

WGS-84 坐标系下双机纯角度无源定位及性能分析

吴卫华¹, 江晶², 范雄华¹, 周宗伟¹

- (1. 空军预警学院 研究生管理大队, 湖北 武汉 430019;
2. 空军预警学院 空天预警实验室, 湖北 武汉 430019)

摘要:为实现切合实际的多运动平台对辐射源的无源定位,提出了基于WGS-84坐标系的双机纯角度交叉定位方法。推导了在各自平台坐标系下的视线(line-of-sight, LOS)到公共的WGS-84坐标系的旋转变换矩阵,然后应用空间两异面直线公垂线线段中点实现纯角度交叉定位;同时,利用一阶Taylor展开法,推导了误差经旋转变换和交叉定位等非线性变换后的协方差矩阵,并将其用于对多个单次定位估计的滤波,以提高算法定位精度。通过仿真,对影响定位精度的主要因素进行了深入分析,对比研究了单次定位和滤波定位性能,结果表明后者可明显改善精度,验证了该方法的有效性,得到的结论可指导实际运用。

关键词:无源定位; 纯角度量测; 机载运动平台; WGS-84; 视线

中图分类号: TN971 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0654-08

Performance analysis of passive location by two airborne platforms with angle-only measurements in WGS-84

Wu Weihua¹, Jiang Jing², Fan Xionghua¹, Zhou Zongwei¹

- (1. Department of Graduate Management, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China;
2. Aerospace Early Warning Laboratory, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: In order to realize passive location to an emitter by multiple moving platforms practically, a cross location with angle-only measurements by two airborne platforms based on WGS-84 coordinate system was proposed. These rotational matrix used to transform line-of-sight from each own platform's coordinate system to common WGS-84 were derived, and then angle-only cross location was achieved as the midpoint of common perpendicular line segment of two lines on different planes. At the same time, using the 1st order Taylor expansion method, the error covariances by nonlinear transform of rotation and cross location were derived which were used to filter a number of single position estimations to improve positioning accuracy. By simulation, the main factors which affected positioning accuracy were analyzed in-depthly, and the performance of single time location and by filtering were studied contrastively. The results show the latter can improve precision obviously, and indicate the validation of the algorithm. The conclusion can guide practical application.

Key words: passive localization; angle-only measurements; moving airborne platforms; world geodetic system-84; line-of-sight(LOS)

收稿日期: 2014-06-13; 修订日期: 2014-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(61102168)

作者简介: 吴卫华(1987-), 男, 博士生, 主要从事多源信息融合方面的研究。Email: weihuawu1987@163.com

导师简介: 江晶(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事现代信号处理、信息融合方面的研究。Email: jiangj36@sina.com

0 引言

研究利用纯角度信息对辐射源定位的机载无源探测系统具有重要意义。参考文献[1-3]分别使用机载红外、雷达告警接收机(RWR)和电子支援测量(Electronic Support Measurement, ESM)的角度数据对目标进行无源定位。从技术原理上看,上述定位方法都可归结为纯角度无源定位。单站纯角度无源定位^[4]需要积累较多观测点数,实时性不强。而通过合理配置多站,可实现对目标的单点即时定位。对地面固定多站,一般假设有统一的方向基准,而对空基多运动平台而言,要想实现纯角度无源定位需要克服时变位置和姿态的影响。因为,为实现即时定位,要求平台间基线长度较长,此时,各平台的NED坐标系^[5]不平行,并且,各平台对目标的LOS(由平台对目标的方位角、俯仰角进行描述)都是相对于自身机体坐标系^[6]而言,其受时变姿态的影响,在这样的条件下,各平台的LOS不能直接用于交叉定位,需要将它们变换到统一的坐标系下。

实际上,许多文献主要集中于纯角度无源定位算法的理论研究,用于实际的空基多平台还是存在一定的不足。比如,地面固定多站定位算法^[6]显然不能适用于运动的空基平台,而已有空基运动平台纯角度无源定位算法,常常建立在相对理想的条件下,如,在假设地球表面为水平面基础上,在简化的2维平面^[7-9]或3维空间^[9]中,参考文献[10]虽考虑了地球实际曲率的影响,但未提及载机姿态问题,而参考文献[11]考虑了载机姿态影响,却忽视了地球曲率的影响。

总之,根据作者目前搜集的信息来看,尚未有在WGS-84坐标系进行纯角度定位的公开报道。为切合实际,此文以椭球地球模型的WGS-84坐标系作为统一坐标系,考虑了空基两个运动平台的时变位置和姿态的影响,将平台各自的LOS变换到统一的WGS-84坐标系下。当利用纯角度交叉定位时,在2维平面下,无论是否有噪声影响,只要两条射线不平行,必然相交于一点(在无噪声时,该点即为辐射源所在位置;当存在噪声时,该点一般偏离辐射源位置),而在3维WGS-84坐标系下,受噪声影响,两条不平行视线可能也不相交,因此,近似认为辐射源在

两条射线公垂线段中间处,利用空间异面两直线公垂线相关公式,推导了纯角度交叉定位具体表达式。此外,纯角度无源定位由于系统的强非线性,定位精度较差。目前,较具代表性的非线性滤波算法有:PF (particle filter)^[12],MSCF(modified spherical coordinates filter)^[13],EKF (extend kalman filter),CMKF(converted measurements kalman filter)等。PF算法尽管适用于非线性非高斯,但实时性限制其广泛运用;MSCF基于修正球坐标系,不能适用于文中涉及的众多坐标系。而参考文献[14]已证明CMKF比EKF具有更好的性能,因此,此文借鉴CMKF滤波思想,在对一系列级联的旋转变换进行分解基础上,运用一阶Taylor展开分析法,推导和归纳出旋转变换误差传递的一般表达式,然后推导出定位误差协方差矩阵,以对多个单次即时估计进行滤波以提高精度。

1 双机纯角度无源定位及误差分析

1.1 纯角度无源定位

设辐射源R的WGS-84坐标系位置 $X_R=[x_R \ y_R \ z_R]^T$ (或经纬高位置,两者的坐标变换关系请参考参考文献[5]),载机平台 $i(i=1,2)$ 的WGS-84位置 $X_i=[x_i \ y_i \ z_i]^T$ (或经纬高位置 $[l_i \ b_i \ h_i]^T$ 、姿态为 $[\beta_i \ \varepsilon_i \ \gamma_i]^T$ (分别对应偏航、俯仰、横滚角),各载机对辐射源的方位、俯仰角为 (a_i, e_i) 。

由于两机载平台对辐射源的LOS都是相对于自身的机体直角坐标系,即载机机体头右下(Head-Right-Down, HRD)坐标系(机头、右翼、机体下方分别为该坐标系的X、Y、Z轴,文中简称载机HRD坐标系),为实现测向交叉定位,首先需要将LOS统一到WGS-84坐标系下,这可将LOS不断旋转实现。

假定两个载机平台采用无源模式,无法直接得到斜距信息,即只能得到方位角 \check{a}_i 、俯仰角量测 \check{e}_i (下凹符号 \check{a}_i 表示量测,后文类同),且平台之间的观测同步获取,设待估计的斜距为 \hat{r}_i (上三角 \hat{r}_i 表示待估计量),易知辐射源在载机HRD坐标系的位置估计为:

$$\hat{X}_{Hi} = \hat{r}_i \mathbf{u}_{Hi} \quad (1)$$

式中: \mathbf{u}_{Hi} 为辐射源在载机HRD坐标系下的单位方向矢量:

$$\mathbf{u}_{Hi} = \mathbf{T}_z^T(\check{a}_i) \mathbf{T}_{y1}^T(\check{e}_i) \mathbf{v} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{v}=[1 \ 0 \ 0]^T$ 为径向单位矢量; $[\cdot]^T$ 为矢量或矩

阵转置,下同; $T_z(\check{a}_i)$ 表示绕载机 HRD 坐标系的 z 轴旋转角度 \check{a}_i 对应的旋转矩阵; $T_{y1}(\check{e}_i)$ 表示绕载机 HRD 坐标系的 y 轴旋转俯仰角 \check{e}_i 对应的旋转矩阵,分别为:

$$T_z(\check{a}_i) = \begin{bmatrix} c\check{a}_i & s\check{a}_i & 0 \\ -s\check{a}_i & c\check{a}_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{y1}(\check{e}_i) = \begin{bmatrix} c\check{e}_i & 0 & s\check{e}_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\check{e}_i & 0 & c\check{e}_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,为便于描述,简记 $c(\cdot)=\cos(\cdot)$, $s(\cdot)=\sin(\cdot)$,下同。

进一步可得辐射源在载机 NED 坐标系下的位置矢量:

$$\hat{X}_{Ni} = T_z^T(\check{\beta}_i) T_{y2}^T(\check{\varepsilon}_i) T_x^T(\check{\gamma}_i) \hat{X}_{Hi} \quad (4)$$

式中: $T_z(\check{\beta}_i)$ 形式同 $T_z(\check{a}_i)$,只是用 $\check{\beta}_i$ 代替 \check{a}_i ; $T_{y2}(\check{\varepsilon}_i)$ 表示绕载机 NED 坐标系的 y 轴旋转纬度 $\check{\varepsilon}_i$ 对应的旋转矩阵; $T_x(\check{\gamma}_i)$ 表示绕载机 NED 坐标系的 x 轴旋转角度 $\check{\gamma}_i$ 对应的旋转矩阵,分别为:

$$T_{y2}(\check{\varepsilon}_i) = \begin{bmatrix} c\check{\varepsilon}_i & 0 & -s\check{\varepsilon}_i \\ 0 & 1 & 0 \\ s\check{\varepsilon}_i & 0 & c\check{\varepsilon}_i \end{bmatrix}, T_x(\check{\gamma}_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\check{\gamma}_i & s\check{\gamma}_i \\ 0 & -s\check{\gamma}_i & c\check{\gamma}_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

最终可得辐射源在 WGS-84 坐标系下相对平台 i 的位置相对矢量:

$$\hat{r}_i = \hat{r}_i \mathbf{u}_i = \hat{X}_{Ri} - \hat{X}_i = T_z^T(\check{l}_i) T_{y3}^T(\check{b}_i) \hat{X}_{Ni} \quad (6)$$

式中: \hat{r}_i 为辐射源到平台 i 的相对位置矢量; \hat{r}_i 为 \hat{r}_i 的模; $\mathbf{u}_i = u_{ix}\mathbf{i} + u_{iy}\mathbf{j} + u_{iz}\mathbf{k}$ 为 WGS-84 坐标系下辐射源相对于载机平台 i 的方向单位矢量; \mathbf{i} 、 \mathbf{j} 、 \mathbf{k} 分别为 WGS-84 坐标系 x 、 y 、 z 轴的单位矢量; \hat{X}_{Ri} 表示平台 i 对辐射源的 WGS-84 位置估计; \hat{X}_i 表示平台 i 的 WGS-84 位置,其由经纬高量测经过坐标变换得到。 $T_z(\check{l}_i)$ 形式同 $T_z(\check{a}_i)$,只是用 \check{l}_i 代替 \check{a}_i ; $T_{y3}(\check{b}_i)$ 表示绕 WGS-84 坐标系的 y 轴旋转纬度 \check{b}_i 对应的旋转矩阵,为

$$T_{y3}(\check{b}_i) = \begin{bmatrix} -s\check{b}_i & 0 & c\check{b}_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -c\check{b}_i & 0 & -s\check{b}_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

综上所述,由式(1)、(2)、(4)、(6),可得

$$\hat{r}_i = \hat{r}_i \mathbf{u}_i = T_z^T(\check{l}_i) T_{y3}^T(\check{b}_i) T_x^T(\check{\beta}_i) T_{y2}^T(\check{\varepsilon}_i) \cdot T_x^T(\check{\gamma}_i) \hat{r}_i T_z^T(\check{a}_i) T_{y1}^T(\check{e}_i) \mathbf{v} =$$

$$\hat{r}_i T_z^T(\check{l}_i) T_{y3}^T(\check{b}_i) T_x^T(\check{\beta}_i) T_{y2}^T(\check{\varepsilon}_i) \cdot T_x^T(\check{\gamma}_i) T_z^T(\check{a}_i) T_{y1}^T(\check{e}_i) \mathbf{v} \quad (8)$$

从而,可得在 WGS-84 坐标系下辐射源相对于载机平台 i 的方向单位矢量:

$$\mathbf{u}_i = T_z^T(\check{l}_i) T_{y3}^T(\check{b}_i) T_x^T(\check{\beta}_i) T_{y2}^T(\check{\varepsilon}_i) \cdot T_x^T(\check{\gamma}_i) T_z^T(\check{a}_i) T_{y1}^T(\check{e}_i) \mathbf{v} \quad (9)$$

式(9)实际上表示由载机对辐射源的 LOS(由方位角 \check{a}_i 、俯仰角 \check{e}_i 描述)以及平台自身的姿态角和经纬度,可将径向单位矢量通过连续的旋转变换投影到 WGS-84 坐标系下。

在 WGS-84 坐标系下,设平台 1 到平台 2 的距离矢量为 \mathbf{d} ,由于噪声的存在,当两方向单位矢量不相交时,此时两直线一般不共面,设两者的公垂线与 \mathbf{u}_1 和 \mathbf{u}_2 分别相交于点 R' 、 R'' ,如图 1 所示,令 $\mathbf{n} = \overline{R'R''}$,称为法向量,易知 $|\mathbf{n}|(|\cdot|$ 表示矢量的模)为两平台对辐射源方向单位矢量的最短距离^[14]。

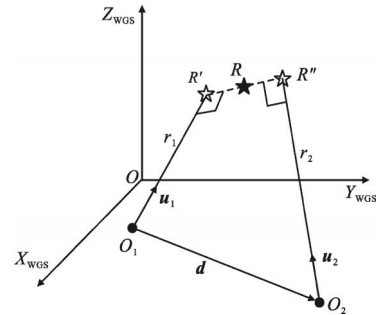


图 1 WGS-84 坐标系下双机对辐射源方向射线交叉定位

Fig.1 Cross location with angle-only measurements by two airborne platforms based on WGS-84 coordinate system

根据参考文献[14],可得各平台对辐射源的斜距估计:

$$\hat{r}_1 = \frac{|\mathbf{d} \times \mathbf{u}_2|}{|\mathbf{u}_1 \times \mathbf{u}_2|}, \hat{r}_2 = \frac{|\mathbf{d} \times \mathbf{u}_1|}{|\mathbf{u}_1 \times \mathbf{u}_2|} \quad (10)$$

式中:“ \times ”代表矢量叉积(也称向量积)。

得到斜距估计后,由式(6)可得平台 i 对辐射源的位置估计为

$$\hat{X}_{Ri} = \hat{X}_i + \hat{r}_i \mathbf{u}_i \quad (11)$$

假定认为辐射源在法向量 \mathbf{n} 中点处,最终可得双机对辐射源的融合估计为:

$$\hat{X}_R = \frac{1}{2} (\hat{X}_{R1} + \hat{X}_{R2}) \quad (12)$$

将式(10)、(11)代入式(12)有:

$$\hat{X}_R = \frac{1}{2} \left(\hat{X}_1 + \hat{X}_2 + \frac{|d \times u_2|}{|u_1 \times u_2|} u_1 + \frac{|d \times u_1|}{|u_1 \times u_2|} u_2 \right) \quad (13)$$

由式(13)可见,辐射源位置估计为 u_1, u_2 的函数。

1.2 误差分析

由式(9)可看出,假定各观测量是独立的,则整个旋转变换可进行级联分解,7个旋转矩阵对应7级坐标变换,为了后文表述方便,标记等式右边项自右向左分别对应第1~7级,见式(14)。该式尽管变换级数较多,但均是旋转变换,不失一般性,对任意第 $m(m=1, \dots, 7)$ 级旋转变换,设变换前的观测矢量(输入矢量) $\check{X}=[\check{x} \ \check{y} \ \check{z}]^T$ 真值为 $X=[x \ y \ z]^T$, 对应协方差矩阵为 P_X , 变换后的矢量(输出矢量) $X'=[x' \ y' \ z']^T$, 协方差矩阵为 $P_{X'}$, 旋转变换前后的误差矩阵 P_X 和 $P_{X'}$ 的传递关系可运用一阶 Taylor 近似分析法在真值处展开进行推导。

$$u_i = \underbrace{T_z^T(l_i) T_{y2}^T(b_i) T_z^T(\beta_i) T_{y1}^T(\epsilon_i)}_1 \cdot \underbrace{T_x^T(\gamma_i) T_z^T(a_i) T_{y3}^T(e_i)}_2 y \quad (14)$$

下面以第1级旋转变换为例说明,对该级变换有:

$$X' = T_{y3}^T(e_i) \check{X} \quad (15)$$

对式(15)在真值处一阶 Taylor 展开,可得输出误差矢量协方差为:

$$P_{X'} = J_1 \cdot \text{diag}(P_X, \sigma_{e_i}^2) \cdot J_1^T \quad (16)$$

式中: J_1 为第1级变换输出矢量对输入矢量和旋转角度的雅克比矩阵,见式(17)。

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial x'}{\partial x} & \frac{\partial x'}{\partial y} & \frac{\partial x'}{\partial z} & \frac{\partial x'}{\partial e_i} \\ \frac{\partial y'}{\partial x} & \frac{\partial y'}{\partial y} & \frac{\partial y'}{\partial z} & \frac{\partial y'}{\partial e_i} \\ \frac{\partial z'}{\partial x} & \frac{\partial z'}{\partial y} & \frac{\partial z'}{\partial z} & \frac{\partial z'}{\partial e_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos e_i & 0 & -\sin e_i & -x \sin e_i - z \cos e_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin e_i & 0 & \cos e_i & x \cos e_i - z \sin e_i \end{bmatrix} = \left[T_{y3}^T(e_i) \left| \frac{\partial T_{y3}^T(e_i)}{\partial e_i} X \right. \right] \quad (17)$$

注意:对于第1级旋转变换, $\check{X}=X=v=[1 \ 0 \ 0]^T$ 为常矢量, $P_X=0_{3 \times 3}$, 这里是对一般式子进行推导。

根据上述分析,易得对于任意第 $m(m=1, \dots, 7)$ 级旋转变换,有如下误差传递的一般关系:

$$P_{X'} = J_m \cdot \text{diag}(P_X, \sigma_{\theta_m}^2) \cdot J_m^T \quad (18)$$

式中: $\sigma_{\theta_m}^2$ 为第 m 级观测误差方差; J_m 为第 m 级输出矢量对输入矢量和旋转角度的雅克比矩阵,并有如下结构

$$J_m = \left[T_m^T(\theta_m) \left| \frac{\partial T_m^T(\theta_m)}{\partial \theta_m} X \right. \right] \quad (19)$$

式中: $T_m(\theta_m)$ 表示第 m 级旋转角度 θ_m 对应的旋转矩阵。

通过上述级联的误差传导后,可得 u_i 的协方差矩阵为 P_i , 忽略两平台之间距离 d 的误差,则根据式(13),再次利用一阶 Taylor 近似分析法,可得辐射源 WGS-84 位置估计误差矩阵,即定位误差矩阵为:

$$R_w^c = J \cdot \text{diag}(P_1, P_2) \cdot J^T \quad (20)$$

式中: J 为辐射源位置 $[x_R \ y_R \ z_R]^T$ 对 u_1 和 u_2 的雅克比矩阵。

2 无源定位滤波

1.1 节的双机对辐射源的单次无源定位估计可类比转换量测,而1.2节的定位误差分析相当于量测转换误差分析,因此,可借鉴CMKF思想,对多个单次定位估计进行滤波以提高无源定位的精度。设辐射源在WGS-84坐标系中的状态为 X , 对于固定目标,状态选择为 $X=X_R=[x_R \ y_R \ z_R]^T$, 则状态方程为:

$$X(k+1) = F \cdot X(k) \quad (21)$$

式中: $F=I_{3 \times 3}$ 为状态转移矩阵; $I_{3 \times 3}$ 表示秩为3的单位矩阵。

在两载机平台飞行过程中,由1.1节介绍的单次无源定位估计结果,得到 k 时刻辐射源在WGS-84系下的“观测”矢量为:

$$Z^c(k) = H \cdot X(k) + w_k \quad (22)$$

式(22)等号左边项由式(13)得到, $H=I_{3 \times 3}$, w_k 为零均值,协方差为 $R_w^c(k)$ 的白高斯噪声。 $R_w^c(k)$ 采用1.2小节的式(20)得到。

建立了状态方程和量测方程后,即可进行Kalman滤波,具体流程如下:

$$\hat{X}(k|k-1) = F \hat{X}(k-1|k-1)$$

$$P(k|k-1) = F P(k-1|k-1) F^T$$

$$S(k) = H P(k|k-1) H^T + R_w^c(k)$$

$$G(k) = P(k|k-1) H^T S^{-1}(k)$$

$$\hat{Z}(k|k-1) = H \hat{X}(k|k-1)$$

$$\begin{aligned}\hat{X}(k|k) &= \hat{X}(k|k-1) + G(k)[Z^c(k) - \hat{Z}(k|k-1)] \\ P(k|k) &= P(k|k-1) - G(k)S(k)G^T(k)\end{aligned}\quad (23)$$

式中: $P(k|k)$ 为滤波协方差; $G(k)$ 为滤波增益; $S(k)$ 为新息协方差。在滤波之前, 需要初始化滤波器, 初始状态为: $X(1|1) = Z^c(1)$, $P(1|1) = R_w^c(1)$ 。

3 仿真分析

为了评估无源定位算法的精度, 定义以下性能指标。设辐射源位置真值为 X_R , 第 n 次蒙特卡罗仿真的估计量 \hat{X}_n , 那么总定位误差 $\Delta r_n = |\hat{X}_n - X_R|$, 总均方根误差 RMSE 为 $\eta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Delta r_n^2}$ 。

3.1 单次定位仿真

3.1.1 仿真场景设计

为研究两平台与辐射源之间的相对几何、两平台之间距离以及平台与辐射源之间的距离对定位精度的影响, 并为了场景合理(如在 WGS-84 坐标系下避免海拔高度为负或过大), 在以辐射源为原点所在的 ENU 地理坐标系^[5]下(见图 2), 定义如下参数: 两平台中点 M 与辐射源的距离为 D , 该中点相对辐射源的方位角、俯仰角(注意与载机对辐射源观测的方位角和俯仰角相区别)分别为 a_g 、 e_g , θ 为两平台连线 O_1O_2 与两平台中点与辐射源连线 RM 之间的夹角, a_0 为 O_1O_2 在 XOY 平面投影与 RM 直线在该平面的投影的夹角。易知, $\cos\theta = \cos a_0 \cos e_g$, 因此, 在给定 e_g 条件下, θ 与 a_0 一一对应。注意, 在 $a_0 = 90^\circ$ 时, $\theta = 90^\circ$, 两平台到辐射源的距离相等, 即 $r_1 = r_2$ 。

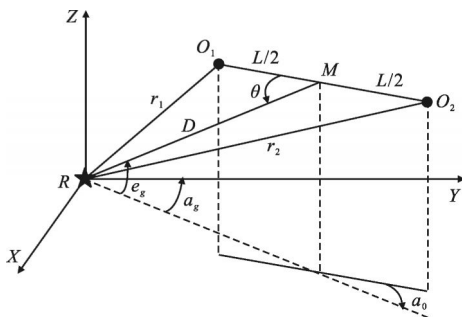


图 2 辐射源本地 ENU 坐标系下描述双机与辐射源的相对几何
Fig.2 Relative geometry of airborne and emitter based on ENU coordinate system of emitter

假定平台 1、平台 2 在辐射源 ENU 坐标系的 z

分量位置相等, 那么可根据 e_g 、 a_g 、 D 、 L 以及 $a_0(\theta)$ 五个参数确定两平台的位置。下面在给定 $a_g = -60^\circ$ 情况下, 着重研究分别反映平台与辐射源的相对几何形状 $a_0(\theta)$ 、平台之间的距离 L 以及平台与辐射源的距离 D 对定位精度的影响(为确保海拔高度较为合理, e_g 根据 D 不同而不同)。

3.1.2 不同因素影响时单次定位性能

设辐射源的经度 121.5°E , 纬度 25°N , 高度 200 m , 两平台传感器观测性能相同, 方位角、俯仰角观测标准差为 1° , 偏航角、俯仰角、横滚角等姿态观测标准差为 0.1° , 经度、纬度标准差为 0.001° , 海拔高度标准差为 100 m 。为避免偶然因素对定位性能的干扰, 进行了 1 000 次的蒙特卡洛仿真实验。

(1) $a_0(\theta)$ 对定位精度的影响

为研究两机载平台与辐射源三者形成的几何形状对定位精度的影响, 令 $D = 100\text{ km}$, $L = 115\text{ km}$, $e_g = 0.0176\text{ rad} \approx 1.01^\circ$, a_0 分别取值为 $a_0 = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 时的定位统计结果见表 1。

表 1 $a_0(\theta)$ 取不同值时无源定位 RMSE 结果

Tab.1 RMSE of passive location vs. $a_0(\theta)$

No.	$a_0(\theta)/(^\circ)$	r_1/km	r_2/km	RMSE/km
1	0(1.01)	42.5	157.5	240.15
2	5(5.10)	43.0	157.4	21.28
3	10(10.05)	44.5	156.9	9.93
4	15(15.03)	46.9	156.2	6.78
5	30(30.02)	57.9	152.5	4.38
6	45(45.01)	71.9	146.4	3.70
7	60(60.01)	86.9	138.0	3.50
8	75(75.00)	101.6	127.6	3.33
9	90(90.00)	115.4	115.4	3.35

注: 表中数据做了四舍五入处理(后文各表也进行了类似处理)。

从表中可看出, 在 $a_0(\theta) = 0^\circ(1.01^\circ)$ 时定位误差相当大, 这是由于此时两平台和辐射源几乎在一条直线上, 因此, 无法进行三角交叉定位, 而 $a_0(\theta) = 5^\circ(5.10^\circ)$ 时定位性能有了极其显著的改善, 在 $45^\circ(45.01^\circ) < a_0(\theta) < 90^\circ(90^\circ)$ 时, 定位性能较为接近, 说明了此文定位算法受相对几何的影响, 但影响范围较小, 表明算法具有较强的实用价值。

角度 $a_0(\theta)$ 对定位精度的影响更详细更直观地仿真结果如图 3 所示(由于 a_0 、 θ 的一一对应关系, 横轴只标出了 θ)。

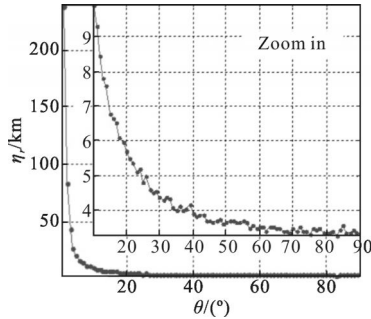


图 3 定位 RMSE 随 θ 的变化关系
Fig.3 RMSE of passive location vs. θ

(2) L 对定位精度的影响

为研究两平台之间的距离对定位性能的影响, 令 $D=100\text{ km}$, $a_0=90^\circ$ ($\theta=90^\circ$) 保持不变, L 分别取值为 $L=50\text{ km}, 85\text{ km}, 115\text{ km}, 150\text{ km}, 180\text{ km}, 200\text{ km}, 250\text{ km}$ 的场景配置及定位性能见表 2。在此条件下, 两平台与辐射源三者在不同情况下始终保持等腰三角形, 且在 No.3 时, 三者构成的几何形状近似为等边三角形。随着平台之间的距离增大, 定位精度先提高后降低, 并且在三者构成等边三角形时定位性能最佳。值得一提的是, 从 No.4~No.7 可看出, 虽然随着平台之间的距离继续增加, 破坏了等边三角形的条件, 但是定位性能下降比较缓慢。因此, 在平台与辐射源之间的距离未知时, 应尽可能地增加平台之

表 2 不同 L 值时场景配置及定位性能

Tab.2 RMSE of passive location and scene configuration vs. L

No.	L/km	$e_g/(\circ)$	Platform1			Platform2			$r_1(r_2)/\text{km}$	RMSE/km
			Longitude/ (\circ)	Latitude/ (\circ)	Height/m	Longitude/ (\circ)	Latitude/ (\circ)	Height/m		
1	50	1.09	120.76	25.64	3 003.9	120.52	25.25	3 002.0	103.1	5.38
2	85	1.08	120.85	25.78	3 007.4	120.43	25.12	3 004.3	108.7	3.85
3	115	1.01	120.92	25.90	3 006.0	120.36	25.00	3 001.8	115.4	3.30
4	150	0.91	121.01	26.04	3 009.1	120.27	24.86	3 003.5	125.0	3.32
5	180	0.79	121.08	26.15	3 004.4	120.20	24.74	2 997.7	134.5	3.42
6	200	0.70	121.13	26.23	3 004.2	120.15	24.66	2 996.8	141.4	3.55
7	250	0.45	121.26	26.43	3 007.7	120.03	24.47	2 998.5	160.1	3.98

间的距离以提高定位精度。

(3) 对定位精度的影响

为研究平台与辐射源之间的距离对定位精度的影响, 令 $L=100\text{ km}$, $a_0=90^\circ$ ($\theta=90^\circ$) 保持不变, D 分别取值为 $D=50\text{ km}, 86\text{ km}, 100\text{ km}, 125\text{ km}$ 时的场景配置及定位性能见表 3。为保持载机平台的海拔高度在 3 000 m 左右, 随着距离 D 的增加, e_g 相应减小,

且由于 $a_0=90^\circ$ ($\theta=90^\circ$), 因此, 两平台距离辐射源的距离相等。可看出, 随着距离的增加, 定位性能逐步下降。并且注意, 在 No.2 条件下, 双机和辐射源构成近似等边三角形, 尽管 No.1 条件三者只是等腰三角形, 但后者定位性能更佳, 说明此时双机与辐射源的距离对定位性能的影响要大于三者形成的几何形状。

表 3 不同 D 值时场景配置及定位性能

Tab.3 RMSE of passive location and scene configuration vs. D

No.	D/km	$e_g/(\circ)$	Platform1			Platform2			$r_1(r_2)/\text{km}$	RMSE/km
			Longitude/ (\circ)	Latitude/ (\circ)	Height/m	Longitude/ (\circ)	Latitude/ (\circ)	Height/m		
1	50	2.76	121.32	25.62	3 002.2	120.83	24.83	3 000.3	70.7	1.77
2	86	1.32	121.00	25.78	2 955.7	120.52	24.99	2 952.5	99.5	2.94
3	100	1.04	120.89	25.84	3 002.3	120.39	25.06	2 998.6	111.8	3.54
4	125	0.63	120.67	25.95	2 999.1	120.18	25.17	2 994.5	134.6	4.99

3.2 无源定位滤波仿真

为验证无源定位滤波算法可有效提高定位精度, 设定两载机在 WGS-84 坐标系下做匀速直线运动, 双机观测同步, 且采样间隔为 6 s, 辐射源位置及各观测量标准差同上。

对辐射源进行切向飞行是一种比较常见的侦察模式, 设定平台 1 的初始经纬高坐标为 $[121^\circ 24.5^\circ 8\ 000\ \text{m}]^T$, 平台 2 的初始经纬高坐标为 $[121^\circ 24^\circ 8\ 000\ \text{m}]^T$, 见图 4, 两平台的速度均为 $[64.69 -107.66\ 272.44]^T(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。

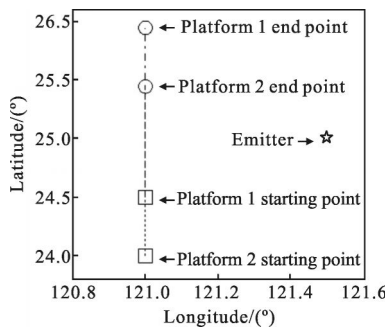


图 4 载机与辐射源相对几何
Fig.4 Relative geometry of airborne and emitter

图 5 直观反映了各平台与辐射源之间的距离以及平台之间的距离随时间的变化关系, 可知两平台之间的距离始终保持不变, 且平台 2 滞后平台 1 一定时差, 在时刻 $k=48$ 处两平台与辐射源三者构成近似等边三角形。

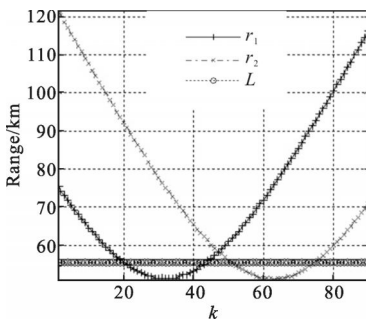


图 5 r_1, r_2, L 随时间的变化关系
Fig.5 r_1, r_2, L vs. time

图 6 分别给出了单次定位和滤波定位在不同时刻的 RMSE 性能。可看出, 单次定位沿 $k=48$ 对称分布, 这是因为双机和辐射源不同时刻构成的几何形状也关于 $k=48$ 对称, 且由于在 $k=48$ 时近似为等边三角形, 此时定位性能也最好, RMSE 为 1 804.5 m,

而滤波定位随着时间的增加定位精度逐步提高, 在 $k=90$ 时, RMSE 达到 225.67 m, 验证了其有效性。

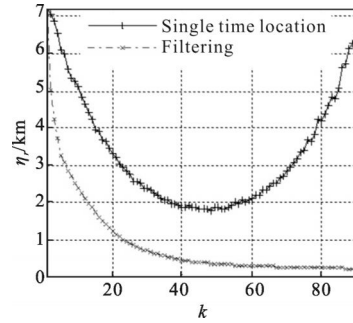


图 6 单次定位和滤波定位 RMSE 性能
Fig.6 RMSE performance of single time location and by filtering

4 结论

为贴近实际, 解决机载平台由于时变位置和姿态引起 LOS 处于非惯性坐标系下、3 维空间下两射线交叉定位不能交于一点以及纯角度无源定位精度较差的难题, 提出了 WGS-84 坐标系下双机协同纯角度无源定位方法, 该方法基于 WGS-84 三维坐标系建模, 并考虑了载机时变姿态影响, 便于直接工程应用。仿真结果表明: 各平台距离辐射源越近, 平台之间距离越远, 双机与辐射源三者构成的三角形越接近等边三角形, 有助于改善定位精度, 并且, 通过对多个单次定位估计滤波可明显提高定位性能, 验证了算法的有效性。下一步的研究工作是实现对运动辐射源的定位跟踪。

参考文献:

[1] Wang Huijun, Zhao Yin, Ni Shuxin. Airborne IR early warn detect system [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37 (11): 1133-1136. (in Chinese)
王慧君, 赵寅, 倪树新. 机载红外预警探测系统[J]. 激光与红外, 2007, 37(11): 1133-1136.

[2] Ma Dengwu, Fan Geng, Qv Xiaoyan. Acquisition of rear target information with RWRs onboard two aircrafts [J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(8): 32-35. (in Chinese)
马登武, 范庚, 曲晓燕. 双机用雷达告警接收机对尾后目标信息获取的方法研究[J]. 光电与控制, 2008, 15(8): 32-35.

[3] Chen Xin, Peng Keju, Zhou Dongxiang, et al. Bearing only method based on optimal data in Multi-UAV co-location [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(10): 1466-1472. (in Chinese)
陈新, 彭科举, 周东翔, 等. 基于优选数据准则的空基多平

- 台协同定位方法[J]. 信号处理, 2010, 26(10): 1466-1472.
- [4] Richard A Poisel. Electronic Warfare Target Location Methods [M]. London: Artech House, 2005.
- [5] Jiang Jing. Study on multiple moving platforms multiple sensors information fusion application [D]. Wuhan: Wuhan University, 2006: 9. (in Chinese)
江晶. 多运动平台多传感器信息融合技术应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006: 9.
- [6] Cao Lei, Wang Shuai, Liu Zhao. Bearing-only location and tracking by two stationary stations [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(4): 410-414. (in Chinese)
曹磊, 王帅, 刘钊. 两静止观测站的纯角度定位与跟踪[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(4): 410-414.
- [7] Zhu Jianhui, Fang Yangwang, Zhang Ping, et al. Error analysis in dual-aircraft cooperative locating [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(6): 21-25. (in Chinese)
朱剑辉, 方洋旺, 张平, 等. 双机协同定位误差分析的研究[J]. 电光与控制, 2012, 19(6): 21-25.
- [8] Zhao Xingchen, Wu Jun, Peng Fang, et al. Research on a passive localization method based on dual match in combined air attack [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012, 31(6): 18-21. (in Chinese)
赵星辰, 吴军, 彭芳, 等. 联合空战中一种基于双机配合的无源定位方法研究[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(6): 18-21.
- [9] Wei Yi, Yang Wanhai, Li Hongyan. Accuracy analysis of 3D passive location with infrared [J]. *Infrared Technology*, 2002, 24(6): 37-40. (in Chinese)
韦毅, 杨万海, 李红艳. 红外三维定位精度分析[J]. 红外技
- 术, 2002, 24(6): 37-40.
- [10] Lei Yu, Feng Xinxi, Zhu Canbin, et al. Geometric location algorithm for multi-sensor networking based on data fusion theory [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1339-1344. (in Chinese)
雷雨, 冯新喜, 朱灿彬, 等. 基于数据融合理论的多传感器几何定位算法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1339-1344.
- [11] Sheng Yuebin, Chen Dingchang, Ren Qiang, et al. Algorithm and simulation of 3D passive location with two infrared moving sensors [J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(10): 2746-2748. (in Chinese)
盛跃宾, 陈定昌, 任强, 等. 双被动红外运动探测器三维定位算法及仿真 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(10): 2746-2748.
- [12] Cappe O, Godsill S J, Moulines E. An overview of existing methods and recent advances in sequential Monte Carlo [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(5): 899-924.
- [13] Robinson P N, Yin M R. Modified spherical coordinates for radar [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994: 55-64.
- [14] Lerro D, Bar-Shalom Y. Tracking with debiased consistent converted measurements versus EKF [J]. *IEEE Trans on AES*, 1993, 29(3): 1015-1022.
- [15] Samuel Blackman, Robert Popoli. Design and Analysis of Modern Tracking Systems [M]. Boston: Artech House, 1999: 703-705.