

引用格式:刘爱东,王兆毅.测距机位置误差条件下交会定位改进算法研究[J].电光与控制,2017,24(8):38-43. LIU A D, WANG Z Y. An improved algorithm for distance intersection positioning in the presence of rangefinder position errors[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(8):38-43.

测距机位置误差条件下交会定位改进算法研究

刘爱东¹, 王兆毅²

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军92132部队, 山东 青岛 266404)

摘要:起降引导系统进行岸基标校时,由于甲板变形,布设在甲板上用于进行目标定位的激光测距机位置无法精确获得,存在位置误差,会严重影响目标定位性能。针对这个问题,提出了一种混合定位算法,该算法将非线性方程线性化,得到最小二乘解,然后综合考虑测距机位置误差和测距误差,将误差分量分离后利用加权最小二乘法得到目标位置次优解,以此次优解作为泰勒级数展开法的迭代初值,进行迭代运算,最终得到定位结果。将该混合算法与约束总体最小二乘法及CHAN算法进行仿真对比,结果表明,该算法可靠性更高,定位精度在较高噪声的条件下仍能接近CRLB。

关键词:起降引导系统; 距离交会; 混合定位; 位置误差; 岸基标校

中图分类号: TN92 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2017.08.009

An Improved Algorithm for Distance Intersection Positioning in the Presence of Rangefinder Position Errors

LIU Ai-dong¹, WANG Zhao-yi²

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. No. 92132 Unit of PLA, Qingdao 266404, China)

Abstract: When the warship is in the shore-based calibration process, the position of the laser rangefinder laid on the deck for targeting may not be accurately obtained due to the deformation of the deck, and position errors existed may seriously affect targeting accuracy. To solve this problem, a hybrid location algorithm is proposed. Firstly, the linearization is made to the nonlinear equation, and the least square solution is obtained. Then considering the position error together with the ranging error of the range finders, the suboptimal solution of the target position is obtained by using the weighted least square method. The suboptimal solution is taken as the initial value of Taylor series expansion method for iteration, and the final location can be obtained. The simulation result showed that: Compared with Constrained Total Least Squares (CTLS) algorithm and CHAN algorithm, the proposed algorithm is more reliable, and has an accuracy relatively close to CRLB even under high noise condition.

Key words: landing guidance system; distance intersection; hybrid positioning; position error; shore-based calibration

0 引言

目前对舰船靠泊状态下的起降引导系统标校研究处于起始阶段,在标校过程中目标位置估计手段也有限,由于激光单色性及方向性好的特点,设计在舰船甲板上布设激光测距机进行目标定位具有一定研究意义。激光测距定位方法主要有基于到达时间(TOA)^[1]、到达时间差(TDOA)^[2]、到达频率差(FDOA)^[3]、到达时

间和以及混合定位法等多种,由于标校过程中信号在视距内传播(LOS),环境引起的误差并不明显,此外,如果合作目标处于静止或慢速运动状态,采用TOA定位技术在时统精度不是很高的条件下也能得到较高精度的目标位置信息。

由于外因(受力、风浪、温度场变化等)影响,甲板会存在一定程度的变形,激光测距机安装平台会发生一定的位置偏移和挠曲,相关文献表明,大型舰船甲板静态变形可达到 $1^\circ \sim 1.5^\circ$ ^[4],动态变形高达几十角分;一般舰船在静浮状态下位移偏差超过 10 mm ^[5],位置偏移误差与高精度激光测距机测距误差相当,因此考虑测距机位置误差对定位性能的影响是必要的。

收稿日期:2016-07-13 修回日期:2017-08-26

作者简介:刘爱东(1968—),男,山东烟台人,教授,硕导,研究方向为嵌入式系统。

文献[6]表明,传感器位置误差对定位性能的影响与测量误差具有同等权值,即使在很小的情况下,也会严重影响目标的定位性能。在考虑传感器位置误差的情况下,文献[7]提出一种两级加权最小二乘 TOA 定位方法,该方法在误差较小时定位精度能达到克拉美-罗界(CRLB),但该方法在求解过程中存在开方运算,产生的目标位置解存在模糊性,且可能存在虚数解,在误差较大时定位结果容易发散。约束总体最小二乘方法^[8](CTLS)能有效克服总体最小二乘^[9](TLS)不能达到 CRLB、两步加权最小二乘方法(Two-Step WLS)在较高噪声时定位精度发散的缺陷,在存在较高噪声时定位精度仍能达到 CRLB,但该方法在最后对目标函数求极值时比较困难,一般将部分含有未知变量的矩阵当成常数矩阵进行求导,容易导致不收敛现象,对初值的选取要求相对苛刻。

在以上分析的基础上,本文提出了一种距离交会混合定位算法,该算法结合 CHAN 算法和 CTLS 算法的特点,利用最小二乘法及加权最小二乘法先给出目标的次优解,之后将次优解作为泰勒级数展开法^[10-11]的迭代初值进行运算,能较好地保证迭代收敛及定位精度。

1 距离交会定位初值求解

假设在舰船上布设的激光测距机真实坐标为 $\mathbf{B}'_i = [x'_i, y'_i, z'_i]^T, i=1, 2, \dots, N$, 目标的真实坐标为 $\mathbf{M}' = (x, y, z)^T$, 可得到目标到每个激光测距机的距离表达式为

$$r'_i = \|\mathbf{M}' - \mathbf{B}'_i\|_2 \quad i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

展开上式

$$r'^2_i = x^2 + y^2 + z^2 + x'^2_i + y'^2_i + z'^2_i - 2x'_i x - 2y'_i y - 2z'_i z \quad (2)$$

可以看出式(2)中存在非线性分量,较常用的方法是先将 $x^2 + y^2 + z^2$ 当成独立于 x, y, z 的分量进行拟线性化,本文将式(2)分别减去第 1 个测距机距离表达式即可消去非线性分量,展开化简可得

$$2(x'_{i1}x + y'_{i1}y + z'_{i1}z) = k'_{i1} + r'^2_i - r'^2_1 \quad i=2, 3, \dots, N \quad (3)$$

式中: $x'_{i1} = x'_i - x'_1; y'_{i1} = y'_i - y'_1; z'_{i1} = z'_i - z'_1; k'_{i1} = x'^2_i + y'^2_i + z'^2_i; k'_{i1} = k'_i - k'_1$ 。用矩阵方程可表示为

$$\begin{bmatrix} x'_{21} & y'_{21} & z'_{21} \\ x'_{31} & y'_{31} & z'_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_{N1} & y'_{N1} & z'_{N1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} k'_{21} - r'^2_2 + r'^2_1 \\ k'_{31} - r'^2_3 + r'^2_1 \\ \vdots \\ k'_{N1} - r'^2_N + r'^2_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

符号表达式为

$$\mathbf{A}'\boldsymbol{\theta} = \mathbf{b}' \quad (5)$$

在工程实践中,激光测距仪必定存在测量误差和位置误差,假设实测的测距机位置测量值为 $\mathbf{B}_i = [x_i, y_i,$

$z_i]^T$, 距离测量值为 $r_i, i=1, 2, \dots, N; n_{xi} = c\Delta t_i$ 为各测距机测距误差,误差矢量可以写为 $\mathbf{n}_r = [n_{r1}, n_{r2}, \dots, n_{rN}]^T$, 测距误差相互独立,服从均值为零,协方差矩阵为 \mathbf{Q}_r 的高斯分布;同样的,假设 $\Delta\mathbf{B}_i = [n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}]^T$ 为第 i 个激光测距机在直角坐标系下的三轴位置误差,用矢量表示所有激光测距机位置误差为

$$\mathbf{n}_b = \begin{bmatrix} (n_{x1}, n_{y1}, n_{z1})^T \\ (n_{x2}, n_{y2}, n_{z2})^T \\ \vdots \\ (n_{xN}, n_{yN}, n_{zN})^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

激光测距机位置误差各分量相互独立,服从均值为零,协方差矩阵为 \mathbf{Q}_b 的高斯分布。

激光测距机测量误差与位置误差通常可认为相互独立,也符合实际情况,将位置误差和测距误差联合起来可得到总误差为

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_b \\ \mathbf{n}_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

总误差的协方差矩阵为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_b & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q}_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{0}$ 为 $3N \times N$ 维零矩阵,考虑测距机位置误差和测距误差后,式(5)可进一步转化为

$$(\mathbf{A} + \mathbf{E})\boldsymbol{\theta} = \mathbf{b} + \mathbf{w} \quad (9)$$

式中: \mathbf{A}, \mathbf{b} 是 \mathbf{A}', \mathbf{b}' 各元素对应的测量值组成的矩阵和向量; \mathbf{E}, \mathbf{w} 分别表示矩阵 \mathbf{A} 和向量 \mathbf{b} 对应的误差分量。

常规最小二乘法只考虑 \mathbf{b} 对应的误差分量 \mathbf{w} , 最小二乘解为

$$\boldsymbol{\theta}_{LS} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (10)$$

但得到的最小二乘解不是最优的,需综合考虑误差分量 \mathbf{E} 和 \mathbf{w} , 将式(4)中的真值用测量值和误差量的形式替换,并忽略二阶以上误差分量,对误差进行提取和简化,可最终得到

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{x1} - \mathbf{n}_{x2} & \mathbf{n}_{y1} - \mathbf{n}_{y2} & \mathbf{n}_{z1} - \mathbf{n}_{z2} \\ \mathbf{n}_{x1} - \mathbf{n}_{x3} & \mathbf{n}_{y1} - \mathbf{n}_{y3} & \mathbf{n}_{z1} - \mathbf{n}_{z3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{n}_{x1} - \mathbf{n}_{xN} & \mathbf{n}_{y1} - \mathbf{n}_{yN} & \mathbf{n}_{z1} - \mathbf{n}_{zN} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^T - \mathbf{B}_2^T & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{B}_1^T & 0 & -\mathbf{B}_3^T & \cdots & 0 \\ \mathbf{B}_1^T & \vdots & 0 & \vdots & \\ \mathbf{B}_1^T & 0 & 0 & \cdots & -\mathbf{B}_N^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -r_1 & r_2 & 0 & \cdots & 0 \\ -r_1 & 0 & r_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -r_1 & 0 & 0 & \cdots & r_N \end{bmatrix} \mathbf{n} \quad (12)$$

式(9)的另一种表达式为

$$[A \quad b] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ -1 \end{bmatrix} = -[E \quad \boldsymbol{w}] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

将式(11)、式(12)得到的结果代入式(13)化简可得到

$$[A \quad b] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ -1 \end{bmatrix} = [E_1 \quad E_2 \quad E_3] \boldsymbol{n} = G\boldsymbol{n} \quad (14)$$

$$\text{式中: } G = [E_1 \quad E_2 \quad E_3], E_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} x_1 - x \\ y_1 - y \\ \vdots \\ z_1 - z \end{bmatrix}^T, E_2 =$$

$$-\text{diag} \left(\begin{bmatrix} x_2 - x \\ y_2 - y \\ z_2 - z \end{bmatrix}^T, \dots, \begin{bmatrix} x_N - x \\ y_N - y \\ z_N - z \end{bmatrix}^T \right), E_3 = \begin{bmatrix} -r_1 & r_2 & 0 & \dots & 0 \\ -r_1 & 0 & r_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -r_1 & 0 & 0 & \dots & r_N \end{bmatrix}.$$

可以看出 G 为行满秩矩阵,故

$$G^\dagger = G^T (GG^T)^{-1}. \quad (15)$$

式(14)可进一步简化为

$$A\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{b} = \boldsymbol{\varphi} \quad (16)$$

式中,误差矢量 $\boldsymbol{\varphi} = G\boldsymbol{n}$,其误差协方差矩阵为

$$\boldsymbol{\psi} = E(\boldsymbol{\varphi}\boldsymbol{\varphi}^T) = GQG^T. \quad (17)$$

利用加权最小二乘法可以得到目标的初步估计^[12]

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_1 = (A^T \boldsymbol{\psi}^{-1} A)^{-1} A^T \boldsymbol{\psi}^{-1} \boldsymbol{b}. \quad (18)$$

由于矩阵 G 中含有未知变量,因而 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_1$ 未知,可以用最小二乘法得到的目标初始值代入矩阵 G 得到目标值,但目标值是次优解,需要进一步给出更精确的解。

2 泰勒级数展开法

泰勒级数展开法是一种迭代算法,需要首先给出迭代初始值,然后进行迭代直至结果满足精度要求,本文将式(19)得到的目标解作为迭代初值,进行泰勒级数求解。

定义新未知变量 $\boldsymbol{\omega}$ 为

$$\boldsymbol{\omega} = [B'^T, M'^T]^T \quad (19)$$

$\boldsymbol{\omega}$ 为 $3(N+1) \times 1$ 维向量, $B' = [B'_{1,i}, B'_{2,i}, \dots, B'_{N,i}]^T$, 欲求未知变量 $\boldsymbol{\omega}$, 需构建至少 $3(N+1)$ 组方程, 测量方程 $r'_i = \|M' - B'_i\|_2, i=1, 2, \dots, N$, 是由 N 个方程构成的方程组, 另外, 测距机位置误差方程为

$$B_i = B'_i + \Delta B_i \quad i=1, 2, \dots, N. \quad (20)$$

位置误差方程共 $3N$ 个方程, 则有测量方程和测距机位置误差方程可构成由 $4N(N \geq 3)$ 个方程组成的非线性方程组

$$f(\boldsymbol{\omega}) = [B'^T, r'^T]^T = [B^T, r^T]^T - \boldsymbol{n} = T - \boldsymbol{n} \quad (21)$$

式中: $B = [B_1^T, B_2^T, \dots, B_N^T]^T; r = [r_1, r_2, \dots, r_N]^T; T =$

$[B^T, r^T]^T; B', r'$ 为相应的真值, 若给出某组迭代初值

$$\boldsymbol{\omega}_i = [B'_{1,i}, B'_{2,i}, \dots, B'_{N,i}, M'_i]^T \quad (22)$$

则忽略二阶及以上部分, $f(\boldsymbol{\omega})$ 在 $\boldsymbol{\omega}_i$ 处的泰勒级数展开式为

$$f(\boldsymbol{\omega}) \big|_{\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{\omega}_i} + D\delta\boldsymbol{\omega} \approx T - \boldsymbol{n} \quad (23)$$

式中, D 为 $f(\boldsymbol{\omega})$ 在 $\boldsymbol{\omega}_i$ 处的一阶展开矩阵

$$\delta\boldsymbol{\omega}_i = [\delta B^T, \delta M^T]^T = \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega}_i. \quad (24)$$

下面对 D 进行求解

$$D = \left[\frac{\partial f(\boldsymbol{\omega})}{\partial B^T}, \frac{\partial f(\boldsymbol{\omega})}{\partial M^T} \right] \bigg|_{\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{\omega}_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B'}{\partial B^T} & \frac{\partial B'}{\partial M^T} \\ \frac{\partial r'}{\partial B^T} & \frac{\partial r'}{\partial M^T} \end{bmatrix} \bigg|_{\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{\omega}_i} \quad (25)$$

$$\text{式中: } \frac{\partial B'}{\partial B^T} = I_{3N \times 3N}; \frac{\partial B'}{\partial M^T} = \mathbf{0}_{3N \times 3}; \frac{\partial r'}{\partial M^T} = \begin{bmatrix} (M - B_1)^T \\ r'_1 \\ \vdots \\ (M - B_N)^T \\ r'_N \end{bmatrix};$$

$$\frac{\partial r'}{\partial B^T} = \text{diag} \left(\frac{-(M - B_1)^T}{r'_1}, \dots, \frac{-(M - B_N)^T}{r'_N} \right).$$

因此, 泰勒级数展开式可进一步表示为

$$D\delta\boldsymbol{\omega}_i \approx T - f(\boldsymbol{\omega}) \big|_{\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{\omega}_i} - \boldsymbol{n} \quad (26)$$

根据误差平方和最小原则, 式(26)的解为

$$\delta\boldsymbol{\omega}_i \approx (D^T Q^{-1} D)^{-1} D^T Q^{-1} (T - f(\boldsymbol{\omega}) \big|_{\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{\omega}_i}) \quad (27)$$

式中, Q 为误差协方差矩阵。

这样, 在一次迭代中, $\delta\boldsymbol{\omega}$ 可根据式(27)进行计算, 通过

$$\boldsymbol{\omega}_{i+1} = \boldsymbol{\omega}_i + \delta\boldsymbol{\omega}_i \quad (28)$$

得到新的解算值。重复迭代直至满足精度要求。

本文提出的混合定位算法计算过程为:

1) 利用式(5)求出目标的最小二乘解, 将矩阵 G 中的目标位置元素用最小二乘解代替;

2) 将得到的矩阵 G 代入式(18), 可进一步得到更为精确的加权最小二乘解, 以此解作为泰勒级数展开法的迭代初值;

3) 将2)得到的加权最小二乘解作为迭代初值, 进行迭代得到 $\delta\boldsymbol{\omega}_i$;

4) 根据得到的 $\delta\boldsymbol{\omega}_i$ 验证是否满足精度要求, 如果不满足, 则重复3), 4), 如果满足要求, 则将新得到的 $\boldsymbol{\omega}_{i+1}$ 作为最终解, 其中, $\boldsymbol{\omega}_{i+1}$ 的最后3个元素即为目标的坐标。

3 仿真分析

对本文算法的目标定位性能进行了仿真分析, 并与 CTLS 算法和 CHAN 算法进行比较分析。

设备的安装位置应充分考虑甲板的布局、船体变形特点和设备间的相对位置关系。其中：船上有效载荷对船体变形的影响比较大；设备安装基座与船体重心之间的相对变形随着距离的拉长和高度差的增加而增大^[13]；此外拉长设备之间的基线会提高定位性能^[14]。综合上述分析，测距机安装位置应尽量靠近船体重心，安装高度应尽量低，设备之间应尽量分散且要避免较大的上层建筑，根据舰船甲板实际情况，假设 5 个传感器的位置坐标如表 1 所示。

表 1 激光测距机在舰船甲板上的位置坐标

Table 1 Positions of the laser rangefinders laid on the deck

传感器	x_i	y_i	z_i
B_1	0	0	0
B_2	100	0	0
B_3	50	-40	0
B_4	150	30	0
B_5	90	15	11

激光测距机位置误差的协方差矩阵及测距误差协方差矩阵分别表示为 $Q_b = \sigma_b^2 \text{diag}(2, 2, 2, 1, 1, 1, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 5, 5, 5)$, $Q_r = \sigma_r^2 \text{diag}(1, 1, 1, 1, 1)$, σ_b^2 代表测距机位置误差方差等级，误差范围在毫米级，为分析方便，假设其变化范围在 $0.001^2 \sim 0.05^2$ 之间， σ_r^2 代表测距机测距误差方差等级，同样假设其变化范围在 $0.001^2 \sim 0.05^2$ 之间，可以确保测距机测量误差和位置真实误差在假设区间内。根据标校实际情况，合作目标布设在甲板中线延长线上，选取 $M_1 = [550, 5, 28]^T$ 和 $M_2 = [1150, 5, 70]^T$ 两个位置点作为近距和远距目标，制定两套仿真方案，分别固定传感器位置误差或测距误差，改变另一个误差，仿真分析不同定位方法在不同条件下的定位性能。

方案 1 固定 $\sigma_b^2 = 0.002^2$ ，改变 σ_r^2 ，分别对各算法对近距、远距目标的定位性能进行 $N = 10\ 000$ 次的蒙特卡罗仿真分析，图 1、图 2 分别为近距目标和远距目标位置估计随 σ_r^2 (可用 $10 \lg \sigma_r^2$ 方便算法性能比较) 变化时的 MSE 与 CRLB 对比情况。

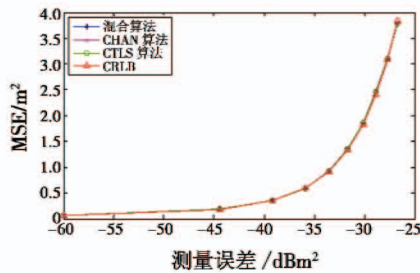
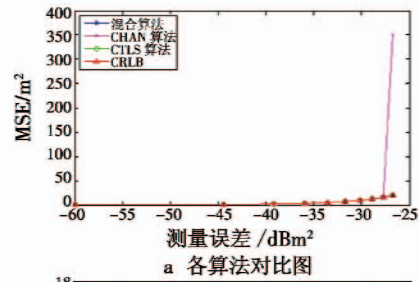
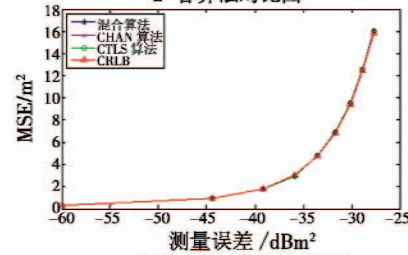


图 1 不同测距误差条件下各算法对近距目标的定位误差均方差对比关系

Fig. 1 The variance of position errors of each algorithm in different ranging error conditions for near-field source



a 各算法对比图



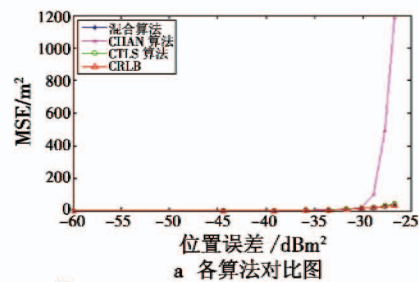
b 各算法未发散时对比图

图 2 不同测距误差条件下各算法对远距目标的定位误差均方差对比关系

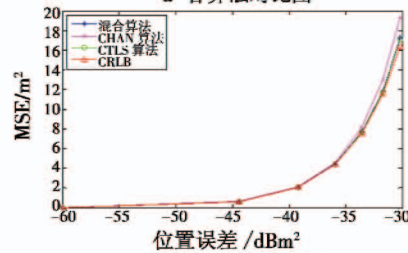
Fig. 2 The variance of position errors of each algorithm in different ranging error conditions for far-field source

由图 1、图 2a、图 2b 可以看出，随着测距误差的增大，各算法的定位误差均方差均逐渐增加，当测距误差较小时，3 种算法对远距、近距目标的定位性能均逼近 CRLB，但 CHAN 算法随着测距误差的增加会出现发散情况，因此当测距误差较大时，使用 CHAN 算法不能保证得到满意的目标定位结果。

方案 2 固定 $\sigma_r^2 = 0.002^2$ ，改变 σ_b^2 ，分别对各算法对近距、远距目标的定位性能进行 $N = 10\ 000$ 次的蒙特卡罗仿真分析，图 3 和图 4 分别为近、远距目标位置估计随 σ_b^2 (可用 $10 \lg \sigma_b^2$ 方便算法性能比较) 变化时的 MSE 与 CRLB 对比情况。



a 各算法对比图



b 各算法未发散时对比图

图 3 不同位置误差条件下各算法对近距目标的位置误差均方差对比关系

Fig. 3 The variance of position errors of each algorithm in different position error conditions for near-field source

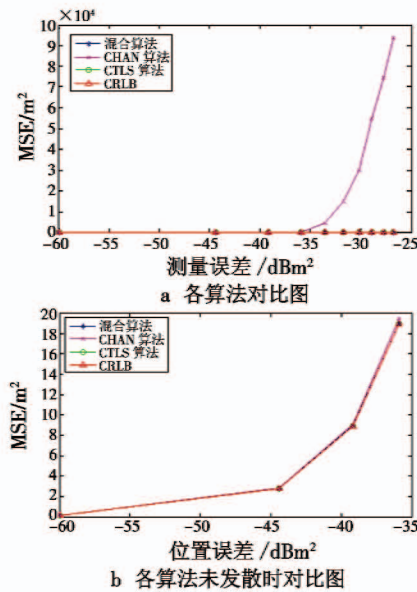


图4 不同位置误差条件下各算法对远距目标的位置误差均方差对比关系

Fig.4 The variance of position errors of each algorithm in different position error conditions for far-field source

由图3和图4可以看出,位置误差对目标的定位性能有十分明显的影响,3种算法的位置误差均方差均随着位置误差的增加成放大趋势,当位置误差较小时,均逼近CRLB,但同样的CHAN算法随着位置误差的增加会出现发散情况。

比较方案1、方案2也可以得到以下结论:方案1固定 $\sigma_b^2=0.002^2$, σ_r^2 变化范围为 $0.002^2\sim 0.05^2$;方案2固定 $\sigma_r^2=0.002^2$, σ_b^2 变化范围同样为 $0.002^2\sim 0.05^2$ 。横向比较方案1、方案2中对近距、远距目标的定位性能可以看出,测距机位置误差对目标的定位性能的影响效果更为显著,因此在定位时考虑测距机位置误差因素是十分必要的。

CTLS算法和本文的混合算法均需要给出一个目标初值进行迭代,目标初值是否靠近真值的程度对迭代次数和是否收敛均具有十分重要的作用,在给出的初值和迭代终止条件都相同的情况下,迭代是否收敛也取决于迭代算法自身的优劣。因此在方案1、方案2仿真中,CTLS算法和本文算法目标初值均由式(19)提供,即 $\hat{\theta}_1=(A^T\psi^{-1}A)^{-1}A^T\psi^{-1}b$,然后在不同误差条件下分别进行10000次的蒙特卡罗仿真,分别记录两种不收敛的次数,记录结果如表2所示。

由表2可明显看出,CTLS算法在位置误差较小的情况下不收敛的次数较少,但对位置误差比较敏感,如果误差较大,很容易出现不收敛的情况,而混合算法用相同的初值进行迭代,均能保证每次都收敛,因此混合算法相对于CTLS算法在可靠性上更有优势。

表2 蒙特卡罗仿真中算法不收敛次数统计

Table 2 The numbers of non-convergence of the algorithm in

		Monte Carlo simulation									
		$10\lg \sigma_r^2$									
$\sigma_b^2=0.002^2$		-60	-44	-39	-36	-34	-32	-30	-29	-28	-27
近距	CTLS算法	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
目标	混合算法	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
远距	CTLS算法	0	0	0	0	0	11	50	137	245	413
目标	混合算法	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		$10\lg \sigma_b^2$									
$\sigma_r^2=0.002^2$		-60	-44	-39	-36	-34	-32	-30	-29	-28	-27
近距	CTLS算法	0	0	25	215	661	1124	1627	1891	2193	2538
目标	混合算法	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
远距	CTLS算法	0	209	1159	2114	2935	3684	4274	4714	5102	5347
目标	混合算法	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4 总结与结论

在舰船甲板上布设激光测距机进行距离交会定位时,测距机位置误差会严重影响目标的定位结果,在考虑测距机测量误差和位置误差的条件下,本文提出的混合算法相比CHAN算法和CTLS算法具备以下关系:

1) 在测距误差和位置误差较小的情况下,3种算法都能较好地逼近CRLB;

2) CHAN算法虽然能够提供目标位置的闭式解,但在误差较大的情况下容易发散,同时由于最后存在开方运算,容易产生虚数解;

3) CTLS算法在误差较大时同样对远距和近距目标具备较好的定位性能,但在目标初值的给定要求上相比混合算法更为苛刻,否则易造成迭代不收敛;

4) 本文提出的混合算法首先在将非线性方程组线性化的基础上,利用最小二乘和加权最小二乘给出目标位置的次优解,然后以次优解作为泰勒级数展开法的初值进行迭代,不仅能实现每次迭代收敛,而且在较大误差条件下对近距或远距目标的定位性能均逼近CRLB,即得到的解是最优解,算法可靠性高。

参考文献

- [1] SHEN J Y, MOLISCH A F, SALMI J. Accurate passive location estimation using TOA measurements [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2012, 11 (2): 2182-2192.
- [2] CHAN Y T, HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [3] HO K C, XU W W. An accurate algebraic solution for moving source location using TDOA measurements [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52 (9): 2453-2463.

- [4] 郑荣才,陈超英,杨功流. 大型舰船甲板测量[J]. 天津大学学报,2006,39(9):1077-1081.
- [5] 张伟,王东涛,陈斌. 船体变形对武器装备基座安装精度的影响分析[J]. 造船技术,2010(3):12-14.
- [6] KOVAVISARUCH L, HO K C. Modified Taylor-series method for source and receiver localization using TDOA measurements with erroneous receiver positions [C]// Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems, 2005:2295-2298.
- [7] HO K C, LU X N, KOVAVISARUCH L. Source location using TDOA and FDOA measurements in the presence of receiver location errors: analysis and solution [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(2):684-696.
- [8] 陈少昌,贺慧英,禹华钢. 传感器位置误差条件下的约束总体最小二乘时差定位算法[J]. 航空学报,2013,34(5):1165-1173.
- [9] WANG A H, YANG K, AN J P, et al. Total least-squares algorithm for time of arrival based wireless sensor networks location [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2011, 94(9):1851-1855.
- [10] FOY W. Position-location solutions by Taylor-series estimation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1976, AES-12(2):187-194.
- [11] 张令文,谈振辉. 基于泰勒级数展开的蜂窝 TDOA 定位新算法[J]. 通信学报, 2007, 28(6):7-11.
- [12] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:356-362.
- [13] 周金亮,赵岩峰. 舰船变形研究[J]. 舰船电子工程, 2010,30(5):198-200.
- [14] 郭伟锋,张政超. 五站时差无源定位及精度分析[J]. 中国电子科学研究院学报,2013,8(6):617-621.

(上接第8页)

简化线性模型;然后针对简化模型,采用线性二次型最优反馈控制方法对其进行控制律设计,在控制律的最终表达式中加入重力补偿项加以弥补建模中忽略的重力;同时针对空地导弹,在控制律中加入目标值设定来实现对导弹落角的约束;最后与一种带落角约束的滑模控制方法做仿真对比分析。结果表明,本文采用该设计思路所设计的一体化控制律弹道轨迹相对滑模方法更短且更为平滑,在不影响制导精度的情况下,仿真时长有所减少,证明了该控制律设计的有效性。

参考文献

- [1] 刘名玥. 小型导弹导引与控制一体化设计[D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [2] 樊世杰,范红旗,肖怀铁,等. 末制导中估计器与制导律设计方法新进展[J]. 自动化学报,2015,41(1):38-46.
- [3] 朱战霞,陈鹏,唐必伟. 基于滑模方法的空空导弹一体化制导控制律设计[J]. 西北工业大学学报,2014,32(2):213-219.
- [4] 赵国荣,韩旭,胡正高,等. 基于模糊滑模方法的双舵控制导弹制导控制一体化[J]. 控制与决策,2016,31(2):267-272.
- [5] LIN C F, WANG Q, SPEYER J L, et al. Integrated estimation, guidance, and control system design using game theoretic approach [C]//Proceedings of American Control Conference, American Automatic Control Council, Evanston, IL, 1992:3220-3224.
- [6] LIN C F, BIBEL J E, OHLMEYER E, et al. Optimal design of integrated missile guidance and control [C]//Proceedings of the World Aviation Conference, Anaheim, CA, 1998. doi:10.2514/6.1998-5519.
- [7] SERRANI A, ZINNECKER A M, FIORENTINI L, et al. Integrated adaptive guidance and control of constrained nonlinear air-breathing hypersonic vehicle models [C]// Proceedings of the American Control Conference, Missouri, USA; IEEE, 2009:3172-3177.
- [8] 薛文超,黄朝东,黄一. 飞行制导控制一体化设计方法综述[J]. 控制理论与应用,2013,30(12):1511-1522.
- [9] 付主木,曹晶,王晓红. 具有末端落角约束的空地导弹滑模变结构制导律设计[J]. 信息与控制,2015,44(3):291-297.
- [10] 苗昊春,马清华,董国才,等. 反坦克导弹最优一体化制导与控制[J]. 系统仿真技术,2013,9(1):9-13.
- [11] 王洪雪,李新国,王晨曦. 基于 θ -D方法带落角约束的三维末制导律设计[J]. 飞行力学,2014,32(2):145-148.
- [12] 王先哲,吴庆宪,姜长生. 带落角约束的导弹制导与控制一体化设计[J]. 航空兵器,2011(6):23-28.