

文章编号: 2095-4980(2021)04-0569-04

一种长基线阵列地面单站无源定位方法

李 明

(中国电子信息产业集团有限公司 国营第七二二厂, 广西 桂林 541001)

摘 要: 为解决地对空快速单站无源定位问题, 提出了一种长基线阵列地面单站无源定位方法。该方法将阵列天线嵌套在三天线长基线系统中, 利用目标到长基线两端的视向夹角隐含在相位差参数上的原理, 由视向夹角相位差估计角度变化率, 同时利用阵列天线测出目标的实际方向, 最后获得目标的位置参数。该方法可以在单个脉冲实现对目标的无源定位, 仿真结果验证了该方法的正确性。

关键词: 阵列天线; 无源定位; 相位差; 角度变化率

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021184

Passive location method to long baseline antenna array

LI Ming

(The State 722 Factory, China Electronics Corporation, Guilin Guangxi 541001, China)

Abstract: A passive location method to long baseline antenna array is proposed. In this method, an array antenna is embedded into a long baseline system with tri-antenna firstly. According to the principle that the angle between the target and the long baseline is implied in the phase difference information, the angle changing rate can be estimated from the phase difference of the angle between the target and the long baseline. The actual direction of the target can be measured by the array antenna. The position parameters of the target are obtained thereafter. The method can be applied to locate the target by using only a single pulse. The simulation results verify the validity of the proposed method.

Keywords: antenna array; passive location; phase difference; angle changing rate

无源定位技术是一种利用目标发出的电磁波信号实现对目标定位的技术^[1-2], 由于探测器本身不发射电磁波信号, 具有很高的隐蔽性。无源定位系统由于直接接收目标辐射的直达波, 接收信号的大小与距离的二次方成反比, 且不受目标隐身的影响, 因此其探测距离可以大于有源雷达。无源定位系统大致可分为两种类型: 多站系统与单站系统。多站无源定位系统由多个在空间上分离配置的观测平台同时对辐射源信号进行接收处理, 依赖于多观测平台之间的协同工作和大量的数据传输, 系统相对较复杂, 同时多站选址在实际应用中存在诸多问题。当前, 我国在钓鱼岛海域和南海区域上与相关国家都存在着领土和海权的纠纷, 周边邻国和西方势力联合不断对我实施围堵和干扰。为了及时掌控相关区域的海情、空情和电磁情报, 迫切需要对周边海域上的舰机目标活动进行及时侦测和不间断监视的装备。而这些区域上多数地区无法选择适合长基线多站定位系统架设的理想阵地, 存在许多侦察空白。地面单站体制的无源定位系统, 由于结构简单可靠, 适应信号形式强, 得到优先发展和装备。近年来, 以地面无源侦察为主要手段, 以相位差和相位差变化率为基本测量的定位技术在国外, 尤其是美国, 得到了快速发展。长基线单站定位电子侦察定位系统^[2-3], 利用基线长度为几十到几百米的天线阵列侦收雷达、通信和敌我识别等辐射源信号, 根据球面波前测量模型, 从天线阵相位差参数中解算辐射源目标的位置参数^[4]。针对地面单站无源定位, 本文提出一种长基线阵列地面单站快速无源定位方法。该方法可以在单个脉冲实现对目标的无源定位, 在目标侦察、目标定位等方面具有非常广阔的应用前景。

1 地面短基线定位原理

短基线定位体制通过测量地面天线的相位差对辐射源进行定位。一般情况下, 相位差测量误差折算到时差

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-05-27

基金项目: 国防科技创新特区资助项目(193A231012001)

只有几个皮秒或几十个皮秒,远小于长基线时差定位体制中几十纳秒的时差误差,因而能够在较短的基线条件下实现对远距离目标的精确定位。相位差测量存在很多的模糊周期,如果用长短基线组合来解模糊,则需要非常多的天线。为了减少天线数目,设计特定阵型结构的长天线阵列,如图 1 所示。整个天线孔径长度为 $2d$,定义目标到天线两端的距离分别为 r_1 与 r_2 ,距离天线中心的距离为 r ,目标到天线两端的视向夹角 α 隐含在相位差参数上,目标与天线中心的方位角为 β 。

由于目标距离远大于天线孔径长度,因此视向夹角 α 非常小,其对应的相位差存在很少的模糊周期。根据三角关系可得

$$r^2 + d^2 - 2rd \cos \beta = r_1^2 \quad (1)$$

$$r^2 + d^2 + 2rd \cos \beta = r_2^2 \quad (2)$$

对上式进行整理,若在天线两端以及天线中心接收的信号分别为 s_1, s_2 和 s_0 ,对应的视向夹角相位差的测量公式为:

$$\phi = \arg \left[s_1 \times (s_0^*)^2 \times s_2 \right] \quad (3)$$

目标视向夹角相位差的测距公式为:

$$r \approx \frac{\pi d^2 \sin^2 \beta}{2\lambda\phi} \quad (4)$$

式中 λ 为信号波长。

可以获取目标的具体坐标 (x_t, y_t)

$$x_t = x_0 + r \sin \beta, \quad y_t = y_0 + r \cos \beta \quad (5)$$

式中: (x_0, y_0) 为天线中心坐标。

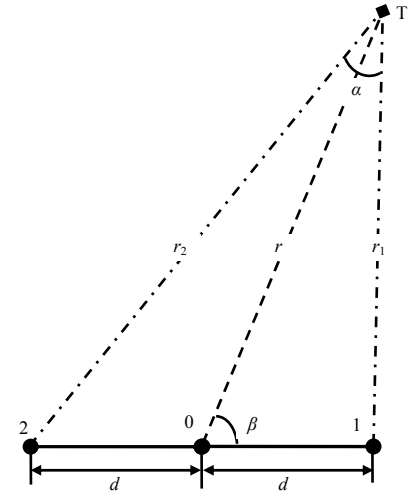


Fig.1 Relationship between antenna and target
图 1 天线与目标关系

2 测距误差分析

对于百米量级之内的单站定位系统及一般的应用情形,利用近似测距公式(4)已能充分满足测距精确度的要求。因此,以下的分析将以该测距公式为基础。根据测距公式(4),测距误差主要来源于测相误差 $\delta\phi$ 和测角误差 $\delta\beta$,同时阵间距误差 δd 也会带来一定的测距偏差,误差传播公式如下:

$$\delta r = -\frac{2\pi d^2 \sin^2 \beta}{\lambda\phi^2} \times \delta\phi + \frac{4\pi d^2 \sin \beta \cos \beta}{\lambda\phi} \times \delta\beta + \frac{4\pi d \sin^2 \beta}{\lambda\phi} \times \delta d = -\frac{\lambda r^2}{2\pi d^2 \sin^2 \beta} \times \delta\phi + \frac{2r \cos \beta}{\sin \beta} \times \delta\beta + \frac{2r}{d} \times \delta d \quad (6)$$

阵间距误差 δd 是一个固定量,目前采用先进仪器测量该偏差可以控制在毫米量级。可见,对于阵间距为几十米或上百米量级的长基线干涉仪(Long Baseline Interferometer, LBI)系统, δd 引入的测距相对误差将小于万分之一。因此, δd 的影响在实际应用中可以忽略不计。实际上, δd 的影响主要是在相位测量中引入系统误差。

3 地面单站定位方法步骤

整个地面长基线阵列单站定位流程具体实施步骤为:

- 1) 利用高精度测量设备,对地面长基线阵列天线孔径进行精确测量,获取天线孔径长度 d 。
- 2) 在天线基线中心采用阵列测量方式,实现对目标的精确测向,获取目标的方向 β ;
- 3) 对长基线两端天线接收的信号 s_1, s_2 分别与中心天线接收信号 s_0 进行相干处理,解算出视向夹角相位差:

$$\phi = \arg \left[s_1 \times (s_0^*)^2 \times s_2 \right]。$$

- 4) 利用目标视向夹角相位差的测距公式 $r \approx (\pi d^2 \sin^2 \beta) / (2\lambda\phi)$ 对目标距离地面长基线中心的距离进行估计。
- 5) 解算出目标距离天线中心距离后,根据目标的测向结果计算出目标的距离坐标。

该方法可以瞬时获取目标的坐标,适合地面对空中机载雷达目标的快速无源定位。设计的地面长基线单站定位设备组成见图 2。

天线阵包括水平测距干涉仪和阵列测向天线子阵。水平测距干涉仪由 3 个置于天线孔径两个端点与中心位置的天线阵元组成,用于对辐射源进行被动测距;利用高精度测向阵列,实现对辐射源方位角的测量^[5-6]。天线阵与接收机之间以微波光纤传输线传输射频信号;天线接收到的信号首先经过滤波、放大和电-光调制,转变为光信号后由光纤传输至信号处理机。在处理中心经过光-电解调,将光信号恢复成射频信号,输入多通道接收机

进行处理。信号处理机由射频接收机、高速采集卡和数字信号处理卡组成。多通道射频接收机采用统一本振将射频信号下变频到中频；多通道同步采集卡对中频进行模—数转换得到中频数字信号，由数字信号处理卡进行信号检测、参数测量和定位解算；处理结果在终端 PC 进行显示和存储。

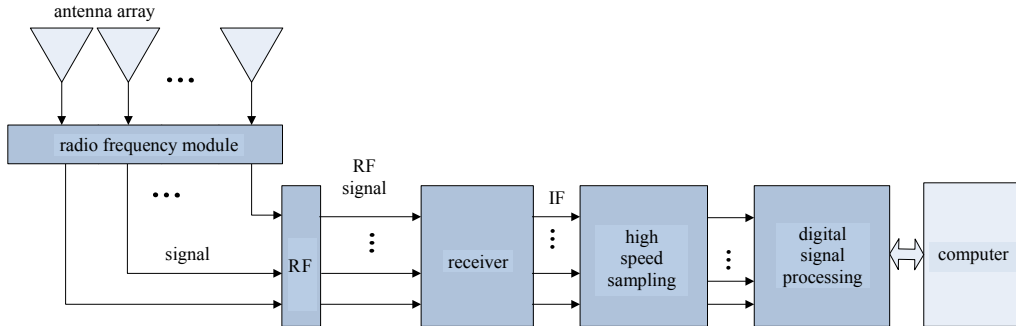


Fig.2 Architecture of ground long baseline passive location
图 2 地面长基线无源定位总体架构图

与多站时差定位方法(站间距离 10 km 以上)相比，基线一般只有 100 m 至几百米，阵地适应性强，安装和部署方便；与传统质点运动学单站无源定位相比，定位快，精确度高，可实现单脉冲定位，对信号形式的适应性强；此外该方法无目标共视问题和高重频模糊问题，适应窄波束天线目标和高重频目标。

4 仿真结果

仿真选择系统工作频段为 8~12 GHz 的 X 波段。该频段上的空中辐射源目标主要包括机载火控雷达和气象雷达等。按照天线测距精确度 0.1 m，测向精确度优于 0.5°，天线之间信号的相位差测量误差为 10° 进行设置。以典型波长为 0.033 m 的机载火控雷达为仿真对象，目标距离地面天线阵列中心为 200 km，与天线阵列法线方向的夹角为 70°。图 3 与图 4(a)分别为在相位测量精确度 10°，测向精确度 0.5° 条件下，采用本文方法的目标无源定位结果与定位误差，采用 200 次蒙特卡洛试验，整个地面基线长度为 100 m 即可获得较高定位精确度。

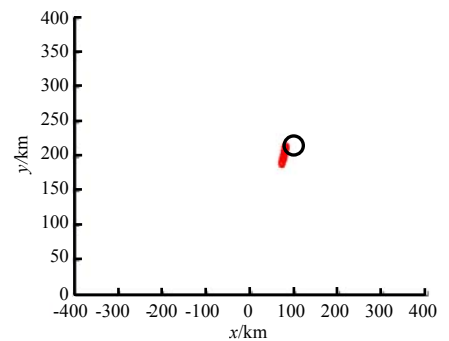


Fig.3 Target positioning results
图 3 目标定位结果

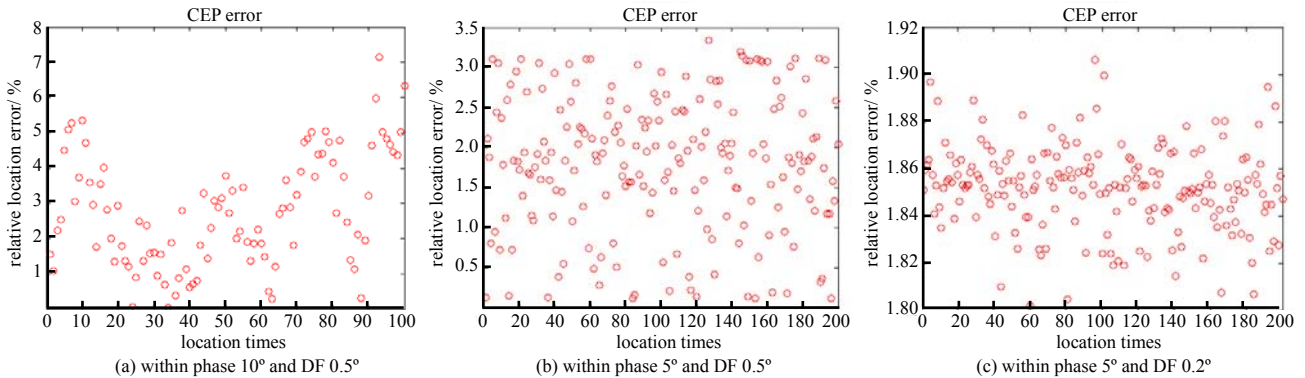


Fig.4 Error results of target positioning
图 4 目标定位误差结果

图 4(a)为目标圆概率误差(Circular Error Probable, CEP)，可以看出目标的圆概率误差基本在目标距离的 3% 左右。为了进一步验证提出的地面无源定位随天线之间信号的相位测量精确度与测向精确度之间的关系，图 4(b)仿真了相位测量精确度 5°，测向精确度 0.5° 条件下的无源定位结果，图 4(c)仿真了相位测量精确度 5°，测向精确度 0.2° 的无源定位结果，分别进行 200 次定位仿真试验。

可以看出，随着相位测量精确度与测向精确度的提升，目标的定位精确度能够得到较大的改善，由于测向误差呈现出随机分布特性，因此在增加到 200 次定位试验结果时发现定位精确度也呈现出一定的收敛性。根据式(6)仿真在相位测量精确度 5°，测向精确度 0.5° 的目标定位误差分布，结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出，随着

目标距离增大,测距误差等高线迅速变密,且测距误差变大。同时随着目标方位角偏离天线法线方向,测距误差的等高线逐渐变密,在基线方向上则无法有效测距。可见,系统有效作用区域位于天线阵列法线两边大约 60° 的角度范围内。

5 结论

针对无源定位需求,提出了一种阵列长基线地面单站快速无源定位方法,该方法将阵列天线嵌套在长基线系统中,利用目标到长基线两端的视向夹角隐含在相位差参数上的原理,由视向夹角相位差估计夹角变化,同时利用阵列天线测出目标的实际方向,最后获得目标的位置参数。该方法通过测量地面天线的相位差对辐射源进行定位,一般情况下相位差测量误差折算到时差只有几个皮秒或几十个皮秒,远小于长基线时差定位体制中几十纳秒的时差误差,因而能够在较短的基线条件下实现对远距离目标的精确定位,是未来地对空单站无源定位领域的重要发展方向。

参考文献:

- [1] 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. (SUN Zhongkang,ZHOU Yiyu, HE Lixing. Single multiple bases active and passive location[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1996.)
- [2] 郭福成,樊昀,周一宇,等. 空间电子侦察定位原理[M]. 北京:国防工业出版社,2012. (GUO Fucheng,FAN Yun,ZHOU Yiyu,et al. Localization principles in space electronic reconnaissance[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2012.)
- [3] 郁春来,张元发,万方. 无源定位技术体制及装备的现状与发展趋势[J]. 空军雷达学院学报,2012,26(2):79-85. (YU Chunlai,ZHANG Yuanfa,WAN Fang. Actuality and development trends of passive location technical system and equipment[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2012,26(2):79-85.)
- [4] 王鼎,吴志东,尹洁昕. 信号波形已知条件下多目标直接定位性能分析及其改进算法[J]. 电子学报,2017,45(12):2881-2889. (WANG Ding,WU Zhidong,YIN Jiexin. A performance analysis and improvement algorithm for multiple-source direct localization with known signal waveforms[J]. Acta Electronica Sinica, 2017,45(12):2881-2889.)
- [5] 尹洁昕. 基于阵列信号的直接定位方法研究[D]. 郑州:战略支援部队信息工程大学,2018. (YIN Jiexin. Research on direct position determination methods based on array signals[D]. Zhengzhou,China:PLA Strategic Support Force Information Engineering University, 2018.)
- [6] 李炳荣,马强,王欣欣. 机载单站对运动目标无源定位跟踪算法[J]. 海军航空工程学院学报,2014,29(1):14-18. (LI Bingrong,MA Qiang,WANG Xinxin. Passive location and tracking algorithm of airborne single station for moving target[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical, 2014,29(1):14-18.)

作者简介:

李明(1984-),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为雷达电子侦察、无源定位以及电子对抗总体技术。email:glchliming@163.com.

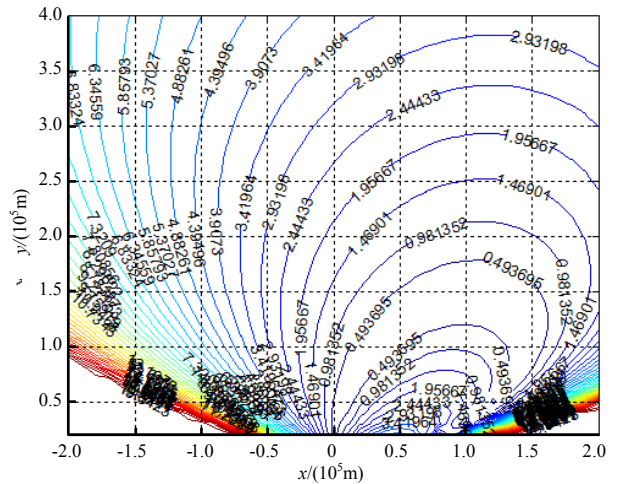


Fig.5 Contour of target positioning error
图5 目标定位误差等高线