

文章编号: 1001 - 9014 (2009) 05 - 0382 - 04

一种融合干涉测量的被动毫米波焦平面成像方法

胡 飞, 冯 宇

(华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对被动毫米波焦平面阵列中相邻馈源波束存在的重叠区域, 采用相关的方法对相邻馈源的输出进行相关接收, 产生了新的像素信息, 提出了一种融合干涉测量的焦平面成像方法. 该方法将相干和非相干技术进行有效融合, 增加了被动毫米波多波束成像像素的数量, 提高了成像分辨率. 理论分析和仿真实验都表明该方法是有用的.

关键词: 被动毫米波成像; 分辨率; 干涉测量; 焦平面

中图分类号: TP75 **文献标识码:** A

PASSIVE MILLIMETER WAVE FOCAL PLANE IMAGING METHOD COMBINED WITH INTERFEROMETRY

HU Fei, FENG Yu

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the problems that there existed overlap regions between the beams of adjacent feeds in passive millimeter-wave focal plane array (FPA) and the images are not clear, a focal plane imaging method combined with interferometry was proposed to generate more image pixels than the conventional FPA imaging methods. By combining coherent and incoherent technologies, the method can increase the number of image pixels. Therefore, the spatial resolution of passive millimeter-wave multi-beams imaging was improved. Both theoretical analysis and simulation results demonstrate the effectiveness of the method.

Key words: passive millimeter wave imaging; resolution; interferometry; focal plane

引言

被动毫米波 (PMW) (passive millimeter-wave) 成像技术在场景监控、安全检查、军事侦察等领域具有广阔的应用前景. 近年来, PMW 多波束阵列成像技术发展迅速, 非相干测量和干涉测量是两个主要的发展方向.

采用非相干测量方法的毫米波焦平面阵列成像技术在国外已进入样机阶段. 如美国 TRW 公司已研制成功 W 波段焦平面 PMW 实时成像仪^[1], 工作频率为 89GHz, 空间分辨率为 0.5°, 图像像素数为 26 × 40. 采用干涉测量方法的干涉仪阵列综合孔径成像技术被广泛应用于地球环境遥感等领域, 如一维综合孔径辐射计 ESTAR^[2]、二维综合孔径辐射计 MRAS^[3] 和 GeoSTAR^[4] 等. 非相干的 PMW 焦

平面成像具有很高的温度灵敏度, 实时性好, 但视场范围和空间分辨率有限; 而干涉仪阵列综合孔径成像具有较大的视场范围, 空间分辨率高, 但温度灵敏度有所下降, 实时性较差.

文献 [5] 提出了一种结合毫米波辐射计全功率输出和相关输出获得的信息进行人体在场检测的方法, 利用两通道相关输出信息消除常规单通道辐射计输出中的杂散信号, 是非相干与相干技术相结合的一种尝试. 该方法仅探索了两个通道间的相干信息和非相干信息的融合, 未对该方法在多波束阵列中的应用进行讨论, 不具备成像能力.

本文提出了一种在 PMW 多波束阵列成像中融合干涉测量的焦平面成像方法. 通过对被动毫米波焦平面成像中相邻馈源波束存在的重叠区域采用相关的方法来增加目标场景成像像素, 从而提高成

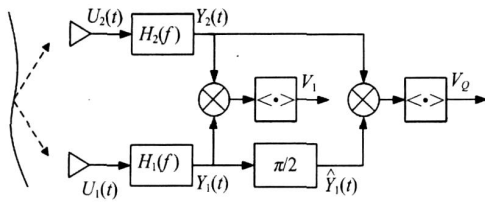


图 1 二元干涉仪原理框图
Fig 1 Block diagram of interferometer

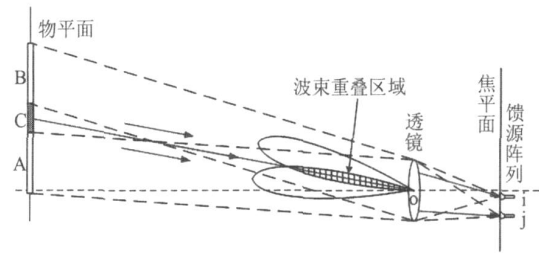


图 2 被动毫米波焦平面成像示意图
Fig 2 Diagram of PMMW focal plane imaging

像分辨率. 本文对提出的方法进行了具体的理论分析, 并通过仿真实验进行了验证.

1 PMMW 焦平面成像及干涉测量原理

PMMW 焦平面成像与红外焦平面成像类似, 属于非相干的直接成像. 其原理是将多个接收单元以一定的阵列形式排列在聚焦天线的焦平面上, 利用各馈源的偏焦不同产生不同指向的波束覆盖视域, 每一波束对应场景中的一个像点, 相应接收单元的输出信号即对应着该场点的亮度温度, 全部接收单元的输出组成目标场景的辐射亮温图像.

干涉测量的基础是采用复相关接收方法的二元干涉仪, 其原理如图 1 所示.

将两路接收通道的输出信号直接相关, 获得同相 (In-phase) 相关; 将其中一路信号进行 $\pi/2$ 移相之后再相关, 获得正交 (Quad-phase) 相关. 二者合起来即为复相关输出

$$V = V_i + V_Q \quad (1)$$

复相关输出 V 是可见度函数 (Visibility Function) 的一个采样值, 它与被测场景亮温分布有如下关系

$$V(u, v) = \frac{\sqrt{D_1 D_2}}{4} T_B(\cdot, \phi) f_{n1}(\cdot, \phi) f_{n2}(\cdot, \phi) \cdot e^{j(u \sin \phi \cos \phi + v \sin \phi \sin \phi) d} \quad (2)$$

其中, $u = d_x / \lambda$, $v = d_y / \lambda$, d 是两个天线之间的距离矢量, 称为基线; $f_{n1}(\cdot, \phi)$ 与 $f_{n2}(\cdot, \phi)$ 分别为天线 1 和天线 2 的归一化场强方向图, D_1 与 D_2 分别为两天线的最大方向性, $T_B(\cdot, \phi)$ 为被测场景亮温分布.

2 焦平面成像中融合干涉测量

2.1 理论分析

图 2 是 PMMW 焦平面成像示意图, 馈源 i 和馈源 j 的波束存在重叠部分, 分别指向物平面上的 AC 区以及 BC 区, 则物平面上 C 区的辐射会同时进入

两个馈源. 为分析简便, 作如下假设:

- 1) 不同物点的毫米波辐射互不相关;
- 2) 物平面处于聚焦天线远场;
- 3) 同一物点辐射到聚焦天线口面上的毫米波近似等效为平面波.

根据以上假设, 把两馈源的输出进行相关后得到的结果将只包括 C 区的亮温信息, 通过适当的信号处理, 可得到 C 区亮温的测量值. 再对两个馈源的输出分别进行实孔径成像的处理, 并从中“减去”重叠部分的相关结果, 就可以得到 A 区和 B 区的亮温测量值.

根据干涉测量原理, 将馈源 i 和馈源 j 的输出进行同相相关, 其结果可表示为

$$V_{ij} = \frac{\sqrt{D_i D_j}}{4} T_B(\cdot, \phi) f_{ni}(\cdot, \phi) f_{nj}(\cdot, \phi) \cdot \cos\left(\frac{2 - S(\cdot, \phi)}{d}\right) \quad (3)$$

式中, $S(\cdot, \phi)$ 为同一物点的毫米波辐射进入两馈源的路程差, λ 为接收机工作频率所对应的波长, 其余变量的意义与式 (2) 相同. 若旁瓣电平足够低, 可把式 (3) 中的积分当成在主波束重叠范围内进行, 如图 2 中的 C 区. 由于每个波束足够窄, 可把重叠部分的亮温当成一定值 T_C , 则式 (3) 简化为

$$V_{ij} = T_C \frac{\sqrt{D_i D_j}}{4} f_{ni}(\cdot, \phi) f_{nj}(\cdot, \phi) \cdot \cos\left(\frac{2 - S(\cdot, \phi)}{d}\right) \quad (4)$$

综合孔径成像中常用 G 矩阵进行图像反演, 其根据是下式

$$T = G^T (GG^T)^{-1} V \quad (5)$$

其中, V 为 $(2N + 1) \times 1$ 的可见度函数矩阵, N 为进行复相关的对数; T 为 $M \times 1$ 的真实亮温矩阵, M 为待反演的亮温点数; G 矩阵大小为 $(2N + 1) \times M$, 称为调制矩阵, 表示了整个系统的冲激响应.

本文提出的方法中, 由于只需得到一个同相相

关输出,并且把波束重叠部分的亮温当成一定值,所以 V 、 G 和 T 都退化成 1×1 的矩阵,则 V 和 T 成线性关系,对应于式 (3)中的积分项为一常数.采取类似全功率辐射计定标的方法确定两者的关系,只要获得相邻馈源的相关输出,通过定标即可获得 T_c 的值.

设 C 区所对应的立体角为 Ω_c ,则馈源 i 接收来自 C 区的辐射功率为

$$P_c = kT_c \int_{\Omega_c} \frac{A_r}{f^2} F_n(\theta, \phi) d\Omega$$

$$= kT_c \frac{A_r}{f^2} \Omega_c \quad (6)$$

其中, $F_n(\theta, \phi)$ 为天线的归一化功率方向图, A_r 为有效接收面积, f 为接收机带宽, k 为玻尔兹曼常量.

只考虑主波束,设主波束的立体角为 Ω_m ,馈源接收的总功率为

$$P_i = kT_i \frac{A_r}{f^2} \Omega_m \quad (7)$$

其中, T_i 是实孔径焦平面成像中馈源 i 所测得的天线温度.馈源 i 接收来自 A 区的辐射功率为

$$P_A = P_i - P_c = k \frac{A_r}{f^2} (T_i \Omega_m - T_c \Omega_c) \quad (8)$$

另一方面,由于主瓣波束足够窄,可假设 A 区的亮温为定值 T_A ,若 A 区立体角为 Ω_A ,有

$$P_A = kT_A \frac{A_r}{f^2} \Omega_A \quad (9)$$

比较式 (8)和式 (9),可得

$$T_A = \frac{T_i \Omega_m - T_c \Omega_c}{\Omega_A} = \frac{T_i \Omega_m - T_c \Omega_c}{\Omega_m - \Omega_c} \quad (10)$$

同理可求得 B 区的亮温值.通过干涉测量不但得到了波束重叠部分的亮温 T_c ,而且从非相干测量得到的 T_i 和 T_j 中“减去” T_c ,就可得到 T_A 和 T_B ,不仅多获得了一个像素,且由于这些区域小于主波束的宽度,成像的空间分辨率得到了提高.

2.2 对馈源波束的要求

干涉测量是以相邻馈源主波束存在重叠区域为前提条件的.若不扫描以满足采样定理,则馈源的波束要以半个 3dB 波束宽度以上两两重叠^[6],但此时馈源之间会产生强烈的互耦;若相邻波束重叠过少,则旁瓣的影响会增大,式 (4)中的积分区域将不能近似为主波束重叠区域.本文采用的方案是相邻主波束指向间隔 3dB 波束宽度,即它们的 3dB 波束在边缘重叠.以均匀口径形成的波束为例,两个相邻波束的场强方向图及其乘积如图 3所示.

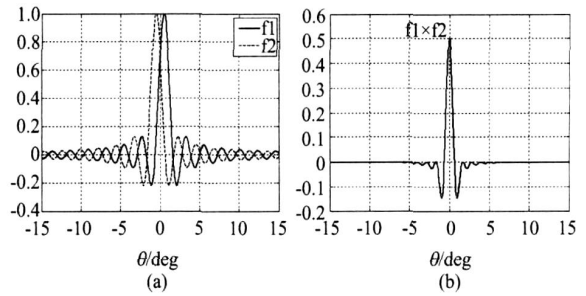


图 3 相邻波束指向间隔 3dB 波束宽度时的方向图 (a),及其乘积 (b)

Fig 3 Patterns of two adjacent beams (a), and their product (b) when their directions are separated in 3dB beamwidth

图 3中 f_1 和 f_2 分别表示两个波束的归一化场强方向图, 3dB 波束宽度为 1° .从图中可以看出,一方面,此时两主波束重叠的部分约为整个主波束宽度的 $1/4$,除去两侧重叠的部分,主波束非相干测量的区域缩小为原来的一半,可以看作分辨率提高了一倍.另一方面,干涉测量对应的中心点在 3dB 波束相连处,结合非相干测量,相当于一个 3dB 波束范围内采样了两个点,满足实孔径成像中的奈奎斯特采样条件.

3 仿真实验

3.1 干涉测量实验

模拟对焦平面上两个相邻馈源的输出进行同相相关接收.以均匀口径形成的笔形波束为波束模型, 3dB 波束宽度为 1° ;两波束指向间隔 1° .保持主波束重叠部分以外的视在亮温为定值,只改变重叠部分的亮温值,对两馈源的输出进行相关接收,观察相关输出与重叠部分亮温的关系,结果如图 4所示.

图 4(a)是分别在 3种亮温条件下重复 10次测量的结果,从图中可以看出,相关输出比较稳定,但

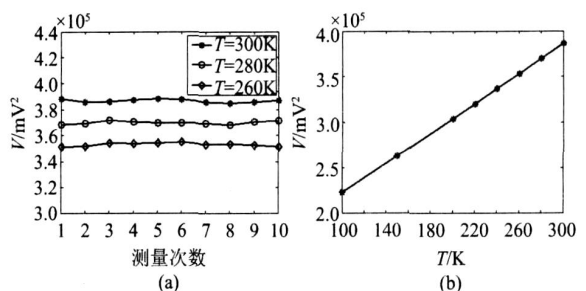


图 4 干涉测量仿真实验结果 (a)相关输出 V 的稳定性 (b)相关输出 V 与重叠部分亮温 T 的关系

Fig 4 Simulation results of interferometric measurement (a) stability of correlation output V (b) relationship between V and brightness temperature T of overlap

也有一定的起伏,这是因为仿真程序生成的随机序列不是完全不相关的,其相关性的偏差导致相关输出有一定波动.图 4 (b)绘出了不同亮温下的相关输出 v ,其中每个 v 是取测量 10次后的平均值.从图中可以看出, v 与两波束重叠部分的亮温近似成线性关系,这验证了上面推导出的两者的关系.若将图中的线段向左延长至 T 为 0处,此时 v 并不为 0,这是因为旁瓣的存在使得主波束重叠部分以外的亮温对相关输出也有贡献.为降低这一影响,实际成像中,在保证波束宽度满足条件的前提下,应使其旁瓣电平尽可能低.

3.2 成像实验

模拟 16个馈源以线阵形式排列在焦平面上,各波束的 3dB 波束宽度为 1° 相邻波束指向间隔 1° ;在垂直于阵列排列方向上以 0.5 为步长进行扫描成像,其结果如图 5所示.

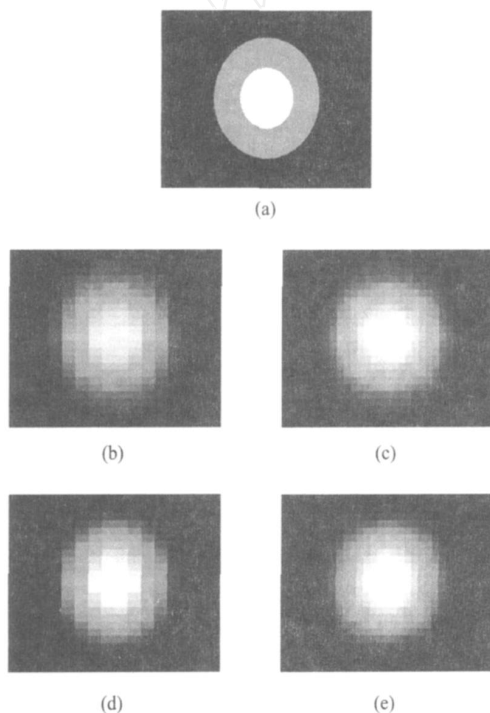


图 5 仿真成像结果 (a)模拟场景亮温图 (b) (c)旁瓣电平为 -17dB 时焦平面成像结果及本文方法的结果 (d) (e)旁瓣电平为 -30dB 时焦平面成像结果及本文方法的结果

Fig 5 Results of simulation imaging (a) simulated scene's brightness temperature image (b) (c) images of focal plane imaging and this paper's method using beams with -17dB side lobe (d) (e) images of focal plane imaging and this paper's method using beams with -30dB side lobe

图 5 (a)中原始模拟场景亮温分布图的视域为 $16^\circ \times 12^\circ$,图中颜色越亮表示亮温越高;图 5 (b)和图 5 (c)是以均匀口径形成的笔形波束为模型时的成像结果,旁瓣电平为 -17dB ;图 5 (d)和图 5 (e)采用的波束模型为旁瓣抑制的笔形波束,旁瓣电平为 -30dB .

根据仿真实验结果,采用常规焦平面成像方法获得的像素数为 16×25 ,而采用融合干涉测量的焦平面成像方法获得的像素数提高到了 31×25 ,成像效果得到了明显的提高.同时,从结果对比中可以看出,波束的旁瓣电平越低,成像效果越好.

4 结论

论文提出了一种融合干涉测量的被动毫米波焦平面成像方法,并通过仿真实验进行了验证.针对被动毫米波焦平面成像中相邻馈源波束存在的重叠区域,对相邻馈源的输出进行相关接收,获得重叠区域的亮温,从而产生新的像素,有效提高了被动毫米波多波束成像的分辨率.在被动毫米波成像领域里,焦平面阵列成像和综合孔径成像是两个主要的发展方向,论文提出了一种新的思路,将两者各自的特点进行了有效结合.当然,要推动该方法走向应用,还需对天线系统结构和通道特性等进行深入的研究.

REFERENCES

- [1] Yujiri L, Agravante H, Fomaca S, *et al* Passive millimeter-wave video camera [C]. *Proc SPIE*, Orlando, US, 1998, **3378**: 14—19.
- [2] Le Vine D M, Swift C T, Haken M. Development of the synthetic aperture microwave radiometer, ESTAR [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2001, **39** (1): 199—202.
- [3] Ribo S, Martin-Neira M, Cabeza I, *et al* M-RAS airborne demonstrator [C]. *IEEE MicroRad Proceedings*, San Juan, Puerto Rico, 2006: 45—49.
- [4] Tanner A B, Gaier T C, Lambriksen B H. GeoSTAR performance demonstration [C]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, Big Sky, MT, US, 2008: 1—6.
- [5] Nanzer J A, Rogers R L. Human presence detection using millimeter-wave radiometry [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2007, **55** (12): 2727—2733.
- [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.