

文章编号:1001-9014(2007)01-0043-04

装甲目标毫米波辐射温度的建模与计算

时翔¹, 娄国伟¹, 李兴国¹, 张光锋¹, 聂建英²

(1. 南京理工大学, 江苏 南京 210094; 2. 福州大学, 福建 福州 350002)

摘要:在被动毫米波探测原理的研究基础上,建立了辐射计天线温度模型与输出信号模型,对装甲目标进行了实战条件下的毫米波辐射温度计算与分析.指出在进行雷达隐身的同时,必须进行针对被动探测的毫米波被动隐身技术研究,即毫米波辐射特性的控制.

关键词:毫米波;辐射计;被动探测;辐射温度;装甲目标;目标特性

中图分类号:TN015 **文献标识码:**A

MODELLING AND CALCULATING OF MILLIMETER WAVE RADIANT TEMPERATURE FOR ARMORED TARGET

SHI Xiang¹, LOU Guo-Wei¹, LI Xing-Guo¹, ZHANG Guang-Feng¹, NIE Jian-Ying²

(1. Nanjing Univ. & Sci. and Tech., Nanjing 210094, China; 2. Fuzhou Univ., Fuzhou 350002, China)

Abstract: On the basis of passive millimeter wave (MMW) detection principle, radiometer antenna temperature and output signal models were established. Armored target MMW radiant temperature in actual combat condition was computed and analyzed. The necessity for passive MMW stealth at the same time of radar stealth research, that is MMW radiation characteristics control, was pointed out.

Key words: millimeter wave; radiometer; passive detection; radiant temperature; armored target; target characteristics

引言

被动毫米波系统能够在晴天、阴天、雾天和沙尘环境中有效侦察地面的军事和非军事目标,已经在多种反装甲毫米波导引头和末敏弹,及各种机载、星载毫米波被动成像系统中得到应用.装甲目标毫米波辐射温度的研究,是被动毫米波探测与成像系统的研制,以及提高装甲目标在未来战场生存能力的理论基础.国外关于毫米波被动系统应用于飞机盲降、地雷探测、机场安检、成像、遥感等研究的大力开展,以及国内开展的被动毫米波探测原理与系统的研究,装甲目标毫米波辐射温度的反演与材料毫米波发射率的计算等工作,为装甲目标毫米波辐射温度研究提供了坚实的理论与实践基础.

本文通过装甲目标毫米波辐射温度的建模、计算与分析工作,对实战环境下装甲目标所受被动毫米波探测威胁进行分析与论证,指出在进行雷达隐

身的同时,必须进行被动毫米波隐身技术的研究.

1 被动毫米波探测的理论基础

根据普朗克定律,一切高于绝对温度零点的物体都要对外辐射电磁波.毫米波辐射测量是通过高灵敏度的辐射计,接收物体发射电磁波谱中的毫米波热辐射能量来探测物体特性,进行目标识别.

在毫米波频段以下区域,根据普朗克黑体辐射定律得到简化的瑞利-金斯近似表达式,黑体的光谱亮度 B_f 表示为:

$$B_f = \frac{2kT}{\lambda^2}, \quad (1)$$

式中, k ——波尔兹曼常数(1.38×10^{-23} J/k);

λ ——波长(m);

T ——绝对温度(K).

功率和温度具有线性关系:

$$P = kT_B \Delta f, \quad (2)$$

收稿日期:2006-04-10, 修回日期:2006-10-31

基金项目:中国博士后科学基金(2005038579)

作者简介:时翔(1974-),男,江苏泗阳人,南京理工大学,博士生,主要从事被动毫米波探测与目标辐射特性研究.

Received date: 2006-04-10, revised date: 2006-10-31

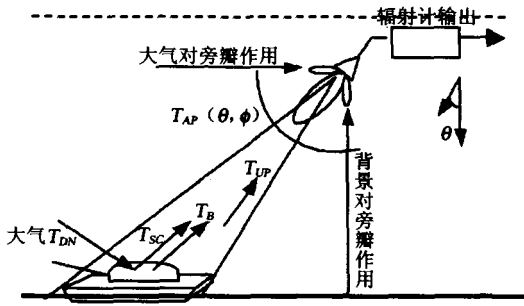


图1 装甲目标的毫米波辐射温度测量示意图
Fig.1 Schematic drawing of armored target MMW radiant temperature measurement

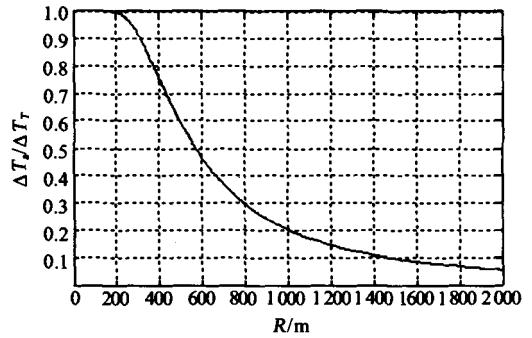


图2 $\Delta T_a/\Delta T_T$ 与 R 的关系曲线
Fig.2 Relational curve of $\Delta T_a/\Delta T_T$ and R

式中, T_B ——亮度温度(K), 物体的自身辐射温度;
 Δf ——接收机带宽(Hz).

因此, 在毫米波辐射特性的研究中用温度(以绝对温度 K 为单位)来表示毫米波辐射功率的大小.

图1 为装甲目标的毫米波辐射温度测量示意图, 毫米波辐射计在方向 (θ, ϕ) 上观测到目标的毫米波辐射温度为:

$$T_{AP}(\theta, \phi, H, p) = \frac{1}{L_a(\theta, H)} [T_B(\theta, \phi, p) + T_{SC}(\theta, \phi, p)] + T_{UP}(\theta, H), \quad (3)$$

式中, θ, ϕ, H, p ——分别代表着探测角、方位角、探测高度与天线极化方向;

$L_a(\theta, H)$ ——目标到天线传输路径上大气的损耗因子;

$T_B(\theta, \phi, p)$ ——目标在 (θ, ϕ) 方向的 p 极化亮度温度;

$T_{SC}(\theta, \phi, p)$ ——目标在 (θ, ϕ) 方向的 p 极化反射辐射温度;

$T_{UP}(\theta, H)$ ——天线接收到的大气向上辐射的辐射温度.

2 天线温度与输出信号模型

2.1 天线温度模型与仿真

毫米波辐射计的天线温度相当于天线上接收到的信号功率, 对于一般高增益、低旁瓣天线, 当天线在目标与背景之间扫描时, 设:

天线温度的变化量为: $\Delta T_a = T_a - T_i, T_a, T_i$ 分别表示目标与背景的天线温度;

目标与背景的辐射温度差为: $\Delta T_T = T_T - T_{BT}, T_T, T_{BT}$ 分别表示目标与背景的辐射温度.

$$\text{则有: } \frac{\Delta T_a}{\Delta T_T} \approx 1 - e^{-bA_T \pi R^2}, \quad (4)$$

式中, $\Delta T_a/\Delta T_T$ 定义为目标的归一化天线温度变化, b 为与天线增益相关的参数, A_T 为目标的辐射面积, R 为辐射计探测目标距离.

设 $b = 14214$, ($\phi 300\text{mm}$, 3dB 宽度为 0.8° 天线) $A_T = 25\text{m}^2$, 可根据式(4)绘出归一化天线温度变化 $\Delta T_a/\Delta T_T$ 与探测距离 R 的关系曲线如图2所示.

从曲线看出, 在近程探测范围(50 ~ 300m)内, 辐射计归一化天线温度的变化 $\Delta T_a/\Delta T_T$ 趋近于1, 这也是毫米波辐射计的最佳作用距离.

2.2 毫米波辐射计输出信号模型

当辐射计天线在目标与背景之间进行扫描时, 归一化天线温度变化为一钟形脉冲信号, 如图3(a)所示, 其近似高斯表达式为:

$$\Delta T = Ae^{-nb^2v^2t^2}, \quad (5)$$

式中, A 为幅度常数, 其值由式(4)所确定的归一化天线温度变化的大小决定, 与其成正比; b 为波形常数, 可通过计算机逼近来求出; v 为辐射计扫描速率; t 为扫描时间.

天线的温度变化量经混频、中放、检波、视放, 将功率转化为电压形式. 输出电压变化信号 ΔU 为—

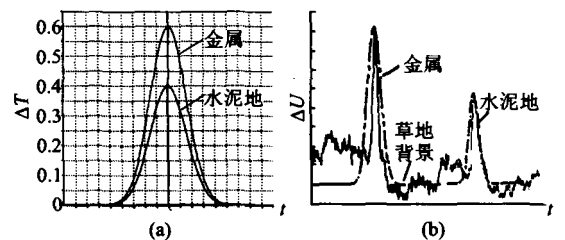


图3 (a)辐射计归一化天线温度变化信号脉冲与(b)辐射计输出电压信号与仿真曲线(虚线)对比(图中 $b = 400$)
Fig.3 (a) Radiometer normalization antenna temperature change signal pulse, (b) radiometer output voltage signal contrasts with the simulation curve (dashed line) ($b = 400$)

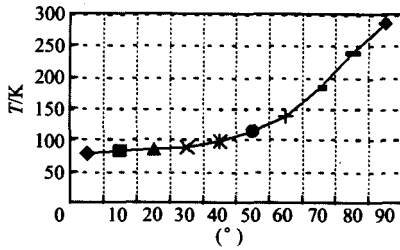


图4 天顶半球辐射温度示意图
Fig.4 Schematic drawing of zenith hemisphere radiant temperature

低频交流信号,信号波形与天线温度变化信号模型的波形相同,如图3(b)所示,即:

$$\Delta U = B e^{-mb^2 \omega^2 t^2} \quad (6)$$

B 为输出电压变化信号的幅度常数.

当观测距离、观测角度、天线特性一定时,信号的波形幅度只与目标与背景的辐射特性有关,天线温度变化量含有较精确的目标毫米波辐射特征.

3 装甲目标毫米波辐射温度的计算

3.1 装甲目标地面背景的毫米波辐射温度计算

图4为某次实际测试的天顶随入射角变化的辐射温度(94GHz)示意图.天顶入射角为0°时,天空辐射温度最低,天顶入射角靠近地面,逐渐增大时,天空辐射温度逐渐上升,当天顶入射角接近90°时,天空的辐射温度接近于地面辐射温度.

此时,静止装甲目标的物理温度为 $T_s = 293\text{K}$ (20°C),表面发射率 $\varepsilon = 0.1$,反射率 Γ 与其成归一化关系,即 $\varepsilon + \Gamma = 1$.由式(1)可知,要计算坦克的毫米波辐射温度,必须先求出装甲目标自身辐射温度与反射天空的辐射温度.

如图5所示,将天顶角从0°到90°分为 n 等分微元,则装甲目标反射天空的辐射温度为:

$$T_{sc} = \Gamma \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{2\pi} \cdot T_i \right) = (1 - \varepsilon) \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{2\pi} \cdot T_i \right) \quad (7)$$

第 i 个微元占天顶半球体的面积为:

$$A_i = \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} 2\pi r \cos \theta \, d\theta \quad (8)$$

式中, θ_i, θ_{i+1} 为第 j 个微元的起始角度.在统计意义上,将天顶半球分为每隔10°角的 $n = 9$ 部分计算.此时,装甲目标反射天空的辐射温度为:

$$\begin{aligned} T_{sc} &= (1 - \varepsilon) \cdot \left(\frac{A_1}{2\pi} T_1 + \frac{A_2}{2\pi} T_2 + \dots + \frac{A_9}{2\pi} T_9 \right) \\ &= 0.9 \times \left(\int_{80^\circ}^{90^\circ} \frac{2\pi r \cos \theta \, d\theta}{2\pi} \times \frac{(78.4 + 80.1)}{2} + \dots \right) \end{aligned}$$

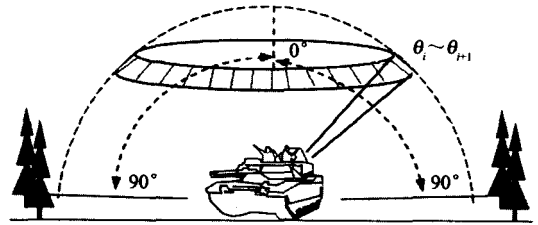


图5 装甲目标反射天顶半球毫米波辐射温度示意图
Fig.5 Schematic drawing of armored target reflection zenith hemisphere MMW radiant temperature

$$+ \int_{0^\circ}^{10^\circ} \frac{2\pi r \cos \theta \, d\theta}{2\pi} \times \frac{(239 + 286)}{2}$$

$$= 157.8\text{K}$$

自身辐射温度为:

$$T_B = \varepsilon \cdot T_s = 0.1 \times 293 = 29.3\text{K}$$

晴朗天气在近程毫米波被动探测距离下,大气损耗因子 $L_a(\theta, h) \approx 1$,大气对辐射计的毫米波辐射也非常小, $T_{UP}(\theta, h) \leq 1\text{K}$,因此,可将大气损耗和大气辐射忽略.这样,根据式(1)计算的装甲目标的毫米波辐射温度为:

$$T_{AP} = T_B + T_{SC} \approx 157.8 + 29.3 = 187.1\text{K}$$

此时,背景地面物理温度为293K,表面发射率为 $\varepsilon = 0.9$ (典型草地或泥土地),同样的方法可得出地面的毫米波辐射温度为:

$$T'_{AP} = 281.2\text{K}$$

从计算看出,金属装甲目标的毫米波辐射温度的大部分来自天空辐射温度的反射;地面的毫米波辐射温度的大部分来自自身辐射温度,其反射天空的毫米波辐射只占很小的一部分.

于是,装甲目标与背景的毫米波辐射温度对比度为: (“+”表示目标辐射温度高于背景,“-”表示目标辐射温度低于背景)

$$\Delta T_{AP} = T_{AP} - T'_{AP} = -94.1\text{K}$$

从上述的计算结果中可以看出,装甲目标的毫米波辐射温度远低于地面背景的毫米波辐射温度,二者有较大的温度对比度,对于测试精度达到1K的毫米波辐射计,容易被探测.

3.2 两栖战车实战条件下毫米波辐射温度的计算

两栖战车的实战环境为路面背景和水面背景,按照上述方法,分别计算静止与运动两栖战车(308K),以及隐身战车(对毫米波雷达的隐身效果最大达到-20dB, $\varepsilon = 0.92$)在地面和水面背景($\varepsilon = 0.6$)下的毫米波(94GHz)辐射温度对比度,绘成表

1、2:

从表中计算结果可以得出的结论是:

1. 装甲目标在不同的背景下,与背景的毫米波辐射温度对比度是不同的,受到的毫米波被动探测威胁也不同.陆地背景下的未隐身装甲目标由于与环境的温度对比度最大,受到被动毫米波探测的威胁最大,水面背景下的装甲目标无论是隐身、运动与否,受到的被动毫米波探测威胁都较大.

2. 运动的隐身装甲目标比其静止时受到的威胁大,隐身装甲目标在水面背景下的威胁比未隐身时受到的威胁大.

表1 94GHz 装甲目标与背景的毫米波辐射温度
Table 1 94GHz armored target and background MMW radiation temperature

	发射率 ϵ	94GHz 辐射温度
陆地背景	0.9	281.2K
水面背景	0.6	222.4K
静止战车	0.1	187.1K
运动战车	0.1	188.6K
静止隐身战车	0.92	283.6K
运动隐身战车	0.92	297.4K

表2 装甲目标在不同背景下的辐射温度对比度
Table 2 Armored targets radiation temperature contrast gradient under the different background

	陆地背景	水面背景
静止战车	$\Delta T_{AP} = -94.1K$	$\Delta T_{AP} = -34.3K$
运动战车	$\Delta T_{AP} = -92.6K$	$\Delta T_{AP} = -33.8K$
静止隐身战车	$\Delta T_{AP} = +2.4K$	$\Delta T_{AP} = +61.2K$
运动隐身战车	$\Delta T_{AP} = +16.2K$	$\Delta T_{AP} = +75.0K$

因此,在研究针对主动探测的雷达隐身的同时,也要进行针对被动探测的毫米波被动隐身技术研究.隐身技术的实质是低目标特性技术,雷达隐身的实质是目标散射特性的控制——雷达截面积(RCS)的缩减,毫米波被动隐身技术的实质是目标辐射特性的控制——目标与背景的毫米波辐射温度对比度(ΔT_{AP})的减少.根据毫米波辐射温度的计算结果,必须根据不同的作战环境,作战状态进行毫米波被

动隐身技术的研究.

4 结束语

本文通过对装甲目标的毫米波辐射温度的建模与计算,指出为提高未来战场上装甲目标的生存能力,必须在进行雷达隐身的同时,进行被动毫米波隐身.毫米波辐射特性的研究,不仅为被动毫米波探测与制导技术提供更加细致深入的理论依据,同时也为目标特性的控制研究提供理论、数据与方法上的支持.对于装甲目标毫米波辐射温度的研究,应该采取散射特性(RCS)及红外特性的研究方式,即通过原理计算、计算机的分析与仿真,再进行实测的对比验证,达到理论与实践的完善和成熟.对毫米波散射与辐射、红外辐射进行对比性研究将是目标的毫米波辐射特性研究深入的重要手段.

REFERENCES

- [1] William L, Stewart I, Passive millimeter wave imaging considerations for tactical aircraft [J]. *AESS Systems Magazine*, 2002, 12:11—15.
- [2] Thomas Lüthi Christian Mätzler, Stereoscopic passive millimeter-wave imaging and ranging [J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(8):2594—2599.
- [3] ZHANG Guang-Feng, ZHANG Zu-Yin, Guo Wei. Research on 3mm band radiometric imaging [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张光峰,张祖荫,郭伟.3mm 波段辐射成像研究.红外与毫米波学报), 2005, 24(6):422—426.
- [4] MIAO Chen, LOU Guo-Wei, LI Xing-Guo. Antenna temperature model of 3mm coating stealth materials [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (缪晨,娄国伟,李兴国.3mm 涂层隐身材料的天线温度模型,红外与毫米波学报), 2004, 23(3):221—224.
- [5] NIE Jian-Ying, LI Xing-Guo, LOU Guo-Wei. Smooth interpolate solution of armored targets' millimeter wave radiometer radiometric brightness temperatures [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (聂建英,李兴国,娄国伟.装甲目标毫米波辐射亮温平滑内插解.红外与毫米波学报), 2004, 23(5):377—379.
- [6] LI Xing-Guo, Millimeter wave near-sensing technology and application [M], Beijing: National Defense Industry Publishing House. (李兴国,毫米波近感技术及其应用,北京,国防工业出版社). 1991:22—51.