

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.S.003

一种对空中目标的双星无源测向定位方法

曾巍, 何泓毅, 李浩林, 罗啸天, 方峰

(中国空间技术研究院卫星应用总体部, 北京 100094)

摘要: 针对单星无源测向对空中目标定位误差较大的问题, 提出了一种对空中目标的双星无源测向定位方法。通过仿真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影响对空中目标的定位的因素, 为后续卫星轨道的设计提出了建议。

关键词: 无源测向; 空中目标; 双星

中图分类号: TN97 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)S-0014-05

A Method for Air-Target Location Based on Passive Direction Finding with Double Satellites

ZENG Wei, HE Hongyi, LI Haolin, LUO Xiaotian, FANG Feng

(Institute of Spacecraft Application System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Since the passive direction measuring of a single electronic reconnaissance satellite outputs a large error when localizing air targets, this paper proposes a dual-satellite passive direction-finding method for air targets localization. The feasibility of the method for aerial target positioning is verified by simulation. Factors affecting the localization of aerial targets are analyzed combined with the double-satellite field of view. Suggestions for the design of subsequent satellite orbits are put forward as well.

Key words: passive direct finding; air-target; double-satellite

空中目标具有飞行速度快、价值高且威胁大等特点。而卫星对空中目标的辐射信号的探测可以不受国界与天气限制。因此, 卫星对空中目标的远距离探测具有较好的应用前景。

目前卫星的无源定位体制主要分为单星测向^[1-6]、双星时频差^[7-8]和三星时差定位^[9-11]等。这些体制主要针对地面或海面目标, 在解算目标位置时按照地面或海面假设了目标的高度。由于空中目标的高度与定位解算所设置的高度不一致, 将直接影响目标的水平定位精度, 且无法对空中目标进行识别和准确定位。

随着卫星系统的不断建设, 多颗卫星同时对同一区域开展无源探测窗口逐渐增多, 为多星联合对空中目标定位提供了条件。本文基于具有共视区

域的两颗无源测向卫星, 提出了双星无源测向对空中目标定位的方法。

1 单星无源测向定位模型

单星无源测向对空中目标定位, 不仅会受到卫星测向误差的影响, 还受到来自目标高度与解算定位的假设高度不一致的影响。图 1 为单星无源测向对空中目标的定位示意图。

在图 1 中, 空中目标 T 的地面投影为 B 点, 而单星无源测向对 T 的定位结果为直线 ST 的延长线与球面的交点 P 。由此可见, \widehat{BP} 为目标高度带来的对目标定位的投影误差。针对 \widehat{BP} 与目标高度、卫星轨道的高度的关系分析如图 2, 3 所示。

收稿日期: 2022-05-25; **修订日期:** 2022-06-20

通信作者: 曾巍, 男, 高级工程师, E-mail: zengwei_1982@sina.com。

引用格式: 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(S): 14-18. ZENG Wei, HE Hongyi, LI Haolin, et al. A method for air-target location based on passive direction finding with double satellites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S): 14-18.

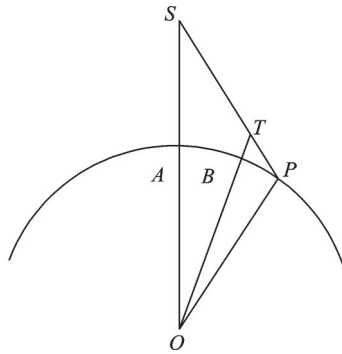


图1 单星无源测向对空中目标的定位示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-satellite passive direction finding for air-target positioning

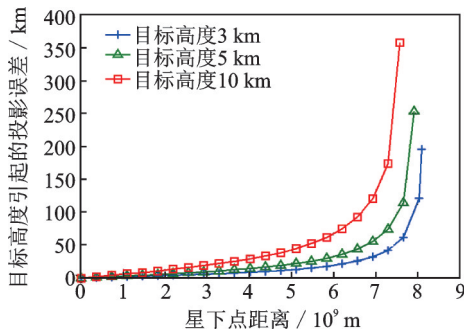


图2 600 km 轨道高度的卫星对不同高度的目标投影误差
Fig.2 Project errors of 600 km orbital satellite to target at different altitudes

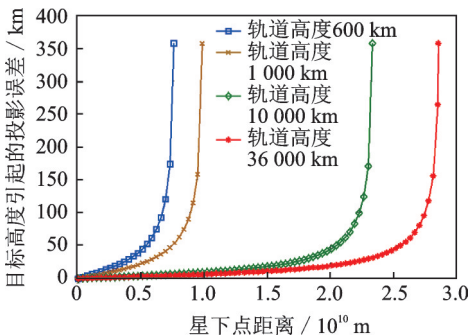


图3 不同轨道高度的卫星针对 10 km 高程的空中目标的投影误差
Fig.3 Project errors satellites with different orbital altitudes for 10 km high for air-targets

在图2中,目标的投影误差随着目标的高度升高而增加。从图3中可以看出,卫星轨道高度的变化对最大的投影误差影响基本一致。但在卫星测向误差不变的条件下,无源测向卫星的定位误差会随着卫星轨道高度的升高而增加。故无源测向卫星的轨道高度越高对定位误差的影响越大。因此,在未获取到目标的准确高度的情况下,仅依靠单星无源测向很难实现对空中目标的准确定位。

2 双星无源测向定位模型

考虑到单星无源测向对空中目标的局限性,故

利用双星对地面目标的交叉测向,实现对空中目标的定位,以解决单星对空中目标定位误差大的问题。双星对空中目标的定位模型见图4。

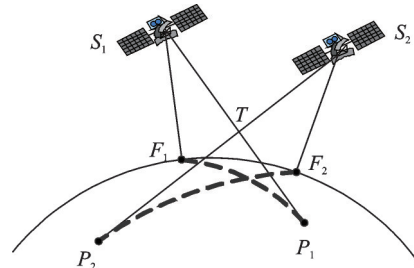


图4 双星无源测向对空中目标的定位示意图

Fig.4 Schematic diagram of double-satellite passive direction finding for air-target positioning

该方法基于两颗卫星对空中目标的无源测向数据,匹配两颗卫星分别对同一空中目标的侦察结果,提取对同一空中目标的测向结果,并计算对空中目标的交叉定位。在无测量误差的理想情况下,两颗卫星对空中目标的测向定位,即是求解两条直线在三维空间的交点。考虑到卫星对空中目标的测向误差和卫星的位置定位误差,两直线在三维空间中并不一定有交点。因此,将两颗卫星对空中目标的交叉测向定位的求解转换为对两条测向直线距离最短线段的中点的求解。

将卫星与空中目标置于地固坐标系,在不失一般性的情况下,将卫星对目标的测向分解为方位测向和俯仰测向,双星无源测向定位模型如图5所示。

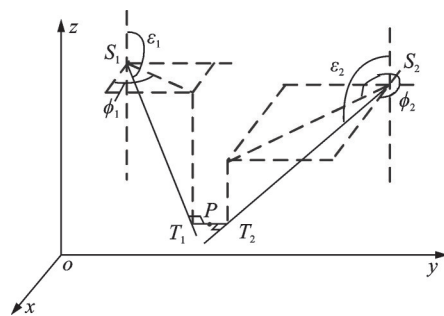


图5 对空中目标的双星无源测向定位的模型

Fig.5 Model of passive direction finding with double-satellite for air-target positioning

在图5所示的地固坐标系中,两颗卫星的位置分别为 $S_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $S_2(x_2, y_2, z_2)$, 两颗卫星对目标的俯仰测量角度分别为 ϵ_1 和 ϵ_2 , 方位测向角度为 ϕ_1 和 ϕ_2 。 $T_1(x_{k1}, y_{k1}, z_{k1})$ 和 $T_2(x_{k2}, y_{k2}, z_{k2})$ 为两个卫星测向直线上最近的两个点,即两条测向直线的最短距离线段。 P 为最短距离线段的中点,即交

叉测向定位所得到的空中目标位置。

将两颗卫星 S_1 、 S_2 的测向直线分别设为 l_1 、 l_2 ，如式(1,2)所示。

$$l_1: \begin{cases} x = x_1 + a_x k_1 \\ y = y_1 + a_y k_1 \\ z = z_1 + a_z k_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$l_2: \begin{cases} x = x_2 + b_x k_2 \\ y = y_2 + b_y k_2 \\ z = z_2 + b_z k_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 l_1 、 l_2 的方向余弦分别为 a_x 、 a_y 、 a_z 和 b_x 、 b_y 、 b_z 。假设 l_1 和 l_2 上任意两点的距离平方为 $f(k_1, k_2)$ ，则

$$f(k_1, k_2) = (x_1 + a_x k_1 - x_2 - b_x k_2)^2 + (y_1 + a_y k_1 - y_2 - b_y k_2)^2 + (z_1 + a_z k_1 - z_2 - b_z k_2)^2 \quad (3)$$

考虑到两条不平行的空间直线存在唯一最短距离线段，故可通过对 $f(k_1, k_2)$ 求导并计算获取两直线的最短距离线段。对 $f(k_1, k_2)$ 求导结果如下

$$\frac{df(k_1, k_2)}{dk_1} = \frac{df(k_1, k_2)}{dk_1} + \frac{df(k_1, k_2)}{dk_2} \quad (4)$$

其中

$$\frac{df(k_1, k_2)}{dk_1} = 2(a_x^2 + a_y^2 + a_z^2)k_1 - 2(a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z)k_2 + 2a_x(x_1 - x_2) + 2a_y(y_1 - y_2) + 2a_z(z_1 - z_2) \quad (5)$$

$$\frac{df(k_1, k_2)}{dk_2} = -2(a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z)k_1 + 2(b_x^2 + b_y^2 + b_z^2)k_2 - 2b_x(x_1 - x_2) - 2b_y(y_1 - y_2) - 2b_z(z_1 - z_2) \quad (6)$$

因此， $f(k_1, k_2)$ 所对应的最短距离线段的条件为

$$\begin{cases} \frac{df(k_1, k_2)}{dk_1} = 0 \\ \frac{df(k_1, k_2)}{dk_2} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)整理为

$$\mathbf{X} \times \mathbf{K} = \mathbf{Y} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 & -(a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z) \\ -(a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z) & b_x^2 + b_y^2 + b_z^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} -a_x(x_1 - x_2) - a_y(y_1 - y_2) - a_z(z_1 - z_2) \\ b_x(x_1 - x_2) + b_y(y_1 - y_2) + b_z(z_1 - z_2) \end{bmatrix}$$

因此，该方程组的解可通过 $\mathbf{K} = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{Y}$ 求得

到，并最终求得目标的定位结果，如式(9)所示。

$$P = (T_1 + T_2)/2 \quad (9)$$

3 仿真实验

3.1 可行性仿真

为验证双星无源测向对空中目标方法的可行性，采用蒙特卡洛方法对定位精度进行仿真验证。两颗卫星的夹角示意图如图6所示。

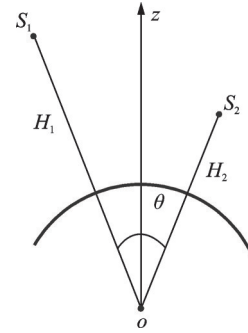


图6 星间夹角示意图

Fig.6 Schematic diagram of angle for two satellites

如图6所示，假设卫星位于坐标系的 z 方向，卫星的位置定位误差为 10 m (1σ)，卫星无源测向系统和姿态测量误差均统一分配到俯仰向和方位向，且两个方向的测量误差均为 0.1° (1σ)。两颗卫星的星间距以卫星与地心连线所形成的夹角表示为图6中的 θ 。设置高程为 10 km 的空中目标场景，按照两星高度为 500 km ，星间夹角为 20° ，来统计空中目标的定位误差，并将统计结果投影至直角坐标系 XOY 平面上。在 XOY 平面对 X 方向和 Y 方向分别按照步进 50 km ，设置空中目标的测试点位并计算 100 次定位结果，同时统计定位误差的均方根值。图7和8分别为空中目标的定位精度分布和在垂直方向上的定位精度分布。

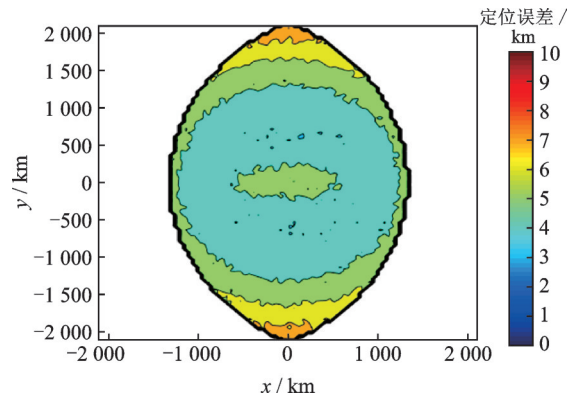


图7 双星无源测向对空中目标的定位误差图

Fig.7 Location error diagram of double-satellite passive direction finding for air-target

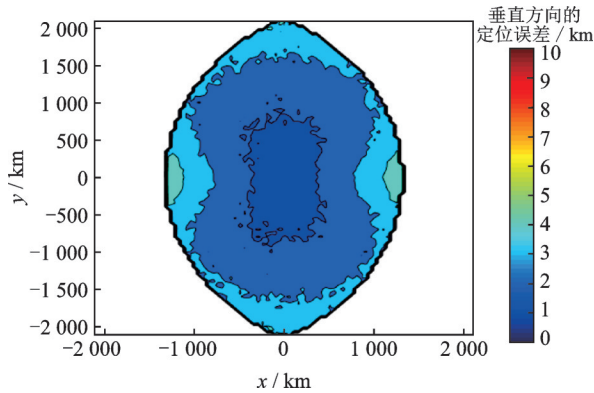


图8 双星无源测向对空中目标的垂直方向上的定位误差图

Fig.8 Location error diagram of double-satellite passive direction finding for air-target in the vertical direction

如图7所示,两颗卫星的共视区域内的定位结果均小于8 km,并且在两星共视的中心的环状区

域的定位效果最好。如图8所示,在垂直方向上的定位结果均小于4 km,某些区域可达到1 km。故当目标飞行高度较高时,可通过定位结果直接区分是否为空中目标。因此,两星无源测向定位对空中目标的定位方法是可行的。

3.2 影响因素

针对卫星高度、星间距和卫星测向误差等定位误差影响因素,通过不同组合条件下仿真,来研究双星无源测向定位方法对空中目标的定位效果。主要是统计两星的共视区域内定位误差的最大值、最小值和平均值,并计算共视区域面积。考虑到卫星的位置误差对目标的定位误差相对于其他影响因素较小,故未将卫星的位置误差纳入影响因素^[6],将卫星的位置误差均设置为10 m(1σ)。在不同条件下的统计结果如表1所示。

表1 不同条件下的定位误差结果

Table 1 Results of location errors with different conditions

条件序号	1	2	3	4	5	6
卫星1高度/km	500	500	500	1 000	500	500
卫星2高度/km	500	500	500	1 000	1 000	36 000
卫星测向误差/(°)	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1
星间夹角/(°)	20	10	20	20	20	20
误差最大值/km	7.99	23.06	41.05	14.07	23.00	1 592.3
误差最小值/km	3.83	1.97	19.33	4.08	3.93	35.35
误差均值/km	5.01	7.72	25.06	7.53	6.74	60.35
共视面积/km ²	$1.595\ 3\times 10^7$	$1.766\ 4\times 10^7$	$1.595\ 3\times 10^7$	$3.210\ 6\times 10^7$	$1.844\ 0\times 10^7$	$1.855\ 9\times 10^7$

从表1的不同条件的统计结果来看,卫星的高度和测向能力对空中目标的定位误差影响较大。星间夹角增大可以提高对空中目标的定位精度,但是星间夹角增大会导致两星的共视区域减小。两颗轨道高度不同的卫星对空中目标定位精度相比于两颗轨道均较低的卫星的定位精度要差。这主要是轨道高的卫星对目标的定位误差较大,导致与低轨卫星联合定位交叉定位误差增大。因此,高低轨卫星对空中目标定位的结果并不理想。

综合表1的统计结果,可以看出空中目标的定位精度的提高需要整体提高卫星的定位精度,故降低卫星高度、提高测向精度,并适当拉大星间夹角均是提高定位精度有效手段。同时,单独提高其中一颗卫星的定位精度,不会对空中目标定位起到理想的效果。

4 结 论

通过仿真验证,证明了双星无源测向定位方法可以有效解决对空中目标的准确定位问题。该方法简单易行,仅需两星的对地无源测向结果即可关联定位,在增加星间通信的情况下,可以实现星上实时处理,提高了检测的时效性。双星无源测向定

位不仅能提升对空中目标的定位精度,同时也改善了单星对地观测的边缘区域的测向定位精度,有利于卫星以及星座的整体定位效果。

在卫星星座轨道设计,建议考虑采用同轨跟飞的方式,在对空中目标的监视效果上可以保证相对稳定。对于高低轨卫星协同定位,由于定位效果和共视区域不稳定,不建议专门设计该类卫星。

随着卫星体系化、规模化的应用,后续将开展对双星测向联合定位的误差影响因素的全面量化分析,并开展多星多体制下的空中目标的联合定位方法的改进。

参考文献:

- [1] 刘海军,柳征,姜文利,等.基于星载测向体制的辐射源定位融合算法[J].系统工程与电子技术,2009,31(12):2875-2878.
LIU Haijun, LIU Zheng, JIANG Wenli, et al. Integration algorithm of emitter position based on satellites direction-finding systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009,31(12):2875-2878.
- [2] 李腾,郭福成,姜文利.星载干涉仪无源定位新方法及其误差分析[J].国防科技大学学报,2012,34(3):164-170.

- LI Teng, GUO Fucheng, JIANG Wenli. A novel method for satellite-borne passive localization using interferometer and its error analysis[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(3): 164-170.
- [3] 刘海丰,叶浩欢,柳征,等. 基于星干涉仪测向的辐射源定位综合算法[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(6): 110-125.
- LIU Haifeng, YE Haohuan, LIU Zheng, et al. Integration algorithm of emitter location based on satellite-borne interferometer[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(6): 110-125.
- [4] 徐义,郭福成,冯道旺. 一种单星仅测 TOA 无源定位方法[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 502-507.
- XU Yi, GUO Fucheng, FENG Daowang. A new satellite passive localization method using TOA measurement only[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2): 502-507.
- [5] 蒋东旭,谢登召. 单星频差无源定位技术原理及仿真[J]. 舰船电子对抗, 2017, 42(2): 17-20.
- JIANG Dongxue, XIE Dengzhao. Principle and simulation of single satellite frequency difference passive location technology[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2017, 40(2): 17-20.
- [6] 魏星,万建伟,皇甫堪. 基于长短基线干涉仪的无源定位系统研究[J]. 现代雷达, 2007, 29(5): 22-35.
- WEI Xing, WAN Jianwei, HUANGPU Kan. Study of passive location system based on multi base-line interferometers[J]. Modern Radar, 2007, 29(5): 22-35.
- [7] 张勇,盛卫东,郭福成,等. 低轨双星无源定位算法及定位精度分析[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(2): 188-192.
- ZHANG Yong, SHENG Weidong, GUO Fucheng, et al. Low orbit dual-satellites passive location algorithm and its precision analysis[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(2): 188-192.
- [8] 许丞梁. 低轨双星电子侦察融合定位新体制研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2015.
- XU Chengliang. Research on new methods of electronic reconnaissance fusion localization based on low orbit dual-satellite[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [9] 饶红霞. 多星时差定位的关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
- RAO Hongxia. Critical technology research on TDOA with several-satellite[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [10] 徐海源,吕守业,韩涛. 三星多普勒频差无源定位方法及定位精度分析[J]. 宇航学报, 2010, 31(7): 1832-1837.
- XU Haiyuan, LU Shouye, HAN Tao. Doppler frequency difference based three-satellite passive algorithm and its precision analysis[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(7): 1832-1837.
- [11] 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. Geolocation accuracy of high and low orbit satellites by using TDOA and FDOA[J]. Aerospace Shanghai, 2018, 35(3): 54-59.

(编辑:陈珺)