2018年4月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

Apr., 2018

文章编号: 2095-4980(2018)02-0223-04

基于双时刻联合的多辐射源时差定位解模糊方法

董 勇1, 刘 帅*1, 张 璐2, 杨柳青1, 王虎妹1, 齐春东3

(1. 北京空间飞行器总体设计部,北京 100094; 2.中国空间技术研究院 载人航天总体部,北京 100094; 3. 北京理工大学 信息与电子学院,北京 100081)

摘 要:三星时差定位系统中,当对多个距离接近、功率相当的雷达辐射源进行侦收定位时,会产生时差定位解模糊。提出利用前一时刻与后一时刻观测量独立进行定位,并对前后双时刻定位信息进行联合的算法,有效剔除时差定位模糊解,实现对多个雷达辐射源的高精确度定位。理论分析与仿真结果表明:对多个雷达辐射源进行单次三星时差定位时,除真值外,会产生模糊解;通过联合双时刻定位结果,可实现模糊解的剔除,有效解决多辐射源解模糊问题。

关键词: 双时刻联合; 多辐射源; 时差定位系统; 解模糊算法

中图分类号:TN958;TP182

文献标志码:A

doi:10.11805/TKYDA201802.0223

Un-ambiguity algorithm of multiple radiation sources by combining double-time in TDOA location system

DONG Yong¹, LIU Shuai^{*1}, ZHANG Lu², YANG Liuqing¹, WANG Humei¹, QI Chundong³
(1.Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;
2.Institute of Manned Space System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;
3.School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In the Time Difference Of Arrival(TDOA) location system, it will produce a TDOA location ambiguity when receiving and positioning multiple radar radiation sources in a short distance. A double-time combined algorithm by using the independent position information of the moment before and after is proposed to eliminate the TDOA location ambiguity solution effectively, and then achieving high precision of multiple radar radiation sources. Analysis and simulation results show that the double-time combined algorithm in TDOA location system can solve the multiple radiation sources range ambiguity problem effectively.

Keywords: double-time combined; multiple radiation sources; Time Difference Of Arrival location system; un-ambiguity algorithm

在电子侦察中,对雷达辐射源的无源定位技术已经成为隐蔽探测与精确打击的重要手段。三星时差定位体制是一种以电子侦察卫星为平台的无源时差定位方式,它利用3颗卫星编队飞行,通过测量某时刻地(海)面同一雷达辐射源信号到达卫星的时间差,来确定2个等时差面,联合地表约束方程,实现对雷达辐射源的实时高精确定位^[1-2]。三星时差定位体制具有精确度高、定位快、覆盖范围广、不易受干扰、侦察设备相对简单等优势,是一种常用的无源定位方法。

然而,当前空天电磁环境日益复杂,实际应用中,在三星天线波束覆盖范围内,常常会存在多个雷达辐射源信号,且辐射源的数量、发射频率、发射功率等信息都是未知的^[3-4]。当多个雷达辐射源所处位置接近,发射频率与发射功率相当,在对雷达脉冲进行配对时容易发生配对模糊,导致定位精确度下降甚至错误^[5-6]。

文献[7]中提到基于模糊无解的特征进行解模糊,具有较高的工程实现价值,但对于部分区域不能实现完全解模糊;文献[8]提出利用对多目标测量数据进行相互关联,并通过曲线交会与数据滤波实现定位处理,但该方法运算量大,过程复杂且实时性不强;文献[9]提出修正级联的综合关联方法,关联准确率高于传统属性关联与空间关联,但对于属性或者空间特性接近的多辐射源无法有效区分;文献[10-11]提出了基于加权最小二乘法的

收稿日期: 2016-08-10; 修回日期: 2016-12-15 *通信作者: 刘 帅 email:lsshr@163.com

多舰定位算法,确定多舰定位模型并给出高精确度定位结果,但定位结果取决于目标辐射源测向精确度与初始态势。针对上述问题,本文提出基于双时刻联合的多辐射源三星时差定位解模糊方法,通过对多个辐射源脉冲信号的互相关处理^[12],同时利用前后 2 个时刻独立的目标时差定位结果,剔除多辐射源产生的时差模糊解,实现多辐射源的快速、高精确度定位。

1 双时刻联合定位解模糊方法

本文对主星、辅星 1 和辅星 2 天线波束范围内存在 2 个雷达辐射源的脉冲信号进行研究。设 2 个辐射源发射的信号均为线性调频信号,此时主星、辅星 1 和辅星 2 接收到的脉冲信号 x(t), y(t), z(t)为:

$$x(t) = k_{x1}s_1(t - \tau_{x1}) + k_{x2}s_2(t - \tau_{x2}) + n_{x1}(t) + n_{x2}(t)$$
(1)

$$y(t) = k_{v1}s_1(t - \tau_{v1}) + k_{v2}s_2(t - \tau_{v2}) + n_{v1}(t) + n_{v2}(t)$$
(2)

$$z(t) = k_{z1}s_1(t - \tau_{z1}) + k_{z2}s_2(t - \tau_{z2}) + n_{z1}(t) + n_{z2}(t)$$
(3)

式中: k_{xi} , k_{yi} , k_{zi} (i=1,2,3,…,N)为雷达辐射源脉冲信号到达卫星的衰减系数; τ_{xi} , τ_{yi} , τ_{zi} (i=1,2,3,…,N)为雷达辐射源脉冲信号到达卫星的时延; n_{xi} (t)为高斯白噪声。

设信号和噪声间是相互独立的,将主星、辅星1和辅星2接收到的脉冲信号进行互相关运算可得:

$$R_{xy}(t) = R_{s_1 s_1}(t) + R_{s_2 s_2}(t) + R_{s_1 s_2}(t) + R_{s_2 s_1}(t) + R_{s_1 n_2}(t) + R_{s_2 n_1}(t) + R_{n_1 s_2}(t) + R_{n_2 s_1}(t) + R_{n_2 s_2}(t) + R_{n_2 s_$$

式中 $R_{n,s_i} = R_{s,n_i} = R_{n,n_i} \approx 0$ (i = 1,2; j = 1,2), 因此上式简化为:

$$R_{xy}(t) \approx R_{s_1 s_1}(t) + R_{s_2 s_2}(t) + R_{s_3 s_4}(t) + R_{s_3 s_4}(t)$$
 (5)

设辐射源脉冲信号持续时间为 T_0 ,则主星与辅星 1 互相关运算可得:

$$\int_{0}^{T_{0}} x(t)y^{*}(t-\tau)dt = A^{2} \int_{0}^{T_{0}} [k_{x1}k_{y1} \exp(j2\pi f_{0}(\tau-\tau_{y1x1})) + k_{x2}k_{y2} \exp(j2\pi f_{0}(\tau-\tau_{y2x2}))]dt + \int_{0}^{T_{0}} (k_{x1}k_{y2}s_{1}(t-\tau_{x1})s_{2}^{*}(t+\tau-\tau_{y2}) + k_{x2}k_{y1}s_{2}(t-\tau_{x2})s_{1}^{*}(t+\tau-\tau_{y1}))dt$$
(6)

式中:第1项是2路信号的自相关,由每个辐射源脉冲信号自身分量间相关运算产生;第2项是信号交叉项,由不同辐射源脉冲信号分量间互相关运算产生。由于在一个时差窗口中,存在多个不同的辐射源脉冲信号,信号交叉项的存在严重影响了信号参数估计准确度,同时产生了时差定位解模糊。

当 $\hat{t} = \tau_{y1x1}$ 时,为主星与辅星 1 接收辐射源 1 信号的时间差值;当 $\hat{t} = \tau_{y2x2}$ 时,为主星与辅星 1 接收辐射源 2 信号的时间差值。

同理可得2个雷达辐射源脉冲信号到主星与辅星2的时间差值。

根据上述分析,在多个辐射源的情况下,当前时刻可得主星与辅星 1 互相关运算得到的时间差值为 $\tau_1 = [\tau_{11}, \tau_{12}, \cdots, \tau_{1n}]$,主星与辅星 2 互相关运算得到的时间差值为 $\tau_2 = [\tau_{21}, \tau_{22}, \cdots, \tau_{2n}]$ 。根据时间差值,利用三星时差定位方程,可得定位结果如下所示:

$$\mathbf{P}_{1} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{pmatrix}$$
(7)

式中 $p_{ii}(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,n)$ 是利用时差 τ_{1i} 与 τ_{2i} 计算得到的定位结果。可见,定位结果中存在时差模糊解。

设雷达辐射源在短时间内位置不变,在下一时刻,随着三星星座在轨运动,多个雷达辐射源到达卫星将产生一组新的时差值,重复上述过程,可得新时差值为: $\boldsymbol{\tau}_1^* = [\boldsymbol{\tau}_{11}^*, \boldsymbol{\tau}_{12}^*, \cdots, \boldsymbol{\tau}_{1n}^*]$, $\boldsymbol{\tau}_2^* = [\boldsymbol{\tau}_{21}^*, \boldsymbol{\tau}_{22}^*, \cdots, \boldsymbol{\tau}_{2n}^*]$, 得到新的定位结果如下所示:

$$\boldsymbol{P}_{1}^{*} = \begin{pmatrix} p_{11}^{*} & p_{12}^{*} & \cdots & p_{1n}^{*} \\ p_{21}^{*} & p_{22}^{*} & \cdots & p_{2n}^{*} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1}^{*} & p_{n2}^{*} & \cdots & p_{nn}^{*} \end{pmatrix}$$
(8)

对 2 个时刻点的定位结果取交集可得:

$$P = P_1 \cap P_1^* \tag{9}$$

式中矩阵 P中的元素即为真实辐射源位置。根据 P中元素在矩阵 P_1 与 P_1^* 中的位置,可以得到辐射源 1 与辐射源 2 到达卫星的时延真值在时延矩阵中的位置,从而得到时延真值。

双时刻联合算法流程如图 1 所示。

仿真实验与分析

设 3 颗卫星分别为 s_0 , s_1 和 s_2 , 并确定其初始时刻位置。雷达辐射源 1 线性调频脉冲信号参数为:脉冲重复周期为 0.1 s,脉冲宽度 0.01 s,调频 斜率 2×10^8 Hz/s,卫星接收到信号的信噪比为 0 dB;辐射源 1 处于东经 122°, 北纬 5°, 位于地球表面。雷达辐射源 2 发射信号参数: 脉冲重复周 期为 0.05 s, 脉冲宽度 0.005 s, 调频斜率 $4 \times 10^8 \text{ Hz/s}$, 卫星接收到信号的 信噪比为 0 dB。辐射源 2 处于东经 100°, 北纬 12°, 位于地球表面。将主 星与辅星 1、主星与辅星 2 接收到的信号进行互相关,得到图 2。

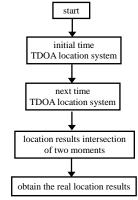
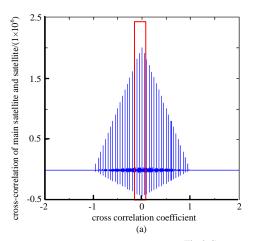


Fig.1 Un-ambiguity algorithm flow chart 图 1 双时刻联合算法流程图



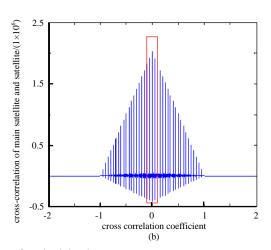


Fig.2 Cross-correlation of received signal 图 2 主星与辅星截获信号互相关

初始时刻的定位结果如表 1 所示。

下一个时刻(时间间隔为 1 min),设辐射源位置不变,由 于星座运动,3颗卫星的位置信息发生变化。将主星与辅星1、 主星与辅星2接收到的信号进行互相关,所得的定位结果如表 2 所示。

从上述仿真分析可得: 雷达辐射源 1 处于东经 122°, 北纬 5°, 高度 0 m; 雷达辐射源 2 处于东经 100°, 北纬 12°, 高度 0 m, 与定位真值一致, 有效剔除了时差定位模糊解。

经分析, 当同一区域内雷达辐射源数量变多或雷达辐射源 脉冲重复周期变小时, 双时刻联合定位算法的解模糊效果下 降,此时可通过增加2次定位的时间间隔来提高解模糊的性能。

结论 3

三星时差定位系统中,在对多个雷达辐射源脉冲信号进行

表 1 卫星初始时刻定位结果

Table I TDOA location results at initial time				
location results	longitude/(°)	latitude /(°)	height/m	
p_{11}	107.78	28.37	0	
p_{12}	100.00	12.00	0	
p_{21}	122.00	5.00	0	
p_{22}	113.37	-9.88	0	

表 2 卫星下一时刻定位结果 Table2 TDOA location results at next time

location results	longitude/(°)	latitude/(°)	height/m
<i>p</i> ₁₁ *	105.54	27.39	0
$p_{_{12}}^*$	100.00	12.00	0
$p_{_{_{21}}}^{*}$	122.00	5.00	0
$p_{_{22}}^{*}$	115.47	-9.00	0

侦收定位时,会产生时差定位解模糊的情况。本文利用前一时刻与后一时刻独立进行时差定位,并对双时刻定位 信息进行联合,有效解决了多个雷达辐射源时差定位解模糊问题。但是,利用双时刻联合定位算法比单次定位需 要增加一定时间,为进一步提高定位算法的实时性,后续将对双时刻时间间隔进一步分析优化。

参考文献:

- [1] 朱伟强,黄培康,马琴,等. 多站时差频差高精度定位技术[J]. 数据采集与处理, 2010,25(3):307-312. (ZHU Weiqiang, HUANG Peikang,MA Qin,et al. Emitter location with multi-station using TDOA/FDoA measurements[J]. Journal of Data Acquisition&Processing, 2010,25(3):307-312.)
- [2] 班书生,胡进,饶起. 时差定位中解高重频信号定位模糊研究[J]. 现代雷达, 2014,36(4):51-55. (BAN Shusheng,HU Jin, RAO Qi. A study on eliminating location ambiguity of high PRF signals in time-difference location system[J]. Modern Radar, 2014,36(4):51-55.)
- [3] 钟珲,陈守稳. 时差与测向结合解高重频信号定位模糊的方法[J]. 现代防御技术, 2008,36(5):115-119. (ZHONG Hui, CHEN Shouwen. Approach combining with radar direction finding of solving ambiguous location with high PRF signal[J]. Modern Defence Technology, 2008,36(5):115-119.)
- [4] LU Ming, GUO Shimin. Application of processing algorithm of TDOA location based on data fusion [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2007(4):100-102.
- [5] 钱剑勋. 长基线时差定位中定位模糊问题[J]. 四川兵工学报, 2010,31(5):138-140. (QIAN Jianxun. Eliminating location ambiguity in long distance in TDOA[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010,31(5):138-140.)
- [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. TDOA location precision of target on the ground[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2008,23(6):17-20.)
- [7] 袁罡,陈鲸. 三站时差定位模糊问题解决方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2004,9(1):89-92. (YUAN Gang, CHEN Jing. Solution on ambiguity of time difference location system of three stations[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2004,9(1):89-92.)
- [8] 李红伟,李淳. 基于时差的多辐射源数据关联与无源定位算法[J]. 航天电子对抗, 2014(4):36-39. (LI Hongwei,LI Chun. Multi-target data association and passive localization algorithm based on TDOA[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2014(4): 36-39.)
- [9] 倪忠德,马宝华. 海上编队多辐射源目标数据关联模型及仿真分析[J]. 探测与控制学报, 2007,29(4):24-26. (NI Zhongde,MA Baohua. Data association model and simulation of multiple radiation targets of naval formation[J]. Journal of Detection & Control, 2007,29(4):24-26.)
- [10] 倪忠德,冯国华,马宝华. 基于加权最小二乘法的多舰定位算法[J]. 北京理工大学学报, 2005,25(11):971-974. (NI Zhongde,FENG Guohua,MA Baohua. An algorithm of multiple-vessel localization based on weighting least squares[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005,25(11):971-974.)
- [11] 刘李楠,赵晓萌. 基于微波辐射计的多舰无源定位算法[J]. 计算机仿真, 2012,29(1):5-8. (LIU Linan,ZHAO Xiaomeng. Algorithm of passive multiple-vessel localization based on microwave radiometer[J]. Computer Simulation, 2012,29(1): 5-8.)
- [12] 张宏元,穆贺强. 基于相关算法消除高重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 Hongyuan,MU Heqiang. Eliminating TDOA location ambiguity about HPRF signal based on correlation algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008,30(5):816-818.)

作者简介:



董 勇(1965-),男,山东省日照市人,高级工程师,主要研究方向为电子系统设计、信号处理等.email:bravedong@sina.com.

杨柳青(1984-),女,黑龙江省齐齐哈尔市人,工程师,主要研究方向为软件系统设计.

齐春东(1975-), 男, 北京市人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为信号处理等.

刘 帅(1984-),男,河北省保定市人,硕士, 高级工程师,主要研究方向为卫星通信与数传系 统、信号处理等.

张 璐(1983-), 女, 西安市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星测控与通信系统等.

王虎妹(1976-),女,河南省许昌市人,博士,研究员,主要研究方向为卫星系统、信号处理等.