

## 激光引信炸点控制精度分析

李玉钊, 刘岩, 陈曦, 沙沙, 郭娟

(北京遥感设备研究所, 北京 100854)

**摘要:** 前向激光引信可以实现对目标距离的持续探测, 并利用距离信息控制炸点, 炸点控制偏差是影响防空导弹作战性能的关键指标, 因此需要对激光引信的炸点控制精度进行分析。基于制导引信一体化(GIF)和交会段匀速运动的假设, 分析利用时序测距进行炸点估计的全局可观性, 获得测距值在满足零均值加性高斯分布误差时炸点控制精度的克拉美罗界(CRLB), 仿真结果验证了所得结果的正确性, 并通过数值计算方法对影响炸点控制精度的脱靶量、起爆角、空间采样率等系统参数进行了分析。这可为距离高分辨激光引信的设计提供参考。

**关键词:** 激光引信; 炸点控制; 制导引信一体化; 克拉美罗界

**中图分类号:** TJ43<sup>+</sup>9.2    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1206004

## Precision analyses of point-of-burst control based on laser fuze

Li Yuzhao, Liu Yan, Chen Xi, Sha Sha, Guo Juan

(Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The forward looking laser fuze could detect target range persistently, use range information to control the point-of-burst. The deviation of point-of-burst control is the key indicator that affecting the operational performance of air defense missile. Therefore, it is necessity to analyze the precision of point-of-burst control based on laser fuze. Under the assumption that guidance integrated fuzing (GIF) and uniform motion in the intersection stage, the global observability of point-of-burst was estimated based on sequential ranging. Then the Cramer-Rao lower bound(CRLB) of point-of-burst control precision was obtained when the ranging data met estimation errors of zero-mean additive Gaussian distribution. The system parameters such as miss-distance, initiation angle and spatial sampling rate which all influenced the control precision of point-of-burst were analyzed through numeric calculation. It provided reference for the design of high resolution laser ranging fuze.

**Key words:** laser fuze; point-of-burst control; guidance integrated fuzing; Cramer-Rao lower bound

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

基金项目: 总装预先研究基金(41419050201)

作者简介: 李玉钊(1979-), 男, 研究员, 硕士, 主要从事引信方面的研究。Email: lyz\_lf@163.com

## 0 引言

利用制导引信一体化(Guidance Integrated Fuzing, GIF)技术可以前向探测目标并进行炸点控制,实现公式化的自适应目标炸点计算<sup>[1-3]</sup>。GIF 技术是以提高弹药作用可靠性及引战配合效率为目的,基于信息共享、结构兼容、部件共用、功能互补原则,在综合考虑引信与导引头在工作体制、探测视场、交会状态、目标及环境信息特征情况下,进行结构与电路融合设计,实现对目标准确识别、有效跟踪、实时精确起爆的一体化系统设计技术<sup>[4]</sup>。

GIF 技术的本质是一种综合利用弹上信息的起爆控制技术。由于制导系统测量得到目标信息较多、测量的时间比较长,可以为炸点控制提供有用的参数。参考文献[4]提出利用导引头测量的距离和角度信息计算炸点,参考文献[5-6]提出利用导引头提供的转率信息结合激光引信测距信息来计算炸点。但通常导引头的波束宽度是固定的,在弹目交会的几十米以外,扩展目标就可能已充满波束以致导引头难以继续保持对目标的角度测量,从而导致炸点控制精度不够高。参考文献[6-7]提出跟踪目标特征点的方法进行持续角度跟踪并藉此进行炸点控制,这不仅需要预知目标在相对速度方向上投影的长度,而且需要找到准确的目标特征点,但目标点的选取是较复杂的。此外,上述文献均没有提到制导系统在交会前可提供相对速度和起爆角的前提下,在近距交会段单纯利用激光引信信息进行炸点控制的方法,也未涉及激光引信的距离测量精度、测量周期、作用距离、交会参数等对炸点控制精度的影响。

在交会段,弹目相对运动通常认为是匀速直线运动,弹目距离的变化规律由相对速度、脱靶量等参数决定。利用激光引信测距值就可获得与炸点控制有关的切向距离、脱靶量等信息。

文中在制导系统提供相对速度和起爆角的前提下,只利用前向大视场激光引信进行高分辨率的距离测量实现炸点控制,建立了关于弹目位置参数的距离时间函数。在此基础上,分析了距离测量方法计算炸点的全局可观性,给出了测距值存在满足零均值加性高斯分布误差时炸点控制的克拉美罗界(Cramer-

Rao lower bound, CRLB),并通过炸点偏差 CRLB 的推导及数值计算对炸点偏差精度进行分析。

## 1 全局可观性分析

文中从参数解的唯一性角度对炸点估计的可观性进行分析,即在确定交会状态时,利用给定的距离值可以唯一得到对应的炸点。炸点计算中,由于防空导弹的战斗部动态飞散角前倾,即在目标达到脱靶点之前启动,因此对弹目接近区域的距离数据分析具有现实意义。

采用 GIF 技术,在弹目交会前,制导系统可提供相对速度  $v_r$ 、起爆角  $\varphi$  等信息,可辅助激光引信确定炸点。设交会段的  $v_r$  不变,记导弹运动轨迹上与目标相距最近的点为脱靶点,该点与目标的距离为脱靶量  $\rho$ ,导弹初始测量位置与脱靶点的距离为初始切向距离  $x$ ,如图 1 所示,则目标与引信的距离  $r(t)$  为:

$$r(t) = \sqrt{(x - v_r t)^2 + \rho^2} \quad (1)$$

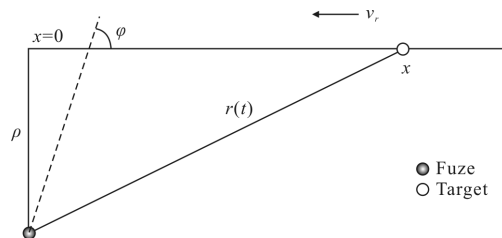


图 1 引信与目标的几何关系

Fig.1 Geometry relationship between fuze and target

实际应用中引信需要在  $\rho > 0$  的情况下才能准确启动,且引信启动时满足  $x - v_r t \geq 0$ ,以初始切向距离对应的时刻为参考时刻  $t=0$ ,设交会前的时间区域内任意 2 个时刻  $t_i, t_{i+j}$  的距离分别为  $r(t_i), r(t_{i+j})$ ,由距离关于时间的函数为递减的性质可得:

$$r(t_i) > r(t_{i+j}) > 0 \quad (2)$$

联解 2 个距离值对应的公式(1)得到参量唯一解,确定  $t_i$  时刻引信距炸点的启动延时  $\tau_i$ :

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{r_i^2 - \frac{r_i^2 - r_{i+j}^2}{(t_{i+j} - t_i)v_r^2}} \\ x &= \frac{r_i^2 - r_{i+j}^2}{(t_{i+j} - t_i)v_r} + v_r(t_i + t_{i+j}) \\ \tau_i &= \frac{x - t_i v_r - \rho \arctan \varphi}{v_r} \end{aligned} \quad (3)$$

## 2 炸点估计的 CRLB 及仿真

### 2.1 炸点估计的 CRLB

激光引信炸点控制的关键技术就是高分辨率的距离测量和数据处理。如今,固体激光器、微片激光器、光纤激光器、半导体激光器等分别可以产生约 0.5~20 ns 的窄脉冲<sup>[8]</sup>,利用激光调制技术也可以实现亚米级的距离分辨率<sup>[9]</sup>,在弹载体积下的大视场激光引信作用距离可达数十米,非线性最小二乘估计、Kalman 滤波等方法也已广泛应用于数据处理。文中分析了参数解的唯一性条件,但是当距离测量存在误差时,仅利用 2 个测量值求解得到的炸点可能存在较大偏差,而利用多个距离测量值进行优化估计则可以提高炸点估计精度。当距离测量误差服从加性零均值高斯分布时,非线性最小二乘估计得到的炸点位置为无偏估计量,文中给出无偏估计下炸点控制的 CRLB 并作为该方法的炸点估计理论依据。

关于参数  $\theta=[\rho \ x]^T$  的离散方程为:

$$r[n]=\sqrt{(x-v_r t_n)^2+\rho^2}, n=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中:  $t_n$  是第  $n$  次测量的时间,记  $r[n]$  的观测值为  $\tilde{r}[n]$ ,即:

$$\tilde{r}[n]=r[n]+w[n] \quad (5)$$

式中:  $w[n]$  是服从高斯分布的零均值观测误差,误差均方根为  $\sigma_d$ 。则  $\tilde{r}[n]$  的条件概率密度函数可表示为:

$$\rho(\tilde{r}; \theta)=\frac{1}{(2\pi\sigma_d^2)^{N/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_d^2} \sum_{n=1}^N (\tilde{r}[n]-\sqrt{(x-v_r t_n)^2+\rho^2})^2\right\} \quad (6)$$

参数  $\theta$  的 CRLB 可以通过矩阵  $I(\theta)$  求逆得出<sup>[10]</sup>,即:

$$\text{var}(\hat{\theta}_i) \geq [I^{-1}(\theta)]_{ii}, i=1, 2, \dots \quad (7)$$

式中:  $I^{-1}(\theta)$  为  $2 \times 2$  的 Fisher 信息矩阵。

$$I(\theta)_{ij} = -E\left(\frac{\partial^2 \ln \rho(\tilde{r}; \theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j}\right) \quad (8)$$

矩阵  $I(\theta)$  为:

$$I(\theta) = \frac{1}{\sigma_d^2} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \frac{\rho^2}{(x-v_r t_n)^2+\rho^2} & \sum_{n=1}^N \frac{\rho(x-v_r t_n)}{(x-v_r t_n)^2+\rho^2} \\ \sum_{n=1}^N \frac{\rho(x-v_r t_n)}{(x-v_r t_n)^2+\rho^2} & \sum_{n=1}^N \frac{(x-v_r t_n)^2}{(x-v_r t_n)^2+\rho^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

当  $\rho > 0$  时,矩阵  $I(\theta)$  可逆,为:

$$I^{-1}(\theta) = F \times \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \frac{(x-v_r t_n)^2}{(x-v_r t_n)^2+\rho^2} & \sum_{n=1}^N \frac{\rho^2}{(x-v_r t_n)^2+\rho^2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$F = \frac{\sigma_d^2}{\left(\sum_{n=1}^N \frac{\rho(x-v_r t_n)}{(x-v_r t_n)^2+\rho^2}\right)^2 - \sum_{n=1}^N \frac{(x-v_r t_n)^2}{(x-v_r t_n)^2+\rho^2} \sum_{n=1}^N \frac{\rho^2}{(x-v_r t_n)^2+\rho^2}} \quad (11)$$

进而得到  $\rho$  和  $x$  的 CRLB

$$\begin{cases} \sigma_\rho^2 \geq F \sum_{n=1}^N \frac{(x-v_r t_n)^2}{(x-v_r t_n)^2+\rho^2} \\ \sigma_x^2 \geq F \sum_{n=1}^N \frac{\rho^2}{\sqrt{(x-v_r t_n)^2+\rho^2}} \end{cases} \quad (12)$$

$\rho$  和  $x$  是相互独立的交会参量,由公式(3)可知,可得启动延时  $\tau_i=0$  时对应的炸点估计偏差  $\sigma_p$  的 CRLB

$$\sigma_p^2 \geq \sigma_x^2 + \frac{1}{\tan^2 \varphi} \sigma_\rho^2 \quad (13)$$

### 2.2 炸点估计方法

采用曲线拟合的最小二乘算法进行交会估计,由公式(4)可得:

$$r_n^2 = x^2 - 2xv_r t_n + v_r^2 t_n^2 + \rho^2, 1 \leq n \leq N \quad (14)$$

构建线性方程  $y_n = a' + b' t_n$ , 其中  $y_n = r_n^2 - v_r^2 t_n^2$ ,  $a' = x^2 + \rho^2$ ,  $b' = -2xv_r$  可得:

$$Y = Ab \quad (15)$$

式中:  $Y = [y_0, \dots, y_{N-1}]^T$ ,  $A = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ t_0 & \dots & t_{N-1} \end{bmatrix}^T$ ,  $b = [a' \ b']^T$ 。

利用  $\hat{b} = (A^T A)^{-1} A^T Y$  得到  $b$  的最小二乘估计  $\hat{b}$ , 然后再求得  $\hat{x}$  和  $\hat{\rho}$ , 并以此计算启动延时  $\hat{\tau}$  是否等于 0, 即当满足公式(16)时引信启动战斗部。

$$\hat{x} - t_i v_r - \hat{\rho} \arctan \varphi = 0 \quad (16)$$

### 2.3 炸点估计 CRLB 仿真验证

对公式(13)进行仿真验证,给定参数  $\theta=[\rho \ x]^T$  为  $(15 \text{ m}, 45 \text{ m})^T$ ,  $v_r=1000 \text{ m/s}$ , 距离数据测量间隔  $t_s=0.1 \text{ ms}$ 。引信持续测量目标,从  $x=45 \text{ m}$  处到脱靶点处的距离数据,即  $\varphi=90^\circ$ 。假设观测值  $\tilde{r}[n]$  服从公式(5)对应的分布,在每个  $\sigma_d$  取值下,进行 256 次弹目交会仿真,每次交会中引信测得距离数据样本并由其进行炸点估计,对 256 次交会的炸点估计数据进行均方误差(MSE)的统计。图 2 给出了不同  $\sigma_d$  条件下的  $\sigma_p$  和与 CRLB 的对比结果,可见二者呈近似线性

关系,且仿真误差曲线接近 CRLB 曲线,图 2 所示结果也验证了 CRLB 推导结果的正确性。

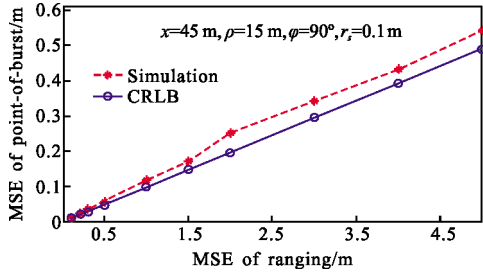


图 2 炸点估计的仿真 MSE 与 CRLB 的对比

Fig.2 Comparison between the simulation MSE and the CRLB for estimating point-of-burst

### 3 炸点估计性能分析

CRLB 推导结果显示,炸点控制偏差与脱靶量  $\rho$ 、初始切向距离  $x$ 、数据测量点数  $N$ 、起爆角  $\varphi$ 、相对速度  $v_r$ 、数据采样率  $t_s$  等参数有关,但没有明显的比例关系。文中接下来主要通过 CRLB 的数值计算来分析这些参数对炸点估计精度的影响。其中,假设  $\tilde{r}[n]$  服从公式(6)对应的分布且炸点偏差 CRLB 数值计算结果依据公式(13)得出。

#### 3.1 引信测量参数

距离测量周期  $t_s$ 、相对速度  $v_r$ 、初始切向距离  $x$ 、数据测量点数  $N$  为引信相关参数。

(1) 炸点控制误差并不直接受  $t_s$  和  $v_r$  影响,而是受空间采样间隔  $r_s=t_s v_r$  的影响。这说明,不论目标运动速度是多少,只需在其运动轨迹上进行适当的距离采样,就可估计交会信息并控制炸点,不受距离数据采样先后、快慢的影响。

(2) 空间采样间隔密度和炸点控制误差均方根呈负相关,由概率理论可知,当空间采样率  $r_s$  提升  $n$  倍,炸点偏差均方根误差降低  $\sqrt{n}$ 。但实际上不能无限提高采样率  $r_s$  来降低炸点偏差,一方面受模糊距离、激光器重频、数字运算规模及计算误差等制约,另一方面,引信的测量噪声是带宽受限的,高于其带宽的采样频率的积累增益会下降。

(3) 对于初始切向距离  $x$ ,取值大有利于提升精度,但在  $x$  大于  $20\rho$  后,对炸点估计精度提升不再明显,从图 3 和后续的图 5 中可以看出。

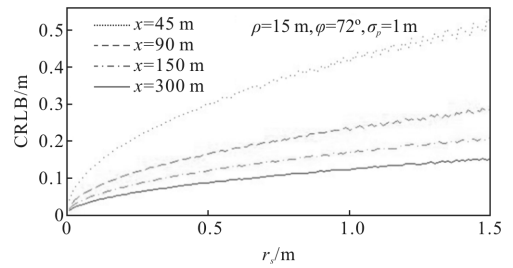


图 3 引信测量参数对 CRLB 的影响

Fig.3 CRLB under different fuze parameters

#### 3.2 脱靶量

与脱靶量相关的信息,主要集中在交会阶段,即距离由接近变远离的曲率部分,空间采样间隔应该有效反映该段的曲线特征。对于小脱靶情况(例如,0~3 m),距离变化曲率非常陡峭,如图 4 所示。公式(17)是弹目距离相对切向距离的二阶导数,在过脱靶点时其导数值为  $-\rho^{-0.5}$ ,所以小脱靶时需要提高引信的空间采样率。

$$\frac{\partial^2 r[n]}{\partial x} = \frac{-\rho^2}{(x^2 + \rho^2)^{3/2}} \quad (17)$$

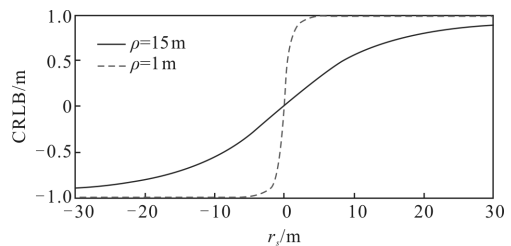


图 4 弹目距离相对切向距离的一阶导数

Fig.4 Missile-to-target range first-order derivative to tangential range

CRLB 数值计算结果如图 5 所示,在小脱靶时,炸点估计精度随着  $r_s$  增大出现较大波动,这正是因为采样间隔在脱靶点附近的采样不足所致。

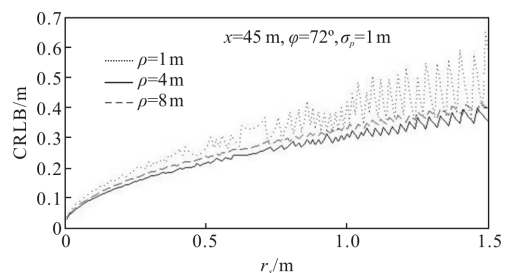


图 5 小脱靶量时炸点估计 CRLB 的抖动

Fig.5 Fluctuation of CRLB for estimating point-of-burst under small miss-distance

### 3.3 起爆角

一般情况下起爆角  $\varphi < 90^\circ$ ，提前于交会点引信启动会造成测距数据截断。图 6 可以看到，起爆角  $\varphi$  越接近  $90^\circ$ ，炸点控制精度越高，但当起爆角  $\varphi < 45^\circ$  时炸点控制误差明显增加。实际应用中，当防空导弹对付高速目标(例如, 10~25 Ma)时，一般起爆角会很小，此时要求引信炸点控制精度很高，而且高速弹头目标散射面积一般比较小，引信不易跟踪大作用距离，提高引信空间采样率和测距精度是可行的途径。

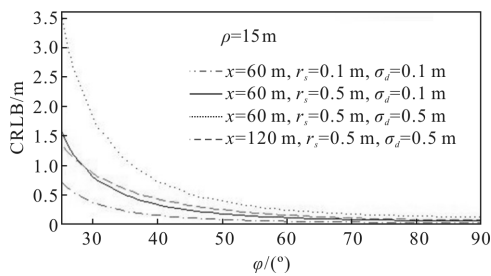


图 6 不同起爆角的炸点估计 CRLB

Fig.6 CRLB for estimating point-of-burst under different actuation angles

## 4 结论

文中分析了在 GIF 技术中利用激光引信测距进行炸点控制的全局可观性，得出距离接近时区间内无误差的任意 2 个不同时刻取值与炸点参数的唯一对应关系，推导了距离测量存在加性零均值高斯误差时炸点控制的 CRLB，并与交会参数为  $[\rho, x]=[15, 45]$  的仿真统计进行了对比验证。利用数值计算方法分析了空间采样率、脱靶量、轨迹提取长度、起爆角等因素对炸点控制 CRLB 的影响，结果表明：(1) 当其他参数确定时，距离估计精度与炸点精度呈线性关系；(2) 提升空间采样率有助于炸点精度提升；(3) 当其他参数确定时，小脱靶或小起爆角时，炸点精度会下降。文中的结果可为距离高分辨激光引信进行炸点控制提供参考。

### 参考文献：

[1] Pan Xi, Cui Zhanzhong. Full digital smart fuze on air target [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 19 (4): 386-389.  
 [2] Zhang Bin. Analysis of fuze-warhead coordination technology for effectively damaging multi-targets [J]. Modern Defence

Technology, 2015, 43(1): 39-45. (in Chinese)  
 张斌. 有效应对多种类目标的引战配合技术途径分析[J]. 现代防御技术, 2015, 43(1): 39-45.  
 [3] Yan Hanxin, Jiang Chunlan. Research on terminal efficiency of air-air missile against hypersonic weapons with GIF [C]// 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2010: 262-265.  
 [4] Chopper K, Jaeger H, Stephens L, et al. Guidance integrated fuzing analysis and simulation[C]//First IEEE Conference on Control Applications, Dayton, OH: IEEE, 1992: 750-755.  
 [5] Liu Bin, Fan Yangyu, Zhou Junwei, et al. A burst control algorithm based on imaging guidance and laser ranging [J]. Journal of Detection & Control, 2012, 34 (2): 57-60. (in Chinese)  
 刘斌, 樊养余, 周军伟, 等. 基于成像导引/激光测距的起爆控制算法[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(2): 57-60.  
 [6] Xu Junfeng, Jiang Chunlan, Mao Liang, et al. Coordination technology of ranging-imaging guidance integrated fuzing and aimable warhead [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1794-1800. (in Chinese)  
 许俊峰, 姜春兰, 毛亮, 等. 测距成像一体化引信与可瞄准战斗部配合技术[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1794-1800.  
 [7] Tu Jianping, Peng Yingning. Air-air missile IR imaging fuze and its fuzing control algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(3): 244-248. (in Chinese)  
 涂建平, 彭应宁. 空空导弹红外成像引信及其起爆控制算法[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 244-248.  
 [8] Wang Bin, Sun Hongtao, Yu Yongji, et al. High power acousto-optic Q-switched master oscillator power amplifier [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45 (12): 1205003. (in Chinese)  
 王斌, 孙洪涛, 于永吉, 等. 高功率声光调 Q 主振荡功率放大器[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1205003.  
 [9] Chen Huimin, Jia Xiaodong, Cai Kerong. Laser Fuze Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 184-189. (in Chinese)  
 陈慧敏, 贾晓东, 蔡克荣. 激光引信技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 184-189.  
 [10] Feng Dingwei, Wu Siliang, Wei Guohua. Performance analyses of approach for estimating the miss distance parameters [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(1): 94-99. (in Chinese)  
 冯定伟, 吴嗣亮, 魏国华. 基于多普勒频率的脱靶量参数估计性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(1): 94-99.