

草地的红外纹理建模与真实感绘制方法

柳 倩^{1,2,3,4}, 朱 枫^{1,3,4}, 郝颖明^{1,3,4}, 金增辉⁵, 付双飞^{1,3,4}

- (1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
4. 辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
5. 空军驻沈阳地区代表室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 纹理是使图像具有视觉真实感的重要因素, 红外纹理生成是场景红外成像仿真的重要组成部分, 也是真实感场景仿真的迫切需求。以在图像平面直接生成具有真实感的景物红外纹理图像为目标, 提出了一种草地的红外纹理建模与真实感绘制方法, 从模拟组分温度分布和空间结构形态两方面开展研究。首先, 考虑土壤-植被-大气间的热交换过程, 建立红外辐射的耦合求解模型; 其次, 构建各组分的空间分布模式; 最后, 将已经求解的红外辐射数据映射到图像空间, 生成具有真实感的红外纹理图像。对近距离或“放大”状态下草地红外纹理的视觉效果进行了模拟, 理论分析和仿真结果表明: 所提出的红外纹理模拟方法具有一定的合理性和有效性。

关键词: 纹理建模; 真实感; 草地; 红外辐射; 耦合模型

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-1100-06

Research on modeling and rendering of realistic infrared texture of grassland

Liu Qian^{1,2,3,4}, Zhu Feng^{1,3,4}, Hao Yingming^{1,3,4}, Jin Zenghui⁵, Fu Shuangfei^{1,3,4}

- (1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Opto-Electronics Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
4. Key Lab of Image Understanding and Computer Vision, Shenyang 110016, China;
5. Military Representative Office of Air Force in Shenyang, Shenyang 110016, China)

Abstract: Texture is one of the most important factors to create visual realism in images. Infrared texture generation plays an important role in the field of infrared imagery simulation, and provides an effective way to satisfy the urgent need of realistic scene simulation. In order to generate realistic infrared textures directly in image space, a novel method for modeling and rendering realistic infrared texture of grassland was proposed. It mainly researched modeling the temperature field and the structure morphology of grassland. Firstly, the radiation transfer process in soil-vegetation-atmosphere system was analyzed, which was expressed in the coupled infrared radiation model. Secondly, the spatial distribution pattern of

收稿日期: 2012-08-13; 修订日期: 2012-09-14

基金项目: 中国科学院创新基金(CXJJ-11-S100)

作者简介: 柳倩(1984-), 女, 博士生, 主要从事红外成像仿真方面的研究。Email: liuqian@sia.cn

导师简介: 朱枫(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事机器人视觉与图像处理方面的研究。Email: fzhu@sia.cn

grassland were simulated. Finally, infrared radiation properties were mapped to image space to generate realistic texture images. The infrared textures of grassland under close or magnification observation state were simulated. Theoretical analysis and simulation results justify the effectiveness and resonableness of the proposed method.

Key words: texture modeling; realistic; grassland; infrared radiation; coupled model

0 引言

自然地表的基本覆盖类型主要包括裸土、植被、水体三大类。多数情况下,地表是由多种覆盖类型混合而成的,以土壤-植被混合最为常见。草地是一种典型的土壤-植被混合地表,其红外辐射特性研究在场景仿真^[1-2]、农业、遥感监测、军事等领域都有明确的应用需求。

国外对红外纹理的研究相对较早,大部分都是基于统计方法生成纹理图像^[3-4]。国内在红外纹理方面的研究也很有限,邵晓鹏^[5]建立了红外物理纹理的统计模型,描述红外纹理在空间上的统计分布特性;赵灿^[6]利用可见光图像或实测反演纹理数据作为数据源,对均值温度进行调制,添加纹理细节信息,增强红外图像的真实感。总之,现有的纹理生成模型只针对典型背景进行了纹理特征的预测和模拟,仿真方法很难全面覆盖并普遍适用于任意类型的纹理图像。

文中提出了一种草地的红外纹理建模与真实感绘制方法。草地中各材质组分(土壤、植被)的热物理、光谱特性存在差异,加之草地本身具有不可忽略的空间结构特征,构成了其红外纹理的物理成因。文中从这一物理本质出发,对其红外纹理进行模拟,主要内容包括红外辐射建模和纹理结构建模两部分。在某些对绘制精度要求不高的场合,可以采用仿真生成的纹理图像进行二维纹理映射,在一定程度上增强场景仿真的真实感。

1 混合地表红外辐射模拟现状

目前土壤-植被混合地表的红外辐射特性研究大多基于统计模型^[7],各材质组分的辐射特性利用独立模型求解,混合地表的辐射特性与各组分具有如下关系:

(1) 当每一组分的辐射场都服从独立同分布时,

混合地表的辐射场同样具有随机分布特性,其统计参数可用各组分进行显式表达;

(2) 当混合地表中各组分以“团”或“簇”的形式密集混合在一起时,应先将该“团”作为一个对象,按照(1)的方法处理,然后再将不同的“团”作为独立的对象,继续按照(1)的方法处理即可。

独立求解模型将混合地表中的各组分视为相对独立的对象,计算其与外界环境的热交换,而忽略了地表内部各组分间的热通量交互。这种简化处理方法很容易导致温度场求解的偏差。

2 草地红外辐射建模

草地是土壤、植被两种材质彼此相邻、交错构成的混合地表,其辐射交换机理相比于单一覆盖类型的地表要复杂得多,除了外界的太阳辐射,各组分也互为辐射源。参考文献[8]考虑辐射能量在土壤-植被-大气系统内的传输过程,建立红外辐射温度场的耦合求解模型:

$$\begin{aligned} F_{\text{canopy}} &= F_c(T_c, T_g) = 0 \\ F_{\text{groundy}} &= F_g(T_c, T_g) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

土壤和植被的温度分布可通过求解二元方程组而获得。图1是草地与外界、草地内部辐射能量传输示意图。图中各能量项的物理意义如下: Q_{sun} 指到达冠层顶的太阳短波辐射; Q_{sky} 指到达冠层顶的大气长波辐射; Q_{cbsun} 指冠层吸收的直射太阳辐射; Q_{cbsky} 指冠层吸收的直射大气辐射; Q_{crsun} 指冠层吸收的土壤反射太阳辐射; Q_{crsky} 指冠层吸收的土壤反射大气辐射; Q_{gsun} 指土壤吸收的太阳透射辐射; Q_{gsky} 指土壤吸收的大气透射辐射; LE_{c-a} 指冠层与空气的潜热交换; LE_{g-a} 指土壤与空气的潜热交换; H_{c-a} 指冠层与空气的感热交换; H_{g-a} 指土壤与空气的感热交换; LE_{g-c}/LE_{c-g} 指冠层与土壤的潜热交换; H_{g-c}/H_{c-g} 指冠层与土壤的感热交换; M_c 指冠层自身热辐射; M_g 指土壤自身热辐射; G_c 指冠层向下的热传导通量; G_g 指土壤向下

的热传导通量。

土壤与植被逐时热平衡方程为：

$$F_c(T_c, T_g) = \text{VegF} \cdot R_{nc} - (H_c + LE_c + G_c) \quad (2)$$

$$F_g(T_c, T_g) = (1 - \text{VegF}) \cdot R_{ng} - (H_g + LE_g + G_g) \quad (3)$$

式中： VegF 为植被覆盖率； R_{nc} 为植被冠层净辐射； R_{ng} 为土壤表层净辐射。 H 、 LE 与 G 为感热、潜热和热传导分量，下标 c 和 g 分别代表植被和地表。各辐射分量的计算公式详见参考文献[8]。

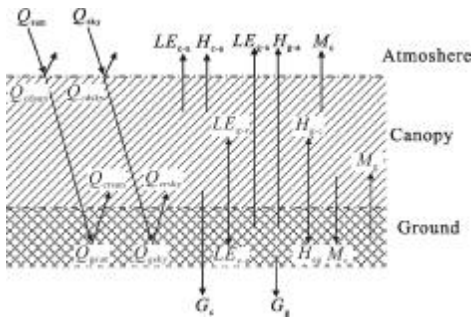


图 1 土壤-植被混合地表辐射能量传输示意图

Fig.1 Schematic diagram of energy transfer for soil-vegetation mixed terrain surface

混合地表的温度场受地表物性参数、外界气象条件等多种因素的影响，这些因素的微小扰动都会导致温度场的变化。研究表明^[5]：当各参数为独立同分布的随机变量时，地表温度场、辐射场同样具有随机分布特性。文时暂作简化处理：假设各影响因素（如吸收率、发射率、风速等）均服从正态分布，利用自然地表温度场统计模型^[5]计算得到土壤和植被温度场也服从正态分布，即

$$\begin{aligned} T_c &\sim N(\bar{T}_c, \sigma_{T_c}^2) \\ T_g &\sim N(\bar{T}_g, \sigma_{T_g}^2) \end{aligned} \quad (4)$$

同样，辐射能量场也服从正态分布：

$$\begin{aligned} E_c &\sim N(\bar{E}_c, \sigma_{E_c}^2) \\ E_g &\sim N(\bar{E}_g, \sigma_{E_g}^2) \end{aligned} \quad (5)$$

3 草地纹理结构建模

草地的纹理结构反映草地中各组分的生长和分布特点，直接影响着红外纹理的视觉效果，因此建立合理的纹理结构模型是决定仿真图像逼真与否的关键。

草地纹理结构包括组分空间分布状态和植物个

体形态两部分。随着观察距离的不同，纹理结构要素对视觉效果的影响程度也不同。近距离观察（小于 50 cm）时，植物个体形态是主要影响因素；一般观察距离（100 cm 左右）的视觉效果也与组分空间分布状态有关。

文中模拟草地在近距离或“放大”状态下进行观察的效果，其纹理结构建模分两个步骤完成：组分空间分布建模和个体形态建模。

3.1 组分空间分布建模

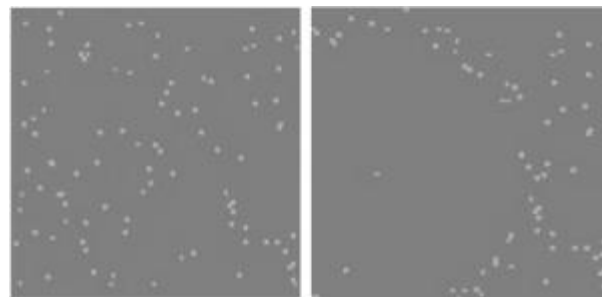
目前确定组分位置的方法主要有三种：人为给出、实际测量、利用统计学中的随机分布。文中采用第三种方法，草的位置采用点模式生成模型来创建。假设图像尺寸为 $\text{Height} \times \text{Width}$ ，草的位置 (x_i, y_i) 按公式(6)确定：

$$\begin{aligned} x_i &= 1 + (\text{Height} - 1) \times \text{rand}() \\ y_i &= 1 + (\text{Width} - 1) \times \text{rand}() \end{aligned} \quad (6)$$

为了模拟真实场景中草的丛生效果，还需对均匀分布的点的位置进行扰动。通常使用 Hopkins 指数^[9]，即给定区域内随机指定的某一草体与离其最近的草体间的平均距离和整个区域内随机指定的某一草体与其最近的草体间的平均距离之比 H 来控制草体的分布情况。

$$H = \frac{\text{avg}(\min_i(\|q - p_i\|)_q)}{\text{avg}(\min_j(\|p_j - p_k\|)_j)} \quad (7)$$

式中： q 为给定区域内随机指定的草模型； p_i 为给定区域内除 q 之外的草模型； p_j 为整个草地中随机指定的草模型； p_k 为整个草地中除 p_j 之外的草模型。



(a) 随机均匀分布的草 (b) $H=2$ 时草的分布图

(a) Random distribution of grass (b) Grass distribution with $H=2$

图 2 草的位置分布图

Fig.2 Spatial distribution of grass

图 2(a)、(b) 分别为某一区域内 $H=1$ 和 $H=2$ 时草的分布图。 $H=1$ 时点完全是随机均匀分布的； $H=2$

时表示比均匀分布更加聚集的状态。

3.2 组分个体形态建模

叶子也是草地纹理的重要影响因素,因此纹理结构建模时有必要对草叶进行真实感绘制。按仿真精度的不同,草叶分分支结构明显和不明显两类。文中对草叶进行简化描述,不考虑单株草在外形上的拓扑结构。图 3(a)为真实草叶,仿真时每个叶片用三角形来表示,如图 3(b)所示。当一定数量的草叶密集排列时,与自然界真实草坪的丛生效果相似。

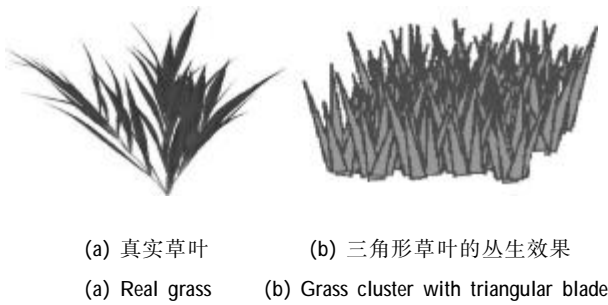


图 3 真实草叶以及仿真草丛

Fig.3 Schematic of real blades and simulated grass cluster

草的线型表示为:

$$F=X(L, \theta|L-\Delta L \leq L \leq L+\Delta L, \theta-\Delta \theta \leq \theta \leq \theta+\Delta \theta) \quad (8)$$

式中: L 是草的长度; θ 是倾角。对天然草地而言,草体的长度和倾角都不是固定值,而是在一定范围内变化的, ΔL 与 $\Delta \theta$ 分别表示草长与倾角的变化范围。该参数模型是草叶的抽象表示,实际上草的几何形态还应体现叶面宽度信息。三角形草叶的绘制方法如图 4 所示,假设 A 点为公式(6)确定的草在图像空间的位置,C 点根据公式(7)计算得到,B 点的确定方法与 C 点类似,控制参数为偏离 A 点的距离 r 和角度 α 。A、B、C 三点构成的三角形为草叶的仿真模型。

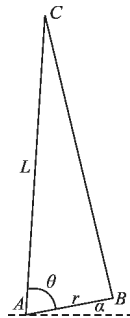


图 4 三角形草叶

Fig.4 Sketch map of triangular-shaped blade

草地纹理结构 GLTex 是空间分布状态与草体形态共同作用的结果。表示如下:

$$GLTex = \bigcup_{\substack{1 \leq x_i \leq \text{Height} \\ 1 \leq y_i \leq \text{Width} \\ 1 \leq i \leq m}} f(x_i, y_i) \cdot Y_i(l, \theta, r, \alpha) \quad (9)$$

式中: i 是草的序号; m 表示图像中草的株数; (x_i, y_i) 代表第 i 株草在图像中的位置, $f(x_i, y_i)$ 是 (x_i, y_i) 位置有无草的标识; $Y_i(l, \theta, r, \alpha)$ 表示草叶形态。草叶的位置及形状都具有随机性。

3.3 草地红外纹理生成

红外纹理图像反映了红外辐射特性在灰度空间的起伏分布。生成草地的红外纹理图像需要将已求解的组分红外辐射数据映射到图像纹理结构中:

$$E(x_i, y_i) = \begin{cases} E_g & f(x_i, y_i) = 0 \text{ 土壤} \\ E_c & f(x_i, y_i) = 1 \text{ 草地} \end{cases} \quad (10)$$

最后将辐射场归一量化到灰度空间显示即可生成草地的红外纹理图像。

4 仿真结果及讨论

利用文中提出的红外辐射耦合求解模型对草地的温度场进行模拟。以冬季典型气象条件为例,温度场模拟结果如图 5 所示。草地温度场的起伏特性主要受太阳辐射影响:白天各组分的温度随太阳辐射的增强而上升;日落后及日出前,太阳辐射强度减弱,组分温度也随之降低。仿真结果与实际变化规律^[10]基本一致。

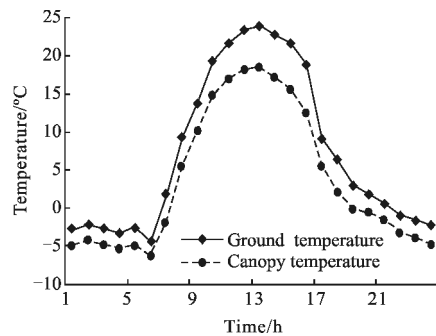


图 5 日周期内草地的温度场模拟结果

Fig.5 Simulation results of diurnal temperature field of grassland

对仿真结果的准确性进行定量验证在实际操作中存在较大难度,因为草地各组分的温度不易测量^[11]。此外,不同波段和成像条件下地物的红外纹理数据又相对匮乏。文中从草地热图像特征的日周期变化角度出发,对红外纹理模拟效果作定性分析。

生成草地的红外纹理图像时,取一天中草地的最高、最低辐射度值为灰度量化的上、下限,分别对应图像的最高、最低显示灰度级,各时段内组分的显示灰度级通过线性量化^[12]方法求得。图 6 为 5:00、10:00、15:00、20:00 四个时段草地的热图像。对比不同时段的热红外图像可以发现:图像的平均亮度与地表温度场的变化相一致,日出前(5:00)与日落后(20:00)地表辐射度较低,红外图像的亮度明显偏暗;日照时段(10:00 和 15:00)地表辐射度较高,对应的红外图像亮度也较高。

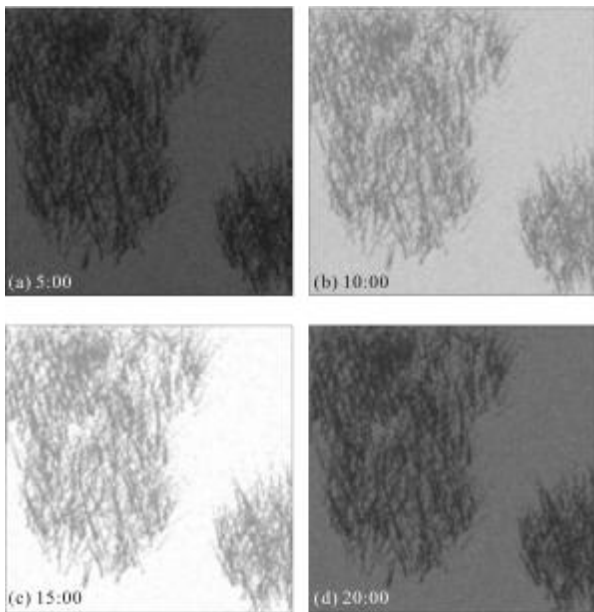
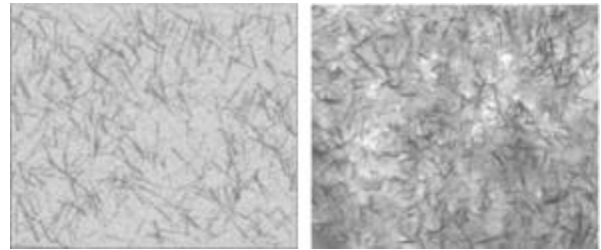


图 6 日周期内草地的红外图像模拟结果

Fig.6 Simulation results of diurnal infrared textures for grassland

混合地表的温度场对比特性也是其红外辐射特性研究的一个重要方面。据统计资料,在太阳辐射较强的白天,混合地表的平均温度、辐射度较高,红外图像的亮度和对比度较大;在夜间,红外图像的亮度和对比度特性随太阳辐射的减弱而逐渐变小^[7]。利用文中提出的红外辐射耦合求解模型模拟的草地温度场起伏在白天明显高于夜间(见图 5),与真实情况相吻合。图 7 为草地的仿真红外纹理与真实图像的对比结果。可以发现,仿真结果与自然界真实草地具有相似的表现特征,二者的纹理都呈细腻的丝绒状。理论分析和实验结果均表明,文中提出的草地红外纹理建模与真实感绘制方法具有一定的合理性和有效性。



(a) 仿真纹理 (b) 真实图像
(a) Simulated texture (b) Real texture

图 7 草地的仿真红外纹理与真实图像对比

Fig.7 Comparison of simulated and real infrared textures of grassland

5 结 论

草地是一种典型的混合自然地表,其辐射交换机理较单一覆盖类型更复杂。传统方法基于统计模型模拟红外纹理,仿真真实感不足。文中从草地红外纹理的物理本质出发,提出了一种新的草地红外纹理建模与真实感绘制方法,通过建立耦合的红外辐射模型及纹理结构模型保证仿真结果兼具辐射正确性及视觉真实感。理论分析和实验结果表明,用耦合模型模拟的草地温度场分布更符合自然地表温度场的实际变化规律,仿真红外图像与真实图像具有相似的纹理结构特征。该方法在大规模场景仿真中具有较好的应用价值。

文中暂对草地在近距离或“放大”状态下的观察效果进行了模拟。实际上不同观察距离的视觉效果与纹理平面分辨率的选取密切相关,今后将做进一步深入研究。

参 考 文 献:

- [1] Zhao Weiyu. Simulation test technology of electro-optical countermeasures [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(3): 171-175. (in Chinese)
赵炜渝. 光电对抗仿真试验技术 [J]. *红外与激光工程*, 2001, 30(3): 171-175.
- [2] Xu Chuangang, Song Liquan. Design and realization of infrared complicated scene simulation system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 241-252. (in Chinese)
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): 241-252.
- [3] Weiss R A, Sabol B M, Smith J A, et al. Physics-based infrared terrain radiance texture model [R]. Vicksburg: Army

- Engineer Waterways Experiment Station, 1995: 20-26.
- [4] Schott J R, Salvaggio C N, Brown S D. Incorporation of texture in multispectral synthetic image generation tools [C]//SPIE, 1995, 2469: 189-196.
- [5] Shao Xiaopeng. Research on infrared texture synthesis [D]. Xi'an: Xidian University, 2005.
邵晓鹏. 红外纹理生成方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [6] Zhao Can. Research on the design and generation method of OGRE-oriented infrared texture [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
赵灿. 面向 OGRE 的红外纹理设计与生成方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [7] Zhen Hongbin. Research on infrared radiation characteristics of the soil-vegetation mixed terrain surface [D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)
郑宏斌. 土壤-植被混合型地表红外辐射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [8] Liu Qian, Zhu Feng, Hao Yingming, et al. Coupled model for simulating infrared radiation temperature of soil-vegetation mixed terrain surface [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(12): 4589-4592. (in Chinese)
柳倩, 朱枫, 郝颖明, 等. 土壤-植被混合地表红外辐射温度场的耦合建模方法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(12): 4589-4592.
- [9] Hopkins B. A new method for determining the type of distribution of plant individuals[J]. Annals of Botany, 1954, XVIII: 213-226.
- [10] Qin Jianfei, Ma Yuzhong, Yuan Shidong. Discuss on IR radiation characteristics of woodland background[J]. Engineer Equipment Research, 2004, 23(4): 29-33. (in Chinese)
秦建飞, 马玉中, 袁世东. 林地背景红外辐射特性初探[J]. 工兵装备研究, 2004, 23(4): 29-33.
- [11] Fu Kaihua. The study on thermal infrared emission directionality of typical soil-vegetation canopy based on 3-D structure simulation model [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
符楷华. 基于 3-D 模拟的典型植被热辐射方向性研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2005.
- [12] Shao Xiaopeng, Yang Wei, Zhang Jianqi. Approach to generate IR images of natural background [J]. Infrared and Laser Engineering, 2000, 29(3): 11-14. (in Chinese)
邵晓鹏, 杨威, 张建奇. 自然地面背景红外图像生成方法研究, 红外与激光工程, 2000, 29(3): 11-14.

下期预览

扩展弹道成型制导系统脱靶量特性分析

王 辉^{1,2}, 吕瑛洁³, 林德福¹, 张 颀¹

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081;

2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191; 3. 北京市清河大楼直 6, 北京 100085)

摘要: 通过将导弹剩余飞行时间的幂函数引入到目标函数中, 实现了对经典弹道成型制导律的扩展。针对扩展弹道成型制导系统, 将导引头和驾驶仪动力学简化成一阶形式, 分别引入导引头角速度零位误差、角度零位误差、导引头角噪声以及目标闪烁噪声, 利用无量纲化技术和伴随函数法, 给出了制导系统无量纲位置脱靶量和角度脱靶量伴随模型。仿真结果表明, 为了消除导引头角速度零位误差对脱靶量的影响, 要求制导系统具有较长的末导时间和较大的指数 n ; 当末导时间达到系统总滞后时间常数的 15 倍左右时, 导引头角度零位误差引起的位置脱靶量收敛到零附近, 角度脱靶量收敛到与角度零位误差大小相等、方向相反的稳态值; 随着末导时间的增大, 导引头角噪声及目标闪烁噪声引起的位置和角度脱靶量均趋向于不为零的稳态值, 指数 n 越大, 脱靶量越大。最后分析指出, 制导动力学越慢, 角噪声引起的脱靶量稳态值越大; 滤波器频带越宽, 闪烁噪声引起的脱靶量越大。