第23卷第5期 红外与毫米波学报 Vol. 23, No.5
2004年10月 J. Infrared Millim. Waves October,2004

文章编号:1001-9014(2004)05-0377-03

装甲目标毫米波辐射亮温平滑内插解

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.福州大学,福建 福州 350002)

摘要:毫米波辐射计的无源被动探测技术在反装甲导弹和末敏弹的制导中起着重要作用.为求得装甲目标的辐射亮温,必须解第一类 Fredholm 积分方程.方程是一病态积分方程其解很不稳定.利用样条插值的特性,以及一阶微分算子具有极小范数的条件,得到装甲目标毫米波辐射亮温的平滑解,并应用于毫米波被动探测中.

关 键 词:毫米波辐射计探测;亮度温度;平滑内插解;第一类 Fredholm 积分方程
中图分类号:TJ765.365 **文献标识码**:A

SMOOTH INTERPOLATE SOLUTION OF ARMOURED TARGETS' MILLIMETER WAVE RADIOMETRIC BRIGHTNESS TEMPERATURES

NIE Jian-Ying[1,2], LI Xing-Guo[1], LOU Guo-Wei[1]
(1. Institute of Millimeter Wave and Optical Wave Near-sensing Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The passive detection techniques of the millimeter wave radiometer play an important role in homing guidance of anti-armour missile and end-sensing-cartridge. In order to obtain the radiometric brightness temperatures of the armoured target, a Fredholm integral equation of the first kind must be solved. This equation is ill-posed and its solutions are extremely unstable. The character of the spline interpolation and the condition of the minimum norm of first order differentiator are used, then the smooth interpolation solutions of armored target's brightness temperatures are obtained, and are used in millimeter wave passive detection.

Key words: detection of millimeter wave radiometer; brightness temperature; smooth interpolate solution; Fredholm integral equation of the first kind

引言

毫米波辐射计的无源被动探测技术在许多领域有着重要作用,而从测得的目标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.然而天线温度的积分表达式是一病态的第一类 Fredholm 积分方程.因此寻找适当的方法,得到尽可能好的解,提高对目标的探测与识别具有重要的实际意义[1-6].本文尝试从样条空间出发,利用样条内插值固定若干反演点值,使其它反演值只能在附近波动,且附加平滑性条件,从而给出毫米波目标辐射亮温的样条平滑内插解,最后并进行验模.

1 样条空间

设 V、H、W 分别为定义在区域 D 上的温度分布函数所成的 Hilbert 空间.设 $\kappa: V\to H$ 线性算子,$\chi: V\to W$ 线性算子.取 $(\theta_i,\phi_i)\in D, i=1,2,\cdots,N$ 为 N 个插值点.令 $N(\kappa)=\{T\in V|\kappa T(\theta_i,\phi_i)=0, i=1,2,\cdots,N\}$, $U(\kappa,\chi)=\{g\in W|\exists T\in N(\kappa)$, 使 $\chi(T)=g\}$, $U(\kappa,\chi)^{\perp}$ 为 $U(\kappa,\chi)$ 在 W 中的交补,即 $W=U\oplus U^{\perp}$.

设 $S=\chi^{-1}(U^{\perp})=\{T\in V|\chi(T)\in U^{\perp}\}$,则 S 为

收稿日期:2003-10-21,**修回日期**:2004-07-24 **Received date**: 2003-10-21, **revised date**: 2004-07-24
基金项目:国家自然科学基金项目(编号10071039),十五"211"国家立项项目资助.
作者简介:聂建英(1965-),男,江苏宜兴人,副教授,博士后,主要从事毫米波目标探测与识别及其应用的研究.

V的一个子空间,称S为V中的样条子空间,其元素称为样条.于是可知定理:空间V为$N(\kappa)$与S的直接和,$V=S\oplus N(\kappa)$.

2 毫米波辐射计天线温度建模

设辐射计天线功率方向图为$G(\theta,\phi)$,根据天线原理,天线的有效接收面积为$A(\theta,\phi)=G(\theta,\phi)\frac{\lambda^2}{4\pi}$,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)

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

式(1)中$\frac{1}{2}$表示天线只接收一个极化方向的信号,$T_B(\theta,\phi)$是天线附近所得物体的表观温度,k为玻尔茨曼常数.

如果用温度T_A的电阻所辐射的能量来代替天线接收机的总能量,奈奎斯特证明,在温度为T_R时,电阻R产生的噪声功率为$W=kT_R\Delta f$.若天线辐射电阻温度为$T_a=T_R$,则$kT_A\Delta f=\frac{k\Delta f}{4\pi}\iint_{4\pi}T_B(\theta,\phi)G(\theta,\phi)\mathrm{d}\Omega$,于是得天线温度:

$$T_A=\frac{1}{4\pi}\iint_{4\pi}T_B(\theta,\phi)G(\theta,\phi)\mathrm{d}\Omega, \quad (2)$$

设装甲目标的等效面积为A_T,由[7]得

$$\Delta T_A=\frac{1}{4\pi}\iint_{A_T}\Delta T_T G(\theta,\phi)\mathrm{d}\Omega, \quad (3)$$

其中ΔT_T为装甲目标和背景辐射温度的对比度;ΔT_A为天线温度变化量.

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.由[1]无损耗天线在任意指向α的天线温度为

$$T_A(\alpha)=\int_0^{\pi}F(\theta)T_B(\alpha-\theta)\mathrm{d}\theta, \quad (4)$$

其中$F(\theta)$为归一化天线功率方向图.

设$I_\alpha=[\theta_1,\theta_2]$为装甲目标等效面积$A_T$被$\theta$扫描时的变化范围,从而有装甲目标温度为

$$T_A(\alpha)=\int_{\beta_1}^{\beta_2}T_T F(\alpha-\theta)\mathrm{d}\theta. \quad (5)$$

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.

3 毫米波装甲目标亮温平滑内插解

上述方程是一病态积分方程.下面用样条内插加以限制,且附加平滑性条件,减少解的不稳定性,给出毫米波目标辐射亮温的求解.

设$T_A=(T_{A_1},T_{A_2},\cdots T_{A_N})$为辐射计在$(\theta_i,\phi_i)$,$i=1,2,\cdots,N$处所测天线温度,$T_B=(T_{B_1},T_{B_2},\cdots,T_{B_N})$为对应的装甲目标真实亮温,$T_{B_0}=(T_{B_{01}},T_{B_{02}},\cdots,T_{B_{0N}})$为一组先验值.令$\kappa(T_B)=T_A$,$\chi(T_B)=\frac{\mathrm{d}T_B}{\mathrm{d}\theta}$,$\kappa$,$\chi$所对应的对偶变换为$\kappa^*$,$\chi^*$,它们所对应的矩阵仍采用上述记号.

对$\forall T_B\in V=S\oplus N(\kappa)$,$T_B=T_N+T_S$,所以$\kappa(T_B)=\kappa(T_S)$.于是对$\forall h\in S$时,有$\|\chi(T_B-h)\|=\|\chi(T_N)\|+\|\chi(T_S-h)\|$,故$h=T_S$时上式最小,$T_S$是它的样条.则$\min\limits_{h\in V,\kappa(T)=\kappa(h)}\|\chi(h)\|_w=\|\chi(T_s)\|_w$即样条$T_s$有着"最佳逼近的性质".

于是我们提出如下问题:

(a)对任意$T_A=(T_{A_1},T_{A_2},\cdots,T_{A_N})$寻找$T_B=(T_{B_1},T_{B_2},\cdots,T_{B_N})$使$\kappa(T_{B_i}(\theta_i))=T_{A_i(\theta_i)}$,$i=1,2,\cdots,N$,内插要求.

(b)$\min\|\chi(T_B)\|_w=\min(\|T_B'\|_w)$,即$T_B$是最佳逼近且是最平滑的插值解.

考虑相应的离散情形,将区间等分,则条件(b)成为(b′):

$\min(\|T_B'\|_w^2)=\min\{\frac{1}{h}\sum_{i=1}^{m-1}(T_{B_{i+1}}-T_{B_i})^2\}$.令

$$\chi=\begin{pmatrix}T_{B_2}-T_{B_1}\\T_{B_3}-T_{B_2}\\\cdots\\T_{B_m}-T_{B_{m-1}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-1&1&0&\cdots&0\\0&-1&1&\cdots&0\\&&&\ddots&\\0&\cdots&0&-1&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}T_{B_1}\\T_{B_2}\\\vdots\\T_{B_m}\end{pmatrix},$$
$$=DT_B=D(T_B-T_{B_0}) \quad (6)$$

则$\chi=D$,D为一阶微分算子.记$w=\chi^*\chi$,误差矢量$e=(T_A-\kappa T_{B_0})-\kappa(T_B-T_{B_0})$.

考虑条件目标函数

$\Phi(T_B)=<\chi(T_B-T_{B_0}),\chi(T_B-T_{B_0})>+2\lambda^TP(T_A-\kappa T_B)$,由$\frac{\partial\Phi}{\partial T_B^T}=2\chi^*\chi(T_B-T_{B_0})-2\kappa^*P^T\lambda=0$,得$T_A-\kappa T_{B_0}=\kappa(T_B-T_{B_0})=\kappa w^{-1}\kappa^*P^T\lambda$,故(1)当$(\kappa w^{-1}\kappa^*P^T)^{-1}$存在时,得

$T_B=T_{B_0}+w^{-1}\kappa^*(\kappa w^{-1}\kappa^*P^T)^{-1}(T_A-\kappa T_{B_0})$为最平滑内插解. (7)

(2)当$(\kappa w^{-1}\kappa^*P^T)^{-1}$不存在时,令

$$\Phi(T_B)=e^Twe+\lambda^2(T_B-T_{B_0})^T(T_B-T_{B_0})$$

由 $\frac{\partial\Phi}{\partial T_B^T}=\frac{\partial\Phi}{\partial(T_B-T_{B_0})^T}=0$

得 $T_B=T_{B_0}+(\kappa^*w\kappa+\lambda^2I)^{-1}\kappa^*w(T_A-\kappa T_{B_0})$ (8)

为最平滑内插解,其中 λ^2 为选取的某常数使 $(\kappa^* w\kappa+\lambda^2 I)^{-1}$ 存在.

4　3mm 直流辐射计目标辐射亮温度计算

取样机 3mm 波段直流辐射计,用常温"黑体"和浸在液氮中的"黑体"定标;再取调制 2 通道,天线口面分别对准天空,此时阴天,天气温度 14℃,可得天空大气层在该波段的辐射温度 $T_s=65.89K$;天线口面对准装甲目标($3\times5m^2$ 金属板)测试,由公式 $T_A=\frac{U_A}{25.9}+T_s$ 求得装甲目标在各个不同角度天线温度如下.

表 1　天线温度
Table 1　Temperature of antenna

探测角度	天空温度	装甲目标天线温度		
		30°	35°	40°
T_A	66K	138K	121K	107K
初始值	66K	140K	135K	130K

由定标的测试系统输出的天线功率方向图,知其天线功率方向图的模拟曲线可以近似为 $G(\theta,\varphi)=G_0e^{-b\theta^2}$,由于毫米波系统,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 4.8^0,$G_0=4b=1600$.

将公式 $T_A=\int_{\beta_1}^{\beta_2}e^{-400(\alpha-\theta)^2}T_T(\theta)d\theta$ 数值化,设 $\alpha_1,\alpha_2,\cdots\alpha_m$ 为插值点,则得方程组 $T_A(\alpha_j)=k\sum_{i=1}^{n}e^{-400(\alpha_j-iI_\alpha/n)^2}T_T(\frac{iI_\alpha}{n})$　$j=1,2,\cdots,m$。令 $a=(T_{A_1}(\alpha_1),T_{A_2}(\alpha_2),\cdots,T_{A_m}(\alpha_m))^T$;$b=\left(T_T(\frac{I_a}{n}),T_T(\frac{2I_\alpha}{n}),\cdots,T_T(I_\alpha)\right)^T$;$F=k(e^{-400(\alpha_j-iI_\alpha/n)^2})_{m\times n}$,当取 $\alpha_j=\frac{jI_\alpha}{n}(j=1,2,\cdots,n)$ 时,则 F 为循环矩阵. 两边乘 F^T,令 $T_A=F^Ta$,$\kappa=F^TF$,$T_B=b$,则有 $T_A=\kappa T_B$.

以 $\alpha_j=30°$、$35°$、$40°$为内插点,得:

$$F\approx\begin{bmatrix}1 & 0.047540 & 0\\ 0.047540 & 1 & 0.047540\\ 0 & 0.047540 & 1\end{bmatrix}\qquad(9)$$

则 $\kappa=F'F$,取初始值(或先验值)

$T_{B_0}=(140,135,130)^T$,由表知 $T_A=(138,121,107)^T$,所以 $T_A'-\kappa T_{B_0}=(-15.4595,-40.2845,-36.4595)^T$,

$$D^T=\begin{bmatrix}-1 & 1 & 0 & 0\\ 0 & -1 & 1 & 0\\ 0 & 0 & -1 & 1\end{bmatrix},\quad w=D^TD=\begin{bmatrix}2 & -1 & 0\\ -1 & 2 & -1\\ 0 & -1 & 2\end{bmatrix}$$

取 $\lambda=1$,于是由式(8)得

$T_B=T_{B_0}+(\kappa^*w\kappa+I)^{-1}\kappa^*w(T_A-\kappa T_{B_0})$

$\approx(137.7267,118.9243,113.7267)^T$

若取 T_B 的各分量平均值为近似值,即 $T_B=123K$.

5　验模

为考察我们提出的反演方法是否正确,如何验模? 我们设想用如下方法:由于毫米波"黑体"的发射系数 $\varepsilon\approx1$,考虑液氮沸点温度 T 及毫米波"黑体"的发射系数,液氮中"黑体"的毫米波辐射温度可为 $T_0=80K$. 当用毫米波辐射计的低温黑体进行测试时,若所求反演结果与已知的液氮中黑体的毫米波辐射温度一致,则方法应为正确.

验模测试结果用示波器、计算机每一数值采集 2500 个数据,再求其平均值,以减少误差. 因数据量大,故每个角度所测得的 2500 个数据用示波器图给出,用 Wavestar 软件打开即可得数据与图中点的对应转化. 以天线直径 $\Phi=120mm$ 为例,探测高度 $H=48cm$,室内温度 27℃,探测角度 40°、35°、30°. 2500 个数值平均值见下表.

表 2　高温黑体天线温度
Table 2　Antenna temperature of the millimeter-wave absorber

探测角度	输出电压	输出天线温度
40°	-3.9171V	151K
35°	-4.1455V	143K
30°	-4.1786V	141K

取液氮黑体的初始值为 $T_{B_0}=(80,82,83)^T$,由测试表 2 知,此时 $T_A=(151,143,141)^T$,取 $\lambda=1$,$P=I$ 为单位阵. 于是代入公式(8)求出液氮黑体的平滑内插解为:

$T_B=T_{B_0}+(\kappa^*w\kappa+\lambda^2I)^{-1}\kappa^*w(T_A-\kappa T_{B_0})$,

$=(111.1737,91.3419,105.5066)^T$.

若取 T_B 的各分量平均值为近似值,即 $T_B=102K$. 注意到考虑到 $H=48cm$,反演的目标辐射温度实际上是周围环境和目标一起在该波段的辐射亮度温度,此时解应比液氮温度略高,基本吻合.

6　距离公式

当反装甲导弹采用被动式毫米波导引头,探测器波束对确目标中心时,(下转第 383 页)

3 结语

由于激光与 DNA 的非线性作用,可把 DNA 打成许多片段,使得表达基因易于导入、整合、配对;并且在把 DNA 打成碎片同时,还具有诱变作用,可获得更广泛选择余地;红色激光有红光效应,能促进植物生长,有利于获得良好性状. 对受体后代及供、受体进行过氧化物酶同工酶的酶谱研究表明,多数受体后代的酶谱与供体较为相似而与受体差异较大. 与供体酶谱相比较,除个别外多数受体后代酶带数略多于供体,酶活性也略强于供体;而与受体相比,多数受体后代酶带数少于受体,酶活性也普遍地弱于受体. 同工酶谱图上的差异与在田间观察性状的差异结果是一致的. 并且 D_3代与 D_4代的同工酶谱分析结果一致,表明了本研究外源 DNA 导入效果较好,遗传稳定,获得了较理想的受体后代. 酶是基因表达的产物,是一种重要的遗传标志,可从分子水平揭示其遗传与变异. 同工酶的酶谱研究,在分子水平上证明了外源 DNA 已导入番茄受体,被整合得到表达,并能遗传. 受体后代还大幅度地提高 V_C的含量,这除了供体因素外,可能与激光与 DNA 非线性作用引起 DNA 变异有关.

REFERENCES

[1] Yomosa S. Solitary excitations in deoxyribonucleic acid (DNA) double helices[J]. *Phys. Rev. A*, 1984, **30**: 474—480.

[2] SHAO Yao-Chun, FENG Guo-Lin. Study of the influence of laser frequency on DNA chaos[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(邵耀椿,封国林,激光频率对 DNA 分子混沌态影响的研究,**红外与毫米波学报**), 1995, **14**(6):456—460.

[3] SHAO Yao-Chun, FENG Guo-Lin. Study on stochastic resonance of the laser-DNA interaction system[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(邵耀椿,封国林,激光与 DNA 作用系统的随机共振研究,**红外与毫米波学报**), 1996, **15**(6): 450—454.

[4] FENG Guo-Lin, SHAO Yao-Chun, Study on the stochastic resonance chaos in laser-DNA interactive system[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(封国林,邵耀椿,激光与 DNA 作用系统的随机混沌研究,**红外与毫米波学报**), 2000, **19**(3):169—173.

[5] FENG Guo-Lin, DAI Xin-Gang, WANG Ai-Hui, *et al.* On numerical predictability in the chaos system[J]. *Acta Physica Sinica* (封国林,戴新刚,王爱慧等,混沌系统中可预报性的研究,**物理学报**), 2001, **50**(4):606—611.

[6] HU Neng-Shu, WAN Xian-Guo. *Technology and application of isoenzyme*[M]. Changsha: Hunan scientific and technical publishers (胡能书,万贤国,**同工酶技术及碟应用**,长沙,湖南科学技术出版社), 1985.

(上接第 379 页)由参考文献[7]可得导引头辐射计探测距离公式:

$$R = \left\{\frac{bA_T \mid T_T \mid}{\pi \mid T_A \mid \ln 2}\right\}^{1/2} \tag{10}$$

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≥10dB 以上,天线半功率波束宽度为 4.8^0 时, $b = 400$,及 $T_T = 123$, $T_A = 122$,将这些值代入式(10),可得毫米波导引头辐射计近感探测距离为 $R = 62m$.

7 结语

在毫米波辐射无源被动探测中,为得到真实的各种目标的辐射温度,从测得的天线温度中反演目标的亮温,有着重要的作用. 本文我们给出了毫米波装甲目标辐射亮温的样条平滑内插解及计算方法,以及探测距离.

REFERENCES

[1] Holmes J T, Balanis C A, Truman W M. Application of Fourier transforms for microwave radiometric inversions[J], *IEEE. Trans. on A. P.* 1975, **23**(6): 797—806.

[2] Truman W M, Balanis C A, Holmes J T, Three-dimensional vector modeling and restoration of flat finite wave tank radiometric measurements[J], *IEEE Trans. on A. P.*, 1977, **25**(1): 95—104.

[3] Stogryn A. Estimates of brightness temperatures from scanning radiometer data[J], *IEEE Trans. on A. P.*, 1978, **26**(5): 720—726.

[4] Claassn J P, FungA K. The recovery of polarized apparent temperature distributions of flat scenes from antenna temperature measurements[J], *IEEE Trans. on A. P.*, 1974, **22**(3): 433—442.

[5] Troisky A V, GajKovich K P, Thermal sounding of the atmospheric boundary layer in the oxygen absorption band center at 60 GHz [J], *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1993, **31**(1): 116—119.

[6] Petrnko B Z, Retrieval of paramenters of a horizontal hydrometeor distribution within the field of view of a satellite microwave radiometer [J], *IEEE trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2001, **39**(9): 1871—1878.

[7] Li Xin-Guo. *Millimeter Wave Near-Sensing Technique 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),1989.