

双机协作无源定位测角精度计算

高 翔¹, 方洋旺¹, 董凤珍², 杨鹏飞¹, 曹中红³

(1. 空军工程大学航空航天工程学院,陕西西安,710038;2. 95107 部队,广东广州,510500;3. 94942 部队,上海,200434)

摘要 针对无源定位测角精度难以计算的问题提出了一种双机协作无源定位远距离目标测角精度计算方法。首先建立了基于到达角度方式的双机协作无源定位解析方程;其次通过引入波程差,建立了方位角信息与到达时间差之间的数学关系;接着给出了一种通过到达时间差的概率分布计算方位角概率分布的近似算法;最后进行了仿真试验,并分析了双机占位对测角精度的影响。仿真结果验证了所提测角精度计算方法的可行性和有效性。

关键词 无源定位;双机协作;测角精度;均方根误差

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.05.002

中图分类号 V243.2;TN958 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)05-0005-05

无源定位是指定位站通过接收目标自身辐射的电磁信号对其进行定位的方式^{[1]10,241},由于定位站不向外辐射电磁信号,所以无源定位具有很好的电磁隐蔽特性和抗干扰性能以及一定的反隐身能力^[2]。同时,无源定位的作用距离比有源定位系统的作用距离成倍增加,有利于己方获得先敌发射主动权。但是单个定位站进行无源定位只能给出目标信号的到达方位和到达时间,因此需要多个定位站协同工作才能得到目标的位置信息^[3]。双机协同是目前空战中常用的编队方式,双机组成的 DOA 无源定位系统由于设备相对简单,技术相对成熟而具有十分重要的应用。考虑单个平面内情况,若不存在定位误差,利用正弦定理可得 2 条方位线的交点就是目标位置^[4]。

实际情况下任何测量都会不可避免地受到探测误差的影响,目标可能落在以所计算的辐射源位置为圆心的一个圆(或椭圆)中,所以实际目标方位的报告方式应该是计算所得位置和有效精度的组合。对于无源定位系统,这个精度通常是以均方根(RMS)角度误差来描述^{[5]173},它由平均误差 μ 和标准偏差 σ 2 部分组成,如何获得 μ 和 σ 对提供最终的定位结果以供决策是定位过程中必须解决的问题。双机组成的 DOA 定位系统存在的一个问题是当定位远距离目标时,由于定位基线离目标很远,方位线变得几乎平行,所以由均方根误差限定线所围成的区域面积很大导致几何精度的大幅下降^{[6]104}。本文以双机协作定位远距离辐射源为背景,重点分析了双机四天线组成的 DOA 和 TDOA 复合无源定位系统的测角精度,为如何进行空基协作无源探测定位远距离目标精度报告提供了一种思路。

1 假设条件及坐标系建立

1.1 假设条件

作为定位模型建立的基础,假设:

1) 作为定位站的飞机水平向前飞行并且飞行姿态没有发生变化。组成四天线系统时,2 架飞机具备双天线且对称分布于机翼两端,二者机身轴线在同一竖直平面内;

收稿日期:2011-06-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60874040)

作者简介:高翔(1985-),男,河南信阳人,博士生,主要从事航空武器系统总体、被动探测、制导与控制研究。

E-mail: gaoxiang003007@163.com

2) 忽略地球曲率影响;

3) 目标的方位报告为俯仰和偏航 2 个通道, 范围均为 $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ 。

1.2 坐标系建立

建立双机协作四天线定位系统坐标系 $OXYZ$ 如图 1 所示, 前方飞机机翼两端天线 A, B 连线的中点 O 为坐标原点, 后方飞机机翼天线 C, D 。 OA 为 OX 轴正向, OY 轴平行于两飞机的轴线指向前方, OZ 轴由右手定则确定指向上方。图中 $2a$ 表示前方载机翼展, b 和 h 分别表示两架载机的前后间距及高度差。前方飞机测得的方位角和俯仰角为 $L_1(\phi_1, \theta_1)$, $L_2(\phi_2, \theta_1)$, 后方飞机测得的方位角和俯仰角为 $L_3(\phi_3, \theta_2)$, $L_4(\phi_4, \theta_2)$ 。方位角定义沿 OY 轴逆时针旋转为正, 俯仰角定义为向上旋转为正。

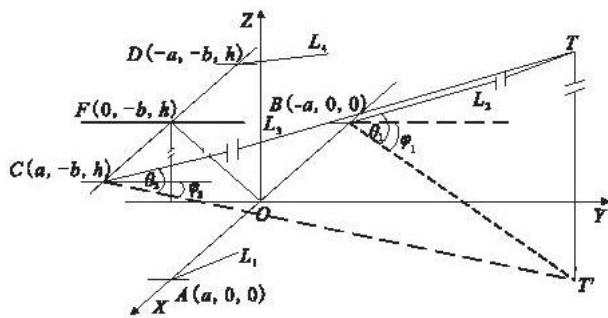


图 1 双机四天线定位系统天线、目标位置关系
Fig. 1 Relationship between the antennas and the target in the dual-aircraft with four antennas detecting system

2 定位精度模型建立

单纯依靠图 1 所示几何关系建立 DOA 定位模型, 由于包含的参数的统计特性不直观, 使得对定位精度分析的难度很大^[7-9]。为此本节通过引入波程差, 建立目标方位和到达时间差之间的数学模型。

2.1 DOA 定位模型建立

如图 1 所示设天线 A, B, C, D 的定位线的方向为单位向量 e_1, e_2, e_3, e_4 , 则:

$e_1 = (\cos\theta_1 \sin\phi_1, \cos\theta_1 \cos\phi_1, \sin\theta_1)$, $e_2 = (\cos\theta_1 \sin\phi_2, \cos\theta_1 \cos\phi_2, \sin\theta_1)$, $e_3 = (\cos\theta_2 \sin\phi_3, \cos\theta_2 \cos\phi_3, \sin\theta_2)$, $e_4 = (\cos\theta_2 \sin\phi_4, \cos\theta_2 \cos\phi_4, \sin\theta_2)$ 。

过 A, B, C 点的定位线 L_1, L_2, L_3, L_4 的方程为

$$L_1: \begin{cases} x = a + \lambda_1 \cos\theta_1 \sin\phi_1 \\ y = \lambda_1 \cos\theta_1 \cos\phi_1 \\ z = \lambda_1 \sin\theta_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$L_3: \begin{cases} x = a + \lambda_3 \cos\theta_2 \sin\phi_3 \\ y = -b + \lambda_3 \cos\theta_2 \cos\phi_3 \\ z = h + \lambda_3 \sin\theta_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$L_2: \begin{cases} x = -a + \lambda_2 \cos\theta_1 \sin\phi_2 \\ y = \lambda_2 \cos\theta_1 \cos\phi_2 \\ z = \lambda_2 \sin\theta_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$L_4: \begin{cases} x = -a + \lambda_4 \cos\theta_2 \sin\phi_4 \\ y = -b + \lambda_4 \cos\theta_2 \cos\phi_4 \\ z = h + \lambda_4 \sin\theta_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 及 λ_4 为常数, 下文将给出它们的具体含义。下面通过引入波程差建立目标方位与到达时间差之间的关系。

2.2 DOA&TDOA 定位精度模型建立

设天线 A, B 接收到目标辐射信号的波程差为 ΔAB , B, C 接收到的波程差为 ΔBC , C, D 接收到的波程差为 ΔCD , D, A 接收到的波程差为 ΔDA 。如图 2 所示, 过 A 作垂直于 L_1 的平面 Π , 该平面与 L_2 的交点为 G , 则波程差 ΔAB 就是有向线段 BG 的长度。

平面 Π 的法向量为 e_1 , 过点 $A(a, 0, 0)$, 由平面点法式方程可得 Π 的方程为:

$$\cos\theta_1 \sin\phi_1(x - a) + \cos\theta_1 \cos\phi_1 y + \sin\theta_1 z = 0 \quad (5)$$

联立式(2)和式(5)可得 λ_2, λ_2 即为有向线段 BG 的长度, 即波程差为:

$$\Delta AB = 2a \cos\theta_1 \sin\phi_1 / [\cos^2\theta_1 \cos(\phi_1 - \phi_2) + \sin^2\theta_1] \quad (6)$$

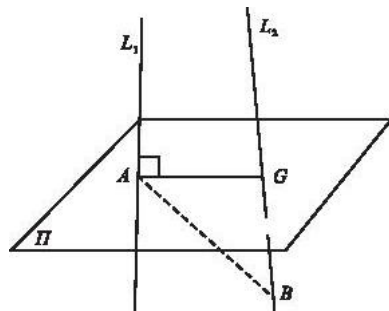


图 2 波程差 ΔAB 求解图

Fig. 2 The relationship between wave path and location line

采用同样的计算方法可得 ΔBC 、 ΔCD 、 ΔDA 也即 λ_3 、 λ_4 、 λ_1 的值。由于飞机的翼展相对于其与目标的距离来说很小,这里假设同一架飞机两天线测得的方位角相同,即可令 $\phi_1 = \phi_2$ 、 $\phi_3 = \phi_4$ 。设 ΔAB 、 ΔBC 、 ΔCD 、 ΔDA 对应的时间差为 Δt_{AB} 、 Δt_{BC} 、 Δt_{CD} 、 Δt_{DA} , c 为电磁波传播速度,则可得下列方程:

$$\Delta t_{AB}c = 2a\cos\theta_1 \sin\phi_1 \quad (7)$$

$$\Delta t_{BC}c = [(b\cos\phi_1 - 2a\sin\phi_1)\cos\theta_1 - h\sin\theta_1] / [\cos\theta_1\cos\theta_2\cos(\phi_1 - \phi_3) + \sin\theta_1\sin\theta_2] \quad (8)$$

$$\Delta t_{CD}c = 2a\cos\theta_2 \sin\phi_3 \quad (9)$$

$$\Delta t_{DA}c = -[(b\cos\phi_3 + 2a\sin\phi_3)\cos\theta_2 - h\sin\theta_2] / [\cos\theta_1\cos\theta_2\cos(\phi_1 - \phi_3) + \sin\theta_1\sin\theta_2] \quad (10)$$

至此定位角度和到达时间差之间的数学关系已经建立,如果已知到达时间差服从某种概率分布,那么理论上通过式(7) - (10)就可以得到定位角度的概率分布。

3 定位角度精度求解算法

先计算均值,假设每 s 采样 100 次,则在短时间内可以认为天线所测得的方位角与俯仰角变化不大,以 θ_1 为例,可以将其表示成为 $\theta_1^k = \theta_1^* + \Delta\theta_1^k$, $\Delta\theta_1^k \sim N(0, \sigma_{\theta_1}^2)$, σ_{θ_1} 为一远小于 1 的正数, $E\theta_1 = E\theta_1^* + E\Delta\theta_1^k = E\theta_1^*$, 根据假设可知 $\cos\Delta\theta_1^k \approx 1$, $\sin\Delta\theta_1^k \approx \Delta\theta_1^k$, 可得 $E(\cos\theta_1) = \cos\theta_1^*$ 。同理可得 $E(\sin\theta_1) = \sin\theta_1^*$, $E(\cos\theta_2) = \cos\theta_2^*$, $E(\sin\theta_2) = \sin\theta_2^*$, $E(\cos\phi_1) = \cos\phi_1^*$, $E(\sin\phi_1) = \sin\phi_1^*$, $E(\cos\phi_2) = \cos\phi_2^*$, $E(\sin\phi_2) = \sin\phi_2^*$ 。假设测量数据之间是相互独立的,对式(7) - (10)两边同时取数学期望则可得

$$\begin{cases} 2a\cos\theta_1^* \sin\phi_1^* = cE(\Delta t_{AB}) \\ \frac{b(\cos\phi_1^* - 2a\sin\phi_1^*)\cos\theta_1^* - h\sin\theta_1^*}{\cos\theta_1^* \cos\theta_2^* \cos(\phi_1^* - \phi_3^*) + \sin\theta_1^* \sin\theta_2^*} = cE(\Delta t_{BC}) \\ 2a\cos\theta_2^* \sin\phi_3^* = cE(\Delta t_{CD}) \\ -\frac{b(\cos\phi_3^* + 2a\sin\phi_3^*)\cos\theta_1^* - h\sin\theta_1^*}{\cos\theta_1^* \cos\theta_2^* \cos(\phi_1^* - \phi_3^*) + \sin\theta_1^* \sin\theta_2^*} = cE(\Delta t_{DA}) \end{cases} \quad (11)$$

这样通过方程组(11)并结合三角函数性质可以计算得到定位角度的均值。下面计算方差, $D[\theta_1] = D[\theta_1^*] + D[\Delta\theta_1^k] = D[\Delta\theta_1^k] = \sigma_{\theta_1}^2$, $D[\phi_1] = D[\phi_1^*] + D[\Delta\phi_1^k] = D[\Delta\phi_1^k] = \sigma_{\phi_1}^2$ 。对式(7)左端求方差并考虑到 σ_{θ_1} 、 σ_{ϕ_1} 为远小于 1 的正数,故可设 $\sigma_{\theta_1}\sigma_{\phi_1} \approx 0$, 则可得:

$$K_1\sigma_{\theta_1}^2 + K_2\sigma_{\phi_1}^2 = c^2 D(\Delta t_{AB}) \quad (12)$$

式中 $K_1 = -(2a\sin\theta_1^* \sin\phi_1^*)^2$, $K_2 = (2a\cos\theta_1^* \cos\phi_1^*)^2$ 。

采用同样的方法计算式(9)可得:

$$K_3\sigma_{\theta_1}^2 + K_4\sigma_{\phi_3}^2 = c^2 D(\Delta t_{CD}) \quad (13)$$

式中 $K_3 = -(2a\sin\theta_1^* \sin\phi_3^*)^2$, $K_4 = (2a\cos\theta_1^* \cos\phi_3^*)^2$ 。

同样不考虑高阶无穷小项化简式(8)分子和分母可得:

$$f(\Delta\theta_1^k, \Delta\phi_1^k, \Delta\theta_2^k, \Delta\phi_3^k) = \frac{A_1\Delta\theta_1^k + A_2\Delta\phi_1^k + A_3}{B_1\Delta\theta_1^k + B_2\Delta\theta_2^k + B_3\Delta\phi_1^k + B_4\Delta\phi_3^k + B_5} \quad (14)$$

式中: $A_1 = -b\cos\phi_1^* \sin\theta_1^* + 2a\sin\theta_1^* \sin\phi_1^* - h\cos\theta_1^*$; $A_2 = -b\sin\phi_1^* \cos\theta_1^* - 2a\cos\theta_1^* \cos\phi_1^*$; $A_3 = b\cos\phi_1^* \cos\theta_1^* - 2a\sin\phi_1^* \cos\theta_1^* - h\sin\theta_1^*$; $B_1 = \cos\theta_1^* \sin\theta_2^*$; $B_2 = \sin\theta_1^* \cos\theta_2^*$; $B_3 = -\sin(\phi_1^* - \phi_3^*)\cos\theta_1^* \cos\theta_2^*$; $B_4 = \sin(\phi_1^* - \phi_3^*)\cos\theta_1^* \cos\theta_2^*$; $B_5 = \sin\theta_1^* \sin\theta_2^*$ 。

将 $f(\Delta\theta_1^k, \Delta\phi_1^k, \Delta\theta_2^k, \Delta\phi_3^k)$ 在 $f(0, 0, 0, 0)$ 处用泰勒级数展开并略去高阶无穷小项求方差可得:

$$\left(\frac{A_1B_5 - B_1A_3}{B_5^2}\right)^2 \sigma_{\theta_1}^2 + \left(\frac{A_2B_5 - A_3B_3}{B_5^2}\right)^2 \sigma_{\phi_1}^2 - \left(\frac{A_3B_2}{B_5^2}\right)^2 \sigma_{\theta_2}^2 - \left(\frac{A_3B_4}{B_5^2}\right)^2 \sigma_{\phi_3}^2 = c^2 D(\Delta t_{BC}) \quad (15)$$

采用同样的方法计算式(10)可得:

$$\left(\frac{C_1B_5 - B_1C_3}{B_5^2}\right)^2 \sigma_{\theta_1}^2 - \left(\frac{C_3B_3}{B_5^2}\right)^2 \sigma_{\phi_1}^2 - \left(\frac{C_3B_2}{B_5^2}\right)^2 \sigma_{\theta_2}^2 - \left(\frac{C_2B_5 - C_3B_4}{B_5^2}\right)^2 \sigma_{\phi_3}^2 = c^2 D(\Delta t_{DA}) \quad (16)$$

式中: $C_1 = b\cos\phi_3^* \sin\theta_1^* + 2a\sin\theta_1^* \sin\phi_3^* + h\cos\theta_1^*$; $C_2 = b\sin\phi_3^* \cos\theta_1^* - 2a\cos\theta_1^* \cos\phi_3^*$; $C_3 = -b\cos\phi_3^* \cos\theta_1^* - 2a\sin\phi_3^* \cos\theta_1^* + h\sin\theta_1^*$ 。

联立式(12)、(13)、(15)、(16)所构成的方程组根据克莱姆法则,即可求得定位角度的方差值为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{Q} \quad (17)$$

$$\text{式中: } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \sigma_{\theta_1}^2 \\ \sigma_{\phi_1}^2 \\ \sigma_{\theta_2}^2 \\ \sigma_{\phi_3}^2 \end{bmatrix}; \mathbf{P} = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & 0 & 0 \\ K_1 & 0 & 0 & K_4 \\ \left(\frac{A_1 B_5 - B_1 A_3}{B_5^2}\right)^2 & \left(\frac{A_2 B_5 - A_3 B_3}{B_5^2}\right)^2 & -\left(\frac{A_3 B_2}{B_5^2}\right)^2 & -\left(\frac{A_3 B_4}{B_5^2}\right)^2 \\ \left(\frac{C_1 B_5 - B_1 C_3}{B_5^2}\right)^2 & -\left(\frac{C_3 B_3}{B_5^2}\right)^2 & -\left(\frac{C_3 B_2}{B_5^2}\right)^2 & -\left(\frac{C_2 B_5 - C_3 B_4}{B_5^2}\right)^2 \end{bmatrix}; \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} c^2 D(\Delta t_{AB}) \\ c^2 D(\Delta t_{BC}) \\ c^2 D(\Delta t_{CD}) \\ c^2 D(\Delta t_{DA}) \end{bmatrix}。$$

4 仿真与结果分析

设飞机翼展 $a = 10 \text{ m}$, 电磁波传播速度 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 到达时间差 Δt_{AB} 、 Δt_{BC} 、 Δt_{CD} 、 Δt_{DA} 的采样数据按照服从均值为 μ , 方差为 σ_t 的正态分布随机产生。仿真场景定义见表 1。

表 1 仿真场景

Tab. 1 The simulating scenarios

场景	载机 1/km	载机 2/km	μ/ns	σ_t
1	(0, 0, 0)	(0, -100, 0)	0.1	0.01
2	(0, 0, 0)	(0, -200, 0)	0.5	0.05
3	(0, 0, 0)	(0, 0, -100)	2	0.01
4	(0, 0, 0)	(0, 0, -200)	2	0.05

仿真得到的结果如表 2 所示,表中分别列出了定位角度偏差(即均值)和标准差的数值。

表 2 定位偏差与标准差

Tab. 2 Mean deviations and standard deviations of the locating angles

仿真 场景	定位角度偏差/(°)				定位角度标准差			
	$E\phi_1$	$E\phi_2$	$E\theta_1$	$E\theta_2$	$D\phi_1$	$D\phi_2$	$D\theta_1$	$D\theta_2$
1	0.26	0.18	0.24	0.195	0.014	0.042	0.054	0.064
2	0.43	0.32	0.961	0.923	0.07	0.053	0.079	0.075
3	2.16	2.76	2.24	2.89	0.052	0.068	0.101	0.126
4	1.87	1.40	1.63	2.18	0.041	0.051	0.081	0.092

从表 2 可以得出以下结论:

1) 定位角度的期望与方差随着到达时间差的均值和方差增大,因此采用 DOA 与 TDOA 结合的探测方式必须尽量校准接收机的时间起点,即保证时间测量的准确性,才能提高测角精度。

2) 当双机位于同一竖直平面内时,方位角的定位误差随双机前后间距的增大变化不大,而俯仰角的定位误差随双机前后间距增大;方位角与俯仰角的定位误差随双机高度差的增大而减小,但总体减小不大。这说明双机之间的前后间距及高度差对定位误差的影响较小。

5 结束语

基于 DOA 方式组成的双机无源定位系统在定位远距离目标时存在测角不高的缺点,如何通过双机占位对其测角精度进行提高是定位过程中必须解决的问题。本文主要分析了双机空中占位对方位角精度的影响。通过引入波程差,将 DOA 系统与 TDOA 系统联系起来,根据到达时间差的概率分布来求解方位角的概率分布,并给出了定位角精度的蒙特卡洛求解算法。仿真结果表明,文中方法能够准确计算出方位角方差,为双机无源定位远距离目标的测角精度报告提供了一种技术支持,同时也对双机编队在空中如何占位以提高目标定位精度提供了一种可行思路。

参考文献(References):

[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.

- SUN Zhongkang, GUO Fucheng, FENG Daowang, et al. Passive location and tracking technology by single observer[M]. Beijing: National defense industry press, 2008. (in Chinese)
- [2] Skolnik. Introduction to radar systems[M]. New York: McGraw - Hill, 2001.
- [3] 胡来招. 无源定位[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
HU Laizhao. Passive locating[M]. Beijing: National defense industry press, 2004. (in Chinese)
- [4] Cadzow. Methods of direction - of - arrival[C]//Proceedings of IEEE pacific rim conference on communications, computers, and signal processing. London: IEEE press, 1991: 709 - 717.
- [5] David L. Adamy. EW102: 电子战进阶[M]. 朱松, 王燕, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009.
David L. Adamy. EW102: A second course in electronic warfare[M]. ZHU Song, WANG Yan, translated. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2009. (in Chinese)
- [6] Richard A Poisel. 电子战目标定位方法[M]. 屈晓旭, 罗勇, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
Richard A Poisel. Electronic warfare target location methods[M]. QU Xiaoxu, LUO Yong, translated. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2008. (in Chinese)
- [7] 胡航, 李绍滨, 杨秀萍. 基于高效时频分析的多 LFM 信号源的 DOA 估计[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(3): 534 - 537.
HU Hang, LI Shaobin, YANG Xiuping. DOA estimation based on high efficient time - frequency analysis for mutiple LFM signal sources[J]. Systems engineering and electronic, 2009, 31(3): 534 - 537. (in Chinese)
- [8] Shin D - H, T - K Sung. Comparison of error characteristics between TOA and TDOA positioning[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic system, 2002, 38(1): 307 - 310.
- [9] 张刚兵, 刘渝, 胥嘉佳. 基于 UKF 的单站无源定位与跟踪双向预测滤波算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(7): 1415 - 1418.
ZHANG Gangbing, LIU Yu, XU Jiajia. Unscented kalman filter with forward - backward prediction for single observer passive location and tracking[J]. Systems engineering and electronic, 2010, 32(7): 1415 - 1418. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

Angle Precision Study of Dual - aircraft Coordination Locating Remote Target by Passive Locating Method

GAO Xiang¹, FANG Yang - wang¹, DONG Feng - zhen², YANG Peng - fei¹, CAO Zhong - hong³

(1. School of Aeronautics and Astronautic Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 95107, Guangzhou 510500, China; 3. Unit 94942, Shanghai, 200434)

Abstract: An algorithmic method of calculating angle precision of remote target by dual - aircraft coordination passive locating way is performed. Firstly, with some proper hypotheses, an analytic equation of dual - aircraft coordination locating remote target based on Direction of Arrival (DOA) is set up. Then the mathematic relationship between azimuth angle and Time Difference of Arrival (TDOA) based on wavepath difference is established. And then, by using the method of Taylor Series, an approximate algorithm of calculating the azimuth angle's probability distribution by calculating TDOA's probability distribution is presented. Finally, the affection of different dual - aircraft's position on angle precision is analyzed through simulation. The feasibility and the validity of the algorithmic method are demonstrated by the experiment.

Key words: passive locating; dual - aircraft coordination; angle precision; RMS error

本刊相关链接文献:

- [1] 孙亮, 于雷, 王凯, 等. 机载三维纯方位无源定位的可观测性[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 9(4): 1 - 5.
- [2] 余洪涛, 张永顺, 齐立峰. 对一种多基地雷达系统定位精度的计算与分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2005, 6(4): 8 - 11.
- [3] 朱永文, 王立辉, 娄寿春. 测向交会定位跟踪的保精度空间区域划分[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 7(3): 30 - 33.