

一种基于多辐射源匹配的未知辐射源的定位方法

赵洪立* 习建博

(中国电子科技集团第三十八研究所 合肥 230088)

(数字阵列技术重点实验室 合肥 230088)

(智能情报处理重点实验室 合肥 230088)

摘要: 无源定位系统利用民用辐射资源, 具备静默探测的优势, 为目前的研究热点之一。某些情况不能直接获取辐射源位置, 这影响了该系统的应用, 例如邻国民用调频台。该文提出了利用多辐射源匹配的定位方法, 解决了未知辐射源定位的问题。仿真结果表明该方法计算量小, 部分定位精度最好可达到 1 m, 对提高战术应用具有重要参考价值。

关键词: 无源定位; 民用辐射源; 静默探测; 多辐射源匹配

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)06-0727-05

DOI: 10.12000/JR14128

A Method of Unknown Illuminator Location Based on Matched Multi-illuminators

Zhao Hong-li Xi Jian-bo

(No. 38 Research Institute, China Electronic Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

(Key Laboratory of Digital Array Technology, Hefei 230088, China)

(Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Hefei 230088, China)

Abstract: As one of the research hotspots, passive location system has the advantage of silent detection using civil radio illuminators. Sometimes the location information of the illuminators can't be obtained, such as the illuminators in neighboring country, which impact the use of the system. A method of unknown illuminator location is proposed, which takes use of matching multi-illuminators. The results of simulation are valuable references for tactical application of this system with simple calculation and high accuracy of positioning.

Key words: Passive location; Civil radio illuminators; Silent detection; Matched multi-illuminators

1 引言

无源雷达系统分为两种, 一种利用目标自身的辐射完成对目标的定位, 一种利用第三方的机会照射源, 通过检测目标的反射波发现并定位目标, 第 2 种具有潜在的隐蔽探测和抗静默等优势, 成为雷达界关注的一种新体制雷达^[1-3]。该体制雷达按目标定位用的接收站的数量分为两种, 单站定位和多站定位。单站外辐射源定位系统实现简单, 成本较低, 但定位精度较差^[4]。多站定位系统采用特殊布站形式可实现瞬时高精度定位^[5]。该体制雷达用于定位的量测种类有多种, 基于不同类型量测的定位方法有: 测向(Direction Of Arrival, DOA)定位、时差(Time Difference Of Arrival, TDOA)定位、多

普勒频率(Doppler Frequency, DF)定位及它们的混合定位体制^[6-8]。大多数文章多在讨论在已知发射站和接收站位置的情况下如何提高定位精度和跟踪效果, 本文则探讨在如何利用未知位置的辐射源资源提高该体制雷达战术应用价值。

2 基本原理

以单站定位系统为例, 如图 1 所示。系统主要利用直达波信号作为参考信号, 完成与目标反射波的多普勒相关处理, 根据相关处理获取目标回波相对直达波的时间延迟和双基地多普勒速度。通过主阵面的数字波束形成技术获取目标方位信息, 利用时间延迟和目标方位联立方程组获取目标位置^[9,10]。目标位置即为 1 个椭圆与 1 条射线的交点, 椭圆的两个焦点分别为发射站和接收站, 射线的端点为接收站, 方向为目标方位, 如图 2 所示。

2014-11-20 收到, 2015-01-21 改回

国家部委基金资助课题

*通信作者: 赵洪立 zhaohongli_xd@163.com

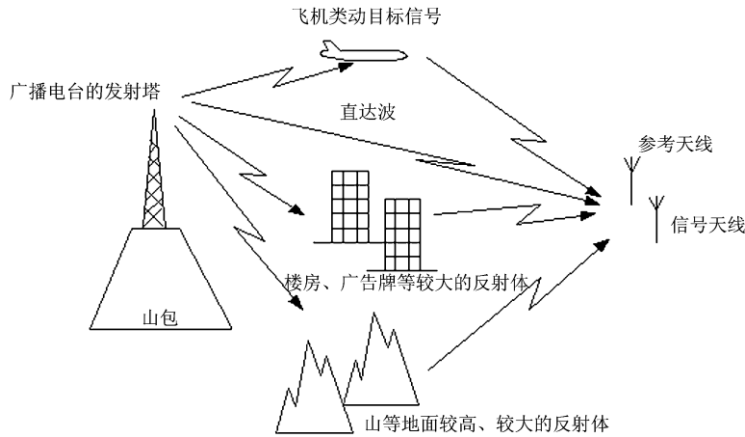


图 1 民用广播目标定位系统几何位置示意图

Fig. 1 Geometric position schematic diagram of location system based on civil broadcasting

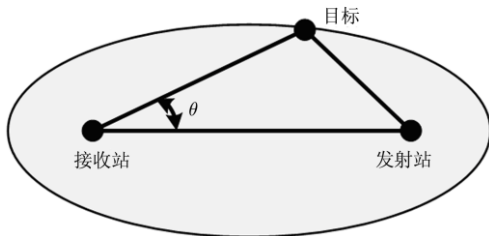


图 2 交叉定位图

Fig. 2 Schematic diagram of cross location

当某些外辐射源的位置无法获取时(例如辐射源位于无法简单到达的山区或者位于另外的国家),这些辐射源不能应用于该系统,特别是当该类辐射源具备提高探测范围等战术应用价值时,辐射源位置未知必然会降低上述系统的战术应用价值。针对上述情况,借鉴导航系统中的多传感器组合应用的概念^[1],本文从多个辐射源的匹配利用上入手,给出了解决上述问题的方法。

3 多辐射源匹配定位方法

常规的解决方法是在飞机上安装高精度 GPS,依据目标位置计算未知辐射源的位置,该方法必须安排专门的验证飞行。多辐射源匹配定位方法的基本思路是:在多个辐射源的观测重叠区(例如图 3 中的区域 III),通过目标匹配,获得未知辐射源定位目标的位置信息,进而解算未知辐射源位置。

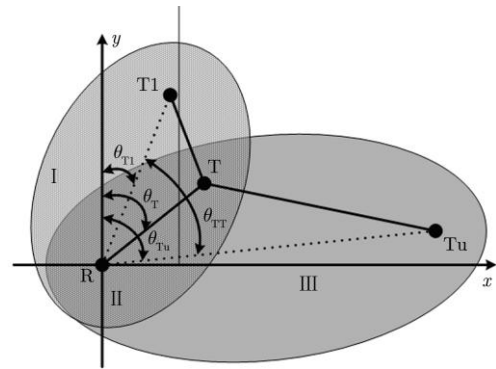


图 3 双辐射源匹配定位示意图

Fig. 3 Schematic diagram of location based on two matched illuminators

以双辐射源匹配为例,见图 3。图中 R 为接收站,具备距离和与到达角的测量能力。T1 是已知位置的辐射源,即 T1 在直角坐标系中的位置 (x_{T1}, y_{T1}) , 以及方位 θ_{T1} 已知。Tu 为未知位置的辐射源,利用雷达的测角能力, Tu 的方位 θ_{Tu} 已知。区域 I 为辐射源 1 与接收站 R 组成的双基地雷达系统的观测区域,区域 II 为未知位置的辐射源 2 与接收站 R 组成的双基地雷达系统的观测区域,区域 III 为区域 I 与区域 II 的交叠区域。目标 T 为区域 II 中的一个目标。

辐射源 1 与接收站 R 组成的雷达系统可以获得量测 $R_{RT} + R_{TT1}$ 和 θ_T , 即

$$\left. \begin{aligned} \sum_1 &= R_{RT} + R_{TT1} = \sqrt{(x_T - x_R)^2 + (y_T - y_R)^2} + \sqrt{(x_T - x_{T1})^2 + (y_T - y_{T1})^2} \\ \tan(\theta_T) &= \frac{y_T}{x_T} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中,可以求解出 x_{T0}, y_{T0} 。

此处，可以利用多个已知辐射源联立提高匹配目标的定位精度，如式(2)。

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_T, y_T) &= \sum_1 = \sqrt{(x_T - x_R)^2 + (y_T - y_R)^2} + \sqrt{(x_T - x_{T1})^2 + (y_T - y_{T1})^2} \\ f_2(x_T, y_T) &= \tan(\theta_{T1}) = \frac{y_T}{x_T} \\ &\vdots \\ f_{2n-1}(x_T, y_T) &= \sum_n = \sqrt{(x_T - x_R)^2 + (y_T - y_R)^2} + \sqrt{(x_T - x_{Tn})^2 + (y_T - y_{Tn})^2} \\ f_{2n}(x_T, y_T) &= \tan(\theta_T) = \frac{y_T}{x_T} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在 (x_{T0}, y_{T0}) 处将式(2)做 1 次泰勒展开，忽略 2 次项，获得式(3)。

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_T, y_T) &= f_1(x_{T0}, y_{T0}) + \frac{\partial}{\partial x} f_1'(x_{T0}, y_{T0})(x_T - x_{T0}) + \frac{\partial}{\partial y} f_1'(x_{T0}, y_{T0})(y_T - y_{T0}) \\ f_2(x_T, y_T) &= f_2(x_{T0}, y_{T0}) + \frac{\partial}{\partial x} f_2'(x_{T0}, y_{T0})(x_T - x_{T0}) + \frac{\partial}{\partial y} f_2'(x_{T0}, y_{T0})(y_T - y_{T0}) \\ &\vdots \\ f_{2n}(x_T, y_T) &= f_{2n}(x_{T0}, y_{T0}) + \frac{\partial}{\partial x} f_{2n}'(x_{T0}, y_{T0})(x_T - x_{T0}) + \frac{\partial}{\partial y} f_{2n}'(x_{T0}, y_{T0})(y_T - y_{T0}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

利用最小二乘算法、牛顿迭代等多种寻优算法^[12]，即可获得最优的修订值：

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= x_T - x_{T0} \\ \Delta y &= y_T - y_{T0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

目标位置的最终解为：

$$\left. \begin{aligned} x_{T\text{opt}} &= \Delta x + x_{T0} \\ y_{T\text{opt}} &= \Delta y + y_{T0} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

对于未知辐射源 2，可以获得距离和、目标角度以及辐射源角度信息，目标角度用于目标匹配，匹配获得辐射源获取的目标位置信息，进而获得：

$$\left. \begin{aligned} \sum_{T1} R_{RT} + R_{TTu} - R_{RTu} &= \sqrt{(x_T - x_R)^2 + (y_T - y_R)^2} + \sqrt{(x_T - x_{Tu})^2 + (y_T - y_{Tu})^2} - \sqrt{(x_R - x_{Tu})^2 + (y_R - y_{Tu})^2} \\ \tan(\theta_{Tu}) &= \frac{y_{Tu}}{x_{Tu}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)可以求解出唯一解 (x_{Tu0}, y_{Tu0}) ，这是 1 条双曲线和 1 条射线的交点，当射线与该双曲线焦点处的切线接近平行时，解算精度较低。

考虑目标的持续移动(K 个航迹点)，可以获得含多个定位方程的方程组用以提高精度，即式(7)。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{T1} &= \sqrt{(x_{T1} - x_R)^2 + (y_{T1} - y_R)^2} + \sqrt{(x_{TK} - x_{Tu})^2 + (y_{T1} - y_{Tu})^2} - \sqrt{(x_R - x_{Tu})^2 + (y_R - y_{Tu})^2} \\ \sum_{TK} &= \sqrt{(x_{TK} - x_R)^2 + (y_{TK} - y_R)^2} + \sqrt{(x_{TK} - x_{Tu})^2 + (y_{T1} - y_{Tu})^2} - \sqrt{(x_R - x_{Tu})^2 + (y_R - y_{Tu})^2} \\ \tan(\theta_{Tu}) &= \frac{y_{Tu}}{x_{Tu}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

将式(6)的解作为初始解,在该点进行泰勒展开,忽略高次项,即可获得式(7)的近似线性方程组。类似于式(2)的求解方法,获得式(7)的最小二乘解。

求解过程中两次用到了冗余方程求解,起到了类似于非相干积累的作用,提高了定位精度。将上述过程步骤化,如下:

(1) 寻找位于区域II中,1个波束内仅存在为1个目标的目标作为匹配定位目标T;

(2) 利用已知辐射源1,获得目标的量测(距离和 $R_{RT} + R_{TT1}$ 和 θ_T 估计值 θ_{A1});

(3) 利用 $R_{RT} + R_{TT1}$ 和 θ_{T1} 联立方程组或利用多个已知辐射源的多组量测获得冗余方程组,解算目标T位置的最优解 (x_{Topt}, y_{Topt}) ,同时获得目标方位的最佳估计 θ_{Topt} ;

(4) 利用主阵面对未知辐射源进行多波束测角,获取未知辐射源的方位 θ_{Tu} ;

(5) 利用未知辐射源2,获得 $R_{RT} + R_{TTu} - R_{RTu}$ 和目标T的方位 θ_{A2} (θ_T 估计值);

(6) 利用 θ_{A1} 和 θ_{A2} 完成目标匹配,若仅利用1个已知辐射源联立方程,则取 $\theta_T = (\theta_{A1} + \theta_{A2})/2$,若利用多个辐射源联立方程,可取 $\theta_T = \theta_{Topt}$;

(7) 利用未知辐射源2获得的 $R_{RT} + R_{TTu} - R_{RTu}$ 和 θ_{Tu} 联立方程组或利用目标航迹中的多个点联立冗余方程组,解算未知辐射源2的位置 x_{Tu} 和 y_{Tu} ;

(8) 利用外辐射源2的位置,可以完成对区域III中目标的定位探测。

4 仿真验证

设外辐射源雷达位于直角坐标系坐标原点,雷达作用距离积为 $300\text{ km} \times 300\text{ km}$,距离和测距精度为 800 m ,对目标的测角精度为 1.2° ,对未知辐射源的测角精度为 0.5° 。已知辐射源1位于 $(0\text{ km}, 80$

$\text{km})$,未知辐射源2位于 $(100\text{ km}, 10\text{ km})$ 时,图4为匹配目标位置不同的未知辐射源的定位精度等高线分布图。图4中用三角形标记出了定位精度分别为 10 m 和 1 m 的区域。

图4中 10 m 定位区域的面积为 6000 km^2 , 1 m 定位区域的面积约为 1900 km^2 。在利用辐射源的目标定位时,可以利用多个已知辐射源,进行非相参积累提高定位精度,在解算未知辐射源位置时,可以利用目标航迹中的多个相邻的点,联立冗余方程组,采用最小二乘求解方法可以进一步提高定位精度。图5就是采用5个相邻航迹点的定位精度等高线图。图5中 10 m 定位区域面积约为 15400 km^2 (提高约2.6倍), 1 m 定位区域面积约为 6000 km^2 (提高约3倍),精度区域面积明显提高。

仿真试验表明利用多辐射源匹配的未知辐射源定位方法,计算简单,定位精度高,部分区域可达到 1 m ,应用更多辐射源或者更多航迹点可以进一步提高高精度区的范围,在降低寻找匹配目标难度的同时进一步提高了定位精度。

5 结束语

本文针对外辐射源雷达如何利用未知位置的辐射源提高战术应用价值的问题,提出了一种采用多辐射源匹配的未知辐射源定位的方法,该方法不增加雷达设备,不需要合作目标携带GPS的配合飞行,该算法简单易行,利用更多辐射源或更多航迹点可以进一步提高定位精度,仿真表明该方法的部分定位精度最好可达到 1 m 。

利用敌方未知辐射源的多辐射源定位系统,如何利用长基线形成超远距离观测是进一步发挥本文方法提高战术应用价值的热点之一。

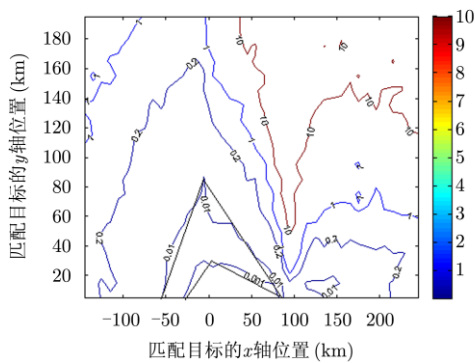


图4 未知辐射源定位精度等高图(单位: km)
Fig. 4 Contour line of unknown illuminator location accuracy (unit: km)

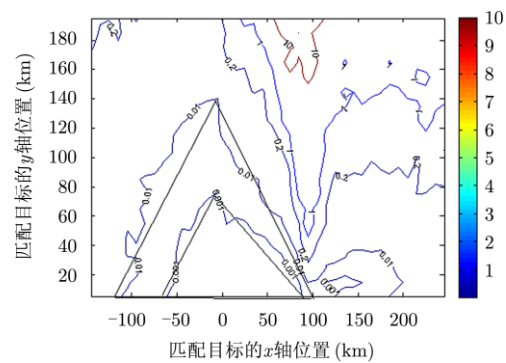


图5 采用5个航迹点的定位精度分布图(单位: km)
Fig. 5 Contour line of location accuracy using five track points (unit: km)

参考文献

- [1] 黄知涛, 周一宇, 姜文利. 基于外辐射源信号的时差定位系统定位精度分析[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2257-2262.
Huang Zhi-tao, Zhou Yi-yu, and Jiang Wen-li. Location precision analysis for passive surveillance systems exploiting non-cooperative transmitters[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(11): 2257-2262.
- [2] 罗玲. 基于多个调频广播电台的无源雷达技术研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2010.
- [3] 杨进佩. 基于 GPS 的无源雷达技术研究[D]. [博士学位论文], 南京理工大学, 2006.
- [4] Jauffret C and Pillon D. Observability in passive target motion analysis[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(4): 1290-1300.
- [5] Becker K. Three-dimensional target motion analysis using angle and frequency measurements[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(1): 284-301.
- [6] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [7] 李红伟, 王俊, 刘玉春. 两种外辐射源雷达跟踪算法性能分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(6): 1049-1052.
Li Hong-wei, Wang Jun, and Liu Yu-chun. Performance analysis of two passive radar tracking algorithms[J]. *Journal of Xidian University*, 2010, 37(6): 1049-1052.
- [8] 牛新亮, 赵国庆, 刘原华, 等. 低空目标高精度无源时差定位方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(5): 862-886.
Niu Xin-liang, Zhao Guo-qing, Liu Yuan-hua, et al. High precision passive TDOA location method for low-altitude targets[J]. *Journal of Xidian University*, 2009, 36(5): 862-886.
- [9] Weiss A J. Direct position determination of narrowband radio frequency transmitters[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, 11(5): 513-516.
- [10] Caffew J J. *Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems*[M]. Boston: Kluwer Academic Publisher, 2000.
- [11] 林雪原. 基于交互式多模型的多传感器组合导航系统[J]. 兵工自动化, 2011, 30(6): 27-30.
Lin Xue-yuan. Study on multi-sensor integrated navigation system based on interacting multi-model[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2011, 30(6): 27-30.
- [12] 刘利军, 韩焱. 基于最小二乘法的牛顿迭代信源定位算法[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(3): 325-328.
Liu Li-jun and Han Yan. Newton iterated signal source localization algorithm based on the least squares method[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(3): 325-328.

作者简介



赵洪立(1978-), 男, 天津人, 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 高级工程师, 研究方向为雷达系统、雷达信号处理、雷达数据处理、无源定位雷达等。
E-mail: zhaohongli_xd@163.com



习建博(1986-), 男, 河北秦皇岛人, 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 工程师, 研究方向为雷达系统、雷达信号处理等。
E-mail: xijianbo1128@163.com