



基于可移点波束天线的干扰源单星定位方法

钟锡健, 张更新, 谢智东

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要:针对地球同步轨道通信卫星,提出了一种基于可移点波束天线的干扰源单星定位方法。该方法通过天线方向图函数建立干扰源的位置指向与天线增益的映射关系,通过多次移动可移点波束获取干扰信号的强度,结合可移点波束各中心指向信息,建立干扰信号链路计算的方程组,利用粒子群搜索算法对其进行求解,可得到干扰源的指向,结合星历及地球信息求出干扰源的经纬度。采用上述干扰源定位方法对地面干扰源进行了定位仿真,结果表明了该方法的有效性。

关键词:干扰源定位;可移点波束;粒子群优化;方向图模型

中图分类号: TN911

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016190

Interference source single satellite location method based on movable antenna with spot beam

ZHONG Xijian, ZHANG Gengxin, XIE Zhidong

College of Telecommunication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China

Abstract: An interference source single satellite location method based on movable antenna with spot beam was proposed for GEO satellites. In this method, a mapping relationship between orientation of interference and antenna gain is first established with the function of antenna pattern. Equations were established to calculate the interference signal link combining the orientation information of center of movable spot beam and the intensity of interference signal which derived from moving the beam several times. The orientation of interference was obtained by solving the equations with the help of particle swarm optimization (PSO). Then the longitude and latitude of the interference source could be calculated, jointly considering the ephemeris and the information of the earth. We made a positioning simulation of the ground interference source with the proposed method. The results validate the effectiveness of this method.

Key words: interference source location, movable antenna with spot beam, particle swarm optimization, pattern model

1 引言

由于卫星应用的迅速发展,卫星轨道、频率日趋拥挤,大小地球站数量激增,卫星所处的电磁环境日益恶化。世

界范围内,每年发生的卫星受到干扰的事件不计其数,造成了诸多恶劣影响以及经济损失。因此,如何及时快速定位干扰源,是卫星系统发展应用过程中需要逐步解决的问题。参考文献[1]中提出一种基于多波束天线的单星干扰源

收稿日期: 2016-03-29;修回日期: 2016-07-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61401507, No.91338201)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61401507, No.91338201)

定位方法,利用干扰信号入射方向与天线指向的夹角不同则增益不同的特点,结合地球模型与天线增益函数,建立方向图地面投影模型,建立定位方程组,实现干扰源单星定位。但其弊端在于,直接将天线增益与地理位置相结合,定位出干扰源的地理位置,若其中一个环节出现问题,整个定位系统都受到牵连,问题无法单独处理;并且其非线性方程组的解法采用传统方法,求解效率和精度不够高。

本文将对参考文献[1]的方法进行改进,针对卫星通信系统为单个全球波束并配有可移点波束的情形,采用先定向后定位的方法,利用可移点波束实现对干扰源的精确定位。

2 基于可移点波束天线的干扰源单星定位原理

当卫星受到干扰时,及时对干扰信号参数进行认知,利用可移点波束的灵活性,在全球波束覆盖范围内进行交叉扫描,根据可移点波束接收干扰信号强度的强弱变化,对干扰源位置进行初步估计,接收干扰信号较强的横纵交叉点可视为估计位置;再将可移点波束指向初步估计的干扰源位置附近,多次改变中心指向实现对干扰信号强度的多次测量,得到干扰信号强度的空间分布。其定位原理如图 1 所示。

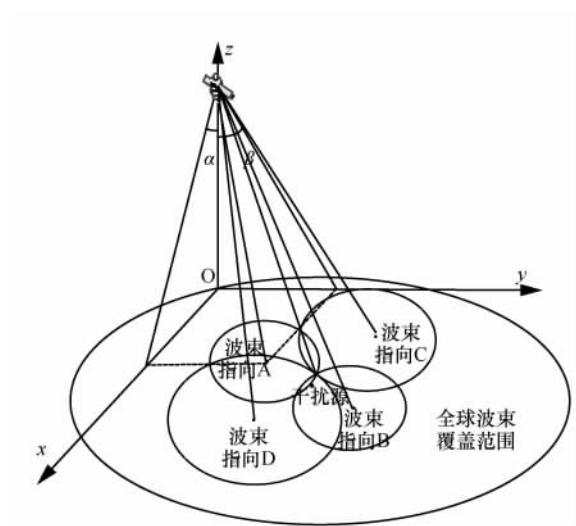


图 1 定位原理示意

由于干扰源和卫星的连线与可移点波束各中心指向的夹角不同,导致天线增益不同,故干扰源信号在可移点波束指向不同时接收到的信号强度不同。选取接收信号强

度较强且中心指向位置成等边三角形的波束,如图 1 中波束指向 A、B、C,它们接收干扰信号的信号强度曲线相交于干扰源位置。

这里定义两个角:如图 1 所示, α 为任意指向位置在平行于卫星运行方向上与星下点的夹角; β 为任意指向位置在垂直于卫星运行方向上与星下点的夹角。其中, x 轴的正方向为卫星运行方向,原点 O 为星下点。

由于波束的指向可以由 α 角和 β 角表示,而增益的大小为关于 α 角和 β 角的函数,故根据这 3 个波束接收到的信号强度,可以列出方程组,根据方程组即可求出干扰源位置相应的 α 角和 β 角。具体定向过程如下。

(1) 根据可移点波束天线方向图函数,将天线增益与 α 角和 β 角之间建立联系,构建天线方向图的指向模型。

(2) 利用可移点波束的灵活性,在全球波束覆盖范围内进行交叉扫描,根据可移点波束接收干扰信号的强弱变化,对干扰源位置进行初步估计。

(3) 将可移点波束移至初步估计的干扰源位置附近,多次改变中心指向,实现对干扰信号强度的多次测量,选取接收信号强度较强且中心指向位置成等边三角形的波束,得到干扰信号强度的空间分布。

(4) 结合系统空间链路损耗和天线方向图函数,可得关于可移点波束各指向所接收干扰信号的链路方程,亦即信号强度曲线方程组。

(5) 通过计算定向方程组可以获得干扰源指向,结合星历信息及地球信息,求得干扰源的经纬度。

2.1 天线方向图模型

参考文献[2]提出一种辐射源与波束之间的波束增益 G 近似计算方法。该方法的思想是通过辐射源发射信号的人射方向与波束中心之间夹角的大小确定增益大小,波束增益 G 为:

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

其中,点波束中心增益 $G_0 = \frac{\pi^2 D^2 \eta}{\lambda^2}$, J_1 和 J_3 分别是 1 阶和 3 阶第 1 类贝塞尔函数, $u = 2.071 \ 23 \sin \theta / \sin \theta_{3\text{dB}}$ 。 θ 表示辐射源发射信号入射方向与点波束中心之间的夹角, $\theta_{3\text{dB}} = 70 \cdot \frac{\lambda}{D}$ 是天线增益相对波束中心 3 dB 衰减处所对应的角度, D 为天线口径, λ 为辐射信号的波长, η 为天线效率。

为了使任意指向与增益相关联,将 θ 转换为关于 α 角



和 β 角的函数, 转换计算式为:

$$\theta = 2\cos\varphi_0 \cdot \cos\varphi \left[\frac{1}{\cos^2\varphi_0} + \frac{1}{\cos^2\varphi} - (\tan\alpha_0 - \tan\alpha)^2 - (\tan\beta_0 - \tan\beta)^2 \right] \quad (2)$$

其中, $\varphi = \arctan\sqrt{\tan^2\alpha + \tan^2\beta}$, $\varphi_0 = \arctan\sqrt{\tan^2\alpha_0 + \tan^2\beta_0}$, α 和 β 为辐射源信号任意入射指向, α_0 和 β_0 为波束中心指向。

由于具体的可移点波束天线参数无从获取, 现假设其增益特性如式(1)所述, 若将波束中心指向的 (α_0, β_0) 设为 $(5, 0)$, 卫星天线口径 D 设为 12.5 m, 信号的载波频率设为 2 GHz, 即信号波长 λ 为 0.15 m, 天线增益与指向关系如图 2 所示。

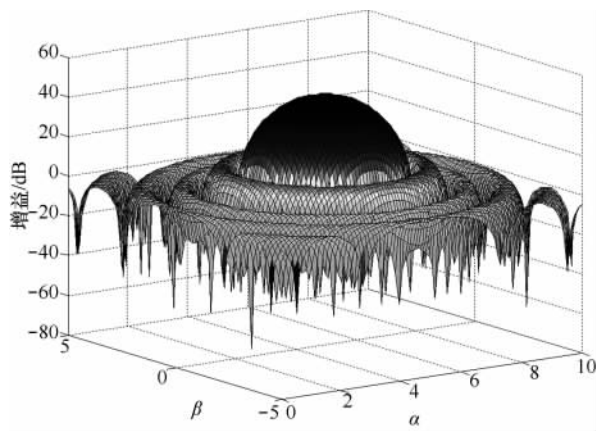


图 2 天线增益与指向关系

2.2 定位方程组的建立

如图 1 所示, 假设波束指向 A、波束指向 B 和波束指向 C 接收干扰信号强度为 $u_i (i=A, B, C)$, 信号在传播过程中的损耗假设为 L_i , 地面干扰源的初始辐射强度设为 t , 干扰源对应星上各波束获得的增益为 $G_i = G(\alpha, \beta) (i=A, B, C)$, 则关于波束各指向接收的干扰信号的链路方程可以表示为 (单位为 dB):

$$\begin{cases} [t] - [L_i] + [G_A(\alpha, \beta)] = [u_A] \\ [t] - [L_i] + [G_B(\alpha, \beta)] = [u_B] \\ [t] - [L_i] + [G_C(\alpha, \beta)] = [u_C] \end{cases} \quad (3)$$

化简式(3), 得:

$$\begin{cases} [G_A(\alpha, \beta)] - [G_B(\alpha, \beta)] - ([u_A] - [u_B]) = 0 \\ [G_A(\alpha, \beta)] - [G_C(\alpha, \beta)] - ([u_A] - [u_C]) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

记:

$$\begin{cases} f_1 = [G_A(\alpha, \beta)] - [G_B(\alpha, \beta)] - ([u_A] - [u_B]) \\ f_2 = [G_A(\alpha, \beta)] - [G_C(\alpha, \beta)] - ([u_A] - [u_C]) \end{cases} \quad (5)$$

求解非线性方程组可看作寻优过程, 式(5)中求解 α, β , 相当于寻找 $f = |f_1| + |f_2|$ 取最小值时的 α, β 。考虑到高效性以及精确性, 使用粒子群算法^[3,4]对非线性方程组寻优求解。得到干扰源的指向后, 结合星历信息及地球信息, 即可求得干扰源的经纬度。

2.3 粒子群算法

2.3.1 算法介绍

粒子群优化 (PSO) 算法最早由 Knedy 和 Eberhart^[5] 在 1995 年提出, 是一种群体智能的寻优算法。算法首先在可行解空间中初始化一群粒子, 每个粒子都代表极值优化问题的一个潜在最优解, 用位置、速度和适应度 3 项指标表示粒子特征, 适应度值由适应度函数计算得到, 其值的好坏表示粒子的优劣。粒子在解空间中运动, 通过跟踪个体极值位置 P_{best} 和群体极值位置 G_{best} , 更新个体位置。粒子每更新一次位置, 就计算一次适应度值, 并且通过比较新粒子的适应度值和个体极值、群体极值的适应度值, 更新个体极值位置 P_{best} 和群体极值位置 G_{best} 。

假设在一个 D 维的搜索空间中, 由 n 个粒子组成的种群 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其中, 第 i 个粒子表示一个 D 维量 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$, 代表第 i 个粒子在 D 维搜索空间中的位置, 亦代表问题的一个潜在解。根据目标函数即可计算出每个粒子位置 X_i 对应的适应度值。第 i 个粒子速度为 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})^T$, 其个体极值位置为 $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})^T$, 种群的群体极值位置为 $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gD})^T$ 。

在每次迭代过程中, 粒子通过个体极值位置和群体极值位置更新自身的速度和位置, 即:

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (6)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (7)$$

其中, ω 是惯性权重^[6], 空间维度 $d=1, 2, \dots, D$; 粒子种群数 $i=1, 2, \dots, n$; k 为当前迭代次数; V_{id} 为粒子的速度; c_1 和 c_2 是非负常数, 称为加速因子; r_1 和 r_2 是分布在 $[0, 1]$ 区间的随机数。为防止粒子的盲目搜索, 一般将其位置和速度限制在一定区间内。

2.3.2 算法搜索步骤

步骤 1 初始化一个规模为 n 的粒子群, 设定初始位置和速度。

步骤 2 计算每个粒子的适应度函数值。

步骤 3 对每个粒子将其适应度和其经历过的最好位置的适应度函数值进行比较, 若较好, 则将其作为当前的最好位置。

步骤 4 比较每个粒子的适应度值和全局经历过的最好位置的适应度值,若较好,则将其作为当前全局的最好位置。

步骤 5 按照 $V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k)$ 和 $X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1}$ 改变粒子的速度和位置。

步骤 6 如果满足终止条件,则输出解;否则返回步骤 2。

通过以上步骤,求解 $f=|f_1|+|f_2|$ 的最小值,得到干扰源指向 (α, β) 。影响粒子群搜索算法精度的因素有权重值选取、迭代次数等,可根据定向精度和计算量的需要进行适当调整。

3 仿真分析

以地球同步轨道卫星为例,将星下点的经纬度设为 $99.85^\circ\text{E}, 0^\circ\text{N}$, 卫星轨道半长轴 $42\,164.137\text{ km}$ 、偏心率 0° 、轨道倾角 0° 。如图 1 所示,假设波束指向 A、波束指向 B 和波束指向 C 的经纬度分别为 $(130.064\,6^\circ, 0^\circ)$ 、 $(133.537\,4^\circ, 11.015\,9^\circ)$ 、 $(144.927\,7^\circ, 3.720\,5^\circ)$, 干扰源的经纬度为 $(137.892\,7^\circ, 5.843\,5^\circ)$, 位置指向 (α, β) 为 $(6.000\,0^\circ, 1.000\,0^\circ)$ 。在理想情况下,波束 3 个指向测量干扰信号强度即真实信号强度,没有掺杂用户信号,地球假设为标准的球形。

运用粒子群搜索算法进行搜索求解,将迭代次数设置为 100,种群规模设置为 20,惯性权重 $\omega(k) = \omega_{\text{start}}(\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}})(T_{\text{max}} - k)/T_{\text{max}}$, 其中, $\omega_{\text{start}} = 0.9$, $\omega_{\text{end}} = 0.4$, k 为当前迭代次数, T_{max} 为最大迭代次数。其适应度值随进化代数(迭代次数)的变化如图 3 所示,求解的指向结果为 $(6.000\,000\,042\,133\,911^\circ, 1.000\,000\,422\,840\,491^\circ)$, 与真实指向十分接近。

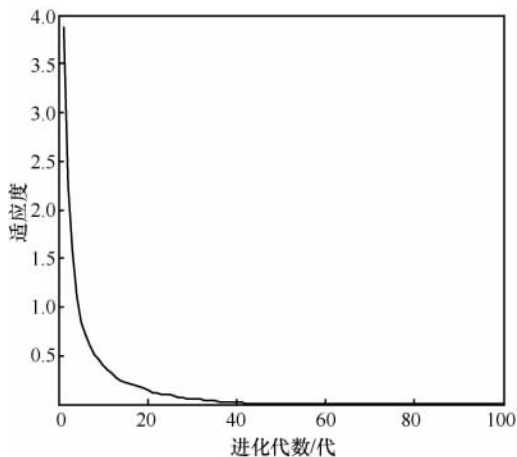


图 3 适应度值与进化代数的关系

为了表明粒子群算法的优越性,将其与基于随机搜索的蒙特卡洛搜索算法^[7]进行对比。其中,蒙特卡洛搜索算法的表达式如下:

$$(\alpha, \beta)_{\text{ML}} = \arg \left[\min_{\alpha, \beta \in D} \sum_{i=1}^2 |f_i(\alpha, \beta)| \right] \quad (8)$$

式(8)中, D 为搜索范围, $\arg$ 表示在限定范围内随机产生 (α, β) 。

分别运用粒子群搜索算法和蒙特卡罗搜索算法进行搜索求解,仿真次数设置为 100 次,取平均值得到定位结果,定位误差随搜索次数变化如图 4 所示。

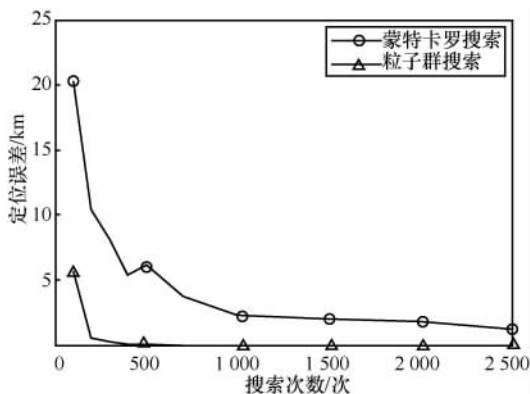


图 4 粒子群与蒙特卡罗搜索定位精度对比

从得出的结果来看,在相同搜索次数的情况下,粒子群搜索算法相比于传统的蒙特卡洛搜索算法,求解精度高、收敛快,原因在于粒子群算法具有很强的搜索方向性和局部搜索能力;而蒙特卡洛搜索算法基于无方向性的随机搜索,方法简单但搜索效率低。当搜索次数达到 500 次,粒子群算法搜索得到的解精度已经非常高,接近精确解,在这种情况下,其定位精度主要受其他因素影响而不受求解方程组精度的影响。

4 结束语

本文针对卫星通信系统为单个全球波束并配有可移点波束的情况,提出了基于可移点波束的干扰源单星定位方法。该方法中的定位方程组形式简单,运用的粒子群算法求解精度高、可实现性强;无需额外的星载设备用于干扰源定位,节约了卫星发射成本,降低了星上资源消耗。但是本文定位结果是在理想情况下得到的,在实际应用中,影响定向精度的因素非常多,如实际应用中天线增益为非理想函数,干扰信号强度测量会存在误差,卫星会存在波束指向误差和轨道位置偏差等。在下一步的研究中,将对



这些误差因素具体分析,寻求提高定位精度的修正方案。另外,由于波束的移动会产生较大的时延,若干扰源的信号强度是随时间变化的,则测量的干扰信号强度不能直接代入定位方程组计算,需要做出一定的补偿,补偿方案也属于下一步的研究内容。

参考文献:

- [1] 余强, 谢智东, 张更新. 一种基于星载多波束天线的单星干扰源定位方法[J]. 通信技术, 2009, 48(1): 37-41.
YU Q, XIE Z D, ZHANG G X. Single satellite interference location based on satellite-borne multi-beam antenna [J]. Communications Technology, 2009, 48(1): 37-41.
- [2] CAINI C, CORAZZA G E, FALCIASECCA 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.
- [3] 刘建华. 粒子群算法的基本理论及其改进研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.
LIU J H. The research of basic theory and improvement on particle swarm optimization [D]. Changsha: Central South University, 2009
- [4] 欧阳艾嘉, 刘利斌, 乐光学. 求解非线性方程组的混合粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(9): 33-37.
OUYANG A J, LIU L B, YUE G X. Hybrid particle swarm optimization for solving systems of nonlinear functions [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(9): 33-37.
- [5] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// The 1995 IEEE International Conference on Neural Network, November 27-December 1, 1995, Perth, Australia. New Jersey: IEEE Press, 1995: 1942-1948.
- [6] PANDEY B B, DEBBARMA S, BHARDWAJ P. Particle swarm

optimization with varying inertia weight for solving nonlinear optimization problem [C]//The 2015 International Conference on EESCO, Jan 24-25, 2015, Visakhapatnam, India. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-5.

- [7] 朱平. 拟蒙特卡罗方法的若干研究与应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

ZHU P. The studies and applications of quasi Monte Carlo methods[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

[作者简介]



钟锡健(1991-),男,解放军理工大学通信工程学院硕士生,主要研究方向为干扰源定位。



张更新(1967-),男,解放军理工大学教授,主要研究方向为卫星通信、卫星导航等。



谢智东(1984-),男,解放军理工大学讲师,主要研究方向为卫星通信抗干扰。