

# 一种改进的基于UKF的单站无源定位方法

邓佳欣

中国飞行试验研究院, 陕西 西安  
Email: [jxdeng0501@163.com](mailto:jxdeng0501@163.com)

收稿日期: 2021年4月2日; 录用日期: 2021年4月17日; 发布日期: 2021年4月28日

## 摘要

单站无源定位是电子侦察设备的一个重要功能。然而, 现有的方法要么涉及到复杂的非线性运算, 要么定位平台需经过长时间机动才能给出目标位置估计值。对于要求反应速度快、功耗低、体积小的设备, 现有的方法并不适用。针对该问题, 提出了一种改进的单站无源定位方法, 首先结合三角定位法对定位点进行粗略估计, 然后基于UKF进行滤波优化。仿真实验表明, 该方法能够快速给出定位值, 并能经过滤波逐步收敛。

## 关键词

无源定位, UKF, 电子侦察

# An Improved Algorithm Based on UKF for Single Station Passive Location

Jia-xin Deng

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an Shaanxi  
Email: [jxdeng0501@163.com](mailto:jxdeng0501@163.com)

Received: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Apr. 17<sup>th</sup>, 2021; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Single station passive location is an important function of electronic reconnaissance device. However, the existing methods either refer to complicated nonlinear equations, or need the station to move long time. For the device which is restricted to real time response, low power dissipation, small volume, these methods are not suitable. Aim at this problem, an improved algorithm for single station passive location is proposed. First, triangulation is executed to acquire rough estimation, then optimizing the estimation based on UKF. Simulation results demonstrate that the pro-

posed algorithm can get the location in time, and converge to real position.

## Keywords

Passive Location, UKF, Electronic Reconnaissance

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

通过侦收敌方辐射源发射的电磁波信号,电子侦察设备能够检测、识别目标,判定来波方向,并能经过无源定位解算,给出目标的位置。由于其不发射能量,隐蔽性强,相比有源探测设备,作战距离远,并且在一定程度上能够侦测雷达隐身目标,因此电子侦察设备一直是现代战争中的重要武器装备[1] [2]。其中对辐射源的无源定位能够使得指挥员更好的了解平台周围的电磁态势,同时其引导的火力打击可以做到出其不意,有效的压制敌方有源探测器,保护我方平台。目前,无源定位技术仍然是各国持续发展研究的热点,其对应的武器平台也是竞相生产、装备。

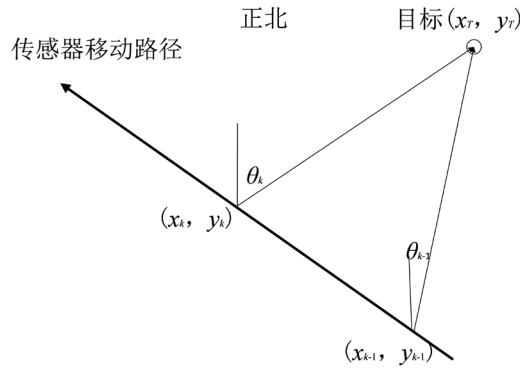
现有的无源定位方法首先可分为单站和多站定位。多站定位涉及到各站之间的同步和数据传输问题,因此其必然涉及到复杂的传输设备和交互流程,且对于窄波束雷达,分布部署的侦收站难以同时接收到辐射源信号,存在共视的问题[3]。因此,通过单站机动,对固定辐射源进行定位,更符合作战需求[4] [5] [6] [7]。例如,载机平台经过飞行,对地面雷达站进行无源定位。单站无源定位方法可通过对目标的角度进行交叉定位。该方法的定位精度与平台的机动距离相关。例如,为了达到一定的精度,载机平台必须经过长时间飞行,才能给出定位估计值。为了提高定位的实时性,孙仲康等提出了基于相位差变化率的定位法[1],刘文跃等给出了相应的计算相位差变化率的一些算法[8]。该类方法存在相位差变化率模糊跳变的问题,且涉及到高度非线性的运算,不能直接获得目标位置的解析解。传统的扩展卡尔曼滤波(EKF)无法给出较好的结果。无迹卡尔曼滤波(UKF)的性能相当于二阶高斯滤波器,它的滤波精度、稳定性要优于EKF。另外也有利用粒子滤波、鸟群算法等优化算法来解决高非线性运算的问题,但此类方法计算量较大[9] [10]。

根据以上分析,本文采用基于UKF的滤波算法,并对定位过程进行了适当的优化。首先在定位平台短距离机动之后,即对辐射源目标进行三角交叉定位,快速给出初始定位点。然后以该值作为UKF滤波的起始点,进行滤波更新,直至收敛至真实值附近。初始定位点的引入,可有效加快滤波收敛的速度,抑制发散。同时,对于二维平面的定位运算,UKF滤波只需进行2阶矩阵的运算,对硬件的算力要求较低,适合于对体积、重量、功耗敏感的平台。

## 2. 单站无源定位方法

### 2.1. 定位模型

设定场景,假定一架飞行中的直升机,对地面雷达站进行无源定位。在飞行航路中,直升机的电子侦察系统对地面雷达站持续进行角度测量。由于直升机飞行高度相对目标的距离较小,可等效为二维平面上进行运算。如图1所示。令每次测量的角度值为 $\theta_k$ ,相应载机的位置 $(x_k, y_k)$ ,则由此估计目标的位置 $(x_T, y_T)$ 。



**Figure 1.** Geometric diagram of passive positioning of single station  
**图 1.** 单站无源定位的几何示意图

### 2.2. 三角交叉定位

为了快速给出目标位置估计值，在传感器移动一段距离之后，即采用三角交叉定位法，对目标进行定位。若两次观测时，传感器位置为 $(x_{k-1}, y_{k-1})$ 、 $(x_k, y_k)$ ，所测量得到的来波到达角度为 $\theta_{k-1}$ 、 $\theta_k$ ，两条方向的射线可以交于一点，该点即为目标的位置估计。

根据角度定义可以得到：

$$\begin{cases} (y_T - y_{k-1}) \operatorname{tg} \theta_{k-1} = x_T - x_{k-1} \\ (y_T - y_k) \operatorname{tg} \theta_k = x_T - x_k \end{cases} \quad (1)$$

写成矩阵形式为：

$$AX = Z \quad (2)$$

其中，

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 1 & -\operatorname{tg} \theta_{k-1} \\ 1 & -\operatorname{tg} \theta_k \end{bmatrix}, \\ X &= \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \end{bmatrix}, \\ Z &= \begin{bmatrix} -x_{k-1} + y_{k-1} \operatorname{tg} \theta_{k-1} \\ -x_k + y_k \operatorname{tg} \theta_k \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

可以得到目标位置的解析解：

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Z \quad (4)$$

### 2.3. UKF 滤波

在进行交叉定位时，因定位基线短，初始定位值精度较差。根据应用背景，采用基于动态系统模型的三角定位方法，每次获得新的观测值之后，不断更新的带目标位置的估计。因为假定目标是固定的，所以这里的状态转移矩阵为单位矩阵。

$$\begin{bmatrix} x_{T,k} \\ y_{T,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{T,k-1} \\ y_{T,k-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

这种情况下，状态转移矩阵是线性的，方位角 $\theta_k$ 为观测量，其观测模型可表示为

$$\theta_k = \arctan\left(\frac{y_T - y_k}{x_T - x_k}\right) + \eta_k \quad (6)$$

其中,  $\eta_k$  表示观测噪声, 这里假定为零均值加性高斯白噪声, 并且误差矩阵为  $R$ 。由于观测模型的高度非线性, 采用扩展卡尔曼滤波不能满足稳定要求, 极易发散。在此我们采用 UKF 无迹卡尔曼滤波进行处理。

无迹卡尔曼滤波不同于扩展卡尔曼滤波, 它是概率密度分布的近似, 由于没有将高阶项忽略, 所以在求解非线性时精度较高。UT 变换的核心思想为近似一种概率分布比近似任意一个非线性函数或非线性变换要容易。其基本原理如下:

假设  $n$  维随机向量  $X$ , 其均值为  $\bar{X}$ , 误差协方差为  $P_X$ 。  $X$  通过非线性函数  $Y = f(X)$  变换后得到随机变量  $Y$ 。通过 UT 变换可以比较高的精度和较低的计算复杂度求得  $Y$  的均值  $\bar{Y}$  和方差  $P_Y$ 。

UT 的具体过程如下:

1) 计算  $2n + 1$  个 Sigma 点及其权值:

$$X_i = \begin{cases} \bar{X}, & i = 0 \\ \bar{X} + \sqrt{(n+1)P_X}, & i = 1, 2, \dots, n \\ \bar{X} - \sqrt{(n+1)P_X}, & i = n+1, n+2, \dots, 2n \end{cases}$$

$$w_i^m = \begin{cases} \frac{\lambda}{n+\lambda}, & i = 0 \\ \frac{1}{2(n+\lambda)}, & i = 1, 2, \dots, 2n \end{cases} \quad (7)$$

$$w_i^c = \begin{cases} \frac{\lambda}{n+\lambda} + (1-\alpha^2 + \beta), & i = 0 \\ \frac{1}{2(n+\lambda)}, & i = 1, 2, \dots, 2n \end{cases}$$

其中,  $\lambda = \alpha^2(n+\kappa) - n$ ;  $\alpha$  决定 Sigma 点的散布程度, 通常取一小的正值;  $\kappa$  通常取 0;  $\beta$  用来描述  $X$  的分布信息, 高斯情况下,  $\beta$  的最优值为 2。

2) 计算 Sigma 点通过非线性函数  $f(\cdot)$  的结果:

$$Y_i = f(X_i), \quad i = 0, 1, \dots, 2n \quad (8)$$

从而得知

$$\bar{Y} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m Y_i$$

$$P_Y = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (Y_i - \bar{Y})(Y_i - \bar{Y})^T \quad (9)$$

由于  $X$  的均值和方差都精确到二阶, 计算得到  $Y$  的均值和方差也精确到二阶, 比线性化模型精度更高。

## 2.4. 算法流程

整个单站无源定位算法实现步骤如下:

- 1) 启动定位功能;
- 2) 平台移动一定距离后, 进行三角交叉定位, 获取初始定位点;
- 3) 以初始定位点作为 UKF 滤波起始估计值;
- 4) 由状态滤波估计值产生 Sigma 点;
- 5) 根据滤波方程, 迭代更新目标状态估计, 即目标位置估计值。

### 3. 仿真分析

设定仿真场景, 验证方法有效性。假定载机初始位置在原点, 沿 Y 轴向上飞行。分析在不同约束条件下(目标初始距离  $R$ , 初始方位角  $\theta$ , 测角精度  $\sigma$ , 滤波周期  $T$ , 飞行速度  $v$  等)的定位精度。仿真持续时间为 300s, 每次场景仿真 100 次。仿真结果见图 2。

由仿真结果可得, 在滤波前期, 因为滤波器尚未稳定, 定位精度较差, 且规律不明显。随着观测时间的推移, 目标估计位置向真实值收敛, 定位误差变小, 且大致规律为载机速度高、距离近、初始角度大、测角精度高, 则定位精度高。

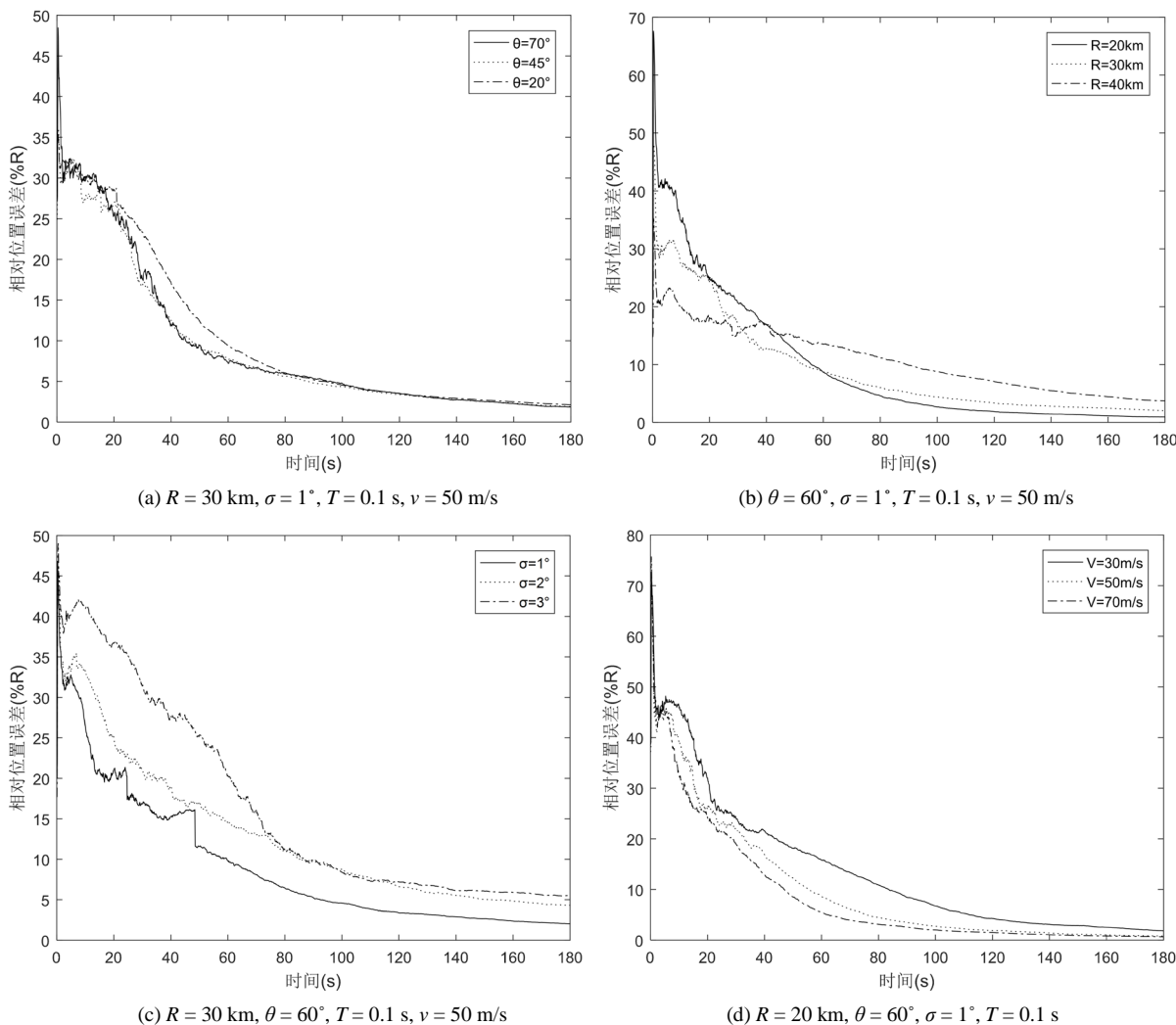


Figure 2. Analysis diagram of simulation  
图 2. 仿真结果分析图

为验证在不同约束条件下的 CEP 定位精度，设置如下仿真实验，获取 180s 时刻点的定位位置。目标估计定位位置如下图所示。其中的圆半径大小为  $10\%R$ ，圆心为目标真实位置。孤立点为各个估计定位位置。仿真 100 次。

约束条件为  $R = 40 \text{ km}$ ,  $\theta = 60^\circ$ ,  $T = 0.1 \text{ s}$ ,  $v = 50 \text{ m/s}$ ,  $\sigma = 1^\circ$ ，96% 的估计点落入圆内，满足大于 50% 的要求。结果见图 3。

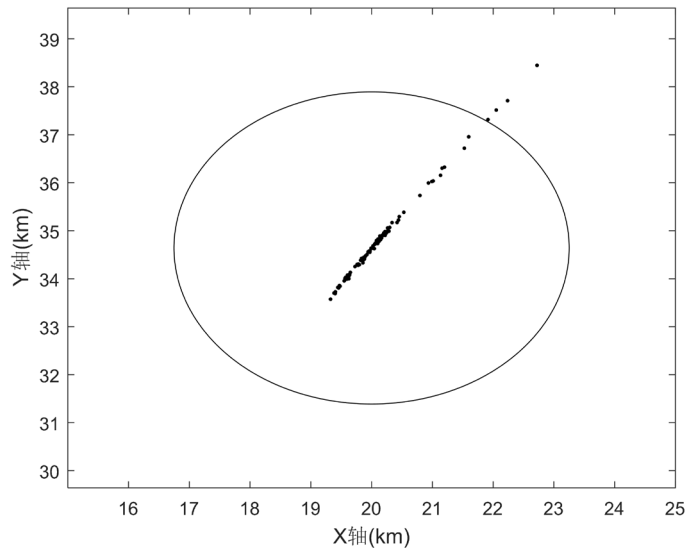


Figure 3. Estimated location of single-station target (1)

图 3. 单站目标估计定位位置(一)

约束条件为  $R = 40 \text{ km}$ ,  $\theta = 60^\circ$ ,  $T = 0.1 \text{ s}$ ,  $v = 50 \text{ m/s}$ ,  $\sigma = 1.5^\circ$ ，94% 的估计点落入圆内，满足大于 50% 的要求。结果见图 4。

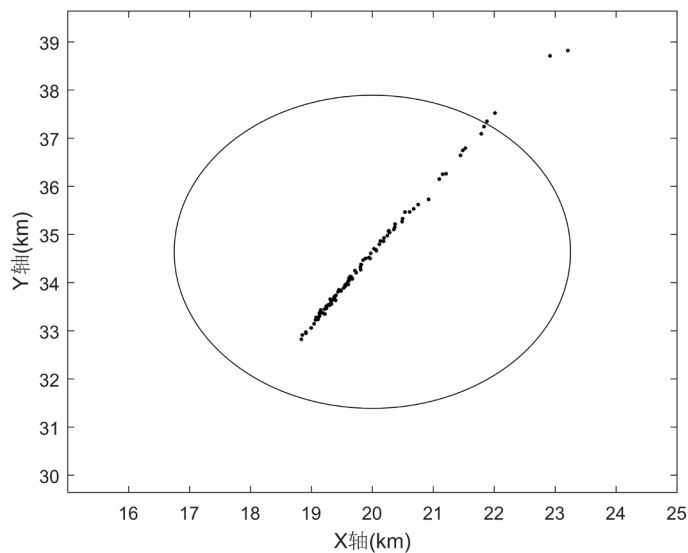
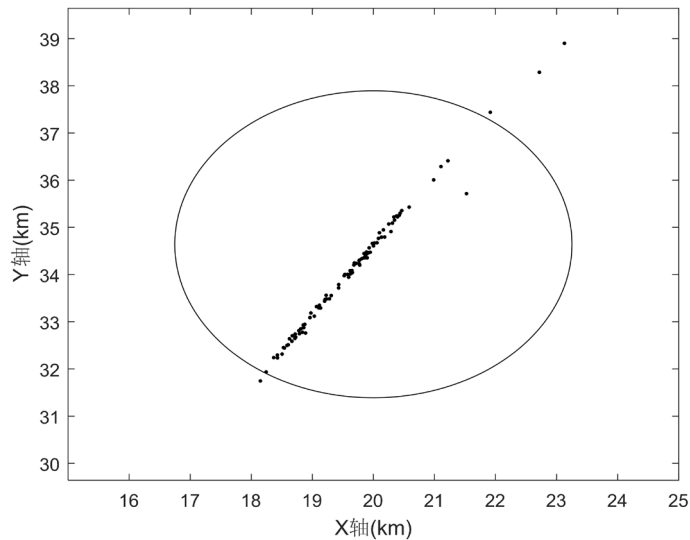


Figure 4. Estimated location of single-station target (2)

图 4. 单站目标估计定位位置(二)

约束条件为  $R = 40 \text{ km}$ ,  $\theta = 60^\circ$ ,  $T = 0.1 \text{ s}$ ,  $v = 50 \text{ m/s}$ ,  $\sigma = 2^\circ$ , 93%的估计点落入圆内, 满足大于 50%的要求。结果见图 5。



**Figure 5.** Estimated location of single-station target (3)  
**图 5.** 单站目标估计定位位置(三)

根据以上分析, 对 40 km 外目标, 在收敛时间不大于 180s 时, 单站定位精度优于 10% $R$  (CEP)。

#### 4. 结论

单站无源定位是电子侦察设备的一个重要功能。然而, 对于直升机等载机平台, 由于其可携行重量和体积的限制, 电子侦察设备需极力做到简化, 且从作战需求的角度考虑, 其处理响应时间也必须短。如此, 单站无源定位必须在较少的输入信息下, 快速给出目标的初始定位信息, 然后再进行滤波优化逐步收敛。本文方法紧贴实际需求, 具有较强的工程应用价值。

#### 参考文献

- [1] 孙仲康, 郭福成, 冯道旺, 等. 单站无源定位跟踪技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 5-6.
- [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: 1-2.
- [3] 蒋伊琳, 刘梦楠, 郜丽鹏, 等. 运动多站无源时差/频差联合定位方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(7): 1441-1449.
- [4] 田明辉, 马敏, 张文伟. 基于方位测量和速度估计的目标定位跟踪[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(1): 69-73.
- [5] 左燕, 陈志猛, 蔡立平. 基于约束总体最小二乘的单站 DOA/TDOA 联合误差校正与定位算法[J]. 电子信息学报, 2019, 41(6): 1317-1323.
- [6] 邢怀玺, 张宇晖, 陈游, 等. 基于 MCIS 技术的相位差变化率单站无源定位[J]. 航空学报, 2021, 41(3): 324278.
- [7] 邢怀玺, 吴华, 陈游. LMS 预处理的相位差机载单站无源定位方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(6): 9-14.
- [8] 刘文跃, 彭世蕤, 王光学, 等. 基于差值定理的相位差变化率提取方法[J]. 雷达科学与技术, 2020, 18(4): 417-421.
- [9] 熊露, 谌剑, 毕晓文, 等. 基于迭代观测更新滤波的单站无源定位算法[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(4): 406-412.
- [10] 周桃云, 梁平元, 张怡. 一种新的可控粒子数无源定位滤波算法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(3): 157-161.