

装甲目标毫米波辐射亮温解的优化控制

聂建英^{1,2}, 李兴国¹, 娄国伟¹

(1. 南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏南京 210094; 2 南京师范大学, 江苏南京 210097)

摘要: 毫米波系统有着较微波、红外、光学系统不同特性的优点. 毫米波辐射探测技术在许多领域有着重要应用与发展. 为能求得真实的目标物体亮温, 从测得的天线温度数据或天线温度分布函数中反演出装甲目标的亮温分布, 需解第一类 Fredholm 积分方程. 该积分方程是一病态方程. DFP 法算法是无约束最优化方法中最有效的方法之一. 本文尝试用 DFP 法优化控制毫米波装甲目标辐射亮温, 得到较为稳定的反演解.

关键词: 毫米波辐射计; 亮度温度; 第一类 Fredholm 积分方程; 天线温度反演

中图分类号: TN015 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 09-1491-04

Optimal Control of the Millimeter Wave Radiometric Brightness Temperatures of Target

NIE Jianying^{1,2}, LI Xingguo¹, LOU Guowei¹

(1. Inst. of MMW & Optical Wave Tech. Nanjing Univ. of Sci. & Tech., Nanjing, Jiangsu 210094, China;

2 Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210097, China)

Abstract: Millimeter wave characteristics differ from those of microwaves, infrared or optical, as well. It has some distinct advantages over microwave, infrared, or optical system. There are many significant applications and exciting developments in millimeter wave system. To calculate the brightness temperature distribution from the measured antenna temperature, a Fredholm integral equation of the first kind must be solved. This equation is ill posed. DFP is applied to recovery of the armour target's brightness temperatures from the scanning millimeter wave radiometer data.

Key words: millimeter wave radiometer; antenna temperature; Fredholm integral equation of the first kind; inversion

1 引言

电磁斗争的发展, 驱使战术导弹制导技术向毫米波段发展. 毫米波为覆盖 40~300GHz 频段的电磁波, 它处在微波低频端和红外光电高频端之间, 兼有红外和微波共同特征外, 具有其特有的性能. 毫米波近感装置精度高、波束窄、抗干扰能力强、低仰角跟踪性能好、能穿透等离子体, 因此毫米波探测技术在许多领域发挥着重要作用.

目前, 反装甲目标的精确制导及未敏弹的毫米波导引头往往是主动/被动双模体制. 导引头在远距离时, 由雷达进行目标的搜索, 识别和跟踪. 但当导弹接近目标时, 由于主动式雷达存在角闪烁效应, 目标的闪烁带来的测角误差相当严重, 甚至丢失目标, 此时则采用被动体制. 被动体制的辐射计却能较好地克服这一缺点, 且毫米波辐射计不发射电磁波, 利用不同目标的辐射差异来探测目标, 具有很高的隐蔽性, 并有很好的抗干扰性能.

在毫米波辐射探测中, 为得到真实的各种目标辐射温度, 从测得的目标天线温度反演目标的亮温是无源被动探测中的

重要技术^[1-6]. 然而天线温度的积分表达式是一个病态的第一类 Fredholm 积分方程, 因此寻找适当的求解方法, 控制解波动, 得到较为稳定的解非常重要. 这对提高对敌目标的探测与识别具有重要的意义. DFP 法是 Davidon, Fletcher, Powell 先后改进而形成的算法, 它是无约束最优化方法中最有效的方法之一. 本文尝试利用 DFP 法, 来控制解的波动性, 再采用直线搜索法, 搜索方向的模不断调整变化, 得到了较为稳定的毫米波装甲目标辐射亮温.

2 毫米波装甲目标天线温度建模

设辐射计的天线功率方向图为 $G(\theta, \varphi)$, 根据天线理论, 则天线的有效接收面积为^[7]

$$A(\theta, \varphi) = G(\theta, \varphi) \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (1)$$

当带宽 $\Delta f \ll f^2$ 时, 可得天线从辐射体接收的总功率为 (忽略大气损耗及天线旁瓣的作用)

$$W_R = \frac{1}{2} \frac{2k\Delta f}{4\pi} \iint_{\Omega} T_B(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (2)$$

式中, $\frac{1}{2}$ 表示天线只接收一个极化方向的信号, $T_B(\theta, \varphi)$ 是天线附近所得物体的表现温度。

如果用温度 T_A 的电阻所辐射的能量来代替天线接收的总能量, 可得

$$kT_A \Delta f = \frac{k \Delta f}{4\pi} \iint_{\Omega} T_B(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega$$

$$\text{即 } T_A = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} T_B(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (3)$$

由交流辐射计工作方式知, 辐射计在探测地面某一目标时, 辐射计天线在目标与地面之间扫描, 利用目标与地面之间的辐射温度差来探测目标, 当目标辐射面积与辐射计天线波束在地面的投影面积之比 ≤ 1 时, 天线输出温度呈现类似天线辐射方向图的变化形式。

设目标有效面积为 A_T , 则

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

$$= \frac{1}{4\pi} \iint_{A_T} T(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega - \frac{1}{4\pi} \iint_{A_T} T_{BR}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega$$

$$+ \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} T_B(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega$$

$$= \frac{1}{4\pi} \iint_{A_T} (T_T - T_{BR}) G(\theta, \varphi) d\Omega + T_S$$

所以 $\Delta T_A = \frac{1}{4\pi} \iint_{A_T} \Delta T_T G(\theta, \varphi) d\Omega \quad (4)$

其中 $\Delta T_A = T_A - T_S$ 代表天线温度变化量; $\Delta T_T = T_T - T_{BR}$ 代表目标和背景之间的对比度; T_S 为装甲目标周围的场景温度; T_{BR} 为装甲目标覆盖的面积具有的辐射温度。解这个积分方程可以从天线温度得到目标的视在温度分布, 但上述方程是一个病态的积分方程。

3 毫米波装甲目标亮温解的优化控制

我们考虑如图 1 所示的毫米波辐射计探测^[2]。设天线具有锥形波束, 在某平面内扫描。场景为平坦的均匀表面, 并忽略大气的影响, 探测目标相对于天线的极大辐射方向为 γ , 它与天波束中心轴的剖面上的夹角为 θ , 于是探测目标的亮温分布可认为仅与 γ 有关的量, 根据天线温度的一般表达式, 可得到无损耗天线在任意指向 α 的天线温度为

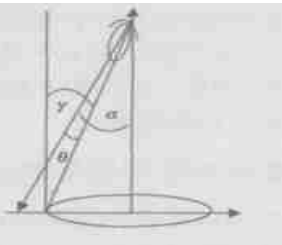


图 1 天线扫描图

$$T_A(\alpha) = \frac{\iint_{A_T} G(\theta, \varphi) T_B(\gamma) d\Omega}{\iint_{A_T} G(\theta, \varphi) d\Omega}$$

$$= \int_0^\pi F(\theta) T_B(\gamma) d\theta = \int_0^\pi F(\theta) T_B(\alpha - \theta) d\theta \quad (5)$$

其中 $F(\theta)$ 为归一化天线功率方向图。

设 $I_a = [\theta_1, \theta_2]$ 为装甲目标有效面积 A_T 被 θ 扫描时所扫

过的 θ 变化范围, 从而有装甲目标温度为

$$\Delta T_A(\alpha) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \Delta T_T F(\alpha - \theta) d\theta \quad (6)$$

将其考虑成数值公式, 把 $[\theta_1, \theta_2]$ 分 n 等分

$$\Delta T_A(\alpha) = \frac{\theta_2 - \theta_1}{n} \sum_{i=1}^n F(\alpha_j - \frac{i\alpha}{n}) \Delta T_T(\frac{i\alpha}{n}) \quad (7)$$

在不同时刻取 $\Delta T_{A_1}, \Delta T_{A_2}, \dots, \Delta T_{A_m}$, 它们对应的角度为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 便得方程组

$$\Delta T_A(\alpha_j) = k \sum_{i=1}^n F(\alpha_j - \frac{i\alpha}{n}) \Delta T_T(\frac{i\alpha}{n}), j = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

令 $\Delta a = (\Delta T_{A_1}(\alpha_1), \Delta T_{A_2}(\alpha_2), \dots, \Delta T_{A_m}(\alpha_m))^T$; $\Delta b = (\Delta T_T(\frac{I_a}{n}), \Delta T_T(\frac{2I_a}{n}), \dots, \Delta T_T(I_a))^T$; $F = (F(\alpha_j - \frac{i\pi}{n}))_{m \times n}$, 则方程组成为 $\Delta a = F \Delta b$, 特别当取 $\alpha_j = \frac{jI_a}{n} (j = 1, 2, \dots, n)$ 时, 则 F 为循环矩阵。两边乘 F^T , 令 $A = F^T \Delta a$, $G = F^T F$, $B = \Delta b$ 则有 $A = GB$, 且 $G = F^T F$ 对称阵。由于积分方程是第一类病态 Fredholm 方程, 于是数值化后, 方程组 $A = GB$ 仍为病态方程组。

当辐射计在场景内扫描, 且目标在波束中心附近时, 由定标的测试系统输出的天线功率方向图形, 天线功率方向图的模拟曲线可以近似认为 $G(\theta, \varphi) = G_0 e^{-b\theta^2}$, 其中 G_0 为天线波束中心的功率增益; b 为表征天线方向图的常数; θ 为 3dB 波束宽度的一半。对于毫米波系统, 一般波束很窄, 采用十分大的 b 值, 例如取 $b = 400$, 相当于 3dB 波束宽度为 4.8° , 此时要求 $G_0 = 4b = 1600$ 。归一化后积分式(6)。

取 $I_a = [f\theta_1, \theta_2] \leq 10^\circ$, 以 $n = 3$ 为例, 三等分 I_a , 且取 $\alpha_0 = 30^\circ, \alpha_1 = 35^\circ, \alpha_3 = 40^\circ$

得 $F \approx \begin{pmatrix} 1 & 0.047540 & 0 \\ 0.047540 & 1 & 0.047540 \\ 0 & 0.047540 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$

则 $G = F^T F = \begin{pmatrix} 1.0023 & 0.0951 & 0.0023 \\ 0.0951 & 1.0045 & 0.0951 \\ 0.0023 & 0.0951 & 1.0023 \end{pmatrix} \quad (10)$

作总误差函数: $E(\Delta b_k) = (A - G \Delta b_k)^T W (A - G \Delta b_k)$, W 为权矩阵, 为方便取 $W = G^{-1}$, 则 $-\frac{\partial E}{\partial \Delta b_k} = 2(A - G \Delta b_k)$ 。令 $\Delta e_k = A - G \Delta b_k$ 为第 k 次的误差, 因为 Δe_k 为 $E(\Delta b_k)$ 的负梯度方向, 从而 Δe_k 成为 $E(\Delta b_k)$ 下降速度最快的方向。

令 $H_{k+1} = H_k + \Delta H_k$, ΔH_k 为校正矩阵, H_k 为第 k 次方向矩阵, $P_k = -H_k \nabla E(\Delta b_k) = -H_k \Delta e_k$ 。

采用直线搜索法: $\Delta b_{k+1} = I_s(\Delta b_k, P_k)$, 则 $\Delta b_{k+1} = \Delta b_k + \lambda_k P_k = \Delta b_k - \lambda_k H_k \Delta e_k$, 每步的 H_k 是变化的, 即搜索方向的模不断在调整变化。因为 $\Delta(\Delta b_k) = H_{k+1} \Delta(\Delta e_k) = (H_k + \Delta H_k) \Delta(\Delta e_k)$, 于是 $\Delta H_k \Delta(\Delta e_k) = \Delta(\Delta b_k) - H_k \Delta(\Delta e_k)$ 。

引进任意的 n 维向量 Y_k , 只要 $Y_k^T \Delta(\Delta e_k) \neq 0$, 代入得 $\Delta H_k = B_k - C_k$, 其中

$$B_k = \frac{\Delta(\Delta b_k) Y_k^T}{Y_k^T \Delta(\Delta e_k)} = \frac{\Delta(\Delta b_k) \Delta(\Delta b_k)^T}{\Delta(\Delta b_k)^T \Delta(\Delta e_k)},$$

$$C_k = \frac{Z_k Y_k^T}{Y_k^T \Delta(\Delta e_k)} = \frac{H_k \Delta(\Delta e_k) (H_k \Delta(\Delta e_k))^T}{(H_k \Delta(\Delta e_k))^T \Delta(\Delta e_k)}$$

从而第 $k+1$ 次方向矩阵 $H_{k+1} = H_k + B_k - C_k$, 其最优步长为 $\|\Delta(\Delta b_k)\| = \|\lambda_k P_k\|$, $P_k = -H_k \Delta e_k$ 为搜索方向. 令 $H_0 = I$ 为单位阵, $H_1 = I + B_0 - C_0$,

$$H_{k+1} = H_k + B_k - C_k = I + \sum_{i=0}^k B_i - \sum_{i=0}^k C_i, \quad k = 1, 2, \dots \quad (11)$$

再选取初始值 Δb_0 (或先验值) 及判别收敛的充分小允许误差 ε_1 , 于是

(a) 若 $\|\nabla E(\Delta b_0)\| = \|\Delta e_0\| \leq \varepsilon_1$ 若成立, Δb_0 即为所求.

(b) 否则作直线搜索 $\Delta b_{k+1} = ls(\Delta b_k, P_k)$, 确定最优步长参数 λ_k , 求使

$\min E(\Delta b_k + \lambda P_k) = E(\Delta b_k - \lambda_k H_k \Delta e_k)$ 成立的最小 λ_k .

(c) 求增量 $\Delta(\Delta b_k) = -\lambda_k H_k \Delta e_k$, $\Delta b_{k+1} = \Delta b_k + \Delta(\Delta b_k)$, 并计算 $\Delta e_{k+1} = \nabla E(\Delta b_{k+1})$, $\Delta(\Delta e_k) = \Delta e_{k+1} - \Delta e_k$;

(d) 检验 $\|\Delta e_{k+1}\| \leq \varepsilon_1$ 是否成立?

若成立, 则得极值点 Δb_{k+1} . 否则

(e) 计算第 $k+1$ 次方向矩阵 $H_{k+1} = H_k + B_k - C_k$;

(f) 令 $k = k+1$, 再由 (b) 求 λ_{k+1} , 依次类推. 直至 $\|\Delta e_n\| \leq \varepsilon_1$ 时为止.

当 n 增加时, DFP 收敛性是有保证的, 即有 $\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta b_n = B$. 故若干次迭代后可得较稳定的近似解 Δb_n .

4 8mm 波段装甲目标温度亮温计算

取毫米波交流辐射计样机, 目标 $3 \times 5m^2$, 金属板, 示波器采集的探测波形如图 2.

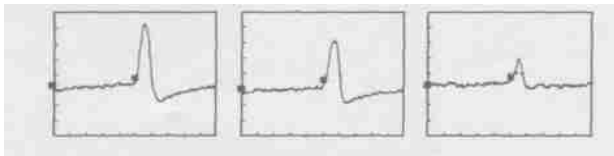


图 2 辐射计探测波形图

根据当时天空温度及辐射计定标系数整理计算得天线温度及辐射衰减量平均值.

表 1 辐射计探测数据

探测角度 α		30°	35°	40°
无隐身坦克	电压值	2V	1.7V	1.3V
	温度值	206K	165K	90K
隐身坦克	电压值	0.4V	0.3V	0.2V
	温度值	66K	50K	33K
辐射衰减平均值		14dB	15.5dB	16.3dB

由表 1 知 $\Delta T_A = (206, 165, 90)^T$, 于是 $A = G \Delta T_A = (213.8441, 179.0718, 97.8441)^T$, 取初始值 (或先验值) $\Delta b_0 = (150, 150, 150)^T$, 则 $\Delta e_0 = A - G b_0 = (48.9041, -0.1302, -67.0959)^T$ 误差较大.

作直线搜索 $\Delta b_1 = \Delta b_0 + \lambda_0 P_0$, 求 λ_0 使得 $E(\Delta b_1) = E(\Delta b_0 + \lambda_0 P_0) = \min_{\lambda \geq 0} E(\Delta b_0 + \lambda P_0)$ 由 $\min E(\Delta b_k + \lambda P_k) = E(\Delta b_k - \lambda H_k \Delta e_k)$

得 $\frac{\partial E}{\partial \lambda_k} = -2P_k^T A + 2\lambda_k^T G P_k + 2\lambda_k^T G P_k = 0$, 于是, $\lambda_k = \frac{P_k^T A}{P_k^T G P_k + b_k^T G P_k}$ 为 $E(\Delta b_{k+1})$ 的极小值点. 求得第一次极小值

点 $\lambda_0 = -0.3901$. 从而得第一次反演值: $\Delta b_1 = \Delta b_0 - 0.3901 \Delta e_0 = (169.0793, 149.9492, 123.8234)^T$, 于是 $\Delta e_1 = \nabla E(\Delta b_1) = (29.8457, 0.5957, -40.8985)^T$, 又 $\Delta(\Delta b_0) = -\lambda_0 \Delta e_0 = (19.0793, -0.0508, -26.1766)^T$, $\Delta(\Delta e_1) = \Delta e_1 - \Delta e_0 = (-19.0584, 0.7258, 26.1974)^T$

计算 $H_1 = H_0 + B_0 - C_0$

$$= I + \frac{\Delta(\Delta b_0) \Delta(\Delta b_0)^T}{\Delta(\Delta b_0) \Delta(\Delta e_0)} - \frac{\Delta(\Delta e_0) \Delta(\Delta e_0)^T}{\Delta(\Delta e_0)^T \Delta(\Delta e_0)}$$

得 $H_1 = \begin{pmatrix} 0.3072 & 0.0141 & 0.9514 \\ 0.0141 & 0.9995 & -0.0194 \\ 0.9514 & -0.0194 & -0.3065 \end{pmatrix}$,

$P_1 = -H_1 e_1 = (29.7331, -1.8085, -40.9203)^T$

所以 $\lambda_1 = \frac{2030.6}{2036} = 0.9970$, 得第二次迭代反演解 $\Delta b_2 = \Delta b_1 - \lambda_1 P_1 = (209.6845, 132.3892, 79.6588)^T$ 此时误差 $\Delta e_2 = \nabla E(\Delta b_2) = (-9.0961, 10.5703, 4.9296)^T$, 显然 Δe_1 较 Δe_0 小, 而 Δe_2 较 Δe_1 更小, 依次类推. 如可取 $\Delta b_2 = (209.6845, 132.3892, 79.6588)^T$ 或取 Δb_2^T 中分量的平均值 $140.5775K$ 为目标亮温的反演解的近似解. 则得 $\Delta T_T = 141K$. 因测试时天晴, 取天空温度 $T_S = 85K$ 使得 $T_T = 56K$. 本方法的收敛性是有保证的. 由 ε 的任意性, 若干次迭代后的解可得较稳定的近似解. 类似地计算求出隐身坦克亮温的反演解 ΔT_{ST} (略).

5 辐射计探测距离

当反装甲导弹采用被动式毫米波导引头, 探测器波束对准目标中心时, 由文[7]可得导引头辐射计探测距离公式:

$$R = \left\{ \frac{b A_T |\Delta T_T|}{\pi | \Delta T_A | \ln 2} \right\}^{1/2} \quad (12)$$

式中 A_T 为目标的辐射面积, ΔT_T 为目标与背景的温度对比度, b 为天线波形系数, ΔT_A 为辐射计天线的温度变化量. 设被动式毫米波导引头辐射计灵敏度 $\Delta T_{min} = 2K$, 装甲目标辐射面积 $A_T = 21m^2$ 为有效探测和识别目标, 要求天线输入的信噪比 $S/N \geq 10dB$ 以上, 天线半功率波束宽度为 4.8° 时, $b = 400$, 及 $\Delta T_T = 141$, $\Delta T_A = 153$, 将这些值代入式(13), 可得毫米波导引头辐射计探测距离为 $R = 60m$.

6 结论

毫米波辐射计不是直接测得物体的辐射亮温, 而测得的是的天线温度, 是目标辐射亮温被天线方向图平滑化的亮温. 从测得的天线温度数据反演目标的亮温是无源被动探测中的重要技术. 本文利用 DEP 最优化法进行了一些尝试, 得到了较为稳定的毫米波装甲目标辐射亮温, 有较大的实用价值.

参考文献:

- [1] A V Troisky, K P GajKovich. Thermal sounding of the atmospheric boundary layer in the oxygen absorption band center at 60GHz[J]. IEEE Trans on Geosci Remote Sensing, 1993, 31(1): 116- 119.
- [2] J T Holmes, C A Balanis, W M Truman. Application of fourier transforms for microwave radiometric inversions[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1975, 23(6): 797- 806.
- [3] W M Truman, C A Balanis, J J Holmes. Three dimensional vector modeling and restoration of flat finife wave tank radiometric measurements [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1977, 25(1): 95- 104.
- [4] A Stogryn. Estimates of brightness temperatures from scanning radiometer data[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1978, 26(5): 720- 726.
- [5] J P Claassn, A K Fung. The recovery of polarized apparent temperature disributions of flat scenes from antenna temperature measurements[J]. IEEE Trans Antennas Propagat. 1974, 22(3): 433- 442.
- [6] B Z petmko. Retrieval of paramenters of a horizontal hydrometeor distribution within the field of view of a satellite microwave radiometer [J]. IEEE trans Geosci Remote Sensing, 2001, 39(9): 1871- 1878.
- [7] 李兴国. 毫米波近感技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989. 22- 56.

作者简介:



聂建英 男, 1965 年 4 月生于江苏宜兴, 副教授, 南京大学数学系理学博士, 南京理工大学博士后, 随李兴国教授从事毫米波探测及目标识别技术的研究, 发表论文 20 余篇.



李兴国 男, 1940 年 6 月生于云南昆明, 教授, 博士生导师, 南京理工大学毫米波光波近感技术研究所所长, 《红外与毫米波学报》、《微波学报》编委, 《探测与控制学报》副主任, 长期从事毫米波探测及目标识别技术等领域的研究, 已发表论文 100 余篇.

娄国伟 女, 1952 年 7 月生于浙江镇海, 研究员, 硕士生导师, 南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 长期从事毫米波探测及目标识别技术等领域的研究, 发表论文 40 余篇.