

文章编号:1004-9037(2012)05-0620-05

基于几何解析的双雷达地面目标定位算法

宫记松¹ 赵振宇² 冯 星² 陈 谋¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016; 2. 中国航空工业集团公司光电控制技术重点实验室, 洛阳, 471009)

摘要: 传统的双雷达地面目标定位算法因测量数据本身固有的误差和量测噪声, 使得基于非线性估计定位算法的定位精度不高。本文研究了一种新的双雷达地面目标定位算法, 该算法将已知雷达探测数据以几何方式加以表示, 通过几何解析对地面目标进行定位。此外, 还详细分析了各种因素在不同情况下对定位精度的影响。所研究的算法具有计算量小、远距离定位精度高等优点。最后, 通过仿真验证了该算法能够提高远距离定位的定位精度。

关键词: 双雷达系统; 几何解析方法; 地面目标; 定位算法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

Location Algorithm for Ground Target Using Twin-Radar System Based on Geometry Analytic Method

Gong Jisong¹, Zhao Zhenyu², Feng Xing², Chen Mou¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Key Laboratory of Optical-Electrics Control Technology, Aviation Industry

Corporation of China, Luoyang, 471009, China)

Abstract: As the location algorithm based on nonlinear estimation, classical location algorithms for ground target using twin-radar system have low accuracies due to the error of measurement data. Therefore, a new location algorithm is developed, which transforms measurement data into geometric figures and locates targets using geometry analytic method. All factors that can affect location accuracy in different cases are analyzed. The proposed algorithm has the advantages of small calculation, high long-distance location accuracy and so on. Finally, simulation results illustrate that the algorithm perform well in location accuracy improvement.

Key words: twin-radar system; geometry analytic method; ground target; location algorithm

引 言

传统的双雷达地面目标定位算法是在测量噪声服从高斯分布的前提下, 利用最大似然法进一步将雷达目标定位问题转化为一个非线性最小二乘问题^[1]。常用的算法有: 高斯-牛顿法^[2]、拟牛顿法^[3]和 Levenberg-Marquardt 法^[4]等。文献[2-4]分别对高斯-牛顿法、拟牛顿法和 Levenberg-Marquardt 法进行了研究, 通过以上研究可知, 虽然这些算法在一定程度上都能提高定位精度, 但因测量数据误差的存在, 很大程度上影响了定位精度的优化程度, 特别是远距离目标定位时, 定位精度更低。

为了进一步提高远距离目标定位精度, 本文研究了一种新的双雷达地面目标定位算法, 该算法从几何角度对双雷达系统地面目标探测数据加以分析, 以几何图形的形式探究地面目标的定位算法, 并对该算法下的目标定位精度进行了分析、计算。所研究算法简单明了、计算量小, 充分利用了双雷达系统地面目标探测数据中的高精度量, 有效地提高了远距离地面目标定位精度。

1 问题建模

二维双雷达地面目标定位系统的坐标分布及表示法如图 1 所示^[5], 图中主坐标系为地面坐标

基金项目: 国家自然科学基金(61174102)资助项目; 江苏省自然科学基金(BK2011069)资助项目; 航空科学基金(20105152)资助项目; 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研(NP2011049)资助项目。

收稿日期: 2011-08-29; 修订日期: 2011-11-15

系,其中 M_1, M_2 均为机载雷达平台在地面上的投影。另外还有平台坐标系,平台坐标系是针对飞行平台而言的,首先假设飞行平台正处于平飞状态, y 轴指向机首所指正前方, x 轴垂直于 y 轴指向飞行平台水平方向正右侧。

平台 M_1, M_2 上的雷达同时发射信号并跟踪目标方向,同时测量平台到目标的距离、目标相对于平台的方位角、平台的偏航角和平台自身的坐标。已知平台 M_1 的坐标为 (x_1, y_1, h_1) , R_1 为平台 M_1 到目标间的距离测量值, ϕ_1 为目标相对于平台 M_1 的方位角测量值, ψ_1 为平台 M_1 的偏航角。平台 M_2 的坐标为 (x_2, y_2, h_2) , 与平台 M_1 相对应的变量分别为 R_2, ϕ_2, ψ_2 。与 R_1, R_2, ϕ_1, ϕ_2 相对应的实际量的测量误差均为均值为零的高斯白噪声^[6], 平台自身定位误差及 ϕ_1, ϕ_2 测量误差较小, 忽略不计。

为了便于表示, 引入待求地面目标 T 的坐标, 设为 (x, y) , 平台 M_1, M_2 到目标间的实际距离在地面上的投影距离分别为 r_1, r_2 , 目标相对于平台 M_1, M_2 的实际方位角分别为 ϕ'_1, ϕ'_2 。这些量在实际应用中都是未知的。

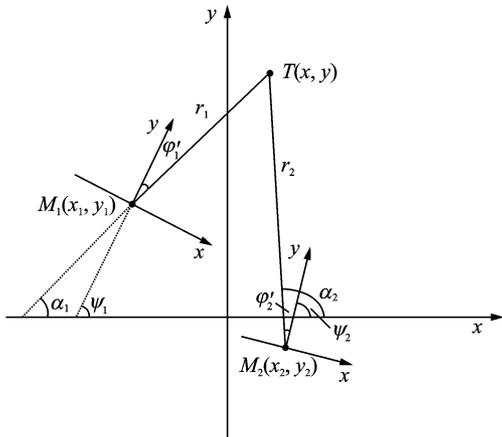


图1 二维双雷达地面目标定位系统的坐标分布

2 二维双雷达地面目标定位算法

2.1 目标可能存在区域的几何表示

假设平台 M_1 上的雷达对目标 T 的距离探测精度为 s_1 , 方位角探测精度为 θ_1 , 则目标 T 的单雷达可能存在区域可由图2中阴影区域所示(图2中的坐标系为平台坐标系, T_1 为 M_1 对 T 的定位坐标, M_1T_1 为距离观测量 R_1 在地面上的投影), 其中 d_1 为可能存在区域的宽度

$$d_1 = \sqrt{(R_1 + s_1)^2 - h_1^2} - \sqrt{(R_1 - s_1)^2 - h_1^2} \quad (1)$$

同理, 假设 M_2 对目标 T 的距离探测精度为 s_2 , 方位角探测精度为 θ_2 , 同样目标 T 的单雷达可能存

在区域用相同的几何方式表示, T_2 为平台 M_2 对 T 的定位坐标, M_2T_2 为距离观测量 R_2 在地面上的投影, d_2 可表示为

$$d_2 = \sqrt{(R_2 + s_2)^2 - h_2^2} - \sqrt{(R_2 - s_2)^2 - h_2^2} \quad (2)$$

结果如图3所示^[7], 图中阴影区域即为目标 T 的双雷达可能存在区域, 其中 β 为两平台与其对应目标定位点连线的夹角。 β 的计算公式为

$$\beta = \left| \psi_2 - \phi_2 - \psi_1 + \phi_1 \right| \quad (3)$$

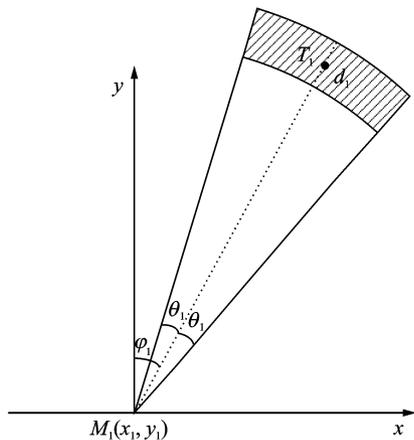


图2 目标 T 的单雷达可能存在区域几何表示

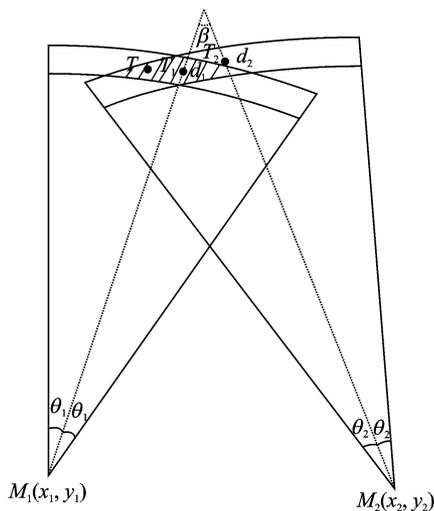


图3 目标 T 的双雷达可能存在区域几何表示

2.2 双雷达联合定位算法及定位精度

当远距离定位时, 图3中阴影部分可近似为一平行四边形, 如图4所示。结合第2.1节可知, AB 与 CD 间的距离 AM 即为 M_1 所对应可能存在区域的宽度, 大小为 d_1 ; AC 与 BD 间的距离 BN 即为 M_2 所对应可能存在区域的宽度, 大小为 d_2 ; $\angle ACM = \angle \beta$ 。假设目标 T 落入两可能存在区域的相交区域, 可取此平行四边形中心点 O 点, 作为联合定位

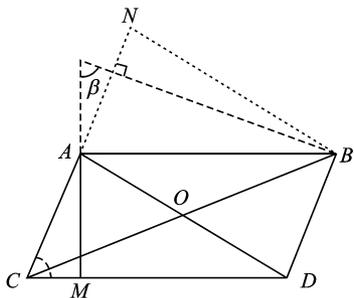


图 4 联合定位结果与定位精度的几何表示示意图

结果,具体求解算法如下

$$\begin{cases} d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \\ k_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, k_2 = -\frac{1}{k_1} \\ x_0 = x_1 + \frac{(x_2 - x_1)(R_1^2 - h_1^2 - R_2^2 + h_2^2 + d^2)}{2d^2} \\ y_0 = y_1 + k_1(x_0 - x_1) \\ r = R_1^2 - h_1^2 - (x_0 - x_1)^2 - (y_0 - y_1)^2 \\ x_3 = x_0 - \sqrt{\frac{r}{(1 - k_2^2)^2}}, y_3 = y_0 + k_2(x_3 - x_0) \\ x_4 = x_0 + \sqrt{\frac{r}{(1 - k_2^2)^2}}, y_4 = y_0 + k_2(x_4 - x_0) \end{cases} \quad (4)$$

这样就得到了两组定位坐标 (x_3, y_3) , (x_4, y_4) , 取两组定位坐标到任一机载雷达平台定位结果距离小者为最后的联合定位结果。其中有 3 种特殊的情况:

(1) 当 $x_1 = x_2, y_1 \neq y_2$ 时, 式(4)可简化为

$$\begin{cases} r = R_1^2 - h_1^2 - \left[\frac{R_1^2 - h_1^2 - R_2^2 + h_2^2 + (y_2 - y_1)^2}{2(y_2 - y_1)} \right]^2 \\ x_3 = x_1 - \sqrt{r} \\ y_3 = y_1 + \frac{R_1^2 - h_1^2 - R_2^2 + h_2^2 + (y_2 - y_1)^2}{2(y_2 - y_1)} \\ x_4 = x_1 + \sqrt{r} \\ y_4 = y_1 + \frac{R_1^2 - h_1^2 - R_2^2 + h_2^2 + (y_2 - y_1)^2}{2(y_2 - y_1)} \end{cases} \quad (5)$$

(2) 当 $x_1 \neq x_2, y_1 = y_2$ 时, 式(4)可简化为

$$\begin{cases} r = R_1^2 - h_1^2 - \left[\frac{R_1^2 - h_1^2 - R_2^2 + h_2^2 + (x_2 - x_1)^2}{2(x_2 - x_1)} \right]^2 \\ x_3 = x_1 + \frac{R_1^2 - h_1^2 - R_2^2 + h_2^2 + (x_2 - x_1)^2}{2(x_2 - x_1)} \\ y_3 = y_1 - \sqrt{r} \\ x_4 = x_1 + \frac{R_1^2 - h_1^2 - R_2^2 + h_2^2 + (x_2 - x_1)^2}{2(x_2 - x_1)} \\ y_4 = y_1 + \sqrt{r} \end{cases} \quad (6)$$

(3) 当 $x_1 = x_2, y_1 = y_2$ 时, 这种情况不会对算法产生影响, 下文会给出分析。

关于算法的定位精度, 由图 4 可知, 若以 O 点为定位结果, 则 $\max(OA, OC)$ 即为此时的定位精度, 表达式为

$$L = \frac{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 2d_1d_2\cos\beta}}{2\sin\beta} \quad (7)$$

由式(7)可知, 当 $\beta \rightarrow 0$ 或 $\beta \rightarrow \pi$ 时, $L \rightarrow \infty$, 显然此时定位算法的定位结果误差过大, 因此必须添加一限制条件以确保获得较高的定位精度。以单雷达定位精度中的较高者为限制条件, 令

$$L = l \quad (8)$$

式中 l 为单雷达定位精度中的较高者, 当定位距离较远时, 图 2 中阴影部分可看成矩形, 因此可得 l 的表达式为

$$l = \min \left[\sqrt{(\theta_1 R_1)^2 + \left(\frac{d_1}{2}\right)^2}, \sqrt{(\theta_2 R_2)^2 + \left(\frac{d_2}{2}\right)^2} \right] \quad (9)$$

从而得角度 β 的分界线为 $\beta = \gamma$ 或 $\pi - \gamma$

$$\gamma = \arccos \frac{-d_1d_2 + \sqrt{d_1^2d_2^2 - l^2(d_1^2 + d_2^2 - l^2)}}{l^2} \quad (10)$$

显然当 $0 \leq \beta \leq \gamma$ 或 $\pi - \gamma \leq \beta \leq \pi$ 时, 算法的定位精度低于单雷达的定位精度, 因此, 这种情况下取定位精度较高的单雷达定位坐标作为联合定位结果, 这样也避免了情况(3)的出现。综上所述, 算法流程图如图 5 所示, 定位精度可总结为^[8]

$$L = \begin{cases} l & 0 \leq \beta \leq \gamma \text{ 或 } \pi - \gamma \leq \beta \leq \pi \\ \frac{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 2d_1d_2\cos\beta}}{2\sin\beta} & \gamma < \beta < \pi - \gamma \end{cases} \quad (11)$$

结合式(1~3)和式(11)可知, 联合定位精度随距离测量误差的增大而增大; 而方位角测量误差对定位精度的影响微乎其微, 完全可以忽略不计; β 为直角时, 定位精度最高, 继而随着 β 的增大和减小, 定位精度降低。在仿真过程中将会加以验证。整个算法的流程如图 5 所示。

3 仿真结果分析

仿真时的基本设定为 $s_1 = s_2 = 100$ m, $\theta_1 = \theta_2 = 0.008$ rad, $r_1 = r_2 = 60$ km, $\angle\beta = 45^\circ$, $\varphi_1' = \varphi_2' = 0$ 。

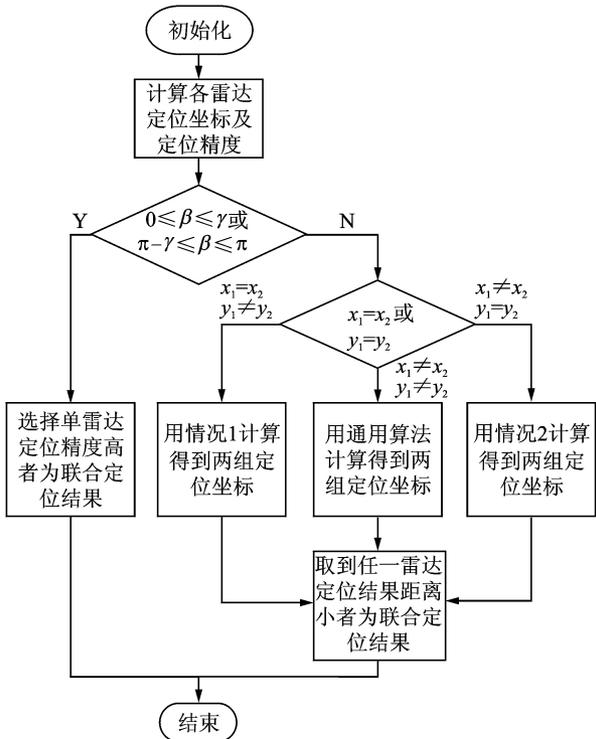


图5 算法流程图

$\psi_1 = \pi, \psi_2 = \frac{5}{4}\pi, h_1 = h_2 = 2\ 000\ \text{m}$ ^[9], 相关数据可参考文献[9]。图6~9为几何解析算法定量分析仿真图,通过理论分析可知,该算法定位精度可能与距离测量误差、方位角测量误差、定位距离(即平台到目标的距离投影长度 r_1, r_2)和角度 β 有关系。图6为 s_1, s_2 在0~180 m范围内变化时的定位误差曲线,可以看出,随着距离测量误差的增大,定位误差在变大;图7为 θ_1, θ_2 在0~0.018 rad范围内变化时的定位误差曲线,由图可知,随着方位角测量误差的增大,定位误差基本没有变化;图8为 r_1, r_2 在10~100 km范围内变化时的定位误差曲线,随着定位距离的增大,距离较近时,对定位误差影响较大;随着定位距离的变大定位误差减小,距离较远时,对定位误差影响较小,这时随着定位距离的变大定位误差基本保持不变;图9为 β 在0~180°范围内变化时的定位误差曲线,可以看出,当 $\beta = 90^\circ$ 时定位误差最小,继而随着 β 的增大或减小,定位误差变大^[10]。

图10为 r_1, r_2 在10~100 km范围内变化时,单雷达定位、双雷达高斯-牛顿法^[2]、双雷达几何解析法3种定位方法的定位误差曲线,由仿真结果可知,在距离较远时,几何解析法能在很大程度上提高定位精度,距离越远效果越明显。但该算法也存在缺陷,即近距离定位时,定位精度明显偏低,因

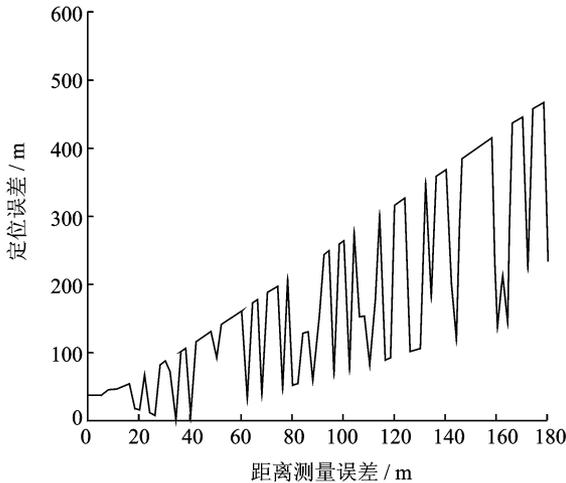


图6 算法定位误差与距离测量误差关系曲线

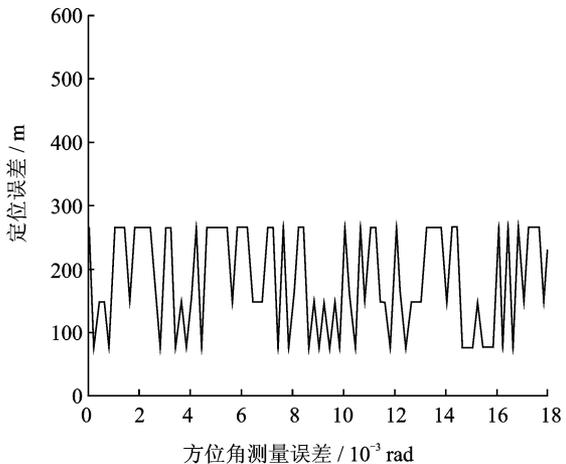


图7 算法定位误差与方位角测量误差关系曲线

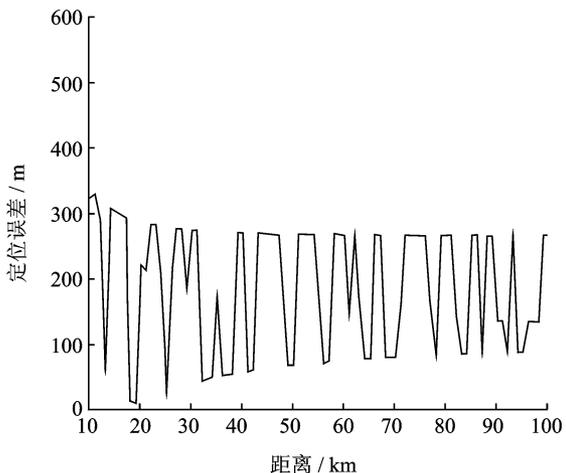


图8 几何解析算法定位误差与定位距离关系曲线

此,为了弥补算法所存在的不足,可以在近距离定位时采用高斯-牛顿法进行定位,远距离定位是采用几何解析法进行定位,这样,就可以在全距离范围内得到较高的定位精度。

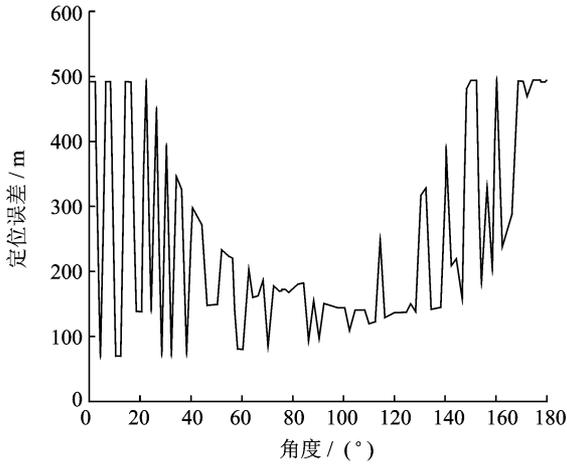


图 9 几何解析算法定位误差与角度 β 关系曲线

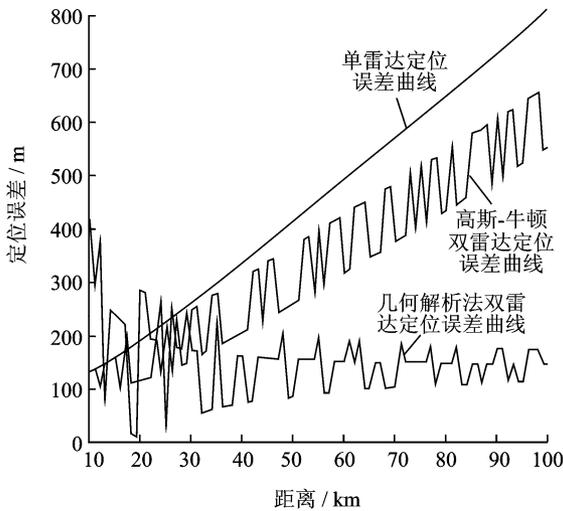


图 10 3 种定位方法定位误差对比曲线

4 结束语

在远距离定位时,几何解析法定位精度主要和距离测量精度、双平台与目标间的夹角有关,本文所提算法能够在很大程度上提高定位精度,距离越远效果越明显。近距离定位时,几何解析法定位效果不佳,与其他算法相比并无明显优势,甚至比其他定位算法的定位精度还要低。因此,在这种情况下,需要和其他定位算法相配合,才能达到提高定位精度的目的。

参考文献:

- [1] 杨建华. 雷达无源定位技术的发展与战术应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(6): 601-605.
Yang Jianhua. The latest development of radar passive localization technology and applications [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2009, 4(6): 601-605.
- [2] 彭芳, 左继章, 吴军. 基于高斯-牛顿法改进的复合双基地雷达目标空间定位算法[J]. 系统工程与电子技术

术, 2009, 21(3): 557-559.

Peng Fang, Zuo Jizhang, Wu Jun. Algorithm of target location for complex bistatic radar system based on Gauss-Newton method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 21(3): 557-559.

- [3] 闰永义, 刘三阳, 岳菊梅. 基于 MQNM 的双基地雷达目标定位改进算法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(3): 455-458.
Yan Yongyi, Liu Sanyang, Yue Jumei. Improved algorithm for locating targets in bistatic radar system based on MQNM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(3): 455-458.
- [4] Chen L H, Deng N Y, Zhang J Z. A modified quasi-Newton method for structured optimization with partial information on the hessian[J]. Computational Optimization and Application, 2006, 35(1): 5-18.
- [5] 刘贵宾, 胡国平. 基于坐标转换实现双基地雷达目标参数的定位[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 257-264.
Liu Guibin, Hu Guoping. The two-dimensional orientating bistatic radar on the method of coordinate alternating [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(1): 257-264.
- [6] 宋杰, 何友, 蔡复青, 等. 非合作双基地雷达参数测量与定位方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(7): 1206-1209.
Song Jie, He You, Cai Fuqing, et al. Study of parameter measurement and location method in non-cooperative bistatic radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(7): 1206-1209.
- [7] 王智显, 徐汉林, 敖庆. 超远距离目标的交叉定位算法研究[J]. 现代雷达, 2008, 30(12): 39-43.
Wang Zhixian, Xu Hanlin, Ao Qing. Study on algorithm of cross location for over-long range target [J]. Modern Radar, 2008, 30(12): 39-43.
- [8] He Y, Xiu J J, Wang G H, et al. Theorem for the combination of bistatic radar measurements using least square[J]. IEEE Trans on AES, 2003, 39(4): 1441-1445.
- [9] 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: 231-256.
Sun Zhongkang, Zhou Yiyu, He Lixing. Single/multiple bases active/passive positioning technology [M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 1996: 231-256.
- [10] Don J T. Statistical theory of passive location systems[J]. IEEE Trans on AES, 1984, 20(2): 183-198.

作者简介: 宫记松(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 地面运动目标检测、定位与跟踪, E-mail: xjqxgjs100@sina.com; 赵振宇(1970-), 男, 研究员, 研究方向: 火力控制技术; 冯星(1971-), 男, 高级工程师, 研究方向: 火力控制技术; 陈谋(1975-), 男, 教授, 研究方向: 非线性系统控制、火力控制技术。