

综合孔径微波辐射计光学实时信号处理系统

胡岸勇, 白明, 苗俊刚

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要:分析了综合孔径微波辐射计光学实时信号处理系统的基本原理及关键技术,研制了一套X波段6单元综合孔径红外实时信号处理系统样机,并进行了系统测试及点辐射源的一维实时成像实验,获得了清晰的干涉条纹图像.初步的实验结果验证了综合孔径辐射计光学实时信号处理的可行性及系统设计的正确性.

关键词:综合孔径;微波辐射计;红外;实时信号处理

中图分类号:TP722.6 **文献标识码:**A

Optic real-time signal processing for synthetic aperture microwave radiometer

HU An-Yong, BAI Ming, MIAO Jun-Gang

(Department of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The principle and key technologies of the optic real-time signal process system for synthetic aperture microwave radiometer were analyzed. An infrared real-time signal process system prototype for an X-band synthetic aperture microwave radiometer with six elements was developed. The system tests and one dimensional imaging experiments of point source were carried out. The clear interference fringes pattern were obtained. The primary experiment results validate the feasibility of real-time signal processing for synthetic aperture microwave radiometer and the correctness of the system design.

Key words: synthetic aperture, microwave radiometer, infrared, real-time signal processing

PACS: 07.57.KP

引言

在高分辨率对地微波遥感中,综合孔径辐射计作为一新型微波遥感仪器,避免了传统全功率辐射计大口径天线设计及机械扫描带来的困难,成为国际上的研究热点^[1-3].然而,为了实现高分辨率实时成像,综合孔径辐射计通常需要较多的接收通道及大量的复相关器,如目前在轨运行的综合孔径微波成像辐射计MIRAS包含了69个接收通道,3000多个复相关器^[1].另一方面,为了获得较高的温度灵敏度,需要较大的接收带宽,这要求后端的数据采集及数据处理具有更高的处理速度.这两方面的要求给综合孔径辐射计的数据处理提出了巨大的挑战.针对这一问题,国际上开展了将微波(或毫米波)信号调制到光学频段,利用光学器件进行实时成像的

处理方法^[4-6].借鉴这一思想,本文研究了采用电光调制器将综合孔径微波辐射计接收的微波信号上变频至红外波段,利用光纤阵列、透镜和红外CCD相机等进行实时成像的处理方法.

1 综合孔径辐射计光学实时信号处理系统的原理

综合孔径微波辐射计的成像原理是基于非相干光学中的范西特-泽尼克定理^[7]:在远场条件下,综合孔径辐射计测量的可视度函数与场景亮温是傅里叶变换关系.可视度函数是天线接收信号的复相关值,它表示场景亮温的空间频域信息.综合孔径辐射计通过稀疏分布的小孔径天线之间的干涉测量获得场景亮温的空间频域信息,通过数字信号处理机进行傅里叶变换获得场景亮温图像.通常,综合孔径

收稿日期:2011-04-26,修回日期:2011-12-11

基金项目:国家863项目(2007AA12Z122);国家自然科学基金(61001136)

Foundation items: Supported by National High Technology Research and Development Program (863 Program) (2007AA12Z122); National Natural Science Foundation of China(61001136)

作者简介 (Biography): 胡岸勇(1980-),男,湖南娄底人,博士,主要研究领域为微波遥感及信号处理, E-mail: hay800906@126.com.

Received date: 2011-04-26, **revised date:** 2011-12-11

辐射计为了降低信号的采样率,采用下变频的方式,其系统结构如图 1 所示。

综合孔径辐射计光学实时信号处理系统的基本原理是:采用电光调制器将微波信号上变频至红外或可见光频段,利用透镜的傅里叶变换关系代替数字信号处理机的傅里叶变换运算,利用 CCD 相机的平方率检波代替综合孔径辐射计的复相关运算,其系统结构如图 2 所示。

下面以两个接收通道为例,来进行理想状态(忽略系统中存在的误差)下的成像分析。设天线接收到的窄带微波辐射信号为 $\cos(\omega_{\text{RF}}t + \phi_{\text{RF}})$, 光载波信号为 $\cos(\omega_o t + \phi_o)$, 接收信号经过电光调制器幅度调制后有三个频率分量: $\cos(\omega_{\text{RF}}t + \phi_o)$, $\cos[(\omega_{\text{RF}} + \omega_o)t + \phi_o + \phi_{\text{RF}}]$ 和 $\cos[(\omega_{\text{RF}} - \omega_o)t + \phi_{\text{RF}} - \phi_o]$ 。第一部份为光载频,不包含任何有用信息;第二部份和第三部份为调制后的两个边带,包含了射频信号的相位信息。通过采用单边带调制技术,可以使调制信号中只含有一个边带。以上边带信号 $\cos[(\omega_{\text{RF}} + \omega_o)t + \phi_o + \phi_{\text{RF}}]$ 来进行分析。如图 3 所示,假设无穷远处有一点源位于天线阵列法向的 θ 方向,两个天线接收信号之间的相位差为 $\Delta\phi = \omega_{\text{RF}} D \sin\theta/c$, 假设系统自身无相位差,经过调制后在光

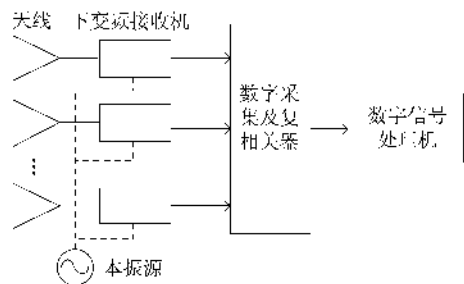


图 1 综合孔径辐射计系统结构框图
Fig. 1 Block diagram of the synthetic aperture radiometer

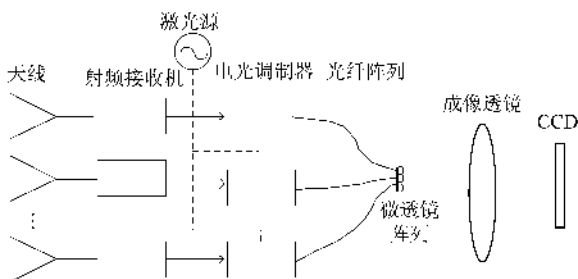


图 2 综合孔径辐射计光学实时信号处理机系统的结构框图
Fig. 2 Block diagram of the optic real-time signal processing system for synthetic aperture radiometer

纤末端,两路上边带的相位差也是 $\Delta\phi$ 。在由该两路光纤组成的光干涉仪中,角度为 α 的出射光束产生的光程差为 $d \sin\alpha$, 在垂直于 α 方向的平面上引入的相位差为 $\Delta\phi' = \omega_o d \sin\alpha/c$ 。从而点源通过系统引起的总的相位差为 $\Delta\phi_{1/2} = \Delta\phi' - \Delta\phi$ 。根据干涉理论,当相位差为 2π 的整数倍时,会出现干涉亮纹,再根据零级条纹集中大部分能量,其中心为目标几何像点,则目标角度和成像角度的关系为

$$\sin\alpha = \frac{D\omega_{\text{RF}}}{d\omega_o} \sin\theta \quad (1)$$

因此,相对于天线阵列不同入射角的信号,经过电光转换和光纤干涉后,转变为相对光纤阵列不同角度的干涉条纹。实际系统在光纤阵列末端加上微透镜阵列进行聚束和准直,再在适当的距离加成像透镜,在成像透镜的焦平面上放置高分辨率红外(或光学)CCD 相机,即可实时获得高分辨率二维图像。

2 关键技术

在综合孔径辐射计光学实时信号处理系统中,存在如下几项关键技术:

2.1 单边带调制技术

为了使光纤输出的信号为单边带信号,需要抑制电光调制器输出信号的载波及对称边带的信号。载波信号将会使成像的图像中出现一个很强的亮点,使真实的场景图像淹没在强点源的成像背景中。在本系统中,载波信号的抑制通过选择具有抑制载波抑制功能的电光调制器,通过调节电光调制器的静态工作点,可以使载波抑制达 20 dB。对称边带的信号将会使成像图像中出现相对视场中心对称的镜像图像。对称边带信号的抑制采用超窄带热稳定光纤滤波器进行抑制,它可使边带抑制达到 15 ~ 20 dB。系统单边带调制的实现如图 4 所示。

2.2 实时相位校正制技术

在干涉测量系统中,相位误差是系统的主要误

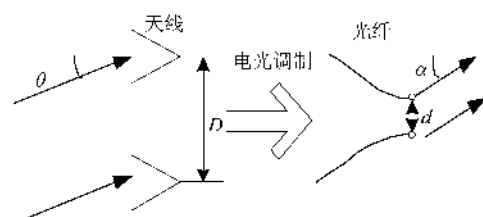


图 3 二单元综合孔径辐射计光学成像原理示意图
Fig. 3 Schematic diagram of optic imaging principle for the two elements synthetic aperture radiometer

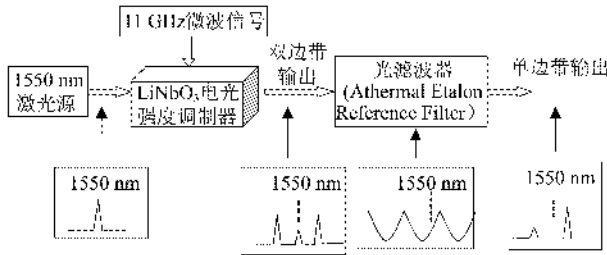


图4 系统单边带调制原理图
Fig. 4 Schematic diagram of single sideband modulation

差来源. 与综合孔径辐射计的电学处理系统相比, 光学处理系统在实时相位校正的需求上更加迫切, 实现难度上更加困难. 在无恒温控制的情况下, 综合孔径辐射计电学处理系统的相位漂移主要由射频前端的温漂引起, 而综合孔径辐射计光学处理系统的相位漂移还包括电光调制器引入的相位漂移, 及由温度变化导致的光纤长度变化引起的相位漂移. 由于光波的波长在微米量级, 很小的温度变化可能导致系统较大的相位变化, 因此综合孔径辐射计光学处理系统的相位校正要比其电学处理系统的相位校正更加频繁. 在电学处理系统中, 综合孔径辐射计通道间的相位差可以通过外加点辐射源或注入相关噪声, 直接从测得的可视度函数的相位上获得, 并在反演成像时, 在可视度函数上进行相位补偿. 在光学处理系统中, 相位的实时校正比较困难, 因为相位信息作为一个中间量无法直接获得. 文献[8,9]分别提出了采用冗余基线及两次成像的相位校正方法, 以及采用分光方法将载波与各通道信号干涉的相位校正方法, 但它们对光学器件的加工、安装精度要求高, 实现难度大. 在本系统中采用的相位校正方法是: 在外加点辐射源的情况下, 接收通道两两相关, 根据 CCD 上干涉条纹偏离中心的方向和位置来反馈控制每路压电陶瓷线圈的电压, 以此来调节光纤的相位, 使干涉条纹位于中心, 从而达到两接收通道相位平衡的目的.

2.3 天线阵列布局技术

综合孔径辐射计光学成像的基本原理与其电学成像原理相同, 因此其天线阵列的布局可以借鉴综合孔径辐射计天线阵列布局的研究成果^[10,11], 但需要注意电学成像处理系统与光学成像处理系统的差别. 在电学成像处理中, 数据处理非常灵活性, 既可以对冗余的可视度函数进行累加或取平均, 还可以对可视度函数进行加权, 以便在温度灵敏度和空间分辨率之间进行折中处理^[12]; 而在光学处理系统

中, 阵列布局形式就完全决定了可视度函数的分布形式及冗余情况, 而且所有冗余的可视度函数在成像过程中都被累加计算.

3 原理样机

根据综合孔径辐射计光学实时信号处理系统的原理及关键技术解决方案, 研制了一套 X 波段的 6 单元综合孔径辐射计光学实时信号处理系统样机, 其系统结构如图 5 所示, 系统实物如图 6 所示.

综合孔径光学实时信号处理机包括激光光源、射频前端、电光调制器、窄带光纤滤波器、光纤阵列、微透镜阵列、成像透镜、红外 CCD 相机、压电陶瓷线圈及控制计算机等. 各主要部件的功能及性能指标如下:

A) 射频前端

射频前端的作用是将微波辐射计天线接收的微弱辐射信号进行功率放大, 使得进入电光调制器的射频功率满足电光调制器的要求. 系统设计中, 射频前工作在 X 波段, 中心频率为 11 GHz, 带宽为 1 GHz, 噪声系数小于 2.5 dB, 通道增益约为 92 dB,

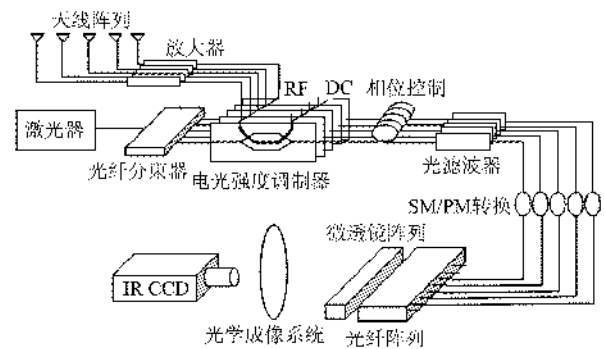


图5 综合孔径微波辐射计光学实时信号处理系统样机结构图
Fig. 5 Block diagram of the optic real-time signal processing prototype for synthetic aperture radiometer

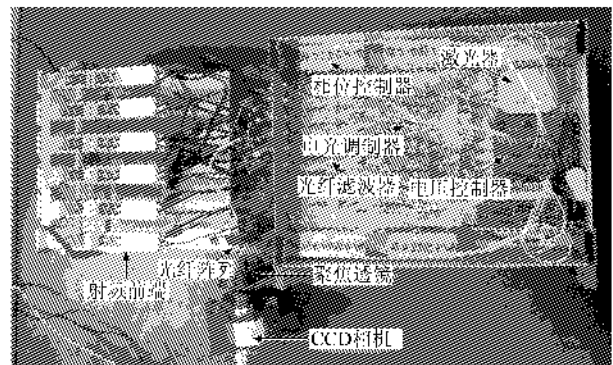


图6 综合孔径微波辐射计光学实时信号处理系统样机照片
Fig. 6 Photo of the optic real-time signal processing prototype for synthetic aperture radiometer

带内增益平坦度小于 0.5 dB.

B) 电光调制器

电光调制器的功能是将辐射计接收到的微波信号上变频到红外波段,并且具有载波抑制功能.考虑到目前市场上可获得的电光调制器的性能和价格,选择基于 LiNbO₃ 电光调制器,其基本指标为:射频频率为 11~15 GHz,输入功率大于 0 dBm;光载波输入功率 5 mW;可通过调整电光调制器的偏置电压,达到抑制载波的功能.

C) 激光源及分束器

激光源及分束器的功能是给系统中的每路电光调制器提供相干光载波.对激光源的要求是具有足够功率及保偏光纤输出,对分束器的要求是尽量等长且保偏.系统设计中,选择激光源的波长为 1550 nm(具有 8 nm 的波长可调范围),线宽小于 1 MHz,输出功率 30 mW.

D) 窄带光纤滤波器

窄带光纤滤波器的功能是滤除电光调制后信号的一个边带,使其有足够的镜像抑制比.系统设计中,选择超窄带热稳定光纤滤波,其技术指标为插入损耗小于 3 dB,通道周期间隔为 50 GHz.

E) 相位控制器

相位控制器的功能是调节接收道的相位延迟.控制器由光纤线圈绕于压电陶瓷管上制成,通过改变置于压电陶瓷管的电压而改变压电陶瓷管的半径,从而改变了光纤的伸缩长度,进而达到改变通道相位的目的.

F) 光纤阵列及微透镜阵列

光纤阵列的功能是将电光调制后的光学信号有规律的排布在一起,从而形成所需要的干涉条纹.对光纤阵列的基本要求是光纤阵列必须与天线阵列布局方式相似.在本系统中,光纤阵列为 8 单元一维均匀排布,光纤间距为 125.8 μm .微透镜的功能是对光纤末端辐射的信号进行聚束和准直,因此微透镜阵列必须与光纤阵列共形.在本系统中,微透镜阵列采用光刻技术在单片石英上加工而成.

G) CCD 相机

由于系统光载波选择在 1550 nm 红外波段,因此系统采用近红外 CCD 相机,具体型号为 Xenics 公司生产的 XS-1.7-320.该相机以短波红外探测器作为技术核心,采用尖端的 InGaAs 半导体为基体,在人眼及常规相机不可见的 0.9~1.7 μm 波段范围内具有极高的响应度,量子效率高达 80% 以上. CCD 相机的基本技术指标为像素大小 320 \times 256,像

元尺寸 30 μm ,帧速 60 帧/s.

4 系统测试及实验

为了对综合孔径辐射计光学实时信号处理系统的关键技术和成像性能进行验证,进行了一系列的系统测试和成像实验.

4.1 单边带调制实验

为了验证单边带调制效果,用信号源代替射频前端,输入功率为 5 dBm,频率为 11 GHz 的点频信号,激光器波长设为 1551.52 nm,将电光调制器和滤波器后的输出信号输入光谱仪进行分析.通过调节电光调制器的工作电压,使载波强度最小,得到如图 7 所示的光频仪测试信号.由测试结果看出,载波抑制可达 20 dB,下边带抑制可达 10~15 dB.实验中发现电光调制器的偏置电压对载波抑制的效果很敏感,而且每路电光调制器的最佳偏置电压都不相同,而且每次实验都有可能不一样,因此实验前需对每路电光调制器进行仔细调节.

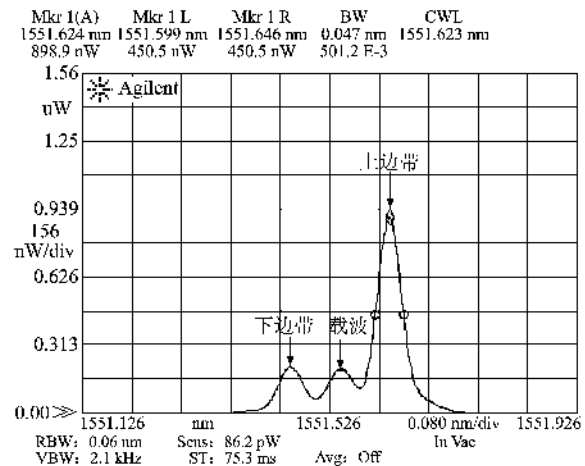


图 7 单边带调制实验结果

Fig. 7 Experimental result of single sideband modulation

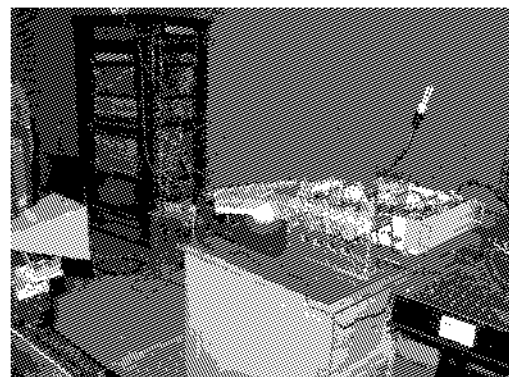


图 8 点源成像实验

Fig. 8 Imaging experiment of the point source

4.2 二通道成像实验

为了对系统的成像功能进行验证,先采用两路接收通道进行了点辐射源的成像实验.点辐射源采用信号源加喇叭天线的方式构成.在实验时,将辐射喇叭分别位于与天线阵列法向成 -15° 、 0° 、 $+15^\circ$ 三个不同位置处,实验场景如图 8 所示.在红外相机上

观察干涉条纹及其移动方向,其成像结果如图 9 所示.

从双通道点辐射源成像实验结果可以看出,系统能够对点辐射源形成清晰的干涉条纹图像,随着点辐射源相对天线阵列角度的变化,干涉条纹的位置也随之变化,并且注意到 0° 点源形成的干涉条纹

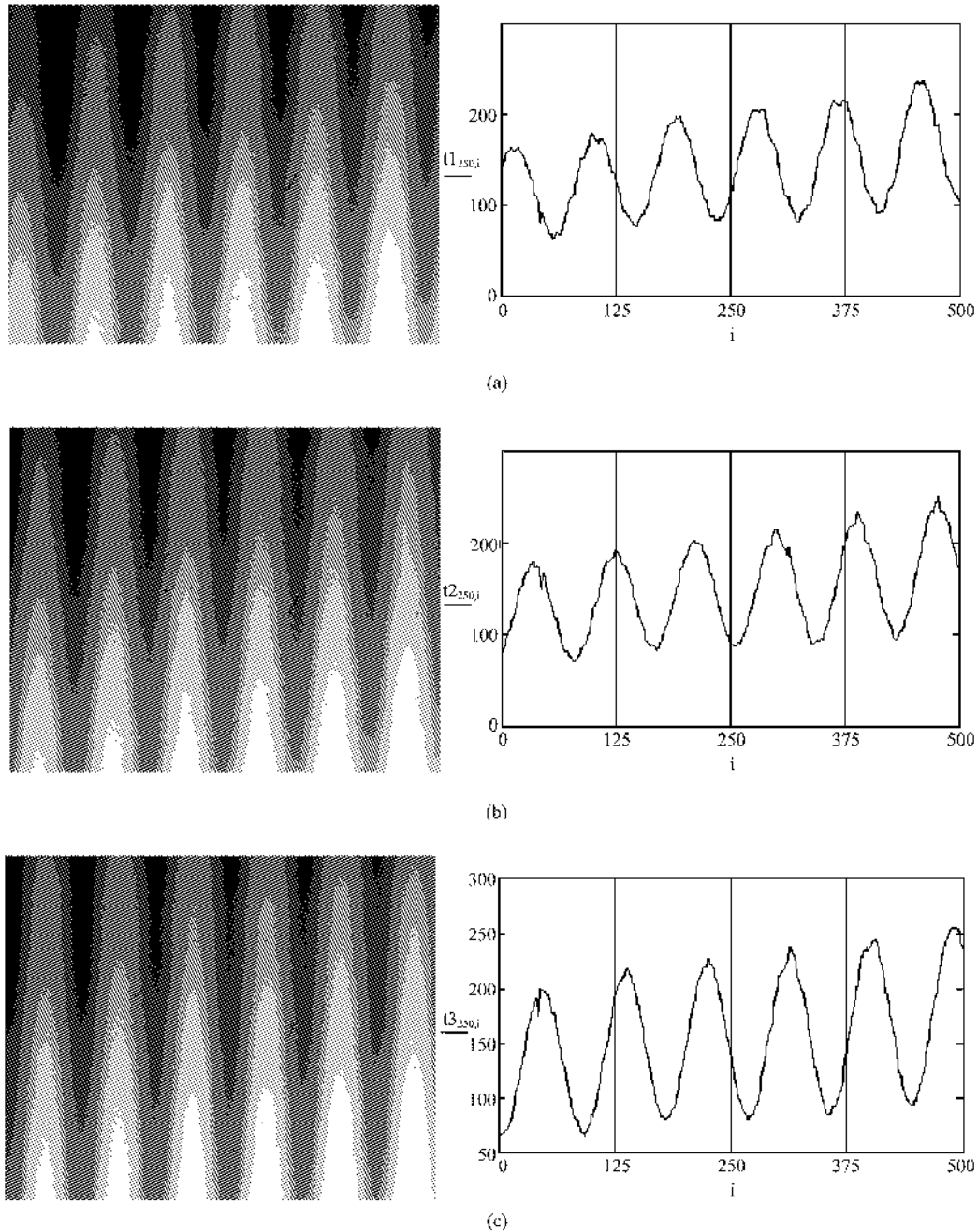


图 9 两单元样机点源成像实验结果,左图为 CCD 上的干涉条纹图像,右图为同一位置处干涉条纹的截线 (a) 点源位于 -15° 时的干涉图样, (b) 点源位于 0° 时的干涉图样, (c) 点源位于 15° 时的干涉图样

Fig. 9 Imaging result of the point source for the two elements synthetic aperture radiometer optic real-time signal processor prototype. The left pictures are interference fringes on the CCD, the right ones are the serif in the same position. From top to bottom panels, the images are taken when point source is at (a) -15° degrees, (b) 0° degree, and (c) 15° degree of the azimuth angle

正好位于 $\pm 15^\circ$ 点源形成的干涉条纹的中间位置,这说明系统的成像位置关系是正确的. 这一实验验证了系统的成像能力及系统设计的正确性.

4.3 多通道一维成像实验

为了验证系统的相位校正方法及多通道成像能力,进行了 6 单元一维阵列点辐射源的成像实验. 首先,将点辐射源放置在天线阵列法向 0° 的位置,与天线阵列相距 3 m,以满足天线阵列的远场条件. 以

阵列中心的第 3 个接收通道为基准,逐步调节 1,2,4,5,6 通道的相位,使它们与第 3 通道形成的干涉条纹的最大值位于某一固定位置. 在观察某一接收通道与第 3 接收通道形成的干涉条纹时,为避免其余接收通道的影响,其余通道接收天线口面用锡箔纸遮盖. 相位调整完成后,分别对点辐射源在 -15° 、 0° 、 $+15^\circ$ 三个不同位置进行了成像实验,实验结果如图 10 所示.

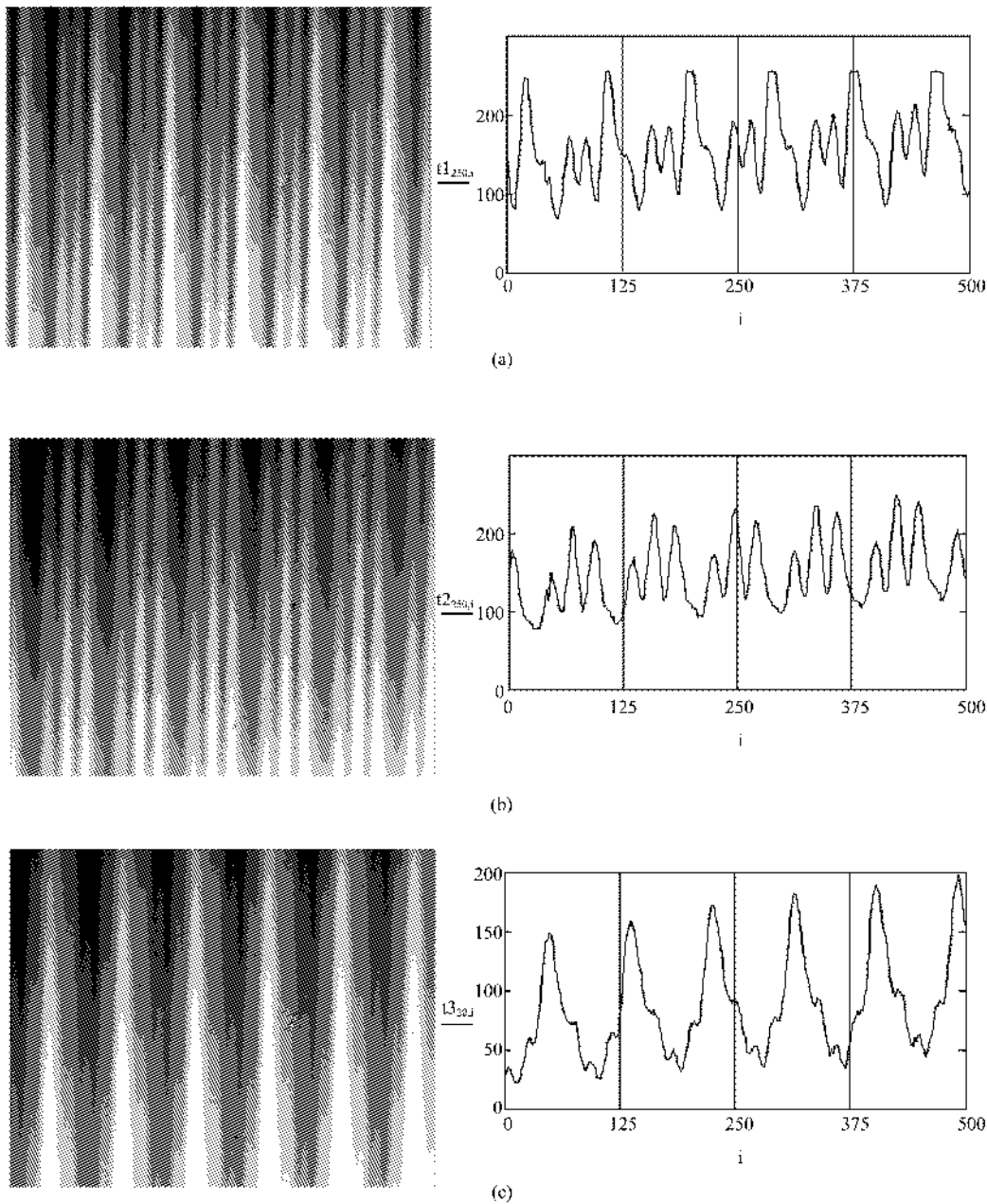


图 10 六单元样机点源成像实验结果,左图为 CCD 上的干涉条纹图像,右图为同一位置处干涉条纹的截线 (a)点源位于 -15° 时的干涉图样, (b)点源位于 0° 时的干涉图样, (c)点源位于 15° 时的干涉图样

Fig. 10 Imaging result of the point source for the six elements synthetic aperture radiometer optic real-time signal processor prototype. The left pictures are interference fringes on the CCD, the right ones are the serif in the same position. From top to bottom panels, the images are taken when point source is at (a) -15° degrees, (b) 0° degree, and (c) 15° degree of the azimuth angle

对比6单元的成像结果与2单元的成像结果可以发现:6单元成像的干涉条纹明显变细,这说明了系统的空间成像分辨率提高了.但另一方面,干涉条纹的形状不规则,而且相互之间也有比较大的差异.这是由于通道的增加,相位校正算法所需要的时间增长,即使经过接收通道的两两校正,等到实际成像测量时接收通道的相位又发生了变化,因此最终测得的条纹的形状不稳定.但从干涉条纹整体的变化看,它依然具有从左向右移动的趋势.

5 结论

综合孔径微波辐射计的高分辨率实时成像对系统的信号处理部分提了非常高的要求.针对这一问题,介绍了基于光学上变频的综合孔径辐射计光学实时信号处理的基本原理,分析了系统设计中的关键技术,研制了一套X波段6单元综合孔径辐射计红外实时信号处理系统样机,并进行了测试及成像实验.初步实验结果验证了综合孔径辐射计光学实时信号处理的可行性及系统设计的正确性.然而受器件水平和实验条件的限制,成像效果还远不能达到实际应用的要求,还需要从增加系统通道数目,提高器件的稳定性及性能指标和研究新的实时相位校正方法,以达到多通道同时相位校正两方面来改善系统的性能.

REFERENCES

- [1] Barré H M J, Duesmann B, Kerr Y H. SMOS: The mission and the system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(3): 587 - 593.
- [2] Lambriksen B, Tanner A, Gaier T, et al. Developing a GeoSTAR science mission[C]. *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007*, Barcelona, Spain, 2007: 5232 - 5236.
- [3] Ruf CS, Swift CT, Tanner AB, et al. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for remote sensing of the Earth[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(5): 597 - 611.
- [4] Schuetz C A, Mirotznik M S, Shia S, et al. Applications of optical upconversion to sparse aperture millimeter-wave imaging[C]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5989: 59891C.
- [5] Dillon T E, Schuetz C A, Martin R D, et al. Passive millimeter wave imaging using a distributed aperture and optical upconversion [C]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7837: 78370II.
- [6] Schuetz CA, Murakowski J, Schneider G J, et al. Radiometric millimeter-wave detection via optical upconversion and carrier suppression [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(5): 1732 - 1738.
- [7] Thompson AR, Moran J M, Swenson G W. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy* [M]. New York: John Wiley & SONS, INC, 2001.
- [8] Blanchard P M, Greenaway A H, Anderton R N, et al. Phase calibration of arrays at optical and millimeter wavelengths[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, 13(7): 1593 - 1600.
- [9] Schuetz CA, Mirotznik MS, Shi S, et al. Optical techniques for sparse-aperture, millimeter-wave imaging[C]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6211: 6211G.
- [10] HE Bao-Yu, WU Ji. Optimization on circular thinned array for two dimensional synthetic aperture microwave radiometer [J]. *Acta Electronica Sinica* (何宝余, 吴季. 二维综合孔径微波辐射计圆环结构天线阵及其稀疏方法. *电子学报*), 2005, 33(9): 1607 - 1610.
- [11] CHAO Kun, ZHAO Zhen-Wei, WU Zhen-Sen, et al. Optimization of synthetic aperture radiometer circle array based on differential evolution algorithm[J]. *Chinese Journal of radio science* (晁坤, 赵振维, 吴振森, 等. 基于微分进化算法的综合孔径辐射计圆阵优化. *电波科学学报*), 2009, 24(6): 997 - 1001.
- [12] Camps A. Application of interferometric radiometer to earth observation[D]. Barcelona, Department of Signal Theory and Communication, Polytechnic University of Catalonia, 1996.