

3mm 与 8mm 波段无源探测特性的比较

李俊明¹, 张祖荫², 郭伟²

(1. 北京无线电测量研究所, 北京 100854;

2. 华中科技大学电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 研究了毫米波无源探测器探测草地背景中水泥路面的原理. 根据 8mm 和 3mm 波段下天线和地物辐射计的特性, 计算出 8mm 和 3mm 辐射计探测地面目标的温度对比度, 得到这两种辐射计在各种天线口径和工作条件下的最大探测距离, 并对两者的实际探测效果进行了比较.

关键词: 无源探测; 灵敏度; 天线温度对比度

中图分类号: TP75 **文献标识码:** A

COMPARISON OF 3 mm AND 8 mm WAVEBAND PASSIVE DETECTION

LI Jun-Ming¹, ZHANG Zu-Yin², GUO Wei²

(1. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China;

2. Electronics and Information Engineering Department of Huazhong
University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The principle of mmW passive detecting cement roads was studied. According to the antenna, surface feature and radiometer characteristic of 3-mm and 8-mm waveband, the antenna temperature contrast and the maximal detecting distance of 3-mm and 8-mm radiometers were obtained by different antenna diameters and working conditions. Also, the actual detection effect of these two models was compared.

Key words: passive detection; sensitivity; antenna temperature contrast

引言

无源微波探测能够全天候、全天时工作, 而且结构简单、隐蔽性好, 因而在军事上具有很大的应用潜力. 本文研究了在一种特定工作模式下^[1-3], 无源毫米波探测的基本原理、信号特征、最大作用距离, 8mm 和 3mm 探测效果的比较.

1 无源探测水泥路面的原理

设有一水泥路面, 路面宽 $d = 50$ 米, 长 $l = 2000$ 米, 位于一片草地中间, 现有一辐射计斜挂在高度为 h 的降落伞上旋转下落. 旋转速度 $\omega = 3$ 圈/秒, 下降速度 $v = 100$ 米/秒, 辐射计天线波束中心线倾角

$\theta_F = 25^\circ$. 主波束在地面的足迹为一椭圆, 主波束足迹在地面上运动的轨迹为一旋转内螺旋. 如下图 1 所示.

设天线增益为 $G(\theta, \varphi)$ 地面亮温分布为 $T_B(\theta, \varphi)$, 则输出天线温度为:

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

在实际应用中, 通常采用方向图旋转对称的天线, 即 $G(\theta, \varphi) = G(\theta)$, 且主波束效率高、旁瓣可以忽略, 则式(1)可以只在主波束 Ω_m 内积分

$$T_A(\theta_F) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_m} T_B(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (2)$$

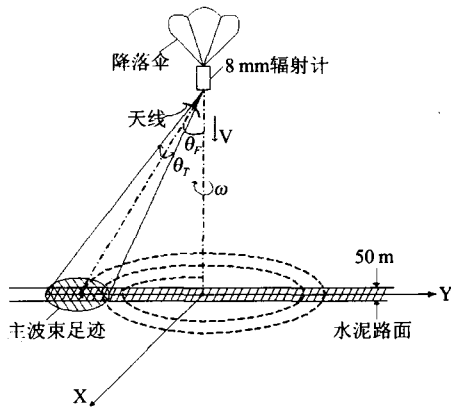


图1 探测模式示意图
Fig.1 Detection model sketch

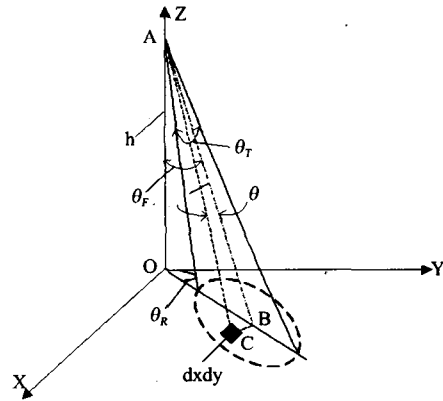


图2 输出信号计算方法示意图
Fig.2 The output signal sketch

在 xyz 坐标系内,天线波束在 xoy 平面内的足迹为一椭圆,如图2所示。

若 $dxdy$ 为主波束在地面足迹内的任一积分元面积, θ 为积分元面积中心 C 到 A 点的连线 AC 与波束中心线 AB 的夹角,则有

$$d\Omega = \frac{dxdy \cdot \cos\theta_F}{r^2} = \frac{dxdy \cdot h}{r^3} \quad (3)$$

式中 $AC = r = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2}$, $\cos\theta_F = \frac{h}{r}$, B 点的坐标 $B(x_B, y_B)$, C 点的坐标 $C(x, y)$ 因为 $x_B = h \sin\theta_R \tan\theta_F$, $y_B = h \cos\theta_R \tan\theta_F$, 所以

$$BC = \sqrt{(x - h \sin\theta_R \tan\theta_F)^2 + (y - h \cos\theta_R \tan\theta_F)^2}$$

而 $AB = h \sec\theta_F$, 故

$$\cos\theta = \frac{AC^2 + AB^2 - BC^2}{2AB \cdot AC} = \frac{h \cos\theta_F + \sin\theta_F (x \sin\theta_R + y \cos\theta_R)}{\sqrt{h^2 + x^2 + y^2}} \quad (4)$$

由于天线方向图旋转对称且忽略旁瓣,则增益可近似表示为:

$$G(\theta, \varphi) = G_0 e^{-b\theta^2} \quad (5)$$

其中, θ 由式(4)给出。

将式(3)、式(5)代入式(2)中积分

$$T_A = \frac{T_S(\theta_F) \cdot G_0 \cdot h}{4\pi} \iint_S \frac{\exp\left\{-b \left[\cos^{-1} \frac{h \cos\theta_F + \sin\theta_F (x \sin\theta_R + y \cos\theta_R)}{(h^2 + x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}}\right]^2\right\}}{(h^2 + x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} dxdy \quad (6)$$

上式即为天线温度表达式,式中 S 为天线主波束的椭圆足迹。由于主波束通常很窄,故式(2)中的 $T_B(\theta, \varphi)$ 可看作常数 $T_S(\theta_F)$ 从积分式中提出,但对式(6)作数字积分时,若 $dxdy$ 在草地上,则 $T_S(\theta_F)$

采用 $T_{草地}(\theta_F)$ 的值,若 $dxdy$ 在水泥路上,则 $T_S(\theta_F)$ 采用 $T_{水泥路}(\theta_F)$ 的数值。

当天线波束在地面上作旋转扫描时,我们将天线波束足迹 S 内没有目标(水泥路)时,按式(6)算得的天线温度 $T_A(\theta_F)$ 称为背景的天线温度 $T_{AB}(\theta_F)$,将波束足迹 S 内有目标(水泥路)时算得的天线温度 $T_A(\theta_F)$ 称为目标的天线温度 $T_{AT}(\theta_F)$,令天线温度对比度为 $\Delta T_A(\theta_F)$,

$$\Delta T_A(\theta_F) = |T_{AB}(\theta_F) - T_{AT}(\theta_F)| \quad (7)$$

2 8mm、3mm 波段下的天线、地物和辐射计特性

实验研究采用的 8mm、3mm 辐射计天线,口径均为 360mm。测得 3db 波束宽度分别 1.5°和 0.5°,主波束宽度分别为 4°和 1.5°。由于近似认为 $G(\theta) \approx G_0 e^{-b\theta^2}$, 故由 $\frac{G_0}{2} = G_0 e^{-b(\theta_{3db})^2}$ 得出: $b = \frac{4 \ln 2}{\theta_{3db}^2}$ 。

又因为 $\iint_{4\pi} G(\theta, \varphi) d\Omega = 4\pi$, 可求得 $G_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi e^{-b\theta^2} \sin\theta d\theta$ 。对于 8mm 辐射计,算得 $b_{8mm} = 4045$, $G_0 = 16181$; 对于 3mm 辐射计,算得 $b_{3mm} = 36407$, $G_0 = 145629$ 。

分别采用 8mm 和 3mm 辐射计对不同的地物进行大量实测,得到不同地物的亮温 $T_S(\theta_F)$ (水平极化, $\theta_F = 25^\circ$), 如表 1 所示。

采用的 8mm 和 3mm 辐射计,其积分时间为 1 秒时的灵敏度 ΔT_{min} 分别为 50mk 和 0.2k。在实际工作中,为了保证有足够快的相应时间,辐射计的积分时间调整为 15 毫秒,由此转换出其灵敏度分别为

0.4k 和 1.6k.

表 1 8mm、3mm 波段下的地物亮温 $T_S(\theta_F)$

Table 1 Terrain brightness temperature of 8mm and 3mm band

| | 草地 | 水泥 |
|---------|---------|---------|
| 8mm 辐射计 | 276k | 251k |
| 3mm 辐射计 | 300.24k | 281.63k |

3 天线温度对比度 ΔT_A 和对作用距离的计算

将上述地物亮温 $T_S(\theta_F)$ 和天线特性 G_0, b 代入式(6), 即可计算出天线在旋转过程中在不同位置上的天线温度, $T_A(\theta_F)$ 并由式(7) 得出天线温度对比度 $\Delta T_A(\theta_F)$ [4]. 计算过程中, 天线每旋转一圈采样 100 个数值, 并且令第 50 个采样点的时间天线波束中心正指向水泥路中心, 得到的 $\Delta T_A(\theta_F)$ 如图 3 所示. 计算和分析表明, 探测高度 h 越大, 则 $\Delta T_A(\theta_F)$ 越小. 根据辐射计灵敏度的定义, 当 $\Delta T(\theta_F) \leq \Delta T_{min}$ 时, $\Delta T_A(\theta_F)$ 将被辐射计的噪声淹没而没法检测, 而且为保证检测的可靠性, 通常要求 $\Delta T_A(\theta_F) \geq 6\Delta T_{min}$. 由此可以计算得到 8mm 和 3mm 辐射计探测地面目标的 天线温度对比度曲线及最远作用距离, 如图 3(a)、(b) 所示.

从图中可以看出, 在高度 $h = 12\ 250$ 米开始降落的情况下, 8mm 辐射计探测水泥路面得到的天线温度对比度 $\Delta T_A = 2.405\ 1k$; 在高度 $h = 8\ 750$ 米开始降落的情况下, 3mm 辐射计探测水泥路面得到的天线温度对比度 $\Delta T_A = 9.606\ 3k$. 而如前所述 8mm 辐射计的灵敏度 $\Delta T_{min} = 0.4k$, 3mm 辐射计的灵敏度 $\Delta T_{min} = 1.6k$, 为了保证检测的可靠性, 要求 8mm 辐射计的天线温度对比度 $\Delta T_A(\theta_F)_{8mm} \geq 2.4k$, 3mm 辐射计的天线温度对比度 $\Delta T_A(\theta_F)_{3mm} \geq 9.6k$. 因此在本文的数据条件下, 8mm 辐射计的最远作用距离为 12 250 米, 3mm 辐射计的最远作用距离为 8 750 米. 但是如果 3mm 辐射计的灵敏度也定为 0.4k, 则可得 3mm 辐射计的最远作用距离为 13 531 米, 如图 3(c) 所示. 又如果 8mm 和 3mm 辐射计的天线口径为 100mm, 则计算出的 8mm 辐射计和 3mm 辐射

表 2 不同天线口径的辐射计最远作用距离

Table 2 The maximal effecting distance by radiometers of different antenna diameter

| 天线口径 | 360mm | | 100mm | |
|--------|--------|-------|--------|--------|
| 辐射计波段 | 8mm | 3mm | 8mm | 3mm |
| 最远作用距离 | 1 225m | 8 750 | 4 700m | 2 445m |

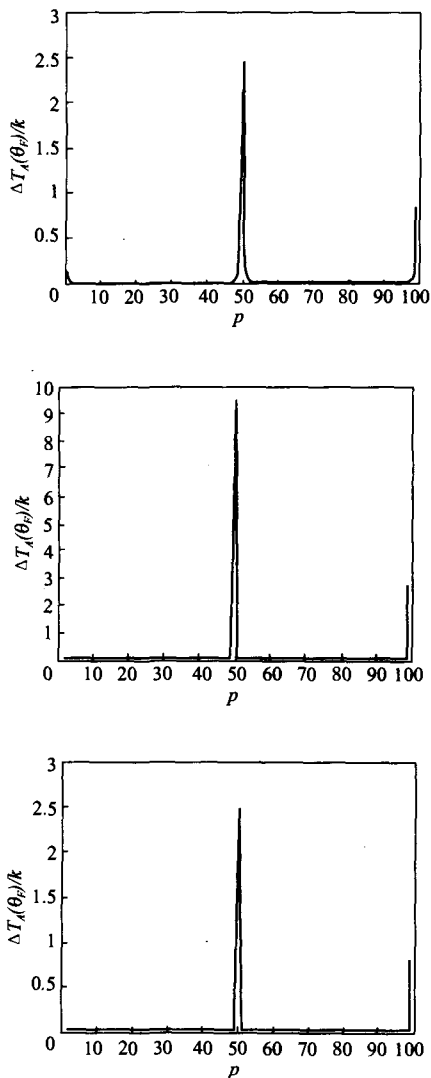


图 3 天线温度对比度 图形(a) 12250 米时 8mm 辐射计探测信号波形 (b) 8750 米时 3mm 辐射计探测信号波形 (c) 13531 米时 3mm 辐射计探测信号波形

Fig. 3 Signal waveform of MMW passive detection (a) antenna temperature contrast of 8mm radiometer (12 250m) (b) antenna temperature contrast of 3mm radiometer (8 750m) (c) antenna temperature contrast of 3mm radiometer (13 531m)

计的最远作用距离 分别为 4 700 米和 2 445 米. 上述几种情况比较如表 2 所示 [5].

4 结论

本文讨论和比较了 8mm、3mm 波段下的天线和地物辐射计的特性. 推导得出了辐射计天线波束中心不在坐标轴上这种情况下天线温度的计算表达式, 利用这一结果对 8mm 和 3mm 辐射计输出信号进行了仿真计算. 仿真结果表明: 在相同的作用距离

下,3mm 辐射计的天线温度对比度要比 8mm 辐射计的天线温度对比度要大;由于在现有条件下 8mm 辐射计的灵敏度要高于 3mm 辐射计的灵敏度,所以实际上 8mm 辐射计的最远作用距离大于 3mm 辐射计的最远距离;如果 3mm 辐射计的灵敏度和 8mm 辐射计的灵敏度一样则 3mm 辐射计的作用距离将大于 8mm 辐射计的作用距离;如果将辐射计的天线口径减小,则 8mm 辐射计和 3mm 辐射计的最远作用距离都会减小. 这些特征为毫米波无源探测系统的辐射计选型和目标识别提供了重要的依据.

REFERENCES

- [1] Zhang G F, Guo W, Zhang Z Y. Millimeter wave passive detection simulation system[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter wave*, 2002, 23(1): 71—77.
- [2] HUANG Quan-Liang, XIAO Zhi-Hui, ZHANG Zu-Yin, et al. Calibration system for MMW radiometer [J]. *J. Infrared Millim Waves* (黄全亮,肖志辉,张祖荫,等. 毫米波辐射计定标系统. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(2): 119—122.
- [3] Nie Jian-Ying, LI Xing-Guo, Lou Guo-Wei. Smooth interpolate solution of armoured targets' millimeter wave 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.
- [4] Li Jun-Ming, Zhang Zu-Yin, Guo Wei. Signal Emulation and Character Research of the Passive Detection of Millimeter Wave [J]. *Journal of Microwaves* (李俊明,张祖荫,郭伟. 毫米波无源探测的信号仿真和特征研究. *微波学报*), 2005, 21(2): 49—51.
- [5] ZHANG Guang-Feng, ZHANG Zu-Yin, GUO Wei. Research on 3mm band radiometric imaging [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张光锋,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.