

减少激光指示器照射时间的目标跟踪算法研究

陈亮亮¹, 王建刚¹, 李晓俊², 赵振宇¹

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009; 2. 海军装备部, 北京 100841)

摘要: 为减少激光制导武器攻击过程中激光指示器的照射总时间, 研究了一种新的目标跟踪算法。激光制导武器充分使用自身 INS/GPS 组合导航, 由卡尔曼滤波中的协方差判断武器目标矢量的误差信息。算法应在任何时刻确保武器能够在误差范围内命中目标。因此, 在飞行的每一时刻存在无法命中目标的最大误差极限。当误差即将超过极限时, 武器可以要求一个简短的目标激光照射。目标的激光量测方位信息可以改进武器目标矢量估计, 也可以反馈到卡尔曼滤波中来改进惯性状态估计。仿真试验表明, 该算法能够在保证火力打击精度的前提下有效缩短激光照射时间, 降低照射单元风险。

关键词: 目标跟踪; 激光制导武器; 卡尔曼滤波

中图分类号: V271.4; P228.41

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2013)02-0019-04

A Target Tracking Algorithm that Reduces Laser Designation Time

CHEN Liangliang¹, WANG Jiangang¹, LI Xiaojun², ZHAO Zhenyu¹

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471009, China;

2. PLA Navy Armament Department, Beijing 100841, China)

Abstract: A new approach that minimizes the total active laser target designation time is proposed for guidance of laser guided weapons. The laser guided weapons can make full use of INS/GPS guidance, and estimate the error of the weapon-to-target vector by covariance information within a Kalman filtering. At any time, the missile needs to be sure that it can navigate to any point within the area around the target that is described by this covariance. Therefore, at each moment during the flight, there exists a covariance threshold above which the weapon cannot guarantee its ability to navigate to the target. In our proposed approach, when the threshold is exceeded, the weapon requests a brief laser designation of the target. The laser designation provides an accurate measurement of the bearing of the target with respect to the missile, and this is used to improve the estimation of the weapon-to-target vector. In turn, this can be fed back into the Kalman filter to improve the internal state estimation. The approach can minimize the laser designation time while guaranteeing the attacking precision.

Key words: target tracking; laser guided weapon; Kalman filtering

0 引言

现代战争中, 前线作战小组可以呼叫来自火炮、激光制导炸弹和联合直接攻击弹药等火力的支援, 将来还有来自增强型制导炸弹和精确制导炮弹的支援。在美军发起的“沙漠风暴”行动中, 激光制导型灵巧炸弹

成为了精确轰炸的制胜法宝。由于宝石路 II 型激光制导炸弹成本较高且易受天气限制, 采用 GPS 制导的联合直接攻击弹药越来越受到作战人员的青睐。

联合直接攻击弹药 (JDAM) 和目标定位指示传递系统 (TLDHS) 都严重依赖于使用 GPS 来定位目标坐标, 因此 GPS 干扰机的广泛应用随之而来。萨达姆·侯赛因曾购买一批俄罗斯制 Aviaconversia GPS 干扰机意图干扰美军的 GPS 制导武器。尽管该计划没有发挥有效作用, 但是随着技术的发展, GPS 干扰机必将成为 GPS 制导武器的噩梦。当 GPS 被干扰时, TLDHS 靠

收稿日期: 2012-06-20

修回日期: 2012-07-19

基金项目: 航空科学基金(2010ZC13012); 总装重点实验室基金项目

作者简介: 陈亮亮(1988—), 男, 山东泰安人, 硕士生, 研究方向为无人机协同对地攻击。

不精确的自身定位方法获得目标定位时误差将非常大。同时,仅靠 GPS 制导的武器对于攻击运动目标没有很好的作战效果。

波音公司对 JDAM 进行改进,研制出了激光制导型联合直接攻击弹药(LJDAM)。通过在其尾部装有制导套件的基础上加装激光导引头,LJDAM 可以截获和跟踪激光瞄准信号,从而增加武器的制导精度和抗干扰能力,同时具有较好的攻击机动目标的能力。

1 算法思路

激光制导武器可以依靠跟踪激光瞄准信号来修正目标位置信息,在这一过程中,激光指示器的照射控制尤为重要。当前激光指示器的开机时间主要凭借炸弹落下时摩擦空气的声音或者是根据算法计算时间来确定。但是,地面激光指示器的灯泡寿命是有限的,并且为了保证有效的激光指示需要耗费大量的电能,同时激光告警器很容易探测到激光指示器的存在,这就使操作者的安全受到极大威胁。综合以上考虑,在使用激光制导武器时,有必要对激光指示器的照射时间进行控制,在保证制导精度的前提下,尽可能降低能源损耗和操作员的风险。

在制导过程中,武器和地面操作者之间能保持通讯连接,武器系统使用自身的 GPS 和 INS 可以实时跟踪自己的位置,根据控制算法中实际协方差信息和期望协方差信息对比,实时判断并计算激光指示器开机时间,以降低激光照射总时间。

为了更好地保护激光指示器的安全,同时整个系统保持一定制导精度和合理效费比的考虑,本文设计了一种新的激光照射系统。在这个系统中,激光目标指示器的默认状态是关闭的,只有武器需要时,才对目标进行一次简短的激光照射^[1]。

武器需要用卡尔曼滤波器持续跟踪自身位置、速度,通过一个反馈控制系统制导到目标,这个控制系统需要使用武器的位置、速度信息和目标位置信息。目标位置和协方差信息由地面观测者推算得到^[2]。

如图 1 所示,本文要提出的方法是武器尽可能地使用自身 INS/GPS 组合卡尔曼滤波器制导,随时间推移,弹目矢量的协方差将不断增加,当误差将要影响系统精度时,武器可以要求对目标进行一段激光束照射,得到一个相对精确的当前目标方向和协方差向量,将这一量测数据与武器中的数据组合估计。激光测量到的数据相当于量测更新,这个估计类似卡尔曼滤波中一种特殊的更新循环,提高了系统的精度^[3]。

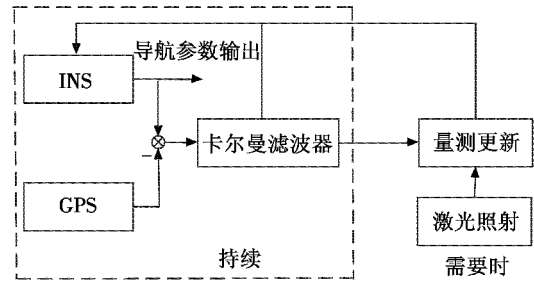


图1 基于滤波更新思想算法示意图

Fig. 1 Algorithm based on filter updating

2 算法分析

在惯性系下,武器 W 和目标 T 的状态,惯性系下武器位置协方差 P_w ,其数值是通过卡尔曼滤波器给出的。 P_T 是惯性系下目标位置的协方差,它是一个预测值,在实际应用中,通常由地面的观测者给出。

在武器坐标系中,武器位于坐标原点,武器目标矢量为 $D = T - W$ 。为了计算弹体坐标系中弹目矢量的误差,本文采用一个随机向量线性组合方差的标准结果:如果 $z = Ax + By$,其中 x, y 是协方差为 P_x 和 P_y 的高斯分布随机向量,则 z 的协方差由 $P_z = AP_xA^T + BP_yB^T$ 得出。 P_D 是武器坐标系下目标位置协方差,这是一个极为重要的统计量, P_D 决定了确保武器能命中目标的误差椭圆大小。在每一时间步长内,控制算法将判断它是否有能力确保将武器制导到目标处。如果不能,这意味着由 P_D 决定的误差已经足够大,武器将要求激光目标指示器照射目标^[4]。

对目标进行激光照射可以使武器精确地测量目标方位,但是不能给出有效的距离信息。对于距离估计,可以选取与武器目标矢量估计具有相同数量级的估值来表示。因此,一个新的武器目标矢量的估计 L ,其方向由测量目标反射激光束得到,数值与 D 的大小相同。由激光照射确定的目标位置的协方差为 P_L 。如图 2 所示,其数值在垂直于武器目标视线方向是有较大约束的,但是没有提供武器目标视线方向的距离信息。因此,武器目标视线方向的方差可以设定任意大小的数值,比如设为距离的 90%。3.2 节中将详细描述矢量 L 和协方差 P_L 。

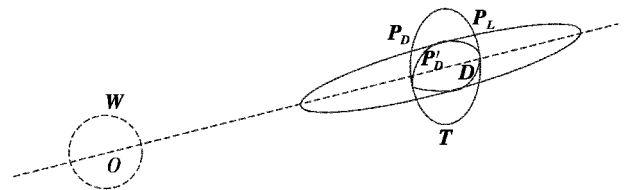


图2 武器坐标系下的协方差关系

Fig. 2 Covariance relation in body-fixed frame

再次回到武器坐标系,将来自导航系统的武器目标矢量和协方差(D, P_D)及来自激光目标指示器的估计(L, P_L),采用卡尔曼滤波的思想进行最优估计得到(D', P'_D)。

$$D' = P_D(P_L + P_D)^{-1}L + P_L(P_L + P_D)^{-1}D \quad (1)$$

$$P'_D = (P_L^{-1} + P_D^{-1})^{-1} \quad (2)$$

式(1)~式(2)等同于卡尔曼滤波中的更新循环

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k/k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k/k-1}) \quad (3)$$

$$P_k = K_k R K_k^T + (I - K_k H)P_{k/k-1}(I - K_k H)^T \quad (4)$$

用(D, P_D)代替(\hat{X}_k, P_k),让(L, P_L)代替(Z_k, R),量测矩阵 $H = I$ 。则用(D', P'_D)去更新(D, P_D)。由 $D = T - W, P_D = P_T + P_W$, 则 $W' = T - D', P'_W = P'_D - P_T$, 可以更新武器的最新位置。从而改进了运行中武器的估计精度。

3 模型建立

3.1 坐标系

在地固惯性框架下,选取任一点 O 为原点建立“东北天”坐标系。在武器坐标系中,本文使用以武器的质心为原点的两种坐标系^[5]: 1) 弹体直角坐标系,是武器的纵轴为 y 轴的直角坐标系; 2) 弹体极坐标系, r 为极半径, α 为方位角, β 为俯仰角。

将协方差阵 P 从惯性系下转换到弹体系下,使用下面转换公式

$$P_b = C P_i C^T \quad (5)$$

$$P_i = C^T P_b C \quad (6)$$

式中,下标 b 和 i 分别表示弹体系和惯性系。

从弹体极坐标系转换到弹体直角坐标系的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \sin \alpha \cos \beta \\ r \cos \alpha \cos \beta \\ r \sin \beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

协方差矩阵 P 从极坐标系到直角坐标系的转换关系为

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha \cos \beta & r \cos \alpha \cos \beta & -r \sin \alpha \sin \beta \\ \cos \alpha \cos \beta & -r \sin \alpha \cos \beta & -r \cos \alpha \cos \beta \\ \sin \beta & 0 & r \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\alpha \\ \sigma_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

因此 $P_b = Q P_{r\alpha\beta} Q^T$, 这里

$$Q = \begin{bmatrix} \sin \alpha \cos \beta & r \cos \alpha \cos \beta & -r \sin \alpha \sin \beta \\ \cos \alpha \cos \beta & -r \sin \alpha \cos \beta & -r \cos \alpha \cos \beta \\ \sin \beta & 0 & r \cos \beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.2 矩阵度量函数的选取

本文设计的激光指示器开机时间的关键在于武器

目标矢量协方差与期望协方差的对比。武器自身卡尔曼滤波器中的估计协方差阵 P_D 随着滤波的进行,协方差 P_D 不断更新。因此,开机时间可以通过比较估计协方差矩阵 P_D 和期望协方差矩阵 P_d 之间的差别 ΔP 来计算。比较两个矩阵之间的差异有多种度量方法,如常用的矩阵 2 范数、列范数、行范数、Frobenius 范数、矩阵的迹、行列式以及矩阵的奇异值分解等^[6]。

协方差矩阵 P_D 可以用不确定性椭圆表示。如果估计协方差 P_D 的椭圆(虚线)超出期望协方差 P_d 的椭圆(实线)所包含的范围时,如图 3a 所示,或者部分超出期望协方差 P_d 的椭圆所包含的范围时,如图 3b 所示,表明实际的武器目标矢量估计协方差超过了期望协方差,此时应进行激光照射;如果估计协方差 P_D 的椭圆被期望协方差 P_d 的椭圆所包含时,如图 3c 所示,则表明 P_D 已满足 P_d 的需求,此时实际协方差没有超出期望协方差。

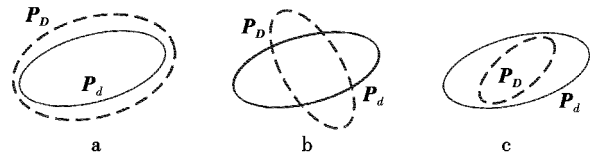


图3 期望协方差与实际协方差的几何关系

Fig. 3 Geometric relation of expected covariance and actual covariance

本文选择矩阵的迹来度量期望协方差 P_d 与估计协方差 P_D 的差别:

$$\Delta P = f(P_D, P_d) = -\text{tr}[P_d - P_D] \quad (10)$$

其中, $\text{tr}(\cdot)$ 为矩阵求迹运算, $f(P_D, P_d)$ 表示是否进行激光照射。当期望协方差 P_d 未完全包含 P_D 时, $f(P_D, P_d) > 0$, 见图 3a、图 3b, 需要激光照射; 而当 P_d 完全包含 P_D 时, $f(P_D, P_d) < 0$, 如图 3c 所示, 不需要激光照射。期望协方差 P_d 一般根据实际火控解算所需的跟踪精度进行选取。

3.3 计算程序

给出在惯性系下武器和目标的位置估计(W, P_W)和(T, P_T), 跟踪算法计算流程如下。

1) 获得武器目标矢量和协方差分别为

$$D_b = C(D_i - R_0) \quad (11)$$

$$P_{D,b} = P_{W,i} + P_{T,i} \quad (12)$$

2) 将武器目标矢量和协方差转换到弹体坐标系

$$D_b = C(D_i - R_0) \quad (13)$$

$$P_{D,b} = C P_{D,i} C^T \quad (14)$$

3) 激光指示器照射目标得到的方位信息和方差为($\alpha_L, \sigma_{\alpha_L}$)和($\beta_L, \sigma_{\beta_L}$), 激光束不提供距离信息, 计算时采用与 D 相同数量级的数值, 选取 $(r_L, \sigma_{r_L}) = (|D|,$

$0.9r_L$)。

4) 武器目标矢量的激光量测协方差矩阵为

$$P_{L, \text{rad}} = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 & 0 \\ 0 & r_L^2 \cos^2 \sigma_{\alpha_L} & 0 \\ 0 & 0 & r_L^2 \sigma_{\beta_L}^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

5) 将弹目矢量的激光量测从弹体极坐标系转移到弹体直角坐标系。

$$L_b = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_L \sin \alpha_L \cos \beta_L \\ r_L \cos \alpha_L \cos \beta_L \\ r_L \sin \beta_L \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$P_{L,b} = Q P_{L, \text{rad}} Q^T \quad (17)$$

6) 将激光束的量测和原始武器目标矢量估计进行最优估计, 将两者采用卡尔曼滤波的思想进行最优估计得到 $(D', P_{D'})_b$ [7]。

$$D'_b = P_{D,b} (P_{L,b} + P_{D,b})^{-1} L_b + P_{L,b} (P_{L,b} + P_{D,b})^{-1} D_b \quad (18)$$

$$P_{D',b} = (P_{L,b}^{-1} + P_{D,b}^{-1})^{-1} \quad (19)$$

7) 将改进后的武器目标矢量估计从武器弹体坐标系转换到惯性坐标系。

$$D'_i = C^T D'_b + R_b \quad (20)$$

$$P_{D',i} = C^T P_{D',b} C \quad (21)$$

8) 由改进后的武器目标矢量估计和武器位置估计即可得到改进后的目标位置估计。

$$W'_i = T_i - D'_i \quad (22)$$

$$P_{W',i} = P_{D',i} - P_{T,i} \quad (23)$$

4 仿真与结果分析

在 Matlab 环境下对上述算法进行仿真验证。该仿真采用的制导武器具有 GPS/INS 和激光双模制导方式, 武器可以与激光指示器进行通信, 可以根据需要对目标进行照射。建立该制导武器弹道模型。该激光制导武器的弹道如图 4 所示。

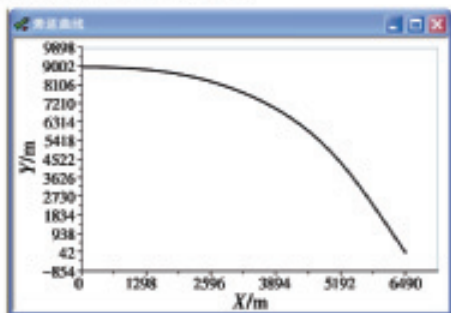


图4 激光制导武器的弹道

Fig. 4 Trajectory of laser guided weapon

用不确定椭圆表示武器、目标、武器目标矢量等协

方差信息, 采用卡尔曼滤波更新的思想, 对新的武器目标矢量进行组合估计, 仿真之后得到的协方差关系如图 5 所示。

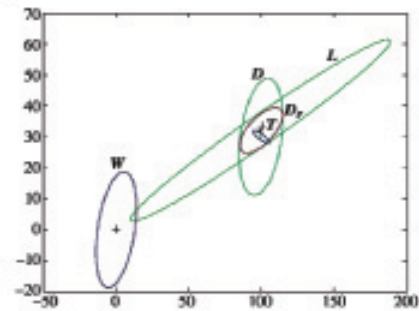


图5 武器、目标和武器目标矢量协方差关系图

Fig. 5 Covariance relation of weapon, target and weapon-to-target vector

图中: W 为武器位置协方差, T 为目标位置协方差, D 为组合了 W 和 T 的弹目矢量协方差, L 为激光量测协方差, D_p 为修正后的组合了 D 和 L 的弹目矢量协方差。该仿真结果验证了本文提出的通过将激光量测矢量 L 和弹目矢量 D 按照类似卡尔曼滤波中更新循环的思想组合成新的弹目矢量估计是可行的。

在整个弹道中, 选取某任意 t 时刻的数据, 分析进行激光照射后, 该时刻前后的武器位置和协方差对比如下所示。

t 时刻采用激光量测估计前后武器位置数据为

$$P_{W_i} = \begin{bmatrix} 615.04 & 0 & 0 \\ 0 & 23.04 & 0 \\ 0 & 0 & 23.04 \end{bmatrix};$$

$$P'_{W_i} = \begin{bmatrix} 603.0389623 & 0.001783304 & 0.00104645 \\ 0.001783304 & 21.03693548 & -0.001798275 \\ 0.00104645 & -0.001798275 & 21.03894476 \end{bmatrix}。$$

t 时刻采用激光量测估计前后武器位置数据为

$$W_i = \begin{bmatrix} 32.16808576 \\ 149.4847673 \\ 18006.41471 \end{bmatrix}; W'_i = \begin{bmatrix} 30.63533476 \\ 145.6808047 \\ 17975.94552 \end{bmatrix}。$$

通过上面对比可以发现, 激光照射修正后, 将激光对目标的量测与武器自身估计进行组合后, 武器目标矢量协方差减小, 因此武器位置协方差减小, 武器位置更新, 武器位置精度得到提高。

5 结束语

本文为激光制导武器提供了一种缩短对目标激光照射总时间的目标跟踪方法。在该算法中, 武器可以

(下转第 32 页)

[2] 马云红,周德云. 飞行器低空突防威胁建模与航迹优化算法[J]. 火力指挥与控制,2004,29(5):31-33.

[3] 张冲,朱凡,张健,等. 飞行器三维突防航迹快速生成方法[J]. 电光与控制,2008,15(12):33-37.

[4] 许立军,鲜勇,杨其,等. 基于 A* 算法的多线程并行航迹规划方法研究[J]. 电光与控制,2009,16(9):33-36.

[5] 王琦. 飞行器航迹规划与航迹评价算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

[6] 宋建梅,李侃. 基于 A* 算法的远程导弹三维航迹规划算法[J]. 北京理工大学学报,2007,27(7):613-617.

[7] 丁明跃,郑昌文,周成平,等. 无人机飞行器航迹规划

[M]. 北京:电子工业出版社,2009:46-57.

[8] 穆中林,鲁艺,任波,等. 基于改进 A* 算法的无人机航路规划方法研究[J]. 弹箭与制导学报,2007(1):297-300.

[9] 李锐,刘占辰,荆献勇. 基于启发式算法的无人机三维航迹规划仿真研究[J]. 电光与控制,2009,16(8):27-31.

[10] 李士波,孙秀霞,李海军. 多约束条件下的飞行器航迹规划算法[J]. 电光与控制,2007,14(2):34-37.

[11] 周志刚. 航空综合火力控制原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008:297.

(上接第 22 页)

与激光指示器进行通信,激光指示器的默认状态是关闭的,只有当武器需要时才要求对目标进行照射。对目标方位的量测用来改进武器目标矢量估计,进而通过对卡尔曼滤波的反馈改进自身的惯性状态估计。通过缩短激光照射时间,该算法可以增加激光照射单元的安全系数,也可以提高导航系统中的位置精度。该算法通过改进激光制导武器自身的卡尔曼滤波算法,可以在 GPS 被干扰的环境中对目标进行精确打击。新型增强型宝石路 III 可以进行多目标坐标信息装订,在飞行过程中可以随时更改攻击目标。本文提出的方法为该攻击模式提供了解决方案。

上面讨论的只是各矢量估计的空间坐标和协方差,在任何实际导航系统中,卡尔曼滤波器的状态 x_k 不仅仅包含空间坐标,还包括速度、旋转角、角速度等其他变量。而本算法中使用的位置的协方差 P_w 仅包含武器位置 3 个状态,要从滤波器中提取实时的协方差,以及组合估计后如何将修正后的协方差更新到卡尔曼滤波中也是一个需要解决的问题^[8]。关于激光指示器照射总时间减少多少,开关机极限时间以及单指示器照射多目标的可行性问题还需进一步研究。同时,新型的激光制导武器具备了攻击过程中更改攻击目标的能力,如何采用本文提出的减小激光指示器照

射时间的算法,还需进一步的改进和研究。

参 考 文 献

[1] 万德钧,房建成,王庆. GPS 动态滤波的理论、方法及其应用[M]. 南京:江苏科学技术出版社,2000.

[2] 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.

[3] 陆彦,周志刚,夏英明. 航空火力控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,1994.

[4] 付新华,王健. 多机协同多目标攻击的目标分配和攻击排序[J]. 火力与指挥控制,2006,31(3):75-77.

[5] 周洪仁,敬忠良,王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京:国防工业出版社,1991.

[6] 卢建斌,胡卫东,郁文贤. 基于协方差控制的相控阵雷达资源管理算法[J]. 电子学报,2007,35(3):402-408.

[7] SHERLOCK B G, KAKAD Y P, FREEMAN B J. A target tracking algorithm that reduces designation time for laser guided weapons[C]//Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, 2005, 5810:150-157.

[8] 王林,彭辉,朱华勇,等. 应用无人机跟踪地面目标——最新研究进展[J]. 系统仿真学报,2010(s1):172-177.

