

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0326-05

上变频毫米波辐射计成像系统的工作性能

黄永明 江月松 何云涛

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要 根据毫米波光子成像辐射计成像系统要求,设计了一种基于光学上变频的被动毫米波扫描成像技术方案:使用电光调制器把毫米波信号加载到光载波的边频带中,利用光学滤波器滤掉载波分量;光电探测器把剩余边频带光信号转化为光电流,经过跨阻放大器后光电流变为电压信号,用锁相放大器读取输出电压信号,再通过计算机处理得到目标物体的亮温图。分析了该成像系统天线扫描速度和天线温度对比度关系、系统输出信号、噪声源、信噪比、灵敏度等工作性能指标及限制因素,讨论了成像系统灵敏度问题,找出改进成像系统灵敏度的方法,为毫米波辐射计实时成像系统的工程实现提供了理论依据。

关键词 成像系统;毫米波辐射计;上变频;电光调制器

中图分类号 TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0326

Performance of the Millimeter Wave Radiometer Imaging System Based on Upconversion

Huang Yongming Jiang Yuesong He Yuntao

(School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract A technique for passive millimeter-wave scanning imaging based on optical upconversion is designed for millimeter-wave photon imaging radiometer system. The millimeter-wave signal is transferred to the sidebands of the optical carrier by an electro-optical (EO) modulator, and filters are used to suppress the optical carrier. The optical signal of the remaining sideband is converted into a photocurrent by photodetector, and then the photocurrent is converted to the voltage signal by transimpedance amplifier. The lock-in amplifier is used to read the output voltage signal. The brightness temperature image of the objects is obtained by signal processing. We analysis the relationship between antenna scanning speed and antenna temperature contrast, system output signal, noise source, signal to noise ratio, and sensitivity etc. The sensitivity of imaging systems is discussed in detail. Several methods are proposed to improve the sensitivity of the imaging system, which provides a theoretical guidance for the realization of the millimeter-wave radiometer real-time imaging system project.

Key words imaging systems; millimeter-wave radiometer; upconversion; electro-optical modulator

1 引 言

位于红外与微波波段之间的毫米波,除具有红外和微波共同特征外还有其特有的性能:与微波相比,毫米波的指向性好、抗干扰能力强、探测性能好、能很好地穿透等离子体;与红外相比,毫米波受气象

影响较小,能很好地区别金属目标和周围环境。这些特性使得毫米波技术近年来得到迅速发展,人们开始研究毫米波成像在对地观测遥感、反恐怖主义、安全检测和飞行导航等诸多领域的应用^[1,2]。

毫米波辐射计成像以被动的工作方式探测目

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z114)、武器装备探索研究项目(7130730)和北京航空航天大学博士创新基金(2008年度)资助课题。

作者简介: 黄永明(1984—),女,硕士研究生,主要从事毫米波和光学综合孔径成像方面的研究。

E-mail: hym@ee.buaa.edu.cn

导师简介: 江月松(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事光电成像遥感理论与技术、毫米波和 THz 光子学成像技术等方面的研究。E-mail: yuesongjiang@buaa.edu.cn

标,不发射电磁波,具有很高的隐蔽性和很好的抗干扰性能,目前得到了广泛的应用。在毫米波辐射计成像系统中,天线接收到的目标辐射信号,由于其衰减较大,在传输前应转换至更适合传输的频率。方法之一是将其下变频至中频信号,通过同轴电缆传输,目前的毫米波辐射计成像系统多采用这一方法,如美国天合(TRW)研究组为飞行器自动着陆而研制的被动微波毫米波(PMMW)成像仪样机,其聚焦天线口径为 460 mm,接收机阵列为 40×26 个微波毫米波集成电路(MMIC)直接检波接收机,中心频率为 89 GHz,带宽为 10 GHz,灵敏度小于 $2 \text{ K}^{[3]}$; Lockheed Martin 公司研制的 PMMW 成像仪样机,其中心为卡塞格伦天线,此系统仅在水平方向线性排列了 34 个接收机,并在垂直方向上作机械扫描,中心频率为 94 GHz,视域为 $15^\circ \times 13.6^\circ$,灵敏度为 $0.6 \sim 2 \text{ K}^{[4]}$; Millivision 公司研制的手持式 PMMW 成像仪,聚焦天线直径为 125 mm,中心频率为 94 GHz,带宽为 5 GHz,灵敏度小于 $1 \text{ K}^{[5]}$ 。方法二为将其上变频至光波频率^[6],由光纤传输,进而可实现被探测目标辐射信号的光子成像,这样可以进一步提高成像系统的灵敏度。本文从方法二出发,设计了一种基于光学上变频的毫米波辐射计成像技术,并对这一成像系统工作性能进行了理论分析,为下一步进行实验研究奠定了理论基础。

2 光学上变频技术

2.1 原理

图 1 所示是毫米波上变频技术原理,其中电光(EO)调制器把接收的毫米波信号加载到光载波的边频带中,用光学滤波器来抑制多余载波,光电探测器用来探测剩余边频带的光能量,并把光能量转化为光电流^[6~8]。

这一成像技术具有多个优点:首先,光纤传输具

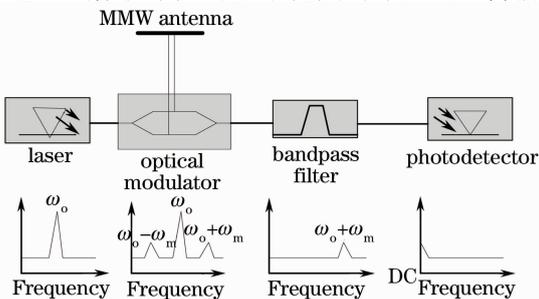


图 1 探测器原理图及相应的频谱图

Fig. 1 Schematic of the detector and associated frequency spectra for each stage

有很宽的工作带宽,上变频毫米波成像系统的接收带宽相比传统下变频方法宽得多,更高的系统收集带宽有助于提高系统可探测到的有效被动毫米波辐射,起到增加探测器最小可分辨温度的目的,进而提高系统的灵敏度;其次,相较于经下变频技术后信号由同轴电缆传输,经上变频技术后通过光纤传输的信号具有低衰减和抗电磁干扰的优点。

2.2 成像系统构成

为验证上述成像原理的可行性,搭建了如图 2 所示的装置进行实验。实验装置由卡塞格伦天线、光纤激光器、马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)型铌酸锂相位调制器、光纤 Bragg 光栅滤波器、PIN 光电二极管、斩波器及锁相放大器组成。

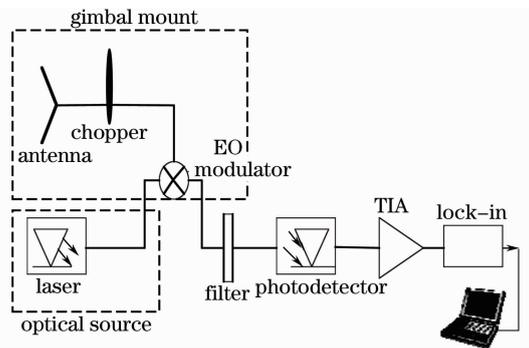


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

成像系统中由天线接收到的目标辐射的毫米波能量在进入系统时有很大的衰减,经过 PIN 光电二极管后,受背景辐射的噪声或其他噪声干扰的影响,有用信号被深埋在噪声之中,此时应借助于微弱信号检测的理论方法^[9]来获取有用信号,即:进入电光调制器的毫米波信号被斩波装置斩波,锁相放大器读取输出的电压值并应用计算机处理把得到的电压值转化为表示成像物体信息的亮温图。

3 系统工作性能研究

3.1 天线扫描速度与天线温度对比度

在毫米波扫描成像系统中,毫米波辐射图像中的色调变换取决于目标及背景之间的天线温度对比度^[10]。下面研究天线扫描速度和天线温度对比度之间的关系。

如图 3 所示,待测目标落在 ab 段内,距离为 d , a, b 连线的中点为 o 。在连线正上方 h 处固定一天线 (c 处), oo' 是 ab 的垂线,与 ac 的夹角为 α ,天线在这个平面内作扫描,其波束最大辐射量沿 ce 方向,与 co 的夹角为 θ , θ_1 和 θ_2 分别是 co 与 ca 和 cb 的夹角。

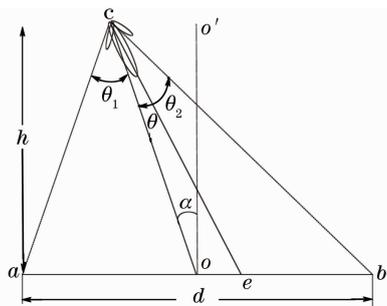


图3 目标物体与天线位置的几何关系

Fig.3 Geometric relationship between the target object and antenna

由 Holmes 推导可知:

$$T_A(\theta) = \int_{-\theta_1}^{\theta_2} T_B(\theta' + \theta) \cdot G(\theta') d\theta', \quad (1)$$

式中 $T_B(\theta)$ 是目标在探测方向上的视在温度, $G(\theta)$ 为天线的增益方向图。

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{d}{2h} - \tan \alpha\right) + \alpha, \quad (2)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{d}{2h} + \tan \alpha\right) - \alpha, \quad (3)$$

α 为常数, 由(1)式可知, $T_B(\theta)$ 与 $G(\theta)$ 是相关的, 又 $G(\theta)$ 为实偶数, 由卷积定理有

$$T_A(\theta) = T_B(\theta) \otimes G(\theta), \quad (4)$$

设天线归一化方向图为

$$F_n(\theta) = \exp(-k\theta^2), \quad (5)$$

假设天线为无耗天线, 有

$$G(\theta) = D(\theta) = \frac{4\pi F_n(\theta)}{\iint_{4\pi} F_n(\theta) d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_A} F_n(\theta) = k_1 F_n(\theta), \quad (6)$$

式中 $D(\theta)$ 为方向性方向图, 无耗天线中 $G(\theta)$ 和 $D(\theta)$ 相等; $\Omega_A = \iint_{4\pi} F_n(\theta) d\Omega$ 为天线的波束立体角;

$k_1 = \frac{4\pi}{\Omega_A}$ 为天线方向图的最大值, 表示天线方向性的好坏。

将(6)式代入(4)式有

$$T_A(\theta) = K_1 T_B(\theta) \otimes F_n(\theta). \quad (7)$$

若 a, b 处为两点源, 则有

$$T_A(\theta) = K_1 \{ \exp[-k(\theta + \theta_1)^2] + \exp[-k(\theta - \theta_2)^2] \}. \quad (8)$$

设天线的扫描速度为 ω rad/s, 则 $\theta = \omega t$, 将其代入(8)式, 可得

$$T_A(t) = K_1 \{ \exp[-k(\omega t + \theta_1)^2] + \exp[-k(\omega t - \theta_2)^2] \}. \quad (9)$$

由(9)式可以看出, 天线温度对比度和天线扫描速度成负指数关系。天线温度对比度越高越好, 因此在设计天线扫描速度时要求速度不能过快。

3.2 系统输出信号

使用 Mach-Zehnder 型电光调制器在正弦调制下 $[V(t) = \cos(\omega_m t)]$, 输出光场可表示为

$$E_o = \frac{E_i}{2} \exp(j\omega_o t) \{ \exp[jm_1 \cos(\omega_m t)] + \exp[jm_2 \cos(\omega_m t)] + j\phi \}, \quad (10)$$

式中 E_i 是加载的光载波振幅; ω_o 是光载波频率; ω_m 是调制频率, 在实验中与斩波器的斩波频率有关 ($\omega_m = 1/f_c$, f_c 为斩波器斩波频率); ϕ 是不同干涉臂之间的相位差; m_1 和 m_2 是每一干涉臂的相位调制幅值。

在频域下, 光能量可以表示为

$$I(\omega_o \pm k\omega_m) = \frac{I_i}{4} [J_k^2(m_1) + J_k^2(m_2) + 2J_k(m_1)J_k(m_2)\cos(\phi)], \quad (11)$$

式中 I_i 是频率 ω_o 下的光强度; $J_k(m)$ 是第一类 K 阶贝塞耳函数。使用单驱动调制器, 则 m_2 为零, 有

$$I(\omega_o \pm \omega_m) = \frac{I_i}{4} \begin{cases} [1 + J_0^2(m) + 2J_0(m)\cos(\phi)] & k = 0 \\ J_k^2(m), & k = \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases}. \quad (12)$$

在小信号近似下有

$$J_0(x) \approx 1 - \frac{x^2}{4} \text{ 和 } J_1(x) \approx \frac{x}{2},$$

及

$$m = \pi \frac{V_m}{V_\pi}, \quad (13)$$

V_π 是调制器半波电压, V_m 是外加调制器电压, 有

$$I_m = \frac{V_m^2}{2Z_e}, \quad (14)$$

Z_e 是电光调制器输入特征阻抗, I_m 是天线接收到目标物体辐射的毫米波能量, 有: $I_m = kBT_A$, K 为玻尔兹曼常数, B 为系统工作带宽, T_A 为天线温度。(12)式变为

$$I(\omega_o \pm \omega_m) \approx \frac{I_i}{4} \begin{cases} [2 + 2\cos(\phi)] & k = 0 \\ \frac{\pi^2}{4V_\pi^2} V_m^2, & k = \pm 1 \end{cases}. \quad (15)$$

调制器第一级边带光功率为

$$I_{\text{FSB}} = L_{\text{mod}} \left(\frac{\pi^2 Z_e}{16V_\pi^2} \right) \cdot I_i \cdot I_m \equiv \eta_{\text{mod}} I_i \cdot I_m, \quad (16)$$

式中 L_{mod} 为调制器光损失, $\eta_{\text{mod}} = L_{\text{mod}} \cdot \left(\frac{\pi^2 Z_e}{16V_\pi^2} \right)$ 为

调制器转换因子。

经光电探测器后输出的光电流为

$$i_{\text{sig}} = \alpha \mathcal{R} I_{\text{FSB}} = \alpha \mathcal{R} \eta_{\text{mod}} \cdot I_i \cdot I_m \equiv \eta_{\text{det}} \cdot I_m, \quad (17)$$

α 为系统总的光损失,包括电光调制器光损失 L_{mod} ,波导损失,通带内光滤波器的损失及系统内部光纤接合及连接器的损失,其中最主要的是电光调制器的光损失; \mathcal{R} 是光电探测器的响应度; η_{det} 是成像系统总的探测效率。

经跨阻放大器后,输出电压为

$$V_{\text{sig}} = G_{\text{TIA}} \eta_{\text{det}} I_m, \quad (18)$$

G_{TIA} 是跨阻放大器的增益阻抗。

由(18)式可以看出,成像系统输出电压值正比于天线接收到的毫米波能量,比例系数为跨阻放大器的跨阻增益及成像系统的探测效率 η_{det} 。其中成像系统的总探测效率 η_{det} 主要由系统总的光损失、光电探测器响应度、调制器效率、光载波组成,这些因素直接影响着成像结果。

3.3 系统噪声源及信噪比、灵敏度

成像系统中的主要噪声来自所使用的光学器件自身的特性,如产生载波信号的激光光源会在滤波器的通频带内产生自发辐射能量、光电探测器产生的暗电流等。这些噪声在温度和环境影响下变化很大,很难从这些噪声的分布中分辨出待测信号强度的变化,在输入信号被斩波的情况下这些影响可以得到改善。

在斩波模式下,进入电光调制器的信号被周期性中断,锁相放大器将带有斩波频率的待测信号和参考信号进行相关运算,连续噪声源可从待测信号中区别出来。对输入信号进行斩波后,成像系统主要噪声有:跨阻放大器的热噪声、光电探测器的散粒噪声、锁相放大器工作带宽内的链路增益变化。其中跨阻放大器产生的热噪声电流来源于跨阻放大器输入端的 Johnson 噪声,由放大器的有效输入阻抗 Z_{TIA} 决定,可表示为

$$\langle i_{\text{th}}^2 \rangle = \frac{4kTB_{\text{det}}}{Z_{\text{TIA}}}. \quad (19)$$

B_{det} 为锁相放大器的工作带宽。

因此,高的跨阻增益可降低经过光电二极管后产生的热噪声电流。

系统噪声基底的第二个噪声是光电二极管产生的散粒噪声,可表示为

$$\langle i_{\text{sh}} \rangle^2 = 2qi_{\text{ph}}B_{\text{det}}, \quad (20)$$

式中 q 为电子电量, i_{ph} 为总的光电流,包括信号电流

i_{sig} ,暗电流 i_d ,探测到的漏电流 $\mathcal{R}I_{\text{ls}}$ 。

在斩波模式下,最后一个噪声是锁相放大器工作带宽内链路增益的变化 $\Delta\eta_{\text{det}}(B)$,这是由斩波装置的振动及光学器件和毫米波器件耦合处损耗引起的。

各噪声是线性无关的,总噪声的均方值为各噪声均方值之和,则系统信噪比为

$$R_{\text{SN}} = \frac{(\eta_{\text{det}} I_m)^2}{B_{\text{det}} \left[2q(\eta_{\text{det}} I_m + i_d + \mathcal{R}I_{\text{ls}}) + \frac{4kT}{Z_{\text{TIA}}} \right] + [\Delta\eta_{\text{det}}(B) I_m]^2}, \quad (21)$$

可得系统的等效噪声功率为

$$P_{\text{NE}} = \frac{\sqrt{B_{\text{det}} [2q(i_d + i_{\text{sig}} + \mathcal{R}I_{\text{ls}}) + 4kT/Z_{\text{TIA}}]}}{\eta_{\text{det}} - \Delta\eta_{\text{det}}(B)}, \quad (22)$$

进而得到系统的噪声等效温差

$$D_{\text{NET}} = \frac{\sqrt{B_{\text{det}} [2q(i_d + i_{\text{sig}} + \mathcal{R}I_{\text{ls}}) + 4kT/Z_{\text{TIA}}]}}{kB_{\text{det}} [\eta_{\text{det}} - \Delta\eta_{\text{det}}(B)]}. \quad (23)$$

由(23)式可以看出系统的灵敏度主要由两方面决定:1)成像系统的总探测效率,主要由调制器的调制效率决定;2)成像系统的噪声基底。

由以上分析可得到改进成像系统灵敏度的3种方法:1)成像系统总的探测效率和输入的光载波强度成正比,增大加载到电光调制器上的光强度,可以改进成像系统的最小可分辨功率,进而改善成像系统的温度分辨率;2)成像系统总探测效率的最主要影响因素是调制器的调制效率,所以提高调制器的调制效率可以改善成像系统的温度分辨率;3)改变成像系统结构:目前的扫描成像结构设计中只使用一个边频带上的能量,改变滤波器的通带可探测两个边频带能量,可进一步提高系统最小可分辨功率,进而提高系统的最小可分辨温差。

考虑一种极限情况,成像系统的噪声等效温差的基本限制因素是光电探测过程中产生的散粒噪声,其他的噪声在系统的搭建中可以降低,如跨阻放大器的热噪声可以通过降低光电二极管和跨阻放大器的物理温度或增大跨阻放大器的输入阻抗得以减小。但是,散粒噪声总是存在,不能通过系统设计得以降低,讨论这一限制因素对评价成像系统的性能是十分重要的。

仅考虑散粒噪声对系统噪声等效功率的影响,忽略其他噪声影响,可由(21)式得到

$$P_{NE} = \frac{2qB_{det}}{\eta_{det}}, \quad (24)$$

进一步可以得到系统噪声等效温差

$$D_{NET} = \frac{2qB_{det}}{\eta_{det}kB_{det}} = \frac{2 \cdot 3B_{det}}{k\eta_{det}}. \quad (25)$$

当 B_{det} 为 100 Hz, 转换效率为 0.001 A/W 时可得到 0.2 K 的系统噪声等效温差。实际应用中, 转换效率可达到 0.01 A/W, 因此可得到 20 mK 的系统噪声等效温差。

4 结 论

天线温度对比度和天线扫描速度成负指数关系, 为提高天线的温度对比度, 要求天线扫描速度越小越好。系统的输出电压值正比于天线接收到的毫米波能量, 比例系数为跨阻增益和成像系统探测效率的乘积, 而成像系统探测效率主要由系统总的光损失、光电探测器响应度、调制器效率、光载波组成, 这些因素直接影响实验结果。在斩波模式下, 系统的主要噪声有跨阻放大器的热噪声、光电探测器的散粒噪声及锁相放大器工作带宽内的链路增益变化, 这些噪声是系统的信噪比和灵敏度最主要影响因素。对温度灵敏度的进一步分析得到改进成像系统灵敏度的几种方法: 1) 在允许的情况下, 增大加载到电光调制器上的光强度; 2) 提高调制器的转换效率; 3) 改变滤波器的通带, 使其可探测到两个边频带能量。毫米波辐射计成像系统工作性能的研究结果, 为下一步的实验研究奠定了理论基础。

参 考 文 献

- 1 A. R. Harvey, R. Appleby. Prospects for mm-wave aperture synthesis from space-borne and aerial platforms [C]. *SPIE*, 2000, **4091**: 27~38
- 2 Jiang Yuesong, You Rui. Synthetic aperture millimeter wave camera of airborne for earth observations: principles and configurations of antenna array[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, **19**(6): 431~436
江月松, 尤睿. 机载毫米波合成孔径对地观测相机: 原理和天线阵列构型[J]. *遥感技术与应用*, 2004, **19**(6): 431~436
- 3 A. Pergande, D. Dean, D. J. O' Donnell *et al.*. Passive millimeter wave imaging [C]. *SPIE*, 1996, **2736**: 240~247
- 4 D. D. Ferris, Jr, N. C. Currie. Overview of current technology in MMW radiometric sensors for law enforcement application [C]. *SPIE*, 2000, **4032**: 61~71
- 5 R. Kuroda, G. S. Pow, Y. Guo *et al.*. Direct detection MMIC FPAs for MMW imaging [C]. *SPIE*, 2000, **3064**: 90~97
- 6 He Yuntao, Jiang Yuesong, Wang Changwei. Application of electro-optic modulation in passive synthetic aperture imaging detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1201~1207
何云涛, 江月松, 王长伟. 电光调制在被动综合孔径成像探测中的应用 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1201~1207
- 7 C. Schuetz. *Optical Techniques for Millimeter-wave Detection and Imaging* [D]. Delaware: University of Delaware, 2007
- 8 He Yuntao, Jiang Yuesong, He Ye. Holographic phase calibration for fiber interferometric imaging array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 38~42
何云涛, 江月松, 何焯. 光纤干涉成像阵列全息相位校正研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 38~42
- 9 Zhao Yuan, Zhang Yu. *Photoelectric Signal Detection Theory and Technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. 173~175
赵远, 张宇. *光电信号检测原理与技术* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 173~175
- 10 J. Kraus, R. Marhefka. *Antenna* [M]. Zhang Wenxun Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 321~329
克劳斯, 马尔赫夫卡. *天线* [M]. 章文勋译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 321~329