

# 基于角度信息的递推最小二乘无源定位算法

莫成坤, 陈树新, 吴昊, 张艺航

(空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077)

**摘要:** 针对机载单站无源定位的定位精度和实时性等问题, 提出了一种基于角度信息的递推最小二乘(RLS)无源定位算法; 首先建立了机载单站三维无源定位模型, 求出最小二乘(LS)解; 然后依据机载单站无源定位的实时性要求将最小二乘估计转化为递推最小二乘估计的形式; 最后通过不同的仿真实验研究了影响定位精度和收敛速度的因素; 仿真结果表明: RLS算法与LS算法在定位精度和收敛速度方面性能相似, 但RLS算法运算复杂度低, 所需存储空间小, 能够实时的对目标进行定位, 满足机载单站无源定位的需求。

**关键词:** 机载无源定位; 三维定位; 递推最小二乘算法; 实时性

## Recursion Least-squares Passive Location Algorithm Based on Angle Information

Mo Chengkun, Chen Shuxin, Wu Hao, Zhang Yihang

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** To improve location accuracy and real-time for single observer airborne passive location, a recursion least-squares (RLS) passive location algorithm based on angle information is proposed. Firstly, this paper builds single observer airborne three dimensional passive location model, and obtains least-squares (LS) solution. And then a recursion form is deduced according to real-time requirement of single observer airborne passive location. At last, by simulation experiment to study the different factors, which affect the location accuracy and convergence rate. The simulation results show that: location accuracy and convergence rate between two algorithms are closed, but the RLS algorithm has low operation complexity, small memory space needs, positions target real time, which can achieve the requirement of single observer airborne passive location.

**Keywords:** airborne passive location; three dimensional location; recursion least-square algorithm; real-time

## 0 引言

在现代化高科技战争中, 先敌发现、先敌攻击是打赢战争的先决条件。有源定位系统受环境影响小, 可以全天候地进行监测定位, 在战场目标定位方面有独特的优势。然而随着当今反辐射技术、电子对抗技术和隐身技术的飞速发展, 传统的有源定位技术正面临着反辐射导弹攻击、电子干扰、隐身和低空突防等多方面的挑战。采用被动方式工作的无源定位系统正是在这种背景下发展起来的, 它不主动对目标发射电磁波信号, 因此很难被敌干扰, 受反辐射导弹的攻击概率低, 具有很高的隐蔽性。此外, 无源定位还因探测距离远、灵活性好等优点在近年来成为各界关注的热点<sup>[1-3]</sup>。

目前无源定位技术采用的定位方法主要有: 测向定位法, 波达时间差定位法, 多普勒效应法以及多种方法联合的联合定位法<sup>[4-6]</sup>。其中测向定位法是指仅利用角度信息来确定辐射源位置的无源定位技术, 是研究最多、最经典的单站无源定位技术。不论何种定位方法, 角度信息都是最基本的观测量, 而且在一些测量环境恶劣的场景中传感器往往只能得到角度信息, 因此研究测向定位法有着及其重要的理论意义和实用价值。

本文在建立了机载单站无源定位模型的基础上, 得出了目标位置的最小二乘解。而最小二乘估计算法<sup>[7]</sup>需要存储大量的数据, 并进行复杂的运算, 很难满足无源定位实时性的要求。因此, 在最小二乘算法的基础上推导了递推最小二乘算法。而

后通过仿真研究了影响算法定位精度和收敛速度的因素, 并且和最小二乘算法进行了定位性能上的比较。最后根据仿真结果给出了提高定位精度和收敛速度的方法。

## 1 定位模型

目前大多数的研究都是把三维定位简化为二维的形式, 往往忽略了俯仰角对定位精度的影响。因此, 在二维机载单站无源定位的基础上建立了三维定位模型<sup>[8]</sup>。图1为基于角度信息的机载单站三维无源定位示意图。假设所定位的辐射源目标位于空间中且保持静止, 所需要定位的目标是某系统中的辐射源 $T(x_i, y_i, z_i)$ 。根据单站定位的可观测性条件知, 至少需要单站做匀速直线运动, 且运动方向不指向辐射源目标<sup>[9]</sup>。因此假设飞机从某点出发, 沿直线运动并测向, 且通过导航系统能够实时的确定自身坐标。点 $(x_i, y_i, z_i)$ 是第 $i$ 个测向点的坐标, 测向点到目标 $T$ 的真实方位角和俯仰角分别为 $\theta_i^*$ 和 $\varphi_i^*$ , 并且在该测向点估计出目标的方位角和俯仰角分别为 $\theta_i$ 和 $\varphi_i$ , 根据几何关系可以得到如下非线性方程组:

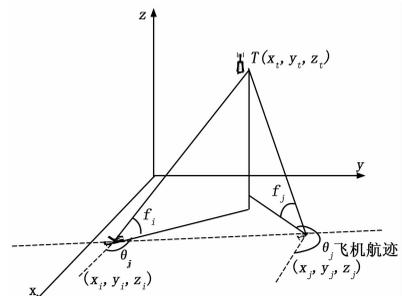


图1 基于角度信息的机载单站无源定位示意图

收稿日期: 2014-05-11; 修回日期: 2014-06-12。

基金项目: 国家自然科学基金(61071014)。

作者简介: 莫成坤(1990-), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事机载无源定位的研究。

$$\begin{cases} \theta_i^* = \arctan \frac{y_i - y_i}{x_i - x_i}, \\ i = 1, 2, \dots, N, \\ \varphi_i^* = \arctan \frac{z_i - z_i}{\sqrt{(y_i - y_i)^2 + (x_i - x_i)^2}}, \end{cases} \quad (1)$$

根据三角变换将非线性方程组 (1) 转化为如下线性方程组:

$$\begin{cases} \sin\theta_i^* x_i - \cos\theta_i^* y_i = \sin\theta_i^* x_i - \cos\theta_i^* y_i, \\ \cos\theta_i^* \sin\varphi_i^* x_i + \sin\theta_i^* \sin\varphi_i^* y_i - \cos\varphi_i^* z_i = \\ \cos\theta_i^* \sin\varphi_i^* x_i + \sin\theta_i^* \sin\varphi_i^* y_i - \cos\varphi_i^* z_i, \\ i = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (2)$$

将线性方程组写成矩阵的形式如下:

$$\mathbf{H}^* \mathbf{X}^* = \mathbf{Y}^* \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{H}^* = \begin{bmatrix} \sin\theta_1^* & -\cos\theta_1^* & 0 \\ \cos\theta_1^* \sin\varphi_1^* & \sin\theta_1^* \sin\varphi_1^* & -\cos\varphi_1^* \\ \sin\theta_2^* & -\cos\theta_2^* & 0 \\ \cos\theta_2^* \sin\varphi_2^* & \sin\theta_2^* \sin\varphi_2^* & -\cos\varphi_2^* \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin\theta_N^* & -\cos\theta_N^* & 0 \\ \cos\theta_N^* \sin\varphi_N^* & \sin\theta_N^* \sin\varphi_N^* & -\cos\varphi_N^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1^* \\ h_2^* \\ \dots \\ h_N^* \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Y}^* = \begin{bmatrix} \sin\theta_1^* x_1 - \cos\theta_1^* y_1 \\ \cos\theta_1^* \sin\varphi_1^* x_1 + \sin\theta_1^* \sin\varphi_1^* y_1 - \cos\varphi_1^* z_1 \\ \sin\theta_2^* x_2 - \cos\theta_2^* y_2 \\ \cos\theta_2^* \sin\varphi_2^* x_2 + \sin\theta_2^* \sin\varphi_2^* y_2 - \cos\varphi_2^* z_2 \\ \vdots \\ \sin\theta_N^* x_N - \cos\theta_N^* y_N \\ \cos\theta_N^* \sin\varphi_N^* x_N + \sin\theta_N^* \sin\varphi_N^* y_N - \cos\varphi_N^* z_N \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X}^* = [x_i, y_i, z_i]^T.$$

在实际角度的估计值与真实值之间因测量噪声的存在误差是不可避免的。因此无法得到真实的矩阵  $\mathbf{H}^*$  和  $\mathbf{Y}^*$ , 只能得到受噪声干扰的矩阵  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{Y}$  (即用估计值  $\theta_i$  和  $\varphi_i$  代替矩阵  $\mathbf{H}^*$  和  $\mathbf{Y}^*$  中的  $\theta_i^*$  和  $\varphi_i^*$ )。若仅考虑  $\mathbf{Y}$  的噪声干扰, 可以求出最小二乘解如下所示:

$$\mathbf{X}_{LS} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Y} \quad (4)$$

## 2 递推最小二乘定位算法

在电子战的应用背景下, 机载单站无源定位系统需要实时的提供自身的位置信息以及测量角度的信息, 这对于定位系统的实时性和载体的存储空间要求较高。而 (4) 式最小二乘估计并不是实时的对数据进行处理, 它采用成批处理数据的方式, 这就导致了算法的实时性差、所需存储空间大和计算复杂等缺点。为此需要改进最小二乘算法、提高算法各方面的性能以满足机载单站无源定位系统的要求。

很多算法都是采用递推的形式来达到实时性的目的。所谓递推就是按照时间的先后顺序来逐渐改变数据值, 每获得一次

新的观测数据就可以实时的对估计值进行修正。随着时间的推移, 观测的数据越多, 最终获得的估计结果也就越接近真实值, 并且可以保持良好的定位状态。因此, 递推算算法只需要获得观测数据就可以不断的更正位置估计值。这样不但可以降低运算复杂度和存储空间, 而且能够实现在线实时估计以提高算法的实时性。以下是推导机载单站最小二乘定位算法递推形式的过程。

记  $\hat{\mathbf{X}}_k$  为用前  $k$  个观测数据进行最小二乘算法得到的估计值。故有:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = (\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{Y}_k \quad (5)$$

令

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k)^{-1}, \text{ 则有 } \mathbf{P}_k = ([\mathbf{H}_{k-1}^T \mathbf{h}_k^T][\mathbf{H}_{k-1}^T \mathbf{h}_k^T])^{-1},$$

解得:

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{P}_{k-1} + \mathbf{h}_k^T \mathbf{h}_k]^{-1} \quad (6)$$

利用矩阵反演公式化简得:

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{I}_1 - \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{h}_k^T (\mathbf{I}_2 + \mathbf{h}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{h}_k^T)^{-1} \mathbf{h}_k] \mathbf{P}_{k-1} \quad (7)$$

其中  $\mathbf{I}_1$  为 3 阶单位矩阵,  $\mathbf{I}_2$  为 2 阶单位矩阵。则由 (5) 式知:

$$\hat{\mathbf{X}}(k) = \mathbf{P}_k [\mathbf{H}_{k-1}^T \mathbf{h}_k^T][\mathbf{Y}_{k-1}^T \mathbf{y}_k^T]^T \quad (8)$$

利用 (6) 式将 (8) 式化简为:

$$\hat{\mathbf{X}}(k) = \hat{\mathbf{X}}(k-1) + \mathbf{P}_k \mathbf{h}_k^T [\mathbf{y}_k - \mathbf{h}_k \hat{\mathbf{X}}(k-1)] \quad (9)$$

式 (9) 即为最小二乘定位算法的递推形式。想要对目标的位置进行估计还需得到估计初值。一般来说主要有两种方法来获得估计初值: 一是可以直接给定估计初值, 令  $\mathbf{P}$  矩阵足够大, 再利用式 (7) 和式 (9) 通过递推来实时估计目标的位置; 二是用最小二乘估计处理少量测量值得到估计初值, 再利用之后的测量值进行递推最小二乘估计来对目标进行定位。

## 3 仿真分析

为了体现递推最小二乘算法的定位精度和收敛速度, 利用该算法对目标进行定位, 研究影响算法性能的因素, 并与批处理最小二乘算法进行定位性能上的比较。具体仿真参数设置如下: 假定某系统的辐射源目标位置  $T$  (70 km, 100 km, 50 km)。为方便研究, 令飞机从坐标原点出发, 沿  $x$  正半轴以 720 m/s 做匀速直线运动并对目标进行测向定位, 探测周期为 1 s。给定 RLS 算法初始  $\mathbf{P}$  矩阵为  $\mathbf{P}_{RLS}(0) = 10^5 \mathbf{I}$ 。假定测量噪声的主体分布服从均值为 0, 方差为  $\sigma^2$  的正态分布, 仿真时间为 300 s。定义相对距离误差:

$$\delta_i = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^L [(\hat{x}_i^{(j)} - x_i)^2 + (\hat{y}_i^{(j)} - y_i)^2 + (\hat{z}_i^{(j)} - z_i)^2]}}{d} \quad (10)$$

式中,  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$  为目标估计位置,  $d = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$  为目标  $T$  到飞机航迹的距离,  $M$  为 Monte-Carlo 仿真次数, 这里令  $M = 100$ 。相对距离误差反映了定位精度的高低, 这里假定  $\delta \leq 5\%$  时达到定位需求, 算法收敛的速度反应定位的快慢。

### 3.1 仿真实验

仿真实验 1: 在不同噪声下 RLS 算法性能比较。假定 RLS 算法递推估计初值为  $[0, 0, 0]$ , 飞机速度为 720 m/s, 在不同的测量噪声方差下 ( $\sigma^2$  分别为  $0.1^\circ$ ,  $0.5^\circ$ ,  $1^\circ$ ) 算法性能如图 2 所示。

仿真实验 2: 在不同估计初值下 RLS 算法性能比较。假定测量噪声方差  $\sigma^2 = 0.1^\circ$ , 飞机速度为 720 m/s, 估计初值  $T_0$ 。

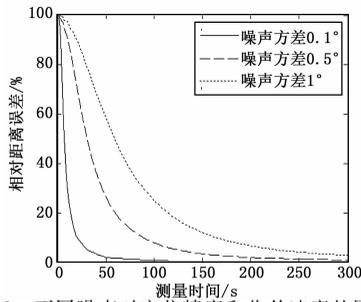


图 2 不同噪声对定位精度和收敛速度的影响

分别为  $[50 \text{ km}, 80 \text{ km}, 40 \text{ km}]$ ,  $[0, 0, 0]$ ,  $[-20 \text{ km}, -50 \text{ km}, -30 \text{ km}]$ , 算法性能比较如图 3 所示。

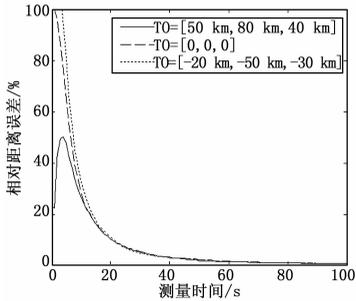


图 3 不同估计初值对 RLS 算法的影响

仿真实验 3: 在不同飞机速度下 RLS 算法性能比较。假定测量噪声方差  $\sigma^2 = 0.1^\circ$ , 估计初值  $T_0$  为  $[0, 0, 0]$ , 在不同的飞机速度 (分别为 720 m/s, 540 m/s, 360 m/s) 下算法性能比较如图 4 所示。

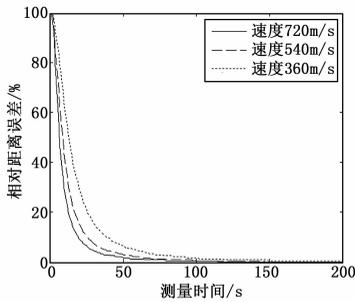


图 4 不同飞机速度对 RLS 算法的影响

仿真实验 4: 相同条件下 RLS 算法和批处理 LS 算法性能比较。假定测量噪声方差  $\sigma^2 = 0.1^\circ$ , 递推估计初值  $T_0(0, 0, 0)$ , 飞机速度为 720 m/s, RLS 算法和批处理 LS 算法性能比较如图 5 所示。

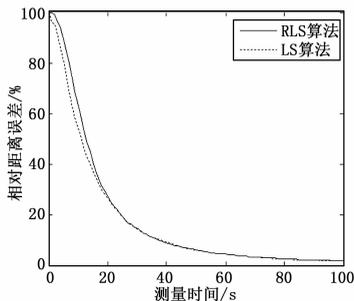


图 5 RLS 算法和 LS 算法性能比较

### 3.2 结果分析

1) 仿真 1 研究了测量噪声方差的大小对 RLS 算法定位精度和收敛速度的影响。从图 2 可以看出, 随着测量噪声方差的减小, 测量的准确度增高, RLS 算法的收敛速度越快, 最终所获得的定位精度也就越高。同时还可以看出, 当飞机速度、噪声方差和估计初值一定时, 定位精度随着测量时间和测量点数的增加而提高。但当相对距离误差达到收敛时, 继续测量并不能显著提高定位精度。

2) 仿真 2 研究了递推初值对 RLS 算法定位精度和收敛速度的影响。从图 3 可以看出, 短时间内, 在其它条件相同的情况下, 递推估计初值越接近真实值, 算法收敛越快。但随着测量时间的增加, 即使初值接近真实值, 算法的定位精度并未明显改变。当 RLS 算法收敛后, 不同初值对算法定位精度的影响相差较小。因此, 即使递推估计初值远离目标真实位置, 经过一定的时间后也能达到精度要求。在实际的应用中, 若可以通过一定的方法获得较为准确的递推估计初值, 则能准确快速的对目标进行定位。或者先对少量数据进行成批最小二乘估计作为递推估计初值, 再利用递推最小二乘算法进行精确定位。以上两种方法都能够提高算法的收敛速度。

3) 仿真 3 研究了飞机速度的大小对 RLS 算法定位精度和收敛速度的影响。从图 4 可以看出, 在其它条件相同的情况下, 随着飞机速度的增加, RLS 算法的收敛速度加快。但在不同的速度下算法都达到收敛后, 定位精度并没有明显的差别。RLS 定位算法在不同的飞机速度下都可以达到定位精度的要求。现实中, 飞机的速度毕竟是有限的, 而且在高速飞行下测量的准确度也会受影响。因此, 在满足机载单站无源定位需求的前提下选择适当的飞行速度进行测向定位即可。

4) 仿真 4 比较了递推最小二乘算法和成批最小二乘算法的性能。从图 5 可以看出, 在相同的仿真条件下, 批处理 LS 算法的定位性能略优于 RLS 算法。前者的收敛速度略快, 但差别不大。收敛后两种算法的定位精度几乎没有区别。在实际应用中, 批处理 LS 算法需要存储大量的测量数据, 且在计算过程中需要多次计算逆矩阵, 运算量大, 过程复杂, 无法满足实时定位。而 RLS 算法所需存储的数据量少, 运算相对简单, 并且能够在测量过程中实时进行定位。因此 RLS 算法相比 LS 算法更适合于电子战背景下的机载单站无源定位。

通过仿真分析可知, 测向噪声、测量时间、飞行速度和递推初始值都是影响机载单站无源定位准确度和定位速度的因素。而 RLS 算法相对与 LS 算法在不同的条件下均能快速准确的实现定位。因此可以依据仿真结论改变影响因素来进一步提高定位精度和收敛速度: ①提高测向设备的精度, 减小测向噪声的干扰, 尽可能获得较为精确的方位角和俯仰角; ②利用各种侦察手段获得较为接近真实值的递推初值, 以提高算法的收敛速度; ③在不影响定位性能的前提下尽量使飞机保持较高的速度。④适当增加飞机的测量时间和测量次数来获得更为准确的定位精度。

### 4 结束语

机载单站无源定位技术在电子战背景下发挥着越来越重要的作用。本文在建立了基于角度信息的机载单站无源定位模型的基础上, 得出了最小二乘估计, 以此为基础推导了 RLS 算法。通过仿真实验得出, RLS 算法运算复杂度低, 所需存储空间小, 能够满足机载单站无源定位的准确性和实时性要求。但在仿真过程中发现, RLS 算法定位的鲁棒性较差, 少量的异常角度测量值都会造成定位结果的不准确甚至严重偏离。因

此, 如何提高算法的鲁棒性是下一步研究的侧重点。

参考文献:

[1] 何伟红, 金荣红, 耿军平, 等. 一种基于分数阶傅里叶变换域加权 MUSIC 算法的移动单站多目标无源定位方法 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45 (3): 345-349.

[2] 刘春辉, 丁文锐, 李红光. 基于相位差测量的无人机单站无源定位系统 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (9): 2015-2018.

[3] 曹铁超. 无线电定位算法研究及目标运动分析 [D]. 南京: 东南大学, 2009.

[4] Li G, Yang S W, Nie Z P, Direction of Arrival Estimation in Time Modulated Linear Arrays With Unidirectional Phase Center Motion [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 28

(4): 1105-1111.

[5] Wang X, He Z S. Target motion analysis in three-sensor TDOA location system [J]. Information Technology Journal, 2011, 10 (6): 1150-1160.

[6] Deming R, Schindler J, Perlovsky L. Multi-Target/Multi-Sensor Tracking using Only Range and Doppler Measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45 (2): 593-611.

[7] 吴 昊, 陈树新, 张衡阳, 等. 基于递推最小二乘的单站无源定位仿真分析 [J]. 火力与指挥控制, 2013, 38 (6): 19-22.

[8] 王 鼎, 张 莉, 吴 瑛. 基于角度信息的约束总体最小二乘无源定位算法 [J]. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2006, 36 (8): 880-890.

[9] 吴顺华, 辛 勤, 万建伟. 对卫星目标的仅测角地基单站无源定位可观性分析 [J]. 航空学报, 2009, 30 (1): 104-108.

(上接第 2843 页)

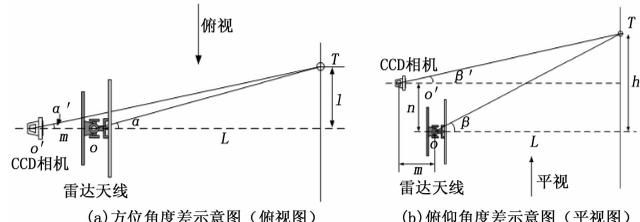


图 4 雷达系统与机器视觉测角系统安装位置不同引起的测量角度偏差示意图

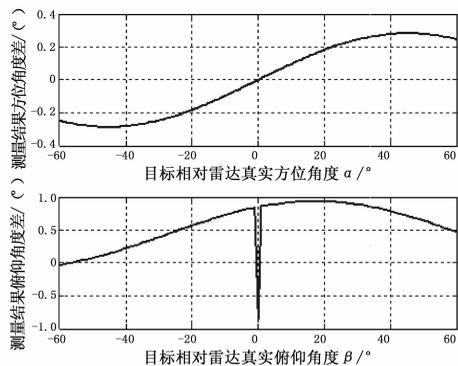


图 5 机器视觉测量系统与雷达系统安装位置不同导致的测量结果角度偏差分析

$$e = \arctan\left(\frac{d}{D}\right) = \arctan\left(\frac{Lf}{L-f}\right) \quad (7)$$

其中:  $L$  为目标模拟器到相机镜头的水平距离。若采用焦距为  $f = 10 \text{ cm}$  的相机,  $\text{CCD}$  像元大小为  $d = 10 \mu\text{m}$ , 目标到相机的距离  $L = 20 \text{ m}$ , 则该测量系统的灵敏度为:  $e = 0.0057^\circ$ 。

从系统方案和上述分析可知, 影响机器视觉系统对雷达角度测量的校准精度和评估性能的主要因素有:

- 1) 目标距  $\text{CCD}$  相机水平距离的测量精度;
- 2) 目标图像点的提取精度;
- 3) 机器视觉系统与雷达系统视线平行情况;
- 4) 机器视觉系统与雷达系统异位引起测角偏差的补偿精度。

影响分析如下: 1) 距离的测量精度对系统角度测量精度

的影响较小, 仿真可知距离测量误差为  $0.5 \text{ m}$  时角度测量误差为  $0.0029^\circ$ ; 2) 目标图像点的提取精度受目标图像所占像元数、相机成像景深等影响, 为提高测量精度, 可以在目标模拟器上安装一个强光源代替目标; 3) 两系统视线平行情况可以通过在同一个平面地板上安装来保证; 4) 两系统安装位置不一致导致的测量角度偏差是固定的, 可以根据上述仿真结果进行相应的补偿。根据分析和仿真, 在正常的实验测量误差条件下, 雷达测角精度评估系统能达到  $0.005^\circ$  的校准和评估精度。

5 结论

本文首先介绍了基于机器视觉的雷达角度测量实时校准试验系统, 由光学模块 ( $\text{CCD}$  相机)、图像采集模块和图像处理与目标角度信息提取模块等组成。然后针对雷达系统与机器视觉测角系统的安装位置不同引起的角度测量偏差问题提出实时补偿方法。最后分析了实时校准和评估系统的校准精度和评估性能。通过仿真和理论分析可知, 本文提出的系统能实现在紧缩场试验中雷达系统角度测量的自动化、高精度和实时连续的校准和性能评估。

参考文献:

[1] 吕亚强, 毛瑞娟, 严家明. 单脉冲雷达测量误差修正方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (8): 1155-1157.

[2] 贝 P. R. 文顿. 数据处理和误差分析 [M]. 北京: 知识出版社, 1986.

[3] QJ 2805-96. 地面雷达角度距离标校方法 [S].

[4] GJB 3153-98. 精密测量雷达标定与校正 [S].

[5] 邢济武, 王东伟, 孙 广, 等. 空间交会对接微波雷达测量系统地面校准技术研究 [J]. 宇航计测技术, 2011, 31 (6): 4-7.

[6] 李杏华, 张彦杰, 王伟超. 基于机器视觉的加工误差在线检测系统设计 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48 (4): 71-75.

[7] 储 珺, 姚晓春, 缪 君, 等. 基于图像的角度检测系统研究 [J]. 光电技术应用, 2009, 30 (6): 940-942.

[8] 何博侠, 张志胜, 戴 敏, 等. 基于序列局部图像的高精度测量 [J]. 光学精密工程, 2008, 16 (2): 367-370.

[9] 张舞杰, 杨义禄, 李 迪, 等. 自动影像测量系统关键算法 [J]. 光学精密工程, 2007, 15 (2): 294-301.

[10] 高 烽. 雷达导引头概论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.

[11] 门金瑞, 姚大志, 韦伟. 基于千兆以太网的  $\text{CCD}$  相机设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49 (3): 142-146.

[12] 张 诚, 罗 丰. 基于千兆以太网的高速数据传输系统设计 [J]. 电子科学与技术, 2011, 24 (1): 44-46.