

①

7元线列并扫毫米波焦平面成像系统的研究*

章勇 李兴国 李跃华

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏, 南京, 210094)

TN015
TN919.8

摘要 在介绍毫米波焦平面阵列成像基本原理的基础上, 给出了研制中的7元线阵并扫方式的系统结构、参数确定、电路组成, 并对关键技术进行了深入讨论。

关键词 焦平面阵列, 卡式天线, 线性渐变, 直接检波。

成像系统

引言

毫米波

近十多年来, 随着毫米波单片集成电路 MMIC 技术的快速发展, 毫米波焦平面阵列 (MFPA) 成像技术^[1,2]的实际应用成为可能, 这种新的多波束成像体制既可做到实时成像, 又不需要机械扫描, 正成为被动毫米波成像技术领域最重要的发展方向之一。

本文深入研究了该体制的成像原理和各项实际技术, 结合国内外元器件市场现状, 在国内率先提出了 35GHz 的毫米波焦平面阵列成像系统的实际设计方案, 并完成了大部分分离部件的调试。鉴于目前 MMIC 的价格还很高, 要做到二维凝视焦平面阵列尚有一定的困难, 该系统采用 7 元线列并行扫描的方式。

1 成像原理

毫米波焦平面一维线阵成像与红外焦平面阵列成像相类似, 属于非相干、直接成像体制, 是将多元单片式探测器阵列置于较大口径的抛物反射面, 如本系统采用的卡塞格伦天线, 或者透镜天线的焦面, 利用馈源阵列的偏焦, 把收集到的目标、背景的毫米波辐射能量聚焦于馈源阵列上, 这样可以产生多个不同指向的高增益固定波束覆盖一维视场, 实现在同一时间内比较

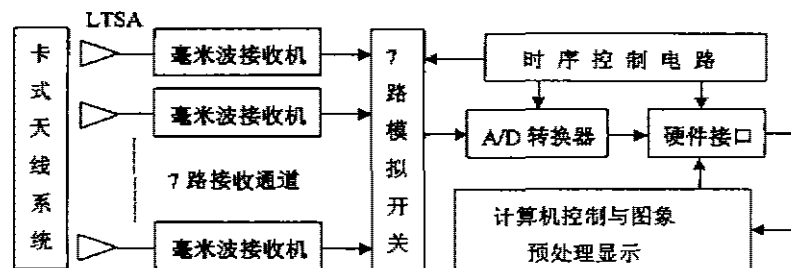


图1 7元并扫毫米波焦平面阵列成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of seven-element parallel scan MFPA imaging system

* 国防预研基金(编号: 1A. 2. 2)资助项目
稿件收到日期 1998-08-14, 修改稿收到日期 1998-12-24

多个波束接收能量的差异,从而极大地提高了辐射计的温度灵敏度和成像的数据速率.接收到的信号经过通道的辐射接收机转换成视频信号,经成像处理输出,能够快速地显示场景的毫米波热辐射图像.图1是本系统的7元并扫毫米波焦平面阵列成像系统的结构框图.

2 卡塞格伦天线的毫米波成像应用

2.1 聚焦天线的选择

可用于毫米波焦平面阵列成像的聚焦天线有各种抛物面天线和准光学透镜.抛物面天线相对透镜重量较轻,容易作一维扫描操作,而且便于馈源探测阵列的排列和系统电路调整;在用于毫米波成像的抛物面天线中有前馈抛物面天线、卡塞格伦天线、偏置抛物面天线三种,其中偏置抛物面较难加工并且调试困难,而卡塞格伦天线相对前馈抛物面天线在多波束成像时有着以下较多优势:

(1) 用短焦距抛物面实现了长焦距抛物面的性能,因此缩短了天线的纵向尺寸,使空间衰减和交叉极化减小.因为在成像应用中,一般要求有较大的焦距和抛物面口面直径比,所以卡式天线的这一特点显得特别重要.

(2) 由于与馈源对着的是双曲面副面,副面的反射把馈源辐射的能量散开了,这样的双镜面系统中返回馈源的能量较单反射面天线要少,从而减少了馈源的失配.

(3) 结构紧凑,馈电和阵元排列方便,减小了高频馈线的长度及附加的损耗和噪声.

(4) 副面的作用使口径场分布更趋均匀,从而缓和了副面漏溢效率与口径渐削效率之间的矛盾,提高了口径效率,并且由于副面张角 θ_{01} 小于主面张角 θ_{02} 而馈漏尺寸与馈电角(即相应的初级波瓣宽度)成反比,因此允许实际馈源具有较大尺寸,这对要求具有复杂馈源阵列的成像系统具有重要意义.

故此,本系统采用了卡氏双反射面天线作聚焦天线(见图2),图2中右边的虚线抛物面为其等效前馈抛物面.

2.2 卡式天线参数的选择

采用后馈形式的卡式结构一般要求天线有较大的直径波长比 D/λ , D 是主反射面的直径, λ 是辐射毫米波波长;更重要的是为得到高分辨率毫米波图像,通常要求直径波长比接近或达到100以上^[2].本系统取 $D/\lambda=100$,即天线主面直径 D 为860mm,这样,工作频率为35GHz时,3dB波束宽为: $\theta_{3dB}=1.2\lambda/D\approx 0.012\approx 0.69^\circ$.

成像的焦平面馈源阵列必然产生横向偏焦,Ruze^[3]给出在1dB增益损失的情况下,最大的扫描3dB波束宽度数为:

$$n_{max} = 0.44 + 22(f/D)^2, \quad (1)$$

式(1)中, f 是卡式天线的等效焦距.这一限制保证了馈源阵列在3dB的波束间隔下,旁瓣电平在大约-10dB以下,对于 $f/D\geq 1$ 的系统,焦平面的阵元的象差不会陡然增大,成像质量

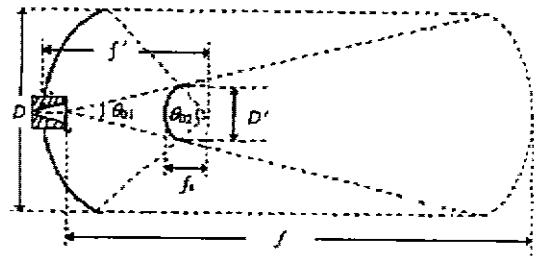


图2 卡式天线的成像光学系统
Fig. 2 Optics of the Cassegrain imaging system

没有大的降低。

另外,交叉极化场分量与 f/D 的平方成反比,而且副镜是用初级馈源来照射的,一般希望副镜处于馈源的远场^[5];从以上因素考虑,天线的 f/D 要选大一些。但 f/D 过大,副镜支撑结构的加长和自重引起支杆变形,会给整个天线电气性能的实现造成困难^[4]。参考下节对本系统采用馈源 LTSA 的讨论,副面边缘对馈源相位中心张角 $\theta_{01} = 30^\circ$,此时副面边缘照射大约为 $-10 \sim -13\text{dB}$,符合成像偏馈时最佳口径效率的照射原则,则由 $D/f = 4\text{tg}(\theta_{01}/4)$,得 $f/D = 1.9$ 。

卡式天线的放大率 M 的典型值在 $4 \sim 11$ 之间。 M 取小时,可使交叉极化分量减小^[4,5],本系统取 $M = 5$,则双曲面副面离心率 $e = (M+1)/(M-1) = 1.5$,得到主面焦距 $f' = f/M = 1.9D/M = 325\text{mm}$, $f'/D = 0.38$,主反射面的张角 $\theta_{02} = 4\text{tg}^{-1}(D/(4f')) = 134^\circ$ 。

副面直径的大小对天线旁瓣、特别是近旁瓣有着重要影响。天线效率最高时的最小遮挡状态下的副面口径遮挡直径由如下近似公式给出^[4]: $D_{\text{min}} \approx \sqrt{(2/k')f'\lambda} \approx 89.3\text{mm}$, k' 是馈源口径直径与其遮挡直径之比,通常取为 0.7 ;另一方面,为了控制绕射损失,副面的直径也不能太小,否则溢失功率太大,使天线的增益下降,噪声增加;因此副面的直径 D' 一般在 $0.11D \sim 0.18D$ 之间^[4,5],本系统的副面直径确定为 $D' = 0.16D = 137.5\text{mm}$ 。

副面双曲线的焦距(虚实焦点间的距离) $C = \frac{D'/2}{\text{tg}(\theta_{01}/2)} + \frac{D'/2}{\text{tg}(\theta_{02}/2)} \approx 286\text{mm}$,依据公式: $C/f, -1 = M$,得副面的焦距(虚焦点到副面顶点的距离) $f_c \approx 47.7\text{mm}$ 。

3 直线渐变缝隙天线 LTSA 馈源阵

直线渐变式缝隙天线 LTSA 属于“表面波”行波天线,由行波馈电的 LTSA 馈源在端射方向,即沿着基片的缝隙方向,有最大辐射值,产生的对称波束在平行于基片的平面为 E 面,在垂直于基片的平面为 H 面。LTSA 的缝隙宽度至少应达到半个波长才能产生有效辐射。

LTSA 由一层介质基片上附贴一层形状不一的金属薄片而构成,如日常的一些电路板即可作为 LTSA 的材料。按金属薄片形状的不同,LTSA 分为指数渐变缝隙天线 Vivaldi、固定宽度缝隙天线 CWSA 和直线渐变缝隙天线 LTSA 三种。如果所用薄片长度、口径大小都一样,则 CWSA 波束宽度最窄,LTSA 次之,Vivaldi 最大;CWSA 旁瓣最高,LTSA 次之,Vivaldi 最小。相对来说,LTSA 加工制造容易,波束宽度和旁瓣特性较适中,容易集成阵列,并且可以把接收机集成电路直接焊接在 LTSA 渐变缝隙的后面狭窄部分,实现天线和接收机电路一体化、小型化。因此 LTSA 非常适合于在焦平面阵列成像系统中作馈源阵列,而且价格便宜,容易实现。在国外,已有成功地应用于 35GHz 、 94GHz 的毫米波焦平面成像系统的报道^[2,6]。图 3 是单个 LTSA 和用于本成像系统的 7 元 LTSA 线列示意图。

3.1 馈源间隔

根据瑞利准则,在毫米波被动成像系统中,卡式天线的焦平面间隔,即瑞利距离,定义为艾里圆斑的峰值和第一零点之间的距离: $\delta_r \approx 1.22\lambda f/D$,瑞利间隔相当于一个 3dB 波束宽度。本系统中,7 片 LTSA 线性排列在卡式天线系统的初级馈源位置,其中一片放在馈源相位中心,另 6 片在同一焦面内等间隔横向置于主反射面轴线的两侧。馈源偏焦时,会引起增益下降,靠近轴线的旁瓣电平增高,依据公式^[3]

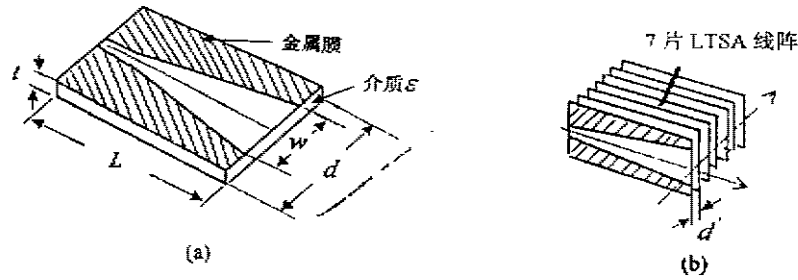


图3 LTSA示意图

(a) 单个LTSA结构 (b) 置于卡式天线馈源位置的LTSA线阵

Fig. 3 Overview of LTSA

(a) outline of single LTSA (b) seven-element FPA of LTSA

$$x = \frac{m(D/f)^2}{1 + 0.02(D/f)^2}, \quad (4)$$

式(4)中 m 为偏馈的半功率波瓣数,把 $m=3, D/f=1/19$ 代入式(4),得 $x \approx 0.83$,则由 Ruze^[3]提供的增益损失随 x 的变化曲线可知,本系统的LTSA偏焦引起的扫描损失可被忽略.图4是偏馈扫描增益损失和旁瓣电平的关系,若增益损失可忽略,则旁瓣电平很低.在毫米波焦平面成像系统中,常以照射目标的次级波束的3dB波束宽为其相邻波束间隔; $\theta = \theta_{3dB} = 0.69^\circ$.若 n 表示卡式天线的主面轴线单侧偏置波束数, BDF 为波束偏移因子,则偏置位移 Δx 为^[7]:

$$\Delta x \approx n\theta_{3dB}f/(BDF) \approx 1.2n\lambda(f/D)/(BDF). \quad (5)$$

BDF 和 f/D 的关系见图5.在小偏置时,对 $f/D > 1$ 的系统, BDF 接近于1,对 $f/D = 1.9$,有最佳的照射锥削 BDF 为0.98.令 $n=3$,得最大馈源偏置距离 $\Delta x_{max} \approx 60.5\text{mm}$,令 $n=1$,得相邻馈源间隔 $d' \approx 20.2\text{mm} \approx 2.35\lambda$.令LTSA的宽度 $d = d'$,则位于馈源相位中心的LTSA阵元的最大理想增益,即方向系数 h 为:

$$h = G_{max} = 4\pi s/\lambda^2 = 4\pi d^2/\lambda^2, \quad (6)$$

式(6)中 $s = d \times d'$ 为阵列中单片LTSA接收辐射的面积;由于存在电阻和介质损耗,所以实际测得的各LTSA阵元增益 G 通常比其偏焦后的最大增益要低0.5dB~1dB.

3.2 直线渐变缝隙天线LTSA的参数

(1) 波束宽度:LTSA的波束宽,即天线系统的初级波束宽,可在大范围内变化,-3dB波束宽可窄到 $15^\circ, 30^\circ$ 的-10dB波束宽也是很容易得到,因此具有高的天线增益.

当缝隙宽度 w 约为1个波长时,端射缝隙单元的辐射效率最高^[6,7].通常LTSA张角 2γ 在 $5^\circ \sim 12^\circ$ 之间,张角增大,E面波束宽略微变窄,而H面波束宽和这一变化无关.

通过改变阵元的孔径大小即阵元间隔可改变波束宽度;另外,当LTSA长度 L 增加,波束将变窄,旁瓣会略有提高,方向系数加大,单个LTSA馈源典型的方向系数和 L/λ 在一定范围内有近似的线性关系,但阵列中馈源的方向系数不可能随 L 的增大而无限增大,因为

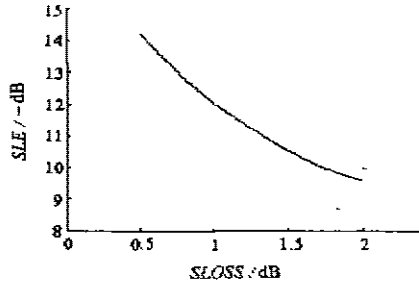


图 4 旁瓣电平 SLE 和扫描损失 $SLOSS$ 的关系

Fig. 4 Sidelobe level versus scan loss

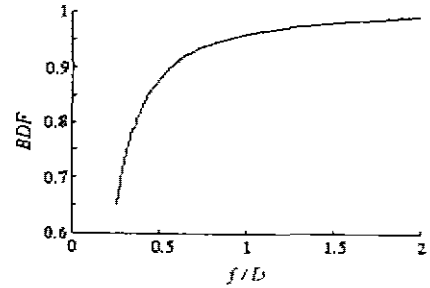


图 5 波束偏移因子和 f/D 的关系

Fig. 5 BDF versus f/D

馈源增益还受阵列中每个阵元所占位置 $s = d \times d'$ 的限制, 通常 L 在 $3\lambda \sim 8\lambda$ 之间。

(2) 口径效率: LTSA 阵元应在 -10dB 电平有 30° 的波束宽以得到最优的系统口径效率; 另外, 为了在照射反射面时得到最大口径效率, 找到 E 面 H 面在 -10dB 电平时相等波束宽度的阵列参数是必要的, 一般认为副面边缘锥削在 $-10\text{dB} \sim -13\text{dB}$ 时达到最佳照射。

(3) 介质厚度: 有效的介质厚度最佳范围一般认为在 $0.005 \sim 0.03$ 之间 (规一化到波长 λ): $t_{\text{eff}} = (\sqrt{\epsilon} - 1)t/\lambda$, t 是实际基片厚度。LTSA 的 E 面波束宽对介质基片厚度的敏感性比 H 面更强, 介质厚度的增大会引起增益提高, 旁瓣升高。

Yngvesson, K. S.^[6,7,8] 对用于成像的 LTSA 馈源阵作了大量研究, 发表了数 10 篇论文, 提供了大量的在不同频率、不同介质、不同介质厚度、不同宽度和不同长度的情况下, LTSA 作为卡塞格伦天线馈源, 其初级波束达到以下要求:

$$\begin{cases} \Delta\theta_{-3\text{dB}} \approx 15 - 20^\circ (\text{在 E、H 面}), \\ \Delta\theta_{-10\text{dB} \sim -13\text{dB}} \approx 30^\circ (\text{在 E、H 面}), \end{cases} \quad (7)$$

的各项参数, 建立了类似于行波天线的 LTSA 简易数学模型, 并指出 LTSA 的长度和介质厚度是影响波束宽度的最重要的因素。参考 K. S. Yngvesson 的结论, 针对本成像系统的要求, 对 LTSA 的参数进行讨论可得出: 工作频率为 35GHz 时, 取 LTSA 的张角 $2\gamma = 11.2^\circ$, 长度 $L = 7\lambda$, 缝隙宽度 $w \approx 2L \tan \gamma \approx 11.8\text{mm}$, 介质 Duroid (介电常数 ϵ 为 2.33) 的厚度为 0.5mm , 即波长规一化的厚度为 0.028, 则通过对 LTSA 的长度和厚度的微调, 可使天线系统的副面边缘达到最佳照射。

4 毫米波辐射计的直接检波接收机

一个 LTSA 探测单元及其后的信号电路组成一个接收机通道, 接收的辐射信号最终即可形成一个图像像素。按接收机电路结构, 目前有超外差和直接检波接收机两种形式。相比超外差接收机, 最新发展起来的直接检波接收机具有系统噪声温度低、不需要本振、直流功耗低和部件简单等优点^[1,9], 便于毫米波焦平面阵列成像系统的小型化、集成化。直接检波接收机主要由一个高增益低噪声放大器和一个检波器电路组成。

本系统的接收机采用两片 ATP2094a 结联以使增益达到 40dB 以上, AP2094a 具有了 3 级放大电路的毫米波低噪声高增益放大器, 其工作带宽可达 34~40GHz, 典型的噪声系数和增益分别为 3.0dB、21dB, 增益平坦度达到 ± 1.5 dB, 尤其是直流功耗和大小分别只有 0.21W 和 $1.72 \times 1.08 \times 0.10$ mm³, 非常有利于多通道毫米波焦平面成像系统的集成化和一体化的设计.

REFERENCES

- 1 ZHANG Yong, LI Xing-Guo, WANG Hua-Li. MMW FPA imaging technique. *Guidance & Fuze* (章勇, 李兴国, 王华力, 毫米波焦平面阵列成像技术, 制导与引信) 1998, (3), 38
- 2 Goldsmith P F, et al. Focal plane imaging systems for millimeter wavelengths. *IEEE Trans. MTT*. 1993, 41(10): 1664~1675
- 3 Ruze J. Lateral feed displacement in a paraboloid. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1965, 13(5): 660~665
- 4 KANG Xing-Jian. *Antenna Principle and Programming*. Beijing: National Defense Industry Publishing House, (康行健. 天线原理与设计, 北京: 国防工业出版社), 1995, 251~261
- 5 YANG Ke-Zong, YANG Zhi-You, ZHANG Ri-Rong. *New Technology for Modern Reflector Antennas*, Beijing: People's Post and Telecommunications Publishing House. (杨可忠, 杨智友, 章日荣. 现代面天线新技术, 北京: 人民邮电出版社), 1993, 25~35
- 6 Yngvesson K S, et al. The tapered slot antenna—a new integrated element for millimeter wave applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1989, 37(2): 365~374
- 7 Yngvesson K S. Imaging front-end systems for millimeter waves and submillimeter waves. *SPIE*, 1985, 598: 104~113
- 8 Yngvesson K S, et al. Endfire tapered slot antennas on dielectric substrates. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1985, 33(12): 1392~1399
- 9 Dow D G, et al. W-band MMIC direct detection receiver for passive imaging system. *IEEE MTT-S Dig.* 1993, 163~166

SEVEN-ELEMENT LINEAR ARRAY PARALLEL SCAN MILLIMETER WAVE FOCAL PLANE ARRAY IMAGING SYSTEM*

ZHANG Yong LI Xing-Guo LI Yue-Hua

(Institute of Millimeter-wave & Light-wave Near-sensing Technology,
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract After introducing the theory of millimeter wave focal plane array imaging, the structure of the system, cognizance of the parameters and circuit components for the developed seven-element parallel scan mode were offered, and a few key techniques were discussed at the same time.

Key words focal plane array, Cassegrain antenna, linearly tapered, direct detection.

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defense
Received 1998-08-14, revised 1998-12-24