

文章编号:1001-5078(2007)04-0366-04

两栖装甲车辆对抗红外/毫米波复合制导方法研究

沈均平¹, 刘建永¹, 胡登高², 李 宁¹, 智 军¹

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 解放军镇江船艇学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要:在分析两栖装甲车辆的毫米波、红外暴露特征和常见的干扰技术, 以及人工水雾干扰红外/毫米波复合制导原理的基础上, 运用 Mie 散射理论和热力学理论, 对人工水雾干扰红外/毫米波复合制导技术进行了理论分析, 给出了单位喷水量条件下, 水雾滴径的最佳尺寸, 最后模拟计算了人工水雾对红外/毫米波复合制导的干扰性能。

关键词:两栖装甲车辆; 人工水雾; 红外/毫米波复合制导; 消光截面

中图分类号:E951.4; TN972

文献标识码:A

Study on Camouflage Ways of Amphibian Armored Car to Counter the MMW/IR Fusion Guidance

SHEN Jun-ping¹, LIU Jian-yong¹, HU Deng-gao², LI Ning¹, ZHI Jun¹

(1. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. Zhenjiang Water Craft College of PLA, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: On the basis of analyzing exposed signature of amphibian armored car in infrared/ millimeter wave, and familiar countermeasures, the artificial water fog screen is put forward. The relationship of spray quantity, water fog radius and extinction characteristics has been analyzed with the Mie scattering theory and the thermodynamics theory, which is used to choose the prime water fog radius to obtain best effect. Furthermore, the nicer performance of the water fog is proved by simulation count.

Key words: amphibian armored car; artificial water fog; MMW/IR fusion guidance; extinction section

1 前 言

随着光电干扰技术和隐身技术的发展, 单一的制导模式由于自身的局限性, 很难适应现代战争的需要。红外/毫米波复合制导模式可以充分发挥红外、毫米波制导模式的优势, 实现光电互补, 克服各自的不足, 具有超常的作战威力, 已成为复合制导的发展方向之一。

因为水背景温度起伏不显著, 水面的不平对红外辐射($\lambda > 3\mu\text{m}$)的影响不大, 所以水体的红外辐射特征是极其单调的, 致使水面行进中的两栖装甲车辆红外暴露特征极其显著, 同时由于金属和水背景在毫米波段发射、反射特性差异显著, 两栖装甲车辆毫米波段暴露特征亦显著。因此, 红外/毫米波复合制导对两栖装甲车辆构成了严重威胁, 研究相应的对抗技术极其重要。

2 两栖装甲车辆红外、毫米波暴露特征

2.1 红外暴露特征

两栖装甲车辆是以发动机为驱动源的装甲目标, 在水面行进中(大气、水的温度为常温), 其动力舱、排气窗等为主要红外辐射源, 假设目标表面温度分布均匀, 其平均温度约 310K, 如图 1 所示^[1]。根据维恩位移定律:

$$\lambda_m T \approx 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (1)$$

两栖装甲车辆的红外辐射波段主要在 8 ~ 14 μm 波段, 正好位于红外热像仪工作波段, 与单一水面背景形成巨大的反差, 其暴露特征显著。

作者简介: 沈均平(1979 -), 男, 博士研究生, 主要从事电磁伪装学习和研究。E-mail: tianymoer@sohu.com

收稿日期: 2006-10-24

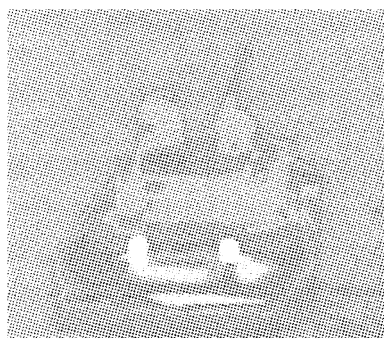


图1 两栖装甲车辆行进时的红外热图

Fig.1 thermal image of dynamic amphibian armored car in water

2.2 毫米波暴露特征

自然界各种物质的辐射特性都不相同,一般介电系数相对较高或导电率较高的物质,发射率较小,反射系数较高。两栖装甲车辆为金属目标,与地面常见背景(包括水背景)相比,其辐射率较低,如表1所示。利用目标和背景的发射率、发射系数差异,毫米波制导系统很容易发现、识别目标^[2]。

表1 8mm 频段几种常见物质的辐射率

Tab.1 radiance of some usual matter in MMW

物质	辐射率 ϵ	物质	辐射率 ϵ
厚植被	0.93	沥青	0.83
耕地	0.92	干雪(28~75cm 厚)	0.88~0.76
干草地	0.91	混凝土	0.76
沙地	0.90	水面	0.30
粗沙砾	0.84	金属	0.0

3 红外/毫米波复合制导

毫米波制导的优点是全天候能力强、波束宽、适合于大范围搜索、目标截获时间短,但探测精度较低。红外成像制导作用距离近,穿透烟雾、尘埃能力弱,搜索范围窄,但是探测精度较高。红外/毫米波复合制导将这两种传感器提供的目标信息进行了融合分析、处理,流程如图2所示^[3],它具有全天时、全天候的工作能力,抗多种电子干扰、光电干扰和反隐身目标的能力,复杂环境下识别目标的能力,对目标精确定位的能力等。

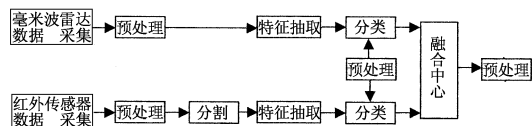


图2 复合系统信号处理流程

Fig.2 schematic diagram of date fusion processing system

目前,已装备和正在研制的反坦克导弹武器系统中已经越来越多地采用了红外/毫米波双模制导技术,如美国的陆军战术导弹系统(ATACMS)中的BlockIIA 导弹和 AIFS、APGM 反坦克导弹,德国的 SMART-155、ZEPC、EPHRSAM 反坦克导弹,法国

的 TACED 反坦克导弹等。

4 常见干扰技术分析

红外/毫米波复合制导干扰技术也倍受重视,并已有了较多的成果,可归纳为两大类:一是组合式多波段干扰技术,即把干扰红外、毫米波两种不同技术通过一定方式组合在一起的干扰技术。如德国发明的可燃组合型多波段遮蔽烟幕、美国研制的微波红外复合箔条和美、德均有大量装备的不可燃组合型多波段遮蔽烟幕等都是典型的此类技术;二是非组合式多波段干扰技术,即通过撒布各种尺寸的粒子来同时达到对红外和毫米波的干扰。虽然各国一直致力于研究该技术,但成效并不明显。已见报道并受到重视的是德国 Nico 公司发明的 NG19 多波段烟雾剂。此外,日本为延长干扰时间研究的以空心微粒代替实心颗粒的多波段干扰烟幕技术,也属于这一类。

然而,这两大类干扰技术都存在明显的不足,归纳起来主要有:(1)有效干扰时间普遍过短,第一类一般只有几秒,第二类的稍长,但也不超过1min,明显不能满足现代战争的需要,目前只得依靠连续不断地进行多次发射来弥补,但发射要求高,战时实施的难度大;(2)大多不能同时干扰可见光,包括对具有很高精度的电视制导也无法干扰,因为对可见光的干扰是基础,如果仍须与可见光干扰措施同时使用,势必又增加了实施的难度;(3)这些干扰技术通常还对环境具有较严重的污染^[4]。

因此,寻找一种高效、实用、价廉的干扰材料对抗红外/毫米波精确制导武器,以提高目标生存能力,有着非常重要的意义。

5 人工水雾干扰红外、毫米波制导原理

人工水雾干扰技术可以克服现有干扰技术存在的问题,它可对红外制导系统、毫米波制导系统进行同时干扰,根据红外/毫米波复合制导系统信号处理流程,能对红外/毫米波复合制导起到干扰作用。

5.1 人工水雾干扰毫米波制导技术原理

毫米波段大气传输衰减较小的窗口频段有四个:35GHz、94GHz、140GHz 和 220GHz。目前,采用毫米波制导方式的制导武器主要使用 35GHz 和 94GHz 这两个窗口。如果喷出的水雾滴径与毫米波相当,根据 Mie 散射理论,水雾将对毫米波产生较强的散射和吸收,加之水雾下落至目标后,形成水层,使原来金属面变成了水面,虽然因该水层温度比水背景温度要高(特别是初始时),使得该水层的发射率比水背景略高,但综合水雾的衰减,目标将融合于背景。

5.2 人工水雾干扰红外制导原理

根据斯蒂芬-波尔兹曼定律

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

即目标的红外辐射出射度 M 与其本身的发射率 ε 、温度 T 的四次方成正比,其中, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。水雾采用水作遮蔽介质,其温度和发射率同水面背景的温度和发射率完全一致,而且水雾的相变以及下落至目标表面所带走的热能均能降低目标的温度,加上水雾的吸收与散射衰减作用,能够使目标与背景很好地融合。

6 人工水雾干扰红外/毫米波复合制导理论分析

6.1 人工水雾干扰毫米波制导理论分析

毫米波穿透烟雾的能力强,是因为烟雾的颗粒远小于毫米波的波长,产生瑞利散射,所以水雾的滴径选择将直接影响衰减的效果。根据 Mie 散射理论对雾滴滴径大小进行设计(由于表面张力的作用,水雾雾滴基本上都是球状),设水雾的滴径选择范围为 $0.8 \sim 1.5 \text{ mm}$,选择水雾的最佳滴径,使得在喷水量一定的条件下,达到最好的遮蔽效果。

根据 Mie 散射理论,雾滴的消光截面 Q_e 公式为^[5]:

$$Q_e(m, \chi) = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{l=1}^{\infty} (2l+1) \text{Re}(a_l + b_l) \quad (3)$$

其中, $m = m_r - jm_i$ 为雾滴的折射指数(如表 2 所示^[2]); r 为雾滴半径; λ 为入射波长; a_l 和 b_l 为 Mie 系数,可由以下递推公式给出:

$$a_1 = \frac{\left(\frac{A_1}{m} + \frac{l}{\chi}\right) \text{Re}(W_l) - \text{Re}(W_{l-1})}{\left(\frac{A_1}{m} + \frac{l}{\chi}\right) W_l - W_{l-1}} \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{\left(mA_1 + \frac{l}{\chi}\right) \text{Re}(W_l) - \text{Re}(W_{l-1})}{\left(mA_1 + \frac{l}{\chi}\right) W_l - W_{l-1}} \quad (5)$$

其中, $\chi = \frac{2\pi r}{\lambda}$; $W_l = \frac{(2l-1)}{\chi} W_{l-1} - W_{l-2}$; $W_0 = \sin \chi - j \cos \chi$; $W_1 = \cos \chi + j \sin \chi$; $A_l = -\frac{1}{m\chi} + \left(\frac{l}{m\chi} - A_{l-1}\right)^{-1}$; $A_0 = \cot m\chi$ 。

表 2 水的复折射率

Tab. 2 complex refractive index of water

temp/°C	3mm(94GHz)	8mm(35GHz)
0	2.801 - j1.302	3.947 - j2.267
10	3.173 - j1.732	4.802 - j2.735
20	3.596 - j2.076	5.607 - j2.838
30	4.031 - j2.323	6.266 - j2.733

运用 Matlab 语言对上述公式进行编程模拟,分别计算了单位喷水量 $1 \text{ g}/\text{m}^3$,不同水温(0°C , 10°C ,

20°C 和 30°C) 条件下所形成的水雾对 3 mm 和 8 mm 波长的衰减效果(假设水雾中的雾滴滴径单一),如图 3、图 4 所示。

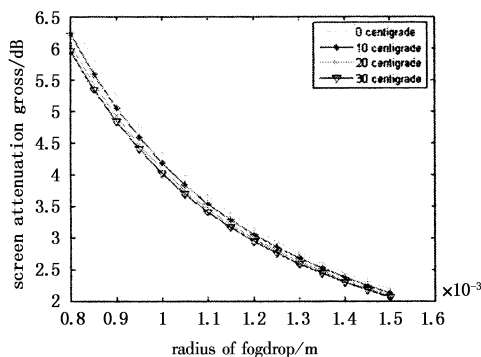


图 3 单位喷水量所形成的半径为 $0.8 \sim 1.5 \text{ mm}$ 的水雾对 3 mm 的遮蔽衰减

Fig. 3 screen attenuation of 3 mm with water fog's radius of $0.8 \sim 1.5 \text{ mm}$ formed by spray quantity

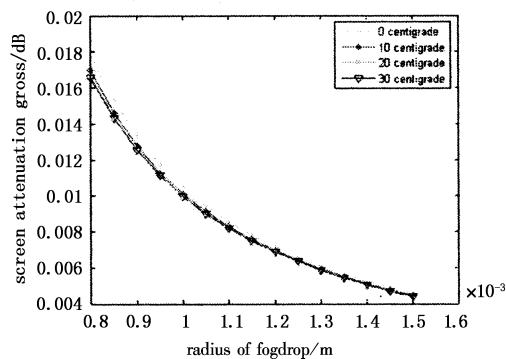


图 4 单位喷水量所形成的半径为 $0.8 \sim 1.5 \text{ mm}$ 的水雾对 8 mm 的遮蔽衰减

Fig. 4 screen attenuation of 8 mm with water fog's radius of $0.8 \sim 1.5 \text{ mm}$ formed by spray quantity

可见,单位喷水量条件下的水雾对 3 mm , 8 mm 的衰减效果随着滴径的增大而减小;相同喷水量、相同滴径、相同温度的水雾对 3 mm 的衰减效果要远远低于 8 mm ;同时,水的温度越低,衰减效果越好,但差异不大;所以研究水雾对毫米波的衰减性能,只需研究常温水雾对 3 mm 的衰减性能即可。

6.2 人工水雾干扰红外制导理论分析

由于水雾的滴径选择范围为 $0.8 \sim 1.5 \text{ mm}$,根据电磁散射理论,它对 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 红外波段将产生无选择散射;根据吸收理论,水雾表面积越大,吸收就越强;所以,在单位喷水量条件下,滴径为 $800 \mu\text{m}$ 的人工水雾将对 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 红外波段衰减最强。

部分水雾下落至目标后,由于目标和水的温差,它们之间存在热传导。以动力舱为例,假设两栖装甲车辆在行进中达到热平衡,动力舱部装甲内表面温度恒为 400 K ,外表面装甲温度为 390 K ,装甲厚 10 cm ,忽略太阳、大气的辐照能量,根据能量守恒定律,动力舱产生的能量恒定,它向外传递的能量也恒

定,所以动力舱向其上部装甲传递的恒定功率密度 Q 等于该装甲单位表面面积向外辐射的功率,即:

$$Q = \alpha / \delta \cdot \Delta T \quad (6)$$

其中, δ 为目标的厚度;导热系数 $\alpha = 20 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 。

设水雾连续喷射,单位含水量为 $x \text{ g}/\text{m}^3$,垂直厚度为 $h \text{ m}$,水温为 293 K ,根据质量恒定原理,则落至装甲表面的水的为 $hx \text{ g}/\text{m}^2$ (假设装甲表面的积水速度和流离速度相同)。由于装甲表面的积水厚度极薄,可以认为积水一旦形成,即与装甲表面温度相同,为计算简便,不计水雾落至装甲上后自身的辐射和水雾相变,则当水雾落至装甲 $\Delta t \text{ s}$ (Δt 非常短)后,动力舱装甲外表面温度降至 T_1 (T 的初始温度为 400 K ,它的值为 $\Delta t \text{ s}$ 前 T_1 的值),有:

$$(T - T_1) \cdot (\alpha / \delta) + Q \cdot \Delta t = (\Delta t \cdot hx \times 10^{-3}) \cdot c \cdot (T_1 - 293) \quad (7)$$

其中,水的比热 $c = 4200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

7 模拟试验计算

根据以上的理论分析,模拟计算人工水雾干扰红外/毫米波复合制导分系统的效果。假设人工水雾雾滴半径为 $800 \mu\text{m}$,含水量 $60 \text{ g}/\text{m}^3$,水温为 20°C ,模拟计算了一束 3 mm 平行波透过厚度为 $2 \sim 5 \text{ m}$ (步长为 0.5 m) 的水雾后,经金属板反射后,再透过水雾后的毫米波的衰减,如图 5 所示。其计算公式为:

$$I_t = I_0 \exp \left[- \int_0^L N Q_e(m, \chi) d\chi \right] \quad (8)$$

其中, N 为水雾滴子数密度; I_0 为入射功率密度; I_t 为出射功率密度; L 为水雾厚度。

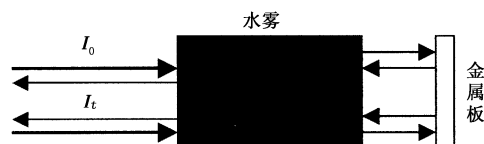


图 5 人工水雾对毫米波的衰减图

Fig. 5 MMW attenuation with artificial water fog

根据式(8)计算的结果如图 6 所示。

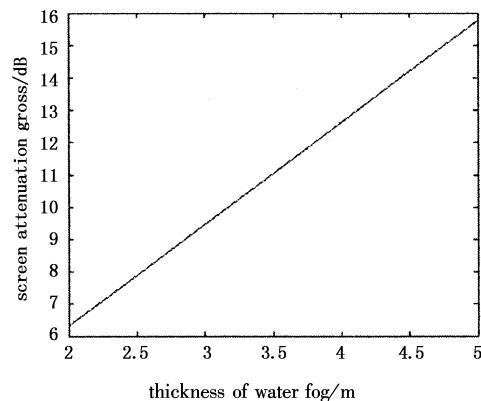


图 6 厚度为 $2 \sim 5 \text{ m}$ 的水雾对 3 mm 的衰减量

Fig. 6 attenuation of 3 mm with water fog screen's thickness from 2 to 5 m

当水雾厚 3 m 时, 3 mm 衰减量达 9.5 dB , 这里没有考虑水雾下落至装甲表面形成一薄层水对毫米波反射的影响,而且忽略了海水衰减效果更好的因素,所以可以认为该人工水雾完全能够满足对抗 3 mm 、 8 mm 制导要求。

忽略海浪的影响,根据式(7)循环计算可得,水雾形成 3 s 后,动力舱表面装甲温度将从 400 K 降至 300.2 K , 7 s 后达到平衡温度为 295.65 K 。此时,两栖装甲车辆高温部与水背景的温度差减少到 $\pm 4^\circ\text{C}$ 以内(美军把这一范围作为红外伪装指标之一),其他部位温度同背景温度差异将更为微弱,加上水雾的相变作用以及对红外波的散射和吸收作用,以及水层作用,两栖装甲车辆与水背景的发射率相同,所以可以认为目标完全融合于背景。考虑到预警时间一般远大于 7 s ,显然,该人工水雾能对抗红外探测、识别,两栖装甲车辆只需在水雾形成时作适当的机动规避,便能“摆脱”红外制导武器的跟踪和打击。

总之,因为含水量为 $30 \text{ g}/\text{m}^3$ 、滴径为 $800 \mu\text{m}$ 、 3 m 厚的常温人工水雾能够同时干扰、对抗红外制导和毫米波制导,所以它能够对抗红外/毫米波复合制导。事实上,该水雾也能同时对可见光波段、激光进行遮蔽干扰,即能有效对抗可见光波段和激光制导武器。

8 结论与展望

分析了人工水雾干扰毫米波、红外制导分系统的原理和技术理论基础上,模拟计算了人工水雾对抗毫米波、红外制导分系统的效果,从理论上证明了两系装甲车辆利用人工水雾完全能够对抗红外/毫米波复合制导。在下一步工作中,将进行雾滴分布和提高水雾折射率虚部研究,如对雾滴荷电,在雾滴中添加导电填料、电解质等,以进一步增强其干扰性能和拓宽它的干扰频谱。

参考文献:

- [1] 武凤臣. 两栖装甲车辆红外辐射特征抑制技术研究[D]. 北京理工大学, 2002: 15 - 27, 67 - 68.
- [2] 路远, 凌永顺, 时家明. 毫米波无源干扰研究[J]. 光电对抗与无源干扰, 2002, 3: 13 - 16.
- [3] 刘郁林, 魏玺章, 黎湘, 等. 毫米波/红外复合制导信息处理系统研究[J]. 信号处理, 1999, 12: 89 - 92.
- [4] 金良安, 王孝通, 童幼堂, 等. 基于泡沫云的红外/毫米波复合制导干扰技术研究[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(6): 413 - 417.
- [5] 赵振维. 水凝物的电波传播特性与遥感研究[D]. 西安电子科技大学, 2001: 29 - 31.