\mathbf{p} - \mathbf{p}_1)}{r_1} - \frac{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_0)^T (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)}{r_0} + \\ &\quad \lambda \times \Delta f_{d1,0} \\ &\dots \\ f_{2N-2}(\mathbf{p}) &= \frac{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_{N-1})^T (\mathbf{p} - \mathbf{p}_{N-1})}{r_2} - \\ &\quad \frac{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_0)^T (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)}{r_0} + \lambda \times \Delta f_{dN-1,0} \\ f_{2N-1}(\mathbf{p}) &= \frac{x^2}{(N_r + h)^2} + \frac{y^2}{(N_r + h)^2} + \\ &\quad \frac{z^2}{[N_r(1 - e^2) + h]^2} - 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

定义 $\mathbf{F}(\mathbf{p}) = [f_1(\mathbf{p}), \dots, f_N(\mathbf{p}), \dots, f_{2N-1}(\mathbf{p})]^T$, 构造代价函数的可表示为:

$$\varphi(x, y, z) = \sum_{i=1}^{2N-1} f_i(\mathbf{p}) = \mathbf{F}^T(\mathbf{p}) \mathbf{F}(\mathbf{p}) \quad (6)$$

式(6)将定位问题转化为求解代价函数最小值问题, 若 $\mathbf{F}(\mathbf{p})$ 可微, 多元函数求梯度在最小值处满足式(7)。

$$\nabla \varphi(x, y, z) = 2\mathbf{F}'(\mathbf{p})^T \mathbf{F}(\mathbf{p}) = 0 \quad (7)$$

将 $\mathbf{F}(\mathbf{p})$ 在 \mathbf{p}^k 处作一阶 Taylor 级数展开:

$$\mathbf{F}(\mathbf{p}) = \mathbf{F}(\mathbf{p}^k) + \mathbf{F}'(\mathbf{p}^k)(\mathbf{p} - \mathbf{p}^k) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得到基于最小二乘(LS)算法的辐射源位置迭代方程:

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k - [\mathbf{F}'(\mathbf{p}^k)^T \mathbf{F}'(\mathbf{p}^k)]^{-1} \mathbf{F}'(\mathbf{p}^k)^T \mathbf{F}(\mathbf{p}^k)^T \quad (9)$$

其中, 方程迭代更新方向与代价函数的梯度值有关, $\mathbf{F}'(\mathbf{p}^k)$ 即为距离差、距离差变化率和地球约束方程组 $\mathbf{F}(\mathbf{p})$ 的第 k 次迭代雅克比矩阵。在求解非线性方程组过程中需要满足 $\mathbf{F}'(\mathbf{p}^k)^T \mathbf{F}'(\mathbf{p}^k)$ 矩阵可逆, 由于该方程为非正定矩阵, 需要求解 $\mathbf{F}'(\mathbf{p}^k)^T \mathbf{F}'(\mathbf{p}^k)$ 的广义逆矩阵。辐射

源位置 \mathbf{p}^k 初始值基于经典 Chan 法三站时差定位初始值 $\mathbf{p}_{ini} = [x^0, y^0, z^0]^T$ 。直至 $|\mathbf{p}^{k+1} - \mathbf{p}^k| < \epsilon$, 迭代停止, 得到的 \mathbf{p}^{k+1} 即为辐射源真实位置的最优估计值, ϵ 表示任意小门限值, 为增强算法鲁棒性, 同时设置最大迭代次数 M , 当迭代次数大 $> M$ 时, 迭代强制停止, 此时得到 \mathbf{p}^M 即为最终辐射源位置最优估计值。

试验数据表明: 多站时频差定位解算迭代次数, 由传统假定观测站下地球投影点初值的方法的 20 次以上, 降低为本文方法的 5~6 次以内, 大大提高了算法收敛速度和工程可实现性。

1.4 处理资源及时效性分析

基于一块高性能通用数字处理板开展不少于 250 个辐射源时差、频差测量及定位算法实时处理能力分析。数字处理板主要处理器包括一片 V7-FPGA、两片 DSP 6678 和四片 DDR 等高性能处理芯片, 处理流程如图 4 所示, 三站时差、频差测量及定位处理流程按照秒节拍实时流水处理, 处理时延约为 4 s。

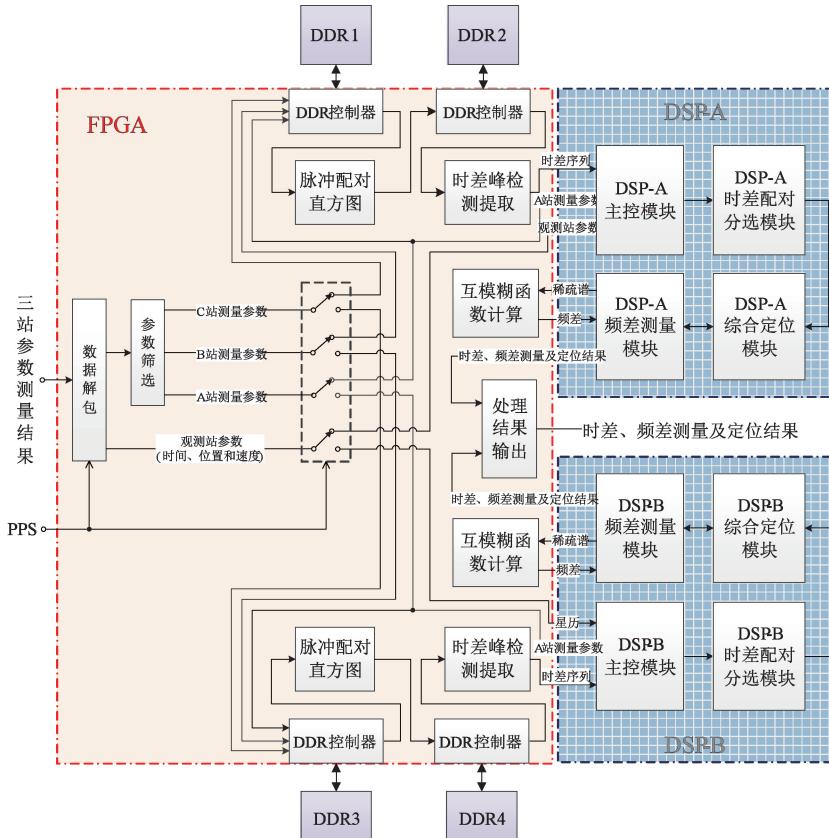


图 4 三站时频差测量、定位实时处理流程

Fig. 4 TDOA and FDOA measurement and localization processing procedure of three-station

2 多站时频差定位内场半实物测试方法

以典型三站时频差定位系统为例, 三站时频差定位系统动态场景内场半实物测试框图如图 5 所示, 包括多站时频差定位系统、动态场景模拟器、原子钟、捷变信号发生器

和系统地检设备。

2.1 多站时频差定位系统

多站时频差定位系统包括 1 个主站和 M 个副站, $M \geq 2$ 。以三站时频差定位系统为例说明, 即包括 1 个主站和 $M=2$ 个副站。

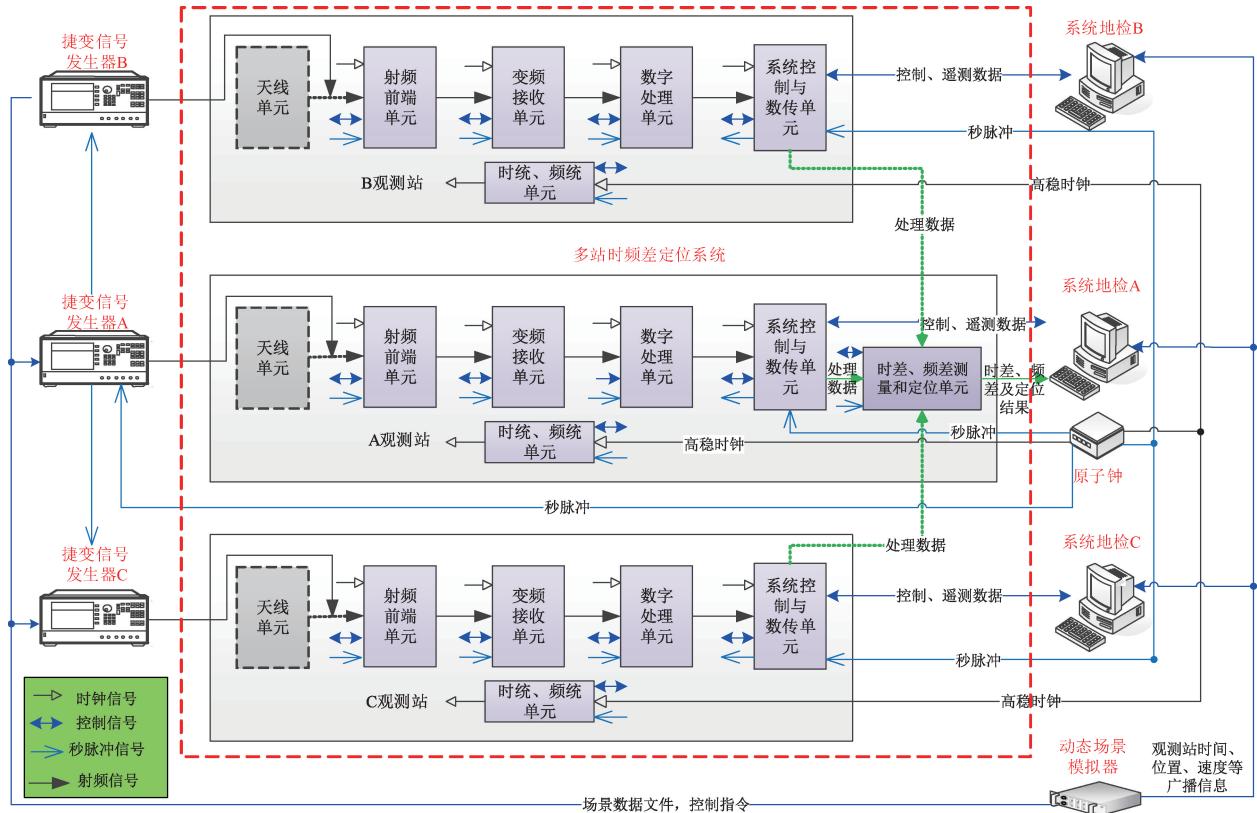


Fig. 5 Semi-physical test block diagram of three-station localization system of TDOA and FDOA in dynamic scenarios

如图 5 所示, 主站和副站均包括对应的射频前端单元、变频接收单元、数字处理单元、系统控制与数传单元和时统/频统单元, 主站还包括时差/频差测量及定位单元; 辐射源发出的射频脉冲信号从主站和副站的射频前端单元注入, 经射频前端单元进行信号放大、滤波后, 输入至变频接收单元进行下变频, 再由数字处理单元完成模数转换和信号处理, 生成 PDW 和频域稀疏谱数据, 从系统控制与数传单元输出, 再通过站间数传链路汇集至时差/频差测量及定位单元完成时差提取、频差提取以及时频差定位解算, 所得辐射源定位结果通过观测站与地面接收站之间数传链路传输至系统地检设备进行显示和定位精度分析; 时统/频统单元在原子钟的驱动下保证主站和副站的时间和频率同步。

2.2 动态场景模拟器

本文提出了一种定制化动态场景模拟器, 实现对运动场景下多站截获辐射源信号进行模拟。根据输入的主站和副站的位置矢量、速度矢量和加速度矢量和辐射源的位置矢量, 辐射源参数(幅度、脉宽、信号载频、到达时间等), 基于动态场景下多站截获信号模型, 模拟生成多站脉冲序列文件以及场景开关控制指令, 并根据 IP 地址发送至主站和副站对应的捷变信号发生器。

推导动态场景下多站截获信号模型如式(10)、(11)所

示, 本文开发场景模拟软件界面如图 6 所示。

$$X_m^n(f_m) = S(f_m) \exp(-j2\pi f_m r_m(t_n)/c) \exp(j2\pi f_m toa_m^n) \exp(-j\varphi_m), m = 0, 1, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中: $m = 0$ 表示 $M + 1$ 个观测站中主站的编号, $m = 1, 2, \dots, M$ 表示 $M + 1$ 个观测站中副站的编号; N 为射频脉冲信号的最大脉冲序号; $f_m = f + f_{dm}$ 为第 m 个观测站接收到的信号频率, f 为信号载频, f_{dm} 为第 m 个观测站的多普勒频率; $S(f_m)$ 为频率 f_m 下的幅度包络; t_n 为射频脉冲信号中第 n 个脉冲发出对应的时刻; $X_m^n(f_m)$ 为 t_n 时刻下第 m 个观测站截获的信号矢量; toa_m^n 为第 n 个脉冲到达第 m 个观测站的时刻, 由输入的射频脉冲信号、第 m 个观测站的位置矢量和辐射源的位置矢量解算得到; φ_m 为 m 个观测站截获第 1 个脉冲时所得相位。

$$r_m(t_n) = r_m^1 + v_m^n t_n + \frac{a_m^n t_n^2}{2}, m = 0, 1, \dots, M, \quad (11)$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

式中: $r_m(t_n)$ 为 t_n 时刻下第 m 个观测站与辐射源的距离; r_m^1 为 m 个观测站截获第 1 个脉冲时刻时与辐射源的距离, 由输入的第 m 个观测站的位置矢量和辐射源的位置矢量解算得到; v_m^n 为 t_n 时刻下第 m 个观测站与辐射源之间的径向速度, 由输入的第 m 个观测站的位置矢量、速度矢量以及辐射源的位置矢量解算得到; a_m^n 为 t_n 时刻下第 m 个



图 6 三站时频差定位系统动态场景模拟器界面

Fig. 6 The dynamic scene simulator interface of three-station localization system of TDOA and FDOA

观测站与辐射源之间的径向加速度,由输入的第 m 个观测站的位置矢量、加速度矢量以及辐射源的位置矢量解算得到。

多站脉冲序列文件包含 t_n 时刻下第 m 个观测站对应的脉冲幅度、脉宽、达到时刻 toa_m 和信号频率 f_m 。场景开关控制指令用于控制捷变信号发生器启动或关闭射频脉冲信号的生成。

2.3 捷变信号发生器

主站和副站的捷变信号发生器保持相参和同时触发工作,根据场景文件控制指令,按照多站脉冲序列文件的要求分别循环产生动态场景射频信号,即模拟辐射源发出的射频脉冲信号,输入至对应主站或副站。

如图 7 所示,以主站的信号发生器为主发生器,副站的信号发生器为从发生器。

动态场景模拟器输出的多站脉冲序列文件以及场景开关控制指令通过网络交换机,根据 IP 地址发送至对应的主发生器和从发生器。

主发生器输出时钟信号,经功分器功分为 3 路同源时钟信号,分别输入至主发生器和 2 个从发生器,以确保主发生器和从发生器相参工作,即频率同步。主发生器的 SYSTEM SYNC IN 端口接收原子钟输出的秒脉冲信号,主发生器的 RF SYNC OUT 端口连接至一个从发生器的 SYSTEM SYNC IN 端口,再经该从发生器的 RF SYNC OUT 端口连接至另一个从发生器的 SYSTEM SYNC IN 端口,以此级联主发生器和所有从发生器,实现主发生器和从发生器的时间同步。

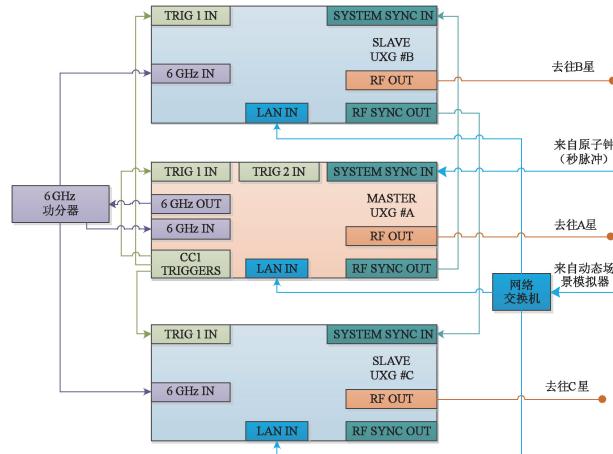


图 7 三站捷变信号发生器相参同步方案

Fig. 7 The coherent synchronization scheme of the three-station agile signal generators

主发生器在场景开关控制指令的控制下生成触发信号,通过 CC1 TRIGGERS 端口输出,分别输入至 3 台信号发生器的 TRIG1 IN 端口,确保主发生器和从发生器同时触发工作。

2.4 原子钟、系统地检

原子钟用于提供高精度、高稳定度时钟基准,保证主站、副站的时间同步和频率相参,以及与捷变信号发生器的时间同步;一方面同时输出 3 路相参时钟,分别至主站和副站的时统/频统单元,确保主站和副站时钟相参;另一方面同时输出 4 路秒脉冲信号如图 8 所示,其中 3 路 1PPS

秒脉冲信号分别至主站和副站的系统控制与数传单元,确保主站和副站同时序节拍工作,剩余 1 路秒脉冲信号至主站对应的捷变信号发生器,确保主站和副站的捷变信号发生器时间同步。

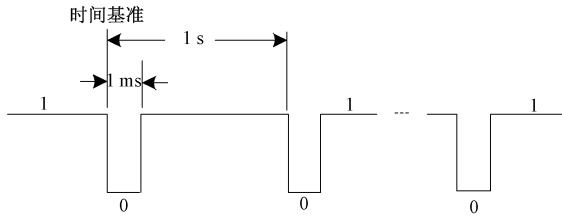


图 8 1PPS 秒脉冲时序关系

Fig. 8 1PPS second pulse timing relationship

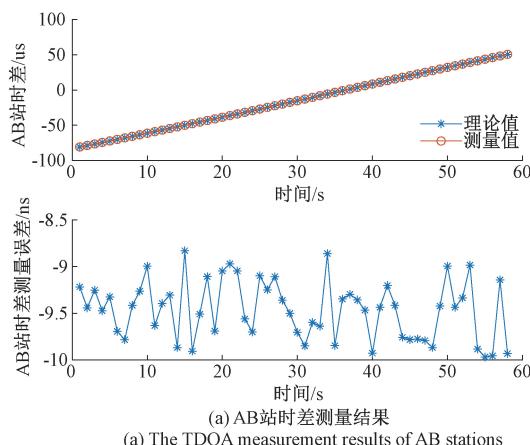
系统地检配置 CAN 接口、高速光接口、LVDS 接口等各类接口,一方面主站对时差/频差测量及定位单元输出的辐射源定位结果进行显示和定位精度分析;另一方面完成动态场景模拟器、主站或副站及其对应捷变信号发生器之间的工作指令、工作参数以及观测站位置、速度等信息和辐射源定位结果的数据交互与数据格式转换。

3 试验结果

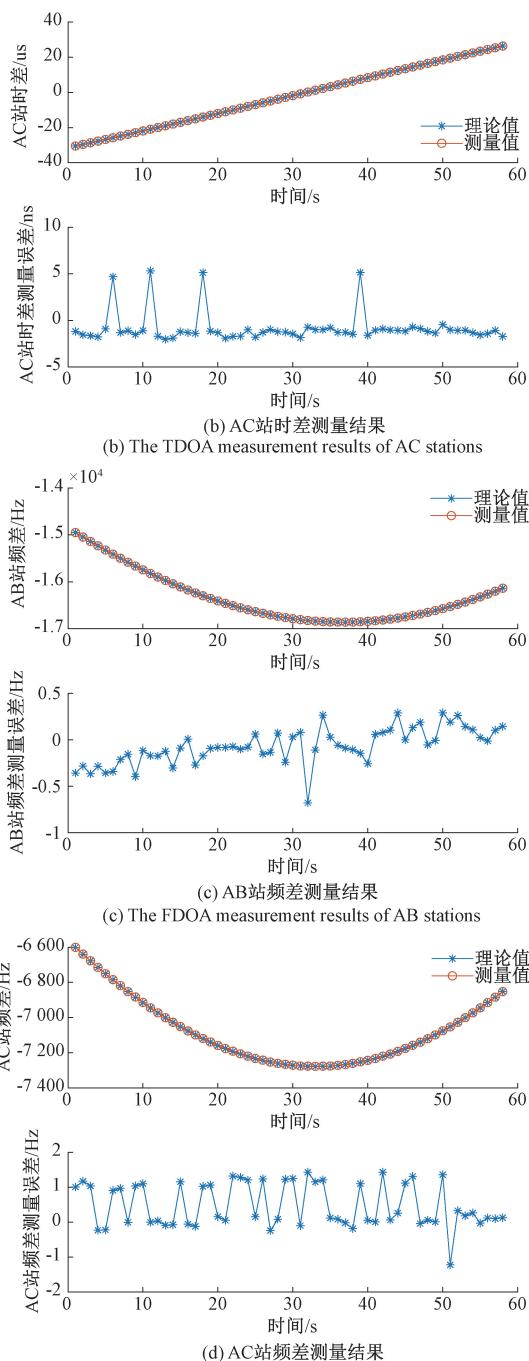
3.1 单辐射源场景

以运行于距离地面 900 km 高度的 A、B、C 3 个观测站为例,站间距 90 km,以某一时刻 A、B 站中心位置在地面投影为 O 点位置,三站编队距离辐射源经过由远及近再由近到远的运动过程,场景时长 60 s,设置单辐射源内场测试场景,辐射源经纬高位置(112.877 853°, -8.281 205°, 0 m),信号频率 3 500 MHz,脉宽 5 μs,重复周期 1 000 μs。

图 9 所示为单辐射源测试场景时差、频差测量精度测试结果,其中图 9(a)~(d)分别为 AB 站时差、AC 站时差,AB 站频差和 AC 站频差测量结果。可知在单辐射源测试场景下,多站时频差定位系统动态场景半实物测试方法,所得时差测量精度优于 10 ns(r. m. s),频差测量精度优于 1 Hz(r. m. s)。



(a) AB 站时差测量结果



(b) AC 站时差测量结果

(c) AC 站频差测量结果

(d) AC 站频差测量结果

Fig. 9 运动场景时差、频差测量结果

Fig. 9 The measurement results of TDOA and FDOA

图 10 所示为在单辐射源测试场景下,多站时频差定位系统动态场景半实物定位测试结果,在辐射源距离站下点 900 km 范围内,三站时频差定位精度优于 100 m (CEP),有效验证了本文所提方法可实现高精度目标定位,三站工作时序同步。

3.2 多辐射源场景

三站编队场景与 3.1 节一致,场景时长 900 s,设置

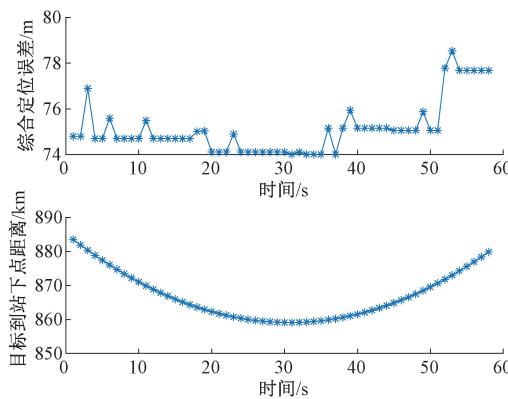


图 10 运动场景三站时频差定位测试结果

Fig. 10 The localization results of TDOA and FDOA in dynamic scenarios

250 个辐射源, 辐射源随机散布在经度 $110^{\circ} \sim 143^{\circ}$, 纬度 $-60^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 范围内, 高度基于全球高程地图设置, 雷达信号频率在 $3 \sim 4$ GHz, 脉宽在 $10 \sim 20 \mu\text{s}$, 重复周期在 $500 \sim 1000 \mu\text{s}$ 范围内随机分布。基于商用 STK 软件和动态模拟器构建的多辐射源测试场景如图 11 所示。

图 12 所示为多辐射源测试场景, 基于本文提出的多站时频差定位系统动态场景半实物测试方法测试结果, 三站编队编队在南纬 -60° ~北纬 60° 范围内, 按照既定飞行

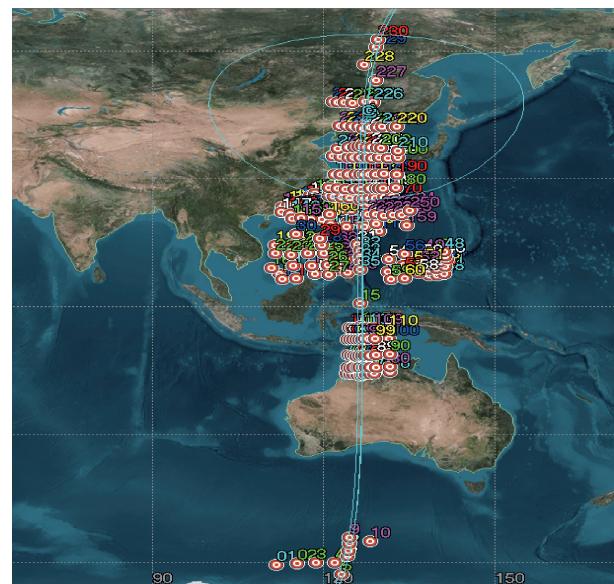


图 11 基于 STK 和动态模拟器构建的多辐射源测试场景

Fig. 11 A multi-radiation source test scenario constructed based on STK and dynamic simulator

轨迹高速运动, 在 900 s 时长内完成对 250 个辐射源信号时差、频差测量和时频差定位。相比外场实装测试, 本文所提内场半实物测试方法试验时间开销降低约 80%, 试验

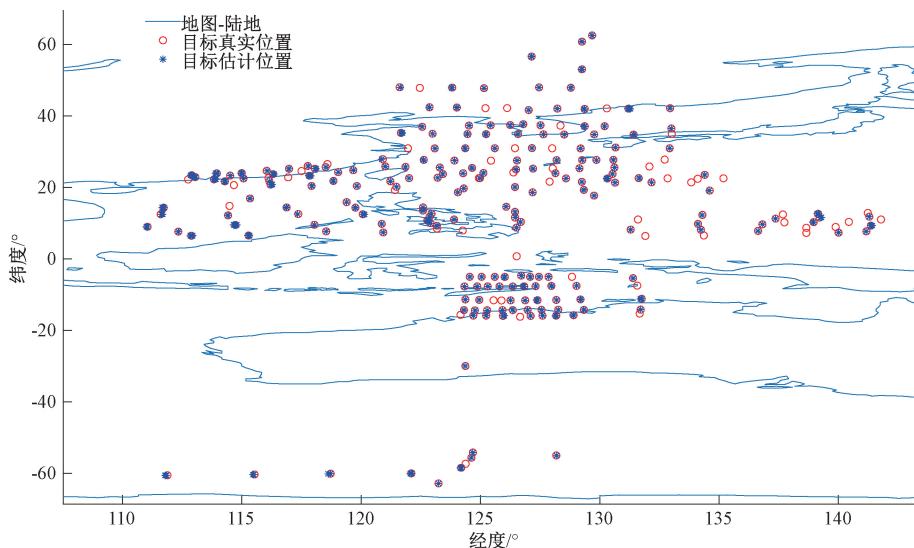


图 12 运动场景下三站时频差多辐射源定位半实物测试结果

Fig. 12 The semi-physical test results of three-station multi-radiation source localization of TDOA and FDOA in dynamic scenarios

成本开销降低约 70%。

基于本文辐射源分选方法, 考虑不同时差测量精度和观测站构型等因素, 试验结果表明: 本文方法可实现对 km 量级近旁辐射源实现有效分辨, 其中 250 个辐射源测试场景, 正确分选定位辐射源数目为 205 个, 分选正确概率优于 82%。

4 结 论

针对运动场景下, 多观测站对地表辐射源时频差测量和定位内场测试验证难题, 提出了一种多站时频差定位系统半实物测试方法。在内场环境中, 原子钟提供统一的时间、频率基准, 系统地检设备生成控制指令。在此基础上

构建多站截获信号模型,模拟生成多站所面临的外场实际辐射源信号脉冲序列文件,与捷变信号发生器协同产生辐射源动态射频信号。分别基于单辐射源场景和多辐射源场景完成多站时频差定位系统时频差高精度测量和辐射源定位全流程半实物测试验证。试验结果表明:本文所提测试方法时差测量精度优于 10 ns(r. m. s),频差测量精度优于 1 Hz(r. m. s),辐射源距离观测站下点 900 km 范围内,定位精度优于 100 m(CEP),相比外场实装测试,试验时间开销降低约 80%,试验成本开销降低约 70%。从而极大提升了系统测试效率和测试场景覆盖性,在地面内场实测环境下释放了多观测编队协同定位体制的技术和工程风险。

参考文献

- [1] 刘章孟. 雷达侦察信号智能处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2023.
- [2] LIU ZH M. Intelligent processing of radar signals in reconnaissance systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2023.
- [3] 郭福成, 樊昀, 周一宇, 等. 空间电子侦察定位原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [4] GUO F CH, FAN Y, ZHOU Y Y, et al. Localization principles in space electronic reconnaissance [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [5] CHEN Y H, YUN H, LI J, et al. Three-dimensional source localization based on 1-D AOA localization[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 63(3):321-334.
- [6] 周彬, 王明扬, 廖骥, 等. 一种基于三角基线干涉仪的天基定位技术[J]. 电子信息对抗技术, 2024, 39(1):62-67.
- [7] ZHOU B, WANG M Y, LIAO J, et al. A space-based positioning technology based on triangular baseline interferometer [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2024, 39(1):62-67.
- [8] PEI Y H, WU G ZH, GUO F CH. Geolocation a know-altitude moving source by TDOA and FDOA measurements[J]. Electronic Letters, 2022, 58 (13): 514-516.
- [9] SHUAI H F, ZHU SH B, LI CH Q. Review of TDOA parameter estimation algorithm based on three-satellite interference location[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(22):91-97.
- [10] LI H, SUN H M, ZHOU R H. Hybrid TDOA/FDOA and track optimization of UAV swarm based on A-optimality[J]. IEEE Journal of Systems Engineering and Electronics, 2023, 34(1):149-159.
- [11] PEI Y H, WU G ZH, GUO F CH. Geolocation a know-altitude moving source by TDOA and FDOA measurements[J]. Electronic Letters, 2022, 58 (13): 514-516.
- [12] LI H, SUN H M, ZHOU R H. Hybrid TDOA/FDOA and track optimization of UAV swarm based on A-optimality[J]. IEEE Journal of Systems Engineering and Electronics, 2023, 34(1):149-159.
- [13] 裴禹豪, 张敏, 郭福成, 等. 基于地球高程信号的运动辐射源时差频差无源定位算法[J]. 中国科学, 2022, 52(11):1974-1991.
- [14] PEI Y H, ZHANG M, GUO F CH, et al. Moving source localization using TDOA and FDOA measurements in the presence of altitude knowledge[J]. Scientia Sinica Informations, 2022, 52(11):1974-1991.
- [15] 徐凡. 双星时差频差定位地面测试中的同步问题研究[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(6):124-127.
- [16] XU F. Synchronization technology in ground test for dual-satellite geolocation system using TDOA and FDOA[J]. Computer Application and Software, 2019, 36(6):124-127.
- [17] 曾巍, 刘航, 王森, 等. 一种有效载荷地面测试系统星地时间同步方法[J]. 航天器工程, 2016, 25(6):131-137.
- [18] ZENG W, LIU H, WANG M, et al. A method of time synchronization between satellite and ground for payload ground test system[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 131-137.
- [19] 李振强, 黄振, 陈曦, 等. 时频差精度的时变性影响及补偿估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(3): 481-486.

- LI ZH Q, HUANG ZH, CHEN X, et al. Effect of time-varying characteristics on TDOA/FDOA accuracy and compensation estimation method [J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(3): 481-486.
- [18] 陈云飞,杨光,郑泽星,等.运动多站对捷变频信号时差和速度差时变性补偿与测量[J].电讯技术,2025,65(5): 740-748.
CHEN Y F, YANG G, ZHENG Z X, et al. Compensation and measurement for time-varying TDOA and VDOA of agile frequency signal in moving multi-station systems[J]. Telecommunication Engineering, 2025,65(5): 740-748.
- [19] 邹峰,杨文举,张殿友,等.一种多站无源时差定位系统内场模拟测试方法[J].舰载电子对抗,2020,43(4): 32-38.
ZOU F, YANG W J, ZHANG D Y, et al. A infield simulation test method for multi-station passive TDOA location system [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2020, 43(4):32-38.
- [20] 李文臣.基于多通道矢量源的时差定位系统性能测
试[J].现代雷达,2015,37(10):21-24.
LI W CH. TDOA location system performance test based on multichannel vector signal generator [J]. Modern Radar, 2015,37(10):21-24.

作者简介

陈云飞(通信作者),硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为卫星载荷总体技术、无源定位、信号与信息处理。

E-mail:893164872@qq.com

杨光,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为卫星载荷总体技术、无源定位。

E-mail:silenceyg@163.com

陈林,博士研究生,研究员,主要研究方向为卫星载荷总体技术、导航总体技术。

E-mail:boolechen@163.com

郭鸿博,硕士研究生,工程师,主要研究方向为卫星载荷总体技术、信号与信息处理。

E-mail:RevenHOO@outlook.com

周彬,硕士研究生,研究员,主要研究方向为卫星载荷总体技术、无源定位。

E-mail:13668100698@163.com