

## 基于激光成像雷达制导系统的仿真设计\*

马超杰,孙晓泉,李晓霞

(电子工程学院 705 室,安徽 合肥 230037)

**摘要:**介绍了激光成像雷达应用于制导系统中的优势,提出应用仿真技术辅助外差式激光成像雷达制导系统设计的方法。分析了激光成像雷达制导仿真系统的四个主要组成部分:光学部分、数据处理部分、通用库部分和稳定跟踪部分。结合不同环境、器件性能对系统的影响,具体分析各部分的模块并给出多种数学建模方案。最后指出该系统需要进一步完善的功能。

**关键词:**激光成像雷达; 系统仿真; 图像处理; 制导技术

**中图分类号:**TN249 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)06-0655-05

## Simulation designing of imaging laser radar guidance system\*

MA Chao-jie, SUN Xiao-quan, LI Xiao-xia

(Laboratory 705, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Predominance of imaging laser radar is introduced in guidance system. A plan that applying simulation with heterodyne imaging laser radar guidance system is presented, then its four important sections are analyzed: optics, data processing, general library, stabilization and tracking. Combining influence of different ambient and device performance parameters on this system, modules of every section are analyzed and multifold mathematical models are presented. It is indicated that further functions of this system are required in the end.

**Key words:** Imaging laser radar; System simulating; Image processing; Guidance technology

### 0 引言

精确制导武器在现代高技术战争中占有越来越重要的地位。在其多种制导技术中,采用激光成像雷达的制导技术是未来精确制导发展的重要方向。激光成像雷达作为多种数据搜集的传感器有许多其他被动式光电传感器及无线电雷达所不具备的优点。激光雷达具有极高的空间分辨率,能够对目标的回波强

度、距离、速度等特征进行多次精确测量,可以获得目标的多种实时三维图像(强度像、距离像、多普勒像)。采用这种末制导技术的导弹可以穿透伪装,高分辨率自动探测(ATD)和识别(ATR)战场目标,根据目标特征找出其薄弱点进行攻击(ASS),以最小的代价摧毁目标。但是激光成像雷达技术难度较高,其在制导系统中的应用更需要大量的实验。应用计算机数字仿真技术能够在一定程度上模拟出外场实验的结果,是激

收稿日期:2005-01-02; 修订日期:2005-03-18

\* 基金项目:国家 863 计划资助项目(2001AA131050,2001AA131090)

作者简介:马超杰(1981-),男,河北邯郸人,硕士生,主要研究方向为光学精确制导技术。

光成像雷达制导系统设计的新手段<sup>[1-3]</sup>。

## 1 系统仿真设计

激光雷达是激光技术与雷达技术相结合的产物,是无线电雷达技术在光波段的延伸。按回波信号探测方法可分为直接探测和外差探测两种。外差探测比直接探测的接收灵敏度高2个数量级,并且回波信号可以包含更多的信息,是激光成像雷达广泛采用的工作方式。本文以收发合置式激光外差(或相干)探测系统为基础进行激光成像雷达制导系统的仿真设计。

仿真系统按模块化设计,总体上可分为4大部分:光学部分、数据处理部分、通用库部分和稳定跟踪部分(如图1所示)。可以选择环境变量和配置各种模块参数来模拟不同环境的影响,方便直观地估计出多种工作特征数据,从而为激光成像雷达制导系统的开发研制提供了理论依据和设计工具。应用此系统能够方便快捷地预计设计中产生的问题,优化导引头性能,缩短实物研制的开发周期,节约外场试验成本。

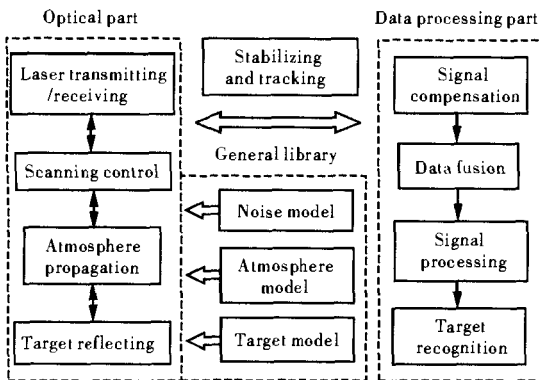


图1 激光成像雷达系统仿真框图

Fig.1 Imaging laser radar system simulating

## 2 系统仿真的数学建模

### 2.1 激光雷达模型

激光成像雷达的性能取决于激光雷达方程,这也是衡量其有效工作能力的重要指标。由于通常情况下,其观测的为静态目标或慢速移动目标,方程的数学表示可由下式给出:

$$P_r = \frac{P_t F K_t K_r \eta}{4\pi \theta_r^2 R^4} D^2 \psi T_a^2 \quad (1)$$

式中  $P_r$  是回波功率;  $P_t$  是发射功率;  $F$  是光束分布函数;  $K_t$  是发射光学系统透过率;  $K_r$  是接收光学系统透过率;  $\eta$  是接收系统的收集系数;  $T_a$  是单程大气透过率;  $\theta_r$  是激光束发散角;  $\psi$  是目标的激光雷达散射截面积;  $R$  是目标距激光雷达的距离;  $D$  是接收口径。当回波功率  $P_r$  为探测器接收的极限功率时,对应的目标距离  $R$  为其系统工作的最大距离。

### 2.2 光学传输模型

#### 2.2.1 激光发射与接收模型

在外差探测光学系统的设计中,各光学参量由信号混频的干涉条件来确定,还要考虑能量利用率,以充分利用信号光能量<sup>[4]</sup>。激光发射器特性与光束分布函数、束宽及瞄准误差等外部因素有关,可以根据实验测量数据选用均匀光束、爱里函数描述光束、高斯光束等模型进行设定。接收器特性由探测技术、各部件性能、灵敏度、探测器频响特性以及接收器瞄准误差等因素决定,需建立不同的设计模型。

#### 2.2.2 扫描控制模型<sup>[3]</sup>

对激光束的扫描控制是为了得到均匀的空间点阵。检流计和谐振镜低惯量扫描和旋转光楔扫描是目前应用于激光成像雷达的主要扫描技术,应根据其工作原理建立激光束扫描的过程模拟。对于工作在  $1 \mu\text{m}$  以下的激光也可采用无扫描的凝视型激光成像雷达体制进行模拟。激光雷达发射经周期性幅度调制的激光束,覆盖观察视场。回波信号经由以同样频率调制的像增强器进行光混频,产生与两者相移量成正比的直流电平,由其后的 CCD 阵列检测出混频后的图像信号。这种方法具有较大的凝视机场,并可获得较远的作用距离和较高的距离分辨率  $\Delta R$ :

$$\Delta R = \frac{c}{4\pi f_m \sqrt{SNR}} \quad (2)$$

式中  $c$  为光速;  $f_m$  为凝视型激光雷达调制频率;  $SNR$  为接收信号信噪比。

#### 2.2.3 大气传输模型

激光成像雷达的性能受大气传输特性的制约。由于大气的吸收、散射及大气湍流等线性非线性关系对光束质量产生影响,在实际处理过程中必须将激光复杂的大气传输特性进行具体分析,提出计算模型<sup>[5,6]</sup>。

由于激光具有极好的单色性,假定传输路径上大气均匀或分层均匀分布的情况下,其传播特性满足 Bouguer-Lambert 定律:

$$I(\lambda, L) = I(\lambda, 0)e^{-\sigma(\lambda)L} \quad (3)$$

式中  $I(\lambda, 0)$  和  $I(\lambda, L)$  分别是波长为  $\lambda$  的激光束的初始光强和在距离  $L$  处的光强;  $\sigma(\lambda)$  是波长的总衰减系数。发射和反射激光强度较弱,不出现非线性效应时,  $\sigma(\lambda)$  可表示为:

$$\sigma(\lambda) = \sigma_m + k_m + \sigma_a + k_a = \sigma + k \quad (4)$$

式中  $\sigma_m$  为大气分子散射系数;  $k_m$  为大气分子吸收系数;  $\sigma_a$  为气溶胶散射系数;  $k_a$  为气溶胶吸收系数。估算方法为:吸收系数  $k$ ,除了考虑与单色光波长相应谱线的吸收贡献外,在大气窗口区还应考虑大气分子 ( $H_2O$  和  $CO_2$ ) 的连续吸收。这部分已经建立了多种模型和近似表达式,可参阅相应的参考文献[5,6];散射系数  $\sigma$ ,大气分子对激光信号为瑞利散射,气溶胶散射近似为米散射,两者总衰减系数的经验公式表示为:

$$\sigma = \frac{3.912}{V_m} \left( \frac{0.55}{r_{\mu m}} \right)^q \quad (5)$$

波长修正因子  $q$  因能见度  $V_m$  而取不同的值。当能见度特别好 ( $V_m > 50$  km),  $q = 1.6$ ; 能见度为中等 ( $V_m \sim 10$  km),  $q = 1.3$ ; 能见度很差 ( $V_m < 6$  km),  $q = 0.585V_m^{1/3}$ [4];

在程序编制过程中可综合将上面的计算结果制成数表,利用查表法提高运算速度。

### 2.2.4 目标反射模型<sup>[1]</sup>

#### (1) 激光雷达散射截面 $\psi$

激光雷达散射截面  $\psi$  是沿着光路返回与目标界面相等光强度的全反射球截面。其计算公式可以表示为:

$$\psi = \pi \rho z^2 \quad (6)$$

式中  $\rho$  为球面反射系数;  $z$  为表面微面元半径。

实际目标面的均方粗糙度大于激光波长,反射信号的幅度分布具有双向反射分布函数 (BRDF) 的特性,应视为漫反射目标。具体又分为朗伯面和悬浮微粒散射体。

朗伯面是散射光强度遵循朗伯余弦定律的表面。小于激光雷达束宽的朗伯圆截面计算公式为:

$$\psi = 4\pi \rho_{2\pi} z^2 \cos^2 \theta = 4\rho_{2\pi} ds \cos^2 \theta \quad (7)$$

式中  $\rho_{2\pi}$  为表面半球反射率;  $\theta$  为激光束入射角度;  $ds$  为物体微面元在扫描方向上的投影面积<sup>[1]</sup>。对装甲、坦克等大于束宽的单目标测量时,目标激光截面为:

$$\psi = \pi \rho_{2\pi} \theta_T^2 R^2 \quad (8)$$

圆形杆状或电线等目标的截面积小但长度比激光束宽大,若  $D_w$  是目标的外径,目标激光截面为:

$$\psi = 4\rho_{2\pi} D_w \theta_T R \quad (9)$$

悬浮微粒散射体包括大气浮粒、雨、雪和其他颗粒,均具有后向散射特性,激光截面为:

$$\psi = \pi \theta_T^2 R^2 \omega \Delta R \quad (10)$$

式中  $\omega$  为大气后向散射系数,  $m^{-1} sr^{-1}$ ;  $\Delta R$  为激光成像雷达的距离分辨率,  $m$ 。

#### (2) 激光雷达所成目标像

激光雷达通过对目标的距离、速度及回波进行多次测量,可以获得目标的实时三维图像。其成像方法包括:角分辨距离成像 (ARRI)、速度角分辨扫描成像 (ARVI)、距离多普勒成像 (RDI)、特征频谱像以及多光谱像。本模型侧重于模拟根据角分辨率所成的距离像和强度像。强度像由目标特征和表面反射率决定,与可见光灰度图类似。距离像是根据激光雷达测得的“三维”数据(距离  $R$ 、方位角  $\beta$ 、俯仰角  $\gamma - \alpha$ ) 得出灰度图。

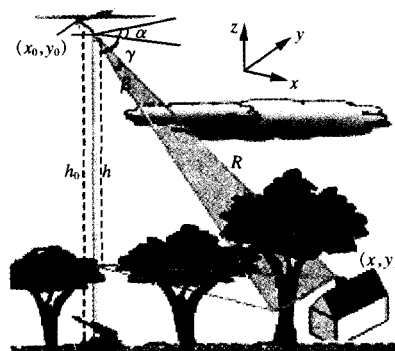


图2 激光成像雷达扫描几何关系图

Fig.2 Imaging laser radar scanning geometry

图 2 表示飞行器在位置  $p(x_0, y_0)$ 、激光成像雷达方位角为  $\beta$ 、俯仰角为  $\gamma$  时的扫描几何关系,坐标系如图中所示,  $x$  轴沿飞行器飞行方向并平行于地平面,  $y$  轴垂直于飞行器飞行方向并平行于地平面,  $z$  轴垂直于  $x, y$  平面向上,  $x, y, z$  构成右手螺旋关系。

由几何关系可以得到激光成像雷达扫描距离、扫描点位置、扫描点地形高度和激光雷达扫描角之间的关系方程<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} x_{mn} = x_0 + R_{mn} \cos\beta_m \cos(\gamma_n - \alpha) \\ y_{mn} = y_0 + R_{mn} \sin\beta_m \\ h_{mn} = h_0 - R_{mn} \cos\beta_m \sin(\gamma_n - \alpha) \end{cases} \quad (11)$$

式中  $m$  为侧向第  $m$  扫描点;  $n$  为纵向第  $n$  扫描点;  $(x_{mn}, y_{mn})$  为激光扫描点坐标;  $(x_0, y_0)$  为飞行器当前位置;  $R_{mn}$  为激光成像雷达扫描距离;  $h_{mn}$  为扫描点地形高度;  $h_0$  为飞行器当前飞行高度;  $\beta_m$  为激光雷达扫描方位角;  $\gamma_n$  为激光雷达扫描俯视角;  $\alpha$  为飞行器基准俯仰角。由  $(x_{mn}, y_{mn}, h_{mn})$  构成的三维数组即可重建目标的精确三维模型。

**2.3 通用资源库模型**

通用资源库(大气模型、噪声模型、目标模型)是指经过数值模拟仿真的具有较强通用性的资源集合。目前已有多种第三方软件可以提供其数值建模。大气模型的各种参数可以通过 FASCODE 和其他大气计算软件进行设定。

噪声模型主要包括背景噪声和探测器噪声;背景噪声是指在不考虑主动激光对抗的情况下,由太阳、大地以及其他辐射源的辐射进入接收视场造成背景“模糊”而引起的噪声;光电探测器的几种主要噪声为散粒噪声、热噪声、产生-复合噪声、热噪声及电流( $1/f$ )噪声。散粒噪声和热噪声在工程上可近似于带限白噪声。电流噪声的特点是噪声功率谱密度与频率成反比,当工作频率大于 1 kHz 时,这种噪声可不考虑。对于直接探测(非相干)脉冲激光雷达系统,由于脉冲持续时间短,接收器带宽相对较宽,由信号产生的散粒噪声和电流噪声可以忽略不计。

目标模拟采用已有的三维数字化地图并运用 AutoCAD、3DMAX 等三维图像处理软件对背景地物和目标进行数字建模,用三维数组  $S(x, y, z)$  作为物体数字化模型。可以加入多个干扰目标或实行简单伪

装以检验系统的抗干扰性能<sup>[8]</sup>。一般情况下,目标面的均方粗糙度大于激光波长,不同目标由于表面特性不同对入射激光的反射特性也不尽相同,可以用双向反射分布函数  $f_r$  来描述。双向反射分布函数  $f_r$  是方向-半球反射系数  $\rho_{2\pi}$  的  $1/\pi$  倍,而  $\rho_{2\pi}$  一般是可测量的,如用日立 V-3400 光谱光度计。结合地物方向-半球反射系数  $\rho_{2\pi}$  的数值和目标数字化模型便可较为真实地建立目标模型。

**2.4 数据处理算法**

数据处理按照所采用的处理芯片对回波接收模块取出的中频信号进行量化,考虑量化误差和处理精度使处理过程较为实际地反应真实情况,分为信号补偿、数据融合、信号处理、目标识别四个方面:

- (1)对大气传输模型中带来的附加干扰进行补偿、去除背景干扰噪声、探测器噪声(散粒噪声、热噪声、产生-复合噪声和响应不均匀噪声)及放大器噪声等因素在图像上产生的附加噪声。
- (2)同前视红外传感器、CCD 传感器或毫米波雷达等数据进行融合,提高图像识别能力。
- (3)对图像进行处理识别取出寻找目标,向稳定及跟踪模块送出调整信号(图 3)。

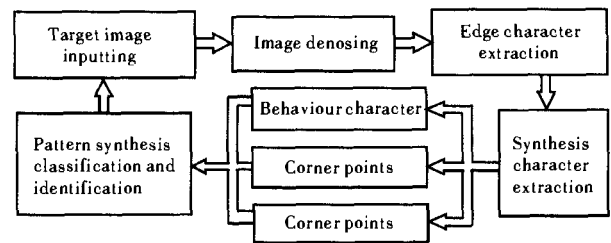


图 3 图像处理和目标识别原理  
Fig.3 Imaging processing and target identification

**2.5 稳定及跟踪模型**

导弹在空气中飞行的过程中,受大气湍流、高空

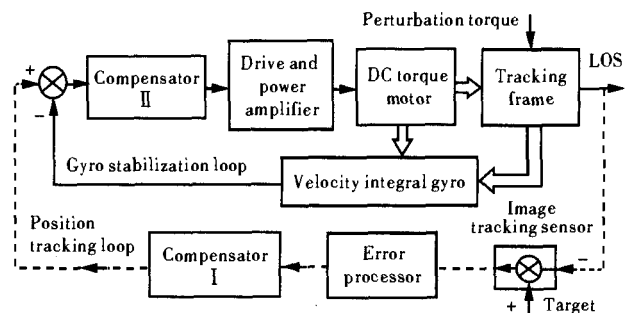


图 4 稳定跟踪系统  
Fig.4 Stabilization and tracking system

气流或平台高频线性力等影响,需要采取稳定闭环控制,运用系统控制理论建模,分析系统稳定性能。其控制原理方框图如图4所示(采用方位和俯仰两轴稳定),依此建立传递函数方框图编写稳定控制模块,并根据系统控制原理按照实际参数来仿真<sup>[9]</sup>。

### 3 结束语

本文设计的激光成像雷达制导仿真系统具有较强的可操作性,为实物设计中出现的问题提供了前期预见能力,为实物系统的有效性提供测评标准,具有十分重要的意义。该仿真系统整体已经构架完毕,并可完成阶段性初步仿真。接下来的工作是要进一步增加仿真功能,提供交互式的图形显示功能;通过选用不同环境、不同元件的大量实验,修正完善通用资源库(大气模型、噪声模型目标模型);研究新的图像处理和目标识别算法,提高信号处理速度等。

### 参考文献:

- [1] SUN Xiao-quan, LV Yue-guang. The Principle and Technology of Laser Countermeasure[M]. Beijing: China PLA Press(孙晓泉,吕越广.激光对抗原理与技术.北京:解放军出版社),2000.73-83.
- [2] NI Shu-xin, LI Yi-fei. Trend of laser radar for military[J]. Infrared and Laser Engineering(倪树新,李一飞.军用激光雷达的发展趋势.红外与激光工程),2003,32(2):111-114.
- [3] ZHOU Li-wei. Target Detection and Identification[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press(周立伟.目标探测与识别.北京:北京理工大学出版社),2002.225-229.
- [4] ZUO Bao-jun, ZHANG Ai-hong. Determination of optical parameters for laser heterodyne detecting system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology(左保军,张爱红.激光外差探测系统光学参量的确定.哈尔滨工业大学学报),2001,33(5):656-657.
- [5] WU Bei-ying. Practical Algorithm for Radiation Propagation in the Atmosphere[M]. Beijing: China Meteorological Press(吴北婴.大气辐射传输实用算法.北京:气象出版社),1998.2-9.
- [6] Tuer T W, Mudar J, Freeling J R, et al. Atmospheric Effects on Low-power Laser Beam Radiation Portion[R]. USA: AD-A095383, 1980.
- [7] WANG Guang-jun, TIAN Jin-wen, LIU Jian. The front-view imaging simulation of imaging laser radar and the obstacles identification approach[J]. Infrared and Laser Engineering(王广君,田金文,柳健.激光成像雷达前视成像仿真及障碍物识别方法研究.红外与激光工程),2001,30(6):463-465.
- [8] XU Chuan-gang, SONG Li-quan. Design and realization of infrared complicated scene simulation system[J]. Infrared and Laser Engineering(徐传刚,宋利权.红外复杂场景仿真系统的设计与实现.红外与激光工程),2005,34(2):242-243.
- [9] ZHANG Bing-hua, ZHANG Shou-hui. Electro-optical imaging tracking system[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press(张秉华,张守辉.光电成像跟踪系统.成都:电子科技大学出版社),2003.131-141.
- [10] ZHANG Xiao-hong, JIANG Jun. Mathematical modeling on detective ability of IR seeker[J]. Optical Technique(张晓宏,姜军.红外导引头探测能力的数学建模.光学技术),2000,26(5):388.
- [11] HAN Jie, ZHANG Jian-qi, HE Guo-jing. Estimation technology of the infrared smoke interference effect[J]. Infrared and Laser Engineering(韩洁,张建奇,何国经.红外烟幕干扰效果评价方法.红外与激光工程),2004,33(1):1-4.
- [12] XU Dai-sheng, LI Zhong-min, YANG Ying-ke. Field study of IR smoke's screening performance using imaging IR technique[J]. Infrared and Laser Engineering(徐代升,李仲敏,杨英科.用红外成像技术外场研究红外烟幕的遮蔽性能.红外与激光工程),2000,29(1):69-72.

(上接第654页)

进,梅建庭.现代烟幕对抗精确制导武器.海军大连舰艇学院学报),2005,28(2):44-46.

[5] CNENG Guo-cai. Tactical Missiles Guidance Method[M]. Beijing: National Defense Industry Press(程国采.战术导弹导引方法.北京:国防工业出版社),1996.

[6] LIU Long-he. Guidance Technology of Multi-mode Seeker[M]. Beijing: National Defense Industry Press(刘隆和.多模复合寻的制导技术.北京:国防工业出版社),1998.

[7] XIONG Xiao-wei, LIU Shang-qian. Effect evaluation on infrared aerosol screening smoke[J]. Systems Engineering and Electronics(熊晓伟,刘上乾.红外气溶胶烟幕干扰效果的定量评估.系统工程与电子技术),2001,23(2):38-39.