

# 激光引信对舰载雷达目标启动区算法研究

路明<sup>1</sup>, 臧伟<sup>1</sup>, 韩仲瑶<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 海军试验基地, 山东 龙口 264000)

**摘要:**针对配备激光引信的反辐射导弹(ARM)攻击舰载雷达目标引信启动区复杂的问题,以典型弹目交会方式为例,提出了一种“触发线法”,建立激光引信启动区模型,对激光引信启动点数学期望、散布方差等求解,以提高引战配合效率。

**关键词:**激光引信;舰载雷达;弹目交会;启动区

**本文引用格式:**路明,臧伟,韩仲瑶.激光引信对舰载雷达目标启动区算法研究[J].兵器装备工程学报,2016(6):153-157.

**Citation format:**LU Ming, ZANG Wei, HAN Zhong-yao. Study on Algorithm of Laser Fuze Start Area to Shipborne Radar [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(6):153-157.

中图分类号:TJ43+9.2

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2016)06-0153-05

## Study on Algorithm of Laser Fuze Start Area to Shipborne Radar

LU Ming<sup>1</sup>, ZANG Wei<sup>1</sup>, HAN Zhong-yao<sup>2</sup>

(1. Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China;

2. Naval Experimental Base, Longkou 264000, China)

**Abstract:** Aiming at solving the problem that when anti-radiation missile (ARM) equipped with laser fuze attacking shipborne radar and the start area is complex, and by taking the typical encounter way of missile and target as an example, a “trigger line” method was put forward and the model of laser fuze start area was built. The efficiency of coordination between fuze and warhead will be improved through solving the mathematical expectation and variance of laser fuze start point.

**Key words:** laser fuze; shipborne radar; encounter of missile and target; start area

仅配备触发引信反辐射导弹(ARM)攻击舰载雷达目标,由于目标运动,直接撞击目标的概率不高,为了提高对目标的毁伤效率,新型反辐射导弹加装激光近炸引信<sup>[1-2]</sup>。由于目标运动及军舰上层建筑结构复杂,为保证触发引信优先,激光引信启动区的确定更为复杂。本文以典型弹目交会方式为依据,提出了一种适用于分析多支路共面窄波束激光引信启动特性的“触发线法”,通过激光引信启动点数学期望、散布方差求解,实现引信启动区与战斗部动态杀伤区最大程度重合。

### 1 典型的弹目交会方式

弹目交会方式多种多样,综合对ARM弹道分析,并考虑实际的作战情况,将ARM攻击舰载雷达目标的弹道分为以下6种情况。

第一种弹道:如图1所示,导弹从舰首一侧在雷达上空掠过,在落入到舰船另一侧海水的过程中起爆。这种弹目交会方式主要针对舰首侧前方的相控阵雷达、火控雷达,激光引信的探测视场会依次扫过主甲板、舰岛上层建筑的侧面或顶面。

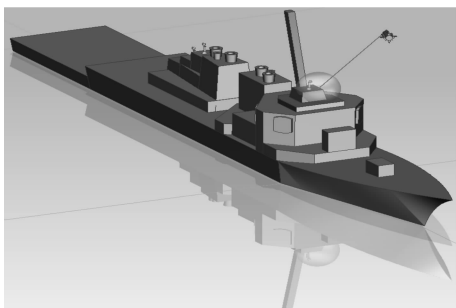


图1 第一种弹目交会示意图

第二种弹道:如图2所示,导弹从舰首一侧在雷达上空掠过,在落入到舰船同一侧的海水过程中起爆。这种弹目交会方式主要针对舰首侧前方的相控阵雷达、火控雷达,激光引信的探测视场依次扫过主甲板、舰岛上层建筑的侧面或顶面。

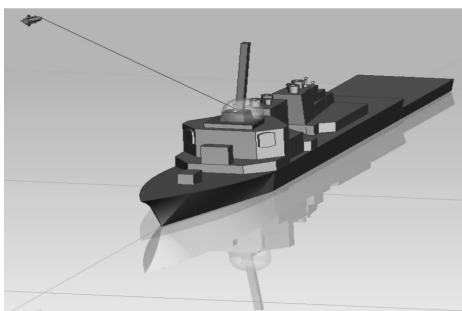


图2 第二种弹目交会示意图

第三种弹道:如图3所示,导弹从舰中一侧在雷达上空掠过,在落入到舰船另一侧海水的过程中起爆。这种弹目交会方式调整了导弹的进入方向,目的是将舰船目标在行进过程中转弯等效为直线运动,主要针对位于舰中后部的火控雷达以及对空搜索雷达。

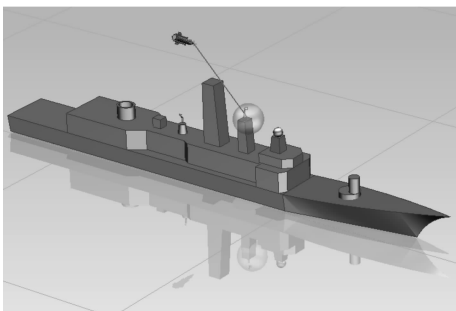


图3 第三种弹目交会示意图

第四种弹道:如图4所示,导弹从舰尾船舷一侧,在落入到舰船另一侧海水的过程中起爆。这种弹目交会方式目的是将舰船目标在行进过程中的转弯等效为直线运动,主要针对舰尾的两部火控雷达。

第五种弹道:如图5所示,导弹从舰尾船舷一侧,在落入到舰船同一侧的海水的过程中起爆。这种弹目交会方式目的是将舰船目标在行进过程中的转弯等效为直线运动,主要

针对舰首侧后方的相控阵雷达以及舰尾的两部。

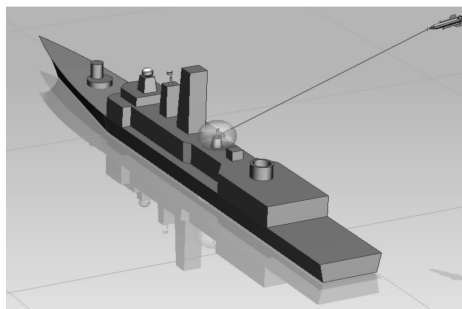


图4 第四种弹目交会示意图

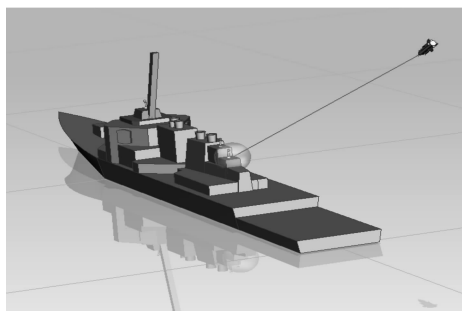


图5 第五种弹目交会示意图

第六种弹道:如图6所示,导弹以较大的俯仰角从高空落下,掠过舰岛上层建筑上方。在落入舰尾或目标后方海水的过程中起爆。这种弹目交会方式针对舰岛上层建筑顶面以及舰尾的火控雷达以及对空搜索雷达,激光引信的探测装置的信号会随着激光束扫过舰体表面的起伏而发生变化。

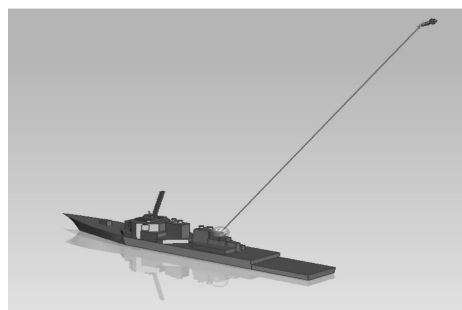


图6 第六种弹目交会示意图

以上6种弹目交会方式兼顾了舰船目标在行进过程中的直线运动与转弯,具有一定的代表性与实际意义。

## 2 激光引信启动区建模

建立激光引信启动区数学模型时考虑到以下几点因素<sup>[3-4]</sup>:

- 1) 激光引信光学视场方向;
- 2) 舰载雷达目标局部等效散射截面;
- 3) 激光引信对舰载雷达目标最大作用距离;

4) 导弹与目标的相对姿态与相对运动速度;

除以上参数外还需要考虑这些参数的随机散布范围。若精确计算激光引信启动区随上述因素的变化将十分复杂<sup>[5,6]</sup>。因此在进行启动区分析时忽略引信信号发射与接收以及处理与积累的物理过程,引入引信触发线的概念。“触发线法”考虑了体目标效应、相对姿态变化、引信和目标的相对距离、相对运动速度等启动区修正因素,利用统计规律研究引信启动延时随启动距离的变化,能够反映一定的实际规律。

引信“触发线法”是相对激光引信光学视场所假设的一条角度随距离变化的曲线  $\Omega_f = \Omega_f(R)$ 。当舰船上具有一定反射面积的边缘点触及触发线时,引信开始积累信号,经过一定的延迟时间,起爆战斗部。由于激光束视场角很小,只有  $1 \sim 2^\circ$ ,所以引信的触发线很接近于引信的光学视场,并接近于一个常数。

### 3 多支路激光引信触发线求解

当激光引信为多支路探测时,相应的就有多条引信触发线。当光路数目为奇数时,认为光路与弹体子午面夹角为  $0^\circ$  的支路为主支路,其余支路为侧支路;光路数目为偶数时,不存在光路与弹体子午面夹角为  $0^\circ$  的支路,此时认为无主支路<sup>[4]</sup>。现以 5 支路激光引信作为研究对象。图 7 为激光引信探测视场分布正视图。图 8 为激光引信探测视场分布侧视图。

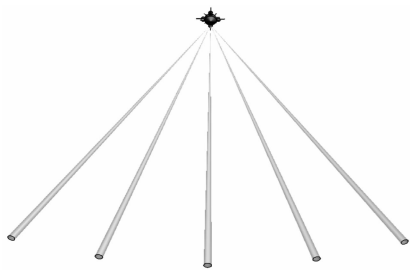


图 7 激光探测视场分布正视图

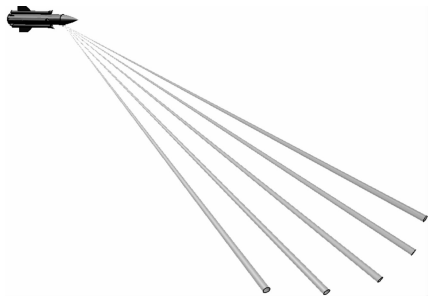


图 8 激光探测视场分布侧视图

激光引信触发线的表达式为

$$\Omega_f(R_i) = \Omega_0 + \Delta\Omega_f(R_i/R_{\max}) \quad (1)$$

式中:  $\Omega_0$  为引信探测前倾角;  $\Delta\Omega_f$  为触发线相对于  $\Omega_0$  的修正角;  $R_i$  为第  $i$  个触发点距离激光发射窗口的距离;  $R_{\max}$  为引信

对给定目标的作用距离;

由于激光直线性好,而且其激光束视场角小,所以主支路方向上激光引信触发线就是其探测前倾角  $\phi_0$ 。激光发射装置环导弹周向分布,侧支路与弹体子午面的夹角分别为  $\pm\phi_1, \pm\phi_2$ ,且侧支路与主支路激光束共面。因此所谓的多支路激光引信触发线实质上是广义面,是由主、侧支路共同构成的由有限条直线构成的类似平面。因此多支路共面窄波束激光引信探测视场实质上是与导弹赤道面成  $\phi_0$  角度,且圆周角为  $2\phi_2$  的扇形探测平面。

### 4 多支路激光引信启动点数学期望求解

以前文设定的第一种典型弹目交会方式为例,以火控雷达为目标,假设 ARM 要以近炸方式毁伤目标。分析激光引信启动特性,利用 UG NX 软件对弹目交会过程进行运动学仿真,得到如图 9 ~ 图 12 的弹目交会示意图。

如图 9 所示为激光引信在近区导引段,探测支路扫过位于舰首的舰炮,由于其相对于海平面高度与雷达所在舰岛高度不同,引信通过测高判断出探测到物体非目标,继续飞行。

当导弹飞行至如图 10 所示的位置,侧支路率先照射到舰岛上层建筑上表面边缘,但该位置并非触发点所在位置。导弹继续飞行至图 11 位置处,即当侧支路的探测距离或主支路的探测距离亦或两者探测距离皆发生突变时,说明激光引信已照射到舰载雷达目标的触发点。雷达的触发点即如图 12 所示的雷达所在舰岛上层建筑下表面的边缘点。此时,引信开始积累信号,经过适当延迟时间后,到达图 12 所示位置,此时弹目距离小于战斗部破片杀伤半径,可以实现对雷达目标的有效毁伤。

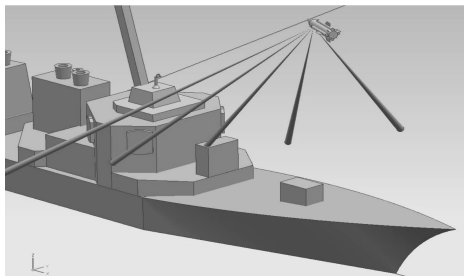


图 9 激光引信受舰载雷达周边设施干扰示意图

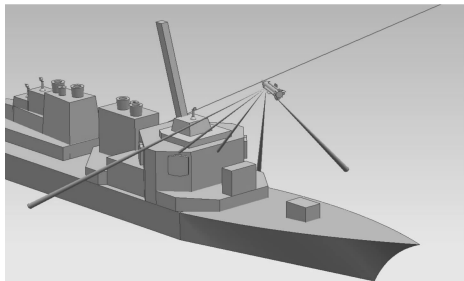


图 10 侧支路接触“触发点”时弹目交会示意图

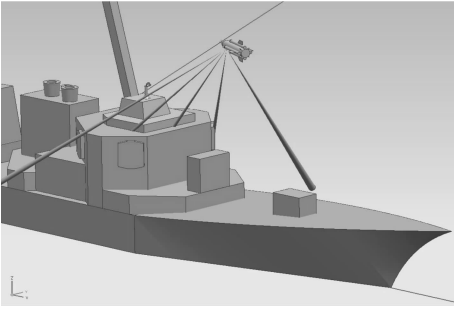


图 11 主、侧支路接触“触发点”时弹目交会示意图

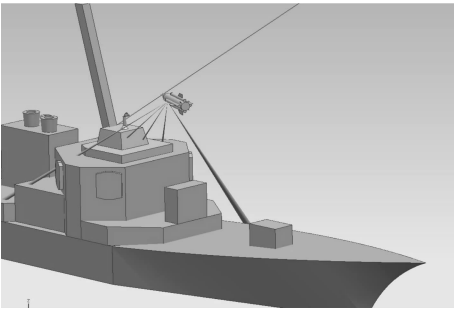


图 12 弹目交会过程中起爆点的位置

在上述过程中,关键在于计算当激光引信探测到触发点时战斗部中心在目标坐标系中的坐标,亦为引信启动点相对于目标坐标系的坐标<sup>[7]</sup>。虽然主支路与侧支路的有效探测距离相同,但是由于不同弹目交会情况下导弹俯角与偏航角存在差异,这将导致可能存在某一条侧支路先接触触发点或某几条支路同时接触触发点的情况发生。在这种情况下,认为当其中任意一条支路接触触发点时激光引信就开始作用,在该点处判断是否满足触发起爆条件。若不满足,则计算在当前弹目交会方式下的最佳起爆延时,直至弹目距离小于战斗部有效杀伤半径引爆战斗部毁伤目标。以上所述为激光引信在弹目交会过程中的启动特性。由于采用五支路激光引信,其主支路相比于侧支路与弹体子午面夹角为0,当导弹以一定偏航角飞向目标,相当于主支路的有效探测距离不及侧支路。因此在计算引信的启动点坐标时,要将主支路与侧支路分别进行讨论<sup>[8]</sup>。由主支路探测得到的启动点数学期望的求解方法为:

将战斗部视为环绕导弹周身的若干个质点以简化计算,因此主支路激光束的发射窗口在以战斗部中心为原点的弹体坐标系中的坐标为 $(x_{ml} \ 0 \ 0)$ ,则该激光发射装置在以战斗部为原点的目标相对速度坐标系中的坐标 $(x_{rl} \ y_{rl} \ z_{rl})$ 的表达式为

$$\begin{bmatrix} x_{rl} & y_{rl} & z_{rl} \end{bmatrix}^T = E^{-1} \begin{bmatrix} x_{ml} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{ml}E_{11} & x_{ml}E_{12} & x_{ml}E_{13} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

设雷达所在舰岛上层建筑下表面边缘有 $n$ 个触发点,其中第 $i$ 个触发点在以雷达天线馈源点为原点的目标坐标系中的坐标为 $(x_{Ti} \ y_{Ti} \ z_{Ti})$ ,则第 $i$ 个触发点在以雷达天线馈源点为原点的相对速度坐标系中的坐标 $(x_{Ro} \ y_{Ro} \ z_{Ro})$ 可以

写为

$$\begin{bmatrix} x_{Ro} & y_{Ro} & z_{Ro} \end{bmatrix}^T = A \begin{bmatrix} x_{Ti} & y_{Ti} & z_{Ti} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

由脱靶量及脱靶方位的定义,当触发点接触触发线时,二者可以用战斗部中心在以天线馈源点为原点的相对速度坐标系中的坐标 $(x_{Rb} \ y_{Rb} \ z_{Rb})$ 表示为

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{y_{Rb}^2 + z_{Rb}^2} \\ \tan\theta &= z_{Rb}/y_{Rb} \end{aligned} \quad (4)$$

则当第 $i$ 个触发点接触触发线时, $(x_{Rb} \ y_{Rb} \ z_{Rb})$ 可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_{Rb} & y_{Rb} & z_{Rb} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{Rb} & \rho\cos\theta & \rho\sin\theta \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

于是,当第 $i$ 个触发点接触触发线时,第 $i$ 个触发点在以战斗部中心为原点的相对速度坐标系的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{Ro} - x_{Rb} & y_{Ro} - \rho\cos\theta & z_{Ro} - \rho\sin\theta \end{bmatrix}$$

可以得到该触发点在以激光发射装置为原点的相对速度坐标系的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{Ro} - x_{Rb} - x_{ml}E_{11} & y_{Ro} - \rho\cos\theta - x_{ml}E_{12} & z_{Ro} - \rho\sin\theta - x_{ml}E_{13} \end{bmatrix}$$

将其转换到弹体坐标系内,得到坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_{mi} & y_{mi} & z_{mi} \end{bmatrix}^T = E \begin{bmatrix} x_{Ro} - x_{Rb} - x_{ml}E_{11} \\ y_{Ro} - \rho\cos\theta - x_{ml}E_{12} \\ z_{Ro} - \rho\sin\theta - x_{ml}E_{13} \end{bmatrix} \quad (6)$$

又因为当第 $i$ 个触发点接触触发线时,有如下关系:

$$x_{mi} = R\cos\Omega_f \quad (7)$$

$$y_{mi} = R\sin\Omega_f \quad (8)$$

式中 $R$ 为激光发射装置至第 $i$ 个触发点的斜距。

由此联立式(7)、式(8)可以得到:当第 $i$ 个触发点接触主支路引信触发线时,战斗部中心在以雷达天线馈源点为原点的目标相对速度坐标系中的横坐标为

$$\begin{aligned} x_{Rb} &= x_{Ro} - x_{ml}E_{11} \mp \frac{\cos\Omega_f \sqrt{E_{11}^2 \rho_i^2 - \rho_i^2 \cos^2 \Omega_f + \delta_i^2}}{E_{11}^2 - \cos^2 \Omega_f} + \\ &\quad \frac{\delta_i \cdot E_{11}}{E_{11}^2 - \cos^2 \Omega_f} \end{aligned} \quad (9)$$

式中:

$$\begin{aligned} \delta_i &= (y_{Ro} - \rho\cos\theta - x_{ml}E_{12})E_{12} + \\ &\quad (z_{Ro} - \rho\sin\theta - x_{ml}E_{13})E_{13} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \rho_i^2 &= (y_{Ro} - \rho\cos\theta - x_{ml}E_{12})^2 + \\ &\quad (z_{Ro} - \rho\sin\theta - x_{ml}E_{13})^2 \end{aligned} \quad (11)$$

将计算得到的点 $(x_{Rb} \ \rho\cos\theta \ \rho\sin\theta)$ 转化至目标坐标系中,即得到了在该弹目交会情况下激光引信对该型雷达启动点的坐标。

由侧支路探测得到的启动点数学期望的求解方法为:设侧支路激光束的发射窗口在以战斗部中心为原点的弹体坐标系中的坐标为 $(x'_{ml} \ y'_{ml} \ 0)$ ,则该激光发射装置在以战斗部为原点的目标相对速度坐标系中的坐标 $(x'_{rl} \ y'_{rl} \ z'_{rl})$ 的表达式为

$$\begin{bmatrix} x'_{rl} & y'_{rl} & z'_{rl} \end{bmatrix}^T = E^{-1} \begin{bmatrix} x'_{ml} & y'_{ml} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

由于引信各探测支路有效探测距离相等,而侧支路与弹体子午面之间有一定夹角。当ARM以一定偏航角飞向目

标,侧支路先扫过雷达目标的触发点,触发点都选择为舰岛上层建筑下表面边缘,因而侧支路较主支路探测到触发点的位置并无区别。设雷达所在舰岛上层建筑的第 $j$ 个触发点在目标坐标系中的坐标为 $(x'_{Tj} \ y'_{Tj} \ z'_{Tj})$ ,则第 $j$ 个触发点在以目标为原点的相对速度坐标系中的坐标 $(x'_{R0} \ y'_{R0} \ z'_{R0})$ 可以写为

$$[x'_{R0} \ y'_{R0} \ z'_{R0}]^T = A[x'_{Tj} \ y'_{Tj} \ z'_{Tj}]^T \quad (13)$$

由于脱靶量与脱靶方位是在脱靶平面内确定的已知量,所以计算触发点接触激光引信侧支路触发线时,战斗部中心在以天线馈源点为原点的目标相对速度坐标系中的横坐标表达式为:

$$x'_{Rb} = x'_{R0} - x'_{Rl} \mp \frac{\cos\Omega_f \sqrt{E_{11}^2 \rho_i'^2 - \rho_i'^2 \cos^2\Omega_f + \delta_i'^2}}{E_{11}^2 - \cos^2\Omega_f} + \frac{\delta_i' \cdot E_{11}}{E_{11}^2 - \cos^2\Omega_f} \quad (14)$$

$$\delta_i' = (y_{R0} - \rho \cos\theta - y'_{Rl})E_{12} + (z_{R0} - \rho \sin\theta - z'_{Rl})E_{13}$$

$$\rho_i'^2 = (y_{R0} - \rho \cos\theta - y'_{Rl})^2 + (z_{R0} - \rho \sin\theta - z'_{Rl})^2 \quad (15)$$

求得第 $i, j$ 触发点对应的战斗部中心在相对速度坐标系中的坐标后,引信启动点的数学期望值应取其最小值,并考虑引信在固有延时 $\tau_1$ 内移动的距离,即

$$m_x(\rho, \theta) = \min x_{Rb} + v_r \tau_1 \quad (16)$$

式中 $\tau_1$ 为引信收到超过灵敏度信号的時刻至引信给出起爆信号的时间间隔。

按照“触发线法”分析,引信的启动点沿相对速度坐标系 $x_y$ 轴的分布服从一维的正态分布。因此,得到该分布密度函数为

$$f_f(x_r | \rho, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x_r - m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (17)$$

式中 $\sigma_x$ 为激光引信启动点的散布。

以上所述为第一种弹目交会方式针对火控雷达的启动点数学期望的求解方法,其余弹目交会方式计算引信启动点期望的原理与之相似,该算法适用于激光引信条件下各种弹

目交会方式对各种舰载雷达目标的求解。

## 5 结束语

本文选取6种将舰船目标等效为在海面做匀速直线运动的典型弹目交会方式。以一种弹目交会方式为参考,分析自激光引信触发线接触雷达目标的触发点至引信引爆战斗部整个过程激光引信的工作情况。在此过程中求解激光引信各条探测支路启动点坐标,取其最小值作为引信启动点坐标,给出启动点数学期望以及散布。

## 参考文献:

- [1] 曲长文,陈铁柱. 机载反辐射导弹技术[M]. 北京:国防工业出版社,2010:122-124.
- [2] 诸德放,李友,曾建新. 爆破式空地反辐射导弹引战配合[J]. 弹道学报,2007,19(2):21-24.
- [3] JANE'S DEFEN. AGM-88 HARM(High-speed Anti-Radiation Missile)[J]. First edition Jane's Air-Launched Weapons,2009(31):54:98-103.
- [4] 李彦. 空地导弹激光近炸引信技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2004.
- [5] 陈梅荪,邓甲昊,孙伟,等. 反辐射雷达激光引信探测技术研究[C]//第十三届引信学术年会论文集. 出版社不详:[出版社不详],2003:288-291.
- [6] 桑会平,邓甲昊,胡秀娟. 脉冲激光引信弱回波信号数字检测技术研究[J]. 兵工学报,2007,28(4):420-424.
- [7] 史春波,马献华. 探测视场对激光引信作用距离影响分析[J]. 红外与激光工程,2007,S36(6):368-371.
- [8] 曲长文,李廷军,苏峰,等. 机载反辐射导弹效能评估[M]. 北京:国防工业出版社,2013:126-151.

(责任编辑 杨继森)