

· 红外技术 ·

泡沫对目标红外探测的影响

章文芳, 胡波, 宋伟, 韩书健

(电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘要:探讨了泡沫通过散射、反射和吸收作用衰减电磁辐射的机理,分析了在理想条件及自然条件下红外热像仪对目标的发现和识别概率。以此为基础并采用朗伯-比尔定律,建立了泡沫衰减遮蔽条件下红外热像仪对目标的发现和识别概率的数学模型。利用Matlab仿真软件进行了数值计算,结论为:随着泡沫厚度的增加,红外热像仪对目标发现和识别的概率逐渐减小,与实验测得的值基本吻合。

关键词:泡沫;红外探测;概率

中图分类号: TN976;O434.3

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)04-0035-04

Effort of Foam on Target Infrared Detection

ZHANG Wen-fang, HU Bo, SONG Wei, HAN Shu-jian

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: The foam can attenuate the electromagnetic radiation by scattering, reflection and absorption, this mechanism is discussed. The target discovery and identification probability of infrared thermal imager in the ideal and natural conditions are analyzed. Based on the conclusion and Lamber-Beer law, the mathematical model of the target discovery and identification probability of infrared thermal imager in the foam attenuation masking condition is established. The values are calculated by using Matlab simulation software. The conclusion shows that the target discovery and identification probability of infrared thermal imager are decreased, with increasing of foam thickness, and that is consistent with the experimental values.

Key words: foam; infrared detection; probability

泡沫是由许多密集的小气泡堆积在一起,气泡外层的液膜厚度在几微米到几十纳米之间,具有不同的曲率半径,气泡间只被极薄的一层液膜所隔开,构成多面体气泡而堆积起来的。实验证明以直链十二烷基苯磺酸钠(LAS)、聚乙二醇20000(PEG20000)、表面活性剂6501、水等为原料制备的泡沫对目标红外辐射吸收作用明显^[1]。此外,目标红外辐射在数量巨大、结构复杂、由溶液和气体等媒质构成的泡沫多种分界曲面上进行传输时,将发生复杂的发射、折射和色散;在泡沫边沿部分还可能发生全反射,造成传播方向上透射能量的大量损失^[2]。

1 泡沫衰减遮蔽机理分析

泡沫的衰减遮蔽主要是指靠散射、反射和吸收作用来衰减电磁波辐射。构成泡沫液膜的表面活性剂分子、原子处于不断运动状态,其微粒所带的正负电荷的“重心”有不重合的特征,即产生偶极矩,故微粒本身可视为电偶极子,在电磁辐射场中将与周围电磁场发生相互作用,从而改变原电磁场辐射传输特性,使电磁辐射能量在原传输方向上形成衰减。另外从量子力学的观点来看,泡沫液膜内表面活性剂分子内的原子中的电子相对原子核运动,原子核的振动和原子核转动的能量都是量子化

收稿日期:2011-06-23

作者简介:章文芳(1986-),男,安徽东至人,硕士研究生,研究方向为光电系统建模与仿真。

的,即每个原子和分子都存在一定数目的电子能级,振动能级和转动能级。同时每种原子、分子都有各自的振动频率,一些极性分子和易极化的分子都具有几种本征振动频率。当这些分子与其谐振频率相同的电磁辐射作用时,产生共振,从而吸收能量,使分子从较低的能级跃迁到较高的能级,即发生了选择性吸收。此外对于液膜表面上含有自由电子的泡沫,由于电磁辐射的激发引起自由电子运动的变化,也表现出对电磁辐射的连续吸收和较强反射特性,从而在原传输方向上形成衰减^[3]。

红外辐射本质上是电磁波,当电磁波传播到泡沫液膜表面上时,遇到表面活性剂分子、原子不断运动形成的电磁辐射场,与之发生相互作用后,在原传输方向上形成衰减。其衰减示意图如图1所示。

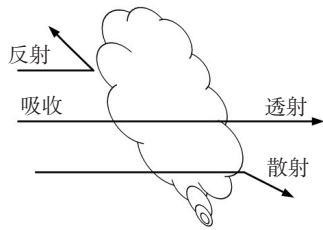


图1 红外辐射通过泡沫衰减示意图

2 红外热像仪对目标发现和识别概率

2.1 理想条件下目标的发现和识别概率

红外热像仪能将探测器视场中的目标和背景的红外辐射功率转换成电信号并在显示器上显示出来,能否及时发现和识别目标,直接决定了红外热像仪的探测能力。目标与背景辐射亮度的差别是热像仪发现和识别目标的基础。描述这一差别的物理量是辐射对比度,该物理量类似于亮度对比度,它的定义为

$$C = \frac{|L_b - L_0|}{\max(L_b, L_0)} \quad (1)$$

式中, L_0 和 L_b 分别表述目标和背景的辐射亮度。显然 $0 \leq C \leq 1$,如果 $C=0$,则无论目标与背景的辐射亮度有多大,目标的尺寸有多大,目标均不可能被热像仪所发现。人眼通过热像仪恰能分辨目标的最小辐射对比度,称为视辐射对比度阈 ε 。

ε 是心理物理参数,它与人眼的视觉功能、训练程度、精神状态、观察时间和方法等一系列因素有

关。大量实验结果表明,辐射对比度阈 ε 是一个遵从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的随机变量。

显然, ε 的概率密度函数为

$$P(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\varepsilon-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

当辐射对比度阈 ε 确定时,可以求得该辐射对比度阈 ε 下的发现概率 $P_1(D)$ 为

$$P_1(D) = P(C \geq \varepsilon) = \int_{-\infty}^C \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\varepsilon-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\varepsilon = \int_{-\infty}^{\frac{C-\mu}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \Phi\left(\frac{C-\mu}{\sigma}\right) \quad (3)$$

识别是在发现目标的前提下对所获得的目标信息进行综合推理判断的过程,识别目标往往需要了解目标的更多细节^[4,5]。因此,对目标的识别既取决于目标的发现水平,又取决于观察者的经验和注意力,对注意力集中的熟练观察者,目标的发现程度与识别目标的关系,按视觉探测领域广泛应用的“强生”准则确定。强生把目标的识别区分为4个等级:发现、定向、分辨、查明,发现级即前述概率中讨论的情况。表1是从实验结果中概括出来的不同识别等级所要求的可分辨空间的频率值。

表1 不同识别等级所要求的可分辨空间频率

识别等级	可分辨空间频率
发现	1.0±0.25
定向	1.4±0.35
分辨	4.0± $\begin{cases} +0.5 \\ -0.4 \end{cases}$
查明	6.4±1.5

对目标识别一般以分辨级作为基本要求,若取分辨级的最下界,则比发现级提高3.6倍。由于分辨级所要求的实际上是发现目标更细微部分的一种发现水平,因而目标在发现条件下的识别概率 $P_1(R/D)$ 可用类似发现概率来表示

$$P_1(R/D) = \Phi\left(\frac{C-\mu_r}{\sigma_r}\right) \quad (4)$$

式中, μ_r 为可分辨级所要求的视辐射对比度阈均值; σ_r 为识别级要求的视辐射对比度阈的均方差,取

$$\sigma_r = 0.39\mu_r \quad (5)$$

当 $\theta_r = \frac{\theta}{3.6}$ 时,有

$$\mu_r = \begin{cases} 0.05 & \theta_r \geq 30' \\ 0.812\theta_r^{-0.819} & \theta_r < 30' \end{cases} \quad (6)$$

式中, θ 为视角, 有

$$\theta = 2 \arctan \frac{D}{2l} \quad (7)$$

式中, D 为面状目标直径; l 为热像仪到目标的距离。由发现概率 $P_1(D)$ 和条件识别概率 $P_1(R/D)$ 可求得目标的识别概率 $P_1(R)$ 为

$$P_1(R) = P_1(D) \cdot P_1(R/D) = \phi\left(\frac{C-\mu}{\sigma}\right) \phi\left(\frac{C-\mu_r}{\sigma_r}\right) \quad (8)$$

2.2 自然条件下的目标发现和识别概率

通常目标与红外热像仪之间是有一定距离的, 在这段距离内, 由于存在大气的影 响, 红外热像仪所接收到的辐射功率并不是目标和背景本身的辐射功率, 而是所谓的视辐射功率, 从而导致了对比度也变为视辐射对比度。大气对目标和背景辐射亮度的影响表现为两个方面, 一是大气对辐射的衰减, 它使接收到的目标和背景的辐射亮度降低; 二是太阳辐射经大气的散射形成一定的气幕辐射亮度, 它将增大接收到的目标和背景的辐射。在考虑了以上两个因素后, 目标和背景的视辐射亮度 L_0' 和 L_b' 分别为

$$L_0' = L_0\tau + L_h(1-\tau) \quad (9)$$

$$L_b' = L_b\tau + L_h(1-\tau) \quad (10)$$

式中, $\tau = e^{-\alpha l}$, 表示大气的透过率; α 为大气的消光系数; l 为目标到红外热像仪之间的距离; L_h 为无穷厚的空气层的气幕亮度, 通常认为是靠近地平线处的天空辐射亮度。

从而视辐射对比度为

$$C' = \frac{|L_b' - L_0'|}{\max(L_b', L_0')} = \frac{C}{1 + L_h(\tau^{-1} - 1)/\max(L_b, L_0)} =$$

$$\frac{|L_b - L_0|}{\max(L_b, L_0) + L_h(e^{\alpha l} - 1)} \quad (11)$$

设热像仪在自然条件下对目标的发现概率为 $P_2(D)$, 则

$$P_2(D) = \phi\left(\frac{C' - \mu}{\sigma}\right) \quad (12)$$

设热像仪在自然条件下对目标的识别概率为 $P_2(R)$, 则

$$P_2(R) = P_2(D) \cdot P_2(R/D) = \phi\left(\frac{C' - \mu}{\sigma}\right) \phi\left(\frac{C' - \mu_r}{\sigma_r}\right) \quad (13)$$

3 泡沫对红外热像仪探测的影响

3.1 对目标发现和识别概率的影响

泡沫可对红外辐射信号进行衰减, 红外辐射信号在通过泡沫时的透过率可以用朗勃一比尔定律进行求解。下面计算泡沫衰减遮蔽条件下红外热像仪对目标的发现和识别概率。

当目标和红外热像仪之间有泡沫存在时, 目标和背景的视辐射亮度将发生改变, 因而这时的视辐射对比度亦有所不同。设热像仪、泡沫、目标背景的位置关系如图2所示。

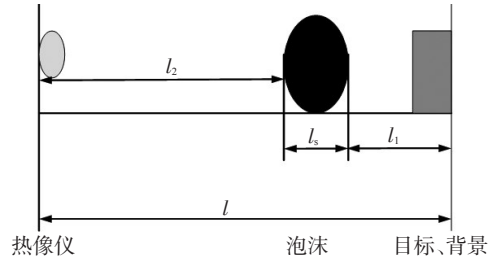


图2 热像仪、泡沫云、目标背景之间的位置关系

设辐射在 l_1 、 l_2 和 l_s 段的透过率分别为 τ_1 、 τ_2 和 τ_s , L_s 为泡沫的辐射亮度, 则此时目标和背景的视辐射亮度 L_0'' 和 L_b'' 分别为

$$L_0'' = \{[L_0\tau_1 + L_h(1-\tau_1)]\tau_s + L_s\}\tau_2 + L_h(1-\tau_2) \quad (14)$$

$$L_b'' = \{[L_b\tau_1 + L_h(1-\tau_1)]\tau_s + L_s\}\tau_2 + L_h(1-\tau_2) \quad (15)$$

则此时的视辐射对比度为

$$C'' = \frac{C}{1 + \frac{L_h(1-\tau_1)\tau_s\tau_2 + L_s\tau_2 + L_h(1-\tau_2)}{\tau_1\tau_s\tau_2 \max(L_b, L_0)}} \quad (16)$$

在实际情况下, 一般有 $l_2 \gg l_1$, $l_2 \gg l_s$, 从而有 $l_2 \approx l$, $l_1 \approx 0$, 于是在式(16)中有 $\tau_1 \approx 1$, $\tau_2 \approx \tau = e^{-\alpha l}$, $\tau_s = e^{-\alpha_c l_s}$, α_c 为泡沫的线性消光系数, 这样式(16)可化简为

$$C'' = \frac{C}{1 + \frac{L_h(\tau^{-1} - 1) + L_s}{\tau_s \max(L_b, L_0)}} = \frac{|L_b - L_0|}{\max(L_b, L_0) \left[1 + \frac{L_h(\tau^{-1} - 1) + L_s}{\tau_s \max(L_b, L_0)} \right]} = \frac{|L_b - L_0|}{\max(L_b, L_0) + \frac{L_h(e^{\alpha l} - 1) + L_s}{\tau_s}} \quad (17)$$

设热像仪在泡沫衰减遮蔽下对目标的发现概率为 $P_3(D)$,则

$$P_3(D) = \phi\left(\frac{C'' - \mu}{\sigma}\right) \quad (18)$$

设热像仪在泡沫衰减遮蔽下对目标的识别概率为 $P_3(R)$,则

$$P_3(R) = P_3(D) \cdot P_3(R/D) = \phi\left(\frac{C'' - \mu}{\sigma}\right) \phi\left(\frac{C'' - \mu_r}{\sigma_r}\right) \quad (19)$$

3.2 不同环境条件下目标发现和识别概率的比较

根据目标处于理想环境、大气环境及泡沫衰减遮蔽条件下,红外热像仪对目标的发现和识别概率的计算公式,利用Matlab仿真软件进行了数值计算,结果如下:

(1) 辐射对比度与发现和识别概率的关系

将泡沫的厚度设定为10 cm时,分别计算3种条件下的发现和识别概率,其数值计算结果如图3所示。

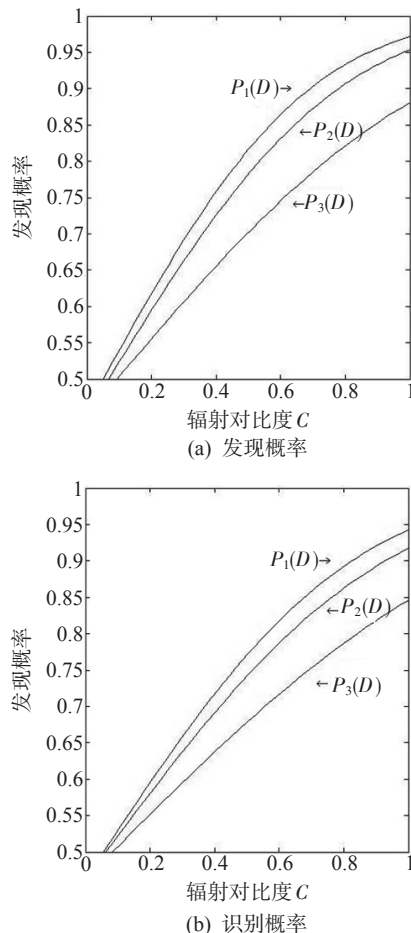


图3 辐射对比度与发现和识别概率的关系

从图3可知,随着辐射对比度的增大,3种条件下的发现和识别概率逐渐增加,当泡沫厚度 $l_s=10$ cm时,对目标的发现和识别概率影响作用明显。

(2) 泡沫厚度与发现和识别概率的关系

针对同一种泡沫,分别计算任意厚度下的发现和识别概率,其数值计算结果如图4所示。

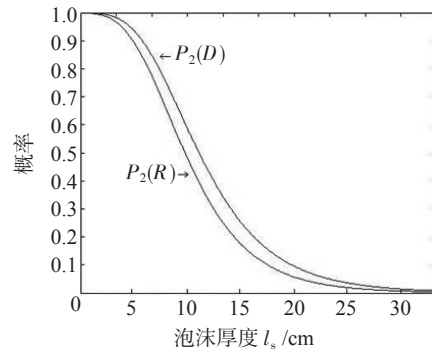


图4 泡沫厚度与发现和识别概率关系

从图4可以清楚地看出,随着泡沫厚度的增加,红外热像仪对目标发现和识别的概率逐渐减小。当泡沫的厚度为30 cm时,红外热像仪对目标发现概率几乎为0,该值与实验测得的值基本吻合。

4 结束语

从泡沫材料的吸收特性和其多面体结构的衰减特点出发,分析了泡沫对红外辐射信号进行散射、反射和吸收的衰减遮蔽方式,并以红外热像仪在理想条件下和自然条件下对目标的探测概率为基础,建立了泡沫环境条件下红外热像仪对目标的红外探测概率模型。最后,利用Matlab软件对所建立的模型进行了仿真分析,结果表明,泡沫对目标的发现和识别概率影响明显。

参考文献

- [1] 赵军,潘功配,陈昕,等. 泡沫红外消光影响因素的实验研究[J]. 光学学报,2007,27(10):1883-1888.
- [2] 赵军,潘功配,关华,等. 泡沫的中远红外消光性能研究[J]. 激光与红外,2007,37(5):394-397.
- [3] 王凤. 高稳定性泡沫配方及其在遮蔽伪装应用中的研究[D]. 南京:南京理工大学,2006:33-34.
- [4] 刘振兴,周常尧,姜宁. 基于目力观测的红外烟幕干扰效能分析[J]. 舰船科学技术,2007,29(1):63-66.
- [5] 周刚. 红外成像系统对目标的发现和识别概率[J]. 红外技术,2001,23(3):16-18.