

利用测向信息消除高重复频率信号的时差定位模糊

任文娟^{①②③} 胡东辉^{①②} 丁赤飏^{①②} 牛 犇^{①②③}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100190)

摘要: 该文针对三星时差定位系统对高重复频率信号的定位模糊问题, 提出在主星增加干涉仪测向并结合测向信息解模糊的思路。由于干涉仪本身有可能出现测向模糊, 进一步提出了根据模糊测向信息解时差定位模糊的方法, 其在无测向模糊时同样适用。该方法定义了时差定位点的距离参数, 通过对其做门限检测去除虚假时差定位点, 从而有效地减少了模糊定位点数量, 改善了对高重频信号的定位模糊问题。

关键词: 三星时差定位; 高重复频率信号; 定位模糊; 干涉仪测向

中图分类号: TN 971

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-3003-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01618

Eliminating TDOA Location Ambiguity of High PRF Signal Based on Direction Information Acquired

Ren Wen-juan^{①②③} Hu Dong-hui^{①②} Ding Chi-biao^{①②} Niu Ben^{①②③}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: For the issue of location ambiguity of high PRF(Pulse Repetition Frequency) signal in three satellites TDOA (Time Difference Of Arrival) passive location system, a new method based on direction information acquired by adding interferometer on main satellite is presented in this paper. Considering ambiguity may occur in direction finding with interferometer, a method is proposed to eliminate location ambiguity by using ambiguous direction information, which is also practicable without ambiguity in direction finding. Firstly, the distance parameter defined in this method of every location is computed, and then false locations are eliminated by threshold detection. This method is able to reduce the number of ambiguous locations, and improve location ambiguity effectively.

Key words: Three satellites TDOA passive location; High PRF signal; Location ambiguity; Direction finding with interferometer

1 引言

现代战争中, 在越来越强调军事电子系统隐蔽攻击和硬杀伤功能的趋势下, 无源定位技术成为隐蔽探测和精确打击十分重要的手段。三星时差定位体制是一种以电子侦察卫星为平台的无源定位方式, 它利用三颗编队飞行的中低轨卫星, 通过测量某一时刻地(海)面同一个辐射源信号到达三星的时间差, 从而确定两个不同的等时差双曲面, 再加上地球面的约束, 实现对辐射源的实时精确定位。三星时差定位系统不仅具有时差定位体制的精度高、

定位快等优点, 还具有星载探测系统的覆盖范围广、安全性较高、不易受到干扰等优势, 具有很好的应用前景。

三星时差定位系统存在时差定位体制的一个固有问題, 即对高重复频率的辐射源存在定位模糊现象。目前, 解决三星时差定位模糊问題主要有以下两种途径^[1]: (1)多次测量, 根据真实目标位置在短时间内不可能突变而虚假点位置突变的原理消除定位模糊。(2)利用脉冲到达时差(TDOA)的直方图消除定位模糊。第(1)种方法计算量大, 所需处理时间长。文献[2]对这一方法进行了分析, 指出在积累时间内有可能存在多个定位点位置发散不明显, 此时将无法去除定位模糊。第(2)种方法需要多级直方图

统计, 处理时间也较长, 并且对系统测量时差的精度有较高的要求。文献[3]提出了一种由相关算法推出的新方法, 它适用于高重复频率的脉组变周期信号, 但该方法还存在一定的局限性, 即当高重复频率信号的重复周期在时差窗内出现公倍数时有可能出现多解的情况。除此之外, 针对地基时差定位系统, 文献[4]提出了结合测向去除模糊的方法, 该方法针对典型的 Y 型布站结构, 对空域进行合理划分, 依据主站测向信息减少了虚假时差对, 但是这一方法并不适用于三星时差定位系统。

本文针对三星时差定位系统, 提出在主星增加干涉仪测向去除高重复频率信号时差定位模糊的方法, 即结合测向定位结果, 利用多信息解定位模糊。然而在频率高端, 干涉仪本身也存在测向模糊, 针对此问题进一步提出了基于模糊测向结果解时差定位模糊的实现方法(无测向模糊时同样适用)。该方法基于测向定位结果, 定义了时差定位点的距离参数, 通过门限检测可以明显地减少甚至完全消除虚假时差定位点。若处理后剩下多个定位点, 则可以通过多次测量利用位置的发散性进行后续处理。本文方法通过距离筛选, 大大减小了后续处理计算量, 并缩短了分辨真实位置所需时间。

2 定位模糊的产生和现有消除方法

三星时差定位系统由一个主星 S_0 和两个辅星 S_1 , S_2 组成, 以主星 S_0 和辅星 S_1 的脉冲配对过程说明模糊时差的产生。假设主星 S_0 和辅星 S_1 的星间距为 D_1 , 辐射源 T 到达辅星 S_1 和主星 S_0 的时间差为 Δt_1 , 由三角形基本原理知:

$$\Delta t_1 = \frac{|S_1 T - S_0 T|}{c} \leq \frac{D_1}{c} \quad (1)$$

式(1)称为时差窗, 时差窗长度为 $W_1 = 2D_1/c$ 。

以主星脉冲为基准, 在时差窗内寻找与之配对的辅星脉冲。设辐射源的脉冲重复周期为 PRI, 当 $\text{PRI} \geq W_1$ 时, 时差窗内只有一个脉冲, 此时脉冲的配对是唯一的, 如图 1 所示。当 $\text{PRI} < W_1/2 + |\Delta t_1|$ 时, 时差窗内就会出现多个脉冲, 使得脉冲配对不唯一, 如图 2 所示。

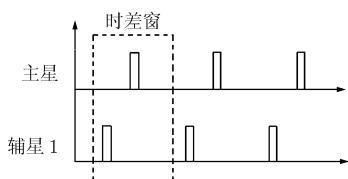


图 1 低重复频率信号的脉冲配对

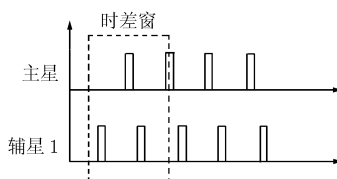


图 2 高重复频率信号的脉冲配对

同理, 主星 S_0 和辅星 S_2 的脉冲配对也可能出现模糊时差。模糊时差使得时差配对后对同一个辐射源形成多组配对时差, 经过定位计算会产生定位模糊。

针对三星时差定位系统, 现有的消除定位模糊的方法主要是利用发散特性去除虚假定位点^[2]。由于卫星运动, 虚假定位点位置是逐渐发散的, 若对每个定位点累积多秒定位结果, 则可根据位置的发散性去除虚假定位点。该方法需要对所有定位点进行多秒定位, 计算量大, 所需时间长。当虚假定位点的发散特性不明显时, 需要累积较长的时间才能做出判断。下面通过仿真说明该方法的弊端。

图 3 表示的是对某个高重复频率辐射源的所有定位点进行持续 30 s 的定位结果(圆圈内的点为真实位置), 图 4 表示的所有 28 个定位点的发散度曲线, 此处计算的发散度为定位点位置的均方根误差。从图 4 可以看出某个虚假定位点和真实定位点的发散度十分接近, 若此时需要提交真实位置时, 则无法做出判断, 分辨真实定位点需要累积更长的时间。

3 利用测向信息消除时差定位模糊的方法

本文方法需要在主星上增加正交基线干涉仪测量信号的到达方向, 对于某个发生时差定位模糊的高重频辐射源, 根据其测向信息可以获得测向定位结果。在理想情况下, 和测向定位结果重合的是真实的时差定位点。但在实际情况中, 每个定位点都有定位误差, 并且由于干涉仪对频率高端信号会出现相位跳周现象, 从而可能出现测向模糊^[5]。由于测向模糊和时差模糊的机理不同, 故虚假时差定位点和虚假测向定位点分布不同, 但真实时差定位点和真实测向定位点总是十分接近的。下面首先分析两个真实定位点满足的关系, 然后在此基础上推导出了本文的方法。

3.1 理论基础

由上述分析可知, 真实时差定位点和真实测向定位点是源自真实的测量值, 它们十分接近, 由于不同位置处的定位误差不同, 单纯用两点距离的大

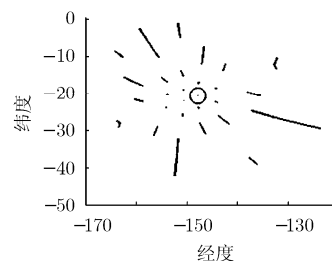


图 3 所有定位点的轨迹曲线

小来表征接近程度显然是不合适的, 下面结合定位误差分析真实定位点间距离具有的特征。

假设目标的真实位置为 T , 测量误差为随机高斯白噪声, 定位误差用 3 个正交方向上方差和的均方根来表示。某时刻辐射源的真实时差定位点为 P , 定位误差为 E ^[6], 真实测向定位点为 Q , 定位误差为 F ^[7], 以 $d(P_1, P_2)$ 表示点 P_1 和 P_2 之间的欧氏距离。设概率 p 条件下等效的误差半径和定位误差之间的比值为 η ^[8], 则 T 和 P 之间的距离 $d(T, P)$ 以及 T 和 Q 之间的距离 $d(T, Q)$ 分别以概率 p 满足。

$$d(T, P) \leq \eta \cdot E, \quad d(T, Q) \leq \eta \cdot F \quad (2)$$

满足式(2)的基础上, 由三角定理可得

$$d(P, Q) \leq \eta \cdot (E + F), \quad \text{即} \quad \frac{d(P, Q)}{E + F} \leq \eta \quad (3)$$

式(2)只是式(3)成立的充分条件, 故式(3)成立的概率要大于 p^2 , 不同的 η 对应不同的成立概率。可见真实时差定位点和测向定位点之间距离以一定的概率小于等于某个值, 此值与目标位置处的时差定位误差和测向定位误差有关系。

3.2 方法推导

由于通过配对分选可将多目标分解为对每个目标单独处理, 所以在此只分析单目标的情况。假设某时刻得到某个辐射源的 N 个时差定位点 P_1, P_2, \dots, P_N 及在各点处计算的均方根误差 E_1, E_2, \dots, E_N , 和 M 个测向定位点 Q_1, Q_2, \dots, Q_M 及在各点处计算的均方根误差 F_1, F_2, \dots, F_M , $M = 1$ 时为无测向模糊的情况。

由于相位测量误差远远小于模糊相位的间隔 2π ^[5], 即真实测向定位点对应的测量误差远远小于虚假测向定位点, 并且时差定位误差小于测向定位误差, 所以和真实时差定位点最接近的是真实的测向定位点。故只需要计算每个时差定位点和与它最近的测向定位点间的距离, 并利用式(3)来筛选真实定位点, 为此下面定义了时差定位点的距离参数 ρ 。

对于任意时差定位点 P_j , 定义它的距离参数为

$$\rho_j = D_j / (E_j + F_{g_j}) \quad (4)$$

其中 $D_j = d(P_j, Q_{g_j}) = \min_{1 \leq n \leq M} d(P_j, Q_n)$, 即 Q_{g_j} 是离它最近的测向定位点, F_{g_j} 是 Q_{g_j} 点的定位误差。以式(3)中的 η 为设距离门限对 ρ_j 做门限检测。若满足距离准则:

$$\rho_j \leq \eta \quad (5)$$

则认为该定位点 P_j 可能为真实定位点, 否则认为其为虚假定位点并剔除, 不同的 η 对应不同的筛选正确率。

距离门限 η 越小, 剩下的点数越少, 但真实点被剔除的概率越大。 η 也不能取得过大, 因为此时虽然真实点不太可能被剔除, 但剩下的定位点会比较多。需要说明的是, 由于定位均方根误差是在定位位置处估算的, 并不是目标真实位置处的定位误差, 所以在选取距离门限时需加以考虑, 可适当选得大一些, 以保证正确率。

3.3 处理过程

在实际应用中, 卫星对某个高重复频率目标可以连续观测多秒, 假设每一秒做一次定位处理。利用测向信息消除高重复频率信号定位模糊的处理过程主要分为两步, 简要描述如下:

(1)对第1秒得到的所有时差对和角度组合进行定位, 计算每个定位点的距离参数, 仅保留满足距离准则的时差定位点。若满足要求的点只有一个, 则该点为真实位置, 结束处理; 若满足要求的点不止一个, 则转入第(2)步的处理。

(2)从第2秒开始, 对与上一秒剩下的定位点关联上的时差对或新的时差对做定位处理, 并仅根据定位点的发散度做判断, 直至提取真实定位点, 在此不再具体论述。

和图3, 图4相同仿真条件下, 图5表示的是用本文方法在第1秒对距离参数做门限检测后的结果, 圆和方框圈住的是满足距离准则的时差定位点(方框表示真实位置)。可见根据门限检测后剩下5个定位点, 明显减少了定位模糊数量。图6显示的是剩下时差定位点的发散度曲线, 与图4比较, 可以看出干扰真实定位点的虚假定位点在上面处理中被剔除, 根

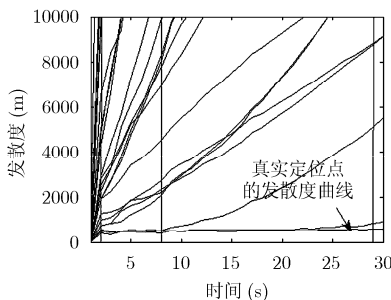


图 4 所有定位点的发散度曲线

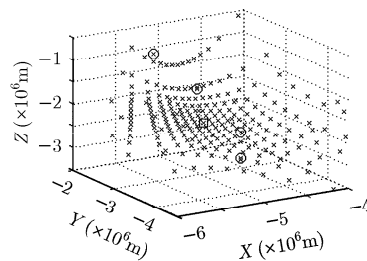


图 5 门限检测后剩下的定位点

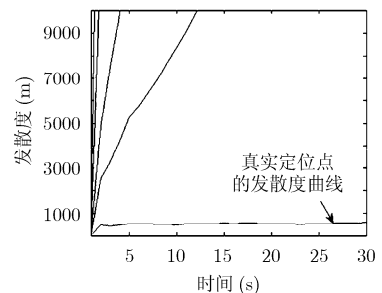


图 6 剩下时差定位点的发散度曲线

据发散度曲线能够快速有效地分辨出真实位置。

综上所述,由于处理过程只对第1秒的测向数据进行定位计算,故新增的运算量很小,但是可以大大减小定位模糊数,并给后续处理运算量和性能上带来好处。

4 仿真分析

假设三颗卫星分布于两个轨道高度均约为 1000 km 的轨道上,主星和辅星 1 位于同一轨道,星间距约为 130 km,辅星 2 分别和主星及辅星 1 的星间距保持基本相同,约在 60 km~140 km 之间变化。设到达时间的测量误差为 60 ns,卫星位置误差为 30 m。在卫星运行的第 2500 s,星下点经纬度位置为 $(-149.9^\circ, -20.3^\circ)$,对距离星下点 2000 km 范围内辐射源进行仿真试验。

4.1 性能验证

假设增加的干涉仪基线长度 $l=1$ m,接收信号的信噪比 $\text{SNR}=10$ dB(信噪比 SNR 和相位误差 $d\phi$ 的关系采用文献[7]给出的近似公式 $d\phi=1/\sqrt{2\text{SNR}}$),距离门限 $\eta=2.5$ 。随机生成高重复频率目标(包括位置和参数),在距星下点 2000 km 范围内随机生成目标位置,在 4000 Hz~9000 Hz 之内随机生成目标的重复频率,在 1 GHz~6 GHz 之内随机生成目标的载频。

(1)有效减少了模糊数量 为了验证本文方法确实能明显减少定位的模糊数量,考察门限检测后剩下点数和原来点数的差别。用 N 表示时差定位模糊数, k 表示处理后剩下的定位点个数, k/N 越小,模糊数减少的越显著。做 100 次蒙特卡洛试验,结果如表 1 所示,其中 r 指的是小于等于对应 k/N 的概率。从表中可以看出,0.5 对应的概率为 99%,即基本上所有处理都能去除一半以上的定位点。0.3 对应的概率为 85%,即去除三分之二以上定位点的概率为 85%。可见,本文方法确实能够明显减少定位模糊数量。

表 1 模糊数减少程度对应的概率

k/N	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
r	0.09	0.50	0.85	0.96	0.99	1

(2)缩短了消除模糊的时间 下面比较本文方法和利用发散性的方法在一定时间内正确分辨真实点的概率。假设当某定位点发散度大于最小发散度 2 倍以上时,认为该点为虚假定位点。做 50 次蒙特卡洛试验,不同累积时间 t 秒能够正确分辨出真实点的概率如表 2 所示,可以看出,本文方法的分辨正确率有很大的提高,6 s 的分辨正确率为 90%,8 s

表 2 分辨正确率的比较

t (s)	4	6	8	10
利用发散性的方法	0.20	0.40	0.54	0.74
本文方法	0.68	0.90	0.94	0.94

的分辨正确率达到 94%。可见,由于本文方法能够显著减少定位模糊数,从而减小了运算量,大大提高了在一定时间内正确分辨真实点的概率,缩短了分辨时间。

4.2 参数影响

下面分析干涉仪基线长度 l ,信噪比 SNR 以及检测门限 η 等参数对系统性能的影响。随机生成一个高重频辐射源的经纬度位置为 $(-157.8^\circ, -30.6^\circ)$,设重频为 6000 Hz,载频为 2 GHz,通过仿真可知该辐射源产生约 15 个时差定位点。由于这些参数直接影响门限检测结果,故在此处考察门限检测后剩下的时差定位点个数 k 和保留真实定位点的概率 r 。

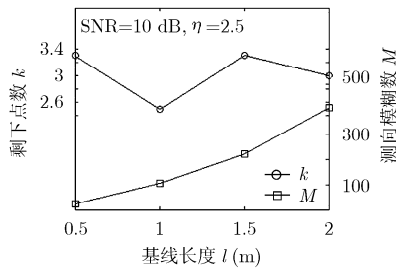
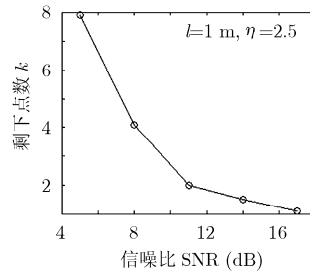
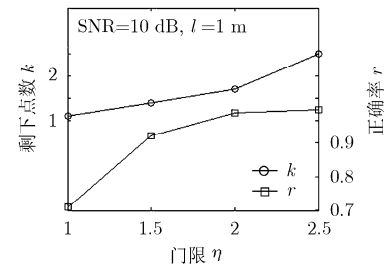
图 7 表示的是不同基线长度 l 下测向模糊数量 M 和剩下点数 k 的变化情况,每个基线长度取值下做 50 次蒙特卡洛实验,取其统计平均值。可见 l 对 k 的影响是比较小的,且 k 的变化不具有明显规律。但是从表中可以看出 l 越大, M 越大,即产生的测向模糊越多,增加的计算量也越大。所以基线长度不应选的过大,具体使用时还需考虑天线阵形等实际因素。

图 8 表示的是不同信噪比 SNR 条件下剩下点数 k 的变化情况,每个信噪比取值下做 50 次蒙特卡洛实验,取其统计平均值。信噪比直接影响着相位测量精度,进而影响测向及定位精度^[7]。可见, SNR 越小, k 越大,即剩下的定位点数越多。但是在较低信噪比 5 dB 条件下,相比原来 15 个时差定位点,本文方法仍将定位模糊数减少了将近一半。

图 9 表示的是不同距离门限值 η 下剩下点数 k 和保留真实点的概率 r 的变化情况,每个门限值下做 100 次蒙特卡洛实验,取其统计平均值。可以看出, r , k 都随 η 的增大而增大,且 η 在合理范围时 k 的变化并不太大,因此在选择 η 时可适当倾向于获得高的正确率。

5 结束语

三星时差定位系统是电子情报侦察的一种重要手段,但是该系统对高重复频率信号辐射源存在定位模糊,而快速、准确去除定位结果中虚假定位点一直是一个比较难以解决的问题。本文提出了基于

图 7 l 和 k , M 的关系图 8 SNR 和 k 的关系图 9 η 和 k , r 的关系

模糊测向信息消除时差定位模糊的方法, 并通过大量实验分析了本文方法的性能和系统参数的选取及影响。仿真结果表明, 该方法显著减少了定位模糊数, 减小了运算量, 大大提高了正确分辨真实点的概率, 缩短了分辨时间。

参考文献

- [1] 梁景修. 高重复频率雷达精确快速定位的方法[J]. 电子对抗技术, 2005, 20(5): 19-22.
Liang Jing-xiu. Quick and accurate location of high PRF radar[J]. *Electronic Warfare Technology*, 2005, 20(5): 19-22.
- [2] 李涛, 姜文利, 周一宇. 高重复频率信号三星座时差定位研究[J]. 电子对抗技术, 2004, 19(4): 7-11.
Li Tao, Jiang Wen-li, and Zhou Yi-yu. TDOA location with high PRF signals based on three satellites[J]. *Electronic Warfare Technology*, 2004, 19(4): 7-11.
- [3] 张宏元, 穆贺强. 基于相关算法消除高重复频率信号的时差定位模糊[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(5): 816-818.
Zhang Hong-yuan and Mu He-qiang. Eliminating TDOA location ambiguity about HPRF signal based on correlation algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(5): 816-818.
- [4] 钟琿, 陈守稳. 时差与测向结合解高重复频率信号定位模糊的方法[J]. 现代防御技术, 2008, 36(5): 108-112.
Zhong Hui and Chen Shou-wen. Approach combining with radar direction finding of solving ambiguous location with high PRF signal[J]. *Modern Defence Technology*, 2008, 36(5): 108-112.
- [5] 陆安南. 基于模糊测向结果的单星无源定位法[J]. 电子对抗, 2002, (3): 6-11.
Lu An-nan. Passive location by single satellite based on ambiguous direction finding[J]. *Electronic Warfare*, 2002, (3): 6-11.
- [6] 符为. 对地面目标的时差定位精度研究[J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23(6): 17-20.
Fu Wei. DTOA location precision of target on the ground[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2008, 23(6): 17-20.
- [7] 陆安南. 单星无源测向定位及精度分析[J]. 电子科学技术评论, 2000, (1): 23-26.
Lu An-nan. Location and precision analysis of direction-finding based on single satellite [J]. *Review of Electronics Science and Technology*, 2000, (1): 23-26.
- [8] 胡来招. 无源定位[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 25-30.
Hu Lai-zhao. Passive Locating[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 25-30.

任文娟: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为被动定位系统信号与信息处理。

胡东辉: 男, 1970年生, 副研究员, 研究方向为 SAR 信号处理、SAR 定标及雷达对抗等。

丁赤飏: 男, 1969年生, 博士生导师, 研究员, 研究方向为信号与信息处理、系统仿真、新体制 SAR 系统及雷达对抗等。