

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

郭福成, 孙仲康, 安 玮

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 本文提出了利用方位角、俯仰角及方位角速度或俯仰角速度信息对固定辐射源的三维单站无源定位模型和方法, 指出这两种方法具有单次观测即可得出目标辐射源位置的优点, 并针对这两种测距方法的误差和可观测性分别进行了分析, 最后给出了单次测量三维定位和多次测量卡尔曼滤波后的计算机仿真结果和结论。

关键词: 无源定位; 可观测性; 方位角; 俯仰角

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12-1885-03

Single Observer Passive Location of 3-D Fixed Emitter Using Direction and Its Rate of Changing Information

GUO Fu-cheng, SUN Zhong-kang, AN Wei

(School of Electronic Science & Engineering, National Univ of Def Tech, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: This paper put forward a single observer passive location model and method of fixed radiation source using azimuth and elevation angle and its changing rate of information, and indicated that this method could give the position of emitter in a single measurement. It also analyzed the location error and observability of these two methods. In the end of the paper, it gives computer emulation of single measurement and Kalman filtering emitter location and gives a conclusion.

Key words: passive location; observability; azimuth angle; elevation angle

1 引言

辐射源的三维单站无源定位与跟踪技术对于 C⁴ISR 系统中的空载、星载电子侦察监视具有重要的价值。传统的机载单站无源定位一般采用只测向定位 (Bearing Only, BO) 方法^[1], 但是 BO 方法具有收敛速度慢、容易发散等缺点而难以实用。在目标辐射源和观测站具有相对运动时, 对目标和观测器的某些相对运动参数的测量可以实现单站快速无源定位^[2-5]。文 [4] 利用运动学原理, 提出如果观测器不但观测到目标辐射源相对于观测器的方位角、俯仰角, 还可通过干涉仪、红外或其它手段测量到它们的变化率—方位角速度或俯仰角速度, 就能够对三维空间中的固定辐射源进行单站无源定位。从国外试验结果来看, 增加相位变化率信息能使机载单站无源定位的精度达到在 10 秒内收敛到 10%^[3]。本文在文 [3, 4] 的启发下提出利用方向角及其变化率信息对固定辐射源的单站无源定位模型和定位方法, 并对其进行了分析。

2 三维定位模型和方法

假设取以观测器为原点的载机直角坐标系, 如图 1 所示。

在三维条件下观测站 O 以速度 $V = (v_{ox}, v_{oy}, v_{oz})^T$ 运动时, 它与地面固定目标 $T = (x, y, z)$ 的连线 r 矢量即斜距, 其大小为距离 $r = |r| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, 此时目标辐射源的辐射

波到达观测器的方位角 β 及相对俯仰角 ϵ 都由于观测器运动而随时间变化, 因此观测器可以观测到来波到达方位角速度 $\dot{\beta}$ 和俯仰角速度 $\dot{\epsilon}$ 。

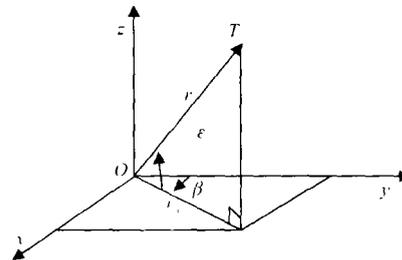


图 1 三维定位示意图

由方位角 β 和俯仰角 ϵ 定义可知:

$$\beta = \arctg \frac{x}{y} \quad (1)$$

$$\epsilon = \arctg \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (2)$$

对上面两式分别求导得到方位角速度 $\dot{\beta}$ 和俯仰角速度

$$\dot{\beta} = \frac{\dot{x}y - y\dot{x}}{x^2 + y^2} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{-z\dot{x}x - z\dot{y}y + (x^2 + y^2)\dot{z}}{(x^2 + y^2 + z^2)(x^2 + y^2)^{1/2}} \quad (4)$$

收稿日期: 2001-07-18; 修回日期: 2002-01-07

如果辐射源固定时,其在图 1 坐标系中相对于观测器的运动速度为 $-V$,因此 $\dot{x} = -v_{0x}$, $\dot{y} = v_{0y}$, $\dot{z} = -v_{0z}$,并令 $r_h \triangleq \sqrt{x^2 + y^2}$,代入式(3)、(4)中可得:

$$\begin{aligned} \beta &= -\frac{v_{0x}y - v_{0y}x}{x^2 + y^2} = -\frac{v_{0x}\cos\beta - v_{0y}\sin\beta}{r_h} \\ &= -\frac{v_{0x}\cos\beta - v_{0y}\sin\beta}{r\cos\epsilon} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= -\frac{v_{0z}r_h - \dot{r}_h z}{r_h^2 + z^2} = -\frac{v_{0z}\cos\epsilon - \dot{r}_h\sin\epsilon}{r} \\ &= -\frac{v_{0z}\cos\epsilon - (v_{0x}\sin\beta + v_{0y}\cos\beta)\sin\epsilon}{r} \end{aligned} \quad (6)$$

从而可以分别得到两个测距公式:

$$r = -\frac{v_{0x}\cos\beta - v_{0y}\sin\beta}{\beta\cos\epsilon} \quad (7)$$

$$r = -\frac{v_{0z}\cos\epsilon - (v_{0x}\sin\beta + v_{0y}\cos\beta)\sin\epsilon}{\epsilon} \quad (8)$$

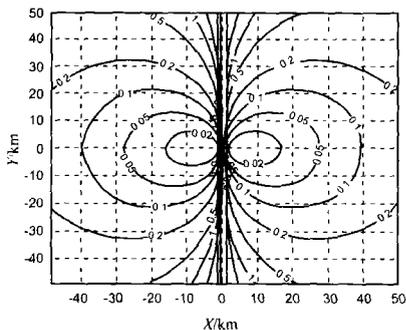
式(7)中如果可以测量得到 β 、 ϵ 、 $\dot{\beta}$,且通过导航设备可以得到观测器运动速度 v_{0x} 、 v_{0y} ,就可以求出观测平台和目标的距离 r ;式(8)中如果可以测量得到 β 、 ϵ 、 $\dot{\epsilon}$ 和 v_{0x} 、 v_{0y} 、 v_{0z} ,同样可以求出观测平台和目标的距离 r .为了区分这两种方法,不妨把式(7)方法叫做利用方位角速度信息的测距方法,式(8)方法叫做利用俯仰角速度信息的测距方法.当距离 r 测量出来以后,结合所观测的方位角 β 、俯仰角 ϵ ,即可仅仅通过单次测量定出辐射源在坐标系中的瞬时位置:

$$\begin{cases} x = r\sin\beta\cos\epsilon \\ y = r\cos\beta\cos\epsilon \\ z = r\sin\epsilon \end{cases} \quad (9)$$

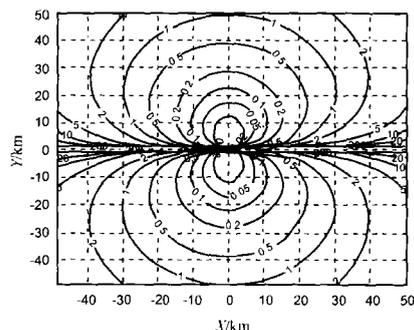
3 单次定位误差分析

假设获得的观测参数 β 、 $\dot{\beta}$ 、 ϵ 、 $\dot{\epsilon}$ 、 v_{0x} 、 v_{0y} 含有误差,并假定这些误差之间相互独立且都是零均值的,它们的方差分别为 σ_β^2 、 $\sigma_{\dot{\beta}}^2$ 、 σ_ϵ^2 、 $\sigma_{\dot{\epsilon}}^2$ 、 $\sigma_{v_x}^2$ 、 $\sigma_{v_y}^2$,将式(7)对这些参数求全微分后得到利用方位角速度定位的三维测距误差方差 σ_r^2 为:

$$\sigma_r^2 = \left(\frac{v_{0x}\sin\beta + v_{0y}\cos\beta}{\beta\cos\epsilon}\right)^2 \sigma_\beta^2 + \left(\frac{-v_{0x}\cos\beta + v_{0y}\sin\beta}{\beta\cos\epsilon}\right)^2 \sigma_{\dot{\beta}}^2 + \left(\frac{r}{\epsilon}\right)^2 \sigma_\epsilon^2 + \left(\frac{\sin\beta\sin\epsilon}{\epsilon}\right)^2 \sigma_{\dot{\epsilon}}^2 + \left(\frac{\cos\beta\sin\epsilon}{\epsilon}\right)^2 \sigma_{v_x}^2 + \left(\frac{\cos\epsilon}{\epsilon}\right)^2 \sigma_{v_z}^2 \quad (10)$$



(a) $\sigma_\beta = 0.025\text{mrad/s}$,用方位角速度测距



(b) $\sigma_\epsilon = 0.025\text{mrad/s}$,用俯仰角速度测距

图 2 $\sigma_\beta = \sigma_\epsilon = 1.74\text{mrad}(0.1^\circ)$, $\sigma_{v_x} = \sigma_{v_y} = \sigma_{v_z} = 0.1\text{m/s}$, $v_{0x} = v_{0z} = 0$, $v_{0y} = 600\text{m/s}$, $H = 5\text{km}$

4.2 多次测量定位仿真

为了获得精度更高的定位结果,必须对多次测量定位结果进行滤波处理.不妨假设观测平台运动以高度 H 沿 y 轴水

$$+ \left(\frac{-v_{0x}\cos\beta + v_{0y}\sin\beta}{\beta\cos\epsilon}\right)^2 \sigma_{\dot{\beta}}^2 + \left(\frac{\cos\beta}{\beta\cos\epsilon}\right)^2 \sigma_{v_x}^2 + \left(\frac{\sin\beta}{\beta\cos\epsilon}\right)^2 \sigma_{v_z}^2 \quad (10)$$

由上式可以看出,如果观测器朝目标辐射源径向运动导致 $\dot{\beta} = 0$ 时,或者目标出现在观测器的正下方导致俯仰角 $\epsilon = 90^\circ$ 时,或者观测器在目标斜距矢量所在的等锥上运动时,上式右边变为无穷大,所以利用方位角速度信息定位时在这些情况下是不可观测的.

同前假设 $\dot{\epsilon}$ 和 v_{0z} 的测量误差服从零均值高斯分布,且方差为 $\sigma_{\dot{\epsilon}}^2$ 、 $\sigma_{v_z}^2$,利用式(8)测距的方差为:

$$\begin{aligned} \sigma_r^2 &= \left(\frac{v_{0z}\sin\epsilon + (v_{0x}\sin\beta + v_{0y}\cos\beta)\cos\epsilon}{\epsilon}\right)^2 \sigma_{\dot{\epsilon}}^2 \\ &+ \left(\frac{(v_{0x}\cos\beta - v_{0y}\sin\beta)\sin\epsilon}{\epsilon}\right)^2 \sigma_\beta^2 + \left(\frac{r}{\epsilon}\right)^2 \sigma_\epsilon^2 \\ &+ \left(\frac{\sin\beta\sin\epsilon}{\epsilon}\right)^2 \sigma_{v_x}^2 + \left(\frac{\cos\beta\sin\epsilon}{\epsilon}\right)^2 \sigma_{v_z}^2 \\ &+ \left(\frac{\cos\epsilon}{\epsilon}\right)^2 \sigma_{v_z}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可以看出,如果目标出现在观测器运动的径向方向上,或者出现在观测器运动的水平面上,或者观测器在以目标为中心的等俯仰锥面上运动时,三种情况时俯仰角速度都为 0,上式右边变为无穷大,所以利用俯仰角速度信息定位时,在这些情况下观测器对于径向、垂直于运动方向上和在观测器运动一个平面上的目标是不可观测的.从物理概念上来说,不可观测的原因是这些情况时角速度都为 0.

4 定位仿真

4.1 单次定位仿真

假设观测器以速度 V 匀速等高地沿 Y 轴方向水平飞行,飞行的高度为 H ,则地面固定目标 T 相对于观测平台的位置为 $(x, y, -H)$,相对运动速度为 $(0, -V, 0)$,由式(10)和(11)可分别计算得到辐射源在地面上每一固定点处的测距理论误差 σ_r 的等高线分布图如图 2 所示,图中标注数值单位为公里.由图 2 可见单次定位的相对误差随着距离的增大而增大;方位角速度的测量误差 σ_β 、俯仰角速度的测量误差 σ_ϵ 对测距相对误差的影响比较大.

平匀速从 $(100\text{km}, 50\text{km}, H)$ 点处以 250m/s 的速度在空中匀速运动,对于位于地面坐标原点处的固定辐射源,则每隔时间 T 可以观测到一组测量参数,根据这组参数利用式(7)或(8)计

算出此时的距离 r_{mi} 和测距误差 σ_{mr}^2 , 代入 Kalman 滤波方程^[6] 中并进行线性化后, 可以计算得到滤波估值和它对应的滤波估计协方差, 根据可计算出理论测距误差的收敛曲线, 重复进行 100 次 Monte-Carlo 仿真统计得到实际的定位误差曲线, 并将其和常用的只测方向角扩展 Kalman 滤波(EKF)定位跟踪误差曲线进行比较如图 3 所示. 可以看出如果利用方位角速度对固定辐射源进行定位, 定位相对误差确实能在 10 秒种内收敛到 10% 以内, 而且增加方位角速度或者俯仰角速度观测信息后, 定位误差的收敛速度要比只测向算法要快. 另外由于观测器水平运动, 因此利用方位角速度的定位精度要比利用俯仰角的定位精度要高.

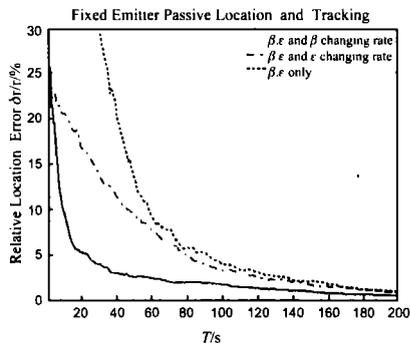


图 3 $\sigma_{\beta} = \sigma_{\epsilon} = 17.4 \text{ mrad}(1^{\circ})$, $\sigma_{\dot{\beta}} = 0.5 \text{ mrad/s}$, $\sigma_{\dot{\epsilon}} = 0.1 \text{ mrad/s}$, $\sigma_{\ddot{\beta}} = \sigma_{\ddot{\epsilon}} = 0.1 \text{ m/s}$, $\sigma_{\omega} = \sigma_{\gamma} = 15 \text{ m}$, $V_{Ox} = 250 \text{ m/s}$, $V_{Oy} = V_{Oz} = 0$, $X_0 = 100 \text{ km}$, $Y_0 = 50 \text{ km}$, $H = 5 \text{ km}$, $T = 1 \text{ s}$

5 结论

综上所述, 可见利用方向角及其变化率对运动目标的定位算法只需单站单次测量即可定出目标的位置, 具有快速定位的潜力. 通过单次和多次定位仿真试验, 验证了在三维条件下利用角速度信息对于固定辐射源的单站无源定位方法的可行性, 并且可以得到下面结果:

(1) 利用方位角速度信息定位时在观测器运动方向所在方位平面上的目标是不可观测的; 而利用俯仰角速度信息定位时观测器在以目标为中心的锥面上运动时是不可观测的;

(2) 对辐射源单次定位的相对误差随着距离 r 的增大而增大;

(3) 如果在测量方向角的基础上增加角速度和俯仰角速度的测量信息, 就有可能做到比目前常用的只测向定位更快的高精度定位.

参考文献:

- [1] L G Taff. Target localization from bearing-only observations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems, 1997, 33(1): 2-9.
- [2] Advanced Digital Receiver Offers Precision Location, Identification [OL]. July 1998 Issue, Signal Magazine, <http://www.us.net/Signal/Virtual/virtualnews.htm>.
- [3] Jon Wilson. Precision location and identification: A revolution in threat warning and situational awareness[J]. Journal of Electronic Defense, Nov 1999: 43-48.
- [4] 孙仲康. 基于运动学原理的无源定位技术[J]. 制导与引信, 2001, 22(1): 40-44.
- [5] 许耀伟. 一种快速高精度无源定位方法的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 1998.
- [6] 孙仲康. 雷达数据数字处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.

作者简介:



郭福成 男, 1975 年 5 月出生于江西龙南, 1996 年从国防科大电子科学与工程学院通信工程专业本科毕业, 1999 年从该校信号与信息处理专业硕士毕业, 同年考入本校本专业博士研究生, 主要研究方向为无源定位、现代雷达和通信中信号处理技术等.

孙仲康 男, 1930 年 2 月生于上海, 雷达信号处理方面著名专家, 现为国防科技大学教授、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, 曾获委级科技奖七项, 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.

安玮 女, 1969 年 10 月生于山东淄博, 博士, 现为国防科技大学副教授, 主要从事电子战/信息战信息处理与仿真、红外目标特性与识别、无源定位等方面的研究.