

文章编号:1001-9014(2009)01-0011-05

3mm 辐射成像研究

李良超, 杨建宇, 姜正茂, 郑鑫

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 610054)

摘要:在研究毫米波无源成像原理的基础上,设计出了简洁的 3mm 超外差迪克式毫米波辐射计,并进行了成像实验.为了解决毫米波被动成像中由于天线孔径尺寸和衍射受限所带来的固有空间分辨率低的问题,采用了一种改进的最大似然超分辨算法进行频谱外推.实验结果表明该算法有很好的频谱外推能力,对图像分辨率的提高和超分辨性能的改善有明显效果.3mm 迪克式辐射计的主要参数如下:中心频率为 91.5 GHz,带宽为 4GHz,温度灵敏度为 0.55K,线性度为 0.9999.

关键词:被动毫米波成像;迪克式辐射计;超分辨;频谱外推;最大似然
中图分类号:TP75 **文献标识码:**A

RESEARCH ON 3mm RADIOMETRIC IMAGING

LI Liang-Chao, YANG Jian-Yu, JIANG Zheng-Mao, ZHENG Xin

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: On the basis of studying the principle of passive millimeter wave (PMMW) imaging, a compact 3mm super-heterodyne Dicke-radiometer was developed and the imaging experiment was done. An improved maximum-likelihood (IML) super-resolution algorithm was proposed in order to solve the inherent problem of poor resolution imaging, which was caused by limited aperture dimensions and the consequent diffraction limit. Experiment results indicate that the algorithm is able to complete spectral extrapolation, and enhance super-resolution performance and spatial resolution. The primary parameters of the 3mm band radiometer are given as follow: the center frequency is 91.5 GHz, the system band-width is 4GHz, the sensitivity of temperature is 0.55K and the linearity is 0.9999.

Key words: passive millimeter-wave imaging; dicke-radiometer; super-resolution; spectral extrapolation; maximum-likelihood

引言

毫米波辐射计具有全天候的工作能力,它可以穿透云、雾、战场硝烟等恶劣天气,可应用在全天候场面监控等领域^[1,2];又由于金属目标主要反射冷空辐射,同人体相比其辐射亮温较低,又可应用在机场安检等领域^[3,4].毫米波辐射成像就是利用毫米波辐射计来探测、接收被测目标、背景的电磁辐射,并把接收到的信号按比例用灰度图像直观地显示出来.

然而,关于无源毫米波成像的成像原理和成像模型方面,研究均较少.本文从毫米波准光原理和光学衍射理论出发,系统地研究了无源毫米波成像模型,并在研制 3mm 迪克式辐射计的基础上,通过成

像实验验证了成像理论、成像模型和超越衍射受限极限分辨率即超分辨的可能.该辐射计中心工作频率为 91.5GHz,带宽为 4GHz.

1 毫米波辐射成像原理

根据黑体辐射理论,任何温度高于绝对零度的物体都会辐射不同强度的电磁波.在毫米波频段,物体辐射能量虽弱,但仍能被探测到^[5].被动毫米波成像系统,是探测毫米波的辐射能量,利用强度差异实现目标的识别和成像.被动毫米波成像系统接收到的辐射亮温信号,在图像域表现为不同的灰度电平.

电磁波传播接收及成像过程如图 1 所示,焦平面阵列每个通道同时接收被测场景不同区域的辐射信号,可以实现同时多波束成像.根据惠更斯原理,

收稿日期:2008-03-21,修回日期:2008-12-18

Received date: 2008-03-21, revised date: 2008-12-18

基金项目:国家自然科学基金重点项目“无源毫米波实时成像理论与关键技术”资助(60632020)和国家自然科学基金项目“基于毫米波无源成像的航空安检新方法研究”资助(60776823)

作者简介:李良超(1978-),男,四川成都人,讲师,博士研究生,主要研究方向为毫米波无源实时成像理论、雷达系统与信号处理.

从目标场景到数据平面,其传播过程为二维傅里叶正变换过程,从数据平面到焦平面的传播过程实际为二维傅里叶反变换过程,焦平面辐射计体制通过接收通道在像平面形成图像,其无需大量的后期信号处理实现二维 FFT 和 IFFT 运算,实时性强,因此广泛用于机场安检等实时性要求较高的领域。

从目标平面到焦平面的传播过程即为系统的空间响应函数,从标量衍射理论出发,其过程实际为一个有限空间的线性空间滤波过程,考虑到从目标场景分布 $f(x, y)$ 到像平面形成毫米波能量的二维分布 $g(u, v)$ 的过程,其成像模型可以描述为

$$g(u, v) = S \left[\iint f(x, y) h_1(u, v; x, y) dx dy \right] + n(u, v), \quad (1)$$

其中, $f(x, y)$ 为在 (x, y) 上的目标亮温分布, $g(u, v)$ 为图像平面 (u, v) 区域内的能量分布, $h_1(u, v; x, y)$ 为系统的空间响应函数, $n(u, v)$ 为接收机系统在图像平面形成的加性噪声, $S[\cdot]$ 表示由目标平面至像平面的非线性变换,其表现为焦平面阵列天线的非均匀性和多通道阵列的不一致性,与焦平面阵列互耦和接收通道的一致性有关。

2 成像系统

辐射计系统中,在 8mm 频段虽然可研制出较低噪声系数的辐射计接收机,但在 3mm 频段比 8mm 频段可研制出更宽频带、更高角度分辨率的接收机,因此为了获得更高的图像质量,特殊的设计要折衷考虑^[6]。相比较而言,3mm 辐射计具有更好的空间分辨率和温度灵敏度,而通过扫描,可以在较小设备量的条件下实现较大视场成像,成像速率较快。

系统主要参数如下:接收机 RF 范围为 89.5 ~ 93.5GHz, IF 带宽为 40MHz ~ 2GHz,系统噪声系数为 11.5dB,积分时间为 50ms,温度灵敏度为 0.55K,

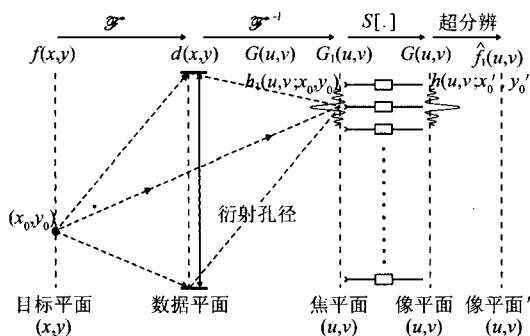


图1 成像原理

Fig.1 Principle of FPA imaging

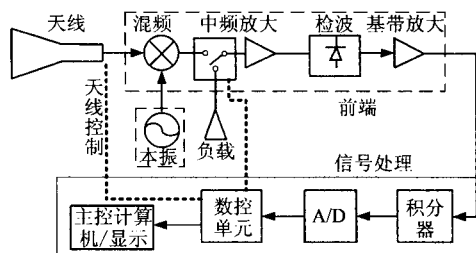


图2 3mm 迪克式辐射计系统框图

Fig.2 System block diagram of the 3mm Dicke radiometer

线性度为 0.9999, 卡塞格伦天线的 θ_{3dB} 为 0.5° , 增益为 44dB。

2.1 辐射计体制设计

在 3mm 频段, 选用 91.5GHz 的中心频率而不是 94GHz 的原因是可以避开 94GHz 雷达通信频率的干扰。

周期比较的迪克式辐射计可以有效地抑制接收机带内增益起伏, 同时采用低插入损耗的迪克式开关, 可以获得较低的系统噪声系数。因此本系统采用双边带超外差迪克式接收机体制, 其原理框图如图 2 所示。天线接收到毫米波辐射能量, 通过混频、中频放大、平方律检波、基带放大和积分至 ADC 数据采集卡, 再通过 USB 线至 PC 机。PC 机完成数据分析、处理和显示, 数控单元实现检波器的同步检波。检波后为三级级联放大, 定标采用两点法进行定标^[6]。

2.2 辐射计前端

辐射计接收机前端由毫米波混频器、W 波段本振源、中频放大器、检波器和基带放大器组成。W 波段基波混频器和毫米波模块压控振荡器 VCO, 紧贴在天线后端, 以此减少前端损耗。W 波段基波混频器是一个低转换损耗的单平衡混频器。毫米波 VCO 有两个口, 一个口输出基波信号进行十次谐波混频, 另一个输出二次谐波信号给基波混频。W 波段本振源 (LO) 是一个锁相环晶振, 可获得两个锁相环。

为提高温度灵敏度, 将本系统接收机各模块安装在一金属底板上, 这样, 辐射计温度变化较慢, 减轻了其温漂, 同时使用低损耗迪克式开关和定标源, 长期进行观察、测量, 系统噪声温度为 $T_{sys} = 3076K$ 。

2.3 数据采集和软件设计

该辐射计数据采集是由 14bit ADC 数据采集卡实现的, 采集后的数据通过 USB 传给 PC 机。辐射计所有功能均可通过 Visual C++ 开发的图形用户接口 (GUI) 控制。图像数据按数组形式, 存储在一个文本文件 (text) 中。这样, 其容易被其它软件包读取、

分析和显示. 在软件中,也可以存储和记录其它一些参数和信息,如实验内容、测试环境、测试条件、系统状态等. 为系统诊断和定标方便(定标时间较长),一个 log 文件被存储在定标参数文件中.

2.4 系统参数

空间分辨率:空间分辨率是指毫米波辐射计能够区别同一辐射源两个相邻点的距离. 根据 Nyquist 采样定理,考虑到天线的低通效应,为了完全恢复天线接收的信息,系统采样率为^[7]

$$f_s \geq 2D/\lambda, \quad (2)$$

其中, f_s 表示采样速率, D 表示天线孔径尺寸, λ 指工作波长. 考虑到天线 3dB 带宽和空间采样间隔,可知

$$\theta_s \leq \theta_{3dB}/2. \quad (3)$$

通过式(3)可以看出,在一个波束内采样点数必须大于两个,才能将空间频率 $f \leq D/\lambda$ 的亮温分布的信号特征完全采集到.

温度灵敏度:温度灵敏度是表征辐射计能检测出输入天线温度最小变化能力的估值. 温度灵敏度跟系统积分时间和系统扫描速度有关. 结合系统扫描速度,测量并计算出系统温度灵敏度 $\Delta T = 0.55 \pm 0.1K$. 通过公式(4)计算出的系统噪声温度 $\Delta T = 0.44K$.

$$\Delta T = \beta \cdot \frac{T_{sys}}{\sqrt{B\tau}}, \quad (4)$$

其中系统噪声温度 $T_{sys} = 3076K$, $B = 4GHz$, $\tau = 50ms$, 迪克式辐射计 $\beta = 2$.

线性度:线性度是表征接收机输出电压同天线温度间的线性关系,通常用线性度的相关系数 Q 来表征

$$Q = \frac{S_{UT}}{\sqrt{S_{UU}S_{TT}}}, \quad (5)$$

其中 S_{UT} 、 S_{UU} 、 S_{TT} 、 m_u 、 m_T 分别是多次测量计算出的均值. 根据实验记录的相关数据,计算出系统的线性度为 $Q = 0.9999$.

3 改善成像质量方法

在被动毫米波成像系统中,由于天线的低通效应和成像系统的衍射受限效应^[8],其传递函数在由衍射极限分辨率所决定的某个截止频率以上的值均为零. 显然,普通的图像复原技术如去卷积技术等只能将物体的频率复原到衍射极限相应的截止频率处,而不能超越它,这样截止频率之外的能量和信息被无可奈何地丢失了. 超分辨率图像复原就是试图复原截止频率之外的信息,以使图像获得更多的细

节和信息.

在多通道辐射计成像中,如果不考虑天线波束的非均匀性和通道的不一致性,成像系统是线性和时间不变的,图 1 所示成像模型可简化为式(6)所示的卷积模型

$$g(x, y) = h(x, y) \otimes f(x, y) + n(x, y), \quad (6)$$

其中 $n(x, y)$ 为图像域噪声, $h(x, y)$ 为系统点扩展函数(PSF), $g(x, y)$ 为获得图像, $f(x, y)$ 为原始图像. 由于单通道成像,不存在波束的非均匀性和通道的不一致性,因而此模型对单通道成像系统始终成立.

在超分辨率信号处理过程中,一种特别实用的方法是统计优化的方法,即通常所指的贝叶斯方法. 其中最为典型的是基于泊松分布的最大似然(ML)估计算法,其思想是试图最大化似然函数,并通过 Picard 迭代方法,得到如式(7)的迭代方程.

$$\tilde{f}^{n+1}(x, y) = \tilde{f}^n(x, y) \left[\frac{g(x, y)}{\tilde{f}^n(x, y) \otimes h(x, y)} \otimes h(x, y) \right], \quad (7)$$

其中, $\tilde{f}^n(x, y)$ 为 $f(x, y)$ 第 n 次迭代的结果, \otimes 为卷积.

在有噪声的环境下,基于泊松分布的 ML 算法的非线性运算外推了通带外的部分高频分量,但同时也破坏了通带内的低频分量,出现了一些振铃波纹,分辨率增强有限,而且收敛速度比较慢. 而 Wiener 滤波复原算法是一种简单的频域恢复方法^[9],能够很好地恢复通带内的频谱分量.

维纳滤波器的估计公式为

$$F_w(u, v) = \frac{OTF^*(u, v)G(u, v)}{|OTF(u, v)|^2 + S_m(u, v)/S_f(u, v)}, \quad (8)$$

其中 $G(u, v)$ 、 $OTF(u, v)$ 、 $F_w(u, v)$ 、 $N(u, v)$ 分别是式(6)中 g 、 h 、 f 、 n 的傅立叶变换.

为了能够把 Wiener 滤波复原算法和 ML 算法的优点结合在一起,进一步增强图像的分辨率,我们提出了改进的 ML 算法(IML),该算法以 ML 算法作为主迭代过程,并用维纳滤波器恢复的低频分量代替通带内频率分量,思想如式(9)所示. 在外推图像的高频分量的同时,保证通带内低频分量不被破坏.

$$F^k = F_w * OTF + (1 - OTF) * F_{ML}^k. \quad (9)$$

这个算法的超分辨率能力来自于每步迭代中涉及的非线性处理,而且更新规则自动实现了对目标场景估计的非负性限制.

4 成像实验与分析

为了验证系统超分辨算法的复原能力,我们进

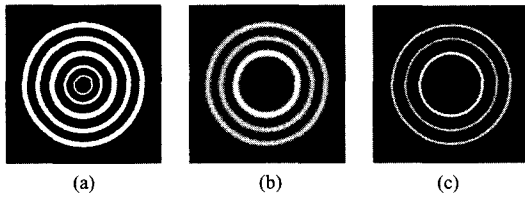


图3 (a)原始图像 (b)退化图像 (c)恢复的图像
Fig.3 Images (a) original (b) blurred (c) restored by IML

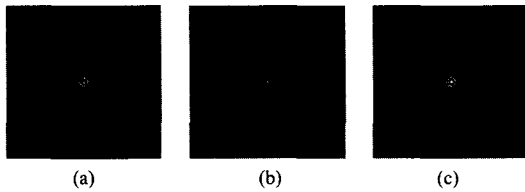


图4 空间谱 (a)原始图像 (b)退化图像 (c)恢复图像
Fig.4 Spectrums (a) original (b) blurred (c) restored by IML

行了一个典型的恢复退化图像的仿真实验,如图3(a)~(c)所示.图3(a)显示的是仿真的原始图像,为黑色背景(图像中灰度值为0)下的一组同心圆环组成,白色的圆环在图像域中亮度值为1;为了模拟由衍射受限成像系统所产生的降晰效果和天线的低通效应,把图3(a)的图像同一个圆孔径天线所产生的点扩展函数(PSF)相卷积,从而产生退化图像如图3(b)所示;图3(c)显示了利用改进的基于泊松分布的IML算法,进行50次迭代后恢复出的图像,很明显,经过超分辨算法处理,去除了引起图像退化的大部分因素,从而有效地恢复出了原始图像信息.为了更好地说明超分辨算法所达到的效果,图4(a)~(c)分别显示了图3(a)~(c)原始图像、退化图像及恢复图像的空间谱信息.图4(b)说明了系统点扩展函数的低通效应和退化本质,图4(c)很好地说明了利用算法进行频谱外推,即超分辨信号处理的能力.

为了进一步验证成像原理、成像模型和超分辨图像复原的能力,我们进行了第2个实验.通过该3mm辐射计机械扫描,在实验室和周围环境采集了两幅图像数据如图5、6所示.图5所示的窗子图像是利用卡塞格伦天线,在稍远距离进行成像,天线波束宽度 0.5° ,获得了较高的空间分辨率.图6所示的图像,是利用喇叭天线,在室外距离辐射计仅有几厘米时进行的手枪成像实验.图5、6所示的毫米波图像,白色表示辐射温度较低呈现冷,黑色表示辐射温度较高.从图中可以看出越接近天空,辐射温度越低;金属主要反射冷空辐射.

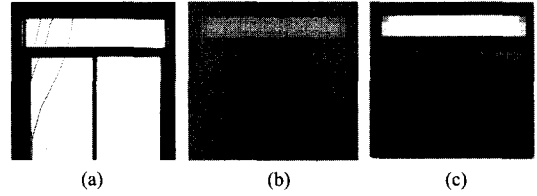


图5 (a)光学图像 (b)毫米波图像 (c)IML处理后的图像
Fig.5 Images (a) optical (b) PMMW (c) restored by IML

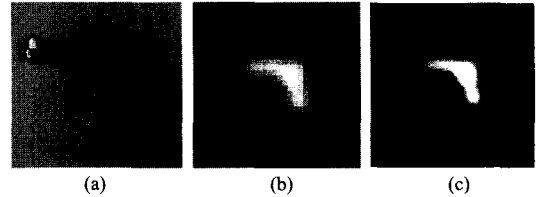


图6 (a)光学图像 (b)毫米波图像 (c)IML处理后的图像
Fig.6 Images (a) optical (b) PMMW (c) restored by IML

5 结语

本文在研究毫米波辐射成像原理的基础上,利用研制的3mm波段辐射计,通过仿真和成像实验,验证了无源毫米波成像原理.为了进一步提高毫米波辐射计图像的空间分辨率,本文采用了一种改进的基于泊松分布的ML超分辨算法(IML),该算法综合了ML算法和维纳滤波复原算法的优点,在外推图像高频分量的同时,保证图像的低频分量不被破坏.实验结果表明该算法对图像分辨率的提高和超分辨性能的改善有明显的效果.

为了进一步降低系统噪声系数、满足一定场合的实时成像要求,并获得更高的空间分辨率和温度灵敏度,将要研究的内容是基于焦平面体制的,多通道、低噪声放大、全功率、直接检波式辐射计技术.

REFERENCES

- [1] WANG Hua-Li, LI Xing-Guo, PENG Shu-Sheng, *et al.* Passive millimeter-wave imaging techniques[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(王华力,李兴国,彭树生,等.被动毫米波成像技术. *红外与毫米波学报*),1997,16(4):297—302.
- [2] 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.
- [3] Yujiri L, Shoucri M, Moffa P. Passive millimeter wave imaging[J]. *IEEE Microwaves magazine*,2003,4(3):39—50.
- [4] SHI Xiang, LOU Guo-Wei, LI Xing-Guo, *et al.* Modelling and calculating of millimeter wave radiant temperature for armored target[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(时翔,娄国

伟,李兴国,等. 装甲目标毫米波辐射温度的建模与计算. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(1): 43—46.

- [5] Moffa P, Yujiri L, Agravante H H, et al. Large-aperture passive millimeter wave pushbroom camera [J]. *Proc. of SPIE*, 2001, 4373: 1—6.
- [6] ZHANG Guang-Feng, LI Xing-Guo, LOU Guo-Wei. Research on passive mmw imaging based on an alternating current radiometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张光锋, 李兴国, 娄国伟. 基于交流辐射计的被动毫米波成像研究. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(6): 461—464.
- [7] PENG Shu-Sheng, WU Li, YIN Xing-Hui, et al. Charac-

teristic parameters measurement of a 3mm band radiometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (彭树生, 吴礼, 殷兴辉, 等. 3mm 波段辐射计特性参数的测试. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(2): 129—132.

- [8] Macfarlane D G, Robertson D A. A dual-mode imaging millimeter wave radar/radiometer for volcanological surveying [J]. *IGARSS 04 Proceedings of IEEE on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004, 5: 3299—3302.
- [9] Hunt B R, Sementilli P. Description of a poisson imagery super-resolution algorithm [J]. *Astronomical Data Analysis Software and Systems*, 1992, 25: 196—199.

(上接第 3 页)

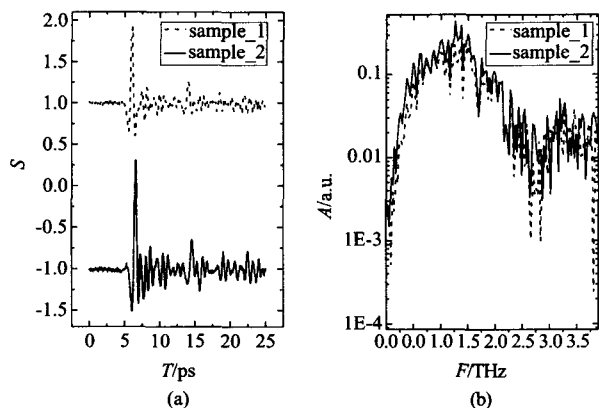


Fig. 5 THz pulse spectrum (a) temporal waveform (b) frequency waveform (T is time and F is frequency, S is THz signal and A is THz amplitude)

Sample_1: $\langle 110 \rangle$ ZnTe crystal emitter, $\langle 110 \rangle$ ZnTe crystal detector (II-VI Company)

Sample_2: $\langle 110 \rangle$ ZnTe crystal emitter, $\langle 110 \rangle$ ZnTe crystal detector (This work)

图 5 THz 脉冲光谱 (a) 时域光谱 (b) 频域光谱

Sample_1: $\langle 110 \rangle$ 晶向 ZnTe 晶体激发, $\langle 110 \rangle$ 晶向 ZnTe 晶体探测 (II-VI 公司)

Sample_2: $\langle 110 \rangle$ 晶向 ZnTe 晶体激发, $\langle 110 \rangle$ 晶向 ZnTe 晶体探测 (本实验)

ever, more information needs to be explored on the THz characteristics of ZnTe crystal grown by Te-solution method in our future study.

3 CONCLUSION

Te - solution method was introduced to grow ZnTe

single crystal. The experimental analysis was performed on THz pulse characteristics and beam propagation of the Te-solvent-grown ZnTe electro-optic crystals. The TDS results confirm that Te-solvent method is a useful method for the growth of ZnTe crystals which are used to generate and detect the THz waves.

REFERENCES

- [1] Xu J Z, Zhang X C. Optical rectification in an area with a diameter comparable to or smaller than the center wavelength of terahertz radiation [J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(12): 1067—1069.
- [2] Dakovski G L, Kubera B, Shan J. Localized terahertz generation via optical rectification in ZnTe [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, 22(8): 1667—1670.
- [3] GU Chun-Ming, LIU Rui, HE Li-Rong, et al. Effects of probe-beam polarization direction on THz detection in ZnTe [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (顾春明, 刘锐, 贺莉蓉, 等. 偏振方向对 ZnTe 电光 THz 辐射探测的影响. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(5): 333—336.
- [4] Winnewisser C, Uhd Jepsen P, Schall M, et al. Electro-optic detection of THz radiation in LiTaO₃, LiNbO₃ and ZnTe [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 70(23): 3069—3071.
- [5] Sharma R C, Chang Y A. Thermodynamic analysis and phase equilibria calculations for the Zn-Te, Zn-Se and Zn-S systems [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1988, 88(2): 193—204.
- [6] Irwin J C, Lacombe J. Raman scattering in ZnTe [J]. *J. Appl. Phys.*, 1970, 41(4): 1444—1450.