

# 多通道宽幅度合成孔径激光成像 雷达收发装置优化研究

张波<sup>1,2</sup>, 周煜<sup>1\*</sup>, 孙建锋<sup>1</sup>, 张国<sup>1,2</sup>, 李光远<sup>1,2</sup>,  
许蒙蒙<sup>1,2</sup>, 贺红雨<sup>1,2</sup>, 劳陈哲<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光通信与探测技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 本文开展了多通道宽幅度合成孔径激光成像雷达(SAIL)收发装置的优化研究,提出了一种实现远场瞬时宽幅式的成像方法,并给出了多通道宽幅度 SAIL 收发装置的结构图。重点对发射光路进行了研究,分析了光纤阵列器中发射光束排布的特点,并给出了光纤阵列器中发射光纤的倾斜排布方案。而后,对发射光纤排布方案进行了优化,建立了多通道宽幅度 SAIL 发射装置的发射光束排布模型,给出了光纤阵列器中发射光束排布的最佳方案并进行了分析。最后,给出了多通道宽幅度 SAIL 接收装置中阵列探测器的结构图。这对远距离高分辨率宽幅度的机载 SAIL 研究具有重要的意义。

**关键词** 遥感; 激光雷达; 光纤排布; 优化模型; 多通道

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0528002

## Optimization Research on Multi-Channel Wide-Swath Synthetic Aperture Imaging Ladar Transceiver System

Zhang Bo<sup>1,2</sup>, Zhou Yu<sup>1</sup>, Sun Jianfeng<sup>1</sup>, Zhang Guo<sup>1,2</sup>, Li Guangyuan<sup>1,2</sup>,  
Xu Mengmeng<sup>1,2</sup>, He Hongyu<sup>1,2</sup>, Lao Chenzhe<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of  
Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The multi-channel wide-swath synthetic aperture imaging ladar (SAIL) transceiver system is researched. A method to realize the far-field instantaneous wide-swath imaging is presented. The structure of multi-channel wide-swath SAIL transceiver system is analyzed. In particular, the transmitter device is studied and the characteristics of the layout of fibers in the fiber array device are analyzed. The tilt layout of the fibers is given. After that, we further optimize the fiber layout in the fiber array device. The layout model of the fibers for the multi-channel wide-swath SAIL launcher is established, the best layout of the fibers is given. Finally, the structure of the array detectors in the multi-channel wide-swath SAIL receiver is given. This will be of vital significance for the long-distance high-resolution wide-swath airborne SAIL.

**Key words** remote sensing; ladar; fiber layout; optimization model; multi-channel

**OCIS codes** 280.3640; 060.2310

收稿日期: 2017-09-06; 收到修改稿日期: 2017-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(61505233, 61377004)

作者简介: 张波(1991—), 女, 博士研究生, 主要从事空间激光雷达和激光通信等方面的研究。

E-mail: zhangbo@siom.ac.cn

导师简介: 孙建锋(1978—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间激光雷达和激光通信等方面的研究。

E-mail: sunjianfeng@163.com

\* 通信联系人。E-mail: sunny@mail.siom.ac.cn

## 1 引 言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)是能够在远距离得到厘米级成像分辨率的唯一的成像观察手段,其原理取之于射频领域的合成孔径雷达(SAR)<sup>[1-6]</sup>。相比之下,光波波长比微波波长小3~6个数量级左右<sup>[7]</sup>,因而SAIL的分辨率比SAR要高3~6个数量级,同时产生的问题是视场要小2~5个数量级<sup>[8-9]</sup>。当前国内外实现的机载SAIL的最大成像视场为4.8 mrad,远小于SAR和CCD相机的视场<sup>[10-11]</sup>。为了解决这个问题,有如下几种方案:1)在发射系统中加入透镜<sup>[2]</sup>,扩大视场,但是单个激光器的功率不能无限提高,而且会引入非线性效应,如受激拉曼散射等,另外还会引入额外的像差;2)采用扫描探测的方式,扩大视场,但是会导致分辨率的降低,视场拓展越多,分辨率越低<sup>[12]</sup>;3)将多束光束进行合束,但是需要锁相,而且会造成波面误差和能量损失<sup>[13-16]</sup>。此外,SAIL需要在方位向上实现二次项匹配,需要接近衍射极限的光波波面,因此通常采用光纤激光器做光源。而大模场单模保偏光纤激光器<sup>[17-18]</sup>在低功率时可以实现单模输出,高功率时则会出现多模,导致输出光束质量下降,因此通常采用单模保偏光纤激光器,而单模光纤在高功率下非线性效应更加突出。文献<sup>[19]</sup>提出了一种方位向多发多收SAIL体制,利用方位向的多通道数据合成,解决方位向高分辨率和距离向测绘带宽的矛盾。但是,该方案并未给出多发多收的SAIL的收发装置,并且没有考虑发射光路中发射光纤的包层和纤芯之间的占空比对远场成像的影响。

多发多收SAIL发射装置中将多个光束通过多根发射光纤同时发出,作为多发多收SAIL的发射光路。如果多发多收SAIL的发射光纤在与顺轨向垂直的方向上进行排布,由于光纤包层的存在,目标面在交轨向上并没有被完整照射,当SAIL在顺轨向进行条带扫描时,成的像只是物体的各个分立的局部图片。

鉴于以上问题,本文开展了多通道宽幅度SAIL收发装置的研究,提出了一种实现远场瞬宽幅式的成像方法,并给出了多通道宽幅度SAIL收发装置的结构图。重点对发射光路进行了研究,分析了光纤阵列器中发射光束排布的特点,并给出了光纤阵列器中发射光纤的倾斜排布方案。而后,对发射光纤排布方案进行了优化,建立了多通道宽幅度SAIL发射装置的发射光束排布模型,给出了

光纤阵列器中发射光束排布的最佳方案并进行了分析。最后,给出了多通道宽幅度SAIL接收装置中阵列探测器的结构图。多通道宽幅度SAIL收发装置可配合扫描法进一步拓宽成像视场,这对远距离高分辨率宽幅度的机载SAIL的研究具有重要的意义。

## 2 多通道宽幅度SAIL收发装置

图1为多通道宽幅度SAIL收发装置的结构示意图,任意波形发生器(AWG)对激光光源产生的激光在频率调制器(FM)处进行调制,调制后的光经过光纤分束器(FBS)进行分束,FBS输出的光分别经过每一个光纤放大器(FA)进行放大,每一个FA的输出光纤经光纤阵列器进行排布,光纤阵列器位于准直透镜1的焦平面上,光纤阵列器输出的光经准直透镜1进行准直,之后一部分光透过分束器1(BS1)后由布儒斯特棱镜缩束器(BPBE)实现近场压缩、远场扩束,进一步扩展交轨视场,然后照到目标面上,该信号即为SAIL的发射信号;另一部分光经过分束器2(BS2)反射后,与经由透镜2(Len2)的目标面反射回波信号在阵列探测器(AD)焦面外差接收并转换为电信号,该电信号被采集卡(AC)采集,采集后的信号通过上位机(PC)处理,进行成像。

## 3 光纤阵列器中光纤的排布

多通道宽幅度SAIL收发装置的发射装置是将多个FA输出的光束同时发出,则光纤阵列器中各个发射光路的排布方式是多通道宽幅度SAIL收发装置能够增大条幅度和避免盲区的关键。由于发射光通过光纤输出,则光纤阵列器中各个发射光路的排布即为发射光纤的排布。

当多通道宽幅度SAIL的光纤阵列器中的发射光纤在与顺轨向垂直的方向上进行排布时,如图2(a)所示,发射光纤发出的光经准直透镜准直后,通过BPBE进行交轨向的近场压缩、远场扩束,光斑经过BPBE后由圆形变成了椭圆形。根据衍射规则,发射光在远场交轨向上拓展的倍数与在BPBE中交轨向上压缩的倍数相同,因此,发射光光斑在近场是长轴在顺轨向、短轴在交轨向的椭圆形光斑,而在远场则变成了长轴在交轨向、短轴在顺轨向的椭圆形光斑,其远场成像如图2(b)所示。由于光纤包层的存在,目标面在交轨向上并没有被完整照射,当SAIL在顺轨向进行条带扫描时,成的像只是物体的各个分立的局部图片,如图2(c)所示。

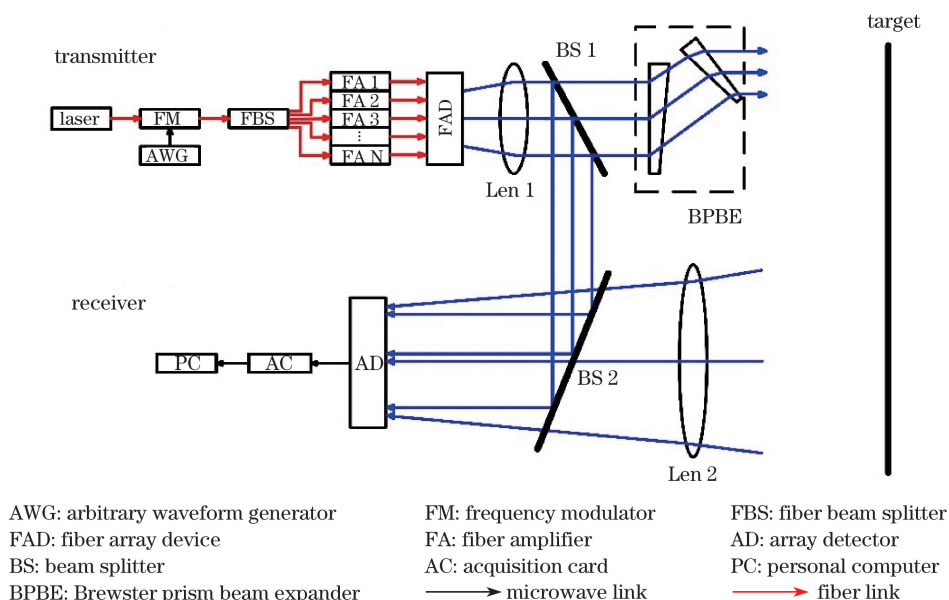


图 1 多通道宽幅度 SAIL 收发装置结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of the multi-channel wide-swath SAIL transceiver system

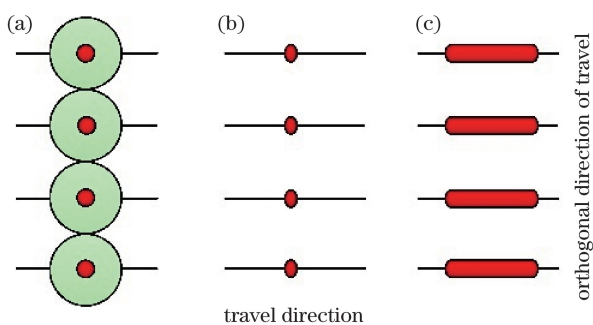


图 2 光纤阵列器中的光纤垂直排布示意图。

(a) 发射光纤; (b) 远场成像; (c) 远场条带成像

Fig. 2 Vertical layout schematic of the fibers in the fiber array device. (a) Emission fiber; (b) far-field imaging; (c) far-field strip imaging

为保证目标完整成像,在满足最大成像条幅度的

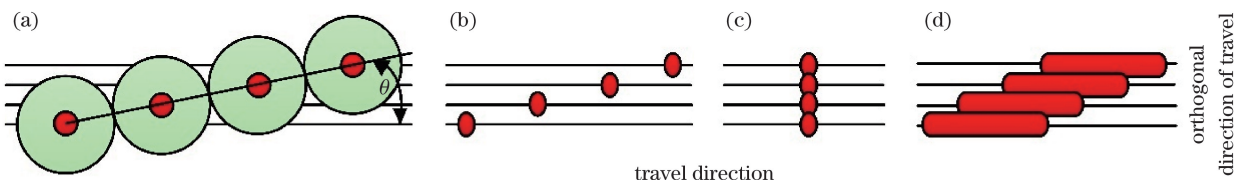


图 3 光纤阵列器中的光纤倾斜排布示意图。(a) 发射光纤; (b) 远场成像; (c) 远场交轨向投影; (d) 远场条带成像

Fig. 3 Tilt layout schematic of the fibers in the fiber array device. (a) Emission fiber; (b) far-field imaging; (c) far-field projection in the orthogonal direction of travel; (d) far-field strip imaging

#### 4 最佳发射光束排布方案

为保证目标完整成像,在满足最大成像条幅度的条件下,多通道 SAIL 发射光路中的光纤纤芯出射光必须在远场处交轨向上有部分重叠。上文已给

条件下,多通道宽幅度 SAIL 收发装置的发射装置中光纤纤芯出射的光必须在远场处交轨向上有部分重叠。根据这种情况,本文提出了光纤阵列器中的光纤倾斜排布方案,如图 3 所示。该方案是指发射光纤纤芯的中心的连线与顺轨向既不平行,也不垂直(此即为图 2 中的光纤垂直排布方案),而是有一定的倾斜角,但是所有光纤的发射端面都是共平面的,且都位于顺轨向与交轨向组成的平面内。图 3(a)为多通道宽幅度 SAIL 收发装置的发射装置中光纤倾斜排布示意图,图 3(b)为相应的远场成像示意图,图 3(c)为相应的交轨向上的投影,图 3(d)为相应的远场条带扫描成像示意图。根据图 3(c)和图 3(d)可以看出,目标在被 SAIL 照射时,光斑在交轨向上有部分重叠,则目标可以被完全覆盖,可以完整地成像。

出了光纤阵列器中的光纤倾斜排布方案。但是,发射光束需要通过准直透镜进行准直,为获得衍射极限光,光纤阵列在准直透镜的焦面处光斑包络尺寸越大,对准直透镜要求越高,因此光纤阵列器的外接圆的半径越小越好,需要对光纤阵列器中发射光束

的排布方案进行进一步的优化。根据以上分析,光纤阵列器中光纤的排布需要满足以下条件:1)在满足最大成像条幅度的条件下,多通道 SAIL 发射装置发射光斑必须在远场处交轨向上有部分重叠,以保证目标完整成像;2)光纤阵列器的外接圆的直径越小越好。

#### 4.1 模型建立

根据以上分析,可以建立光纤阵列器中光纤的排布模型,如图 4 所示。共有  $n$  根光纤,光纤直径均为  $D$ ,纤芯直径均为  $d$ , $n$  根光纤的编号分别为  $f_1, f_2, \dots, f_n$ ,坐标分别为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ,每根光纤的纵坐标固定,且下标相邻的两根光纤的纵向间距值  $d_r$  固定。为了实现最大成像条幅度,通常希望  $d_r$  越大越好,但是光纤纤芯在远场对目标的照射范围相当于光纤纤芯在远场(机载雷达通常成像距离在几公里之外,满足夫琅禾费远场条件)的成像,即相当于对光源做两次傅里叶变换,此时纤芯的图像在远场进行了恢复,如果两根纤芯在交轨向上不重合,则在远场成像时光斑也不会重合,这一结果与目标距离无关。因此,要求  $d_r < d$ ,这样即使不使用缩束器,也能保证每根光纤的纤芯在交轨向上有重叠。为了降低对光纤排布的要求,本文使用 BPBE 结合光纤排布来扩大成像视场,因此  $d_r$  值的确定与 BPBE 的参数设置有关,与目标距离无关。每根光纤的横坐标任意,但是任意两根光纤不能相交(可相切或相离),即任意两根光纤之间的距离  $g$  必须大于等于光纤直径  $D$ 。为简化计算, $f_1$  的横纵坐标都设为 0,要求最终的排布方式为  $n$  根光纤在横轴上的覆盖范围  $L_a$  及在纵轴上的覆盖范围  $L_r$  组成的外接圆直径最小,即求最佳发射光束排布  $L = (f_1, f_2, \dots, f_n)$  使得  $R$  的值最小:

$$\min R = \sqrt{L_a^2 + L_r^2} \quad (1)$$

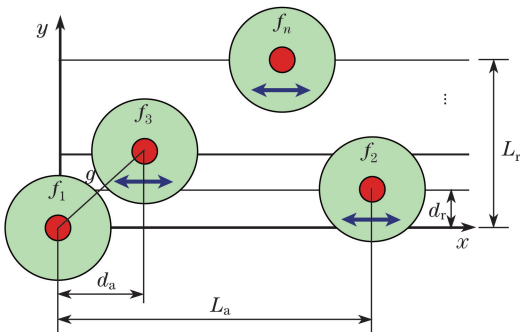


图 4 光纤阵列器中的光纤排布模型示意图

Fig. 4 Layout model of the fibers in the fiber array device

$L_a, L_r$  满足的方程为

$$\begin{cases} y_m = (m - 1)d_r, 1 \leq m \leq n, m \in \mathbf{N}^* \\ g = \sqrt{(x_m - x_j)^2 + (y_m - y_j)^2} \geq D, \\ 1 \leq m, j \leq n, m \neq j, m, j \in \mathbf{N}^* \\ x_1 = 0 \\ y_1 = 0 \\ L_a = \max(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ L_r = (n - 1)d_r \end{cases} \quad (2)$$

多通道宽幅度 SAIL 发射装置中发射光束排布的问题实际上是一个优化组合问题。由(1)式和(2)式可知,当光纤数量一定时, $L_r$  值是确定的,那么为了得到最小的  $R$ ,则希望  $L_a$  值越小越好,因此问题可转化为求  $L_a$  的最小值。

#### 4.2 算法

图 5 为多通道宽幅度 SAIL 光纤阵列器中光纤排布模型的优化算法流程图。设置实验总次数为  $N$ ,当实验次数小于等于实验总次数时,进行以下操作:1)初始化光纤位置;2)按公式  $y_m = (m - 1)d_r, 1 \leq m \leq n, m \in \mathbf{N}^*$ ,计算每根光纤的纵坐标位置;3)计算每根光纤的横坐标位置,当相邻两根光纤的纵坐标大于等于  $D$  时,下一根光纤的横坐标等于上一根光纤的横坐标,否则,下一根光纤与上一根坐标

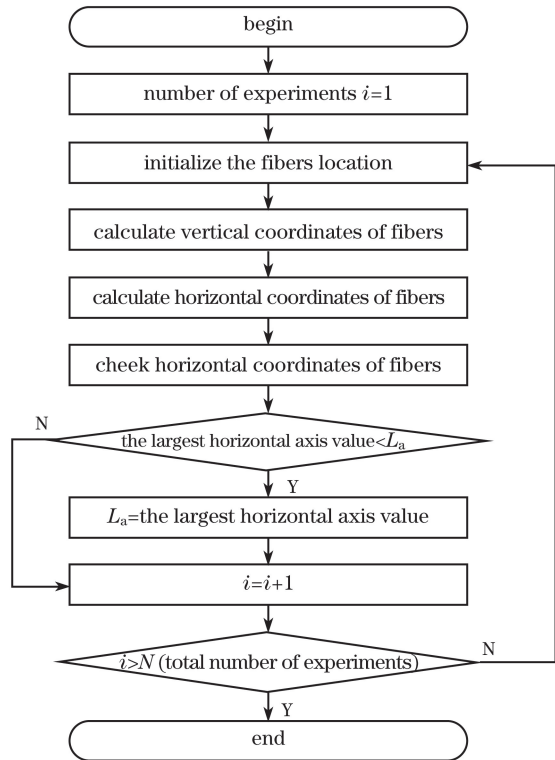


图 5 光纤阵列器中光纤排布模型的优化算法流程图

Fig. 5 Optimal algorithmic flow chart of the fiber layout model in the fiber array device

相切,以保证  $L_a$  值最小,因此下一根光纤的横坐标为  $x_{m+1} = \sqrt{D^2 - (y_m - y_{m+1})^2} + x_m, 1 \leq m \leq (n - 1), m \in \mathbf{N}^*$ ; 4) 检验横坐标的数值,防止当前光纤与前面排好的光纤相交,找出与当前光纤相交的光纤,如光纤 3 和光纤 2,分别计算出在当前光纤纵坐标不变的情况下,分别与光纤 3 和光纤 2 相切的横坐标的位置,并取其中的最大值为当前光纤的横坐标,若无与当前光纤相交的光纤,则光纤的横坐标不变; 5) 将当前光纤排布中最大的横坐标值与已存在的  $L_a$  值进行比较,若当前光纤排布中最大的横坐标值小于已存在的  $L_a$  值,则将其赋给  $L_a$ ,再进行下一次实验,否则,直接进行下一次实验。当  $N$  次实验结束之后,  $L_a$  值即为光纤排布的  $N$  次实验过程中的最小值,亦即最优值,相应的排布为最优排布。当实验次数足够多时,可以找到光纤排布过程中的最优结果。

### 4.3 仿真结果

多通道宽幅度 SAIL 发射装置中发射光纤排布的问题是在图 3(a) 光纤倾斜排布的基础上如何进行进一步优化,有必要对光纤倾斜排布的情况作进一步的讨论。对于图 3(a) 中的倾斜排布,排布方式为  $L = (f_1, f_2, \dots, f_n), L_a$  值为

$$L_a = (n - 1) \times \sqrt{D^2 - d_r^2}. \quad (3)$$

多通道宽幅度 SAIL 发射装置中发射光束排布仿真时参数设置如下: 光纤直径  $D = 125 \mu\text{m}$ , 光纤纤芯直径  $d = 10 \mu\text{m}$ , 下标相邻的两根光纤交轨向上间隔  $d_r = 8 \mu\text{m}$ 。

当  $n = 12$  时,多通道宽幅度 SAIL 发射装置中发射光纤的最优排布与倾斜排布的对比如图 6 所示,最优排布为  $L = (f_1, f_{12}, f_2, f_{11}, f_3, f_{10}, f_4, f_9, f_5, f_8, f_6, f_7,)$ , 此时  $L_a = 1232.2 \mu\text{m}$ , 而光纤

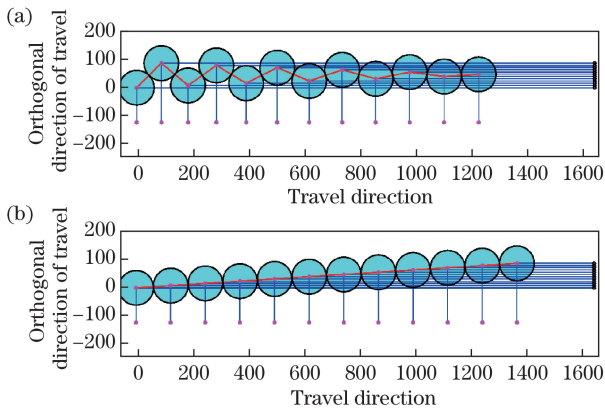


图 6  $n = 12$  时光纤的 (a) 最优排布与 (b) 倾斜排布的对比图  
Fig. 6 Comparison of (a) optimal and (b) tilted fiber layout when  $n = 12$

倾斜排布时的  $L_a = 1372.2 \mu\text{m}$ 。

当  $n = 16$  时,多通道宽幅度 SAIL 发射装置中发射光纤的最优排布与倾斜排布的对比如图 7 所示,最优排布为  $L = (f_1, f_{16}, f_2, f_{15}, f_3, f_{14}, f_4, f_{13}, f_5, f_{12}, f_6, f_{11}, f_7, f_{10}, f_8, f_9)$ , 此时  $L_a = 1506.3 \mu\text{m}$ , 而光纤倾斜排布时的  $L_a = 1871.2 \mu\text{m}$ 。

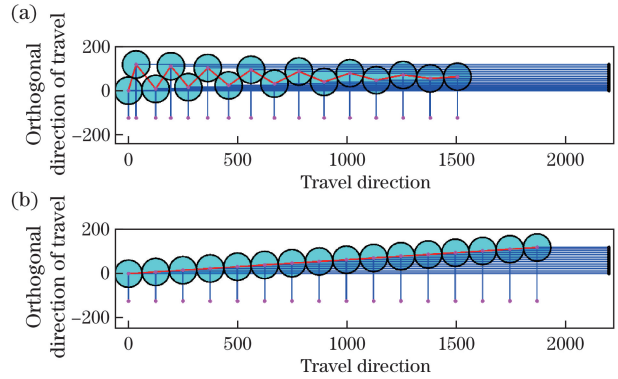


图 7  $n = 16$  时光纤的 (a) 最优排布与 (b) 倾斜排布的对比图  
Fig. 7 Comparison of (a) optimal and (b) tilted fiber layout when  $n = 16$

### 4.4 分析与讨论

在多通道宽幅度 SAIL 发射光束排布问题中,光纤排布优化前(倾斜排布)与优化后  $L_a$  值的对比如表 1 所示,优化因子  $\beta (0 < \beta < 1)$  定义为优化前后  $L_a$  的差值与优化前  $L_a$  值之比,即:

$$\beta = \frac{L_{a\text{-before}} - L_{a\text{-after}}}{L_{a\text{-before}}} \times 100\%. \quad (4)$$

表 1 优化前与优化后的  $L_a$  值对比

Table 1 Comparison of  $L_a$  value between pre-optimization and post-optimization

Number of fibers	$L_{a\text{-after}}$	$L_{a\text{-before}}$	$\beta / \%$
1	125.0	125.0	0
2	250.0	250.0	0
3	248.7	249.5	0.31
4	371.4	374.2	0.76
5	492.2	499.0	1.35
6	610.7	623.7	2.10
7	726.1	748.5	2.99
8	837.8	873.2	4.05
9	945.2	997.9	5.29
10	1047.4	1122.7	6.71
11	1434.4	1247.7	8.34
12	1232.2	1372.2	10.20
13	1312.3	1496.9	12.34
14	1381.6	1621.7	14.80
15	1437.1	1746.4	17.71
16	1506.3	1871.2	19.50

优化因子  $\beta$  的变化曲线如图 8 所示,可见,随着光纤数量的增大,优化因子也在增大,优化程度越来越明显。当光纤数量  $n=16$  时,优化因子  $\beta$  可以达到 19.5%。

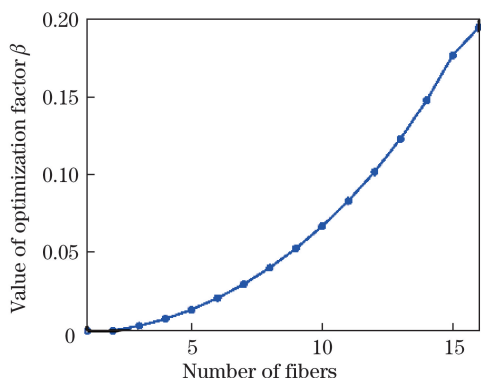


图 8 优化因子变化曲线

Fig. 8 Curve of the optimization factor

## 5 阵列探测器

多通道宽幅度 SAIL 发射装置中经过光纤阵列器输出的光,一部分作为雷达探测的本振光,另一部分照到目标面上进行反射,反射后的回波信号作为雷达探测的信号光。信号光与本振光被多通道宽幅度 SAIL 接收装置中的 AD 外差接收并转换为电信号,该电信号用 AC 进行采集,采集后的信号通过 PC 进行处理并恢复图像。因此,多通道宽幅度合成孔径激光成像雷达接收系统中 AD 的阵元结构必须与发射系统的光纤阵列器中的光纤排布保持一致。另外,由于信号光在经准直透镜进行准直后通过 BPBE 实现了交轨向的近场压缩、远场扩束,且发射光在远场交轨向上拓展的倍数与在 BPBE 中交轨向上压缩的倍数相同,因此在接收系统中,AD 在交轨向上的探测视场也需要增大相应的倍数。对于相干探测系统,接收视场受到天线定律制约,接收口径与视场成反比<sup>[20]</sup>。而为了提高接收分辨率,降低系统功耗,通常希望使用大口径接收。为了解决接收口径与视场之间的矛盾,可以使用阵列外差接收方式<sup>[21]</sup>。设接收口径为发射口径的  $a$  倍,BPBE 的压缩比为  $b$ ,则 AD 探测面上对应的单根发射光纤的单位阵元在顺轨向和交轨向上的阵列关系为: $a \times ab$ 。如:当光纤阵列器中的排布为图 3(a)中的倾斜排布方式时,其对应的 AD 中的阵元排布如图 9 所示。

## 6 结 论

开展了多通道宽幅度 SAIL 收发装置的优化研

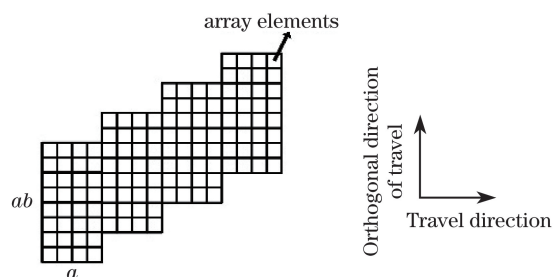


图 9 阵列探测器中的阵元排布图

究,提出了一种实现远场瞬时宽幅式的成像方法,并给出了多通道宽幅度 SAIL 收发装置的结构图。重点对发射光路进行了研究,分析了光纤阵列器中发射光束排布的特点,给出了光纤阵列器中发射光纤的倾斜排布方案。而后,对发射光纤排布方案进行了优化,建立了多通道宽幅度 SAIL 发射装置的发射光束排布模型,给出了光纤阵列器中发射光束排布的最佳方案并进行了分析。多通道宽幅度 SAIL 收发装置可配合扫描法,进一步拓宽成像视场,这对远距离高分辨率宽幅度的机载 SAIL 研究具有重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, *et al.* Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(22): 1983-1985.
- [2] Beck S M, Buck J R, Buell W F, *et al.* Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7621-7629.
- [3] Liu L R. Optical antenna of telescope for synthetic aperture radar[C]// SPIE, 2008, 7094: 70940F.
- [4] Liu L R. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 579-599.
- [5] Luan Z, Sun J F, Zhou Y, *et al.* Down-looking synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(11): 111101.
- [6] Liu L R. Synthetic aperture laser imaging radar (I): defocused and phase-biased telescope for reception Antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 997-1000.  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达 (I): 离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 997-1000.
- [7] Liu L R, Zhou Y, Zhi Y N, *et al.* A large-aperture

- synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900112.
- 刘立人, 周煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验室验证[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900112.
- [8] Liu L R. Principle of down-looking synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0928002.
- 刘立人. 直视合成孔径激光成像雷达原理[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0928002.
- [9] Lu D, Sun J F, Zhou Y, *et al.* Analysis on detection capability of wide field receiving synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0728003.
- 卢栋, 孙建峰, 周煜, 等. 大视场接收合成孔径激光成像雷达探测能力分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0728003.
- [10] Lu Z Y, Zhou Y, Sun J F, *et al.* Airborne down-looking synthetic aperture imaging lidar field experiment and its flight testing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0110001.
- 卢智勇, 周煜, 孙建峰, 等. 机载直视合成孔径激光成像雷达外场及飞行实验[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0110001.
- [11] Krause B W, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. *Conference on Lasers and Electro Optics*, 2011: 1-2.
- [12] Zhang K S, Pan J, Wang R, *et al.* Study of wide swath synthetic aperture lidar imaging technology[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 1-10.
- 张珂殊, 潘洁, 王然, 等. 大幅宽激光合成孔径雷达成像技术研究[J]. *雷达学报*, 2017, 6(1): 1-10.
- [13] Zhou H. Study on the key technologies of high efficiency fiber combiners[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- 周航. 高效率光纤合束器关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [14] Yang B L. Study on active and passive coherent combining of fiber lasers in all-fiber configuration[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- 杨保来. 全光纤结构光纤激光主被动相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [15] Yan A M, Liu L R, Liu D A, *et al.* Recent progress in phase-locking and aperture filling of fiber laser arrays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(8): 33-39.
- 闫爱民, 刘立人, 刘德安, 等. 光纤激光阵列锁相和孔径装填技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(8): 33-39.
- [16] Li B, Liu Y, Zeng S G, *et al.* Study on coherent beam combination of fiber laser array[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(5): 712-716.
- 李彪, 刘雁, 曾曙光, 等. 光纤激光阵列相干合束的研究[J]. *激光技术*, 2015, 39(5): 712-716.
- [17] Liu J, Gu Y R, Chen Z L, *et al.* Hundred-Watt-Level all fiber double-cladding photonic crystal fiber amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106007.
- 刘君, 谷炎然, 陈子伦, 等. 百瓦级全光纤双包层光子晶体光纤放大器[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106007.
- [18] Wen L, Liu B W, Song H Y, *et al.* All polarization-maintaining fiber amplification system to generate high-power and high-quality femtosecond laser pulses[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201011.
- 文亮, 刘博文, 宋寰宇, 等. 高功率、高质量全保偏光纤飞秒激光放大系统[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201011.
- [19] Tang Y, Qin B, Yan Y, *et al.* Multiple-input multiple-output synthetic aperture lidar system for wide-range swath with high azimuth resolution[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(6): 1401-1405.
- [20] Siegman E. The antenna properties of optical heterodyne receivers[C]//*Proceedings of the IEEE*, 1966, 54(10): 1350-1356.
- [21] Becherer R J, Veldkamp W B. Holographic beam shaping for optical heterodyne arrays in laser radars[C]//*SPIE*, 1982, 300: 185-193.