

doi:10.13756/j.gtxyj.2024.230049.

无线通信技术

葛明昊, 赵来定, 张更新. 基于多波束/TDOA技术的双星干扰源定位[J]. 光通信研究, 2024(3):230049.

Ge M H, Zhao L D, Zhang G X. Dual-satellite Interference Source Localization based on Multi-Beam/TDOA Technology[J]. Study on Optical Communications, 2024(3): 230049.

基于多波束/TDOA技术的双星干扰源定位

葛明昊^a, 赵来定^a, 张更新^{a,b}

(南京邮电大学 a. 通信与信息工程学院; b. 通信与网络技术国家地方联合工程研究中心, 南京 210003)

摘要: 单星多波束干扰源定位方法需要在3个以上的同频波束都能接收到干扰源信号的情况下才能实现定位。由于同频波束的数量有限以及干扰源位置的随机性, 往往会出现能接收到干扰源信号的同频波束少于3个, 或接收增益过低影响定位精度的情况。【目的】针对只有两个可用波束的定位问题以及进一步提高干扰源的定位精度, 提出了通过邻星与主星建立基于多波束天线与到达时间差(TDOA)技术的双星联合定位模型。【方法】通过建立双星联合定位模型, 并联立出定位方程组证明了该模型的可行性。同时, 基于定位几何稀疏精度因子(GDOP)对定位模型的接收增益误差、波束指向误差、到达时间差误差以及位置预测误差4个方面进行了定位误差分析, 并使用 Matlab 进行仿真对比。【结果】仿真实验表明, 基于多波束天线与 TDOA 技术的双星联合定位方法的定位精度明显优于传统的单星多波束定位方法。【结论】基于多波束天线与 TDOA 技术的双星联合定位方法利用了 TDOA 对定位精度影响较小的优势, 使其代替部分波束参与到卫星定位中, 不仅减少了对定位波束数量的需求, 而且减少了测量增益的误差与波束指向的误差, 大大提高了定位的精度并提升了可靠性, 较单星多波束定位更具优势。

关键词: 双星定位技术; 干扰源定位; 多波束天线; 到达时间差

中图分类号: TN927 **文献标志码:** A

Dual-satellite Interference Source Localization based on Multi-Beam/TDOA Technology

GE Minghao^a, ZHAO Laiding^a, ZHANG Gengxin^{a,b}

(a. College of Telecommunications & Information Engineering; b. National Local Joint Engineering Research Center for Communication and Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: The single-satellite multi-beam interference source localization method requires more than three co-frequency beams to receive the interference source signal to achieve positioning. Due to the limited number of co-frequency beams and the randomness of the location of the interference source, it is usually that the co-frequency beams can receive the interference source signal less than three, or low receiving gain, which may affect the positioning accuracy. 【Objective】In order to solve the problem of positioning with only two available beams and further improve the positioning accuracy of interference sources, a dual-satellite joint positioning model based on multi-beam antenna and Time Difference of Arrival (TDOA) technology is proposed through adjacent stars and main stars. 【Methods】In this paper, the feasibility of the model is proved by establishing the dual-satellite joint positioning model and the positioning equations in parallel. At the same time, based on Geometric Dilution of Precision (GDOP), the positioning error of the positioning model is analyzed from four aspects: receiving gain error, beam pointing error, arrival time difference error and position prediction error. 【Results】The simulation results show that the positioning accuracy of the dual-satellite joint positioning method based on multi-beam antenna and TDOA technology is obviously better than the traditional single-satellite multi-beam positioning method. 【Conclusion】The dual-satellite joint positioning method based on multi-beam antenna and TDOA technology makes use of the advantage that TDOA has less influence on positioning accuracy. Therefore, it replaces part of the beam to participate in satellite positioning, which not only reduces the demand for the number of positioning beams, but also reduces the error of measurement gain and the error of beam pointing with improved positioning accuracy and the reliability. The simulation results indicate that the proposed method is a better positioning method than single-satellite multi-beam positioning.

Key words: dual-satellite localization technology; interference location; multiple beam antenna; time difference of arrival

0 引言

卫星通信有着通信距离远、不受复杂地理条件限制等优点, 但其工作时会受到干扰, 影响通信的质量。为了消除干扰^[1], 需要用到卫星干扰源定位技

术。

目前比较主流的卫星定位技术有双星到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)/到达频率差(Frequency Difference of Arrival, FDOA)联合定位技术^[2]和三星 TDOA 定位技术。这两种方法虽然

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-04-30; 纸质出版日期: 2024-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91738201)

作者简介: 葛明昊(1999-), 男, 安徽合肥人。硕士, 主要研究方向为干扰源定位。

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

能得到较高的定位精度^[3],但定位条件较为苛刻^[4],考虑到干扰源位置的随机性,在现实中两种方法均难以实现定位^[5]。

单星多波束定位方法不需要邻星的辅助,其定位方法是利用干扰源在多个同频波束中产生的增益大小不同,再根据干扰源和波束之间的角度与增益的关系联立出定位方程组^[6],但其方法同样有一定的局限性。首先,该方法必须有超过3个同频波束接收到干扰源的信号才能实现定位,其次,该方法的定位精度受测量精度的影响较大^[7],当部分同频波束接收到的增益较小时会导致测量误差增大,最终导致定位误差较大。

本文介绍了一种新的利用多波束和 TDOA 技术的双星联合定位方法,该方法不仅避免了易受卫星转发器、星历精度和卫星在轨调资等多种因素影响的 FDOA,同时使用 TDOA 技术来代替部分波束进行定位,不仅减少了同频波束的需求个数,还降低了波束增益测量精度对定位精度的影响,最终总体定位精度优于单星多波束定位方法。

1 定位原理及算法推导

1.1 波束增益与波束指向的理论推导

星载多波束天线有着同频复用以及高载噪比的特点,当干扰信号功率较大的时候,相同频率的不同波束都可以接收到干扰信号。多波束定位示意图如图1所示,由于干扰源与不同波束的夹角不同,因此不同波束所产生的信号增益也不同。

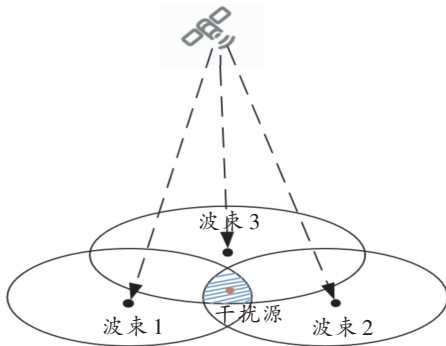


图1 多波束定位示意图

Figure 1 The diagram of multi-beam location

本文用 θ 表示干扰信号入射方向与波束中心指向之间的夹角。由于没有确切的方程来描述 θ 与信号增益 $G(\theta)$ 之间对应的关系,文献[8]提出了二者对应关系的近似算法如下:

$$G(\theta) \approx G_0 \left[\frac{J_1(u)}{2u} + 36 \frac{J_3(u)}{u^3} \right]^2, \quad (1)$$

式中, $u = 2.07123 \sin \theta / \sin(\theta_{3dB})$, θ_{3dB} 为半功率波束宽度,根据理论可知, $\theta_{3dB} = 70\lambda/D$; 波束中心增益 $G_0 = \pi^2 D^2 \eta / \lambda^2$, λ , η 和 D 分别为辐射信号的波长、天线效率和天线口径; J_1 和 J_3 分别为第一类的1阶和3阶贝塞尔函数。

接下来推导出干扰源位置与第 i 个波束之间的角度关系。设 θ_i 为干扰源入射方向与第 i 个波束中心指向之间的夹角。在地固坐标系下, s 为已知卫星, 位置为 $r_s = (x_s, y_s, z_s)$; 波束 i 的中心位置为 $r_i = (x_i, y_i, z_i)$, 干扰源位置为 $r = (x, y, z)$, 根据余弦定理可得:

$$\theta_i = \arccos \frac{(r_s - r_i)^2 + (r_s - r)^2 - (r - r_i)^2}{2(r_s - r_i)(r_s - r)}. \quad (2)$$

1.2 双星波束增益与 TDOA 联合定位模型

利用双星无源定位原理,构建多波束增益与 TDOA 联合定位模型如图2所示,主星 s_1 对应的坐标为 $r_{s_1} = (x_{s_1}, y_{s_1}, z_{s_1})$; 辅星 s_2 对应的坐标为 $r_{s_2} = (x_{s_2}, y_{s_2}, z_{s_2})$ 。通过地面观测站获得主星链路和辅星链路的信号时间差 Δt 和接收到的同频波束增益差 ΔP 。

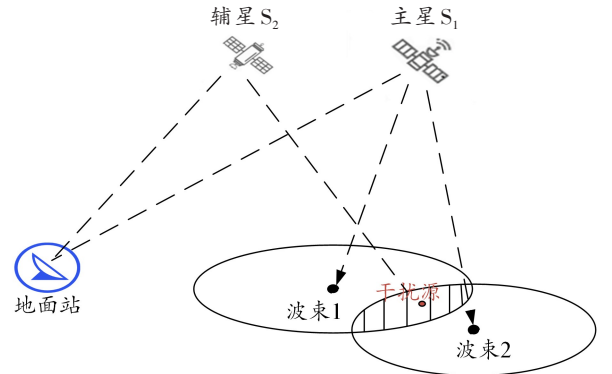


图2 双星定位简图

Figure 2 Map of binary positioning

(1) 多波束定位方程

设能接收到干扰源信号的同频波束为 b_1, b_2 , 波束的中心指向分别为 $r_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $r_2 = (x_2, y_2, z_2)$ 。其与主星到星下点的夹角分别为

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos \frac{(r_{s_1} - r_1)^2 + (r_{s_1} - r)^2 - (r - r_1)^2}{2(r_{s_1} - r_1)(r_{s_1} - r)} \\ \theta_2 = \arccos \frac{(r_{s_1} - r_2)^2 + (r_{s_1} - r)^2 - (r - r_2)^2}{2(r_{s_1} - r_2)(r_{s_1} - r)} \end{cases}, \quad (3)$$

将得到的角度函数式(3)代入到理论增益公式(1)中,可得

$$\begin{cases} G(\theta_1) = G_0 \left[\frac{J_1(u_1)}{2u_1} + 36 \frac{J_3(u_1)}{u_1^3} \right]^2 \\ G(\theta_2) = G_0 \left[\frac{J_1(u_2)}{2u_2} + 36 \frac{J_3(u_2)}{u_2^3} \right]^2 \end{cases}, \quad (4)$$

式中, $u_1 = 2.07123 \sin \theta_1 / \sin(\theta_{3dB})$, $u_2 = 2.07123 \sin \theta_2 / \sin(\theta_{3dB})$ 。则两个波束接收到的干扰源增益差为

$$\Delta P = 10 \lg(G(\theta_2)/G(\theta_1)), \quad (5)$$

式(5)即为多波束增益的定位方程。

(2) TDOA 定位方程

利用 TDOA 可以建立以下定位方程^[9]:

$$\Delta t = \frac{1}{c} (\|r_{s_1} - r\| - \|r_{s_2} - r\|), \quad (6)$$

式中: Δt 为两星的 TDOA; c 为光速。

(3) 多波束增益与 TDOA 联合定位模型

假设干扰源位于地球表面, 则其应满足地球椭圆模型方程^[10]:

$$x^2 + y^2 + \frac{z^2}{1-e^2} = a^2, \quad (7)$$

式中: e 为地球椭圆模型的偏心率; a 为地球椭圆模型中的半长轴。联立式(5)~(7)得到双星多波束增益与 TDOA 联合定位模型的非线性方程组为

$$\begin{cases} \Delta P = 10 \lg(G(\theta_2)/G(\theta_1)) \\ \Delta t = \frac{1}{c} (\|r_{s_1} - r\| - \|r_{s_2} - r\|) \\ x^2 + y^2 + \frac{z^2}{1-e^2} = a^2 \end{cases}. \quad (8)$$

2 基于多波束与 TDOA 技术联合双星定位系统的误差分析

在进行双星无源定位的过程中, 许多因素都会对定位精度产生影响, 本文基于定位几何稀疏精度因子(Geometric Dilution of Precision, GDOP)模型对波束接收增益的误差、波束指向的误差、两路信号 TDOA 的误差和卫星位置的预报误差^[11]对定位精度的影响进行定量分析, 研究不同因素对双星定位系统精度的影响状况。对于定位方程组(8), 记 $f_1 = 10 \lg(G(\theta_2)/G(\theta_1))$, $f_2 = \frac{1}{c} (\|r_{s_1} - r\| - \|r_{s_2} - r\|)$, 然后对方程组中的各变量在坐标点 (x, y, z) 处进行全微分计算, 可得

$$CdX = dZ - U_1 dX_1 - U_2 dX_2 - W_1 dS_1 - W_2 dS_2, \quad (9)$$

式中:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} \\ 2x & 2y & \frac{2z}{1-e^2} \end{bmatrix}; U_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_{s_1}} & \frac{\partial f_1}{\partial y_{s_1}} & \frac{\partial f_1}{\partial z_{s_1}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_{s_2}} & \frac{\partial f_1}{\partial y_{s_2}} & \frac{\partial f_1}{\partial z_{s_2}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; W_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_{s_1}} & \frac{\partial f_1}{\partial y_{s_1}} & \frac{\partial f_1}{\partial z_{s_1}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_{s_1}} & \frac{\partial f_2}{\partial y_{s_1}} & \frac{\partial f_2}{\partial z_{s_1}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_{s_2}} & \frac{\partial f_2}{\partial y_{s_2}} & \frac{\partial f_2}{\partial z_{s_2}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; dX = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}; dZ = \begin{bmatrix} dp \\ dt \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$dX_1 = \begin{bmatrix} dx_1 \\ dy_1 \\ dz_1 \end{bmatrix}; dX_2 = \begin{bmatrix} dx_2 \\ dy_2 \\ dz_2 \end{bmatrix}; dS_1 = \begin{bmatrix} dx_{s_1} \\ dy_{s_1} \\ dz_{s_1} \end{bmatrix}; dS_2 = \begin{bmatrix} dx_{s_2} \\ dy_{s_2} \\ dz_{s_2} \end{bmatrix}.$$

可以求出,

$$dX = C^{-1} (dZ - U_1 dX_1 - U_2 dX_2 - W_1 dS_1 - W_2 dS_2), \quad (10)$$

$$GDOP = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2}, \quad (11)$$

式中: dp 为接收增益误差; dt 为 TDOA 的误差; dX_1 为波束 1 的波束指向误差; dX_2 为波束 2 的波束指向误差; dS_1 为卫星 1 的位置预报误差; dS_2 为卫星 2 的位置预报误差。利用式(11)对多波束与 TDOA 技术联合双星定位模型进行定位误差分析。

(1) 接收增益误差对定位精度的影响

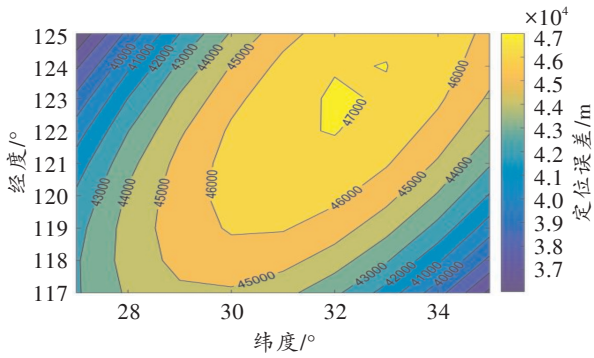
接收增益误差属于测量误差^[12], 其由接收设备的精度以及各种环境因素所决定, 其对双星定位的精度具有不可避免的影响, 图 3 所示为接收增益误差对定位精度的影响。

由图可知, 当接收增益误差为 0.5 和 1.0 dB 时, 最大定位误差分别为 47 和 94 km。表明接收增益误差对干扰源定位的精度影响较大。

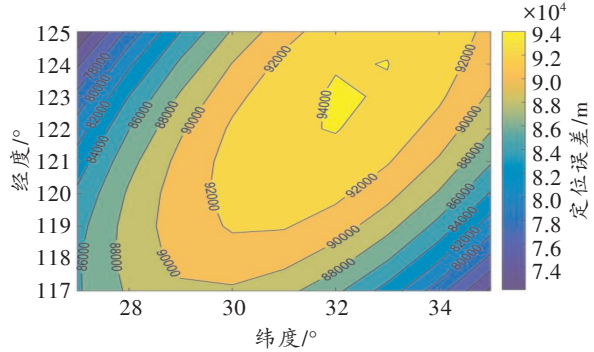
(2) 波束指向误差对定位精度的影响

波束的指向角度与理论增益值的函数关系是建立该双星定位模型的基础, 当波束的指向角度产生误差时, 会对卫星的定位精度产生本质的影响。图 4 所示为当波束指向误差分别为 0.005 和 0.010° 时对定位精度的影响。

由图可知, 当波束指向误差分别为 0.005 和 0.010° 时, 最大定位误差分别为 6.1 和 12.2 km。

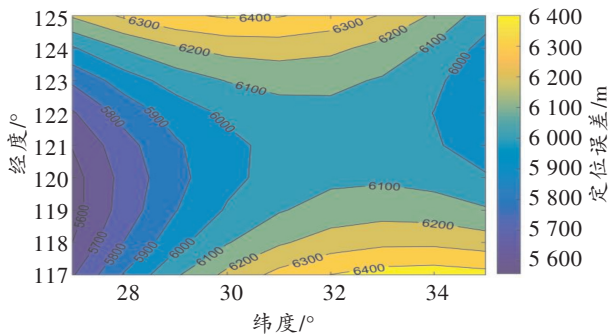


(a)接收增益误差为 0.5 dB 时的 GDOP
(a)GDOP when receiving gain error is 0.5 dB

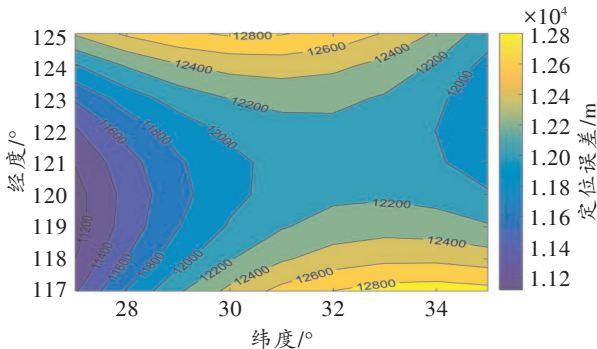


(b)接收增益误差为 1.0 dB 时的 GDOP
(b)GDOP when receiving gain error is 1.0 dB
图 3 接收增益误差对定位精度的影响

Figure 3 The influence of receiving gain error on positioning accuracy



(a)波束指向误差为 0.005° 时的 GDOP
(a)GDOP when the beam pointing error is 0.005°



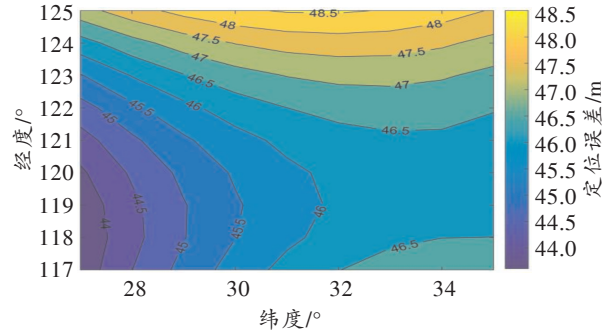
(b)波束指向误差为 0.010° 时的 GDOP
(b)GDOP when the beam pointing error is 0.010°
图 4 波束指向误差对定位精度的影响

Figure 4 The influence of beam pointing error on positioning accuracy

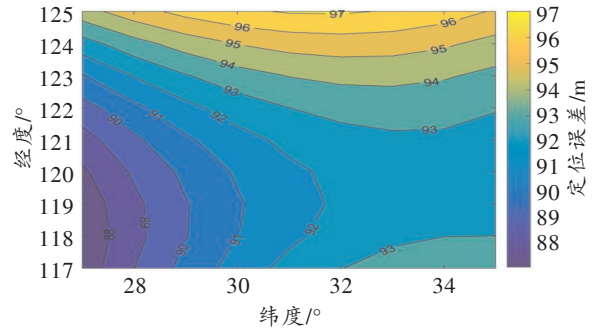
相比于接收增益误差,波束指向误差对干扰源定位精度的影响较小。

(3) 两路信号 TDOA 的误差对精度的影响

由式(5)可知,两路信号 TDOA 的误差同样会造成定位误差^[13]。但目前对于时差测量的技术较为成熟,因此 TDOA 的误差很小^[14],故对定位误差的影响不大^[15]。图 5 所示为时间误差对定位精度的影响。由图可知,当 TDOA 的误差分别为 50 和 100 ns 时,最大定位误差仅为 48.5 和 97 m。表明 TDOA 的误差对干扰源定位精度的影响很小。



(a) TDOA 的误差为 50 ns 时的 GDOP
(a) GDOP with an error of 50 ns for TDOA



(b)TDOA 的误差为 100 ns 时的 GDOP
(b)GDOP with an error of 100 ns for TDOA

图 5 时间误差对定位精度的影响

Figure 5 The influence of time error on positioning accuracy

(4) 卫星位置预报误差对定位精度的影响

目前定位系统使用的星历多为网上公开的星历,使得卫星的位置预报误差较大,对定位精度的影响很大。而本文的双星定位模型中,由于主星为同步卫星,不存在位置预报误差,故本文只分析当辅星为非同步卫星时的位置误差对定位精度的影响。辅星位置误差对卫星定位精度的影响如图 6 所示。可以看出,当卫星位置预报误差分别为 100 和 500 km 时,最大定位误差分别为 50 和 250 km。表明卫星位置预报误差对干扰源定位精度的影响极大,因此在实际定位中应避免这种误差的出现。

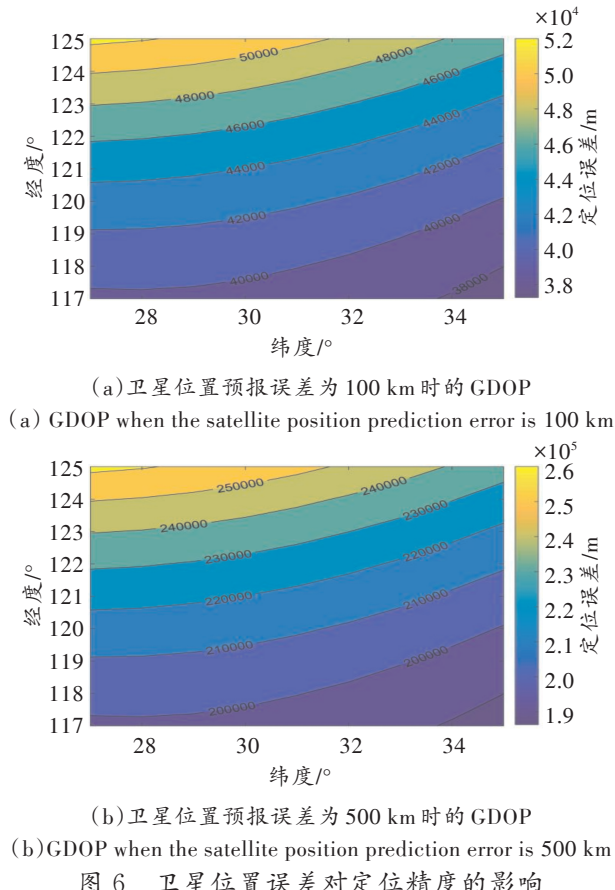


图 6 卫星位置误差对定位精度的影响

Figure 6 The influence of satellite position error on positioning accuracy

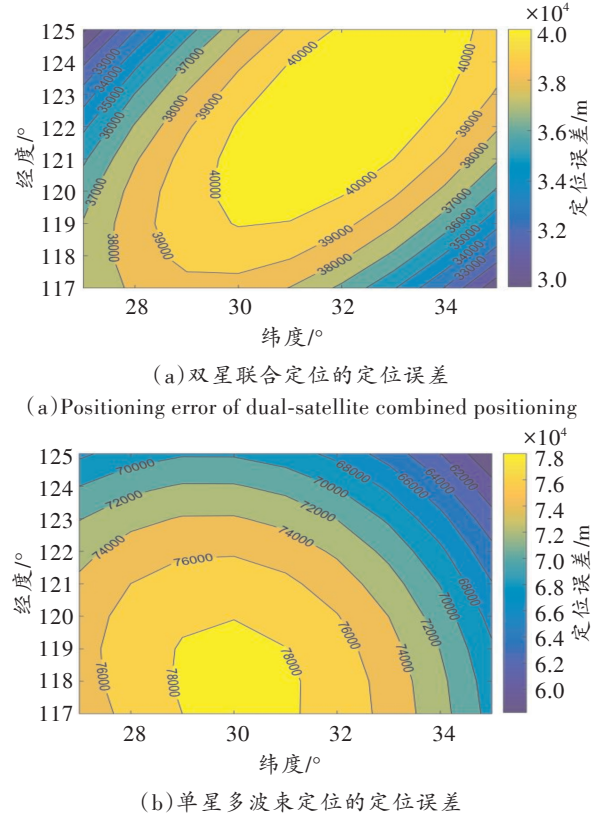
3 计算机仿真与对比

对于双星定位模型,本文选择天通一号和天通二号建立双星定位模型,其好处是:首先,这两颗卫星由同一个观测站观测,方便信号的同步与测量;其次,这两颗卫星都是同步卫星,避免了卫星位置预报误差对定位精度的影响。作为对比,选择天通一号卫星进行单星多波束定位,并基于 GDOP 模型对这两种定位方法的定位误差进行分析。

天通一号的坐标为东经 101.43° ,北纬 0° ;天通二号的坐标为东经 125° ,北纬 0° 。假设干扰源位于上海,其附近的同频波束有波束 37 ($118.4^\circ, 33.4^\circ$)、波束 84 ($122.6^\circ, 27.2^\circ$)和波束 56 ($115.31^\circ, 24.56^\circ$)。对于双星定位模型,选择波束 37 和波束 84 进行干扰源定位;对于单星定位模型,选择波束 37、波束 84 和波束 56 进行干扰源定位。

当接收增益误差为 0.5 dB,两路信号 TDOA 的误差为 50 ns,波束指向误差为 0.005° 时,两种方法的定位误差如图 7 所示。当干扰源位于上海(东

经 121.5° ,北纬 31.2°)时,将接收增益误差从 0.1 增大到 1.0 dB,对比两种定位方法的定位误差变化如图 8 所示。将波束指向误差从 0.001 增大到 0.010° ,对比两种定位方法的定位误差变化如图 9 所示。



(b)Positioning error of single satellite multi-beam positioning

图 7 双星模型与单星模型的定位误差对比

Figure 7 Comparison of positioning errors between two-star model and single-star model

由图 6 和图 7 可以看出,基于多波束天线与 TDOA 技术的双星联合定位方法的定位误差最大为 40 km,而单星多波束定位方法的定位误差最大达到了 78 km;由图 8 和图 9 可以看出,当接收增益误差和波束指向误差逐渐增大时,两种方法的误差都会增大,但双星联合定位方法的误差增大幅度略小,说明双星定位模型的鲁棒性更好。由此可见,双星联合定位方法的精度与可靠性均优于单星多波束定位方法。其原因是对于单星多波束的干扰源定位方法来说,其定位误差主要是由测量增益的误差以及波束指向的误差带来的。而基于多波束天线与 TDOA 技术的双星联合定位方法利用了 TDOA 对定位精度影响较小的优势,使其代替部分波束参与到卫星定位中,减少了测量增益的误差与波束指向的误差,大大提高了定位的精度并提升了可靠性,较单星多波束定位方法更优越。

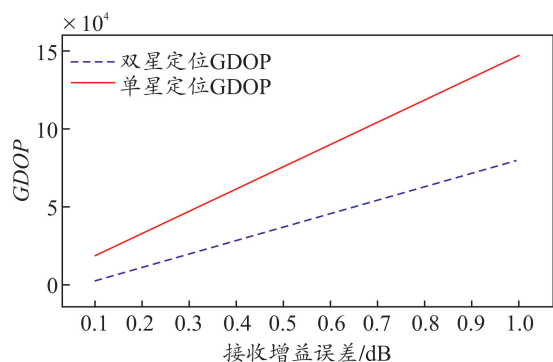


图8 关于接收增益误差的GDOP变化对比图

Figure 8 The GDOP change comparison diagram of the receiving gain error

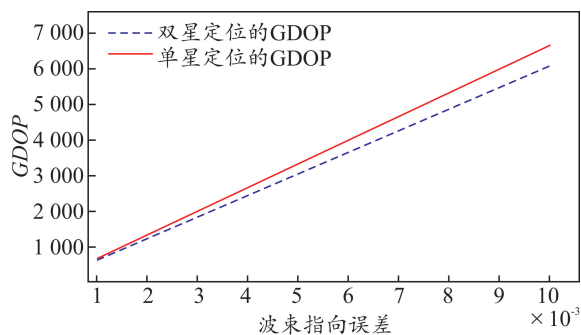


图9 关于波束指向误差的GDOP变化对比图

Figure 9 The GDOP change comparison diagram of the beam pointing error

4 结束语

本文给出了一种基于多波束天线与TDOA技术的双星联合定位方法。通过联合干扰源信号的波束信息和TDOA信息,获得了干扰源三维定位的数学模型,并基于GDOP模型对定位模型中的各种误差因素进行了定量分析。同时,在考虑了各种误差因素的前提下对本文提出的定位方法与单星多波束定位方法进行了误差仿真分析。仿真结果表明,本文所提定位方法对于干扰源定位具有较高的优越性,在实际应用中具有重要意义。

参考文献:

- [1] 阎师. 全球卫星通信产业现状及发展趋势[J]. 卫星应用, 2017, (4): 56–60.
Yan S. Global Satellite Communication Industry Status and Development Trend [J]. Satellite Applications, 2017, (4): 56–60.
- [2] 常新亚, 谢斌, 张晓敏, 等. 双星TDOA/FDOA定位系统的目标定位精度分析[J]. 航天器工程, 2013, 22(4): 35–42.
Chang X Y, Xie B, Zhang X M, et al. Target Positioning Accuracy Analysis of Dual-Satellite TDOA/FDOA Positioning System [J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(4): 35–42.
- [3] 刘春茂, 陈锋, 邱丙益. 基于差分TDOA/FDOA的双星定位技术研究[J]. 通信对抗, 2015, 34(3): 6–9.
Liu C M, Chen F, Qiu B Y. Research on Dual-Satellite Positioning Technology based on Differential TDOA/FDOA [J]. Communication Countermeasure, 2015, 34(3): 6–9.
- [4] Liu C, Yang L, Mihaylova L. Dual-satellite Source Geolocation with Time and Frequency Offsets and Satellite Location Errors[C]//2017 20th International Conference on Information Fusion (Fusion). Xi'an, China: IEEE, 2017: 1–8.
- [5] 帅海峰, 朱诗兵, 李长青. 三星干扰源定位TDOA参数估计算法研究综述[J]. 电子测量技术, 2019, 42(22): 91–97.
Shuai H F, Zhu S B, Li C Q. Review of TDOA Parameter Estimation Algorithms for Samsung Interference Source Localization [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(22): 91–97.
- [6] 钟锡健, 张更新, 谢智东. 基于粒子群算法的单星干扰源定向方法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(13): 223–226.
Zhong X J, Zhang G X, Xie Z D. Single Satellite Interference Source Orientation Method based on Particle Swarm Optimization [J]. Computer Engineering and Application, 2017, 53(13): 223–226.
- [7] 尹展, 孙晨华. 多波束卫星移动通信系统的同频干扰研究[J]. 无线电通信技术, 2016, 42(2): 23–26.
Yin Z, Sun C H. Research on Co-Channel Interference of Multi-Beam Satellite Mobile Communication System [J]. Radio Communication Technology, 2016, 42(2): 23–26.
- [8] Caini C, Corazza G E, Falciascecca G, et al. A Spectrum- and Power-Efficient EHF Mobile Satellite System to be Integrated with Terrestrial Cellular Systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1992, 8(10): 1315–1325.
- [9] Cho S H, Yeo S R, Choi H H, et al. A Design of Synchronization Method for TDOA-based Positioning System [C]//2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems. Jeju, Korea (South): IEEE, 2012: 1373–1375.
- [10] Ramakrishnan S, Sarkar B K. Performance Comparison of Spherical and Elliptical Earth Models for Low Angle Tracking in Radars [C]//2006 International Radar Symposium. Krakow, Poland: IEEE, 2006: 1–4.

- [11] 王好同,马钰,李伟明,等. 无源测距定位系统设计中的 GDOP 分析[J]. 信号处理,2012,28(1):124–130.
Wang H T, Ma Y, Li W M, et al. GDOP Analysis in Passive Ranging and Positioning System Design [J]. Signal Processing, 2012,28(1): 124–130.
- [12] 廖海军. 多站无源定位精度分析及相关技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2009.
Liao H J. Multi-station Passive Positioning Accuracy Analysis and Related Technology Research [D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology, 2009.
- [13] 刘洋,刘晓波. 基于 GDOP 分析模型的双星无源定位系统精度研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2017,31(4):7–13,85.
Liu Y, Liu X B. Research on the Accuracy of Dual-Satellite Passive Positioning System based on GDOP Analysis Model [J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Science Edition), 2017,31(4): 7–13,85.
- [14] 庞京,吉日格乐,武迎兵. 静止轨道卫星信号上行站定位影响因素分析[J]. 数字通信世界,2021(12):67–68,73.
Pang J, JIRi G, Wu Y B. Analysis of Influencing Factors of Geostationary Satellite Signal Uplink Station Positioning [J]. Digital Communication World, 2021 (12) : 67–68,73.
- [15] Lv X, Liu K, Hu P. Geometry Influence on GDOP in TOA and AOA Positioning Systems[C]//2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing. Wuhan, China:IEEE,2010:58–61.