

地面目标辐射截面的建模与分析

时翔 娄国伟 李兴国

(南京理工大学毫米波微波近感技术研究所, 南京 210094. E-mail: xiangshi74@163.com)

摘要 在被动毫米波探测的分析基础上, 进行了目标辐射截面的建模, 将其作为目标毫米波辐射特性的新表征. 对目标的辐射截面进行了诠释和应用分析, 并在实际测试的基础上, 进行了目标辐射截面的实际应用分析. 最后指出被动毫米波隐身的实质是目标辐射截面的缩减.

关键词 被动毫米波 建模 毫米波辐射计 辐射截面

被动毫米波辐射计是被动毫米波末制导和成像探测技术的信号接收部分. 集群坦克、机场飞机和导弹发射井等地面金属结构的目标辐射温度比周围环境低, 是毫米波辐射计的主要探测与攻击对象. 毫米波主被动复合系统, 在导弹飞行的最后阶段, 探测器接近目标时, 主动毫米波雷达工作自动转换为被动毫米波辐射计工作, 避免了雷达近距离探测时的闪烁效应, 已得到广泛应用. 实践表明, 被动毫米波末制导及成像探测系统, 能在晴天、阴天、雾天和沙尘环境下有效侦察地面的军事和非军事目标 [1~5].

被动毫米波技术近年来得到迅速的发展. 然而, 研究往往集中于制导与探测领域, 对于反被动辐射计探测却甚少涉足. 雷达散射截面(RCS)被广泛用来表征目标的散射特性, 成为雷达探测和反雷达探测的一个重要特征. 事实上, 地面目标已受到被动毫米波探测的严重威胁, 反被动毫米波探测已成为重要的研究课题. 但是, 无论是对于被动毫米波探测和反被动毫米波探测技术, 都缺乏目标辐射特征的良好

表征量.

本文在分析被动毫米波探测距离方程的基础上, 建立了目标辐射特性的一种新的表征方法——目标辐射截面. 通过验模实验以及金属坦克模型的实际测试与分析, 证明其为地面目标辐射特性的良好表征. 正如雷达隐身的实质是目标RCS的缩减一样, 被动毫米波辐射计隐身的实质为目标辐射截面的缩减.

1 被动毫米波探测分析

由于功率和温度在微波波段的线性关系, 在被动毫米波探测的研究中, 用辐射温度 T (单位为绝对温度 K) 来表示毫米波辐射功率的大小.

图1示出了在200~300 m距离处对集群坦克的被动毫米波成像图 [4], 图2示出某坦克的光学和被动毫米波图像的对比 [4]. 从图中可以看出, 金属坦克可以清晰地在地物背景中识别出来, 目标不同部位的辐射特性差异(灰度对比)亦很明显.

通过分析可以知道, 地面目标除了要积极进行

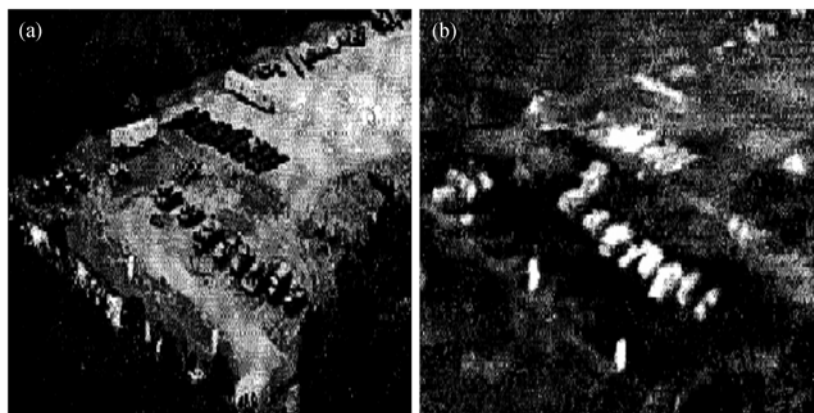


图1 200~300 m处某坦克群的光学图像(a)和被动毫米波图像(b)

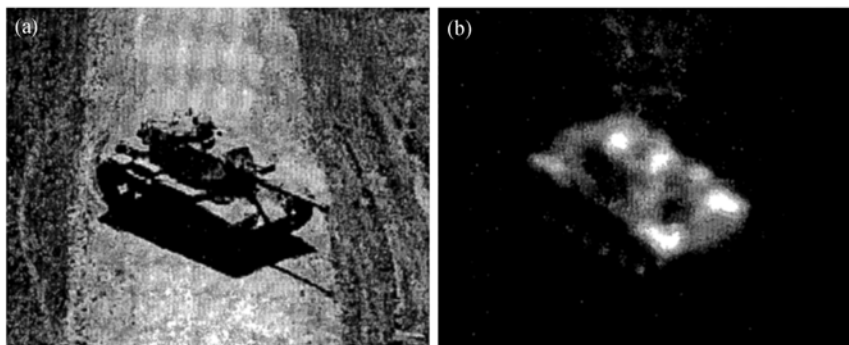


图 2 100 m 处坦克的光学图像(a)和被动毫米波图像(b)

雷达隐身及红外隐身,以应付来自主动微波(包括毫米波)雷达以及红外的精确打击威胁,提高自身的生存能力,还必须积极进行辐射计隐身,即被动毫米波隐身,以减少来自被动毫米波辐射计的威胁.

2 目标辐射截面的建模

被动毫米波辐射计的探测距离与目标的辐射特性、传播路径和接收机的品质密切相关.

2.1 被动毫米波探测距离方程分析

图 3 示出了目标立体角 Ω_T 和天线立体角 Ω_A , 其中 $\Omega_T < \Omega_A$.

$$\Omega_T = A_T / R^2, \quad (1)$$

式中 A_T 为目标投影截面; R 为探测距离.

$$\Omega_A = \frac{\eta_a 4\lambda^2}{\eta_A \pi D^2} = \frac{\Omega_M}{\eta_B}, \quad (2)$$

式中 η_a 为天线辐射效率; λ 为波长; η_A 为天线孔径效率; D 为天线口径尺寸; Ω_M 为天线主波束立体角; η_B 为天线波束效率.

辐射计天线温度为

$$T_a = T_T \cdot \frac{\Omega_T}{\Omega_A} + T_B \cdot \frac{\Omega_A - \Omega_T}{\Omega_A} = T_T \cdot F + T_B \cdot (1 - F), \quad (3)$$

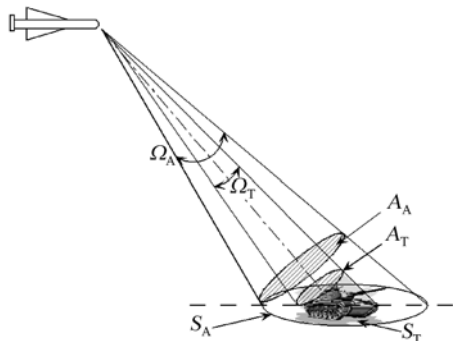


图 3 地面目标面积与天线波束投影

$$F = \frac{\Omega_T}{\Omega_A} = \frac{A_T}{A_A} = \frac{S_T}{S_A}, \quad (4)$$

式中 T_T 为目标辐射温度; T_B 为背景辐射温度; F 为波束填充系数; S_T 为目标投影面积; S_A 为天线主波束地面投影面积; A_A 为天线主波束投影截面.

在被动毫米波探测中,目标信号的大小用天线温度变化 ΔT_a 来表示,它取决于目标辐射温度的变化量 ΔT_T :

$$\Delta T_a = \eta_a \frac{\Omega_T}{\Omega_A} \Delta T_T. \quad (5)$$

最小可探测温度称为辐射计的灵敏度 $\Delta T_{\min}$, 此时目标的信噪比(SNR) $S/N = 1$.

$$\Delta T_{\min} = K_f (T_a + T_m) \sqrt{\frac{B_{if}}{2B_N}}, \quad (6)$$

式中 T_a 为天线温度; T_m 为接收机噪声温度; B_N 为检波后带宽; B_{if} 为检波前带宽; K_f 为辐射计体制常数 [5~8].

从上述方程中,可以得到应用于空-地战术导弹未制导的被动毫米波辐射计的探测距离方程为 [8]

$$R = \left[\eta_a A_T \Delta T_T / \Omega_A \Delta T_{\min} \sqrt{S/N} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

从(7)式可以知道, $[A_T \Delta T_T]$ 表示了目标特性参数对毫米波辐射计作用距离的影响,即

$$R \propto [A_T \Delta T_T]^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

一旦毫米波辐射计的接收机参数和大气影响因子等条件都确定,被动毫米波探测距离与 $[A_T \Delta T_T]$ 的大小成正比关系.

2.2 目标辐射截面的建模与分析

通过上述的分析,从目标自身特性角度可以知道, $[A_T \Delta T_T]$ 表征目标辐射特性,直接与毫米波辐射计的信号输出和探测距离相联系.因此,把目标与环境的毫米波辐射温度差值(ΔT_T)与目标的投影截面积

(A_T)的乘积 [$A_T \Delta T_T$], 定义为目标的辐射计辐射截面, 简称为目标的辐射截面 σ' (radiation cross section), 即

$$\sigma' = A_T \cdot \Delta T_T, \quad (9)$$

其单位为 m^2K , 它与雷达散射截面(RCS)作为雷达散射特性的表征一样, 作为目标毫米波辐射特性的表征。

对于目标的辐射截面 σ' , 有如下解释:

() A_T 表示目标在波束方向的投影截面积, 即辐射计方向看到的目标面积大小。

() ΔT_T 为目标与背景毫米波辐射温度差, 简称对比度,

$$\Delta T_T = |T_B - T_T|, \quad (10)$$

其中 T_B 为背景的毫米波辐射温度, T_T 为目标的毫米波辐射温度。

() 对于辐射温度不均匀的目标, 如大多数立体目标, 其毫米波辐射截面积为

$$\sigma' = \sum_{i=1}^n \sigma'_i = \sum_{i=1}^n A_{Ti} \cdot \Delta T_{Ti}. \quad (11)$$

其数学意义如下: 将立体目标表面分成 n 个微元平面, 每一个微元投影截面积为 A_{Ti} , 对比度为 ΔT_{Ti} , 则整个目标的辐射截面为所有微元辐射截面 σ'_i 的数字和。

一个复杂的立体目标表面, 由于形状的差异, 各部分的对比度必然有差异, 差异大的区域称为“强辐射点”或“辐射中心”。

2.3 目标辐射截面的验模

从(8)式中我们知道, 被动毫米波探测距离 R 是 $(A_T \Delta T_T)^{1/2}$ 的函数。事实上, 对于应用于被动毫米波探测的交流全功率毫米波辐射计来说, 探测距离 R 也是目标信噪比的正比例函数。为了验证目标辐射特性新表征的正确性, 必须证实目标的辐射截面大小亦为目标信号大小的正比例函数^[8]。

图4示出94 GHz辐射计测试的天空与草地的辐射温度。因为金属表面全反射天空辐射温度, 金属平板的辐射温度等于相应入射角度的天空辐射温度。

从上述分析中, 计算出3块金属目标平板(3 cm × 6 cm, 6 cm × 9 cm, 9 cm × 12 cm)在不同入射角条件下的目标投影截面 A_T 、温度对比度 ΔT_T 和目标辐射截面大小。对于交流全功率辐射计来说, 接收机噪声不变化, 输出电压信号大小即为目标的信噪比大小, 数据如表1所示。

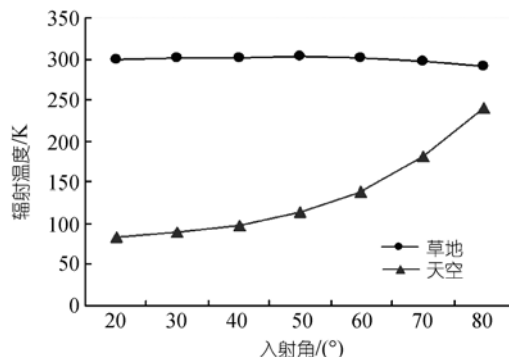


图4 实际测试的天空与草地辐射温度示意图

表1 目标辐射截面与辐射计输出信号大小

入射角度及参数		目标尺寸		
		3 cm×6 cm	6 cm×9 cm	9 cm×12 cm
30°	A_T/cm^2	15.6	46.8	93.6
	$\Delta T_T/\text{K}$	210	210	210
	$\sigma' = A_T \cdot \Delta T_T / \text{m}^2\text{K}$	0.33	0.98	1.97
	$\Delta U/\text{mV}$	840	2500	5000
60°	A_T/cm^2	8	24	48
	$\Delta T_T / \text{K}$	164	164	164
	$\sigma' = A_T \cdot \Delta T_T / \text{m}^2\text{K}$	0.13	0.39	0.79
	$\Delta U/\text{mV}$	330	1000	2000

从表1的测试数据可以发现, 目标的辐射截面大小与目标信号大小成正比例。因此, 目标辐射截面的表征准确而有效。

3 地面目标的辐射截面分析

根据实际的测试结果, 对某金属坦克模型目标的辐射截面进行了分析和计算。94 GHz的毫米波辐射计以30°的入射角, 近距离(1.5 m)迎车头对地面某装甲目标表面进行测试, 地面背景辐射温度为290 K, 不随入射角度变化。测试结果经MATLAB程序进行适当插值后绘图, 目标与背景毫米波辐射温度对比度的等值线如图5所示。

计算不同等温线包含区域的辐射截面积, 得出目标整体的辐射截面大约为

$$\sigma' = \sum_{i=1}^n A_{Ti} \cdot \Delta T_{Ti} \approx 1000 \text{ m}^2\text{K}.$$

在远距离测试时, 目标的局部辐射特性差异将不明显, 图6和7分别示出94 GHz辐射计在15 m处, 分别以入射角15°和45°测试的结果。

根据15°和45°测试结果, 计算装甲目标的辐射截面积分别近似为2500和800 m^2K 。

从上述的测试结果可以得出以下结论:

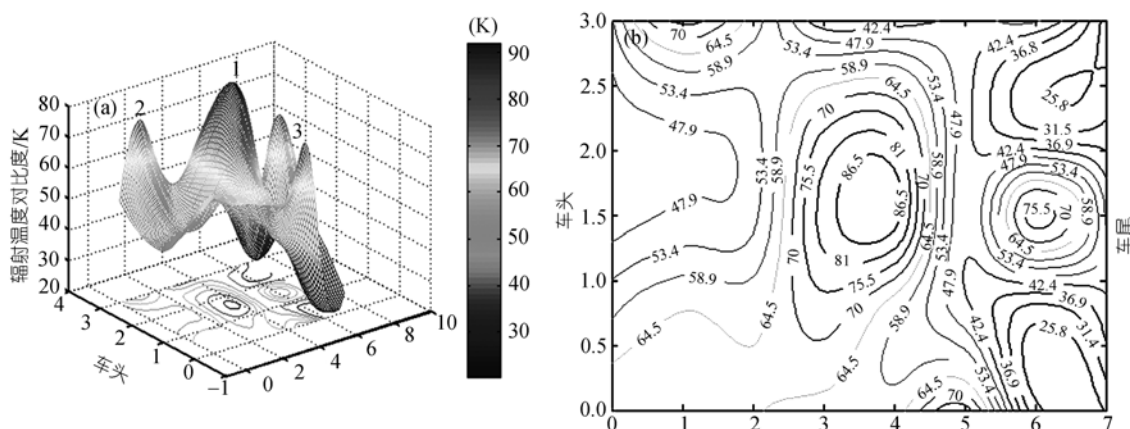


图 5 测试坦克模型的毫米波辐射温度对比度示意图(入射角 30° , 测试距离 1.5 m)

(a) 三维图; (b) 等温线图

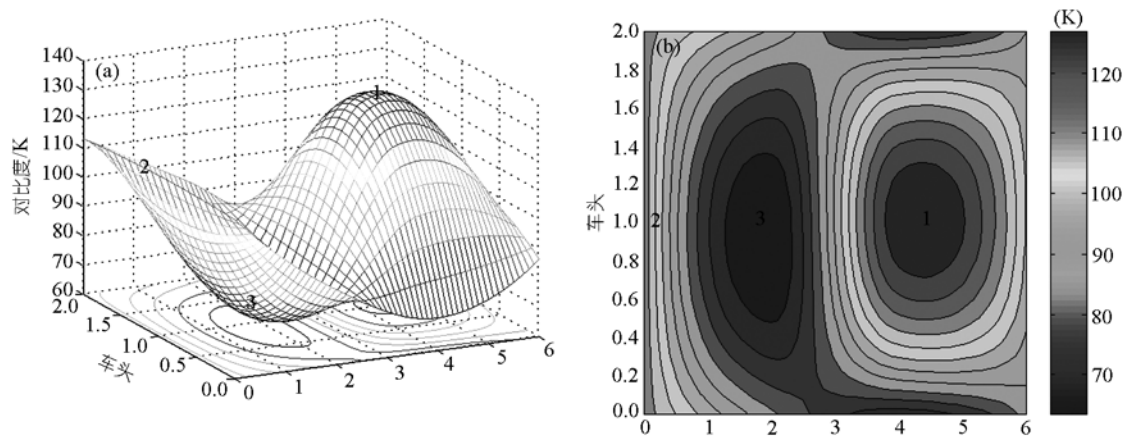


图 6 测试坦克模型的辐射温度对比度示意图(距离 15 m, 入射角 15°)

(a) 三维图; (b) 等温线图

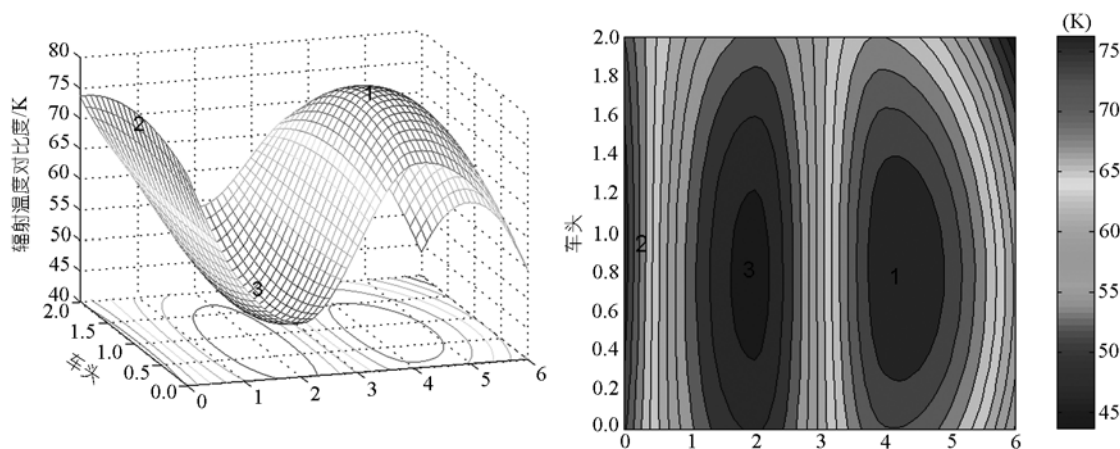


图 7 测试坦克模型的辐射温度对比度示意图(距离 15 m, 入射角 45°)

(a) 三维图; (b) 等温线图

() 近距离探测装甲目标时, 目标的局部辐射特性差异明显, 远距离探测时, 局部特性模糊, 目标更趋近点目标特性;

() 装甲目标的强辐射点在顶甲和前甲处;

() 辐射计入射方向接近天顶探测, 目标的对比度最大, 辐射截面最大.

4 目标辐射截面的缩减

将毫米波雷达与辐射计的探测距离, 以及雷达截面、辐射截面归一化, 绘出关系曲线, 如图8所示. 比较得出, 辐射计探测距离随辐射截面的变化, 比雷达探测距离随雷达截面的变化迅速. 当目标的辐射截面 $[A_T \Delta T_T]$ 下降为原来的 $1/10$, 即下降 10 dB 时, 探测距离 R 下降为原来的 32% .

从上述分析我们知道, 正如目标主动毫米波雷达隐身技术的实质是控制目标的散射特性, 即缩减目标的RCS一样, 被动毫米波辐射计隐身技术的实质为目标辐射特性的控制, 也即目标辐射截面的缩减.

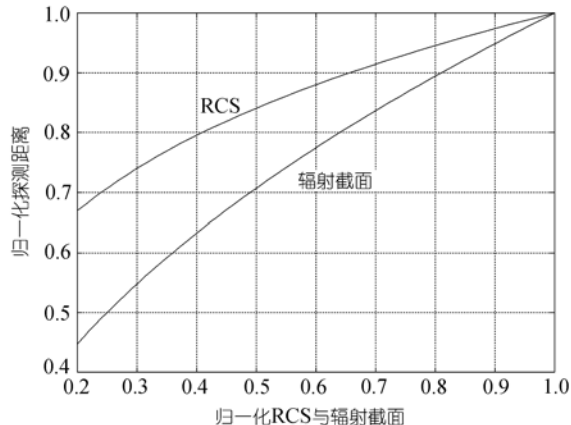


图8 归一化距离与归一化 RCS 及辐射截面的关系曲线

5 结论

本文提出的目标辐射特性的表征——辐射截面, 是基于探测器接收到的能量变化提出的. 正如雷达截面对于主动雷达探测与目标散射特性研究的贡献, 目标辐射截面也将有助于被动辐射计探测与目标辐射特性的研究. 尽管目标辐射截面在目标辐射特性研究中已被证实其科学意义, 但概念的深入和提高必须依赖于大量的理论研究和实际测试. 文中提出的被动毫米波隐身(辐射计隐身)技术的实质, 即目标辐射截面的缩减, 必须与主动毫米波隐身(雷达隐身)和红外隐身等主要的目标特性控制手段一起进行兼容性的研究. 被动毫米波探测技术和反探测技术还需进行大量的理论分析和实践测试工作.

参 考 文 献

- 1 Stewart W L. Passive millimeter wave imaging considerations for tactical aircraft. IEEE AESS Syst Mag, 2002, 12: 11—15[DOI]
- 2 Lüthi T, Mätzler C. Stereoscopic passive millimeter-wave imaging and ranging. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2005, 53(8): 2594—2599[DOI]
- 3 Yujiri L, Shoucri M, Moffa P. Passive millimeter-wave imaging. IEEE Microw Mag, 2003, 4(3): 39—50[DOI]
- 4 Olsen R, Clark S, Galliano J, et al. Video-rate passive millimeter-wave imager. In: Proceedings of 18th Digital Avionics Systems Conference, St Louis, USA, 1999. 3C11—3C18
- 5 巴顿 K J, 威尔茨 J C, 编. 毫米波系统. 北京: 国防工业出版社, 1989. 103—123
- 6 Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing, Active and Passive. Massachusetts: Artech House Inc, 1981
- 7 张祖荫, 林士杰. 微波辐射测量技术及应用. 北京: 电子工业出版社, 1995. 1—25, 101—105
- 8 李兴国. 毫米波近感技术及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1991. 26—28