

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.007

引用格式:魏梅英,孙浩,李辉宇,等.静止轨道卫星自动化干扰定位方案[J].电讯技术,2017,57(1):39-44.[WEI Meiyong, SUN Hao, LI Huiyu, et al. An automatic scheme for locating interference to GEO satellites[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(1):39-44.]

## 静止轨道卫星自动化干扰定位方案\*

魏梅英,孙浩\*\*,李辉宇,方箭,马晓莹

(国家无线电监测中心,北京 100037)

**摘要:**在对静止轨道卫星上行干扰的定位过程中,复杂的分析工作往往需要花费数小时,当干扰信号为突发、短时类信号时,往往会错失定位时机,导致对这类信号的定位失败率非常高。为了解决静止轨道卫星干扰定位的滞后性问题,设计了一种针对静止轨道卫星干扰的自动化定位解决方案。对干扰定位工作中的邻星选择及定位方案设计、参考源信号的选择与发射等各关键环节进行了定量和定性分析,并通过仿真实验证明了该方案的可行性。该方案使得用机器代替人工分析成为可能,对卫星干扰源的快速和准确定位具有现实意义。

**关键词:**卫星通信;静止轨道卫星;干扰定位;自动化定位

**中图分类号:**TN972 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2017)01-0039-06

## An Automatic Scheme for Locating Interference to GEO Satellites

WEI Meiyong, SUN Hao, LI Huiyu, FANG Jian, MA Xiaoying

(The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China)

**Abstract:** In locating the uplink interference to geostationary earth orbit (GEO) satellites, complex analysis work often takes hours of time. For burst and short time interferences, it always misses the best location opportunity, so as to cause a very high fail probability for locating these signals. To settle the delay problem, an automatic location scheme is proposed which includes quantitative and qualitative analysis for neighbor satellite choosing, location scheme design and reference signal choosing and transmitting. Experiments prove the feasibility. This scheme makes it possible for a machine to replace manual analysis and is helpful for quick and accurate interference transmitter location.

**Key words:** satellite communication; geostationary earth orbit satellite; interference location; automatic location

### 1 引言

卫星频率和轨道资源是卫星应用产业发展的基本要素,既是全人类共有的、宝贵的、有限的自然资源,也是世界各国必争的一种宝贵的战略资源,对一个国家的政治、经济和国防建设具有重要的战略意义。经过 60 多年的发展,卫星通信已在通信广播、军事侦察、气象预报、导航定位等领域得到广泛应用,已成为陆海空天一体化信息网络系统的重要组

成部分<sup>[1]</sup>。星上载荷、物理层传输、卫星通信天线和更高频段卫星技术的发展,大大提高了卫星的系统吞吐量,而且使其能提供更丰富的交互技术<sup>[2]</sup>。截至 2016 年初,全球在轨卫星 1 305 颗,其中:美国 549 颗,欧盟 201 颗,中国 141 颗,俄罗斯 131 颗。预计未来 15 年,全球发射约 1 600 颗卫星,这些卫星都将进一步利用好频率和轨道资源,承担人类更多空间航天任务。

\* 收稿日期:2016-05-23;修回日期:2016-10-21 Received date:2016-05-23;Revised date:2016-10-21

基金项目:国家高科技研究发展计划(863 计划)项目(2014AA01A707)

\*\* 通信作者:sunhao@srcc.org.cn Corresponding author:sunhao@srcc.org.cn

然而,卫星通信受自身特点的限制,会不可避免受到各类不可预见的干扰及盗用。随着卫星业务的迅猛发展,大量的干扰或盗用的出现严重损害了卫星操作者及用户的合法利益,同时造成巨大的经济损失。可见,为了保障空间航天事业可持续发展,必须利用技术手段切实保护好空间卫星频率和轨道资源安全。

对卫星地面干扰源定位技术的研究始于 20 世纪 90 年代,包括星上定位及地面定位两种。星上定位技术包括双星时差、频差定位技术以及单星测向测距定位法。对于地面定位技术,研究较多的主要有双星定位技术<sup>[3-5]</sup>、三星时差定位<sup>[6]</sup>等。目前,国际上应用最成熟的是双星定位技术,其原理为通过互模糊函数等信号处理算法估算主星(被干扰)和邻星接收到地面干扰信号的到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)和到达频率差(Frequency Difference of Arrival, FDOA)信息,进而利用曲线(面)映射确定干扰源位置。双星定位技术的精度可以达到几公里的范围<sup>[5]</sup>,因此成为应用最广泛的卫星上行干扰源定位技术。双星定位技术也成为各个定位设备公司最成熟产品的基础技术,如美国的 TLS 公司、法国的 SatId、Zodiac 公司等卫星定位产品都是基于双星定位原理<sup>[7]</sup>。德国李黑穆空间监测站、日本的三浦监测站以及我国的国家卫星监测站等都装备了一定数量的天线与先进的干扰源定位设备。

虽然干扰定位技术上已相当成熟,但目前的卫星监测定位系统在定位的及时性方面还存在很大问题。其中一个最主要的原因在于定位分析过程复杂,往往需要数小时的时间,如果这个过程中干扰载波消失或者转移,往往会错失定位时机。因此,突发、短时类干扰信号的定位失败率非常高。

可见,现有监测定位技术已经不能满足卫星干扰监测定位的需求。研发实时定位系统进行卫星干扰源的快速发现和精确定位,从需求上来讲是非常紧迫的,是监管部门维护卫星频率资源使用秩序及保障重要应用不可或缺的能力和手段。本文通过自动化定位方案的设计,缩短定位过程中的分析时间,用机器分析来代替人工分析,提高了定位工作的效率。

## 2 自动化定位方案设计

邻星的选择、定位方案的选择以及参考源信号的选择和发射是定位中最重要的环节,也是在人工

定位过程中耗时最多的环节。本节中对这几个环节进行定量及定性分析,并进行了自动化流程设计。

### 2.1 邻星自动化选择流程设计

在双星定位中,是否有可用的邻星对定位的成功与否起着决定性作用。合适的邻星必须与主星有一定的轨位间隔,根据经验,按照干扰频段与轨位间隔把邻星划分为 3 个优先级,见表 1。

表 1 根据轨位距离划分邻星优先级  
Tab. 1 The adjacent priority division according to the rail distance

优先级	轨位距离/(°)	
	C 频段	Ku 频段
I 级	5 ~ 10	5 ~ 8
II 级	2 ~ 4	2 ~ 4
III 级	10 ~ 15	9 ~ 15

另外,邻星需要满足以下条件:一是要求干扰信号的上行频率必须在邻星的上行转发频率范围内;二是要考虑上行覆盖范围的一致性,干扰上行站必须在邻星的上行覆盖范围之内;三是邻星的相对应频率没有被占用。其中前两点为必要条件,第三点为非必要条件。

#### 2.1.1 上行频率的一致性分析

目前绝大多数 GEO 卫星采用透明转发的形式,即卫星在接收到上行站信号后,对信号不进行解调等处理,直接对其进行下变频并放大输出。

设干扰信号下行的中心频率为 $f_r$ ,带宽为 $BW_r$ ,受扰转发器的本振频率为 $Lo$ ,待选第 $j$ 个邻星转发器的本振为 $Lo_j$ ,其中 $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ , $M$ 为待选邻星的个数,则干扰信号的旁瓣在待选邻星的下行中心频率应为 $f_j = f_r + Lo - Lo_j$ ,各转发器的下行中心频率为 $F_i, i \in \{1, 2, \dots, N\}$ , $N$ 为该邻星转发器数量。判断干扰信号落入邻星的哪个转发器:

$$[\Delta, z_i] = \min |f_j - F_i|, i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

式中: $z_i$ 为干扰信号落入的邻星转发器的编号。这样得到干扰旁瓣信号所在邻星转发器中心频率为 $F_{z_i}$ 。设邻星转发器带宽为 $B_{z_i}$ ,要求干扰旁瓣信号必须有一部分不在转发器的保护带中:

$$f_j - \frac{BW_r}{2} < F_{z_i} + \frac{B_{z_i}}{2}, \quad (2)$$

或

$$f_j + \frac{BW_r}{2} > F_{z_i} - \frac{B_{z_i}}{2} \quad (3)$$

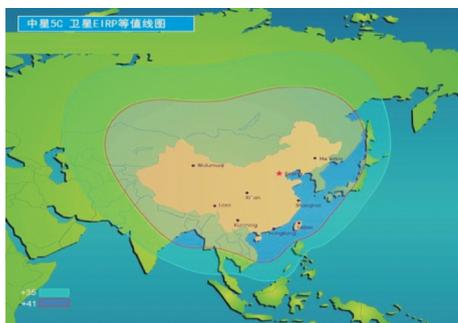
如果不满足以上条件,则该干扰不能利用此邻星进行定位。如果所有可定位范围内的邻星都不满足条件,则该干扰不能进行定位。

### 2.1.2 上行覆盖范围的一致性分析

在邻星选择中,由于在最初接收到干扰信号时无法判断信号的上行站来源,所以邻星的最优选择就是其上行站区域能够囊括受扰卫星的上行站区域。如图 1(a)中卫星 1 的 C 频段波束有效全向辐射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)覆盖主要包括中国地区,图 1(b)中的卫星 2 覆盖区域包括中亚、东亚、东南亚等。如果卫星 1 受到干扰,那么可以考虑使用卫星 2 作为邻星;反之,则可能无法定位。



(a) 中星 9 号 C 频段 EIRP 覆盖图



(b) 中星 5C 号 C 频段 EIRP 覆盖图

图 1 卫星 EIRP 覆盖图  
Fig. 1 EIRP satellite coverage map

以上这种判断方式仅限于人工分析判断,在自动化流程中无法应用。在本方案中,考虑把卫星的 EIRP 图使用规范化编码来表示,以便机器对覆盖范围进行匹配。把各国家和地区用国际电联统一编码进行表述<sup>[8]</sup>。另外,由于国内系统主要用于对覆盖我国的卫星干扰进行定位,而我国的国土面积比较大,有些卫星波束并没有覆盖全部国土,因此,需要把我国国土按照地理分布划分为几个大区,划分方法如表 2 所示。

表 2 中国定位区域划分

Tab. 2 Division of positioning area in China

大区	编码	包含区域
西部	CHNW	新疆、青海、西藏、甘肃
中部	CHNC	陕西、四川、重庆、宁夏
北部	CHNN	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、北京、河北
东部	CHNE	河南、山西、山东、上海、江苏、浙江、安徽、湖北
南部	CHNS	深圳、海南、广西、广东、云南、贵州、福建、江西、湖南、香港、澳门、台湾

如果被干扰卫星的波束覆盖我国大部分地区,则不对波束进行细分,即直接选择能够覆盖我国的邻星;否则,需要对波束覆盖区域进行细分,选择邻星时尽量选择覆盖面积更广的。其次,选择覆盖面积有交叠的;如果面积交叠的邻星仍不存在,则该干扰不满足定位条件。设被干扰卫星的覆盖区域为  $A = \{a_1, a_2, \dots\}$ , 邻星的覆盖区域为  $B = \{b_1, b_2, \dots\}$ , 对于覆盖区域的选择也划分为几个优先级,如表 3 所示。

表 3 根据覆盖划分邻星优先级

Tab. 3 The adjacent priority division according to the covering

判别条件	优先级	处理方法
$A \cap B = A$	I	最优选择
$A \cap B \neq A$ 且 $A \cap B \neq \emptyset$	II	可尝试定位
$A \cap B = \emptyset$	III	无法定位

### 2.1.3 邻星对应频率信号状态检测

邻星对应频率信号的状态,将决定干扰信号的定位方式。如果存在空闲频率,则需要根据空闲进行相关运算的频率、带宽等参数设置;如果邻星没有空闲频率,则需要对两个相关值进行处理或者无法进行定位。检查邻星信号是否存在部分空闲:

检测在  $[f_j - \frac{BW_r}{2}, f_j + \frac{BW_r}{2}]$  频率范围内是否有空闲频率,如果存在,设其中心频率为  $\{f_{k1}, f_{k2}, \dots, f_{kn}\}$ , 带宽分别为  $\{b_{k1}, b_{k2}, \dots, b_{kn}\}$ , 则干扰信号的进行相关计算的信号频率、带宽可在其中选择,一般情况下选择其中空闲带宽最大的频段进行相关计算,这种情况定其优先级为 I。

如果经过检测,邻星在  $[f_j - \frac{BW_r}{2}, f_j + \frac{BW_r}{2}]$  内不存在空闲,那么还存在两种情况:一是邻星信号带宽大于干扰信号,那么在这种情况下,对其进行相关采样,可能得到两个峰值,通过计算邻星信号超出干扰信号的部分的 TDOA、FDOA 值,可以排除邻星信号的相关峰值,这种情况定义其优先级为 II。另外一

种情况是邻星信号的中心频率和带宽与干扰信号恰好重合,这种情况如果邻星信号上行站地址已知,可以使用此邻星尝试定位,这种情况定义其优先级为

III,否则无法定位,需要选择其他的邻星进行定位尝试,这种情况定义其优先级为 IV。分级情况如表 4 所示。

表 4 根据占用频率划分邻星优先级  
Tab. 4 The adjacent priority division according to the frequency of use

判别条件	优先级	处理方法
$[f_j - \frac{BW_r}{2}, f_j + \frac{BW_r}{2}]$ 内邻星存在空闲频率	I	选择其中空闲带宽最大的频段进行相关计算
邻星信号带宽大于干扰信号	II	排除邻星信号的相关峰值
$[f_j - \frac{BW_r}{2}, f_j + \frac{BW_r}{2}]$ 内邻星不存在空闲频率	III	排除邻星信号上行站地址
邻星信号带宽等于干扰信号	IV	无法使用该邻星进行定位
邻星信号上行站地址已知		
邻星信号上行站地址未知		

### 2.2 自动定位方案选择

干扰信号的调制方式不同,将会影响 TDOA、FDOA 等定位信息的提取方式,其相关信号的信息提取及分析方式也会不同。比如:对于普通的数字调制信号来说,对采样后的信号做相关,其结果包括 TDOA、FDOA,这些对干扰定位来说都是有用的信息;而如果干扰信号是单载波信号的话,由于单载波本身就是周期性信号,故其相关得到的 TDOA 值被信号的周期性扰乱,是没有意义的。对于单载波来说,则需要选择双星多时定位方案。

对于扫频信号来讲,则需要积分时间大于其扫描周期,否则信号的累计积分时间过短,系统将无法甄别其正确的相关峰。对于 TDMA 信号,由于在同一个频点上可能存在多个用户,这样有效相关峰则为多个,需要在相关峰选择的时候单独做处理。对于转发信号来讲,需要设置单独的单星定位方案。

所以在定位方案选择时,需要根据干扰信号的类型如调制波、单载波、扫频、TDMA 等,确定定位方案。不同的调制类型的信号选择的定位方案特点如表 5 所示。

表 5 根据干扰信号类别的定位方案选择  
Tab. 5 Positioning scheme selection based on jamming signal category

调制类型	定位方案	特别参数设置
普通数字调制	双星定位	无
单载波	双星多时定位	数据要间隔性采集
TDMA	双星定位	相关峰选择的时候单独做处理
扫频	双星定位	积分时间大于其扫描周期
转发信号	单星定位	采集带宽小于转发频率间隔

### 2.3 参考源信号的发射和选用

由于当前卫星资源日趋紧张,而参考源信号的使用频率又需要符合一定的要求,为了避免造成不必要的干扰,监测部门需要与卫星运营商进行协调,往往需要耗费大量的时间,很可能就会错失最佳的定位良机,故传统的向干扰星或邻星发射普通调制信号作为参考信号的方式已经不能满足目前干扰多发情况下的定位需求,并且在定位自动化流程中无法实现。本方案考虑采用多站码分多址信号进行参考源定位,利用正交伪随机序列作为每个站的码字,例如:如果有 6 个参考源站,利用 walsh 函数生成 8 位的正交伪随机序列作为码元集。

利用扩频参考源的优点之一就是可以把信号隐藏起来,可以做到基本上不占用频谱资源,也不会对卫星用户造成干扰,这样就节省了参考源用频沟通的时间部分。定位设备所在地作为总控制中心,统一对 6 个站的参考源设备进行控制。

### 2.4 自动化定位流程

根据以上各定位环节分解,自动化定位工作的整体流程图如图 2 所示。系统接到监视系统警报之后,开始根据受扰卫星的轨位、受扰频率、转发器覆盖等进行邻星选择,选择的具体原则和优先级划分如 2.1 节中所述。如有适用的邻星,则使用最高优先级的邻星进入定位方案选择,否则无法定位。定位方案选择具体原则如 2.2 节中所述,如选择成功,则进入定位环节;否则,重新进行邻星选择。

在定位环节,首先根据 2.3 节中的原则设置进行参考源信号的选择和发射,之后进行信号的采集与相关计算,并对定位结果进行分析处理。如果可以成功进行定位,则输出定位结果;否则,重新进入邻星选择步骤。依次类推,直至定位成功或者邻星

选择皆不成功,则判断该干扰无法进行定位。

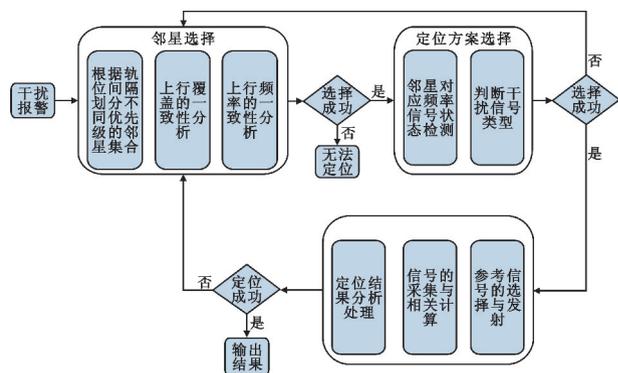


图 2 自动化定位流程图

Fig.2 Flow chart of automatic positioning

### 3 仿真实验结果

为了验证本文提出的自动化定位方案的可行性,在同样的条件下,采用方案中提出的定量定性分析方法与人工定位进行了对比实验。人工定位采用文献[5]中提供的 TLS 系统。实验参数设置如下:被干扰卫星为中星 10 号,模拟干扰信号频点为 12 744 MHz、12 745 MHz、12 746 MHz,Ku 频段水平极化。可选邻星范围为 5°~15°,可选参考信号位置为北京、深圳、上海、乌鲁木齐、昆明。

对于某卫星 3 个已知源进行双星定位,分别采用人工定位及自动化定位标准判别两种方式,得到实验结果见表 6。

表 6 自动化定位方案与人工定位结果的比较

Tab.6 Comparison between automatic positioning and manual positioning result

信号	未知信号坐标/ (°N,°E)	人工定位结果/ (°N,°E)	自动化定位方案结果/ (°N,°E)	人工定位 误差/m	自动化定位 方案误差/m
信号 1	40.052 43,116.293 95	40.024 88,116.289 85	39.995 15,116.284 22	3 086.56	6 430.12
信号 2	34.528 33,109.098 21	34.536 23,109.102 23	34.556 23,109.089 92	953.62	3 197.55
信号 3	43.847 42,87.555 78	43.819 23,87.573 42	43.777 42,87.565 78	3 364.55	7 833.75

实验结果表明,采用本文提出的自动化干扰定位方案在精度上略差于人工定位结果,原因主要是人工定位可以在数据处理中根据人的判定更加灵活,对数据进行反复处理。通过上述仿真可以看到,自动化定位方案定位精度损失非常小,可以将该算法应用于自动化定位系统设计中。另外,可以考虑在后续工作中引入深度学习算法对方案进行改进以逼近人工定位的精度。

### 4 结束语

本文从维护空间卫星频率和轨道资源安全有序使用的角度出发,首先对卫星监测及干扰定位的滞后性问题进行了分析,提出了一种静止轨道卫星干扰自动化定位的解决方案。从上行频率的一致性分析、上行覆盖范围的一致性分析、邻星对应频率信号状态检测三个方面分解设计了邻星自动化选择流程,根据信号类别的不同设计了自动定位方案,并设计了整体的工作流程。对干扰定位的各个关键环节进行了定量和定性分析,使得用机器代替人工分析

成为可能,在提高定位工作的效率和准确度方面有着现实的意义。通过仿真可以看到,自动化定位方案相比于人工定位在精度方面还存在一定损失,建议在后续工作中引入深度学习算法对方案进行改进,以进一步提高系统方案的定位精度。

### 参考文献:

[1] 花江,王永胜,喻火根. 卫星通信新技术现状与展望[J]. 电讯技术,2014,54(5):681-683.  
HUA Jiang, WANG Yongsheng, YU Huogen. Status of new techniques for satellite communications[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(5):681-683. (in Chinese)

[2] 吴涛,张健,刘爱军,宽带卫星通信中的 ACM 技术[J]. 电讯技术,2010,50(12):19-22.  
WU Tao, ZHANG Jian, LIU Aijun. ACM technology for broadband satellite communication[J]. Telecommunication Engineering,2010,50(12):19-22. (in Chinese)

[3] HO K C, CHAN Y T. Geo-location of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1997, 33(3):770-783.

[4] HAWORTH D P, SMITHN G, BARDELLI R. Interference

localization for EUTELSAT satellites – the first European transmitter location system [J]. International Journal of Satellite Communications, 1997, 15(3):155–183.

[5] SOILLE P. Morphological image analysis[J]. Principles and Applications, 1999, 21(2):173–174.

[6] 贾广沂, 李国通, 朱秋芳. 一种基于中国区域定位系统的三星定位方法[J]. 计算机应用, 2008, 28(S1):384–386.

JIA Guangyi, LI Guotong, ZHU Qiufang. A tri-satellite positioning method based on Chinese regional positioning system [J]. Journal of Computer Applications, 2008, 28(S1):384–386. (in Chinese)

[7] 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(6):860–863.

XIA Changxiong, YE Shangfu. Fusion positioning technology of satellite interference localization systems [J]. Journal of Radio Science, 2008(6):860–863. (in Chinese)

[8] 国家标准化管理委员会. 世界各国和地区名称代码: GB/T 2659–2000[S]. 北京: 国家邮政局科学研究规划院, 2000.

## 作者简介:



**魏梅英** (1984—), 女, 河北沧州人, 2010 年于北京邮电大学获硕士学位, 现为国家无线电监测中心工程师, 主要从事卫星信号监测与定位技术等方面的研究;

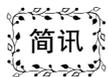
**孙浩** (1984—), 男, 安徽亳州人, 工程师, 主要从事无线电监测、无线电安全、频谱管理、无线电新技术等方面的研究工作;

Email: sunhao@srcc.org.cn

**李辉宇** (1988—), 女, 山西太谷人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无线电监测技术;

**方箭** (1986—), 男, 安徽安庆人, 2009 年于北京邮电大学获工学硕士学位, 现为高级工程师、中国通信标准化协会科学频率组副组长, 主要从事无线电频谱规划、系统间电磁兼容分析、认知无线电等方面的研究工作;

**马晓莹** (1987—), 女, 河北邢台人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为超短波监测。



## 《电讯技术》微信公众号开通

为了响应国家媒体融合、升级转型的号召, 加快《电讯技术》期刊“两微一端”的建设和实施, 实现《电讯技术》期刊移动在线办公、优先出版、稿件状态查询、读者关系维护、信息推送、移动订阅等移动公众服务, 更全面、及时地传播电子信息领域相关研究的最新成果, 更好地服务读者, 经主办单位批准和运营商审核认证, 《电讯技术》微信公众号于 2017 年 1 月 5 日正式开通。

《电讯技术》官方微信名称为“电讯技术”, 微信号为“dianxunjishu”。扫一扫本刊封面右上方的微信公众号二维码, 或在微信中搜索“电讯技术”或“dianxunjishu”, 关注后即可进入《电讯技术》微信公众平台。

本刊编辑部 赵 勇