

一种红外烟幕三维建模仿真方法

张楠, 张科, 王红梅, 吕梅柏
(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

摘要: 根据红外烟幕的遮蔽原理, 结合红外烟幕消光模型和扩散模型建立红外烟幕三维空间的透过率模型。针对传统烟幕遮蔽效果仿真方法的局限性, 提出一种三维空间透过率的仿真方法, 并对其进行数值计算与仿真验证。研究表明, 探测器观察到的目标图像是多层透过率叠加的结果, 遮蔽效果优于传统方法, 对工程应用更具意义。

关键词: 红外制导; 反舰导弹; 烟幕遮蔽; 消光; 透过率

中图分类号: V271.4; TN956 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)06-0048-04

A Simulation Method for Building 3D Model of Infrared Smokescreen

ZHANG Nan, ZHANG Ke, WANG Hong-mei, LÜ Mei-bo
(School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: According to infrared smokescreen's shielding principle, a model of infrared smokescreen transmittance in 3D space was constructed by using the extinction model and expanding model of infrared smokescreen. Considering the limitations of the traditional simulation method for the shielding effect of smoke screen, a method for simulating the transmittance in 3D space was proposed, and simulation was made for the method. The result of research indicated that the images of target observed by the detector is the result of stacking of several layers of transmittance, and the shielding effect is better than that of traditional methods. The method is of great significance for engineering application.

Key words: infrared guidance; antiship missile; smoke shielding; extinction; transmittance

0 引言

红外制导由于具有精度高、隐蔽性好、机动灵活等优点已成为目前精确制导武器的重要技术手段^[1]。基于红外制导体制的反舰导弹已经成为海上舰船的主要威胁^[2]。释放烟幕^[3]是一种有效手段, 烟幕可以使舰船目标的红外辐射能量严重衰减, 此外, 烟幕还可以反射光能量, 起到假目标的作用^[4], 从而大大提高舰船的生存概率。目前有关红外烟幕的仿真^[5], 大多是将一个透过率系数叠加到整个红外图像上, 与实际效果有一定差距。国外学者提出了基于纹理映射模型和基于分形几何等的模型, 但是纹理映射法难以获得具有真实感的运动图像, 分形几何法只适用于表现静止图像的结构, 不能很好地描述物体的运动过程。烟幕扩散

过程中, 浓度从中心到四周是一个逐渐衰减的过程, 从而不同点的透过率也不相同。为了解决这个问题, 提高仿真模型的可信度, 本文通过建立适当的数学模型, 利用计算机仿真生成更加逼真的烟幕效果。

1 红外烟幕遮蔽原理

烟幕是通过施放大量气溶胶微粒, 改变电磁波介质传输特性来干扰光电探测系统的。按照遮蔽机制, 烟幕可分为: 辐射遮蔽型和衰减遮蔽型。辐射遮蔽型烟幕是利用燃烧反应生成大量高温气溶胶微粒, 凭借其较强的红外辐射^[6]来遮蔽目标、背景的红外辐射, 从而完全改变所观察目标、背景固有的红外辐射特性, 降低目标与周围背景之间的对比度^[7], 使目标图像难以辨识, 甚至根本看不到。但由于辐射遮蔽型烟幕本身较强的红外辐射^[8-10], 一旦被识别就很容易暴露目标, 所以目前的研究主要集中在衰减遮蔽型烟幕上。衰减遮蔽型烟幕是靠烟幕对红外辐射的吸收、散射和反射

收稿日期: 2013-08-11 修回日期: 2013-09-04

基金项目: 西北工业大学基础研究基金(GCKY1006)

作者简介: 张楠(1987—), 男, 陕西西安人, 硕士生, 研究方向为控制工程。

作用来实现遮蔽,其中反射的作用相当微弱,一般情况下可以忽略不计。

2 红外烟幕三维透过率模型

2.1 红外烟幕透过率传统模型

红外烟幕对红外成像系统产生干扰反映在光谱透过率上。按照朗伯比尔定律,透过率可以表示为

$$\tau_{IR} = \frac{I}{I_0} = \exp[-\alpha_e(\lambda)NL] \quad (1)$$

式中: I_0 、 I 分别为入射光强和投射光强; $\alpha_e(\lambda)$ 为烟幕的质量消光系数, λ 为辐射波长; N 为烟幕的颗粒浓度; L 为烟幕的厚度。则由朗伯比尔定律可以得到透过率的近似表达式为

$$\tau = e^{-\frac{3cQ_e t}{4R\rho}} \quad (2)$$

式中: c 为烟幕浓度; ρ 为烟幕粒子质量密度; R 为烟幕粒子半径; Q_e 为衰减效率因子。

2.2 烟幕扩散模型

烟幕中的微粒受到大气分子的随机碰撞,永不停息地做无规则运动,即布朗运动。布朗运动使烟幕微粒在不受外力的情况下,只要有浓度梯度存在,就会发生扩散。根据连续方程和梯度理论,烟幕浓度分布满足三维扩散方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

将空间烟云的施放点作为坐标原点,所施放红外干扰材料的总量为 Q , t 时刻无穷空间中任意点 (x, y, z) 处的烟幕浓度记为 $C(x, y, z, t)$ 。

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(4\pi t)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4t}\right) \quad (4)$$

2.3 烟幕三维空间透过率模型

如果仅通过式(2)计算透过率,只能根据烟幕各个参数得到一个透过率系数。由于烟幕扩散是一个动态过程,不同浓度会产生不同的透过率,因此,在实际工程应用中,应结合烟幕扩散模型建立空间透过率模型

$$\tau(x, y, z, t) = e^{-\frac{3cQ_e t}{4R\rho} C(x, y, z, t)} \quad (5)$$

烟幕浓度随着坐标和时间而变化,衰减效率因子 Q_e 需根据米氏理论和入射光波长 λ 确定。如图1所示,建立三维坐标系,设红外探测器垂直于 XOY 面观察烟幕。

烟幕从发烟点开始扩散,在扩散范围 XOY 面内任取一点 $P(x, y)$,对通过该点沿 Z 轴方向烟幕无限细分为 n 等份,通过式(5)算出每个无限小区间的透过率,将 n 个无限小空间的透过率依次相乘,可以算出从 $P(x, y)$ 点入射光总透过率。在数值计算过程中,将烟幕总厚度 L 分成前后厚度 $\pm l(L/2)$,作为积分上下限,

对 z 做定积分

$$T(x, y) = \prod_{k=1}^n \tau(x, y, z_k) = e^{-\int_{-l}^l \frac{3C(x, y, z)Q_e}{4R\rho} dz} \quad (6)$$

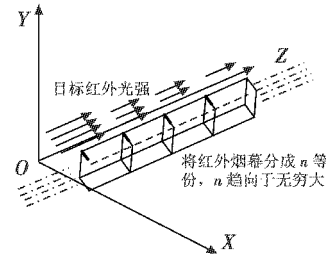


图1 烟幕三维空间透过率模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of smoke screen transmittance model in three dimensional space

根据 $P(x, y)$ 的不同取值、不同透过率生成二维矩阵 $T(x, y)$,将透过率矩阵 $T(x, y)$ 与目标红外图像矩阵进行点乘,仿真的效果就更加逼真。模型原理如图2所示。

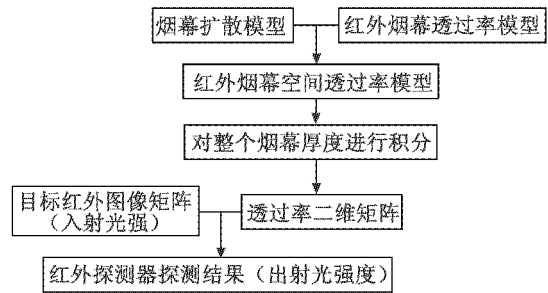


图2 透过率模型原理图

Fig.2 Schematic of the transmittance model

3 计算机仿真与分析

3.1 透过率模型仿真

参数初始化:选取波段范围为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,粒子半径 $R = 10 \mu\text{m}$,粒子质量密度 $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$,烟幕厚度变化范围为 $1 \sim 10 \text{ m}$,烟幕扩散过程理论上到无穷远处,但通过仿真可以看出,烟幕厚度在 6 m 时,红外目标已经达到理想的遮蔽效果,如图3所示。

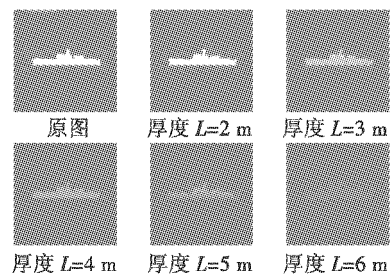


图3 烟幕遮蔽效果图

Fig.3 Image of smoke screen camouflage effect

因此,为了便于仿真,将烟幕沿 Z 轴的扩散限定在 $\pm 3 \text{ m}$;首先,通过式(6)在Matlab环境下生成透过率

矩阵 $T(x,y)$, 计算机仿真结果如图 4 所示。

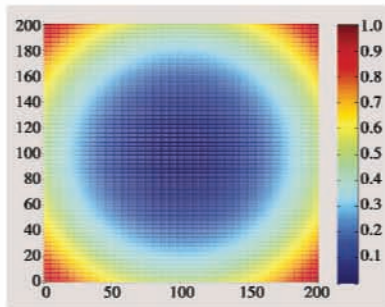


图 4 烟幕 XOY 面透过率

Fig. 4 Smoke screen transmittance of XOY surface

通过图 4 可以看出,蓝色区域内浓度较高,透过率偏低;随着扩散半径的增加,扩散边缘呈现红色,透过率较大。透过率变化范围为 0~1。

舰船红外原图如图 5 所示。如果应用式(2)算得的透过率系数叠加到目标的红外图像上,仿真结果如图 6 所示。



图 5 舰船红外原图
Fig. 5 Original infrared image of a ship

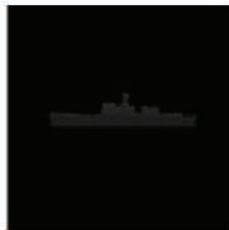


图 6 单一透过率遮蔽效果
Fig. 6 Camouflage effect of single transmittance

从图 6 可以看出,无论红外烟幕各个参数如何变化,红外目标各点特征所受到的干扰效果一样,这与实际情况相差甚远。基于此,应用本文提出的空间透过率模型进行仿真分析。来袭导弹导引头采用被动式红外探测器的像元数为 256×256 ,像元尺寸为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$,为简化仿真过程,减少不必要的计算量,取 80×80 像元的红外图像,将透过率矩阵 $T(x,y)$ 与目标红外图像进行点乘,发烟位置可根据实际情况布设,在对抗过程中一般选取导弹来袭方向,本文设导弹来袭方向与船身垂直,故布设在船身中部。舰船红外原图及仿真结果如图 7~图 9 所示。



图 7 舰船红外原图
Fig. 7 The original infrared image of a ship



图 8 $t=10\text{ s}$ 时遮蔽效果
Fig. 8 Camouflage effect when $t=10\text{ s}$



图 9 $t=20\text{ s}$ 时遮蔽效果

Fig. 9 Camouflage effect when $t=20\text{ s}$

该仿真结果实现了红外烟幕对目标的遮蔽效果,分别取 $t=10\text{ s}$ 和 $t=20\text{ s}$ 观察红外烟幕对目标的遮蔽效果。从图 8 可以看出,在 $t=10\text{ s}$ 时,烟幕浓度较高,对目标的遮挡效果良好;从图 9 可以看出,在 $t=20\text{ s}$ 时,烟幕浓度逐渐衰减,相应的透过率逐渐增大,遮蔽效果较差。仿真结果验证了文中所述仿真方法的正确性,与实际情况符合。本文建立模型仿真的结果相比单一透过率模型更具工程应用价值。

3.2 干扰效果评估

利用 MAK 仿真平台,在 VC++ 2005 环境下实现海面红外攻防对抗过程,对抗对象包括舰船、飞机、反舰导弹,烟幕。仿真开始,飞机在飞行过程中发现目标,满足发射条件时发射导弹,当舰船的防空系统探测到来袭导弹,向舰船质心垂直于导弹方向施放烟幕,针对传统烟幕透过率模型与本文建立的三维透过率模型进行仿真。

1) 单一透过率仿真。

设定飞机初始坐标为 $(-9469.3\text{ m}, -4344.6\text{ m}, 497.0\text{ m})$,舰船初始坐标为 $(-18905.1\text{ m}, -7616.2\text{ m}, 0.0\text{ m})$,飞机距离目标 10000 m 时发射导弹,舰船在导弹距离自己 5000 m 时施放烟幕扰弹。仿真结果如图 10 所示。

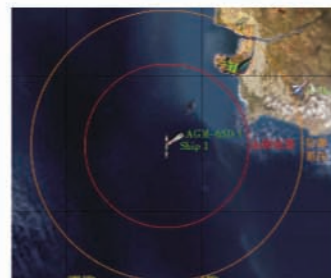


图 10 对抗过程仿真

Fig. 10 Combat process simulation

从图 10 可以看出,采用单一透过率模型,由于舰船轮廓清晰可辨,没有成功干扰到红外成像导弹的识别,反舰导弹成功击中目标。

2) 三维透过率仿真。

设定飞机初始坐标为 $(-9469.3\text{ m}, -4344.6\text{ m}, 497.0\text{ m})$,舰船初始坐标为 $(-18905.1\text{ m}, -7616.2\text{ m},$

0.0 m),飞机距离目标 10000 m 时发射导弹,舰船在导弹距离自己 5000 m 时施放烟幕扰弹。仿真结果如图 11 所示。

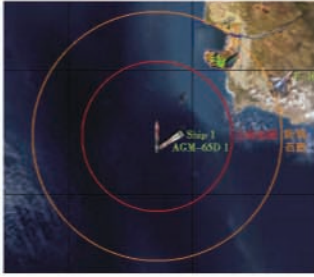


图 11 对抗过程仿真

Fig. 11 Combat process simulation

从图 11 可以看出,反舰导弹未能成功击中目标,说明采用三维透过率模型,使得舰船轮廓发生改变,成功干扰到红外成像导弹对目标的识别。

4 结论

通过分析、仿真可知,红外烟幕在空间扩散过程中,浓度由扩散点逐渐衰减,透过率逐渐增加。探测器观测的红外目标图像是空间多层透过率叠加后的效果。针对传统的和本文提出的仿真方法进行分析,在 MAK 平台上对两种仿真方法进行对比,发现单一透过率下的红外目标轮廓清晰可辨,容易被反舰导弹识别,而三维透过率下的红外目标轮廓较为模糊,成功干扰来袭导弹。

参考文献

- [1] 梁薇,张科. 精确制导武器发展及其关键技术[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(12): 5-8.
LIANG W, ZHANG K. Development and key technologies of precise-guidance weapon[J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(12): 5-8.
- [2] 赵峰民,刘焱,陈望达. 微波/红外成像复合制导技术发展分析[J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 9-12.
ZHAO F M, LIU H, CHEN W D. Analysis of the development of radar/IR compound guidance technique[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(1): 9-12.
- [3] 姚禄玖. 烟幕理论与测试技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
YAO L J. Theory and testing technique of smoke[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.
- [4] 张涛. 动态红外烟幕仿真方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.
ZHANG T. Research on the simulation of dynamic infrared smoke[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [5] 刘安昌. 红外烟幕干扰效果仿真及评价方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007.
LIU A C. Research on the simulation and evaluation of infrared smoke interference effects[D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
- [6] 张涛,黄曦. 一种动态红外烟幕图像仿真方法[J]. 电子科技, 2010, 23(8): 20-24.
ZHANG T, HUANG X. A method for simulating the dynamic image of smoke[J]. Electronic Sci & Tech, 2010, 23(8): 20-24.
- [7] 杨彦杰,王敏帅,王明波. 舰载烟幕弹遮蔽效能的仿真研究[J]. 红外, 2008(6): 26-30.
YANG Y J, WANG M S, WANG M B. Simulation study of masking efficiency of shipboard smoke shell[J]. Infrared, 2008(6): 26-30.
- [8] ZHAO J, PAN G P, CHEN X. Novel medium of broadband PPECM: Aqueous foam[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 36(3): 425-429.
- [9] WANG X, PAN G P. Study and test of extinction coefficient of red phosphorus smoke to 10.6 μm laser emission[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(6): 636-640.
- [10] LIU S T, ZHOU X D, CHEN Y G. Evaluation techniques for countermeasures and counter-countermeasures performance on electro-optical imaging guided systems[J]. Laser & Infrared, 2007(1): 10-13.

欢迎投稿 欢迎刊登广告