

光纤干涉成像阵列全息相位校正研究

何云涛 江月松 何 烨

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要 针对光纤传输和干涉成像阵列中的相位误差,提出了一种基于特殊光子晶体的全息相位校正方法。首先分析了光纤干涉阵列成像的基本原理和相位信息的传输过程,以一维线性阵列建立成像系统相位误差模型,通过对参考光束和探测器前的快门交替打开和闭合,来分别实现在晶体上写入由光纤阵列的出射光束与参考光束干涉形成的含有相位误差的光栅函数,和光纤中出射光束被该光栅衍射和相位偏移以消除相位误差,从理论上分析了上述基于光子晶体的全息法相位校正原理。最后采用所建立的含有相位误差的干涉阵列进行成像仿真,对未加校正、采用本文方法和采用冗余基线校正的结果进行了对比分析。

关键词 干涉成像;相位校正;全息;光纤阵列

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200828s2.0038

Holographic Phase Calibration for Fiber Interferometric Imaging Array

He Yuntao Jiang Yuesong He Ye

(School of Electronic Information Engineering,
Beijing University of Aeronautic and Astronautic, Beijing 100191, China)

Abstract A new approach based on holographic technique was proposed with photorefractive crystal for phase error calibration in fiber interferometric imaging arrays. The principle of fiber interferometric imaging arrays and the transmission of phase information were discussed first. The model of phase error was set up for a one dimension linear array system. The particular process of holographic phase calibration with photorefractive crystal was as follows: the shutter before the reference beam and the shutter before the CCD camera were kept on and off by turns, which respectively made for the diffractive grating writing formed by interfering of fiber beam and reference beam, and for the diffraction and phase shift of the fiber beam. Finally the imaging simulation using un-calibrated, the purposed approach and the redundant baseline spacing calibration corresponded was compared based on the 1D fiber interferometric array with phase errors.

Key words interferometric imaging; phase calibration; holographic; fiber array

1 引 言

被动综合孔径成像技术一直是国际上的研究热点之一,目前其研究的工作波段覆盖了从微波到太赫兹波的全部波段。通过机载和星载平台,该技术被广泛应用于遥感与成像,环境、大气和海洋监测等,发挥巨大的经济和社会效益。在军事上更是受到广泛和深入的研究和应用,特别是美国和欧空局(ESA)都投入巨资用于研究和建立对地观测和侦察的被动综合孔径成像系统。目前国际上研究的被动

综合孔径成像系统包括 ESTAR, 2D-STAR, MIRAS 以及中国科学院空间中心研究的 C 波段和 X 波段的综合孔径辐射计^[1~3]。由于传统的下变频被动综合孔径成像系统受到硬件限制,自 2002 年以来,国际上部分知名学者将目光转向光学信息处理技术:利用光学信息处理技术来处理天线所接受的辐射信号,通过光学相关计算,可以实现对综合孔径系统的实时成像^[4~7]。本文中光纤干涉成像是指先将微波、毫米波或者太赫兹波的接收天线阵列按照

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z100)和武器装备探索研究项目(7130730)资助课题。

作者简介: 何云涛(1982—),男,博士研究生,主要从事被动综合孔径成像方面的研究。E-mail: taoyunhe@ee.buaa.edu.cn

导师简介: 江月松(1958—),男,博士,教授,主要从事红外光电技术、电磁波成像遥感技术、激光空间信息技术、微波光子学、光子学信息技术、光纤传输系统与电信息传输处理方面的研究。E-mail: yuesongjiang@buaa.edu.cn

载体进行优化,然后将接收机接收的信号经过电光调制技术加载到光波上,通过光纤传输,并在阵列末端形成光纤阵列,运用微光学系统设计光学系统使之形成综合孔径成像系统。

在光纤干涉阵列成像系统中,由于环境、大气传输、热漂移和载体平台振动等因素会引起光纤干涉阵列中各通道的相位误差,从而引起图像质量变差,因此必须加以校正,否则将无法实现实时成像。目前已经出现的相位误差校正方法主要包括闭合相位技术,冗余基线校正技术(RSC)和载波干涉校正技术^[8~11]。闭合相位是一种光学自适应校正算法,它可以用来解决在大型的没有任何两条基线相等的无冗余阵列中来校正相位误差。这种技术最初源自于射电天文学中的自校正技术,基本原理是对于一个有三个孔径组成的单元,其对应的三个相位差之和为零,并被称为闭合相位关系。对各个相位差而言,任何的非零组合结果都是测量误差的线性组合。其性能依赖模型的精度,但由模型得到的相关信息是反比于阵列孔径的数目,因此依赖模型的校正技术实际上促进了更大阵列的性能。一个线性的倒置即可得到相位校正值,从测量值中减去这个值就可以为光纤展开控制电路得到一个相位误差阵列,这种技术在大型的无冗余的有精确信号模型的阵列系统中有很好的应用。RSC最初是应用在射电天文学中,作为一种实时相位校准和控制算法,在校准的过程中不需要建立源模型,也不需要额外的硬件结构和重复性计算,同时对仪器、天线误差及介质引入导致的传输误差并不加区分。如果两条基线是相同的向量那么这两条基线测量相同空间频率,两条基线的测量结果不同是由于仪器或者大气误差所引起。冗余基线校正除了要求非相干源和远场条件,不需要对观测目标进行假设或建立模型就可以对相位误差进行校正。对于 N 元阵列,需要至少 $N-3$ 个冗余基线才能使用 RSC 来进行相位校正控制。载波干涉校正技术是将各个通道的电光调制后的光信号通过光纤滤波器,得到光载波信号,这些光纤通道最终形成光纤阵列,该阵列通过与另一位于阵列中心的光纤经发散的光束进行相干成像,得到干涉条纹。经过提取图像信息和分析计算得到各通道的相位误差信息,最终通过补偿装置实现相位的补偿。

在上述的三种校正技术中,都要求一个反馈控制系统,进行相位误差的测量计算,并需要压电陶瓷(PZT)进行光纤阵列的相位延迟,这本身也存在误差的问题,且系统比较复杂。本文将采用一种新的

方法来实现对光纤干涉成像阵列的相位误差测量与控制,即通过一束参考光束和一种特殊光子晶体,对入射的光纤阵列中的相位误差进行全息校正。本文首先介绍了光纤干涉阵列成像基本原理,然后以一维阵列建立了相位误差模型,并从理论上分析了全息校正技术原理,最后通过计算机仿真实验和对传统的 RSC 校正技术对比,验证全息校正技术。

2 光纤阵列干涉成像原理

天线接收辐射信号通过与本振系统进行混频后变为中频信号,然后经过放大器放大信号,再进入电光调制器对光束进行调制;各通道的光载波由同一激光器提供,因此各通道中被调制的光信号是相干的;在光纤末端,透镜阵列对光波信号进行准直和扩束,在透镜阵列后运用光学系统进行光信息处理,得到输出的光信号的复振幅总和,再由透镜焦平面上的面阵 CCD 直接探测其光强度,进行光电转换,得到被探测的目标图像^[12]。

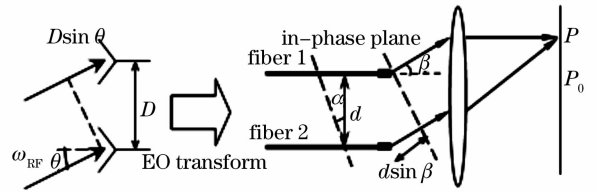


图 1 电光调制过程中的相位传输

Fig. 1 Phase transmission in EO modulation

如图 1 所示,两根天线距离为 D ,点源入射波面与天线阵列平面夹角为 θ ,则天线接收的时间差为 $\Delta t = D \sin \theta / c$,从而相应地在两个通道信号中引入相位差

$$\Delta\phi = \omega_{RF} \Delta t = \omega_{RF} \frac{D \sin \theta}{c} \quad (1)$$

也即 $\Delta\phi$ 最终也被分别保持到被调制后的两路光波中。

根据前述分析,接收机中的相位信息通过电光调制后,转换到被调制的光束中。在光纤的末端,相位差也为 $\Delta\phi$,在由该两路光纤组成的光综合孔径干涉成像系统中,位置为 β 的出射光束产生的光程差为 $d \sin \beta$,在垂直于 β 方向的平面上引入的相位差为

$$\Delta\phi' = \frac{d \omega_{LSB} \sin \beta}{c} \quad (2)$$

从而在垂直于 β 方向的平面上的光束总的相位差为

$$\Delta\phi_{1-2} = \Delta\phi' - \Delta\phi \quad (3)$$

根据光的相干理论,当相位差为 2π 的整数倍时,会出现干涉亮纹,即 $\Delta\phi_{1-2} = 2k\pi$ (k 为任意整数,

表示条纹的级数),则由(2)式变换得到

$$\sin \beta = k \frac{2\pi c}{d\omega_{\text{LSB}}} + \sin \theta \frac{D\omega_{\text{RF}}}{d\omega_{\text{LSB}}}. \quad (4)$$

由于零级条纹(即 $k=0$)集中了绝大部分光能,其中心为目标的几何像点,其原理类似于夫琅禾费衍射中的斜入射情况。因此得到关系式

$$\sin \beta = \frac{D\omega_{\text{RF}}}{d\omega_{\text{LSB}}} \sin \theta. \quad (5)$$

通过选择调制光束的频率 ω_{opt} 和 d 的大小,可实现 $\omega_{\text{LSB}}d = \omega_{\text{RF}}D$ 。由于 $\Delta\phi' = \Delta\phi$,最终实现 $\beta = \theta$,补偿了在天线接收端引入的相位差,则 β 方向的平行光在波阵面上无光程差。通过透镜在其后焦平面 P 处形成零级衍射斑,也即目标的位置和其在图像中的位置在任何地方都是等比例的。当 $\omega_{\text{LSB}}d = \omega_{\text{RF}}D$ 不满足时,在不同的入射方向上的缩放比例不同,需在接收后进行相应的校正处理才可得到和目标完全相对应的图像。不同位置的目标所发射的毫米波波前相对于天线阵的角度 θ 不同,转变为光信号后,光纤末端主光线相对于主轴的角度 β 也随之不同($\beta = \theta$),即衍射斑在焦平面上的位置不同,可达到分辨目标的目的。

3 全息相位误差校正

3.1 干涉成像阵列相位误差模型

为了与 RSC 校正后的光纤干涉阵列成像进行对比,并结合 RSC 技术的要求,阵列结构设计如图 2 所示。



图 2 一维阵列结构

Fig. 2 Configuration of one-dimensional (1D) array

图 2 中的数字对应的圆圈分别代表了各个光纤的位置,其对应的坐标如表 1 所示。

表 1 光纤阵列坐标位置

Table 1 Position of each fiber

Number	1	2	3	4	5
Position / μm	0	250	500	1000	1750

在光纤干涉阵列成像系统中,相位的误差主要来自以下几个因素:1) 目标辐射信号经大气传输产生波前畸变;2) 接收天线阵列的坐标位置的抖动导致的相位误差;3) 阵列信号在通道传输中产生的误差;4) 光纤阵列载体平台的震动产生的光纤相移误差;5) 光纤阵列受到温度变化产生的热漂移;6) 光

纤阵列中各光纤长度不等产生的相位误差。以上各项误差的累积,最后在光纤末端准直后输出将产生一个远远大于 2π 的相位误差。为了实现相干光处理,只需要使得准直输出的波前与天线阵列接收的波前相同即可,也即只需补偿相位误差除以 2π 后的小数部分,而不用考虑整数部分,使得相位误差为波长的整数倍即可。因此,含有相位误差的光纤准直输出波前表达式

$$E_i = E_i \exp\{j[\omega t + \varphi_i(t) + \phi_i]\}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (6)$$

式中 E_i 为第 i 根光纤输出的振幅, $\varphi_i(t)$ 为随着时间变化的相位调制项, ϕ_i 为初始相位,也即相位误差项。

3.2 全息相位误差校正理论

图 3 所示为全息相位校正的光纤干涉阵列成像系统图,图中全息参考光束与来自阵列的光束在光子折射晶体中相干,这两束光干涉后的结果在晶体上写入了一系列对应的光栅,且其强度 η 随时间以 $1/\tau$ 的指数衰减。具体过程是:1) 参考光束快门打开,探测器快门闭合,光纤阵列的出射光束与参考光束在晶体上干涉并在晶体上写入对应的光栅函数;2) 参考光束快门闭合,探测器快门打开,光纤中的出射光束通过 1) 过程中形成的光栅函数进行了衍射和相位移动,在之前参考光束方向形成了光纤阵列的一幅图像;3) 上述过程不断地重复就可以实现实时的相位校正与成像的目的。

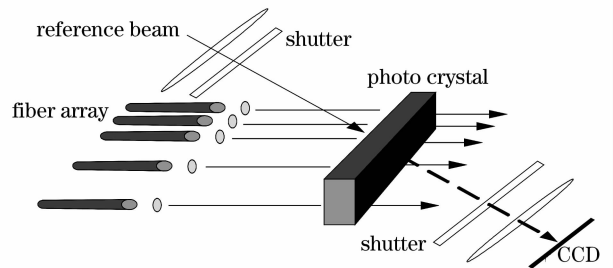


图 3 全息校正系统示意图

Fig. 3 Drawing of holographic calibration system

具体数学过程如下:

光纤阵列光束:

$$E(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=1}^5 g(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) E_i \times \exp\{j[\omega t + \varphi_i(t) + \phi_i]\} \exp(j\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}). \quad (7)$$

参考光束:

$$R(\mathbf{r}, t) = R_0 \exp[j(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r})], \quad (8)$$

式中 \mathbf{r}_i 为第 i 根光纤位置, E_i 为对应振幅, ϕ_i 为对应初始相位, $\varphi_i(t)$ 为随着时间变化的相位调制项; $g(\mathbf{r} -$

r_i) 为光纤的出射光束轮廓,这里统一为高斯包络。

在 \mathbf{r} (晶体位置) 的干涉可以表示为

$$E_{\text{interf}}(\mathbf{r}, t) = E(\mathbf{r}, t) + R(\mathbf{r}, t), \quad (9)$$

此时前述的光子折射晶体会对该干涉结果响应,即在晶体上形成对应的干涉光栅,具体表达式为

$$h(\mathbf{r}, t) = \eta R_0 \int_{-\infty}^t \sum_{i=1}^5 g(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \times E_i \cos[\varphi_i(t) + \phi_i - \mathbf{k}_g \mathbf{r}] e^{-(t-t')/\tau} dt', \quad (10)$$

这里的光栅是由于光载波干涉所形成,并被相位误差项 ϕ_i 移相了,其中 $\mathbf{k}_g = \mathbf{k}_r - \mathbf{k}_0$ 。如果阵列信号被频率为 f_m 的信号调制,这些调制边带产生变化的光栅,即当时间 $\tau \geq 1/f_m$ 时光栅就消失了。光纤中出射的这些光束衍射后得到了这些光栅。这些衍射的波束沿着 \mathbf{k}_r 传输,并产生一个由光栅引起的相移,这个相移正好补偿了阵列中的相位误差

$$h(\mathbf{r}, t) \propto \tau \eta_H R_0 \sum_{i=1}^5 g^2(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) E_i^2 \times \exp\{j[\omega t + \varphi_i(t) - \mathbf{k}_r \mathbf{r}]\}. \quad (11)$$

因此衍射后的光是相位相干的——每个单元具有同样的相对相位——而且可以从参考光束中分别分离出来,通过时分多路技术或者各种其他的角度,或者是偏振多路技术实现。

3.3 仿真计算实验与分析

为了说明本全息相位校正技术的有效与可行,针对 3.1 节所述的阵列进行计算机仿真与分析。仿真中,光纤的直径为 $125 \mu\text{m}$,其坐标如表 1 中所示。天线阵列接收来自无穷远的点源,电光调制中光纤中的光波波长为 $1.55 \mu\text{m}$,聚焦透镜的焦距为 3 mm 。在各种情况下计算得到的点扩散成像图如 4 所示。

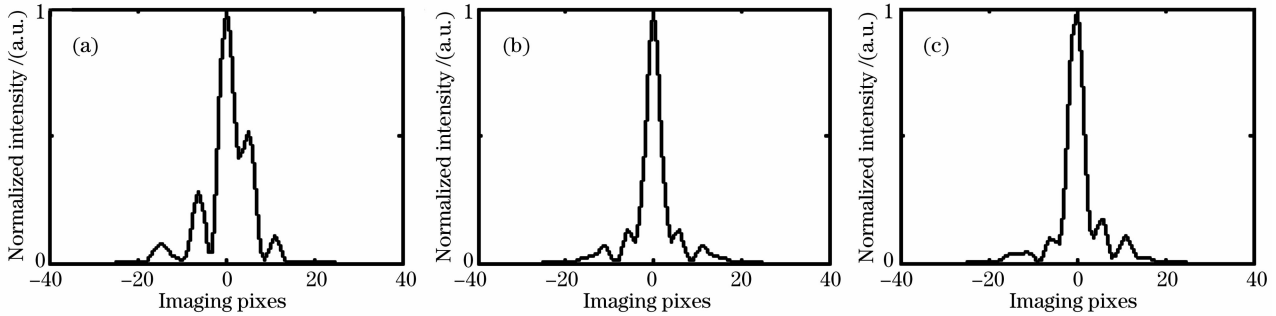


图 4 光纤阵列干涉成像图。(a) 含相位误差成像图;(b) 全息校正成像图;(c) RSC 校正成像图

Fig. 4 Imaging figure of fiber array interferometry. (a) without phase error calibration; (b) with holographic calibration; (c) with RSC calibration

先对光纤干涉阵列进行含有误差,而无校正的系统进行仿真成像,结果如图 4(a) 中所示。仿真中各个通道加入的误差为 $0 \sim \pi/2$ 的一个随机相位误差。从图中可以发现,主瓣周围出现了很大的旁瓣,而且整个成像的分辨率急剧的恶化,这是由于相位误差给光纤干涉阵列成像造成了很大的影响。图 4 (b) 为经过全息相位误差校正所得的成像图。对比图 4(a) 可以发现成像质量有了明显的改善。图 4 (c) 为经过 RSC 校正后得到成像图,相比图 4(a) 也有极大的改善,但相比图 4(b) 在像素位置为 $0 \sim 20$ 的范围内,旁瓣的水平明显高一些,这是由于在 RSC 的技术中图像的加减精度和快速傅里叶变换计算存在误差,从而产生相应的反馈补偿中的误差,这些小的误差也会对成像质量造成影响。

4 结 论

分析了光纤干涉阵列成像系统的基本原理,并

以 RSC 校正技术为基础建立了 5 根天线组成的一维阵列,讨论在光纤干涉阵列成像过程中导致相位误差的因素,并建立相应的模型。针对 5 根天线组成的相位误差模型,深入分析了全息相位校正的理论基础,得到全息校正成像的结果表达式。最后对该 5 天线阵列,通过计算机仿真计算出在含相位误差成像图,全息校正成像图以及经 RSC 校正的成像图,验证全息相位校正技术可以很好的解决光纤干涉阵列成像中的相位误差问题。通过对参考光束的频率和快门的控制,此技术还可以用于综合孔径宽带成像系统中。

参 考 文 献

- 1 D. L. Vine, M. Haken, C. T. Swift. Development of the synthetic aperture radiometer ESTAR and the next generation [C]. IEEE Proc. IGARSS, 2004, **2**:1260~1263
- 2 M. Peichl, H. Suess, M. Suess. Microwave imaging of the brightness temperature distribution of extended areas in the near and far field using two-dimensional aperture synthesis with high spatial resolution [J]. Radio Science, 1998, **33**(3):781~801

- 3 Huang Yonghui, Wu Ji. Study on image theory of high resolution two-dimensional synthetic aperture microwave radiometer [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, **30**(5):688~701
黄永辉, 吴 季. 二维综合孔径微波辐射计成像理论与方法研究 [J]. *电子学报*, 2002, **30**(5):688~701
- 4 C. A. Schuetza, M. S. Mirotznikb, S. Shia *et al.*. Applications of optical upconversion to sparse aperture millimeter-wave imaging [C]. *SPIE*, 2005, **5989**:59891C1
- 5 P. M. Blanchard, A. H. Greenaway, R. N. Anderton *et al.*. Phase calibration of arrays at optical and millimeter wavelengths [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(7):1593~1600
- 6 Youzhi Li, Benjamin Braker, Friso Schlottau *et al.*. Broadband RF imaging and spectrum analysis using spatial-spectral hole-burning in an inhomogeneously broadened absorber [C]. *SPIE*, 2005, **5971**:597122
- 7 He Yuntao, Jiang Yuesong, Wang Changwei. The 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
- 8 A. Camps. Application of Interferometric Radiometry to Earth Observation [D]. Spain, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 1996. 115~134
- 9 E. Tatulli, A. Chelli. Fiber optic interferometry: statistics of visibility and closure phase [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(8):1589~1599
- 10 A. Lannes, É. Anterrieu. Redundant spacing calibration: phase restoration methods [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(12):2866~2879
- 11 C. A. Schuetza, R. D. Martin, I. Biswas *et al.*. Sparse aperture millimeter-wave imaging using optical detection and correlation techniques [C]. *SPIE*, 2007, **6548**:65480B1
- 12 P. M. Blanchard, A. H. Greenaway, A. R. Harvey *et al.*. Coherent optical beam forming with passive millimeter-wave arrays [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(3):418~425