

傅里叶望远镜发射阵列的冗余度及“冗余度-斯特列尔比-目标信息”特性分析

张羽 罗秀娟 曹蓓 陈明徕 刘辉 夏爱利 兰富洋

Analysis of the redundancy of Fourier telescoping transmitter array and its redundancy-strehl ratio-target texture distribution characteristic

Zhang Yu Luo Xiu-Juan Cao Bei Chen Ming-Lai Liu Hui Xia Ai-Li Lan Fu-Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 114201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.114201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.114201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于拉锥结构的全光纤型内窥 OCT 探针研究

Tapered structure based all-fiber probe for endoscopic optical coherence tomography

物理学报.2016, 65(2): 024201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024201>

基于界面信号的扫频光学相干层析成像系统相位矫正方法

Phase correction method based on interfacial signal in swept source optical coherence tomography

物理学报.2016, 65(1): 014201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014201>

超高分辨光学相干层析成像技术与材料检测应用

Ultrahigh-resolution optical coherence tomography and its application in inspection of industrial materials

物理学报.2015, 64(17): 174201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174201>

二级级联式室内可见光通信光学接收天线设计

Design of two-cascade optical antenna for indoor visible light communication

物理学报.2015, 64(16): 164201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164201>

隔行分层填充的太赫兹超高双折射多孔光纤

Ultrahigh birefringence terahertz porous fibers based on interlacing layered infiltration method

物理学报.2015, 64(15): 154201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154201>

傅里叶望远镜发射阵列的冗余度及“冗余度-斯特列尔比-目标信息”特性分析*

张羽[†] 罗秀娟 曹蓓 陈明徕 刘辉 夏爱利 兰富洋

(中科院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2016年1月18日收到; 2016年2月15日收到修改稿)

傅里叶望远技术中不同的基线配置产生不同方向的多组干涉条纹以扫描目标表面. 能否有效判断条纹方向与目标表面细节信息是否匹配决定了目标空间的采样效果. 本文首先对发射基线的冗余度进行了分析, 之后提出了一种新的发射基线分析方法, 通过定义冗余度-斯特列尔比-目标信息(RST)的概念, 将基线冗余度、目标细节信息与重构图像质量相结合. 分析了目标空间细节信息与基线配置的匹配关系. 文中采用T形阵列对目标空间频谱采样. 当某一基线配置的RST值满足文中所设定的大小关系时, 判断目标的细节信息主要分布于阵列的横轴方向还是竖轴方向. 并以此为参考, 调整下一步基线扫描时横竖两轴的扩展规模, 实现了利用目标空间的较低频反馈信息来指导较高频信息的采样基线配置. 此分析方法的建立有助于优化傅里叶望远镜系统真实发射阵列的工作方式, 使基线的频谱与目标的空间谱较好地匹配, 达到更好的探测结果.

关键词: 傅里叶望远术, 空间频谱, 冗余度, 成像质量

PACS: 42.15.Eq, 42.30.-d, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.65.114201

1 引言

目前针对傅里叶望远镜发射阵列的研究分为阵列规模与成像质量关系^[1-4]和光束扫描方式对频谱迭代速度影响^[5-8]两大方面. 其中光束扫描方式体现傅里叶频谱的矢量特性, 即阵列通过多组光束的组合扫描来保证足够方向的傅里叶谱对目标的空间频谱进行采样. 条纹组与目标相同谱段的匹配程度同样影响着重构图像质量. 通常在合成孔径成像中, 冗余度越高重构图像效果越好. 然而在傅里叶望远镜技术中, 由于发射阵列多光束切换的实时性同样影响着探测效率, 因此在满足获取足够多的傅里叶频谱以保证图像质量的前提下, 实时调整基线配置来使基线工作冗余度最低同样重要. 基于这一问题, 本文首先对发射基线的冗余度(redundancy)进行了研究; 结合重构图像质量的

斯特列尔比(Strehl ratio)^[2]以及目标的纹理分布(target texture distribution), 提出了同时包含冗余度-斯特列尔比-目标信息(RST)三种因素的分析方法, 并定义为RST值的计算方法, 使得被测目标的纹理信息与阵列的扫描方式有机结合, 通过具有典型方向特性的目标重构分析了RST分布的规律; 分析了复杂目标在不同空间谱段RST对阵列基线切换的指导意义. 为傅里叶望远镜阵列的实现奠定了理论基础.

2 发射基线冗余度分析

2.1 傅里叶望远镜发射基线“零冗余”可行性分析

傅里叶望远发射阵列基线的“零冗余”是指发射器的布阵不会产生相同的基线(傅里叶分量). 法国学者Arsac^[9]对电磁波接收阵列的冗余度分析

* 国家自然科学基金(批准号: 61505248)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yuzhang16@opt.ac.cn

时,曾提出了最大可能的零冗余度线性阵列.

图1所示的四种状态中,不同空间频谱分量被采集,每一频谱的幅值相同,说明在此频段不存在更多冗余采样.

在傅里叶成像技术中,一维阵列的排布方式如图2^[10]:当孔径 n 移动时,会带动 $O1n$ 和 $O2n$ 发生变化^[11,12],每多移动一个孔径,就会多采集一个空间谱.

从傅里叶望远镜的频谱构成原理可知^[13],傅里叶望远发射阵列与Arsac所述零冗余阵列不同,各孔径之间的频谱值无法单独构成目标傅里叶分量,在不同基线配置下的测量值是需要相互迭代的.此时,虽然图2的每一组配置对应着一个零冗

余空间谱,但是各组的采样值经过相位闭合以及频谱迭代后,就会出现相同的傅里叶分量.因此,T形阵列无法像Arsac提出的那样构成零冗余基线阵列.

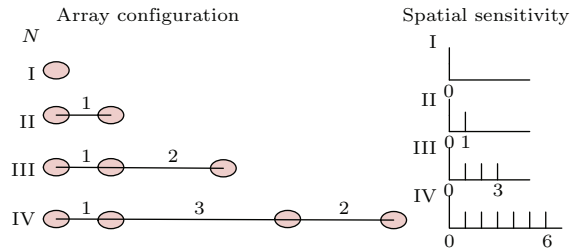


图1 四种零冗余阵列

Fig. 1. Four zero-redundancy arrays.

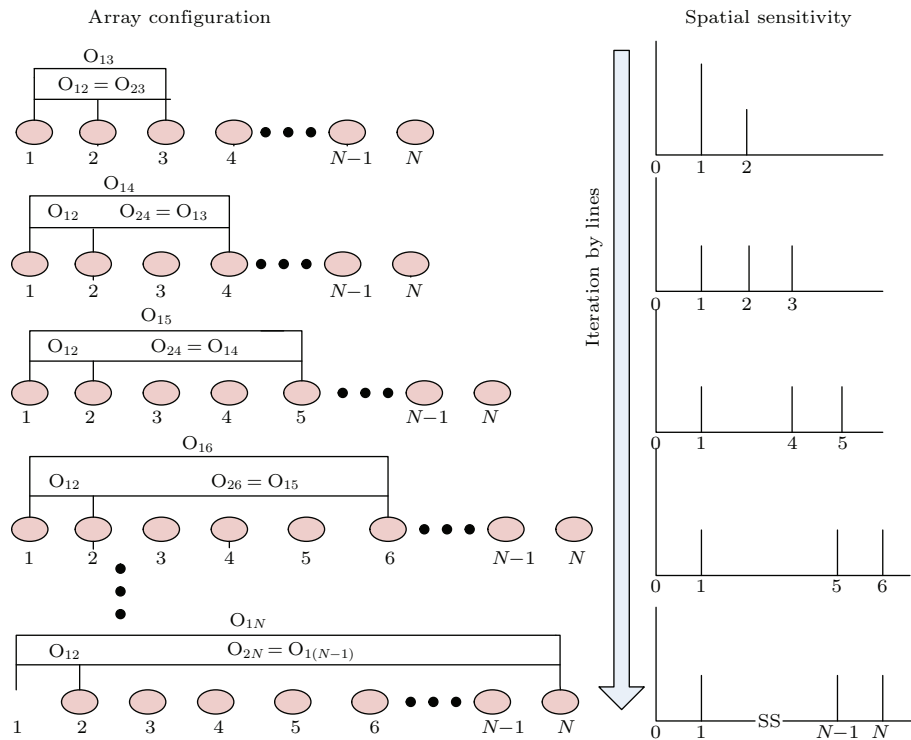


图2 傅里叶望远镜中阵列冗余性

Fig. 2. The array redundancy in Fourier telescope.

如果按格隆尺(Golomb ruler)^[13]来依次布设T形发射器阵列两轴上各发射器的位置,从理论上可实现发射阵列基线的“零冗余”.但是会存在以下两个问题:

- 1) 严重增大发射阵列两轴的长度,不利于工程实现和小型化;
- 2) 采集的目标频谱过于稀疏,不满足分辨率的要求.

综上,“零冗余”傅里叶望远镜发射基线布阵是不可行的.

2.2 二维阵列基线最小冗余度分析

既然傅里叶望远发射阵列达不到“零冗余”,则本节讨论其阵列的最小冗余特性.本文将T形均匀阵列的基线冗余度定义为^[14]

$$R = C_n^2/L, \quad (1)$$

其中 C 表示组合运算, n 为阵元数, 在一维阵列中, L 为阵列最大基线长度; 而在二维阵列中 L 为两个方向最长基线的乘积.

下面以 T 形阵列的两种典型排布方式为切入点, 分析基线的冗余度. 两种方式的总孔径数相同. 第一种方式为“三等臂阵列”, 如图 3(左) 所示, 每个轴臂上分布的孔径数相同, 其频谱构成如图 3(右) 所示. 第二种方式为“双等臂阵列”, 如图 4(左) 所示, 它的横轴孔径数与竖轴孔径数目相同, 其频谱分布如 4(右) 所示.

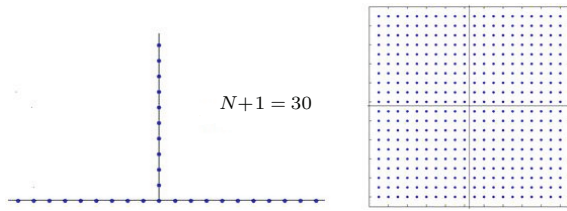


图 3 三等臂 T 形阵列与基线频谱分布
Fig. 3. T baseline spectrum distribution of array with three equal arms.

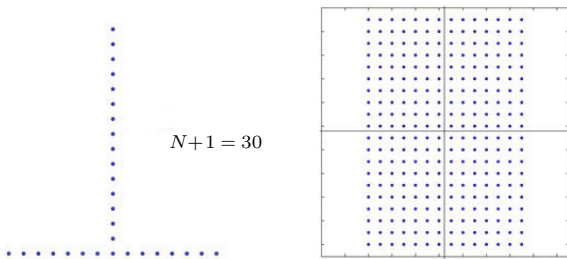


图 4 双等臂 T 形阵列与基线频谱分布
Fig. 4. T baseline spectrum distribution of array with two equal arms.

对于三等臂阵列, 由 (1) 式计算其冗余度: 设三等臂阵列单臂孔径数均为 p , 当 p 取无限大时, 理论上, 此时 T 形阵列冗余度可利用极限的思想表示为

$$R_T^\infty = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{C_{3p+1}^2}{(2p+1)(p+1)} = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{(3p+1) \cdot 3p}{(2p+1)(p+1)} = 2.25. \quad (2)$$

在双等臂阵中, 令横轴的孔径数为 p , 竖轴的孔径数也为 p , 那么此阵列的冗余度理论极限为

$$R_{T_opt}^\infty = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{C_{2p-1}^2}{p \cdot p} = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{(2p-1)(2p-2)}{2p^2} = 2. \quad (3)$$

由 (3) 式可以看出, 当 T 形阵列中两个轴孔径分布不一样时, 构成的频谱面形状不同, 基线的冗余度也会不同.

进一步分析阵列总孔径数为 N 时基线冗余度. 假设 T 形阵列的横轴孔径数为 $N_x (1 \leq N_x \leq N)$, 冗余度为

$$R = \frac{C_N^2}{(N - N_x + 1) \cdot N_x} = \frac{N(N-1)}{2(N - N_x + 1) \cdot N_x}, \quad (4)$$

当 N 取 60 时, 上式可描述为

$$R = \frac{30 \times 59}{(60 - N_x + 1) \cdot N_x}. \quad (5)$$

当横轴的孔径数由 1—60 时, 所构成的发射器阵列基线冗余度分布如图 5 所示.

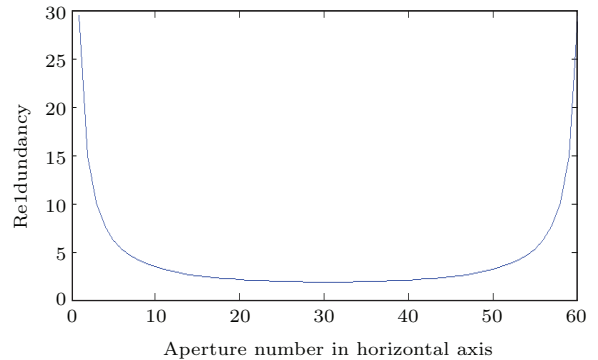


图 5 T 形阵横轴孔径数目与基线冗余度变化关系
Fig. 5. Relationship between redundancy and aperture number in horizontal axis.

从图 5 可以看出, 基线冗余度随轴上孔径数而变化. 在 T 形阵列中, 当横轴数目为 30, 即为总孔径数的一半时, 基线的冗余度最小. 换言之, 当横轴和纵轴发射孔径数相同时, 所构成的 T 形阵列为最小冗余度阵列.

由于 T 形阵列的频谱面为矩形, 当总孔径数不限定为 N 时, 将 (1) 式改写为

$$R = \frac{C_n^2}{N_x \times N_y} = \frac{C_{N_x+N_y-1}^2}{N_x \times N_y}, \quad (6)$$

式中, N_x 与 N_y 分别为横轴、纵轴发射孔径数.

(6) 式的冗余度分布如图 6 所示. 同样可以看出, T 阵列横、纵两轴孔径数相等时基线冗余度最小.

若 T 形阵列横轴孔径数均为 N_x , 则纵轴孔径数可表示为 $N_y = k \times N_x$. 当 $k = 1$ 时, 基线冗余度最小.

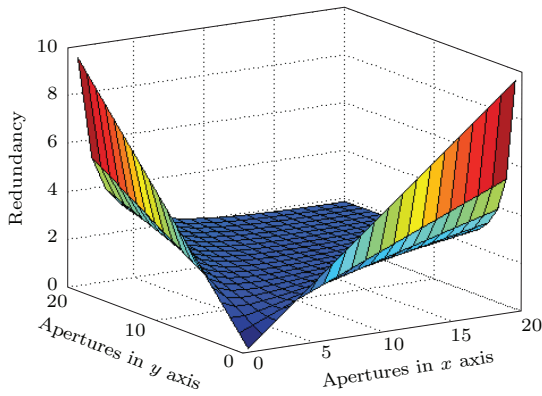


图6 (网刊彩色) T形阵两轴孔径数与基线冗余度变化关系
Fig. 6. (color online) Relationship between redundancy and aperture numbers in two axis.

3 阵列“RST”概念图的提出与验证

从图6可以看出, T形发射阵列的横轴总孔径数 N_x 与竖轴总孔径数 N_y 的一种组合对应发射阵列的一个冗余度, 随着 N_x 与 N_y 数值的增大, 相应冗余度的值也发生变化. 然而存在一个最低值. 将图6投影至 N_x - N_y 面时可看出冗余度的最低值可形成一条直线, 文中称之为最小冗余度曲线. 针对Y形、星形、环形发射阵列, 该曲线会有不同的分布规律. 本文在此曲线的基础上, 探寻不同阵列规模下的图像 SR 值的分布关系. 由成像理论可知, 随着发射阵列等效孔径增大, 图像的分辨率变高. 然而, 在相同规模的阵列情况下, 冗余度最小的点是否一定是成像质量最高的点, 仍需进一步研究.

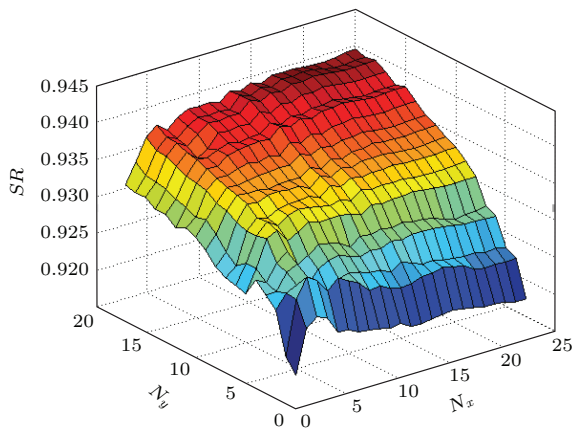


图7 (网刊彩色) SR 值随基线分布
Fig. 7. (color online) Distribution of SR with baseline expansion.

由图7可看出 SR 值随基线规模的扩大也呈增长趋势, 这一点符合傅里叶望远的成像原理. 而为了寻求出随着基线增加不会随之无限增加的 RST

值, 定义在某一基线配置下 RST 值为

$$RST(i, j) = \frac{SR(i, j)}{\sqrt{i^2 + j^2}} - \text{avg} \left(\frac{SR(i, j)}{\sqrt{i^2 + j^2}} \right), \quad (7)$$

(7) 式中, 等式右边第一项用来抑制 SR 值随基线扩大而增加的现象, 第二项为第一项在所有基线上的平均值, 将这两部分相减, 当值为正时, 本文认为在这个基线上的 RST 为较大的值, 表明在该基线所代表的方向上细节信息较多. 对于某一目标来说, 一种基线配置对应一个 RST 值.

然而 RST 值为正的点并不完全落在冗余度最小值曲线上, 说明在相同的 N_x 与 N_y 规模下, 并不是冗余度最小的阵列能达到最好的成像质量. 若 RST 为正的点分布于冗余度最低曲线的一侧, 则说明在此基线时目标细节信息分布多偏向 N_x 或者 N_y 的某一侧. 此时便按照冗余度与 RST 值的分布进而得知阵列基线与目标纹理分布信息的关系.

在图8中选取了在条纹分布方向上较为典型的图案.

图9(a)和图9(b)为在硫酸纸上打印的三条目标, 纹理分别呈水平和竖直分布, 图9(c)为模拟卫星的六爪目标, 其纹理分布在各个方向较为均匀.

图10表示为两种目标的 RST 分布, 其中, 目标A的 RST 值为正的点大都分布在最小冗余度曲线的上侧, 目标B的 RST 值为正的点大都分布在最小冗余度曲线的下侧. 说明A目标竖直方向的纹理分布较B目标的多, 而B的水平纹理分布较A的多.

将T形阵列孔径数所构成的坐标系分为A, B, C三个区域, 对应着阵列所组成的低、中、高三片空间频率, 图10中将 N_y 和 N_x 总数均为20时三等分, $1 \leq N_x, N_y \leq 7$ 时定义为A低频区, $7 \leq N_x, N_y \leq 14$ 时定义为B中频区, $14 \leq N_x, N_y \leq 20$ 时定义为C高频区. 通过不同空间频率区域的分布可得知相应区域的冗余度、成像质量、与目标纹理信息三者的关系.

在发射阵列对同步轨道等相对静止的目标工作时, 可先在A区域中计算不同 N_x 与 N_y 配置时的各点 RST 值, 并在等效孔径最大且一定的几个配置中选择 RST 最大值的点, 分析其与最小冗余度曲线的位置关系. 预测出在低频段的目标纹理信息, 依此为指导, 控制横竖两轴参与干涉的孔径数变化,

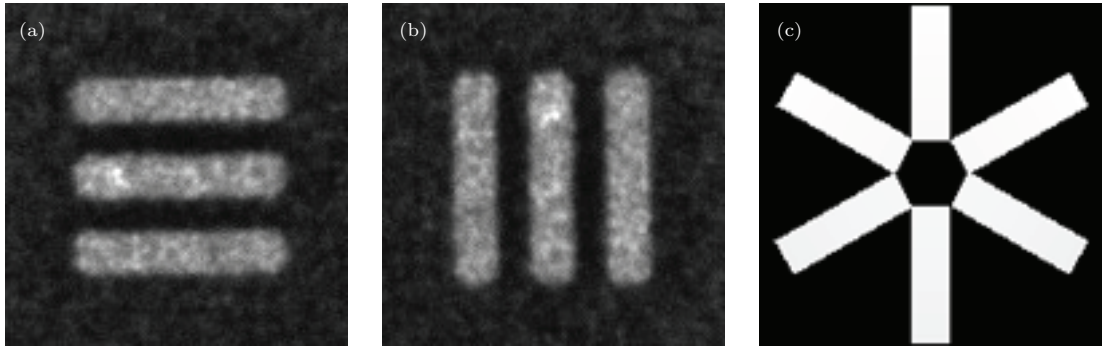


图8 三个典型测试目标 (a) 三横目标; (b) 三竖目标; (c) 六爪目标

Fig. 8. Three typical test target: (a) Three-bar in horizontal; (b) three-bar in longitude; (c) six-bar target.

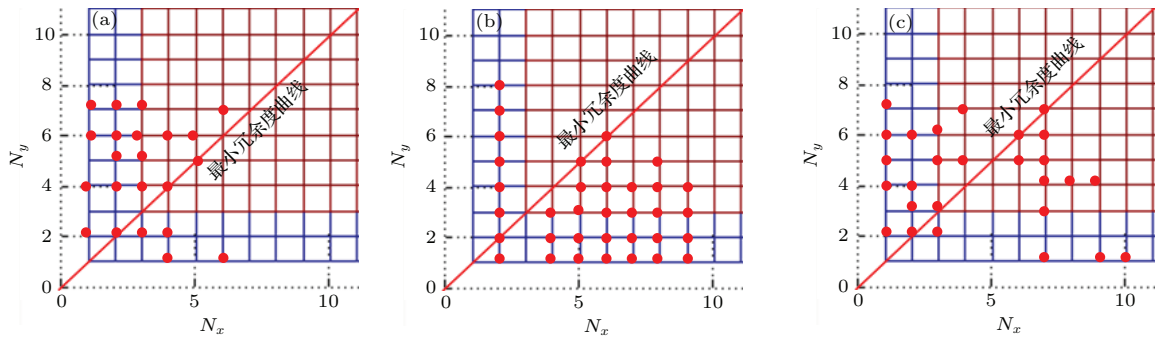


图9 (网刊彩色) 三模拟目标的RST值分布 (a) 三横目标; (b) 三竖目标; (c) 六爪目标

Fig. 9. (color online) RST distribution of three typical test target: (a) Three-bar in horizontal; (b) three-bar in longitude; (c) six-bar target.

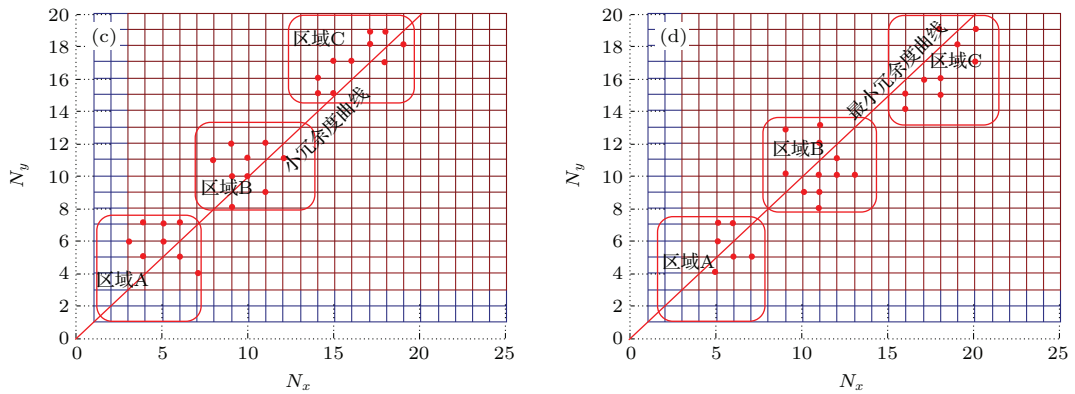
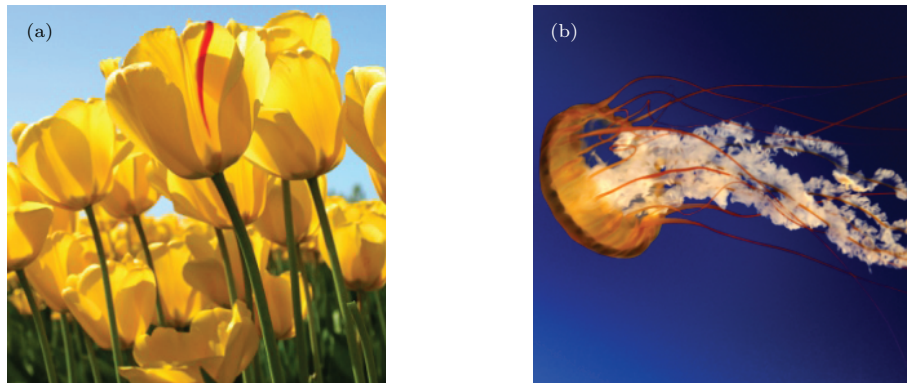


图10 (网刊彩色) 两种目标的RST分布 (a) A目标RST分布; (b) B目标RST分布; (c) A目标RST分布; (d) B目标RST分布
Fig. 10. (color online) RST distribution of two targets: (a) Target A; (b) Target B; (c) RST distribution of A; (d) RST distribution of B.

以匹配的空间频率采集中频段的目标信息. 同理计算中频 RST 值, 指导高频区域的信号采集. 这样根据 RST 分布图所提供的这三者关系选择合适的发射阵列配置, 使得阵列空间频谱布局尽量与目标空间频谱相匹配, 可达到优化发射阵列出射孔径配置的目的.

4 结 论

本文讨论了发射阵列的冗余度与成像质量的关系, 并以此为基础, 结合目标的纹理特性构建了 RST 分布图; 揭示了最小冗余度阵列配置并不是成像质量最好的配置的原因; 提出了发射阵列工作时如何使其与目标本身空间频谱特性匹配的方法. 以 RST 为参考的发射阵列工作方式, 可提高阵列多光束照射目标的工作效率与成像质量.

参考文献

- [1] Luo X J, Zhang Y, Gao C X, Ren J, Cao B, Liu H, Chen M L 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 0314001 (in Chinese) [罗秀娟, 张羽, 高存孝, 任娟, 曹蓓, 刘辉, 陈明徕 2015 光学学报 **35** 0314001]
- [2] Zhang Y, Luo X J, Xia A L, Cao B, Cheng Z Y, Zeng Z H, Si Q D, Wang B F 2014 *Acta Photon. Sin.* **43** 0311001 (in Chinese) [张羽, 罗秀娟, 夏爱利, 曹蓓, 程志远, 曾志红, 司庆丹, 王保峰 2014 光子学报 **43** 0311001]
- [3] Cao B, Luo X J, Si Q D, Zeng Z H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 054204 (in Chinese) [曹蓓, 罗秀娟, 司庆丹, 曾志红 2015 物理学报 **64** 054204]
- [4] Zhang W X, Xiang L B, Kong X X, Li Y, Wu Z, Zhou Z S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164203 (in Chinese) [张文喜, 相里斌, 孔新新, 李扬, 伍州, 周志盛 2013 物理学报 **62** 164203]
- [5] Zhang Y, Yang C P, Guo J, Kang M L, Wu J 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 571 (in Chinese) [张炎, 杨春平, 郭晶, 康美苓, 吴健 2011 强激光与粒子束 **23** 571]
- [6] Dong L, Liu X Y, Lin X D, Wei P F, Yu S H 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 0201004 (in Chinese) [董磊, 刘欣悦, 林旭东, 卫沛锋, 于树海 2012 光学学报 **32** 0201004]
- [7] Zhao M B, He J, Fu Q 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 0628002 (in Chinese) [赵明波, 何峻, 付强 2012 光学学报 **32** 0628002]
- [8] Holmes R B, Ma S, Bhowmik A, Greninger C 1996 *Opt. Soc. Am.* **13** 351
- [9] Arzac J 1955 *Compt. Rend. Acad. Sci.* **240** 942
- [10] Cuellar L E, Stapp J, Cooper J 2005 *Proc. SPIE* **5896** 58960D
- [11] Wang X W, Li Q, Wang Y G, Chen W, Hu X J 2009 *J. National Univ. Defense Technol.* **31** 38 (in Chinese) [王小伟, 黎全, 王雁桂, 陈卫, 胡小景 2009 国防科技大学学报 **31** 38]
- [12] Si Q D, Luo X J, Zeng Z H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104203 (in Chinese) [司庆丹, 罗秀娟, 曾志红 2014 物理学报 **63** 104203]
- [13] Cuellar L E, Cooper J, Mathis J, Fairchild P 2008 *Proc. SPIE* **7094** 70940G
- [14] Moffet A T 1968 *IEEE AP-16* 172

Analysis of the redundancy of Fourier telescope transmitter array and its redundancy-strehl ratio-target texture distribution characteristic*

Zhang Yu[†] Luo Xiu-Juan Cao Bei Chen Ming-Lai Liu Hui Xia Ai-Li Lan Fu-Yang

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

(Received 18 January 2016; revised manuscript received 15 February 2016)

Abstract

The Fourier telescope is a kind of active illumination imaging with high resolution by using multi-interfering fringes generated by the multi-beams from the large transmitter arrays. According to the imaging principle, the beams from one laser source are split and each beam is applied with a different tiny frequency shift so that the interfering fringes may moving across the target. The configuration of the beams changes so that they would generate fringes in different spatial frequencies and different directions. Recently, most of researches focused on the factors such as the baseline scale and data sampling efficiency that may affect the imaging quality. However, there are other two factors, i.e., the configuration of the transmitter and its redundancy, which need studying. In Fourier telescope, if the direction and spatial frequency of the fringe patterns that are generated by the change of different baseline configurations match each other, the target surface information would be a crucial factor that affects the image quality.

In the first part of this article, the practicability of zero redundancy of baseline is analyzed. The results show that the baseline cannot have zero redundancy due to the iteration algorithm. Then the minimum redundancy is analyzed and the minimum redundancy line is proposed. By using the Strehl ratio as the merit of the imaging quality, the concept of redundancy-strehl ratio-target texture distribution (RST) and calculation method are proposed. This method integrates the transmitter redundancy, target detail information and image quality together. The distribution of RST value on the frequency plane is compared with the minimum redundancy line. If the RST point is located on the horizontal side compared with the line, the target detail information on this baseline is mainly in the horizontal direction. On the other hand, if the RST point is located on the longitude side, the target information is mainly in the longitude direction. Therefore this new proposed method reveals the relationship between target spatial information and the baseline configuration. In this article T-shaped transmitter array is adopted, and the Fourier components are mainly distributed on the rectangle plane. According to this relationship and calculated RST value, the working transmitter may continuously rectify its scale and shifting patterns so that the spatial frequencies and directions of fringes may match the target Fourier components in time. In this article, three simulated images and two real images are tested by the proposed method, and the results show that the RST values and the distributions well reveal the relationship between the detailed information and the baseline configurations.

Now the Fourier telescope follows the procedure from laboratory setup to the real system research. Considering the convenience and cost of project realization, this method is helpful for analyzing the real system of the transmitter configuration and enhancing working efficiency.

Keywords: Fourier telescope, spatial spectrum, redundancy, image quality

PACS: 42.15.Eq, 42.30.-d, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.65.114201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61505248).

† Corresponding author. E-mail: yuzhang16@opt.ac.cn