文章编号：2095-4980(2025)06-0604-06

单星双DOA干扰源定位性能分析

王　淳[a,b]，屈德新[a,b]，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，江苏 南京 210003)

摘　要：随着低轨(LEO)卫星系统的发展，星载相控阵列天线已应用到卫星系统中，具备星载电磁波到达方向(DOA)的相控阵测量条件。针对当前卫星测向定位体制中，单DOA定位体制无法定位空中目标，双星时差联合测向(TDOA/DOA)定位需双星同时可视目标下同步测量计算才能定位的问题，提出一种基于单星双DOA的定位方法。分析了单星双DOA定位原理及定位算法；通过仿真定量计算不同卫星间隔、测向误差以及卫星位置误差对卫星定位精确度的影响，并推导该定位系统的几何精确度因子(GDOP)，最后通过仿真验证了其可行性。

关键词：干扰源定位；波达方向(DOA)；几何精度因子(GDOP)；低轨(LEO)

中图分类号：TN927.2　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.11805/TKYDA2024171

Analysis of single satellite dual-DOA positioning performance

WANG Chun[a,b]，QU Dexin[a,b]，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 Jiangsu 210003，China)

Abstract：With the development of Low-Earth Orbit(LEO) satellite systems, satellite-borne phased array antennas have been applied in satellite systems, providing the conditions for phased array measurement of the Direction of Arrival(DOA) of satellite-borne electromagnetic waves. In the current satellite direction-finding and positioning systems, the single-DOA positioning system is unable to locate aerial targets, and the dual-satellite Time Difference of Arrival(TDOA) and DOA joint positioning system requires synchronized measurement and calculation by two satellites with simultaneous visibility of the target to achieve positioning. To address these issues, a positioning method based on single-satellite dual-DOA is proposed. The principle and algorithm of single-satellite dual-DOA positioning are analyzed. Through simulation, the quantitative impact of different satellite intervals, direction-finding errors, and satellite position errors on the positioning accuracy of satellites is calculated. The Geometric Dilution of Precision(GDOP) of this positioning system is derived, and its feasibility is verified through simulation.

Keywords：interference source localization；Direction of Arrival(DOA)；Geometric Dilution of Precision(GDOP)；Low Earth Orbit(LEO)

随着卫星通信技术的发展，星载阵列天线广泛应用到卫星通信中，具有广阔的发展前景[1]，但随之而来的是卫星通信中存在的干扰问题。受到干扰的卫星需对干扰源位置进行可靠定位和排查，这也是卫星系统正常运行的必要条件。在卫星通信系统中，目前干扰源定位常用的体制有单星测向定位[2-4]、双星时频差联合定位[5-7]、多星时差定位[8-9]和时差联合测向(TDOA/DOA)定位[10]。这些定位体制已相对成熟，但在测向定位系统中，单DOA只能定位地表目标，无法定位空中目标[4]，TDOA/DOA需在双星同时可视目标下同步测量计算才能定位[11]。文

收稿日期：2024-03-28；**修回日期：**2024-05-16

基金项目：国家自然科学基金资助项目(U21A20450)

引用格式：王淳,屈德新,张更新.单星双DOA干扰源定位性能分析[J].太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(6):604-609.DOI:10.11805/TKYDA2024171.

Citation format：WANG Chun,QU Dexin,ZHANG Gengxin. Analysis of single satellite dual-DOA positioning performance[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(6):604-609. DOI:10.11805/TKYDA2024171.

献[12]提出对空中目标的双星测向定位体制，并验证了该方法对空中目标定位的可行性，结合双星视场分析了对空中目标的定位影响因素，但并没有对参数误差进行量化分析。

本文提出单星双DOA定位方法，对定位原理和定位算法进行计算和分析，通过仿真验证分析了单颗卫星在不同时刻的间距、不同的测向误差以及卫星位置误差等因素对单星双DOA定位精确度的影响，并对比其他测向定位体制，验证其定位性能，对定位误差进行了量化分析；推导出单星双DOA定位算法几何精度稀释因子(GDOP)，并仿真分析验证了其可行性。

1　单星双DOA定位算法

1.1 定位模型

假定单星双DOA干扰源定位系统中，初始时刻的低轨卫星位置为$\boldsymbol{s}_1$，第2次测得的卫星位置为$\boldsymbol{s}_2$。在O_e-xyz球心坐标系下，卫星位置为$\boldsymbol{s}_1=\left[x_1,y_1,z_1\right]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{s}_2=\left[x_2,y_2,z_2\right]^{\mathrm{T}}$，地面干扰源位置坐标为$\boldsymbol{x}=\left[x,y,z\right]^{\mathrm{T}}$；对2次到达卫星的入射方向进行测量，方位角和俯仰角分别为α_1、α_2和β_1、β_2，可得到定位模型如图1所示。

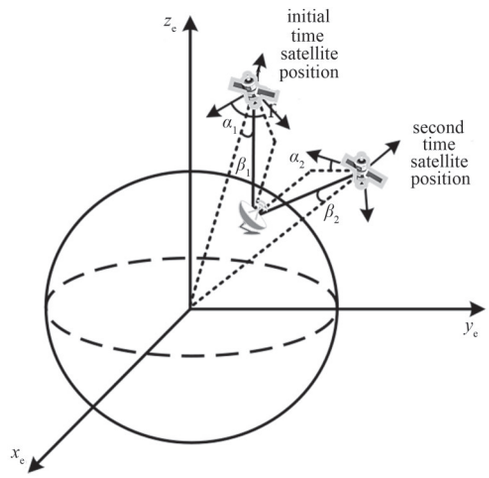

Fig.1 Diagram of location model
图1 定位模型图

DOA测量得到的方位角和俯仰角为：

$$\alpha_i=\arccos\left(\frac{x_{\mathrm{t,b}i}}{\sqrt{x_{\mathrm{t,b}i}{}^2+y_{\mathrm{t,b}i}{}^2}}\right) \tag{1}$$

$$\beta_i=\arccos\left(\frac{x_{\mathrm{t,b}i}}{\sqrt{x_{\mathrm{t,b}i}{}^2+y_{\mathrm{t,b}i}{}^2+z_{\mathrm{t,b}i}{}^2}}\right) \tag{2}$$

式中$x_{\mathrm{t,b}i}$、$y_{\mathrm{t,b}i}$、$z_{\mathrm{t,b}i}$为在星体坐标系下x,y,z方向上的投影长度。令$\boldsymbol{x}_{\mathrm{T}}=\left[x_{\mathrm{t,b}i},y_{\mathrm{t,b}i},z_{\mathrm{t,b}i}\right]$，将地球坐标系转换成星体坐标系需建立旋转矩阵$\boldsymbol{M}$，推导过程见参考文献[10]。

1.2 定位算法

对于存在测向误差的情况，文献[12]给出了一种针对2颗卫星存在测向误差导致2条测向线不相交时，通过计算2条测向线距离最近的2个点之间的中点作为干扰源位置的解法。其参数方程为：

$$l_1:\begin{cases}x=x_1+l_{x1}p_1\\y=y_1+l_{y1}p_1\\z=z_1+l_{z1}p_1\end{cases} \tag{3}$$

$$l_2:\begin{cases}x=x_2+l_{x2}p_2\\y=y_2+l_{y2}p_2\\z=z_2+l_{z2}p_2\end{cases} \tag{4}$$

式中：l_{x1}、l_{y1}、l_{z1}；l_{x2}、l_{y2}、l_{z2}分别为2条直线的方向余弦。在星体坐标系中，还需将方向余弦进行坐标转换，具体转换见参考文献[3]；p_1、p_2为2条测向线方程的参数，通过对2条测向线求解最短距离，可得到关于p_1、p_2的距离方程$f\left(p_1,p_2\right)$为：

$$f\left(p_1,p_2\right)=(x_1+l_{x1}p_1-x_2-l_{x2}p_2)^2+(y_1+l_{y1}p_1-y_2-l_{y2}p_2)^2+(z_1+l_{z1}p_1-z_2-l_{z2}p_2)^2 \tag{5}$$

对式(5)求导即可获得2条直线的最短距离：

$$\frac{\mathrm{d}f\left(p_1,p_2\right)}{\mathrm{d}p_1}=2\left(l_{x1}^2+l_{y1}^2+l_{z1}^2\right)p_1-2\left(l_{x1}l_{x2}+l_{y1}l_{y2}+l_{z1}l_{z2}\right)p_2+2l_{x1}\left(x_1-x_2\right)+2l_{y1}\left(y_1-y_2\right)+2l_{z1}\left(z_1-z_2\right) \tag{6}$$

$$\frac{\mathrm{d}f\left(p_1,p_2\right)}{\mathrm{d}p_2}=-2\left(l_{x1}l_{x2}+l_{y1}l_{y2}+l_{z1}l_{z2}\right)p_1+2\left(l_{x2}^2+l_{y2}^2+l_{z2}^2\right)p_2-2l_{x2}\left(x_1-x_2\right)-2l_{y2}\left(y_1-y_2\right)-2l_{z2}\left(z_1-z_2\right) \tag{7}$$

令式(6)~(7)等于零，即可得p_1、p_2，再将其代入到式(3)~(4)中，求出距离2条测向线最近的2个点$\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{b}$，2个点连线的中点即为目标源的位置$\boldsymbol{\theta}$：

$$\boldsymbol{\theta}=\frac{\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}}{2} \tag{8}$$

其中：$\boldsymbol{a}=\left[x_1+l_{x1}p_1,y_1+l_{y1}p_1,z_1+l_{z1}p_1\right]$；$\boldsymbol{b}=\left[x_2+l_{x2}p_2,y_2+l_{y2}p_2,z_2+l_{z2}p_2\right]$。

2 单星双DOA定位精确度分析

从上述的分析中可以看出，影响单星双DOA定位精确度的因素主要有方向余弦的测量误差、姿态角测量的误差及卫星位置的误差等，其中最主要的因素为方向余弦测量误差及卫星位置误差，因此在这两种误差条件下对定位误差的GDOP进行分析。

在单星双DOA定位模型中，令测量矢量为$\boldsymbol{\delta}=\left[\alpha_1,\beta_1,\alpha_2,\beta_2\right]^{\mathrm{T}}$，测量误差均设为零均值的高斯分布的随机误差且不相关，其对应的方差为$\sigma_{\alpha_1}^2$、$\sigma_{\alpha_2}^2$、$\sigma_{\beta_1}^2$、$\sigma_{\beta_2}^2$；$\boldsymbol{S}=\left[\boldsymbol{s}_1^{\mathrm{T}},\boldsymbol{s}_2^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}$为2个时刻的卫星位置。考虑到实际单星系统受各种噪声影响，单星的未知参数存在误差，则数据向量$\boldsymbol{v}=\left[\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\right]$的概率密度函数的对数为：

$$Inp(\boldsymbol{v};\boldsymbol{k})=Inp(\boldsymbol{\delta};\boldsymbol{k})+Inp(\boldsymbol{S};\boldsymbol{k})=K-\frac{1}{2}\left(\boldsymbol{\delta}-\delta^{\mathrm{o}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_z\left(\boldsymbol{\delta}-\delta^{\mathrm{o}}\right)-\frac{1}{2}\left(\boldsymbol{S}-\boldsymbol{S}^{o}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{\mathrm{s}}\left(\boldsymbol{S}-\boldsymbol{S}^{o}\right) \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{k}=\left[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}$为未知参数；$K$为与参数$\boldsymbol{k}$无关的常数；$\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{o}}$和$\boldsymbol{S}^{\mathrm{o}}$分别为观测矢量的真值和卫星位置的真值；$\boldsymbol{Q}_z=diag\left(\sigma_{\alpha_1}^2,\sigma_{\beta_1}^2,\sigma_{\alpha_2}^2,\sigma_{\beta_2}^2\right)$为测量误差的协方差矩阵；$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{S}}$为卫星位置误差的协方差矩阵，则未知参数$\boldsymbol{k}$的克拉美-罗下界(The Cramér-Rao Lower Bound，CRLB)为：

$$\mathrm{CRLB}(\boldsymbol{k})=-E\left[\frac{Inp(\boldsymbol{k};\boldsymbol{v})}{\partial\boldsymbol{k}\partial\boldsymbol{k}^{\mathrm{T}}}\right]^{-1}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A} & \boldsymbol{B}\\ \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{C}\end{bmatrix}^{-1} \tag{10}$$

式中$\boldsymbol{v}=\left[\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}$为数据向量

$$\boldsymbol{A}=-E\left[\frac{Inp(\boldsymbol{v};\boldsymbol{k})}{\partial\boldsymbol{x}\partial\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}}\right]^{-1}=\left(\frac{\partial\boldsymbol{\delta}}{\partial\boldsymbol{x}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_z^{-1}\left(\frac{\partial\boldsymbol{\delta}}{\partial\boldsymbol{x}}\right) \tag{11}$$

$$\boldsymbol{B}=-E\left[\frac{Inp(\boldsymbol{v};\boldsymbol{k})}{\partial\boldsymbol{x}\partial S^{\mathrm{T}}}\right]^{-1}=\left(\frac{\partial\boldsymbol{\delta}}{\partial\boldsymbol{x}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_z^{-1}\left(\frac{\partial\boldsymbol{\delta}}{\partial\boldsymbol{S}}\right) \tag{12}$$

$$\boldsymbol{C}=-E\left[\frac{Inp(\boldsymbol{v};\boldsymbol{k})}{\partial\boldsymbol{S}\partial\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}}\right]^{-1}=\left(\frac{\partial\boldsymbol{\delta}}{\partial\boldsymbol{S}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_z^{-1}\left(\frac{\partial\boldsymbol{\delta}}{\partial\boldsymbol{S}}\right)+\boldsymbol{Q}_{\mathrm{s}}^{-1} \tag{13}$$

则：$\mathrm{CRLB}(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{A}^{-1}+\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B}\left(\boldsymbol{C}-\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B}\right)^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}$。

单星双DOA定位算法的GDOP为：

$$\varphi_{\mathrm{GDOP}}=\sqrt{\mathrm{trace}\left(\mathrm{CRLB}(\boldsymbol{x})\right)} \tag{14}$$

3 仿真分析

定位误差仿真采用的卫星为具有阵列测向功能的Starlink卫星，在卫星工具软件STK(Satellite Tool Kit)中创建单星双DOA定位的仿真场景，提取仿真所需的不同时刻卫星轨道位置。STK中星链卫星轨道的6个参数中，偏航角、滚动角及俯仰角均为0°；卫星轨道倾角为53.134°；升交点赤经为329.986°；近地点角为64.114°。令单颗低轨卫星第1次DOA观测时刻的卫星星下点经纬度坐标为(115.772°, 29.217°)，卫星高度为545.064 km。第2次DOA观测的卫星位置随着观测间隔时间变化，可从STK软件中提取不同观测间隔的第2次DOA观测的卫星位置。

3.1 DOA观测误差

假定DOA阵列采用10×10的均匀面阵，DOA观测采用文献[13]的传播算子算法。令快拍数为200，信噪比为

0~20 dB时的DOA误差，采用均方根误差(Root Mean Square Error，RMSE)表示，如图2所示。从图2可看出，信噪比在20 dB时，DOA估计精确度为0.01°；信噪比为8 dB时，DOA估计精确度为0.05°；信噪比为6 dB时，DOA估计精确度为0.1°。

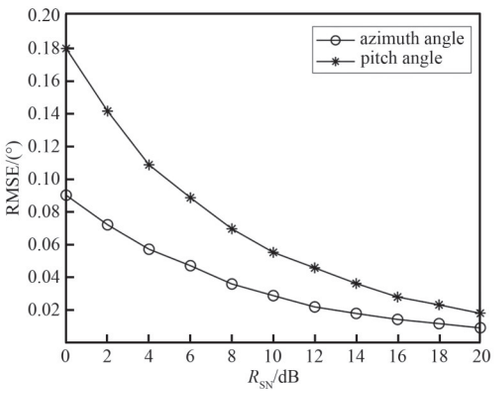

Fig.2 DOA error varying with the SNR
图2 DOA误差随信噪比变化

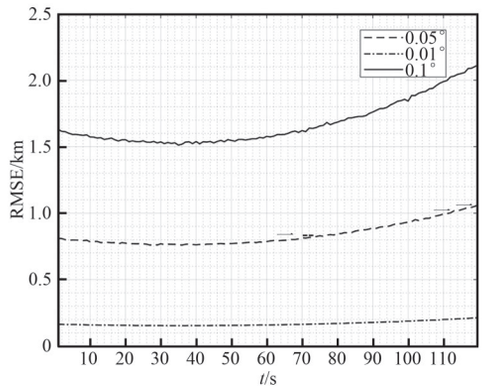

Fig.3 Variation of positioning error with observation interval under three DOA error conditions
图3 三种测向误差下的定位误差随观测间隔变化

3.2 单星双DOA定位的最佳卫星间隔

单星双DOA定位算法的定位误差影响因子有DOA测量误差、卫星位置误差、2次DOA观测的间隔时间等。图3为卫星位置误差为10 m，测向误差分别为0.01°、0.05°以及0.1°条件下的定位误差随观测间隔时间变化的仿真结果，图中横坐标为2次DOA观测间隔时间，跨度范围120 s，步进1 s。从图3中可以看出，定位误差均呈现出先下降后上升的趋势，最小误差分别出现在间隔时间为30 s(0.153 km)、27 s(0.759 km)、33 s(1.512 km)；且定位误差受观测间隔影响相对明显，变化幅度大。因此在3种不同的测向误差情况下，测向误差越大，不同卫星位置间隔对定位误差影响越大。而测向误差本身对定位误差的影响很明显，因此合理地选取第2次卫星观测时间和控制测向误差精确度可以提高定位精确度。

图4为测向误差为0.05°，卫星位置误差分别为10 m、100 m以及300 m情况下的定位误差仿真结果。目标源经纬度坐标为(115.778°,32.061 7°)，高程为0。为计算定位误差性能，采用蒙特卡洛仿真试验，令测向误差和位置误差模型为零均值高斯分布随机过程，进行1 000次统计，可得到每次观测后单星双DOA定位算法的均方差曲线图。

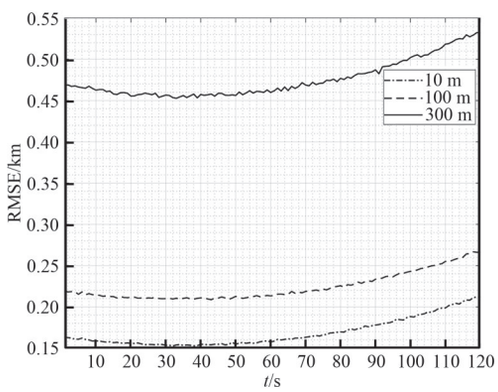

Fig.4 Variation of positioning error with observation interval under three satellite position error conditions
图4 三种卫星位置误差下的定位误差随观测间隔变化

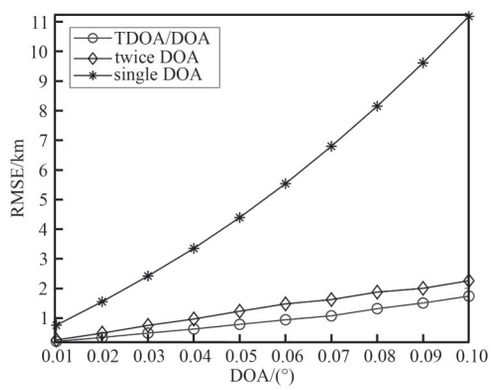

Fig.5 Positioning error under optimal observation interval
图5 最佳观测间隔时间下的定位误差

从图4中可以看出，定位误差均呈现出先下降后上升的趋势，误差最小分别出现在间隔时间为30 s (0.153 km)、32 s(0.209 km)、28 s(0.453 km)，这些是实现最小定位误差的最佳卫星间隔时间。3种不同卫星位置误差情况下，曲线的变化幅度几乎相同，可得出不同卫星位置误差在不同的卫星间隔情况下对定位误差的影响较小。

3.3 最佳观测间隔时间下的定位误差

在最佳观测间隔时间下，本文定位算法的定位误差特性如图5所示。为方便对比，图中给出了单DOA地表约束目标定位算法(文献[4])以及TDOA/DOA定位算法(文献[11])的定位误差。3种定位算法的仿真参数如下：目标源位置为(L,B,H)=(115.778°,32.061 7°,500 m)，初次DOA测量卫星位置为(L,B,H)=(115.772°,29.217°,545.064 km)，TDOA均方误差为100 ns，卫星位置误差为100 m。

从图4可以看出，卫星位置误差对定位误差影响较小，因此本文主要针对测向误差分析定位方法的性能。图5中，DOA误差为0.1°时，文献[11]定位误差为1.8 km，本文方法定位误差为2.1 km，文献[11]双星TDOA/DOA定位方法与本文定位方法的定位误差相差较小；而文献[4]的单DOA定位方法随着误差的增大，定位误差显著上升。单DOA定位方法只能定位地表目标，无法定位空中目标；TDOA/DOA定位方法需要双星同时可视目标下同步测量计算才能定位，验证了本文定位方法的性能。

3.4 定位误差GDOP分布

本仿真设置测向误差为0.05°，卫星位置测量误差为100 m，初始时刻卫星位置经纬度坐标为(115.772°,29.217°)，卫星高度为545.064 km。从图3中取出定位精确度最高的一次观测的卫星位置，其星下点的经纬度坐标为(118.373°,31.757°)，卫星高度为545.89 km。令观测量误差为零均值的高斯分布的随机误差，进行1 000次蒙特卡洛实验，统计得到目标点在不同经纬度的误差分布，如图6所示。从图6中可以看出，此定位方法在星下点附近时，定位误差最小；随着目标点经纬度的偏离，误差随之增大。

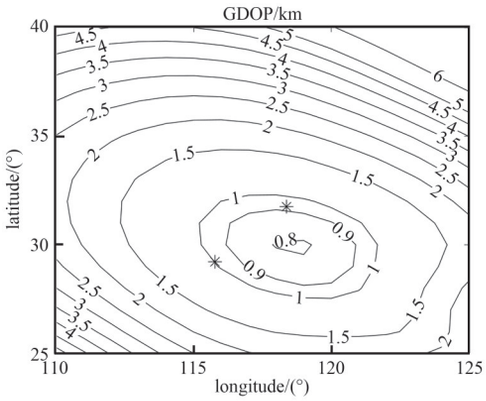

Fig.6 GDOP distribution of positioning error
图6 定位误差GDOP分布

4 结论

在单星定位体制背景下，本文提出一种基于单星双DOA的干扰源定位方法。分析了不同卫星间隔、测向误差以及卫星位置误差对干扰源定位精确度的影响，仿真验证了选取合理的卫星位置以及减小测向误差时，能够提高干扰源定位精确度。对比其他测向定位体制，本文方法克服了单DOA定位方法只能定位地表目标，无法定位空中目标，TDOA/DOA定位方法需在双星同时可视目标下同步测量计算才能定位的问题，同时具有较高的定位精确度。最后推导了单星双DOA定位算法的GDOP，验证了该定位体制的可行性。

参考文献：

[1] 秦红磊,张宇. 星链机会信号定位方法 [J]. 导航定位学报, 2023,11(1):67-73. (QIN Honglei,ZHANG Yu. Star link opportunity signal location method [J]. Journal of Navigation and Location, 2023,11(1):67-73.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20230110.

[2] QIAN Shen,CHENG Meng. DOA-estimations-based 3D geolocations using factor graphs[C]// 2023 IEEE the 11th International Conference on Information, Communication and Networks(ICICN). Xi'an, China: IEEE, 2023: 587-592. DOI: 10.1109/ICICN 59530.2023.10393513.

[3] 虎雷,李军,李永明,等. 单星定位中测向精度增强技术[J]. 数字技术与应用, 2018,36(7):117-118,120. (HU Lei,LI Jun,LI Yongming,et al. Direction finding accuracy enhancement technology in single satellite positioning[J]. Digital Technology and Application, 2018,36(7):117-118,120.) DOI:10.19695/j.cnki.cn12-1369.2018.07.63.

[4] 郭福成. 基于WGS-84地球模型的单星测向定位方法[J]. 宇航学报, 2011,32(5):1179-1183. (GUO Fucheng. Single-satellite direction-finding positioning method based on WGS-84 earth model[J]. Acta Astronautica, 2011,32(5):1179-1183.) DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2011.05.031.

[5] 徐英杰,张敏,张文俊,等. 基于G-N迭代的双星时频差定位融合算法[J]. 雷达科学与技术, 2022,20(1):92-97. (XU Yingjie, ZHANG Min, ZHANG Wenjun, et al. Double-satellite time-frequency difference location fusion algorithm based on G-N iteration[J]. Radar Science and Technology, 2022,20(1):92-97.) DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2022.01.014.

[6] 石荣,张伟,刘畅. 多星对地定位测速的合作与非合作模型对比[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(4):525-530. (SHI Rong,ZHANG Wei,LIU Chang. Star of positioning speed more cooperative and non-cooperative model contrast[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(4):525-530.) DOI:10.11805/TKYDA201604.0525.

[7] 狄慧,潘金波,张国强,等. 高低轨双星时频差无源定位精度[J]. 上海航天, 2018,35(3):54-59. (DI Hui,PAN Jinbo,ZHANG

Guoqiang,et al. High and low orbit dual satellite time-frequency difference passive positioning accuracy[J]. Shanghai Aerospace, 2018,35(3):54-59.) DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.03.009.

[8] 徐英杰,郭福成. 基于高斯-牛顿迭代的三星时差定位融合算法[J]. 航天电子对抗, 2020,36(5):14-17. (XU Yingjie,GUO Fucheng. Three-satellite time-difference positioning fusion algorithm based on Gauss-Newton iteration[J]. Space Electronic Warfare, 2020,36(5):14-17.) DOI:10.16328/j.htdz8511.2020.05.004.

[9] 周鹏. 搜救信号卫星时差定位技术的研究与实现[D]. 南京:南京邮电大学, 2022. (ZHOU Peng. Research and implementation of time difference positioning technology of search and rescue signal satellite[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.) DOI:10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.000936.

[10] LI Wanchun, CHEN Ruibin, GUO Yuning, et al. Closed form algorithm of double-satellite TDOA+AOA localization based on WGS-84 model[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019,32(10):2354-2367. DOI:10.1016/j.cja.2019.05.016.

[11] 周艳,屈德新,张更新. LEO卫星TDOA/DOA定位性能分析[J]. 电子技术应用, 2023,46(9):115-119. (ZHOU Yan,QU Dexin, ZHANG Gengxin. Analysis of LEO satellite TDOA/DOA positioning performance [J]. Application of Electronic Technology, 2023,46(9):115-119.) DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.223574.

[12] 曾巍,何泓毅,李浩林,等. 一种对空中目标的双星无源测向定位方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2022,54(增刊1):14-18. (ZENG Wei,HE Hongyi,LI Haolin,et al. A dual satellite passive direction finding method for aerial targets[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022,54(Suppl.1):14-18.) DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.S.003.

[13] 吴琴,陈建春,乜亮. 一种改进的基于传播算子的二维DOA估计算法[J]. 电讯技术, 2020,60(11):1325-1329. (WU Qin,CHEN Jianchun, MI liang. An improved algorithm for 2-D DOA estimation based on propagator method[J]. Telecommunication Technology, 2020,60(11):1325-1329.) DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.223574.

作者简介：

王　淳(1998-)，男，在读硕士研究生，主要研究方向为卫星定位.email:l0af1998@163.com.

屈德新(1966-)，男，博士，副教授，博士生导师，主要研究方向为卫星无源定位、卫星通信等.

张更新(1966-)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为卫星通信、卫星导航与测控、深空通信等.