

# 装甲目标毫米波辐射测量的 天线温度对比度研究\*

陈绍勇<sup>1</sup>, 郎 量<sup>2</sup>, 张 刚<sup>1</sup>, 彭 节<sup>1</sup>, 刘 威<sup>1</sup>

(1 武汉军械士官学校, 武汉 430075; 2 华中科技大学, 武汉 430075)

**摘要:**被动毫米波探测技术有很强的隐蔽性和抗干扰能力,因此被用于反装甲导弹和末制导寻的领域。天线温度对比度是被动毫米波探测的核心参数。通过对装甲目标建模,导出装甲目标天线温度对比度的公式,结合典型地物目标视在温度的特征,得出装甲目标被动毫米波探测的最佳角度、距离和实用公式。实际测量显示,该公式具有很高的精度,可作为制导武器探测和设计的有用依据。

**关键词:**天线温度;装甲目标;对比度;被动探测

中图分类号:TN015 文献标志码:A

## Research on Antenna Temperature Contrast of Millimeter Wave Radiation Measurement for Armored Target

CHEN Shaoyong<sup>1</sup>, LANG Liang<sup>2</sup>, ZHANG Gang<sup>1</sup>, PENG Jie<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>

(1 Wuhan Ordnance N. C. O Academy of PLA, Wuhan 430075, China;

2 Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430075, China)

**Abstract:** Because of strong anti-jamming ability and concealment, the passive millimeter wave (MMW) detection technology has been applied to important fields such as homing guidance in anti-armored missile and smart bomb. Antenna temperature contrast is the core parameter of passive MMW detection. The antenna temperature contrast formula was derived based on armored target model. According to the apparent temperature characteristics of the typical terrain targets, the optimum angle, distance and pragmatic formula for armored target passive MMW detection were obtained. The actual measurement shows that the formula has higher accuracy, it is meaningful for detection and design of guided weapon.

**Keywords:** antenna temperature; armored target; contrast; passive detection

### 0 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测量的天线温度对比度的研究,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<sup>[1]</sup>。

文中通过对装甲目标毫米波辐射测量的建模、计算与分析,推导出装甲目标的天线温度对比度实用公式,分析了实战情况下装甲目标测量

的天线温度对比度随角度、距离等因素变化的规律。有利于探测器的设计和对目标的精确打击。

### 1 毫米波辐射测量原理

微波辐射计是用来接收目标物体辐射和反射的电磁能量的设备。当被测场景中目标物体和背景物体亮度温度不同时,辐射计可以根据接收到的天线温度对比度经过一定的

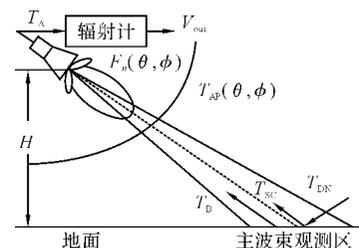


图1 微波辐射测量原理示意图

\* 收稿日期:2008-12-02

作者简介:陈绍勇(1975-),男,湖北汉川人,讲师,硕士,研究方向:电子技术、微波教学和研究工作。

处理后,区分目标物体和背景物体。图 1 是微波辐射测量示意图。

处在  $T_{AP}(\theta, \varphi)$  分布中的无耗天线的天线温度  $T_A(\theta, \varphi)$  为<sup>[2]</sup>:

$$T_A(\theta, \varphi) = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} T_{AP}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (1)$$

式中:  $T_{AP}(\theta, \varphi)$  为主波束观测区的视在温度;  $G(\theta, \varphi)$  为天线增益函数。天线温度就是视在温度被天线方向图加权的结果。

## 2 装甲目标天线温度对比度建模

制导武器追踪目标,一般采用旋转方式靠近目标。当扫描区域内有目标和无目标时辐射计输出的天线温度不同,称为天线温度对比度。如图 2 所示。

图中地面背景上有一块平面金属目标面积为  $A_T$ , 天线观测角为  $\theta_F$ , 高度为  $H$ , 天线的中心线为  $HS$ , 被测目标

$A_T$  不在天线波束中心, 目标上任何一个元面积  $dA_T$  与天线的连线为  $HM$ , 且与天线波束中心的夹角为  $\theta$ 。假定天线的旁瓣可以忽略并设天线的主波束立体角为  $\Omega_M$ , 目标对天线的立体角为  $\Omega_T$ , 则目标天线温度  $T_{A1}$  为:

$$T_{A1}(\theta_F) = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} T_{APT}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega \approx \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_T} T_{APT}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega + \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_M - \Omega_T} T_{APB}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (2)$$

式中:  $T_{APT}(\theta, \varphi)$  为目标视在温度,  $T_{APB}(\theta, \varphi)$  为背景的视在温度。如果背景上没有目标, 则天线温度  $T_{A2}(\theta_F)$  为:

$$T_{A2}(\theta_F) \approx \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_M} T_{APB}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_T} T_{APB}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega + \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_M - \Omega_T} T_{APB}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (3)$$

所以天线温度对比度  $\Delta T_A(\theta_F)$  为:

$$\Delta T_A(\theta_F) = T_{A1}(\theta_F) - T_{A2}(\theta_F) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_T} [T_{APT}(\theta, \varphi) - T_{APB}(\theta, \varphi)] G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (4)$$

对于旋转对称波束, 有  $G(\theta, \varphi) = G(\theta)$ ,  $\theta_T$  为  $HM$  与地面垂线的夹角。制导武器开始探测的初期, 观测高度  $H$  很大, 装甲目标相对于天线所张的立体角很小, 即  $\Omega_T \ll \Omega_M$ , 则  $T_{APT}(\theta, \varphi) \approx T_{APT}(\theta_T)$ ,  $T_{APB}(\theta, \varphi) \approx T_{APB}(\theta_T)$ , 均可看作常数, 故有:

$$\Delta T_A(\theta_F) = \frac{1}{4\pi} [T_{APT}(\theta_T) - T_{APB}(\theta_T)] \int_{\Omega_T} G(\theta) d\Omega = \frac{1}{4\pi} \Delta T_{AP}(\theta_T) \int_{\Omega_T} G(\theta) d\Omega \quad (5)$$

式中  $\Delta T_{AP}(\theta_T)$  是面目标的视在温度对比度。对不同天线, 选用不同的  $b$  值作为  $G(\theta) = G_0 e^{-b\theta^2}$  的近似表达式, 根据图 2 给出的几何关系可得:

$$\Delta T_A(\theta_F) = \frac{\Delta T_{AP}(\theta_T) \cdot G_0 \cdot H}{4\pi} \cdot \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \exp \left\{ -b \left[ \arccos \frac{H \cos \theta_F + y \sin \theta_F}{(h^2 + x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}} \right]^2 \right\} dx dy \frac{1}{(h^2 + x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

如果是圆形目标位于天线波束中心则由式 (5) 可解出:

$$\Delta T_A(\theta_F) = \Delta T_{AP}(\theta_F) \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_T} G_0 e^{-b\theta^2} d\Omega = \Delta T_{AP}(\theta_F) \frac{G_0}{4b} (1 - e^{-b\theta_{TA}^2/4}) \quad (7)$$

其中  $\theta_{TA}$  为目标边缘对天线的夹角, 当天线波束较窄时, 可令  $G_0 = 4b$ , 则式可变为:

$$\Delta T_A(\theta_F) = \Delta T_{AP}(\theta_F) (1 - e^{-b\theta_{TA}^2/4}) = \Delta T_{AP}(\theta_F) (1 - e^{-bA_T \cos^3 \theta_F / \pi H^2}) \quad (8)$$

如果制导武器靠近装甲目标,  $H$  很小时, 式 (8) 就会近似为:

$$\Delta T_A(\theta_F) \approx \Delta T_{AP}(\theta_F) \quad (9)$$

显然, 由于  $H$  很小, 目标所张的立体角就与天线所张的立体角相当, 甚至  $\Omega_T \geq \Omega_M$ 。此时, 目标充满辐射计的主波束, 辐射计接收的装甲目标辐射信息不会随距离的减少而增加, 所以天线温度对比度与距离不再有关系, 它只与天线的观测方向  $\theta_F$  有关。

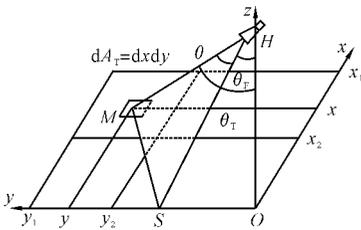


图 2 金属平面目标在辐射测量中的几何关系

### 3 影响天线温度对比度因素的分析

根据式(8)、式(9)可知,当目标、背景确定后,  $\Delta T_A(\theta_F)$  将主要受  $\Delta T_{AP}(\theta_F)$  与  $b, \theta_F$  和  $A_T/H^2$  的影响。

#### 3.1 $b$ 值对天线温度对比度的影响

由式(8)可以看出  $b$  值越大, 天线温度对比度越高, 而由天线理论可知: 对窄波束天线, 天线增益  $G_0 = 4b$ , 且天线的波束宽度  $\beta_{1/2} = 2 \sqrt{\ln 2/b}$ , 意味着在实际探测中应提高天线增益和使用窄波束天线。同时由于提高工作频率可使天线波束宽度变窄, 因此工作频率也应尽可能高。

#### 3.2 $\Delta T_{AP}(\theta_F)$ 对天线温度对比度的影响

从式(8)、式(9)可看出, 其他条件不变的情况下, 天线温度对比度主要由面目标和背景的视在温度对比度  $\Delta T_{AP}(\theta_F)$  决定。由于:

$$\Delta T_{AP}(\theta_F) = T_{APT}(\theta_F) - T_{APB}(\theta_F)$$

所以必须知道装甲目标和背景的视在温度的特性, 装甲目标不是面目标, 但  $H$  较小时, 可等效为面目标。由文献[3-4]可知: 金属面目标是一个理想的反射体, 本身不发射电磁波但会全部反射入射到金属板上的天空向下的辐射, 因而可以直接引用工程计算或实测的天空温度作为金属板的视在温度; 而对于背景, 典型的是草地、泥土地、水泥路面或水面。实测的 3mm 装甲面目标和典型背景的视在温度随  $\theta_F$  的变化关系如图 3 所示, 为便于比较装甲目标与背景之间的天线温度对比度, 同列入图 3 中, 测量条件为: 晴天无云, 气温 300.7K, 测量垂直极化时的天线温度。

从图中可以看出, 除水面外, 典型地物目标之间的天线温度差别不明显, 但与装甲面目标之间的天线温度对比度差别很大, 常温下, 最大可达 220K, 最小的是水面也有 120K。容易识别, 而且在  $\theta_F$  为  $0^\circ \sim 60^\circ$  范

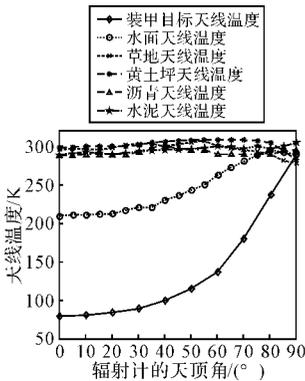


图 3 3mm 波段面目标天线温度测量值

围内, 地物和装甲目标的天线温度基本不随  $\theta_F$  变化, 可以认为大致恒定, 且在此范围内天线温度对比度最大, 因此探测和攻击的角度最好在此范围内, 越小越好。当  $\theta_F$  较大时, 由于天线波束较大, 天线接收了更多的背景辐射而导致天线温度对比度下降。

#### 3.3 $A_T/H^2$ 对天线温度对比度的影响

从式(8)还可以看出, 当其它条件一定时,  $A_T/H^2$  的值越大, 天线温度对比度越高。实际的装甲目标的有效面积  $A_T$  是一定的, 当  $H$  逐渐增大时, 天线温度对比度会逐渐降低, 当  $H$  很大时, 由于  $A_T/H^2$  值很小, 天线温度对比度急剧下降, 此时探测器不能捕捉装甲目标。因此微波辐射探测主要应用于武器末制导和近距离探测。在实际的工程计算中, 若假设探测角在  $0^\circ \sim 60^\circ$  范围内, 则式(8)和式(9)可用一个公式表示为:

$$\Delta T_A \approx \Delta T_{AP, \max} (1 - e^{-bA_T \cos^3 \theta_F / \pi H^2}) \quad (10)$$

为了验证上述结论, 利用相似模缩比原理<sup>[5]</sup>。模拟测量了水泥背景下的面积为  $25\text{m}^2$  金属目标的天线温度对比度。结果见表 1。

气候条件不变,  $\Delta T_{AP, \max} = 190\text{K}, H = 2.2\text{m}, \theta_F = 60^\circ$  辐射计工作频率

表 1 金属板与水泥路面天线温度对比度

面积 / $\text{m}^2$	测量值 / K	计算值 / K
0.1210	188.1	189.9
0.0538	186.5	189.6
0.0194	166.2	170.3
0.0099	127.5	130.2
0.0012	22.8	24.9
0.00027	5.1	6.0
0.000045	1.1	1.0

94GHz, 天线主波束宽度为  $0.8^\circ$ , 对应  $b$  值为 14214, 辐射计灵敏度为 1K。表 1 显示在  $A_T/H^2$  值为  $0.000045\text{m}^2$  时, 天线温度对比度的计算值为 1K, 等于辐射计的灵敏度, 而测量值总是小于理论值的, 因此此时测量值 1.1K 已不能作为有效值。根据相似模缩比算出的高度为 1640m, 可作为此角度下的最大探测高度。其他面积时, 测量值与计算值能较好的拟合, 误差较小, 说明式(10)是可信的, 具有一定精度。由于实际工作中, 系统和其他因素的影响, 往往取测量值为灵敏度 5 倍时作为最大探测距离, 此时  $A_T$  为  $0.00027\text{m}^2$ , 高度约为 670m, 是微波辐射计在此角度下探测装甲目标的最佳探测高度的最大值。

而且虽然距离与天线温度对比度成指数关系,但表 1 测量结果显示,可近似估计为线性关系,用于粗略的估计。

### 4 结 束 语

通过对装甲目标建模,导出了装甲目标天线温度对比度公式。并通过对典型地物目标视在温度的分析,得出在近距离时,0°~60°范围内装甲目标天线温度对比度与探测角度无关;远距离时,装甲目标天线温度对比度与高度和探测角度均有关系,并推出了实用公式,通过测量具有一定的精度,可作为制导武器探测和设计的有用依据。

参考文献:

[1] 时翔,娄国伟,李兴国,等. 装甲目标毫米波辐射温

(上接第 296 页)

使用动态边界层法通过调节边界层的厚度  $\epsilon$  使其满足式(24)~式(26),从而保证满足执行器的幅值和速率限制不被超越,重复上述仿真得到的结果如图 3、图 4 所示,由图 3 俯仰角跟踪曲线可以看出,跟踪误差相比于图 1 有较大的增加,但是保证了系统的稳定,图 4 为动态边界层调节情况。仿真结果表明采用动态边界层法即使在面对执行器限制时仍然能够保证系统的稳定性,同时又获得了较为优异的控制性能。

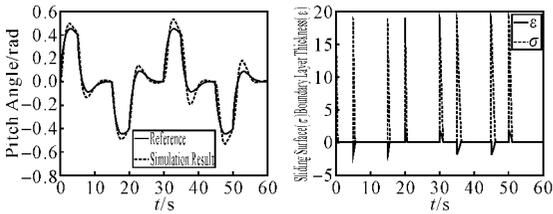


图 3 俯仰角跟踪轨迹 图 4 滑动面和边界层

### 4 总 结

文中主要研究了应用滑模控制器进行水下航行器控制时存在的执行器的限制问题,采用具有动态边界层厚度控制的二阶滑模控制器设计,

度的建模与计算[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(1): 43-46.

[2] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave remote sensing, active and passive[M]. Volume 1, Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry, Addison-Wesley Publishing Company, 1981.

[3] 桂良启,张祖荫,郭伟. 毫米波段典型目标辐射特性研究[C]// 微波毫米波会议论文集, 2005: 1-5.

[4] 张杨远,张祖荫,李青侠. 面目标辐射特性数据库和数据处理[J]. 华中理工大学学报, 1999, 27(8): 98-100.

[5] 张祖荫,郭伟,文光华,等. 金属目标微波辐射特性的理论分析和缩比测量[J]. 华中理工大学学报, 1994, 22(4): 85-88.

在控制过程中动态改变滑模控制器的边界层厚度,以避免超越执行器的限制,保证系统的稳定性,在水下航行器的俯仰角控制中的应用证明了具有动态边界层的滑模控制器设计方法的有效性。

参考文献:

[1] Healey A J, Lienard D. Multivariable sliding mode control for autonomous driving and steering of unmanned underwater vehicle[J]. IEEE J Oceanic Engineering, 1993, 18(3): 327-339.

[2] 宋军,许小鸣. 水下机器人三维路径制导控制器设计[J]. 中国造船, 1998(1): 87-93.

[3] Young K D, Utkin V I, Özgüner. A control engineer's guide to sliding mode control[J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 1999, 7(3): 328-342.

[4] Shtessel Y B, Buffington J M, Pachter M. Reconfigurable flight control on sliding modes addressing actuator deflection and deflection rate saturation [R]. Proceedings of Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA-98-4112.