

网格化 GNSS 弱干扰源定位方法

刘睿, 陈奇东, 甄卫民

(中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107)

摘 要: 介绍了网格化全球卫星导航系统(GNSS)弱干扰源定位的系统组成, 针对该场景下现有方法对信噪比低的情况适应能力较差的问题, 提出了一种基于信号噪声分离的差方均值函数拟合(MFDSS)的网格化 GNSS 弱干扰源定位方法, 方法采用 MFDSS 方法实现时差估计, 并利用 Chan 双曲线定位算法解算干扰源位置. 文章对比仿真了该方法和常用网格化定位方法的定位效果, 在对 GNSS 弱干扰源定位的场景下, 该方法表现出优越性能.

关键词: GNSS; 弱干扰源定位; TDOA; MFDSS

中图分类号: TN971 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2020)04-0058-05

0 引 言

全球卫星导航系统(GNSS)为导航带来了革命性的变化, 它在全球范围内为无限多的海陆空天用户提供精确的实时位置、速度和时间信息, 一旦 GNSS 受到干扰, 就会对与国家安全、国民经济等方面密切相关的键基础设施造成严重影响和不可预计的后果^[1]. GNSS 信号落地功率低, 约为 -13 dBm, 同时信号采用扩频体制, 其功率谱密度更低, 频谱严重地淹没在环境噪声当中, 很弱的干扰即可影响 GNSS 的应用^[2].

常用的网格化 GNSS 干扰源定位方法有波达方向(DOA)定位方法^[3], 到达时间差(TDOA)定位方法^[4]和到达信号强度(RSS)定位方法^[5]. 其中 TDOA 方法以其定位速度快、精度高等特点获得了广泛的推广应用. 目前 TDOA 通常使用广义互相关算法(GCC)^[6]等方法估计接收机间的信号到达时差, 然后通过双曲线定位算法解算干扰源位置.

对 GNSS 弱干扰源定位时, 上述方法对信噪比低的情况适应能力较差, 针对该问题, 本文提出一种基于信号噪声分离的差方均值函数拟合(MFDSS^[2])的网格化 GNSS 弱干扰源定位方法, 方法采用 MFDSS 方法实现时差估计, 然后利用

Chan^[7]双曲线定位算法解算干扰源位置. 同时, 本文还介绍了采用上述方法的网格化 GNSS 弱干扰源定位系统组成, 对系统的定位性能进行了仿真与分析并给出结论.

1 网格化 GNSS 弱干扰源定位系统及接收信号模型

网格化 GNSS 弱干扰源定位系统的组成框图如图 1 所示, 包含监测接收层、数据传输层和中心处理层三个层次. 监测接收层由网格化监测接收机组成, 实现对干扰信号的采集接收并对接收数据打时间标记; 数据传输层由 4G 等无线通信链路实现; 中心处理层的数据处理平台收集各接收机数据, 通过执行本文方法实现对弱干扰信号的准确定位.

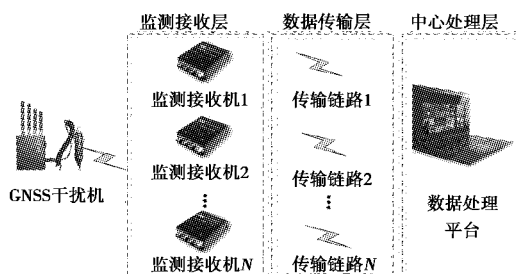


图 1 网格化 GNSS 弱干扰源定位系统的组成框图

收稿日期: 2020-05-15

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0505100)

通信作者: 刘睿 E-mail: 15375516858@163.com

存在干扰的情况下,监测接收机接收到的信号包含目标干扰信号 $s(n)$ 和噪声信号 $n(n)$,接收机接收信号模型如式(1),对于目标干扰信号的检测定位,噪声信号 $n(n)$ 包含隐藏在噪声下的 GNSS 信号,具有相关性,对时差估计有一定影响.

$$x(n) = s(n) + n(n). \quad (1)$$

2 基于 MFDSS 的弱干扰源定位方法

2.1 基于 MFDSS 的时差估计方法

方法利用目标干扰信号与噪声间的正交性采用奇异值差分谱滤除噪声,然后通过拟合方法求出差方均值函数精确的极小值以实现弱干扰的时差估计值.

2.1.1 奇异值差分谱噪声滤除方法

方法首先依据式(1)对接收信号构造 Hankel 矩阵, $x(n)$ 信号长度为 N , $x(n)$ 的 Hankel 矩阵表达式如下:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(n) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(n+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(m) & x(m+1) & \cdots & x(N) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中,根据 N 为偶数和奇数时, m 取值分别为 $N/2$ 和 $(N+1)/2$, n 取值分别为 $N/2+1$ 和 $(N+1)/2$. 对矩阵 $\mathbf{X}$ 进行奇异值分解可得式(3):

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^m \mathbf{u}_i \sigma_i \mathbf{v}_i^T, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{u}_i$ 为 m 维列向量; σ_i 为矩阵 $\mathbf{X}$ 的奇异值; $\mathbf{v}_i$ 为 n 维列向量,分解后 σ_i 由大到小排列并利用式(4)构造奇异值差分谱 $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_{m-1})$, 其中 b_i 的表达式为

$$b_i = \sigma_i - \sigma_{i+1}, i = 1, 2, \dots, m-1. \quad (4)$$

方法通过查找差分谱 b 最大值 b_k , 利用前 k 个奇异值重构 Hankel 矩阵, 表达式如下:

$$\mathbf{X}' = \sum_{i=1}^k \mathbf{u}_i \sigma_i \mathbf{v}_i^T. \quad (5)$$

根据式(2)可得出滤除噪声后的目标干扰信号序列 $\mathbf{x}' = [x'_1(1), x'_1(2), \dots, x'_1(N)]$.

2.1.2 差方均值函数拟合时差估计方法

经上节方法滤除噪声的两接收机信号分别为 $x'_1(n)$ 和 $x'_2(n)$, 构建差方均值函数, 表达式如下:

$$R(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x'_1(n) - x'_2(n+\tau)]^2, \quad (6)$$

式中, $x'_1(n)$ 和 $x'_2(n)$ 分别为 $\mathbf{x}'_1$ 和 $\mathbf{x}'_2$ 中元素,

τ 为两序列间的相对移位, 利用拟合方法给出时差 D 的估计结果, 表达式如下

$$D = -0.5 \frac{R(\tau_m + 1) - R(\tau_m - 1)}{R(\tau_m + 1) - 2R(\tau_m) + R(\tau_m - 1)} - \tau_m, \quad (7)$$

其中, $\tau_m = \arg \min_{\tau} (R(\tau))$.

2.2 Chan 定位方法

Chan 定位算法本质上是双曲线定位方法, 双曲线定位示意图如图 2 所示, 通过估计干扰源到两接收机时差可以列出双曲线方程, 多个双曲线交汇可确定干扰源位置. 完成时差估计后可列双曲线方程如下:

$$r_{i,1} = cD_i = r_i - r_1, i = 2, 3, \dots, N, \quad (8)$$

式中, $r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$; D_i 为目标干扰源到接收机 1(基准站)与接收机 i 的到达时间差; (x_i, y_i) 为接收机 i 坐标; (x, y) 为干扰源位置坐标. 对双曲线方程线性化有如下表达式:

$$x + y_{i,1}y + r_{i,1}r_1 = \frac{1}{2}(K_i - K_1 - r_{i,1}^2), \quad (9)$$

式中: $x_{i,1} = x_i - x_1$; $y_{i,1} = y_i - y_1$; $K_i = x_i^2 + y_i^2$.

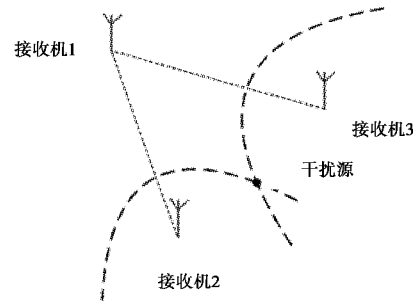


图2 双曲线定位示意图

Chan 算法在成高斯分布的时差估计误差下定位效果好, 因此较好地适用于本文的应用场景^[8]. 方法进行两次加权最小二乘(WLS)以实现双曲线方程的精确求解, 通常场景下, 双曲线方程冗余, 式(9)可写成如下矩阵形式, 表达式如下:

$$\mathbf{G}_a \mathbf{z}_a = \mathbf{h}, \quad (10)$$

$$\text{其中, } \mathbf{G}_a = - \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} & r_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} & r_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N,1} & y_{N,1} & r_{N,1} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{z}_a = [x, y, r_1]^T, \mathbf{h} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ r_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \\ \vdots \\ r_{N,1}^2 - K_N + K_1 \end{bmatrix}.$$

因存在测量误差,有如下误差 $\boldsymbol{\psi}$ 表达式:

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a^0, \quad (11)$$

式中, $\mathbf{z}_a^0$ 为无噪声时 $\mathbf{z}_a$ 值. 依据文献[9-10]可给出式(11)的 WLS 解,表达式如下:

$$\mathbf{z}_a = (\mathbf{G}_a^T \mathbf{G}_a^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \mathbf{h}. \quad (12)$$

利用式(12)得出的解可构造新的方程组进行第二次 WLS 以改善目标干扰源位置的估计结果,方程组表达式如下:

$$\boldsymbol{\psi}' = \mathbf{h}' - \mathbf{G}'_a \mathbf{z}'_a, \quad (13)$$

$$\text{式中: } \mathbf{G}'_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{z}'_a = \begin{bmatrix} (x-x_1)^2 \\ (y-y_1)^2 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{h}' = \begin{bmatrix} (z_{a,1} - x_1)^2 \\ (z_{a,2} - y_1)^2 \\ z_{a,3}^2 \end{bmatrix}, z_{a,1} = x^0 + e_1, z_{a,2} = y^0 + e_2,$$

$z_{a,3} = r_1^0 + e_3, x^0, y^0, r_1^0$ 为 $\mathbf{z}_a^0$ 元素, e_1, e_2, e_3 为 $\mathbf{z}_a$ 的估计误差.

3 仿真分析

仿真模拟真实 GNSS 弱干扰源网格化定位的应用场景,对比统计本文方法和最为常用的基于 GCC 的 TDOA 定位方法的定位精度. 仿真过程中,目标干扰信号 $s(n)$ 功率设置为 -125 dBm,为带宽 2.046 MHz 的弱干扰信号,添加噪声信号 $n(n)$ 后目标干扰信号的信噪比(SNR)为 -7 dB,目标信号淹没在噪声下,其中 $n(n)$ 包含功率为 -128 dBm 的 GNSS 信号. 信号载频为 1575.42 MHz,采样频率为 16.368 MHz.

文献[1]建议实际布设网格化监测接收机时,为提升定位效果,需在网络几何中心设置基准接收机. 图 3 示出仿真实接收机布局及干扰源位置,分别仿真典型四接收机和七接收机布局方式下的定位效果,接收机布设在半径 1.5 km 的圆上,中心布设基准站. 干扰源坐标为 $(300, 500)$,仿真考虑 20 ns 的时间同步误差.

图 4 为某次定位处理的奇异值差分谱噪声滤除效果图,其中图 4(a)为目标干扰信号采样波形,图 4(b)为目标干扰信号混入噪声信号波形,图 4(c)为奇异值差分谱噪声滤除后波形. 图 4 表明本文方法可以很好地实现噪声滤除,从而提升弱干扰信号的时

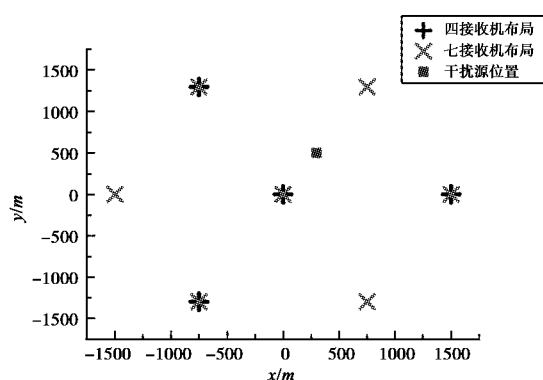
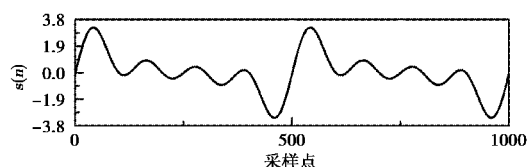
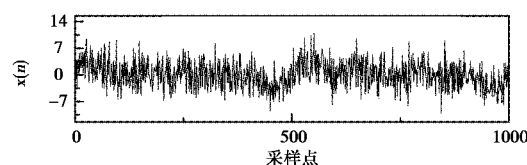


图 3 仿真实接收机布局及干扰源位置

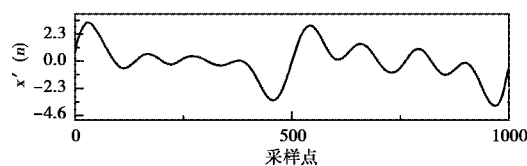
差估计效果.



(a) 目标干扰信号



(b) 目标干扰信号+噪声信号



(c) 噪声滤除结果

图 4 奇异值差分谱噪声滤除效果

在上文仿真条件下进行 200 次定位试验,并对定位结果进行统计. 图 5~6 分别示出四接收机、七接收机本文方法和 GCC 方法定位效果对比,相对于 GCC 方法,本文方法定位结果更接近于真实干扰源位置. 对上述场景下不同定位方法的均方根误差(RMSE)进行统计,统计结果如表 1 所示. 在四接收机情况下,本文方法相比于 GCC 方法,定位 RMSE 由 70.05 m 提升至 24.30 m;在七接收机情况下,本文方法相比于 GCC 方法,定位 RMSE 由 25.92 m 提升至 7.67 m. 仿真结果表明

在弱 GNSS 干扰定位的场景下,本文方法较好地改善了噪声和导航信号对干扰源定位效果的影响,提升了定位精度。

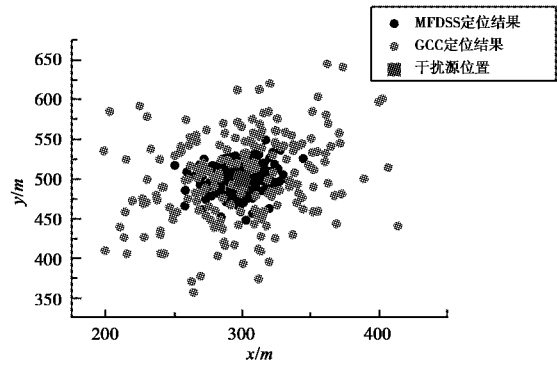


图 5 四接收机定位效果

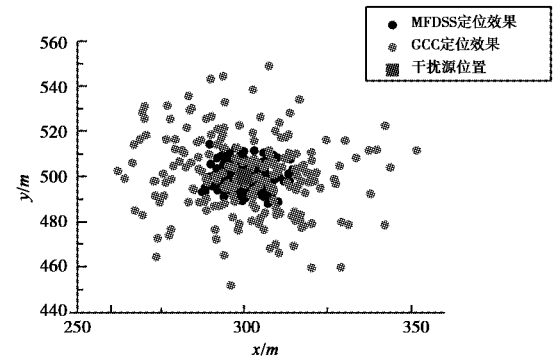


图 6 七接收机定位效果

表 1 不同场景下的定位 RMSE 统计		
接收机个数	GCC 定位 RMSE/m	MFDSS 定位 RMSE/m
4	70.05	24.30
7	25.92	7.67

4 结束语

本文介绍了网格化 GNSS 弱干扰源定位的系统组成,分析了现有方法在该应用场景下尚存的问题,针对这些问题提出了一种基于 MFDSS 的网格化 GNSS 弱干扰源定位方法. 文章详细描述了该方法的原理,并针对弱 GNSS 干扰定位的应用场景和典型接收机布局方式,对比仿真了本文方法和基于 GCC 的 TDOA 算法的定位效果. 仿真结果表明该场景下本文方法相对于目前常用的网格化定位方法,定位效果提升明显。

参考文献

[1] 刘睿,陈奇东,甄卫民. 一种网格化的 GNSS 干扰源定

位方法研究[J]. 全球定位系统,2015,40(6):16-20.

[2] 陈奇东,陶海红,刘睿,等. GNSS 弱干扰 TDOA 定位时差估计方法[J]. 中国电子科学研究院学报,2020,15(2):135-140.

[3] AMIN M G, WANG X, ZHANG Y D, et al. Sparse arrays and sampling for interference mitigation and doa estimation in gnss[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(6): 1302-1317. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2531582.

[4] CETIN E, THOMPSON R J R, DEMPSTER A G. Interference localization within the gnss environmental monitoring system (gems) [J]. GPS solutions, 2014, 18(4): 483-495. DOI: 10.1007/S10291-014-0393-5.

[5] SCOTT L. J911: Fast jammer detection and location using cell-phone crowd-sourcing [J]. Gps world, 2010,21(11):32-37,47.

[6] KNAPP C, CARTER G. The generalized correlation method for estimation of time delay [J]. IEEE transacoustics on acoustic, speech and signal processing, 1976, 24(4): 320-327. DOI: 10.1109/TASSP.1976.1162830.

[7] CHAN Y T, HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE transactions on signal processing, 1994, 42(8): 1905-1915. DOI: 10.1109/78.301830.

[8] CARTER G C. Time delay estimation for passive sonar signal processing [J]. IEEE transactions on acoust, speech and signal processing, 1981, 29(3): 463-470. DOI: 10.1109/TASSP.1981.1163560.

[9] HAHN W, TRETTER S. Optimum processing for delay-vector estimation in passive signal arrays [J]. IEEE transtions on information theory,1973,19(5): 608-614. DOI: 10.1109/TIT.1973.1055077.

[10] HAHN W R. Optimum signal processing for passive sonar range and bearing estimation [J]. The journal of the acoustical society of america,1975,58(1):201-207. DOI:10.1121/1.380646.

作者简介

刘睿 (1989—),男,博士研究生,工程师,研究方向为电波环境监测、无线电导航。

陈奇东 (1980—),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为电波环境监测、无线电导航。

甄卫民 (1963—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为空间环境、电磁环境。

Study of a grid GNSS weak interference positioning method

LIU Rui, CHEN Qidong, ZHEN Weimin

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract: This paper introduces the system composition of grid GNSS weak interference source location. Aiming at the problem that the existing methods have poor adaptability to low signal-to-noise ratio (SNR), this paper proposes a grid GNSS weak interference source localization method based on Mean Function of Difference Square based on Separation of signal and noise (MFDSS). The method uses MFDSS method to realize time difference estimation, and Chan hyperbolic positioning algorithm is used to calculate the location of interference source. This paper compares and simulates the positioning effect of this method and the commonly used grid positioning method. The results show that the method has superior performance in the GNSS weak interference source localization scene.

Keywords: GNSS; weak interference source location; TDOA; MFDSS

(上接第 57 页)

Design and implementation of navigation interference source detection and positioning system based on unmanned aerial vehicle

DOU Xiaojing, LIU Jing, LYU Xin

(Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

Abstract: Global Navigation Satellite System is widely used because of its wide coverage and low cost. However, due to the use of MEO, IGSO and GEO satellites, the signal landing power is low and susceptible to interference. Therefore, to ensure the normal use of GNSS, it is necessary to carry out research on the detection and positioning of navigation interference sources. Aiming at the defects of low positioning accuracy, weak maneuverability, long positioning time, and high dependence on the environment, this paper proposes a navigation interference source detection and positioning system based on UAV. The design and implementation method is to realize the detection and positioning the navigation interference sources by carrying direction finding loads on unmanned aerial vehicles. The system has the advantages of long working distance, large coverage area and strong maneuverability.

Keywords: Global Navigation Satellite System (GNSS); MEO; GEO/IGSO; interference; Unmanned Aerial Vehicle (UAV)