

估计目标速度矢量对运动辐射源的 固定单站无源定位算法

李宗华¹, 冯道旺², 周一宇², 孙仲康²

(1 北京 984 信箱 101 号, 北京 100091; 2 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 针对无源定位必须实现快速和稳定定位跟踪的要求, 本文提出了一种测量目标辐射源脉冲到达时间 (TOA)、到达方向 (DOA), 以及方位角变化率, 实现固定单站对三维运动辐射源的无源定位算法. 该算法基于运动学原理, 充分利用了辐射源信号测量值的时空变化量信息, 定位收敛速度快而且非常稳定, 具有很强的实用性. 文章最后给出了计算机仿真结果.

关键词: 无源定位; 速度矢量; 方位角变化率; 运动学

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 06-0953-04

Passive Location Algorithm for Moving Emitter by Estimating Its Velocity Vector Based on Single Nonmoving Observer

LI Zonghua¹, FENG DaoWang², ZHOU Yiyu², SUN ZhongKang²

(1 Beijing PO Box 165, Beijing 100091, China; 2 School of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: To satisfy the requirement of high location speed and stability, an algorithm for 3D moving emitter passive location and tracking using measurements of time of arrival (TOA), direction of arrival (DOA) and azimuth angle changing rate by single nonmoving observer is given in this paper. Based on the kinematics theory, this algorithm takes full advantage of the spatially and temporally changing information of the measurements from the emitter, and has high convergence speed and stability, so it is of great practicality. Finally, the computer simulation results are presented.

Key words: passive location; velocity vector; azimuth angle changing rate; kinematics

1 引言

实现对辐射源的单观测站无源定位具有非常重要的价值和意义^[1~4]. 无源定位跟踪必须快速而且稳定, 这不但是快速定位的需要, 更重要的是, 满足无源定位需要的信号的持续时间可能会非常有限. 运动单站只测角 (Bearing Only) 定位是常见的无源定位问题^[1~3]. 而固定单站对运动辐射源无源定位跟踪, 除了测量角度外必须增加新的观测信息, 否则无法满足可观测条件^[3]. 通过测量 DOA 和 TOA, 可以实现固定单站对运动目标的无源定位^[3, 6, 7]. 文献 [3, 6, 7] 中采用的方法是将目标位置和速度一起滤波估计, 而且没有角度变化率信息. 随着无源定位技术的不断发展, 引入目标角度变化率信息的运动单站无源定位方法得到迅速发展, 而且表明了增加高精度的角度变化率信息可以大大提高定位收敛速度和定位精度^[4, 8].

由于无源定位没有信号参数的基准信息, 无法直接测量径向距离. 除了测量角度外, 我们只能得到信号到达时间或者

到达频率的变化量测量值, 从中更直接反映的是目标速度信息. 另外当目标距离很远时, 在观测时间间隔为秒级的条件下, 空中运动目标的位置和位置变化量在数量级上差别较大. 位置和速度放在一起估计时, 由于两者的误差是相关的, 位置误差也会给速度估计带来影响. 基于以上两点考虑, 如果先从其中估计目标速度矢量, 可能会从时频变化量中获取更多的有用信息.

本文首先将角度变化率信息引入到固定单站的定位方法中, 并基于运动学原理^[5], 提出了一种估计目标速度矢量的无源定位算法. 估计目标速度是该算法的关键, 文中利用 DOA 和 TOA 观测量推导了估计目标速度的方法. 最后, 通过计算机仿真证明该算法可以实现对运动辐射源的快速稳定无源定位, 定位性能明显优于以前的定位方法.

2 系统模型

本文研究三维条件下, 地面固定单观测站对空中运动辐射源的无源定位. 当目标距离在数百公里以上时, 通常不会有

大范围的机动. 所以在考虑大气扰动等因素的作用后, 目标运动模型可以用带有加速度扰动的匀速运动模型描述. 设辐射源发射周期 T_r 恒定的脉冲信

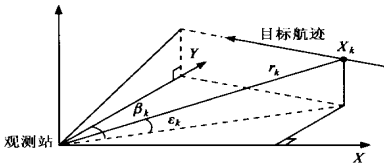


图1 观测站和目标运动的几何关系

号, 观测站每隔 N 个脉冲做一次观测. 通常我们只能得到目标辐射源脉冲重复周期的估值 T_r . 取 $\Delta T_r = T_r - T_r$ 为估计偏差, 把 ΔT_r 作为未知量加入到目标状态变量中一起估计, 并对 T_r 不断更新.

设 $X_k = [x_k \ y_k \ z_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \dot{z}_k \ \Delta T_{rk}]^T$ 为辐射源 k 时刻状态矢量, 观测站位于坐标原点, 则两者间的相对状态矢量就是 X_k . 辐射源状态方程为:

$$X_{k+1} = 5_{k+1, k} X_k + W_k \quad (1)$$

其中, $5_{k+1, k} = \begin{bmatrix} I_3 & \Pi_3 & 0_3 @ \\ 0_4 @ \beta_3 & I_4 & \end{bmatrix}$, $W_k = [(T^2/2)w_{xk} \ (T^2/2)w_{yk} \ (T^2/2)w_{zk} \ Tw_{xk} \ Tw_{yk} \ Tw_{zk} \ 0]^T$ 为扰动噪声, $E[W_k] = 0$, $E[W_k W_k^T] = Q_k D_{j, k}$, $T = NT_r$ 为观测时间间隔.

观测站每接收 N 个脉冲测量一次方位角 B_k 、方位角变化率 \dot{B}_k 、俯仰角 E_k 和脉冲到达时间 TOA_k . 注意到 TOA 中有一部分是脉冲从辐射源到观测站的电磁传播时间. 由于两次 TOA 测量之间辐射源运动, 造成辐射源和观测站之间径向距离发生变化, 所以有

$$\begin{aligned} \Delta TOA_k &= TOA_k - TOA_{k-1} \\ &= (r_k - r_{k-1})/c + N\Delta T_r \\ &= (r_k - r_{k-1})/c + N\Delta T_{rk} + N\Delta T_{rk} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, r_k 和 r_{k-1} 分别是 TOA_k 和 TOA_{k-1} 时刻辐射源到观测站的径向距离, 且 $r_k = (x_k^2 + y_k^2 + z_k^2)^{1/2}$, c 为电磁波传播速度. 由于 T_r 为常量, 算法每隔 N 个脉冲得到一个 T_r , 而 T_r 在每个 k 时刻估计后得到确定值 T_r , 并且 $\Delta T_r = T_r - T_r$, 则从 $k-1$ 时刻到 k 时刻的 N 个脉冲都是用到同一个 ΔT_{rk} .

根据方位角的定义 $B_k = \arctan(x_k/y_k)$ (3)

将上式两边求导得到方位角变化率:

$$\dot{B}_k = (y_k \dot{x}_k - x_k \dot{y}_k) / (x_k^2 + y_k^2) \quad (4)$$

方位角变化率可以通过相位干涉仪等很多途径获得^[8], 而不需要从方位角测量值中得到, 所以两者不存在相关. 式 (4) 只是给出方位角变化率的表达式.

于是得到非线性测量方程:

$$\begin{cases} B_k = \arctan(x_k/y_k) + D_{Bk} \\ E_k = \arctan[\frac{z_k}{(x_k^2 + y_k^2)^{1/2}}] + D_{Ek} \\ \Delta TOA_k = (r_k - r_{k-1})/c + N\Delta T_{rk} + N\Delta T_{rk} + D_{k} \\ \dot{B}_k = (y_k \dot{x}_k - x_k \dot{y}_k) / (x_k^2 + y_k^2) + D_{\dot{B}k} \end{cases} \quad (5)$$

3 定位算法

3.1 估计目标速度矢量的定位原理

估计目标速度矢量的定位跟踪算法结合了几何学和运动

学定位原理. 几何学定位主要考虑通过多个定位曲面的交点来确定目标的位置, 而运动学定位则是充分利用了运动学原理及目标的运动信息对其状态进行求解^[5]. 下面简单给出质点运动学原理, 并进而推导估计目标速度矢量对三维运动辐射源的定位原理.

在球面坐标中, 目标的空间位置可以用斜距 r , 方位角 B 和俯仰角 E 来唯一确定, 当目标与观测站有相对平移及旋转运动时, r 、 B 和 E 是随时间变化的. 方位旋转角速度的

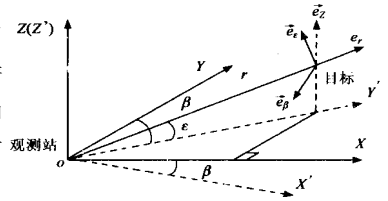


图2 目标运动在视线坐标中描述

旋转轴为 Z 轴, 俯仰旋转角速度的旋转轴为 Xc 轴 (方位转动 B 后的 X 轴), 斜距的变化则沿着目标视线 r 方向进行. 选择视线坐标系 $\{e_r, e_B, e_E\}$ 正交集, 它们满足:

$e_r @ e_B = e_B @ e_E = e_E @ e_r = 0$ 和 $e_r @ e_r = e_B @ e_B = e_E @ e_E = 1$ 及 $e_r @ e_r = e_B @ e_B = e_E @ e_E = 0$ 及 $e_r @ e_B = e_B @ e_E = e_E @ e_r = 0$. e_r 是确定的, e_B 方向为 B 增加的方向, e_E 方向为 E 增加的方向, 这样视线坐标系 $\{e_r, e_B, e_E\}$ 也就是唯一确定的. 在视线坐标系中目标位置和速度矢量可以描述如下,

$$\text{位置矢量: } r = r e_r \quad (6)$$

$$\text{速度矢量: } \dot{r} = \dot{r} e_r + r \dot{e}_r \quad (7)$$

如果目标相对观测站作径向运动, 则目标属于不可观测, 无法实现对其无源定位跟踪. 只要目标不是向观测站做径向运动, 矢量 r 就有平移和旋转运动, 此时视线矢量 e_r 的速度矢量为 $\dot{e}_r = X @ e_r$, 其中 $X = -\dot{B} e_B + \dot{E} e_E$. 将单位矢量 e_z 分解到视线坐标系, 得到 $e_z = \cos E e_E + \sin E e_r$, 再将它们代入式 (7) 可得,

$$\dot{r} = \dot{r} e_r + r \dot{B} \cos E e_B + r \dot{E} \sin E e_r + V_H e_B + V_V e_E \quad (8)$$

受以上运动学原理的启发, 我们可以得出估计目标速度矢量进行无源定位的原理. 式 (8) 说明了, 当目标相对于观测站有平移及旋转运动时, 它在视线坐标系中的速度由径向速度 \dot{r} 、水平切向速度 V_H 及垂直切向速度 V_V 三个分量构成, 且有 $V_H = r \dot{B} \cos E$. 我们知道 $V_H = \dot{B} \cos B - \dot{Y} \sin B$, 所以只要得到目标在直角坐标系中 X 和 Y 方向的运动速度, 并利用测量量 \dot{B} 、 B 和 E , 就可以获得目标到观测站的径向距离 r . 且有

$$r = (\dot{B} \cos B - \dot{Y} \sin B) / \dot{B} \cos E \quad (9)$$

完成实时测距后再结合角度测量值 B 和 E , 基于几何学原理, 目标的位置也就可以实时给出, 从而实现对目标的定位跟踪. 从上面求距离的公式中我们可以看到正好回避了 Z 方向的速度, 这是非常重要的一个方面. 由于远距离目标的高度及俯仰角变化非常小, 对 TOA 变化的贡献就很小, 所以从 TOA 变化中估计目标 Z 方向速度的精度也比较低, 这一点从计算机仿真结果中得到了证明. 得到了估计目标速度矢量的定位原理, 下面需要寻求估计目标运动速度的方法.

3.1.2 估计目标运动速度

采用降维处理, 取目标运动状态中的速度分量, 并且从测量信息中估计目标速度. 一方面目标速度只有小范围的变化, 总体上保持稳定, 其 Fisher 信息矩阵 (FIM) 的条件数较好; 另

一方面速度分量和位置分量的 FIM 中对角线上元素数量级差别较大. 所以单独估计速度时可以得到较高的估计精度和稳定性. 估计目标速度矢量的算法推导如下,

$$r_{k-1} = [(x_k - \hat{x}_k)^2 + (y_k - \hat{y}_k)^2 + (z_k - \hat{z}_k)^2]^{1/2}$$

$$= \{(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2) [1 - \frac{2T(x_k \hat{x}_k + y_k \hat{y}_k + z_k \hat{z}_k)}{(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2)} + \frac{T^2(\hat{x}_k^2 + \hat{y}_k^2 + \hat{z}_k^2)}{(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2)}]\}^{1/2}$$

$$= r_k [1 - \frac{2T(x_k \hat{x}_k + y_k \hat{y}_k + z_k \hat{z}_k)}{r_k^2} + \frac{T^2(\hat{x}_k^2 + \hat{y}_k^2 + \hat{z}_k^2)}{r_k^2}]^{1/2} \quad (10)$$

目标距离观测站很远, 而其运动速度有限. 在 T 为秒级的条件下可知, $\hat{x}_k T \ll r_k$, $\hat{y}_k T \ll r_k$ 和 $\hat{z}_k T \ll r_k$. 忽略式(10)二次项, 并由 $(1-x)^{1/2} \approx 1 - \frac{1}{2}x - \frac{1}{8}x^2$, 可得

$$r_k - r_{k-1} \approx UT(x_k \hat{x}_k + y_k \hat{y}_k + z_k \hat{z}_k) / r_k$$

$$= NT_r(\hat{x}_k \sin B_k \cos E_k + \hat{y}_k \cos B_k \cos E_k + \hat{z}_k \sin E_k) \quad (11)$$

实际中只能得到含测量误差的测量值. 令 $dS_{nk} = STOA_k - NT_{rk}$. 由式(5)可得

$$dS_{nk} = (r_k - r_{k-1}) / c + NST_{rk} + D_k$$

$$U \frac{NT_{rk}}{c} (\hat{x}_k \sin B_{nk} \cos E_{nk} + \hat{y}_k \cos B_{nk} \cos E_{nk} + \hat{z}_k \sin E_{nk}) + NST_{rk} + e_k$$

$$= H_{nk} V_k + e_k \quad (12)$$

其中 $H_{nk} = [NT_{rk} \sin B_{nk} \cos E_{nk} / c \quad NT_{rk} \cos B_{nk} \cos E_{nk} / c \quad NT_{rk} \sin E_{nk} / c \quad N]$,

状态变量 $V_k = [\hat{x}_k \quad \hat{y}_k \quad \hat{z}_k \quad ST_{rk}]^T$, e_k 为等效测量误差. 考虑到式(12)状态变量系数中的测量值带有误差, 所以

$$e_k = \frac{5 dS_{nk}}{5 B_{nk}} D_k + \frac{5 dS_{nk}}{5 E_{nk}} D_k + D_k \quad (13)$$

则估计 V_k 的卡尔曼滤波算法如下,

$$\hat{V}_{k|k-1} = \hat{V}_{k-1} \quad (14)$$

$$P_{V_{k|k-1}} = P_{V_{k-1}} + Q_k \quad (15)$$

$$K_{nk} = P_{V_{k|k-1}} H_{nk}^T [H_{nk} P_{V_{k|k-1}} H_{nk}^T + R_{nk}]^{-1} \quad (16)$$

$$\hat{V}_k = \hat{V}_{k|k-1} + K_{nk} [dS_{nk} - H_{nk} \hat{V}_{k|k-1}] \quad (17)$$

$$P_{V_k} = [I - K_{nk} H_{nk}] P_{V_{k|k-1}} \quad (18)$$

其中, $P_{V_k} = E[e_k^2]$ 为等效测量误差方差, Q_k 是加速度扰动引起的速度噪声方差.

3.1.3 对目标定位跟踪

将目标速度估计值 \hat{x}_k 和 \hat{y}_k 以及测量值 \hat{B}_{nk} 、 B_{nk} 和 E_{nk} 代入式(9), 可得

$$\hat{r}_k = (\hat{x}_k \cos B_{nk} - \hat{y}_k \sin B_{nk}) / \hat{B}_{nk} \cos E_{nk} \quad (19)$$

无源定位的关键是估计径向距离, 距离得到了则无源定位问题也就基本解决了. 由于目标运动在直角坐标系中是线性系统, 现在有了距离估计值和角度测量值, 我们采用先进的滤波算法处理, 可以进一步平滑和提高定位精度. 由式(19)可以知道, 目标距离估计值与角度测量值有关, 所以距离估计误差和角度误差具有相关性. 此时不满足通常滤波问题

中, 测量误差相互独立的条件. 为此, 我们引入一种新的滤波算法 UKF (Unscented Kalman Filter), 该算法由 Julier 和 Uhlman^[9] 提出. EKF (Extended Kalman Filter) 是常用的非线性滤波算法, UKF 算法是 EKF 的改进, 能够克服 EKF 线性化误差大和协方差容易出现病态等缺点. UKF 通过特别选取一些样点, 更好地近似随机变量经过非线性变化后的均值和方差, 不但可以使非线性系统滤波达到更高的精度, 而且对噪声具有非常好的适应性.

通过 UKF 算法对径向距离估值和角度测量值进一步实时滤波处理, 就可以实现对辐射源目标的定位跟踪. 由于篇幅所限, 我们不详细介绍 UKF 算法, 同时非线性滤波属于基本问题, 这里也不再赘述.

4 计算机仿真

为了验证上述算法的性能, 下面进行计算机仿真试验. 首先将本文算法的定位结果与 UKF 直接依据系统模型式(1)和(5)进行非线性滤波得到的定位结果进行比较. 后者采用了以前文献中位置和速度同时估计的方法, 不同点是较以前增加了角度变化率信息. 为了进一步说明算法的性能, 仿真中同时给出定位跟踪的克拉美劳下限(CRLB).

仿真场景如图 1 所示, 目标辐射源作带有加速度扰动的匀速运动. 试验条件: 辐射源脉冲周期 $T_r = 1ms$, 采样脉冲数 $N = 1000$. 辐射源起始位置: $x_0 = 120km$, $y_0 = 100km$, $z_0 = 8km$, 运动状态: $\hat{x} = -300m/s$, $\hat{y} = 100m/s$, $\hat{z} = 2m/s$. 观测站位于坐标原点, 测量精度分别为: $R_B = R_E = 5mrad$, $R_B = 0.2mrad/s$, $R_E = 10ns$. 观测量为 B_k 、 \hat{B}_k 、 E_k 和 TOA_k , 对目标定位跟踪, 作 100 次 Monte Carlo 仿真, 仿真结果见图 3.

图 3 显示了在辐射源脉冲重复周期已知和未知两种条件下, 对目标进行定位跟踪的仿真结果. 同时也给出系统定位跟踪可以达到的克拉美劳下限(CRLB). 从仿真结果可以看出:

1 在 T_r 已知和未知两种情况下, 本文提出的基于运动学原理估计目标速度矢量的方法, 都能在较短时间内实现对目标的快速定位跟踪, 定位误差可以很快收敛到较小的范围, 而且性能更加接近 CRLB. 主要原因是采用本文算法可以很快精确估计目标速度, 进而得到目标距离, 所以比以前文献中的算法有更快的收敛速度.

2 辐射源的脉冲重复周期 T_r 已知比未知时, 定位收敛速度快而且精度高. 所以获得更多的目标辐射源先验知识对无源定位非常重要.

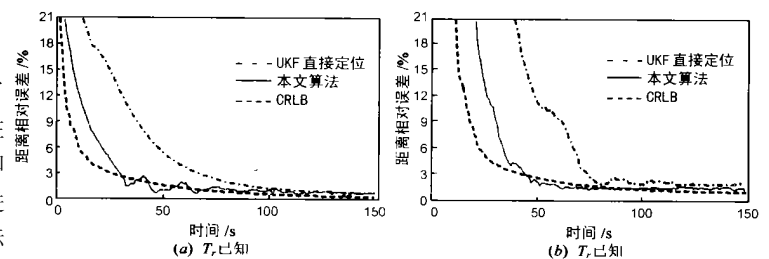


图 3 算法定位跟踪比较

另外,本文提出的算法具有很高的稳定性,不会出现定位发散现象,这一点通过大量仿真试验得到证实,因此其实用性更强.主要原因是目标速度和位置分开依次估计,不但起到了降维处理的作用,而且减小了两者估计时的相互影响.

当然,目标速度和位置分开依次估计也存在一定问题,一方面是加大了运算量,另一方面需要增加角度变化率观测,而增加观测也带来了引入新的误差的可能性.对于前者,由于整个定位过程中需要的数据量并不大,所以该算法对实时定位跟踪没有影响;而后者需要高精度的参数测量来解决.从总体上来讲,增加新的观测是无源定位技术发展的需要.

为了验证增加角度变化率对定位性能的影响,分别在加入和不加入方位角变化率时利用 UKF 对目标定位跟踪.

图4显示了加入方位角变化率信息后,同样利用以前文献中的定位方法,定位性能得到明显改善.

图5显示了利用312节中卡尔曼滤波算法,得到目标在三个坐标上速度分量的估计结果.从上图中可以看出,对目标速度的估计中, \hat{v}_k 和 \hat{v}_k 精度较高, \hat{v}_k 的估计精度很低.而本文的定位算法公式中正好回避了 \hat{v}_k .

5 结论

在对以前测量 DOA 和 TOA 单站无源定位方法研究的基础上,本文引入方位角变化率信息,并提出了一种基于运动学原理估计目标速度矢量的快速定位算法.该算法同时也具有定位稳定和精度高的优点,对实现地面单站对运动辐射源的无源定位跟踪有很强的实用性.计算机仿真结果表明,该算法具有很好的定位性能.本文利用脉冲周期恒定信号的到达时间差来估计目标速度.对于重复周期不恒定的脉冲信号或者连续波信号,通过测量信号多普勒频率变化率等手段,同样可以估计目标速度.文献[3]中指出,对同样的无源定位问题采用不同的滤波估计方法,定位结果会不同,本文的结论也证明了这一点.同时,本文的研究方法和结论对其它类型无源定位问题也具有一定的借鉴作用.

参考文献:

[1] T L Song. Observability of target tracking with bearing-only measurements[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 1996, 33(4): 1468- 1472.
 [2] TKirubarajan, Y Ba2Shahm, D Lerro. Bearing-only tracking of maneuvering targets using a batch-recursive estimator[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 2001, 37(3): 770- 779.
 [3] 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. 5.
 [4] 郭福成,孙仲康,安玮. 利用方向角及其变化率对固定辐射源的三维单站无源定位[J]. 电子学报,2002, 30(12): 1885- 1887.

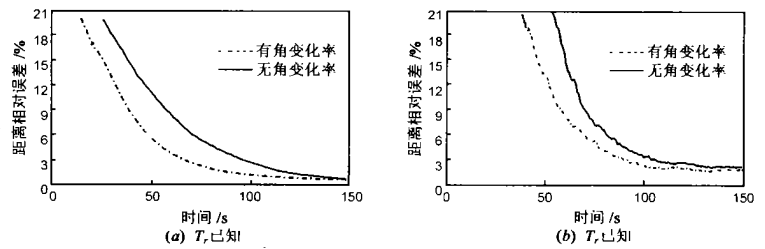


图4 加入和不加入方位角变化率的定位跟踪比较

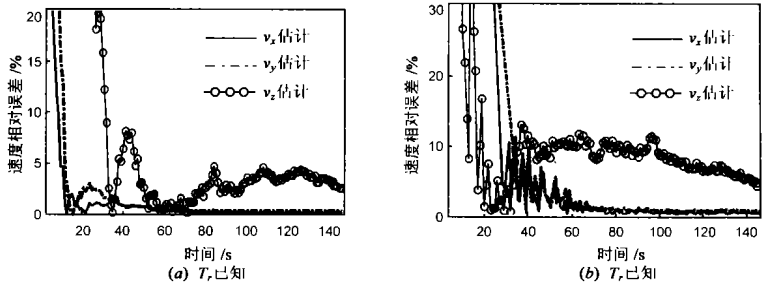


图5 目标速度分量估计性能比较

[5] 孙仲康. 基于运动学原理的无源定位技术[A]. 雷达无源定位跟踪技术研讨会论文集[C]. 北京:天线电定位学会,2001. 1- 7.
 [6] 杨莘元,郑思海. 基于运动辐射体 TQA 和 DOA 测量的单站被动定位算法[J]. 电子学报,1996, 24(12): 66- 69.
 [7] 王杰贵,罗景青,等. 固定单站对机动目标无源定位 IMM 算法[J]. 信号处理,2002, 18(2): 137- 140.
 [8] 邓新蒲,周一宇,等. 相位变化率的测量方法及其测量精度分析[J]. 系统工程与电子技术,2001, 23(1): 20- 23.
 [9] S J Julier, J K Uhlman. A new extension of the kalman filter to nonlinear systems [A]. In Proc of Aero Sense: The 11th Int. Symp. on Aerospace/ Defence Sensing, Simulation and Controls [C]. ADSSC, 1997.

作者简介:

李宗华 男,1974年出生于甘肃兰州,1997年毕业于国防科技大学电子科学与工程学院电子工程专业,2000年从该校通信与信息系统专业硕士毕业,同年考入本校攻读博士研究生,研究方向为雷达信号处理、无源定位、电子战系统仿真.

冯道旺 男,1975年出生于广西,1998年毕业于国防科技大学电子科学与工程学院电子工程专业,同年进入本校攻读硕博连读研究生,研究方向为随机信号处理、无源定位.

周一宇 男,1948年出生于上海,博士,国防科技大学教授,博士生导师,电子学会电子对抗分会委员,航空学会电子分会雷达与制导专业委员会委员,出版专著两部,重点研究方向为综合电子战系统理论、信息战概念与效能评估技术、无源定位技术等.

孙仲康 男,1930年出生于上海,国防科技大学教授、博士生导师、国家级重点学科带头人,国家高技术863专家组成员和顾问,在国内首批编著出版了数字技术在雷达信号、数据、图像、定位方面的学术著作七部约二百多万字,在国内外发表论文140多篇.