



采用空间稀疏性的单星无源定位方法

郝才勇, 刘恒

(国家无线电监测中心深圳监测站, 广东 深圳 518120)

摘要:针对传统单星定位中,参数估计和目标定位被分为两个独立阶段造成定位不优化的问题,提出了一种采用空间稀疏性的单星无源定位方法。该方法通过持续测量目标信号的多普勒频率,利用干扰源位置在地面分布的空间稀疏性,通过构建干扰信号的多普勒频率与地理位置满足的凸优化问题来实现干扰源定位。该定位方法利用了干扰信号的累积时间和干扰源位置的空间分布信息,在一个阶段中完成卫星定位。仿真证实该方法在单星定位中可得到较高的定位精度。

关键词:卫星干扰源定位;多普勒频率;空间稀疏性;凸优化

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016124

Method of single satellite passive geolocation using spatial sparsity

HAO Caiyong, LIU Heng

Shenzhen Station of State Radio Monitoring Center, Shenzhen 518120, China

Abstract: Traditional single satellite geolocation is divided into two separate phases: parameter estimation and target positioning, which causes non-optimal localization. To address this issue, a method of single satellite passive geolocation using spatial sparsity was presented. After continuously measuring the Doppler frequency of the target signal and using the sparse distribution of the interference on the ground, a convex problem achieving geolocation through establishing the relation between Doppler frequency and target position of the interfering signal was introduced. The method leveraged cumulative time and spatial distribution of the interference and geolocation was completed in one phase. The simulations confirm that the proposed method can get high accuracy in single satellite geolocation.

Key words: satellite interference geolocation, Doppler frequency, spatial sparsity, convex optimization

1 引言

卫星通信经常受到地面辐射源的干扰,全球每年大约发生上百起较为严重的卫星干扰事件,而且随着卫星通信业务的扩展、用户数量的增加以及无人值守站的增多,卫星干扰问题将越来越严重^[1]。目前解决卫星通信干扰问题时最普遍使用的技术是多星定位,如双星时差/频差定位、

三星时差定位等^[2-5]。多星定位的优点是定位精度高、定位速度快,但要求定位系统必须找到满足定位条件的邻星。可用邻星必须满足非常严格的限制条件:轨道位置与受干扰卫星(主星)接近(通常C频段间隔为 10° 之内,Ku频段间隔为 7° 之内);信号所在频段、极化方式与主星一致;地面上行覆盖范围与主星一致;在干扰信号对应的频段上没有在用信号;已知邻星转发器的本振频率等。这导致了在



某些干扰情况下很难找到甚至没有可用邻星,从而无法完成干扰源定位。

单星定位是解决多星定位系统中邻星限制条件严格和降低系统复杂度的一种方法。传统的单星定位方法主要利用了卫星信号在时间状态过程中的多普勒频率变化特性,通过测量不同时刻接收信号的多个多普勒频率,从而根据干扰源地理位置与多普勒频移之间的对应关系来进行定位^[6,7]。传统的卫星干扰源定位方法(包括单星定位和多星定位)在实现过程中一般分为两个独立的阶段:信号参数估计阶段和目标干扰源定位阶段。在信号参数估计阶段,首先根据接收的卫星下行信号,测量目标信号的多普勒频率,然后通过计算互相关函数来估计信号的到达频率差(FDOA),该过程至少需要获得两组 FDOA;在目标干扰源定位阶段,首先利用上一阶段获取的 FDOA 和已知的卫星星历,建立多普勒频差与干扰源在地面位置对应关系的方程组,然后采用最小二乘算法在地面卫星覆盖区域中搜索,从而得到干扰源的最可能位置^[8,9]。

然而,传统的定位方法并不优化。因为在信号参数估计阶段,假设前提是目标干扰源可能存在于卫星信号在地面覆盖区域的任意位置,因此每次对信号进行参数测量都是一个独立过程。在目标干扰源定位阶段,对目标干扰源的定位计算中仅使用了信号参数估计阶段中传递来的多普勒频率参数,而没有对定位过程进行系统性分析,没有考虑到干扰源的地理位置在整个定位过程中具有唯一性。事实上,在每次参数测量和目标定位中,目标干扰源都位于地面同一位置,而且在多次测量过程中多普勒频率的变化具有时间连续性,传统的定位方法并没有利用这些先验信息。

为了优化定位过程,提高单星干扰源定位的精度,提出了采用空间稀疏性的单星定位方法。该方法的优势在于,对于地面静止干扰源,所有的信号测量针对的是相对处在同一位置的干扰源。网格化干扰源所在的地面区域,不单独进行参数估计,能够将不同时刻的信号从发射到接收作为系统整体来考虑。本文首先介绍了采用空间稀疏性单星无源定位的原理与数学模型,然后阐述了定位算法,通过持续测量目标信号来得到多个 FDOA,并采用信号的空间稀疏性来建立信号模型,进而构造凸优化问题以求解干扰源位置,最后通过系统仿真证实该方法在单星定位中可得到较高的定位精度。

2 定位原理与数学模型

该定位方法通过建立位于地面静止位置的干扰辐射源与测量得到的卫星信号在多个时间状态下的多普勒频率的关系,实现卫星干扰无源定位。由于卫星相对地面的运动产生了多普勒频移,在不同的观测时刻,卫星的运动速度不同,从而导致卫星接收信号的频率各不相同,而干扰源的地理位置影响着多普勒频率^[10]。将多普勒频率与干扰源位置结合起来就可以得到二者之间满足的约束条件。定位原理如图 1 所示。

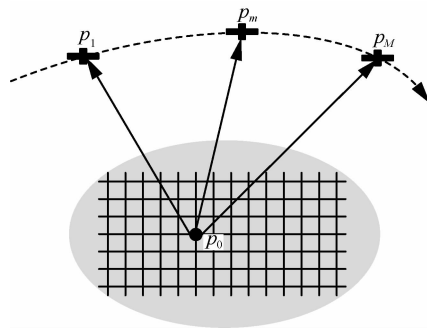


图 1 定位原理

对于位于地面的静止干扰源,将其可能存在的区域网格化。选取 M 个观测时刻,即卫星处于 M 个不同的位置,分别接收干扰源发射的信号。卫星的位置和速度可从星历中获取,信号传播速度已知(为电磁波在空中的传播速度),信号接收频率可以通过地面卫星监测站测量,要求解未知干扰源的位置(由于信号传播过程中卫星下行链路已知,因此只需考虑信号的上行链路传播)。

该定位方法利用了卫星接收信号频率中的多普勒频率参数,为了简化模型,假设卫星接收的信号仅为载波信号,可通过倍频等方法提取调制信号中的载波信号^[11]。第 m 个观测时刻的接收信号可表示为:

$$r_m(t) = a_m s(t) e^{j2\pi f_m t} + w_m(t) \quad (1)$$

其中, a_m 是卫星接收信号的传输衰减系数, $s(t)$ 是干扰源发射的载波信号复包络, $w_m(t)$ 是零均值高斯白噪声, f_m 是第 m 个观测时刻的多普勒频率。信号的多普勒频率 f_m 与信号干扰源的地面位置相关,可表示为:

$$f_m = f_{c,m} \left(1 + \frac{\vec{v}_m \cdot \vec{u}_m}{c} \right) \quad (2)$$

$$\vec{u}_m = \frac{\vec{p}_m - \vec{p}_0}{\|\vec{p}_m - \vec{p}_0\|} \quad (3)$$

其中, $\vec{u}_m$ 为从干扰源到第 m 个观测时刻卫星位置的单位矢量, f_{cm} 为干扰信号的载波频率, 是已知量; $\vec{v}_m$ 和 $\vec{p}_m$ 分别为卫星在第 m 个观测时刻的速度和位置矢量; c 是电磁波在空中的传输速率; $\vec{p}_0$ 为未知干扰源在地面的位置矢量。

在每个观测时刻, 接收机截取信号并采样, 假设信号的采样长度为 N , 那么可以将卫星接收的信号表示为:

$$r_m = a_m L_m s + W_m \quad (4)$$

$$\begin{aligned} r_m &\triangleq [r_m(t_1), \dots, r_m(t_N)]^T \\ s &\triangleq [s(t_1), \dots, s(t_N)]^T \\ w_m &\triangleq [w_m(t_1), \dots, w_m(t_N)]^T \\ L_m &\triangleq \text{diag}\{e^{-j2\pi f_m t_1}, \dots, e^{-j2\pi f_m t_N}\} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 下标 m 表示在第 m 个观测时刻对应的信号参数。 r_m 为卫星接收的干扰信号, 采样个数为 N ; s 为干扰源发射的载波信号; $\text{diag}\{x_1, \dots, x_n\}$ 表示 $\{x_1, \dots, x_n\}$ 的主对角矩阵; f_m 为信号的多普勒频率。

将干扰源在地面可能存在的区域(通常为卫星在该频段的覆盖范围)进行网格划分, 为每个网格分配一个布尔值 $z_{x,y}$, 如果干扰源位于该网格内, 设置 $z_{x,y}$ 为 1; 在其他情况下设置为 0, 完成网格划分。这样, $z_{x,y}$ 可以表示为:

$$z_{x,y} = \begin{cases} 1, & \text{网格中包含干扰源} \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (6)$$

为了减少计算量, 网格划分过程采取递进细化的方法, 步骤如下:

(1) 将该频段的卫星覆盖范围划分为粗粒度大网格, 执行初步定位, 确定干扰源所在的粗略网格;

(2) 将该粗略网格进一步划分为较小的子网格, 再进行定位;

(3) 重复步骤(2), 直到定位结果满足精度要求。

进行网格化处理之后, 第 m 个观测时刻的接收信号可表示为:

$$r_m = \sum_x \sum_y z_{x,y} a_{m,x,y} L_{m,x,y} s_{x,y} + w_m \quad (7)$$

其中, $L_{m,x,y}$ 表示干扰源位于网格 (x,y) 的多普勒频率参数。为了方便计算, 将二维向量改写为一维列向量, 式(7)可表示为:

$$r_m = \sum_{k=1}^K z_k a_{m,k} L_{m,k} s_k + w_m \quad (8)$$

下面建立信号满足的定位约束条件。假设载波信号 s_k 为确定性未知信号, 可通过最大似然估计得到信号 s_k 的表达式^[12]。从式(8)得到的信号观测量为:

$$Q(s_k) = -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{m=1}^M \|r_m - a_{m,k} L_{m,k} s_k\|^2 \quad (9)$$

则相对于第 m 个观测时刻的传输信号为:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_k &= [(a_m L_{m,k})^H a_m L_{m,k}]^{-1} (a_m L_{m,k})^H r_m \\ &= L_{m,k}^H a_{m,k}^H r_m \end{aligned} \quad (10)$$

考虑到所有 M 个观测时刻(干扰源位于网格 k), 载波信号 $\hat{s}_k$ 表示为:

$$\hat{s}_k = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M L_{m,k}^H a_{m,k}^H r_m \quad (11)$$

假设所有的接收信号均来自于位于网格 k 的同一个干扰源, 定义 ϕ_k 为相对所有 M 时刻的多普勒频率算子:

$$\phi_k \triangleq \begin{bmatrix} a_{1,k} L_{1,k} \\ a_{2,k} L_{2,k} \\ \vdots \\ a_{M,k} L_{M,k} \end{bmatrix}_{MN \times N} \quad (12)$$

定义 $\psi_k, k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 为 $MN \times 1$ 向量, 包含所有 M 时刻从位于网格 k 的干扰源发射的信号为:

$$\psi_k \triangleq \phi_k \times \hat{s}_k \quad (13)$$

考虑到所有的网格, 定义矩阵 Ψ 包含所有的向量 $\Psi_k(k=1, \dots, K)$ 为:

$$\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_K]_{MN \times K} \quad (14)$$

相对于不同观测时刻的卫星, 干扰源始终位于地面上同一位置。因此, 可以联合所有观测时刻的接收信号来估计出干扰源位置。由式(11)~式(14)可将接收信号表示如下:

$$r = \Psi x + W \quad (15)$$

$$\begin{aligned} r &\triangleq [r_1^T, \dots, r_M^T]_{MN \times 1}^T \\ z &\triangleq [z_1, \dots, z_M]_{N \times 1}^T \\ w &\triangleq [w_1^T, \dots, w_M^T]_{MN \times 1}^T \end{aligned} \quad (16)$$

其中, r 是所有 M 个观测时刻接收信号的向量, z 是网格的空间稀疏向量, W 是高斯白噪声。

经过这样的转换, 就将卫星干扰源定位问题转化为了求解向量中的最稀疏非 0 元素的位置。最后, 通过建立一个凸优化问题来求解:

$$\begin{aligned} \min & \|z\|_1 \\ \text{s.t.} & \|\Psi \times z - r\|_2 \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)是一个经典的凸优化问题^[13], 可使用 BPIC (basis pursuit with inequality constraint)^[14]来求解, 即完成定位方程计算。



3 定位仿真

为了评估提出的单星无源定位方法的可行性,使用蒙特卡洛(Monte Carlo)仿真来计算不同信噪比下的定位误差分布。如果定位误差在可接受的范围内,说明该定位方法具有可行性。根据长期以来的卫星干扰定位处理经验,卫星干扰上行地球站定位若在 150 km 范围内,通常可作为可接受的定位结果。

假设干扰源的实际位置坐标为 p_0 ,第 n 次实验计算的目标位置为 $\hat{p}_0(n)$,蒙特卡洛实验次数为 N_{exp} ,计算定位点和目标位置的均方根误差(root mean square error, RMSE)来描述精度性能^[15],RMSE 定义为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{exp}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{exp}}} \|\hat{p}_0(n) - p_0\|^2} \quad (18)$$

定位实验参数设置见表 1。

表 1 定位参数

参数	数值
信号频率/MHz	6 025
采样带宽/kHz	256
信号调制方式	QPSK
信号传输速度/(m·s ⁻¹)	3×10 ⁸
卫星高度/km	35 780
初始区域半径/km	300
干扰源位置/(km,km)	(150,150)
蒙特卡洛实验次数/次	200

根据定位算法,使用表 1 中设置的实验参数进行仿真,计算得到定位结果及误差分布。图 2 和图 3 表示信噪比一定(分别为 7 dB 和 20 dB)时定位仿真得到的位置与干扰源实际位置距离的分布情况(X 和 Y 分别为地面二维平面的两个坐标轴,定位点分布在 XY 平面上),表明在信噪比低时,定位点的收敛聚合度明显比信噪比高时低。图 4 表示在不同信噪比下的定位误差变化趋势。从仿真结果可以看出,当干扰信号信噪比接近 6 dB 时,定位误差迅速降低;信噪比高于 11 dB 时,定位误差降低到 150 km 之内,为可接受的定位结果。进一步提高信噪比,定位精度可稳定在 80 km 左右,且定位点的收敛度较高,说明该方法能实现精度相对较高的单星无源定位。

另外,卫星的摄动^[16]会造成卫星相对速度较小,因而单星定位难以实现较高的定位精度。其定位精度依赖于卫星速度、测频精度、测频次数(累积时间)、网格划分粒度。

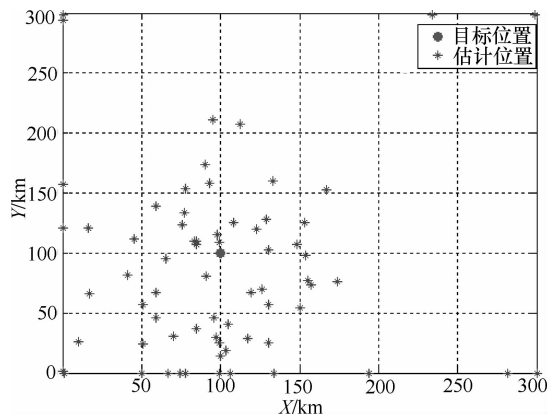


图 2 定位点的位置分布(SNR=7 dB)

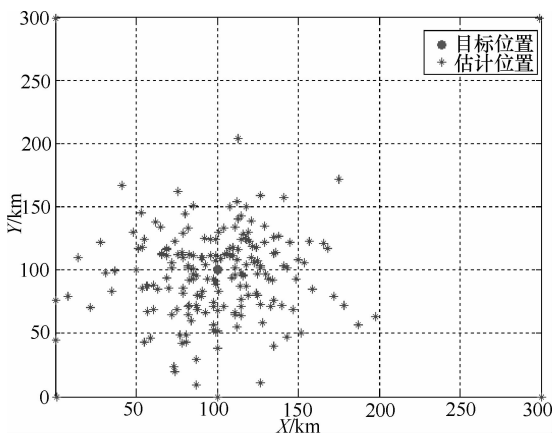


图 3 定位点的位置分布(SNR=20 dB)

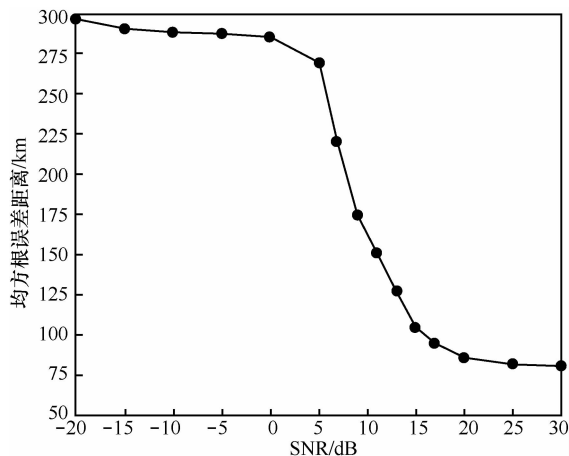


图 4 不同信噪比下定位均方根误差距离

4 结束语

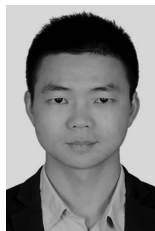
通过利用卫星干扰源位置在地面分布的空间稀疏性对信号定位,能够将不同时间状态下的观测信号从发射到接收作为整体来考虑,从而避免了将定位过程分为参数估计

和目标定位两个独立的阶段造成的定位不优化问题。本文提出的单星定位方法通过持续采集卫星接收的目标信号,建立信号在不同观测时刻的多普勒频率和干扰源位置的关系,然后通过网格化初始区域形成稀疏向量。将干扰源定位问题转化为求解该向量的最稀疏解的位置,这是一个经典的凸优化问题,可用很多成熟的算法来解算。由于该方法采用的是单星模式,很难实现高精度卫星干扰源定位,但是可用于双星定位、三星时差定位时无法找到满足定位条件的邻星的情况,或对定位精度要求不是很高的情况。

参考文献:

- [1] HAWORTH D, SMITH N, BARDELLI R, et al. Interference localization for EUTELSAT satellites-the first European transmitter location system [J]. International Journal of Satellite Communications, 1997, 15(3): 155-183.
- [2] HARWORTH D, SMITH N, BARDELLI R, et al. Interference localization for EUTELSAT satellites-the first European transmitter location system [J]. International Journal of Satellite Communications, 1997, 15(3): 155-183.
- [3] 郝才勇,刘恒,刘宏立. 基于 TDOA 的卫星干扰源定位方法的研究[J].重庆邮电大学学报(自然科学版), 2012, 24(4): 442-446.
HAO C Y, LIU H, LIU H L. Research on satellite interference location based on TDOA [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2012, 24(4): 442-446.
- [4] 李文华. 三星构型设计与时差定位精度研究 [J]. 宇航学报, 2010, 31(3):701-706.
LI W H. Research on configuration of tri-satellites and location precision of TDOA [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31 (3): 701-706.
- [5] SMITH W W, STEFFES P G. Time delay techniques for satellite interference location system [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1989, 25(2): 224-230.
- [6] 陆安南,孔宪正. 单星测频无源定位法 [J]. 通信学报, 2004, 25(9): 160-168.
LU A N, KONG X Z. Passive localization from frequency measurements by single satellite[J]. Journal on Communications, 2004, 25(9): 160-168.
- [7] 陆安南,杨小牛. 单星测频测相位差无源定位 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2):244-247.
LU A N, YANG X N. Passive location from the combined set of frequency and phase difference measurements by single satellite[J]. Systems Engineering & Electronics, 2010, 32(2): 244-247.
- [8] BARDELLI R, HAWORTH D, SMITH N. Interference localization for the EUTELSAT satellite system [C]//IEEE Globecom'95, November 13-17, 1995, Raffles, Singapore. New Jersey: IEEE Press, 1995: 1641-1651.
- [9] 夏畅雄,叶尚福. 卫星干扰源定位系统中的融合定位技术[J]. 电波科学学报, 2008, 23(6): 1106-1110.
XIA C X, YE S F. Transmitter location system using fusion technology [J]. Chinese Journal of Radio and Science, 2008, 23(6): 1106-1110.
- [10] 瞿文中,叶尚福,孙正波. 卫星干扰源精确定位的位置校正算法[J]. 电波科学学报, 2005, 20(3): 342-346.
QU W Z, YE S F, SUN Z B. Algorithm of position calibration for satellite interference location [J]. Chinese Journal of Radio and Science, 2005, 20(3): 342-346.
- [11] CHEN J. Carrier extraction of QPSK baseband digital demodulation [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 1991, 13(4): 544-547.
- [12] AMAR A, WEISS A J. Localization of narrowband radio emitters based on doppler frequency shifts [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(11): 5500-5506.
- [13] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. London: Cambridge University Press, 2004.
- [14] DUARTE M F, ELDAR Y C. Structured compressed sensing: from theory to applications [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2011, 59(9): 4053-4085.
- [15] YANG K, WANG G, LUO Z Q. Efficient convex relaxation methods for robust target localization by a sensor network using time differences of arrivals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(7): 2775-2784.
- [16] 肖峰. 人造地球卫星轨道摄动理论 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997.
XIAO F. Artificial satellite orbit perturbation theory[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1997.

[作者简介]



郝才勇(1985-),男,国家无线电监测中心深圳监测站工程师,英国伦敦帝国理工学院访问学者,主要研究方向为卫星监测与无线电定位。



刘恒(1962-),男,国家无线电监测中心深圳监测站高级工程师、站长,主要研究方向为无线电监测与信号分析。