

文章编号 1004-924X(2018)03-0689-09

视场外回波引起条纹场扫描成像 重构混叠现象研究

董磊^{1,2*}, 卢振武¹, 刘欣悦¹, 李扬²

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了消除成像视场外回波对条纹场扫描成像(又称为傅立叶望远镜或者相干场成像)的可能影响,本文从理论上分析回波引起重构混叠的主要原因,并针对不同的应用场合提出对应的最佳解决方案。本文通过计算机仿真手段详细研究不同照明区域回波对成像的影响,仔细分析增加短基线方案对重构模糊的改善效果。仿真结果表明:三光束(同时发射的最多光束)重叠区域的回波对重构结果有最严重影响;增加短基线可以消除图像混叠,单臂增加一个短基线则能使图像质量明显改善,对应的斯托里尔比(Strehl ratio)从 0.49 上升到 0.59;且单臂增加基线数越多,则重构图像细节就越丰富。本文所提出的消除成像视场外回波影响的几种方案对于条纹场扫描成像系统在不同领域的应用均具有重要的借鉴价值。

关键词:条纹场扫描成像;傅立叶望远镜;视场外回波;成像视场;重构混叠

中图分类号:TH743 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182603.0689

Research of the effect of echo outside field of view on fringes scanning imaging

DONG Lei^{1,2*}, LU Zhen-wu¹, LIU Xin-yue¹, LI Yang²

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: nodepression@126.com*

Abstract: In order to eliminate the effect of echo outside the field of view (FOV) on fringes scanning imaging (also known as Fourier telescope or coherent field imaging), this paper analysed in theory the main factors of reconstruction overlap caused by echo, and provided the best solutions to different application scenes. This paper studied in detail the effect of echo from different illumination zones on imaging by means of computer simulation and also analysed in detail the improving effects of the scheme of adding short baselines on reconstruction blur. The results of simulation show that the echo from three beam (the largest number of beams transmitted simultaneously) overlap zone has the most

收稿日期:2017-06-06;修订日期:2017-08-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11703024);航天系统部装备预先研究项目资助项目(No. 30XXXX10201)

serious effect on reconstruction results and that adding short baselines can eliminate image overlap and also that the more short baselines are added, the more distinct details can be got (one short baseline can promote the Strehl ratio from 0.49 to 0.59). The schemes of eliminating effect of echo outside the FOV provided by this paper could be useful to the concrete implement of fringes scanning imaging in different application fields.

Key words: fringes scanning imaging; Fourier telescope; echo outside field of view (FOV); imaging field of view; reconstruction overlap

1 引言

随着科技的不断发展,各国对人造卫星等空中目标探测的需求越来越强烈。空中卫星的增多,增加了彼此碰撞的几率,同时加剧再次发射时的风险。为了实现对空中己方卫星的实时监控,并预防别国卫星的非授权探测,需要能观测其运动特性、姿态变化并能识别其形状。所以,发展对深空暗弱目标的探测技术成为当前的迫切需要。条纹场扫描成像,又称为傅立叶望远镜或相干场成像,就是能够对远距离小目标高分辨率成像的新型技术之一^[1-6]。

条纹场扫描成像利用在目标表面形成运动干涉条纹的方式提取目标的空间频谱信息,再通过图像重构程序生成目标图像。因其结合主动照明、合成孔径和调制与解调等多项技术,从而适合对远距离暗弱目标成像^[7-12],同时也可对近距离成像(实现普通照相机功能)或微距离目标成像(实现显微镜的功能)^[13]。然而不论是远距离应用或者近距离成像都不可避免成像视场(由最短发射基线决定)之外激光回波的出现,其原因是为保证成像过程中照明光束始终完全覆盖目标,激光发散角应大于视场(一般为其几倍),偶然飞入照明区域的物体或目标周围背景均会引起激光回波。这些激光回波是由视场外的反射引起的,会引起重构图像的混叠(由于空间频域欠采样),严重情况下将无法识别目标。上述问题及其解决方案将是本文的研究重点。

文章结构如下:首先,简单回顾条纹场扫描成像的基本原理;其次,分析图像混叠的来源并提出解决方案;接着,分析回波对成像性能的影响,并对增加短基线方案进行详细的分析和仿真;最后,给出仿真结果并展开讨论。

2 工作原理

条纹场扫描成像的工作原理在很多文献中已经有较为详细地论述^[1-4],在这里只给出结论性的公式和描述。条纹场扫描成像采用 3 束(或更多)经过移频和准直的激光束同时照射目标。通过改变地面发射基线位置以实现改变空间频率的目的。目标反射光包含与发射基线空间频率相对应的目标频谱信息。光学能量接收系统收集目标反射光,经过时间解调和相位闭合处理后可以得到与发射基线空间频率相对应的目标傅里叶分量。在获得足够多目标傅里叶分量的基础上,通过逆傅里叶变换即可重构目标图像。条纹场扫描成像系统组成和图像重构流程的示意图分别如图 1 和图 2 所示。

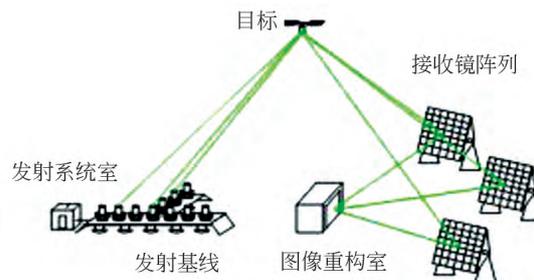


图 1 条纹场扫描成像系统示意图

Fig. 1 Scheme of imaging system of Fourier telescope

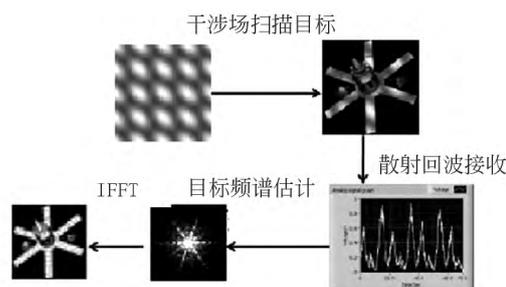


图 2 图像重构示意图

Fig. 2 Scheme of image reconstruction

下面是图像重构过程的简单数学描述。光学接收系统接收到的光信号经过时间解调后的目标傅里叶分量的测量值可表示为:

$$M(\Delta k_{px}, \Delta k_{py}, t) = c'NO(\Delta k_{px}, \Delta k_{py}) \exp[i(p\Delta\omega t - \Delta\phi_p)] \quad (1)$$

其中: Δk_{px} 和 Δk_{py} 分别为所测空间频率的两个正交量; c' 为复常数因子; N 为光束数目; $\Delta\omega$ 为最小频率间隔; $\Delta\phi_p$ 为包含各种噪声影响和初始相位的随机相位项; $O(\Delta k_{px}, \Delta k_{py})$ 为目标傅里叶分量。

可以按照一定的顺序发射多光束并计算傅里叶分量的比值:

$$R(m\Delta k_x) = \frac{M_{m,0}(m\Delta k_x)}{M_{1,0}(\Delta k_x)M_{m,1}[(m-1)\Delta k_x]} \quad (2)$$

$$= \frac{O(m\Delta k_x)}{c'NO(\Delta k_x)O[(m-1)\Delta k_x]}$$

根据傅里叶分量比值可以得到估计值:

$$O_e(m\Delta k_x + n\Delta k_y) = R(m\Delta k_x + n\Delta k_y)R[m\Delta k_x + (n-1)\Delta k_y] \cdots R(m\Delta k_x + \Delta k_y)R(m\Delta k_x) \cdots R(\Delta k_x) \quad (3)$$

利用解调后的测量值计算出所有的目标傅里叶分量的估计值, 然后进行二维逆傅里叶变换就可以重构目标图像。

2 引起图像混叠的回波源分析

2.1 成像视场与观察视场

条纹场扫描成像的成像视场主要由最短发射基线决定^[14], 其表达式为:

$$\theta_{view} = \frac{\lambda}{s} \quad (4)$$

式中: λ 为工作波长, s 为最短基线长度。

因为感兴趣目标的运动(即使同步静止轨道卫星也存在微量运动)、激光发射系统的指向和跟踪误差以及地面振动和大气湍流等因素的共同作用, 目标在视场中的位置不断变化。为了保证在成像过程中同时发射的所有激光束均能完全覆盖目标(完整获取目标空间频谱信息的要求), 激光发散角、光束重叠区域张角、视场角和目标张角这四者的关系应满足以下不等式:

$$\theta_{laser} > \theta_{overlap} > \theta_{view} > \theta_{object} \quad (5)$$

式中: θ_{laser} 为激光发散角, $\theta_{overlap}$ 为光束重叠区域对地面张角, θ_{view} 为视场角, θ_{object} 为目标对地面张角。以上四者的关系在图 3 中给出直观地表述。

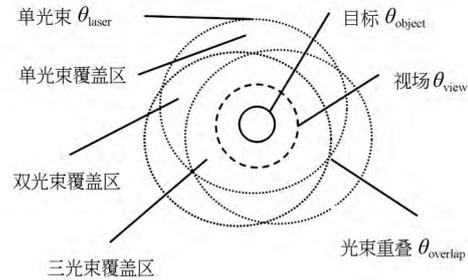


图 3 激光发散角、光束重叠区域张角、视场角和目标张角的关系

Fig. 3 Relationship between laser angle, overlap angle, FOV angle and object angle

由上面的分析可知, 超出成像视场的激光覆盖区域均有可能产生回波。然而, 并不是所有回波都是有害的。对于激光覆盖区域中超出任意两束光重叠区域的单光束覆盖部分(如图 3 所示), 没有干涉条纹产生, 故该区域内回波经过解调后会被滤掉, 不会影响重构质量。超出成像视场的任意两束乃至更多束光波重叠区域内的激光回波均有可能引起重构图像的混叠。

前文给出描述成像视场尺寸的公式如式(4), 该公式限定成像视场的范围, 但却没有指出成像视场的位置。也就是说只要目标尺寸小于成像视场, 则不论目标位于所有光束重叠区域的什么位置(目标完全被照明), 均可以正常成像。即: 假设重叠区域内干涉条纹近似直纹, 则不论目标位于重叠区域的任何位置, 其反射光能量随时间的变化规律是一样的, 所以不论位于何位置均能正常成像。当然, 实际上靠近光束中心(光束质量好)的重叠区内的条纹近似直纹, 越偏离中心条纹畸变越严重(主要由发射光学系统、发散角和大气湍流引起)。所以, 靠近所有光束重叠区域边缘的地方, 目标的重构效果并不好, 但理论上基本可以成像。

由此可见, 与传统光学成像只有一个视场概念不同, 条纹场扫描成像可以定义两个视场概念, 其一可定义为成像视场, 由公式(4)所表述, 当目标尺寸超出成像视场时出现重构混叠; 其二可定

义为观察视场,无具体公式表述,主要由所有光束的重叠区域和实际光束面形所决定,其尺寸一般小于重叠区域。

2.2 出现重构混叠的场合及其解决方案

当感兴趣目标与邻近目标的距离大于成像视场却又都位于两束光(或者更多)的重叠区域内时,会出现重构图像的混叠,即邻近目标的结构信息叠加在感兴趣目标上^[15]。当临近目标越多或越大时混叠越严重,最终导致无法识别目标。下面将针对不同的应用场合分别尝试给出可行的解决方案。

(1) 远距离成像

对于远距离应用来说,偶然飞入激光照明区域的物体,如果该物体与感兴趣目标不在同一个垂直视轴的平面内,则可利用距离选通的方式区分感兴趣目标和干扰物体。距离选通是激光雷达和光学主动成像中经常采用的技术(原理示意图如图 4 所示)。为了消除背景散射光、天空自然光源、大气后向散射和地面人工光源等的影响,根据目标与发射器和接收器之间距离,选择快门开启和关闭时间,保证在高速快门开启时间内感兴趣目标信号完全被探测,而干扰物体的回波光被阻挡。

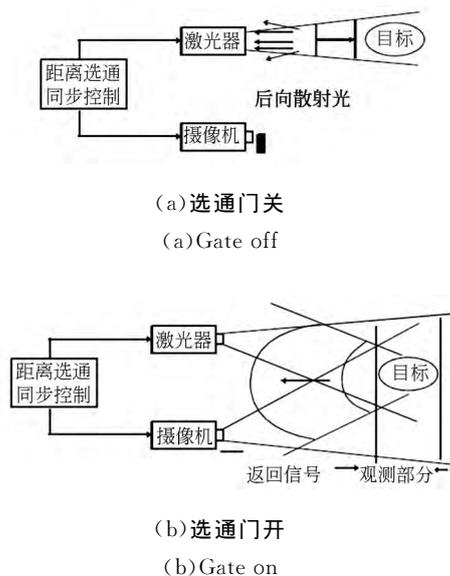


图 4 距离选通原理示意图

Fig. 4 Scheme of range selection

对于条纹场扫描成像,其远距离应用一般采用脉冲激光照明,每次发射获取目标空间频谱信息的持续时间等于激光脉宽。只要在脉冲刚到达

感兴趣目标直至离开的这段时间内,该脉冲不会遇到干扰物体,则可采用距离选通的方式区分两者。

以对同步静止轨道目标成像为例,分析干扰物体位于感兴趣目标的何位置时可采用距离选通技术加以区分。一般高能激光的脉宽约为 10 ns,为了避免干扰物体与感兴趣目标两者回波的重叠,两者间距应满足以下公式:

$$L_{\text{gap}} > \frac{L_{\text{pulse}}}{2} = \frac{c \cdot t_{\text{pulse}}}{2}, \quad (6)$$

其中: L_{gap} 为干扰物体与感兴趣目标在视轴方向的距离, L_{pulse} 为脉冲长度, t_{pulse} 为脉宽, c 为光速。将 $t_{\text{pulse}} = 10 \text{ ns}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 代入(6)式可得, $L_{\text{gap}} > 3 \text{ m}$ 。即在目标视轴方向前(或后)3 m 距离内光束重叠区不能有其它物体。该要求对于实际同步轨道成像来说很容易满足。

如果干扰物体在感兴趣目标所在的垂直视轴的平面内,或 $L_{\text{gap}} < 3 \text{ m}$ (出现干扰物体与感兴趣目标回波的部分混叠),则可采用增加短基线的方式区分两者。

具体来说,前面提到成像视场由最短基线决定,所以一个直观的想法是,如果在现有发射基线的基础上再加入更短的基线 d_s ,则可能会消除图像混叠现象。

该基线尺寸由激光发散角决定:

$$d_s = \frac{\lambda}{\theta_{\text{laser}}}, \quad (7)$$

式(7)与式(4)形式上相似,只不过将 s 和 θ_{view} 分别换成 d_s 和 θ_{laser} 。

由此可知,新成像视场 $\theta_{\text{new-view}} = \theta_{\text{laser}} > \theta_{\text{overlap}}$,即重叠区域的回波不再引起重构图像的混叠。然而增加一对相互正交的基线,使原有均匀分布的基线阵列变成非均匀,可能会引入新的重构噪声,并且新基线阵列对重构混叠的削弱效果需要分析验证,故在本文的第 4 部分将详细分析引入短基线后对成像性能的影响。

(2) 近距离成像

对于类似普通照相这种近距离应用来说,感兴趣目标附近一般都会存在其他干扰物体。因近距离成像过程与远距离完全类似,故对于成像混叠问题的解决方案可参考远距离成像。

(3) 显微成像

对于显微成像,除了可以采用远距离应用中

提到的方案外,还可采用加视场光阑的方法^[13]消除重构混叠现象。

3 成像视场外回波对重构图像的影响

下面将分别仿真以下3种情况:(1)成像区域与视场外三光束重叠区域同时存在;(2)成像区域与视场外双光束重叠区域同时存在;(3)成像区域与视场外单光束覆盖区域同时存在。这3种情况下的成像效果,并与单独存在成像区域的效果进行比较,从而找出对成像质量影响最大的情况。

仿真思路及主要参数如下:采用T型均匀间隔发射阵列,单臂基线数为16。成像区域目标采用 64×64 pixel的卫星图像,其它区域目标采用成像区域目标尺寸 $1/4(16 \times 16$ pixel)的3个目标组合而成(仿真原始图像如图5所示)。利用均匀空间采样方式获得目标的 33×33 空间频谱。然后以两个像素为间隔选取空间频谱组成新空间频谱(欠采样的空间频谱,因成像区域为 64×64 ,故采样空间频率为 $1/64$,对于 128×128 的空间频谱来说,采样间隔为 $128/64=2$)。最后对新空间频谱进行逆傅立叶变换获得重构图像。

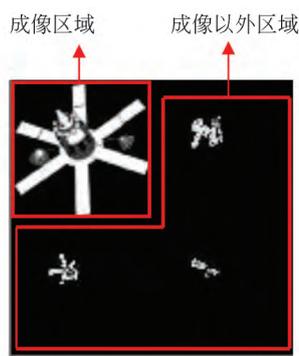


图5 仿真原始图像

Fig. 5 Original simulation image

3.1 三光束重叠区域内回波的影响

假设成像区域以外都是三光束重叠区域,则奈氏采样(对所有光束重叠区域的空间频谱进行奈氏采样)和欠采样(只对成像区域的空间频谱进行奈氏采样)的重构图像分别如图6所示。为了定量反映欠采样与奈氏采样的差别,采用图像的斯托里尔比(Strehl ratio)来表示回波噪声的影响^[16]。

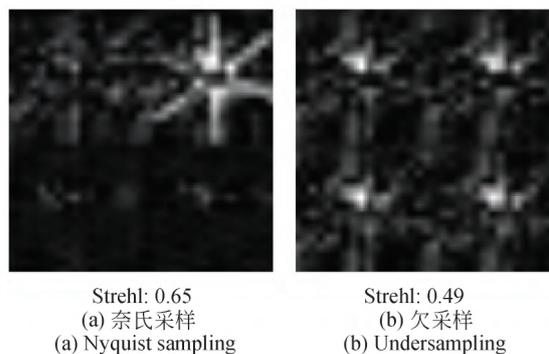


图6 三光束重叠区的成像

Fig. 6 Imaging in three beams overlap zone

由图6可见,在奈氏采样情况下(以所有三光束重叠区域为成像视场),重构图像中感兴趣目标的位置移动到右上角,感兴趣目标清晰可见;在欠采样情况下(成像视场为三光束重叠区域的 $1/2$),出现四个模糊目标,感兴趣目标变得十分模糊,无法分辨。根据前述理论分析可知,造成目标模糊的主要原因是成像视场以外的信息混叠到成像视场内。

3.2 双光束重叠区域内回波的影响

假设成像区域以外都是双光束重叠区域,则奈氏采样和欠采样的重构图像分别如图7所示。

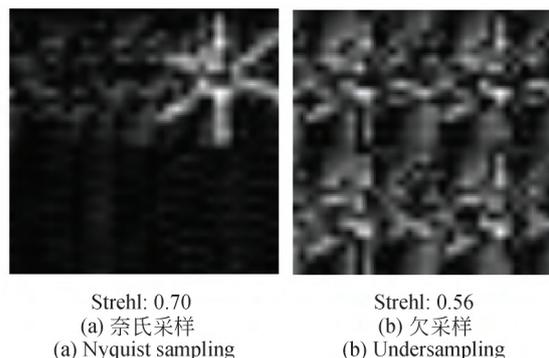


图7 双光束重叠区的成像

Fig. 7 Imaging in double beams overlap zone

由图7可见,在奈氏采样情况下(以所有光束重叠区域为成像视场),重构图像中感兴趣目标的位置移动到右上角,感兴趣目标清晰可见;在欠采样情况下(成像视场为双光束重叠区域的 $1/2$),出现4个模糊目标,感兴趣目标变得较为模糊,但比三光束重叠时的模糊程度轻。根据前述理论分析,我们可知,造成目标模糊的主要原因仍然是成

像视场以外的信息混叠到成像视场内。

3.3 单光束覆盖区域内回波的影响

假设成像区域以外都是单光束覆盖区域,则奈氏采样和欠采样的重构图像分别如图 8 所示。

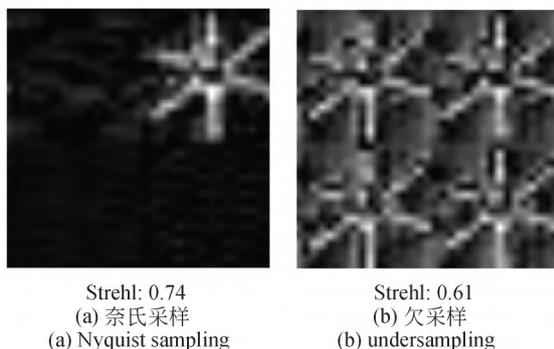


图 8 单光束覆盖区的成像
Fig. 8 Imaging in single beam coverage zone

由图 8 可见,在奈氏采样情况下(以所有光束覆盖区域为成像视场),重构图像中感兴趣目标的位置移动到右上角,感兴趣目标清晰可见;在欠采样情况下(成像视场为光束覆盖区域的 $1/2$),出现 4 个目标,感兴趣目标变得轻微模糊,基本可以分辨。根据前述理论分析,我们可知,单光束照射区域的回波信息为直流信号,经过时间解调后被滤除,不会明显影响成像质量。

3.4 分析与讨论

通过对 3 种情况的仿真可知,单光束覆盖区的回波对成像几乎没有影响,三光束重叠区和双光束重叠区的回波会造成感兴趣目标的模糊,且三光束重叠区回波的影响较为严重。仿真结果与前述理论分析的定性结论相吻合。

既然图像模糊的主要原因是欠采样造成的图像混叠,一个直观的想法就是,通过增加短基线而扩大成像视场,从而避免或减轻图像混叠效应。下面将对短基线方案进行详细分析。

4 短基线方案的分析

在原发射基线阵列的基础上,增加更短基线,相当于增加成像视场。当成像视场等于单束激光发散角时(大于重叠区域),感兴趣目标和邻近物体均在成像视场内,故理论上不会出现重构混叠。在两个正交基线上仅各增加一个短基线是否可避

免图像混叠并不引起图像质量的明显下降,是否需要增加更多基线。上述问题需要通过计算机仿真才能给出答案。

增加短基线后,原均匀分布的基线变成非均匀。可通过以下两种方式之一进行仿真:(1)以增加的短基线为基线间隔,没有基线的位置补零^[17](该方法较为简单直观);(2)直接采用非均匀傅立叶变换进行仿真^[18](该方法性能较好)。从重构图像直观感觉和 strehl 比两者来看^[18],方法(1)略逊色于方法(2),但物理概念简单直观,重构算法相对简单,故这里采用方法(1)进行分析。

4.1 x 和 y 方向各增加一组短基线

为了提高仿真效率,假设激光发散角为成像视场的两倍,比较式(4)和式(7),可知新增短基线为原基线间隔的 $1/2$ 。

仿真思路及主要参数如下:采用 T 型发射阵列,原单臂基线数为 16(均匀分布),以新增短基线为新基线间隔后,单臂基线数变为 17(非均匀分布)。仿真原始图像与第 3 部分采用的图像相同(如图 5 所示),非成像区域均为三光束重叠区域(可引起最严重混叠效应)。利用均匀空间采样方式获得目标的 33×33 空间频谱。然后根据新基线结构(如图 9 所示)对应的目标空间频谱(如图 10 所示)对前述 33×33 空间频谱中未采样处进行补零操作,即新基线不包含的频谱分量取零值。最后对新空间频谱进行逆傅立叶变换获得增加短基线后的重构图像。

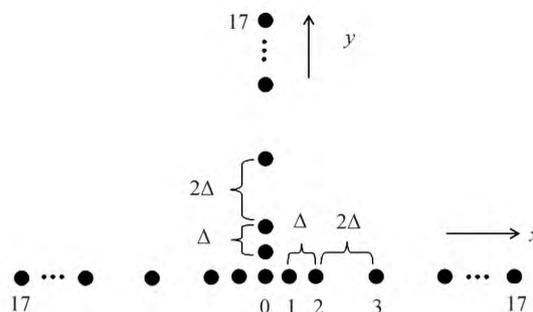


图 9 单臂各加入一个短基线的新 T 型基线
Fig. 9 New T type baseline with each leg adding a short baseline

采用上述方案的仿真结果如图 11 所示,由图可知,混叠现象基本消除,但因中高频空间频谱的部分缺失而引起成像质量下降。

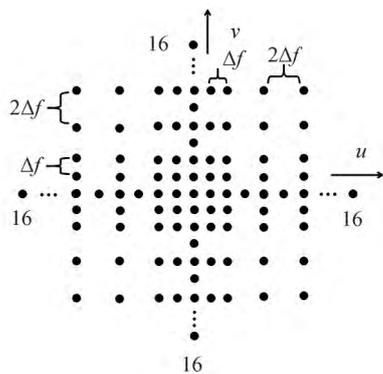


图 10 新 T 型基线对应的频谱分布

Fig. 10 Spectrum distribution of new T type baseline



Strehl: 0.59

图 11 单臂增加一个短基线

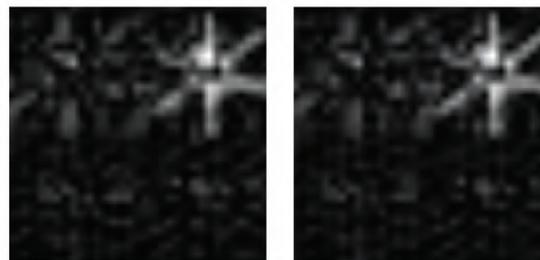
Fig. 11 Each leg adding a short baseline

4.2 x 和 y 方向各增加多组基线

在 x 和 y 方向各增加多组基线的仿真结果如图 12 所示,由图可知,增加基线数越多,则重构图像质量越高。其原因是单臂增加基线数越多,则中高频空间频谱的采样越多,重构图像的细节就越丰富。

4.3 分析与讨论

通过前面的仿真可知,增加短基线可以消除图像混叠,且单臂增加基线数越多,则重构图像的细节就越丰富。其极限情况是,以重叠光束覆盖面积为成像视场选择最短基线,并以其为间隔组



Strehl: 0.63

(a) 单臂增加 4 个短基线
(a) Adding four baselines

Strehl: 0.64

(b) 单臂增加 5 个短基线
(b) Adding five baselines

图 12 单臂增加多个短基线

Fig. 12 Each leg adding several short baselines

成均匀分布的 T 型发射阵列。这种极限情况会造成阵列的布局非常密集,大大增加硬件和软件的复杂度。故应根据实际应用场合,合理增加单臂短基线的数目,做到既能消除重叠区回波的影响保证足够的分辨率,又不至于增加太多的成本和复杂度。

5 结 论

针对条纹场扫描成像系统(又称傅立叶望远镜或相干场成像),本文提出成像视场与观察视场的概念,指出成像视场以外的双光束(以及更多光束)重叠区域的回波会造成感兴趣目标的重构模糊,并从理论上给出引起重构模糊的主要原因。

根据不同的应用场合,分别提出消除重构模糊的可行方案。对于显微成像,在样品表面覆盖视场光阑是最简单有效的方法;对于其它成像应用,如果背景物体与感兴趣目标不在同一垂直视轴的平面内,则可采用距离选通的方式阻挡噪声回波;如果背景物体与感兴趣目标在同一垂直视轴的平面内,则可采用增加短基线的方案降低重构模糊。

本文通过仿真,详细研究成像视场外回波对重构图像的影响,并对增加短基线的方案进行深入分析。仿真结果表明,增加短基线可以消除图像混叠,且单臂增加基线数越多,则重构图像的细节就越丰富。理想的情况是,以重叠光束覆盖面积为成像视场选择最短基线,组成均匀分布的 T 型发射阵列。然而这种情况会大大增加硬件和软件的复杂度,故应根据实际应用场合,合理增加单



Strehl: 0.60

(a) 单臂增加 2 个短基线
(a) Adding two baselines



Strehl: 0.62

(b) 单臂增加 3 个短基线
(b) Adding three baselines

臂短基线的数目。

本文所提出的消除成像视场外回波影响的几

种方案对于条纹场扫描成像系统在不同领域的应用均具有重要的借鉴价值。

参考文献:

- [1] GAMIZ V L, HOLMES R B, CZYZAK S R, *et al.*. GLINT: program overview and potential science objectives[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4091: 304-315.
- [2] OLSON D, LONG S M, ULIBARRI L J. Comparison of complex exponential and least-squares wavefront reconstructors for regular square and nonsquare grid arrays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4091: 323-332.
- [3] BELEN'KII M S, HUGHES K, BRINKLEY T J, *et al.*. Residual turbulent scintillation effect and impact of turbulence on the Fourier telescope system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5160: 56-67.
- [4] 蔡静, 王雁桂, 黎全. 相干编码成像分析及其仿真研究[J]. *激光杂志*, 2009, 30(1): 42-43.
CAI J, WANG Y G, LI Q. Analysis and simulation on interferometric synthetic aperture method [J]. *Laser Journal*, 2009, 30(1): 42-43. (in Chinese)
- [5] 叶溯, 刘艺, 吴健. 傅里叶望远镜中天线阵列配置对成像质量的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(3): 611-616.
YE S, LIU Y, WU J. Effects of antenna array configurations on imaging quality in Fourier telescope [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(3): 611-616. (in Chinese)
- [6] 董磊, 刘欣悦, 王建立. 实验室环境内傅里叶望远镜技术的实现[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 999-1002.
DONG L, LIU X Y, WANG J L. Realization of Fourier telescope technology in laboratory[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 999-1002. (in Chinese)
- [7] 张炎, 杨春平, 郭晶, 等. 实验室中傅里叶望远镜频谱抽取方式[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(3): 571-576.
ZHANG Y, YANG CH P, GUO J, *et al.*. Spectrum extraction mode for Fourier telescope in laboratory[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(3): 571-576. (in Chinese)
- [8] 陈卫, 黎全, 王雁桂. 傅里叶望远镜成像系统的实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0311001.
CHEN W, LI Q, WANG Y G. Experimental re-
- search of Fourier telescope imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0311001. (in Chinese)
- [9] 刘欣悦, 董磊, 王建立. 稀疏采样傅里叶望远镜成像[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 521-527.
LIU X Y, DONG L, WANG J L. Fourier telescope imaging via sparse sampling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 521-527. (in Chinese)
- [10] 于前洋, 曲宏松. 实现同步轨道(GEO)高分辨力对地观测的技术途径(上)[J]. *中国光学与应用光学*, 2008, 1(1): 1-12.
YU Q Y, QU H S. Realization of high-resolution visible earth observation on geostationary earth orbit[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1): 1-12. (in Chinese)
- [11] 王小伟, 黎全, 王雁桂, 等. 傅里叶望远镜中的相位闭合分析及其仿真[J]. *国防科技大学学报*, 2009, 31(1): 38-42.
WANG X W, LI Q, WANG Y G, *et al.*. Analysis and simulation on phase closure of Fourier telescope[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, 31(1): 38-42. (in Chinese)
- [12] 陈卫, 黎全, 王雁桂. 基于全相位谱分析的傅里叶望远镜目标重构[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3441-3446.
CHEN W, LI Q, WANG Y G. Object reconstruction of Fourier-telescope based on all-phase spectrum analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3441-3446. (in Chinese)
- [13] HUTCHIN R A. Microscope for producing high resolution images without precision optics: US Patent 4584484[P]. 1986-04-22.
- [14] HOLMES R B, BRINKLEY T J. Reconstruction of images of deep-space objects using Fourier telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3815: 11-22.
- [15] 陈卫. 傅里叶望远镜的理论和实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
CHEN W. *Study on Fourier telescope in theory and experiment*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [16] CUELLAR E L, STAPP J, COOPER J. Laboratory and field experimental demonstration of a Fou-

rier telescope imaging system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5896: 58960.

- [17] 于树海,王建立,董磊,等. 基于T型稀疏发射阵列的傅里叶望远镜[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 190-194.

Yu SH H, WANG J L, DONG L, *et al.*. Fourier telescope based on sparse transmitting array of T type[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014,

43(1): 190-194. (in Chinese)

- [18] 于树海,王建立,董磊,等. 基于空域非均匀傅里叶变换的傅里叶望远镜[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(7): 1661-1665.

YU SH H, WANG J L, DONG L, *et al.*. Fourier telescope based on spatial non-uniform Fourier transform[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7): 1661-1665. (in Chinese)

作者简介:



董磊(1982—),男,山东金乡人,博士研究生,副研究员,分别在2004年和2007年于山东大学获得学士和硕士学位,主要从事物理光学和激光技术方面的研究。E-mail: nodepression@126.com



卢振武(1955—),男,研究员,博导,1982年于东北师范大学获得学士学位,1985年于长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要研究方向为波动光学、光学设计和光学检测。Email: luzw@ciomp.ac.cn.



刘欣悦(1973—),男,辽宁大连人,博士,研究员,博士生导师,1999年、2006年分别于中科院长春光学精密机械与物理所获得硕士、博士学位,主要从事光学成像及图像处理与分析等方面的研究。Email: sirliuxy@hotmail.com