#### **文章编号:** 1672-8785(2014)03-0027-06

# 目标面积与被动毫米波探测 概率的仿真计算

张恒伟<sup>1,2</sup> 高山<sup>3</sup> 张明<sup>1</sup>
(1. 中国洛阳电子装备试验中心,洛阳471003;
2. 光电对抗测试评估技术重点实验室,洛阳471003;
3. 西安卫星测控中心,西安710049)

**摘 要:**根据被动毫米波探测及信号检测等理论,给出了被动毫米波探测的输出信号、 探测概率与目标面积的理论公式。通过仿真计算给出了被动毫米波敏感器的输出信号 的被积函数分布图、探测概率与信噪比的仿真计算曲线。推导了在近似线性区间内被 动毫米波敏感器的输出信号、探测概率与目标面积的近似计算公式,并利用该公式对 某次被动毫米波对比探测试验中出现的数据"巧合"现象进行了解释。所得结论对相关 被动毫米波探测研究具有参考价值。

关键词:毫米波; 被动探测; 探测概率; 目标面积

中图分类号: TN015 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.03.006

# Simulation of Passive Millimeter Wave Detection Probability and Target Area

ZHANG Heng-wei<sup>1,2</sup>, GAO Shan<sup>3</sup>, ZHANG Ming<sup>1</sup>

(1. Luoyang Electronic Equipment Testing Center, Luoyang 471003, China;
 2.Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test and Evaluation Technology, Luoyang 471003, China;
 3. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** According to the theory of passive millimeter wave detection, the theoretical formulas of output signal, detection probability and target area of passive millimeter wave detection are given. The curves of detection probability and signal-to-noise ratio are presented. The approximate calculation formulas for calculating the output signals from a passive millimeter wave sensor, detection probability and target area in an approximately linear range are derived. The formulas are used to explain a coincidence phenomenon in a certain test of passive millimeter wave detection successfully. The conclusion reached is of a reference value to the related passive millimeter wave detection.

Key words: millimeter wave; passive detection; detection probability; area of target

# 0 引言

根据普朗克公式,温度高于绝度零度的物

体均向外辐射电磁波。被动毫米波探测正是基 于这一原理采用只接收外界毫米波辐射的方式 对物体进行探测识别的。该识别技术现已用于

收稿日期: 2014-01-02

**作者简介:**张恒伟 (1973-),男,硕士,陕西长安,中国洛阳电子装备试验中心高级工程师,主要研究研究方向光 电技术测试等。E-mail: zhwrxf@126.com

末敏弹和智能地雷等领域。探测概率是评价被 动毫米波敏感器性能的关键技术指标,也是评 价假目标对(内有被动毫米波敏感器)干末敏弹 扰效果的主要指标。探测概率与目标特性、背景 噪声、内部电路噪声等因素密切相关。在背景特 性、目标材料、目标表面粗糙度等确定且忽略背 景微小差异的情况下,目标面积是影响被动毫米 探测概率的主要因素。因此,研究探测概率与目 标面积的关系具有重要意义。

为了评估假目标对末敏弹的干扰效果,在 某次试验中采用对比被动毫米波敏感器对真、 假目标进行了探测。在对真、假两个目标进行的 大量试验中出现了一个"巧合"现象:在其他条 件不变的情况下, 被动毫米波敏感器在两个高 度上对处于同一水平面上的真、假目标的探测概 率之差相等,且探测概率差值与两个目标面积 的相对差值接近。为了从理论上对试验现象进 行解释,对被动毫米波敏感器探测概率与目标 面积可能存在的关系进行了探究。应用被动毫 米波探测和信号检测等理论,给出了被动毫米 波探测输出信号、探测概率与目标面积之间的关 系,并对试验现象进行了解释。由理论关系公式 出发,推导了被动毫米波探测的输出信号、探测 概率与目标面积的近似计算公式。在近似线性 区间内,用该公式可进行被动毫米波探测概率 的快速计算。本文探讨的前提条件是其他因素 不变或忽略不计, 仅研究被动毫米探测概率与 目标面积的关系。

1 被动毫米波探测输出信号与目标 面积的仿真计算

### 1.1 理论关系及仿真计算

被动毫米波敏感器依靠天线波束在"热"背景(地面)和"冷"目标(金属目标)之间的扫描 接收毫米波信号。接收到的毫米波信号经过天 线、混频器、中频放大器、检波器后,再经隔离 被去除直流分量,成为含有目标信息的信号。通 过对其提取特征量便可进行目标识别。

若被动毫米波探测敏感器的接收机的天线 功率方向图为  $G(\theta, \varphi)$ ,天线的有效接收面积为

INFRARED (MONTHLY)/VOL.35, NO.3, MAR 2014

 $A(\theta, \varphi) = G(\theta, \varphi) \frac{\lambda^2}{4\pi}$ 。当带宽  $\Delta f \leq f^2$  时,可得到 天线从辐射体接收的总功率为<sup>[1]</sup>

$$W = \frac{k\Delta f}{4\pi} \int \int_{\psi} T(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega$$
(1)

式中, k 为玻尔兹曼常数,  $\Delta f$  为接收机带宽,  $d\Omega$ 为接收机天线的空间微分立体角, 其对应于毫米 波敏感器扫描到地面的微分面元 dxdy,  $T(\theta, \varphi)$ 为被积分目标的辐射温度分布函数。输出功率 与接收机最终输出电压的关系为  $U = G_0 W$ , 其 中  $G_0$  是与接收机电路相关的常数,  $\psi$  为天线接 收区域对应的立体角范围。

通常情况下,天线主波束方向的增益远远 高于旁瓣的增益。由于敏感器的天线功率方向 图 (特别在波束中心附近)可近似为

$$G(\theta,\varphi) = G_0 e^{-\rho\theta^2} \tag{2}$$

式中,  $G_0$  为天线波束中心的功率增益,  $\rho$  为表 征天线方向图的常数,  $\theta$  为 3dB 波束宽度的一 半。敏感器依靠主波束探测识别目标,因此积分 区域仅考虑天线 3dB 带宽对应的立体角即可。 由式 (1) 可以看出  $W = k\Delta T_{\alpha}\Delta f$ ,可以用天线 等效辐射温度变化  $\Delta T_{\alpha}$  代替天线接收机的总能 量。由于  $\Delta T_{\alpha}$  可代表天线的输出信号,天线等效 辐射温度变化为 <sup>[2]</sup>

$$\Delta T_{\alpha} = \frac{G_0 \Delta T}{4\pi} \int \int_{\psi_0} exp(-\rho \theta^2) d\Omega$$
(3)

式中,  $\psi_0$  为目标所张立体角。如图 1 所示,在 直角坐标系中敏感器处于 A 点,目标中心位置 为 C 点, *dxdy* 为目标上的微分单元,则上式变 为

$$\Delta T_{\alpha} = \frac{G_0 H \Delta T}{4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} exp(-\rho(\arccos(\frac{H\cos\theta_F + y\sin\theta_F}{(x^2 + y^2 + H^2)^{1/2}}))^2) (x^2 + y^2 + H^2)^{-3/2} dxdy$$
(4)

式中, H 为敏感器距离地面的高度,  $\theta_F$  为敏感器扫描锥角 (通常为 30°)。目标面积为

 $(x_2 - x_1) \times (y_2 - y_1)$ 的矩形。式 (4) 中, 被积分 函数 f(x, y) 为

$$f(x,y) = exp(-b(\arccos(\frac{H\cos\theta_F + y\sin\theta_F}{(x^2 + y^2 + H^2)^{1/2}}))^2)$$
$$\cdot (x^2 + y^2 + H^2)^{-3/2}$$
(5)

显然, *f*(*x*, *y*) 并非线性关系,这是由于天 线主波束在扫描目标时,微分面元投影到天线 的立体角是随 (*x*, *y*) 而变化的。被积函数 *f*(*x*, *y*) 三维分布曲面如图 2 所示。由图可知,目标面积 与敏感器输出脉冲峰值不是线性关系。



图 1 位于目标任意位置的敏感器波束示意图

利用式 (4) 并引入扫描旋转因子,设敏感器 天线参数 $\rho$ 为400,转速为3 rps,高度由 $H_1 \sim H_7$ 变化,目标 I 面积为 $S_0$ ,目标 II 面积为1.333 $S_0$ , 目标 III 面积为0.96 $S_0$ ,设定三个目标的电导率、 表面粗糙度等均相等,仅存在目标面积差异,忽 略背景微小差异,在其他条件不变的条件下进 行过仿真计算。计算结果见表1。



图 2 被积函数 f(x, y) 的三维分布曲面

#### 1.2 近似计算

由表1看出,随着敏感器高度的上升,敏感器输出的Ⅰ、Ⅱ两个目标峰值比与几何面积比 1.333 越来越接近。这是由于随着高度的增加, Ⅰ、Ⅱ目标在敏感器天线主波束所占比例持续 下降,对应的积分函数 *f*(*x*, *y*)的变化越来越小。 根据积分中值定理,式(4)可以变为

$$\Delta T_I = \frac{G_0 H \Delta T}{4\pi} f(\xi_I, \eta_I) S_I \tag{6}$$

表1 不同高度上敏感器对Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三目标输出信号的计算结果

敏感器高度	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$	$H_6$	$H_7$
高度与 H1 比值	1	1.6667	2	2.6667	3.3333	4	4.6667
Ⅱ / Ⅰ峰值比	1.2	1.26	1.2804	1.2997	1.3112	1.3195	1.328
Ⅲ/Ⅰ峰值比	0.9822	0.9703	0.9676	0.9646	0.9627	0.9609	0.9600

式中,  $S_I$  为目标面积,  $f(\xi_I,\eta_I)$  为积分中 值为常数,目标  $S_{II} = \alpha \cdot S_I(\alpha \ \alpha \ 1 \ \text{附近时},$  $f(\xi_{II},\eta_{II}) \approx f(\xi_I,\eta_I))$ ,敏感器对 II 目标的峰值 输出信号可近似为

$$\Delta T_{II} \approx \Delta T_I \alpha = \Delta T_I \frac{S_{II}}{S_I} \tag{7}$$

当α接近1且已知两个目标的面积比值时, 在误差允许范围内近似计算敏感器输出的信号

http://journal.sitp.ac.cn/hw

峰值,可省略大量运算。表 1 中 I 与 III 目标相比 同样具有上述关系,当  $\alpha = 0.96$ 、敏感器处于  $H_6$ 以上时,输出信号比值与面积比值符合得很好。

# 2 被动毫米波敏感器的探测概率与 目标面积的仿真计算

### 2.1 理论关系及仿真计算

INFRARED (MONTHLY)/VOL.35, NO.3, MAR 2014

被动毫米波敏感器是依靠目标信号的峰 值、上升斜率、脉冲宽度和脉冲面积等对目标 进行识别的,其中脉冲峰值是最重要的依据。 敏感器内外均存在大量随机噪声,而这些噪声 均为随机变量。由于不同噪声符合或近似符合 某种概率分布,这使得敏感器的探测识别也成了 一个随机事件,符合相应的概率模型。概率论的 中心极限定理指出,由n个统计独立的随机变量 构成的总体分布近似服从高斯分布。当这种噪 声通过窄带系统后服从瑞利分布,概率密度函 数如下<sup>[3]</sup>:

$$p(x_n) = \frac{x_n}{\sigma^2} exp(-\frac{x_n^2}{2\sigma^2}) \tag{8}$$

当目标信号 x<sub>s</sub> 和噪声电平 x<sub>n</sub> 同时存在时, 信号加噪声的统计分布规律为<sup>[4]</sup>

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} exp(-\frac{x^2 + x_s^2}{2\sigma^2}) \cdot I_0(\frac{x \cdot x_s}{\sigma^2})$$
(9)

式中,  $I_0(\frac{x\cdot x_s}{\sigma^2})$  为零阶变形贝塞尔函数,  $x = x_s + x_n$  为信号加噪声,  $\sigma$  为噪声均方差。若  $x_T$  为信号检测门限, 毫米波敏感器发现目标的概率 为 <sup>[5]</sup>

$$P_d = \int_{x_T}^{\infty} \frac{x}{\sigma^2} exp(-\frac{x^2 + x_s^2}{2\sigma^2}) \cdot I_0(\frac{x \cdot x_s}{\sigma^2}) dx \quad (10)$$

虚警概率为没有目标信号的探测概率,即 服从瑞利分布:

$$P_{fa} = \int_{x_T}^{\infty} \frac{x}{\sigma^2} exp(-\frac{x^2}{2\sigma^2}) dx = exp(-\frac{x_T^2}{\sigma^2}) \qquad (11)$$

根据 Neyman-Pearson 准则<sup>[6]</sup>,设定虚警概 率为常数,可使发现概率最大化,即  $P_{fa} = C_0$ ,

 $P_{a} = max$ ,这就是恒虚警检测的原理。噪声是随机变量,引入变量  $z = x/\sigma$ ,则 z 为归一化信号, z 的概率密度分布与噪声强度无关,此时探测系统的虚警概率恒定不变,仅与检测门限  $x_{T}$ 选取有关<sup>[7]</sup>。同时引入信噪比  $SNR = x_{s}/\sigma$ ,则式 (10) 变为

$$P_d = \int_{x_T}^{\infty} zexp(-\frac{z^2 + SNR^2}{2}) \cdot I_0(z \cdot SNR)dz \quad (12)$$

图 3 给出了不同信噪比下的探测概率密度 分布曲线,图中数字 0 至 5 代表 *SNR* 的值。在确 定虚警概率后,检测门限 *z*<sub>T</sub> 可由式 (11) 算出。 计算探测概率 *Pa* 实质是计算 *z* > *z*<sub>T</sub> 的面积,显 然 *z* 与 *Pa* 不是线性关系。



图 3 不同信噪比下探测概率密度的分布曲线

以虛警概率  $P_{fa} = 10^{-3}$ 为例,信号检测阈值 为 3.7,探测概率与信噪比关系见表 2。表中结 果也验证了设定的虚警概率。当信噪比为 6 时, 探测器概率接近为 1。

表 2 虚警概率为 10<sup>-3</sup> 时,探测概率与信噪比 SNR 的关系

SNR	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
$P_d$	0.001	0.002	0.007	0.023	0.065	0.151	0.292	0.476	0.667	0.822	0.923	0.972	0.992

设被动毫米波敏感器对前面的 I、Ⅱ、Ⅲ三 个目标进行探测识别,峰值比与 *SNR* 比等价。 在噪声水平σ不变的情况下,已知敏感器对目标 的信噪比,通过式 (10) 可以求得其探测概率。反 之由其探测概率也可求得其 *SNR* 的大小。这样 在已知敏感器对 I 目标的探测概率的情况下, 可由其与 II、Ⅲ目标的峰值比求出敏感器对 II、 Ⅲ目标的探测概率。

以被动毫米波敏感器恒虚警概率为 10<sup>-3</sup> 为 例, 若以被动毫米波敏感器处于 H<sub>4</sub> 高度对 I 目

标探测概率为 0.8 为基准,设不同高度上被动毫 米波敏感器的噪声信号保持不变,可计算出敏 感器处于不同高度时对 I 目标、II 目标、III 目标 的探测概率 (见表 3)。 由表 3 可知,在 $H_1 \sim H_7$ 高度时被动毫米波 敏感器对 I、II、III三个目标的探测概率与目标 面积比不具有线性关系,这与前面的理论分析结 论一致。

表3 不同高度时被动毫米波敏感器对I、II、III三个目标的探测概率

对比会粉	毫米波敏感器高度								
对比参数	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$	$H_6$	$H_7$		
$P_{Id}$	1.000	1.000	1.000	0.80	0.28	0.08	0.03		
$P_{IId}$	1.000	1.000	1.000	0.99	0.63	0.21	0.07		
$P_{IIId}$	1.000	1.000	1.000	0.78	0.24	0.06	0.02		
$SNR_{II}/SNR_{I}$	1.200	1.260	1.280	1.300	1.311	1.320	1.328		
$SNR_{III}/SNR_{I}$	0.982	0.970	0.968	0.965	0.963	0.961	0.960		
$P_{IId}/P_{Id}$	1.000	1.000	1.000	1.238	2.250	2.625	2.333		
$P_{IIId}/P_{Id}$	1.000	1.000	1.000	0.975	0.857	0.750	0.667		
$P_{IId} - P_{Id}$	0	0	0	0.19	0.35	0.13	0.04		
$P_{IIId} - P_{Id}$	0	0	0	-0.02	-0.04	-0.02	-0.01		

但由表 3 也可看出,在 H<sub>5</sub> 高度上,毫米波 敏感器对 I、Ⅲ目标的探测概率、探测概率差值 与其相对目标面积差值相等。敏感器在 H<sub>5</sub> 高度 时对 I、Ⅱ两目标的探测概率差值与相对目标 面积的差值相等。这一"巧合"在其他高度时没 有重复。

2.2 近似计算



图 4 不同虚警概率下的探测概率曲线

探测概率主要由检测门限和信噪比决定, 而在选定恒虚警率的情况下可由积分区间长度 确定。积分结果仅与被积函数有关,即仅与*SNR* 有关,不能直接获得理论上的近似公式。图 4 为探测概率与*SNR*的关系曲线。在不同虚警概 率下,每条概率曲线在一定区间 *P*<sub>d1</sub> ~ *P*<sub>d2</sub> 内

http://journal.sitp.ac.cn/hw

*SNR* 与 *P<sub>d</sub>* 近似线性关系,其关系可近似写为 *P<sub>d</sub>*  $\approx a_1 \cdot SNR + a_0$ 。对于不同的虚警概率,  $a_0$ 、  $a_1$ 、 *P<sub>d1</sub>*  $\sim P_{d2}$  的取值不同。考虑到式(7),则两 目标的探测概率与面积之间存在近似关系:

$$P_{IId} \approx a_1 \cdot SNR_I + a_0 \approx a_1 \cdot SNR_I \cdot \frac{S_II}{S_I} + a_0$$

$$= P_{Id} \cdot \frac{S_{II}}{S_I} + a_0 \tag{13}$$

$$P_{IId} - P_{Id} \approx P_{Id} \cdot \left(\frac{S_{II}}{S_I} - 1\right) + a_0 \qquad (14)$$

式 (13) 就是在线性区间内两个不同目标 I、II的探测概率关系的近似式。根据近似计 算可知,虚警探测概率曲线不同时,其近似线性 区间不同, a<sub>0</sub>、a<sub>1</sub>、P<sub>d1</sub>~P<sub>d2</sub>的取值也不同,但 探测概率与目标面积的关系存在一段近似线性 区间,而这也是出现试验"巧合"的理论基础。 由式 (14) 可以看出,对两个不同目标进行的探测 概率差值确实与其相对面积存在一定的线性关 系,但公式的应用条件是探测概率曲线存在近 似线性区间,且两个目标面积比值符合式 (7) 的 应用条件。根据表 3,这种近似计算结果的误差 波动较大。由 P<sub>Id</sub>、 P<sub>IIId</sub> 提差约在

INFRARED (MONTHLY)/VOL.35, NO.3, MAR 2014

4%~40%。误差大小由 *P*<sub>Id</sub> 、 *P*<sub>IId</sub> 、 *P*<sub>IIId</sub> 是否 在线性区间内决定。在区间内则小,在区间外则 大,探测概率接近 0 或 1 附近误差更大。

## 3 结束语

从被动毫米波探测识别和信号检测等理论 出发,在理论和数值计算上对被动毫米波探测 输出信号、探测概率与目标面积的关系进行了仿 真研究。理论和数值仿真结果均表明,在全部适 用区间内被动毫米波的输出信号、探测概率与 目标面积间不具有严格的线性关系,但在线性近 似区间内毫米波的输出信号、探测概率与目标 面积存在近似线性关系。因此可在已知两个不同 目标面积之间的关系和被动毫米波敏感器对一 个目标的探测概率后,近似计算出被动毫米波 敏感器对另外一个目标的探测概率。近似计算公 式在一定误差允许范围内可用于被动毫米波探

(上接第26页)

的处理时间。其中,平均处理时间为 36.5 ms/ 帧, 满足 25 帧 /s 的实时性要求。

### 3 结束语

本文提出了一种基于光流的红外运动目标 增强算法,并对其进行了基于 GPU 的并行运算 优化。试验结果满足实时处理要求,为后续的红 外目标检测识别算法研究提供了有效参考。由 于 GPU 技术可以有效提高机器视觉处理算法的 速度和精度,我们将在今后的工作中对 GPU 技 术进行更为深入的研究,以提高光电设备的整 体性能。

### 参考文献

[1] 常本康, 蔡毅. **红外成像阵列与系统** [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 测概率的快速计算。同时,对试验中出现的"巧 合"现象也给出了理论解释和数值验证,这对相 关被动毫米波的目标探测研究具有参考价值。

### 参考文献

- [1] 李兴国, 李跃华. **毫米波近感技术基础**[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [2] 耿海建. 毫米波红外复合敏感器信号处理系统研究 [D]. 南京理工大学, 2006.
- [3] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北 京:高等教育出版社, 1997.
- [4] 印勇. 随机信号分析[M]. 北京: 中国物资出版社出版, 2000.
- [5] 盖世昌, 许腾, 侯博, 等. 复杂电磁环境下搜索雷达探 测概率仿真分析 [J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(2): 81-83.
- [6] 陈炳和. 随机信号处理[M]. 北京: 国防工业出版 社, 1996.
- [7] 张剑. 雷达海杂波背景下的恒虚警率目标检测方法 研究及实现 [D]. 哈尔滨工程大学, 2008.
- [2] 代科学,李国辉,涂丹,等.监控视频运动目标检 测减背景技术的研究现状和展望[J].中国图象图形 学报,2006,11(7):919–927.
- [3] NVIDIA. NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture Programming Guide V2.0 [EB/OL]. www.cs.ucla.edu/palsberg/course/cs239/papers/CudaReferenceManual\_2.0.pdf, 2008.
- [4] 龚敏敏. GPU 精粹 2: 高性能图形芯片和通用计 算编程技巧 [M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [5] Horn B K, Schunck B G. Determining Optical Flow[J]. Artificial Intelligence, 1981, 17: 185–203.
- [6] Wedel A, Pock T, Braun J, et al. Duality TV-L1 Flow with Fundamental Matrix Prior [J]. Image Vision and Computing Auckland, 2008, 9: 1–6.
- [7] Jin Zhu, Weiqi Jin, Jiakun Li, et al. A Visible/Infrared Gray Image Fusion Algorithm Based on the YUV Color Transformation [C]. SPIE, 2012, 8558: 855814.