

# 基于双天线单元的单站无源定位技术

窦修全,国辛纯

(中国电子科技集团公司54所,石家庄 050081)

**摘要:**传统相位差变化率单站无源定位技术是以方位和相位差变化率为观测量,建立观测方程,通过定位滤波算法递推计算出目标位置,由于测向系统受接收机通道幅相不一致性、平台自身姿态误差影响,较难实现高精度测向,从而影响定位精度和收敛时间,由于方位和相位差变化率参数分别通过独立天线阵测量得到,提出去掉测向天线阵,利用2个天线单元提取相位差变化率,仅利用相位差变化率为观测量,实现目标位置估计。该定位算法可有效减少系统硬件,简化定位运算过程,提高定位运算速度。

**关键词:**无轨迹卡尔曼滤波;测向;相位差变化率;单站无源定位

中图分类号:TN971.1

文献标识码:A

文章编号:CN32-1413(2014)01-0011-04

## Single Station Passive Location Technology Based on Two-antenna Unit

DOU Xiu-quan, GUO Xin-chun

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** Traditional single station passive location algorithm based on phase difference rate of change uses the direction and phase-difference rate of change as the observation quantity to establish observation equation, and calculates the target position by means of location filtering algorithm recursion. Due to the effects of receiver channel amplitude /phase errors and platform attitude error of direction finding system, it is difficult to realize high-accuracy direction finding, which will effect the localization precision and convergence speed. Because the direction and phase-difference rate of change parameters are got through independent antenna array measurement, this paper brings forward to get rid of direction finding antenna array, uses two antenna units to extract phase-difference rate of change, and estimate the target location only by taking phase difference rate of change as the observation quantity. The location algorithm can reduce the number of system hardware efficiently and simplify the location operation course as well as improve the location operation speed.

**Key words:** unscented Kalman filtering; direction finding; phase difference rate of change; single station passive location

## 0 引言

单站无源定位跟踪技术是利用一个观测平台,设备本身不发射信号,靠被动接收辐射源信号来实现对目标定位的技术,具有作用距离远、不易被对方发觉的优点。传统定位方法<sup>[1-2]</sup>主要有:测向定位法、测向和相位差变化率定位法,运动平台测向精度一般比较低,从而影响定位精度,客观上对测量设备提出了较高的要求。

测向和相位差变化率定位方法是通过2套独立干涉仪测量出目标的方位和相位差变化率信息,以方位和相位差变化率作为观测量,建立观测方程,来实现对辐射源目标的无源定位,而当测向出现较大误差时,会严重影响定位精度,甚至失去定位跟踪作用。基于此,本文提出仅利用相位差变化率作为观测量,通过滤波算法实现目标位置估计。

## 1 定位算法改进

在基于测向和相位差变化率单站无源定位系统中,测向天线阵和相位差变化率提取天线阵在同一基线方向,目的是保证方位信息和相位差变化率信息中所隐含的目标位置信息一致,使建立的观测方程统一,从而实现目标位置估计一致,测向天线阵和相位差变化率天线阵结构关系如图1所示,天线单元1~4实现目标测向,天线单元1和天线单元5实现目标相位差变化率提取,天线单元1在测向和相位差变化率提取时两者共用。

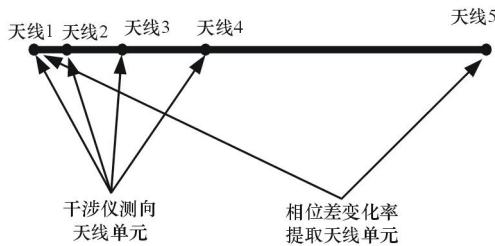


图1 定位天线阵

基于本文定位思想,将测向天线阵去掉,只留天线单元1和5提取相位差变化率信息,单元1和5之间长度根据实际侦察目标信号频率和平台自身情况决定,以选择合理布阵距离,定位精度与基线长度成正比,基线越长提取出相位差变化率越大,对定位精度越有利,为实现高精度快速定位,通常单元1和5之间的距离远远大于目标信号波长,实际接收相位差存在模糊,因此长基线相位差变化率可以通过时间处理消除模糊现象。

## 2 定位算法原理

依据运动学原理<sup>[3]</sup>,在目标与观测平台存在相对运动的条件下,利用观测平台上搭载的任意长度的二单元天线阵(干涉仪)可以获得位置未知的辐射源辐射电磁波的相位差变化率信息,此信息中含有威胁辐射源的位置信息。通过2次参数测量就可以计算出目标位置信息,即可实现对目标的实时交叉定位。

利用空中运动平台上搭载的二单元天线阵(干涉仪)可以获得位置未知的固定威胁辐射源辐射波的相位差变化率信息  $\dot{\varphi}(t)$ 。 $\dot{\varphi}(t)$  含有威胁辐射源的位置信息。

如图2所示,设空中运动平台上的2个天线阵

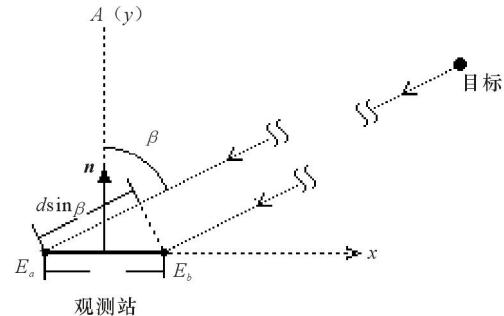


图2 水平放置干涉仪

元  $E_a$ 、 $E_b$  接收的来波信息相位差为  $\varphi(t)$ , 则:

$$\varphi(t) = \omega_r \Delta t = \frac{2\pi d}{c} f_r \sin \beta(t) \quad (1)$$

式中:  $\omega_r$  为来波角频率;  $\Delta t$  为来波到达  $E_a$ 、 $E_b$  2 个阵元的时间差;  $d$  为阵元间距(即干涉仪基线长);  $c$  为光速;  $f_r$  为来波频率;  $\beta(t)$  为来波方位角。

这里假设  $d$  远小于空中运动平台与固定威胁辐射源之间水平距离,并且空中运动平台的飞行高度远小于目标和平台之间的水平距离。

对式(1)求导,可以得出:

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{2\pi d}{c} f_r \cos \beta(t) \cdot \dot{\beta}(t) \quad (2)$$

式中:  $\dot{\varphi}(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}$ ;  $\dot{\beta}(t) = \frac{d\beta(t)}{dt}$ 。

若记  $k = \frac{2\pi d}{c}$ , 则式(2)简化为:

$$\dot{\varphi}(t) = k f_r \cos \beta(t) \cdot \dot{\beta}(t) \quad (3)$$

显然有:

$$\dot{\beta}(t) = \frac{\dot{\varphi}(t)}{k f_r \cos \beta(t)} \quad (4)$$

另外,由几何知识可以得到在某时刻  $i$ , 有:

$$\beta_i = \arctan \frac{x_r - x_{oi_1}}{y_r - y_{oi_1}} \quad (5)$$

式中:  $(x_r, y_r)$  为固定目标辐射源的水平位置坐标;  $(x_{oi_1}, y_{oi_1})$  为空中运动平台  $i$  时刻的水平位置坐标。

在式(5)两边对时间  $t$  求导,得:

$$\dot{\beta}_i = \frac{y_{oi_1} (x_r - x_{oi_1}) - x_{oi_1} (y_r - y_{oi_1})}{(x_r - x_{oi_1})^2 + (y_r - y_{oi_1})^2} \quad (6)$$

式中:  $\dot{x}_{oi_1} = \frac{dx_{oi_1}}{dt}$ ,  $\dot{y}_{oi_1} = \frac{dy_{oi_1}}{dt}$ ;  $\dot{x}_{oi_1}$ 、 $\dot{y}_{oi_1}$  为运动平台速度;  $y_{oi_1}$ 、 $x_{oi_1}$  为运动平台位置,这 2 个参量可由运动平台的导航设备提供,其反映运动平台状态信息。

从公式(6)中可以看出只存在 $x_T$ 、 $y_T$ 2个未知变量,即目标位置信息,因此理论上只要有2组不同时刻运动平台位置信息和相位差变化率信息,就可以通过如下方程组解算出目标位置信息:

$$\begin{cases} \dot{\beta}_1 = \frac{\dot{y}_{oi_1}(x_T - x_{oi_1}) - \dot{x}_{oi_1}(y_T - y_{oi_1})}{(x_T - x_{oi_1})^2 + (y_T - y_{oi_1})^2} \\ \dot{\beta}_2 = \frac{\dot{y}_{oi_2}(x_T - x_{oi_2}) - \dot{x}_{oi_2}(y_T - y_{oi_2})}{(x_T - x_{oi_2})^2 + (y_T - y_{oi_2})^2} \end{cases} \quad (7)$$

通过以上理论推导可以得出运动平台利用双天线单元能实现地面静止目标的定位,本方法和以往方法的原理有所不同,是受以往相位差变化率定位启发而推导出的一种全新的定位技术体制。

由于测量误差存在,导致解方程计算出目标位置误差较大。为实现高精度快速定位,建立以相位差变化率为观测量的观测方程,以目标位置为状态的状态方程,通过定位滤波算法,逐渐递推计算出目标位置信息。

由公式(2)可知,以 $\varphi(t)$ 为原始观测变量,建立观测方程(8),其中 $\cos\beta(t)$ 和 $\beta(t)$ 分别由式(5)和(6)得到:

$$Y_i = g(X_i) + v_i = \dot{\varphi} = \frac{2\pi d}{c} f_r \cos\beta \cdot \dot{\beta} + v_i \quad (8)$$

式中: $v(i)$ 为测量误差,是零均值的高斯白噪声,主要由干涉仪引起,其协方差矩阵记为 $R_v$ 。

用 $x_{Ti}$ 、 $y_{Ti}$ 表示目标第*i*时刻的状态信息,选取状态变量 $X_i = [x_{Ti} \ y_{Ti}]^T$ ,建立如下状态方程:

$$X_{T(i+1)} = \begin{bmatrix} x_{T(i+1)} \\ y_{T(i+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \Phi X_i + B \omega(i) \quad (9)$$

式中: $\omega(i) = [\Delta x \ \Delta y]^T$ ,为目标的瞬时速度扰动噪声,并且 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 均为零均值的高斯白噪声,其协方差矩阵记为 $R_\omega$ 。

由公式(8)、(9)得到定位模型,并利用无轨迹卡尔曼滤波(UKF)算法估计出目标位置与运动速度。

### 3 UKF 定位滤波算法

无迹变换是一种计算非线性变换中随机变量的数字特征的方法,它是UKF的基础。其基本原理是在原先状态分布中按某一规则取一些特殊的采样

点,使这些点的均值和协方差等于原状态分布的均值和协方差,再将这些点代入非线性函数中,并利用得到的函数值点集求取变换后的均值和协方差。

将UT方法应用于Kalman滤波算法,就可以得到UKF滤波算法<sup>[4]</sup>, $R_\omega$ 为过程噪声 $\omega_k$ 的均值为零时的协方差矩阵, $R_v$ 为测量噪声 $v_k$ 的均值为零时的协方差矩阵, $F$ 为非线性传输函数, $Y$ 为非线性测量函数。

初始化过程:

$$\hat{X}_0 = E[X_0], P_0 = E[(X_0 - \hat{X})(X_0 - \hat{X})^T]$$

滤波过程:

取 $k=1, 2, \dots, \infty$ ,用来表示采样时刻。

(1)根据UT变化原理计算 $2m+1$ 个Sigma取样点,及相应的权值 $W_i$ ;

(2)利用状态方程传递取样点;

(3)利用预测取样点 $\bar{X}(k|k-1)$ 和权值 $W_i$ 计算预测均值 $\bar{X}(k|k-1)$ 和预测协方差 $P(k|k-1)$ ;

(4)利用(2)所得结果预测测量取样点;

(5)预测测量值和协方差;

(6)计算UKF增益 $G(k)$ ,更新状态向量 $\bar{X}(k)$ 和方差 $P(k)$ 。

由UKF计算公式可知,以上均值和方差的估计精确到非线性函数Taylor级数展开的二次项。误差只会由3次以上高阶项引起。扩展卡尔曼滤波(EKF)仅能精确到一次项的均值及方差,并将所有高阶项忽略。该算法适用于任意非线性模型,不需估算雅各比矩阵,实现简便,估计精度比EKF要高。

### 4 仿真验证

为验证相位差变化率定位技术可实现性进行了仿真实验,并将相位差变化率定位技术与传统测向及相位差变化率联合定位技术在收敛时间、定位精度方面进行了比较。

仿真条件:平台方面:无人机平台,飞行速度800 km/h,飞行高度18 000 m,侦察范围350 km。信号方面:相位差测量误差按正态分布考虑,测量误差为15°(均方根误差),工作频率范围100~1 500 MHz。仿真过程如图3所示。为验证算法可行性,选取400 MHz和1 000 MHz 2个频点进行了仿真验证,仿真结果如图4~5所示。

通过选择400 MHz、1 000 MHz进行仿真实

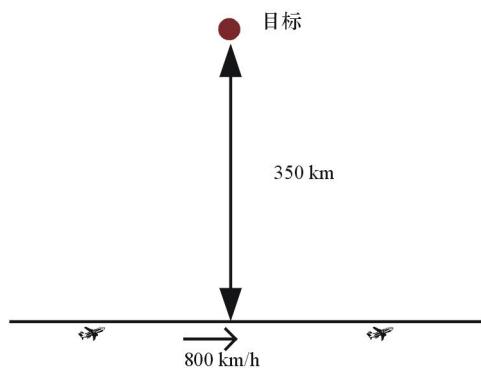


图3 仿真场景

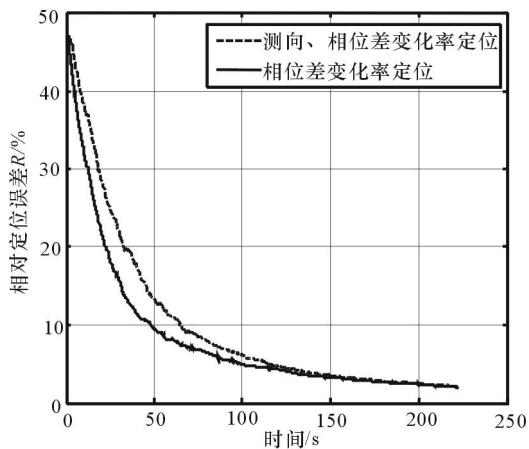


图4 400 MHz 定位收敛曲线

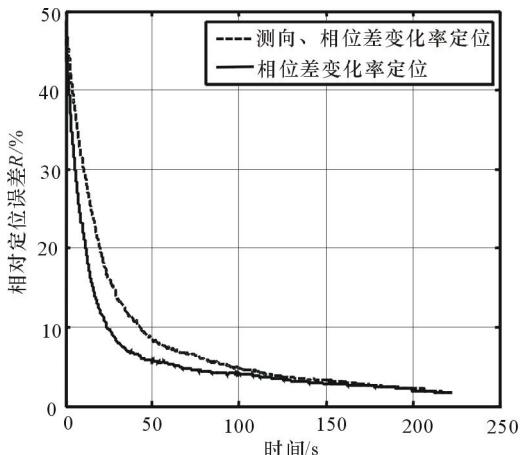


图5 1 000 MHz 定位收敛曲线

验,仿真曲线是500次蒙特卡洛试验后误差收敛曲线。图4为400 MHz定位收敛曲线,测向、相位差变化率联合定位方法达到5%定位精度,其收敛时间为100 s;相位差变化率定位方法达到5%的定位

精度,其收敛时间为115 s。图5为1 000 MHz定位收敛曲线,测向、相位差变化率联合定位方法达到5%定位精度,其收敛时间为70 s;相位差变化率定位方法达到5%定位精度,其收敛时间为90 s。

可以看出,仅利用相位差变化率可以实现目标位置估计,与测向、相位差变化率联合定位相比本方法定位收敛时间相对较慢,但2种方法最终定位精度一致。400 MHz与1 000 MHz 2个频点相比可以看出:频率越高,定位收敛时间越快,这是由于提取相位差变化率基线一定的情况下,频率越高,相位差变化率越快,提取相位差变化率参数精度相对较高,因此频率越高,定位收敛时间越快。

通过以上分析可知:相位差变化率定位与测向、相位差变化率联合定位相比,该方法不需要测向信息,定位算法复杂度低,工程易实现。

## 5 结束语

本文结合空中观测平台对地面远距离慢速运动目标进行定位的应用需求,为消除系统误差影响、提高定位精度、缩短定位时间,提出了仅仅利用相位差变化率实现目标位置估计。该方法利用的是干涉仪相位差变化率,而不是相位差,天线、通道幅度/相位的不一致性导致系统偏差通过时间求导去掉了,从而可以实现对辐射源更高精度的单站无源定位;以往方法需要多个干涉仪天线(一般4~5个)构成多基线解相位差模糊,因此接收通道多,硬件成本、复杂度高,体积、重量大,本方法可以将天线数量减少到只有2个,通过后端信号处理的方法降低了对硬件的要求。最后通过仿真验证这一算法的有效性,实现起来更为简单。

## 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.
- [2] 李淳.短波辐射源精确测向定位技术[J].无线电工程,2004,34(5):34~36.
- [3] 孙仲康.基于运动学原理无源定位技术[J].制导与引信,2001,22(1):40~44.
- [4] Julier S, Uhlmann J. A new extension of the Kalman filter to nonlinear system [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(8):1406~1408.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



### 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

### 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>