

# 10 m 衍射口径天基合成孔径激光雷达系统

胡烜<sup>1,2</sup>, 李道京<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室, 北京 100190;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 分析了用于对地成像的天基合成孔径激光雷达(SAL)系统指标,采用 10 m 口径膜基衍射光学系统以满足功率口径积的要求,用合成孔径雷达相控阵天线模型分析了器件参数和衍射光学系统的波束方向图。针对大口径衍射光学系统存在的孔径渡越问题,提出了基于数字信号处理的高距离分辨率信号补偿聚焦方法。研究结果表明:10 m 衍射口径天基 SAL 系统有可能对远距离特定目标进行高数据率、高分辨率成像跟踪,该技术的实现具有一定的可行性。

**关键词** 探测器; 天基激光雷达; 合成孔径成像; 衍射光学系统; 孔径渡越补偿; 雷达方程

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1210002

## Space-Based Synthetic Aperture LiDAR System with 10 m Diffractive Aperture

Hu Xuan<sup>1,2</sup>, Li Daojing<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>National Key Lab of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

**Abstract** The system indexes of a space-based synthetic aperture LiDAR (SAL) system used for ground imaging are analyzed. A membrane-based diffractive optical system with a 10 m aperture is chosen to satisfy the requirement of power aperture product. Based on the synthetic aperture radar phased array antenna model, the device parameters and beam patterns in the diffractive optical system are analyzed. Aiming at the aperture transition problem existing in the diffractive optical system with a large aperture, a signal compensation and focusing method with a high range resolution is proposed based on digital signal processing. The research results show that based on this space-based SAL with a 10 m diffractive aperture, the image tracking with a high resolution and a high data rate to the specific long-distance targets is possible. Moreover, the realization of this technique can be feasible.

**Key words** detectors; space-based LiDAR; synthetic aperture imaging; diffractive optical system; aperture transition compensation; radar equation

**OCIS codes** 040.1240; 140.3460; 030.1640

## 1 引 言

天基合成孔径雷达(SAR)能够进行全天时、全天候、大范围对地观测,在国土资源管理、灾害监测等民用领域和敏感区域监视侦查等军事领域均具有重要的应用价值。微波波段的天基 SAR 的高分辨率图像数据率通常较低,难以对地面感兴趣的目標进行高分辨率、高数据率成像。

合成孔径激光雷达(SAL)是 SAR 在激光频段

上的一种应用形式。激光波长比微波波长短三个数量级以上,若将 SAL 应用于天基平台,则有可能基于合成孔径实现高分辨率、高数据率对地成像。Krause 等<sup>[1]</sup>报道了美国洛克希德马丁公司利用机载 SAL 进行飞行实验的情况,验证了激光合成孔径成像的可行性。李道京等<sup>[2]</sup>分析了用于空间目标观测的天基 SAL 的系统指标和方案,并指出 SAL 可使用非成像光学系统。2018 年 4 月,美国报道了基于地球同步轨道(GEO)卫星平台的 SAL 实验系

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-08-16; 录用日期: 2018-08-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61771449)

\* E-mail: lidj@mail.ie.ac.cn

统<sup>[3]</sup>,尝试对 GEO 空间目标进行成像。目前,关于天基 SAL 对地成像的相关研究尚未见报道,因此分析天基 SAL 对地成像的可行性具有重要意义。

由于天基平台的功率有限,所以天基 SAL 需要具备较大口径的接收望远镜才能获得足够的功率口径积和成像信噪比。若天基 SAL 的轨道高度为 400 km,则所需的接收望远镜口径约为 10 m。由于对面形精度要求较高,基于传统光学系统实现 10 m 接收口径并非易事,此外 10 m 口径传统光学系统的体积和重量都很大,难以装载于天基平台。近年来,膜基衍射光学系统得到了快速发展<sup>[4]</sup>,该系统通过衍射器件引入较大的移相量,以实现波前控制、减小焦距,并实现系统的轻量化。与此同时,膜基衍射

光学系统对面形精度要求不高,相对大口径传统光学系统,大口径膜基衍射光学系统的加工难度较小。天基 SAL 具备工作视场小、使用非成像光学系统、单色且波长较可见光长等特点<sup>[5]</sup>,可用于膜基衍射光学系统来形成大的接收口径。

本文对一个 10 m 衍射口径天基 SAL 系统进行了指标分析,并针对大口径衍射光学系统存在的孔径渡越问题,提出了基于数字信号处理的高距离分辨率信号补偿聚焦方法。

## 2 系统指标分析

表 1 给出了一个可能具有应用价值的天基 SAL 的主要指标。

表 1 天基 SAL 的主要指标

Table 1 Main specifications of space-based SAL

Parameter	Value	Parameter	Value
Tracking height /km	400	Range width /km	5
Incident angle /( $^{\circ}$ )	30	Resolution with strip map mode /m	0.1
Operating range /km	460	Imaging signal-to-noise ratio /dB	Better than 10

### 2.1 成像分辨率和数据率

天基 SAL 的斜距分辨率可表示为

$$\rho_r = \frac{c}{2B_r}, \quad (1)$$

式中  $\rho_r$  为斜距分辨率, $c$  为光速, $B_r$  为发射信号带宽。若  $\rho_r = 10$  cm,根据(1)式, $B_r \approx 1.5$  GHz。

天基 SAL 的方位向分辨率  $\rho_a$  可表示为

$$\rho_a \approx \frac{\lambda R}{2V_a T_s \cos^2 \theta_s}, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为信号波长, $V_a$  为雷达的运动速度, $T_s$  为合成孔径时间, $\theta_s$  为斜视角, $R$  为目标到雷达的距离。若  $\rho_a = 10$  cm, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ , $V_a = 7000$  m/s, $\theta_s = 0^{\circ}$ ,根据(2)式, $T_s \approx 3.3$  ms(对应方位向波束宽度  $\Delta\theta_a \approx V_a T_s / R \approx 50 \mu\text{rad}$ ),成像数据率  $1/T_s \approx 300$  Hz。

若采用 Ka 波段天基 SAR 进行对地观测,假设波长为 8.6 mm,根据(2)式,要达到 10 cm 方位分辨率,所需成像时间约为 15 s,成像数据率约为 0.06 Hz。由此可见,相对于天基 SAR,天基 SAL 在对地成像图像数据率方面具备明显优势,这使得在远距离条件下对特定目标进行高分辨率成像和高数据率跟踪成为可能。

天基 SAL 接收口径选为 10 m,10 m 口径对应的衍射极限角分辨率约为  $1.06 \mu\text{rad}$ ,传统光学系统在实际大气条件下一般能达到 4 倍衍射极限角分辨率,在 460 km 处能实现的空间分辨率为 1.95 m。

显然,与传统激光雷达相比,天基 SAL 在分辨率上具有明显优势。

### 2.2 多普勒带宽和脉冲重复频率

天基 SAL 的多普勒带宽可表示为

$$B_a \approx \frac{2V_a \Delta\theta_a}{\lambda}, \quad (3)$$

式中  $B_a$  为多普勒带宽。根据(3)式,若  $\Delta\theta_a = 50 \mu\text{rad}$ , $B_a \approx 66$  kHz。

脉冲重复频率(PRF)需要大于多普勒带宽,因此,可设置等效 PRF 为 100 kHz。

高功率激光器难以高 PRF 工作,天基 SAL 拟在顺轨向设置 5 个接收通道以提高等效 PRF<sup>[6]</sup>,使实际发射脉冲的重复频率降至 20 kHz。此时,不模糊测距可达到 7.5 km。为此,可在顺轨向布设 5 个单元的探测器或光纤准直器阵列以形成 5 个接收通道,其间隔由卫星速度和 PRF 决定,在上述参数下,需要在 35 cm 内等间隔布设 5 个探测器或光纤准直器以形成顺轨阵列。

### 2.3 作用距离和成像信噪比

参照微波雷达方程<sup>[7]</sup>,SAL 的接收机输出单脉冲信噪比可表示为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{\eta_{\text{sys}} \eta_{\text{ato}} P_t G_t \sigma A_r T_p}{4\pi \Omega F_n h f_c R^4}, \quad (4)$$

式中: $P_t$  为发射信号峰值功率; $G_t = 4\pi / (\Delta\theta \Delta\theta_a)$  为发射增益, $\Delta\theta$  为俯仰向波束宽度; $\sigma$  为分辨单元对

应的目标散射截面积,为目标散射系数 $\sigma_0$ 、 $\rho_r$ 、 $\rho_a$ 三者之积; $A_r = \pi D^2/4$ 为接收望远镜的有效接收面积, $D$ 为接收望远镜口径; $F_n$ 为电子学噪声系数; $T_p$ 为脉冲宽度; $h$ 为普朗克常数; $f_c$ 为发射信号的中心频率; $\Omega$ 为目标后向散射立体角; $\eta_{at0}$ 为大气损耗; $\eta_{sys}$ 为SAL系统损耗,主要包括光学系统损耗 $\eta_{opt}$ 与电子学系统损耗 $\eta_{ele}$ , $\eta_{opt} = \eta_t \eta_r \eta_m \eta_D \eta_{oth}$ , $\eta_t$ 为发射光学系统损耗, $\eta_r$ 为接收光学系统损耗, $\eta_m$ 为外差探测时视场失配导致的光学系统损耗, $\eta_D$ 为光电探测器的量子效率导致的光学系统损耗, $\eta_{oth}$ 为其他光学系统损耗。

基于表2所示的系统参数,接收机输出单脉冲信噪比为-7.3 dB。根据第2.1节的分析,10 cm方位分辨率对应的合成孔径时间约为3.3 ms,对应相参积累脉冲数为70,所能获得的图像信噪比约为11.4 dB,可满足对地观测要求。

表2 天基SAL系统参数

Table 2 Parameters of space-based SAL system

Parameter	Value	Parameter	Value
$\lambda / \mu\text{m}$	10.6	$\eta_{at0}$	0.25
$P_t / \text{kW}$	80	$D / \text{m}$	10
$T_p / \mu\text{s}$	5	$\eta_t$	0.9
Duty cycle / %	10	$\eta_r$	0.8
$B_r / \text{GHz}$	1.5	$\eta_m$	0.5
$\Delta\theta / \text{mrad}$	10	$\eta_{oth}$	0.5
$\Delta\theta_a / \mu\text{rad}$	50	$\eta_D$	0.5
$\Omega / \text{rad}$	$\pi$	$\eta_{ele}$	0.75
$\sigma_0$	0.1	$F_n / \text{dB}$	3
$\rho_r / \text{m}$	0.1	$R_{SNR} / \text{dB}$	-7.3
$\rho_a / \text{m}$	0.1		

天基SAL可考虑设置小口径激光发射望远镜,使激光发射波束宽度与接收波束宽度相对应。文献[8]的研究表明,激光信号相干性差严重制约了SAL对远距离目标的高分辨率成像能力,因此这里考虑采用文献[9]所述本振数字延时的方式保持信号的相干性。平台振动和大气湍流均会在天基SAL回波信号中引入相位误差,导致成像结果散焦,这里考虑采用文献[10]所述正交基线干涉处理的方法,对振动相位误差和大气相位误差进行估计与补偿。

### 3 器件参数对衍射光学系统波束方向图的影响

基于相控阵模型对10 m口径膜基衍射光学系统进行理论分析。膜基衍射光学系统的衍射器件可看作二元光学器件<sup>[11-12]</sup>,相当于微波相控阵天线的移相器,其台阶数对应移相器的量化位数,台阶间距对应辐射单元的间隔。下面分析器件参数对衍射光学系统波束方向图的影响。

图1给出了远场聚焦状态下衍射主镜与焦距的几何关系,利用衍射主镜在不同位置引入不同的移相量,将接收信号转为同相球面波在焦点处实现聚焦,所引入的移相量 $\Delta\varphi(nd)$ 由直角三角形斜边与直角边距离之差决定,即

$$\Delta\varphi(n \cdot d) = 2\pi \frac{R_F(n) - F}{\lambda}, \quad (5)$$

式中 $R_F(n)$ 为主镜上距离中心 $nd$ 的 $P$ 点到焦点的距离, $R_F(n) = \sqrt{F^2 + (nd)^2} \approx F + (nd)^2/(2F)$ , $d$ 为衍射器件的台阶间距, $F$ 为衍射主镜的焦距。

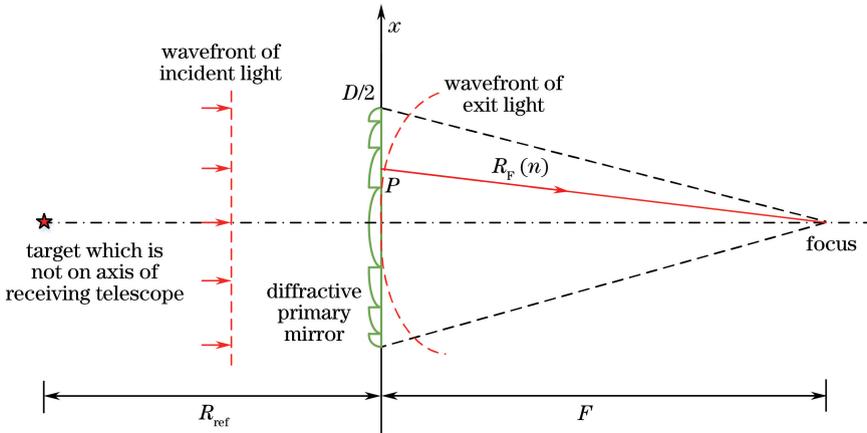


图1 聚焦状态下衍射主镜与焦距的几何关系

Fig. 1 Geometric relationship between diffractive primary mirror and focal length under focusing condition

下面对衍射主镜需要引入的移相量进行分析。衍射主镜口径为 10 m,在激光信号的  $10.6\ \mu\text{m}$  中心波长下,辐射单元间距可设置为  $10.6\ \mu\text{m}$ ,辐射单元数约为  $10^6$ 。图 2 为 20 m 焦距时衍射主镜需形成的相位变化曲线,主要为二阶相位,最大移相量约为  $3.5 \times 10^5\ \text{rad}$ 。

根据相控阵原理,衍射主镜引入的相位变化量可以  $2\pi$  为模折叠。图 3(a)、(b)分别为主镜中心处和边缘处的连续移相量,图 3(c)、(d)分别为 460 km 近场对应的波束方向图及其主瓣放大图,图 3(e)、(f)分别为远场对应的波束方向图及其主瓣放大图。近场条件下产生的波束宽度展宽有利于扩大幅宽,不影响 SAL 的成像分辨率,但会使回波信噪比有所降低,实际系统设计中应考虑其影响。此外,即使在

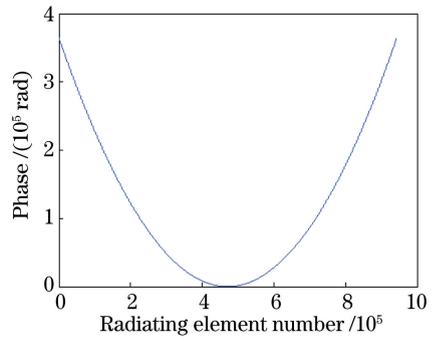


图 2 焦距 20 m 时衍射主镜需形成的相位变化曲线  
Fig. 2 Phase variation curve of diffractive primary mirror when focal length is 20 m

460 km 近场,波束宽度也远小于表 1 中的方位/俯仰向波束宽度,所以还需要考虑文献[5]所述馈源波

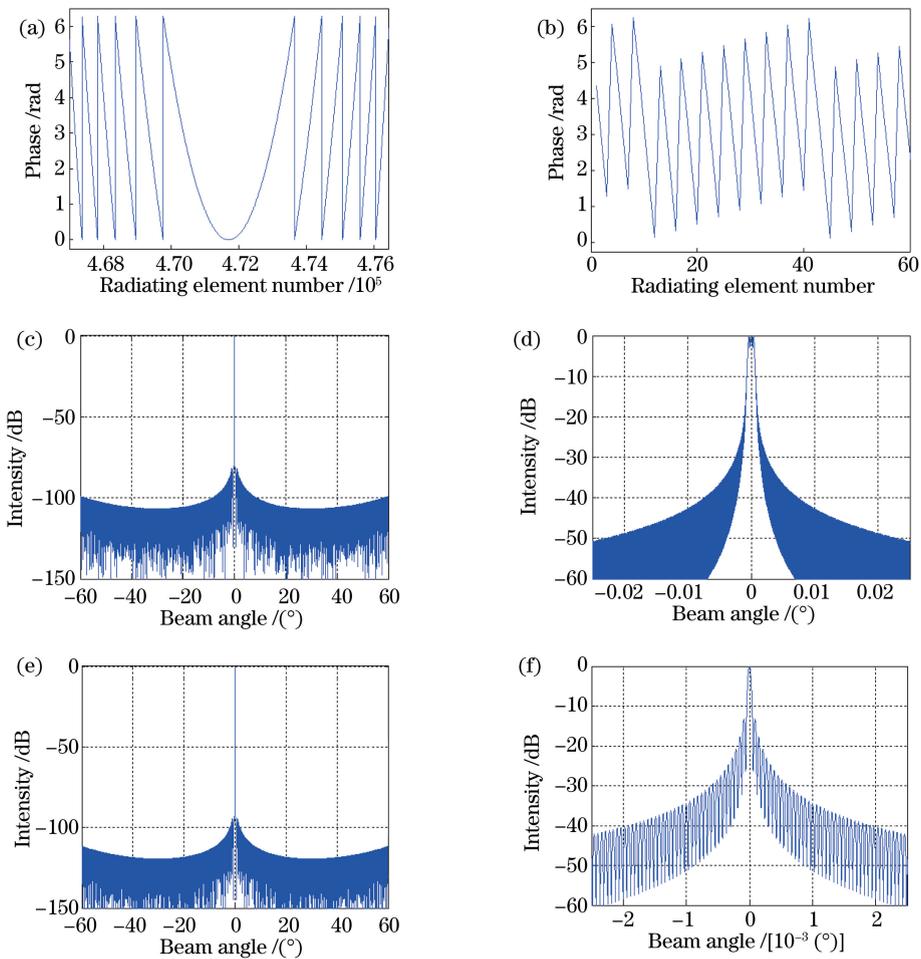


图 3 主镜的连续移相量和其对应的波束方向图。(a)主镜中心处的连续移相量;(b)连续的主镜边缘处的移相量;  
(c) 460 km 近场对应的波束方向图;(d)图 3(c)对应的主瓣放大图;(e)远场对应的波束方向图;(f)图 3(e)对应的主瓣放大图  
Fig. 3 Continuous phase-shifting and corresponding beam patterns of primary mirror. (a) Continuous phase-shifting at center of primary mirror; (b) continuous phase-shifting near mirror edge of primary mirror; (c) beam pattern of 460 km near field; (d) enlargement of main lobe corresponding to Fig. 3(c); (e) beam pattern of far field; (f) enlargement of main lobe corresponding to Fig. 3(e)

束展宽技术,以扩大波束宽度。

移相器的量化位数将直接影响波束方向图的远区副瓣和积分旁瓣比,从而影响衍射光学系统的衍射效率。

图 4(a)、(b)分别给出了折叠并 4 值化后的主镜中心处和边缘处移相量,图 4(c)、(d)分别为 460 km 近场情况下该移相量对应的波束方向图及

其主瓣放大图,图 4(e)、(f)分别为远场情况下该移相量对应的波束方向图及其主瓣放大图。

对比图 3 和图 4 可以看出,对主镜移相量进行 4 值化处理后,虽然波束方向图远区副瓣有所升高,但是主瓣和近区副瓣均与连续主镜移相量对应的波束方向图一致,说明衍射器件台阶数为 4 时,有可能满足 SAL 的使用要求。

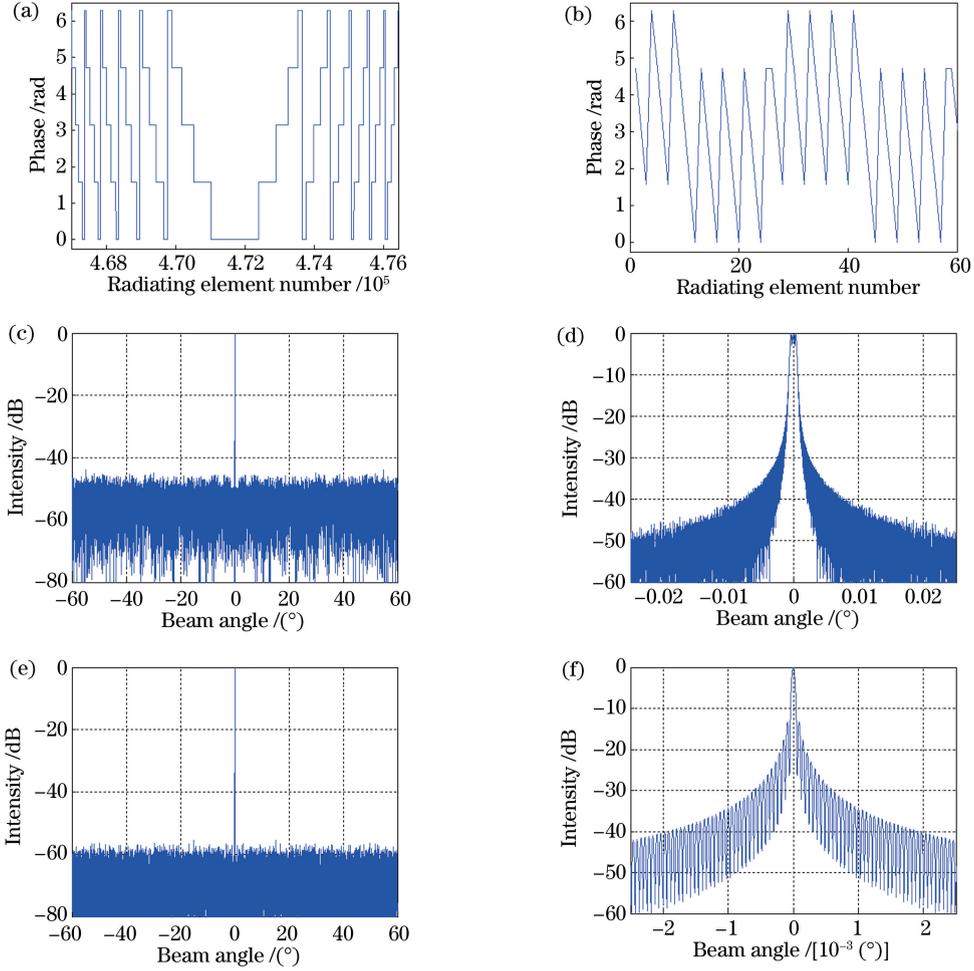


图 4 4 值化的主镜移相量和其对应的波束方向图。(a) 4 值化的主镜中心处的移相量; (b) 4 值化的主镜边缘处的移相量; (c) 460 km 近场对应的波束方向图; (d) 图 4(c) 对应的主瓣放大图; (e) 远场对应的波束方向图; (f) 图 4(e) 对应的主瓣放大图

Fig. 4 Phase-shifting and beam patterns of four quantization bits of primary mirror. (a) Phase-shifting of four quantization bits at center of primary mirror; (b) phase-shifting of four quantization bits near mirror edge of primary mirror; (c) beam pattern of 460 km near field; (d) enlargement of main lobe corresponding to Fig. 4(c); (e) beam pattern of far field; (f) enlargement of main lobe corresponding to Fig. 4(e)

## 4 孔径渡越补偿

### 4.1 孔径渡越现象分析

根据第 3 节的相关分析,衍射器件对入射到衍射主镜不同位置的光信号进行了不同的相移,但未对包络进行不同的时移。这将导致入射到衍射主镜不同位置的光信号在焦点处同相相加时包络难以对

齐,当包络错位大于半个距离分辨单元时,会导致距离向成像结果散焦,该现象与微波相控阵的孔径渡越现象类似<sup>[13]</sup>。下面对衍射主镜的孔径渡越现象进行理论推导和仿真分析。

假定天基 SAL 发射线性调频信号为

$$s_0(\hat{t}) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp(2\pi j f_c \hat{t}) \exp[j\pi K_r (\hat{t})^2], \quad (6)$$

式中  $\hat{t}$  为快时间,  $K_r$  为发射信号的调频频率,  $\text{rect}(\cdot)$  为矩形函数。

如图 1 所示, 假定在衍射主镜轴线上有一个参

考散射点, 其位于衍射主镜的远场且到衍射主镜的距离为  $R_{\text{ref}}$ , 那么到达衍射主镜端面上  $P$  点的回波信号可表示为

$$s_1(\hat{t}, n) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{\text{ref}}/c}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi f_c \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \exp\left[j\pi K_r \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)^2\right]. \quad (7)$$

位于衍射主镜端面上  $P$  点的二元光学器件会以移相器方式对回波信号等效插入相移量  $H_1(n)$ , 即

$$H_1(n) = \exp\left[2\pi j f_c \frac{R_F(n) - F}{c}\right]. \quad (8)$$

经  $P$  点穿过主镜后的回波信号可表示为

$$s_2(\hat{t}, n) = s_1(\hat{t}, n) H_1(n) = \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}}{T_p}\right] \times \exp\left\{2\pi j f_c \left[\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} + \frac{R_F(n) - F}{c}\right]\right\} \exp\left[j\pi K_r \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)^2\right]. \quad (9)$$

经  $P$  点到达主镜焦点的回波信号可表示为

$$s_3(\hat{t}, n) = s_2\left(\hat{t} - \frac{R_F(n)}{c}, n\right) = \text{rect}\left\{\left[\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} - \frac{R_F(n)}{c}\right] / T_p\right\} \times \exp\left[2\pi j f_c \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} - \frac{R_F(n)}{c}\right)\right] \exp\left\{j\pi K_r \left[\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} - \frac{R_F(n)}{c}\right]^2\right\}. \quad (10)$$

在焦点处相干累积后的回波信号可表示为

$$s_4(\hat{t}) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} s_3(\hat{t}, n) = \exp\left[2\pi j f_c \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} - \frac{F}{c}\right)\right] \times \sum_{n=-N/2}^{N/2} \text{rect}\left\{\left[\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} - \frac{R_F(n)}{c}\right] / T_p\right\} \exp\left\{j\pi K_r \left[\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} - \frac{R_F(n)}{c}\right]^2\right\}, \quad (11)$$

式中  $N$  为衍射主镜上的辐射单元数。

与本振信号混频并经光电转换后的电信号可表示为

$$s_5(\hat{t}) = s_4(\hat{t}) \exp(-2\pi j f_c \hat{t}) = \exp\left[-2\pi j f_c \left(\frac{2R_{\text{ref}}}{c} + \frac{F}{c}\right)\right] \times \sum_{n=-N/2}^{N/2} \text{rect}\left\{\left[\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} - \frac{R_F(n)}{c}\right] / T_p\right\} \exp\left\{j\pi K_r \left[\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} - \frac{R_F(n)}{c}\right]^2\right\}. \quad (12)$$

从(12)式可以看出, 同一散射点的回波信号经主镜不同位置辐射单元入射到焦点后, 虽然相位相同, 但是包络错位, 定义  $R_F(n)$  的变化范围  $D^2/(8F)$  为孔径渡越长度。当孔径渡越长度大于距离向分辨率  $c/(2K_r T_p)$  时, 孔径渡越将导致距离向成像结果散焦。

设衍射主镜的口径为 10 m、焦距为 20 m, 对孔径渡越现象进行仿真分析。为便于分析, 假定可以对从主镜不同位置入射到焦点的回波信号进行采样, 并基于发射信号构造滤波器进行脉冲压缩。图 5 给出了从衍射主镜不同位置入射到焦点的回波信号的脉冲压缩结果, 图 6 给出了在焦点处相干累加

之后的回波信号的脉冲压缩结果, 显然, 孔径渡越导致不同位置的回波信号间存在 0.6 m 的错位, 并使得距离向成像结果严重散焦。

#### 4.2 孔径渡越补偿

根据第 4.1 节的分析, 在存在孔径渡越时, 基于发射信号构造的滤波器与回波信号并不匹配。由于衍射主镜上的辐射单元到焦点的距离恒定且已知, 所以可以依据(12)式构造匹配滤波器, 对回波信号进行脉冲压缩, 匹配滤波器的频率响应为

$$H_5(f) = \mathcal{F}[s_5(\hat{t})]^*, \quad (13)$$

式中  $\mathcal{F}[\cdot]$  表示傅里叶变换。

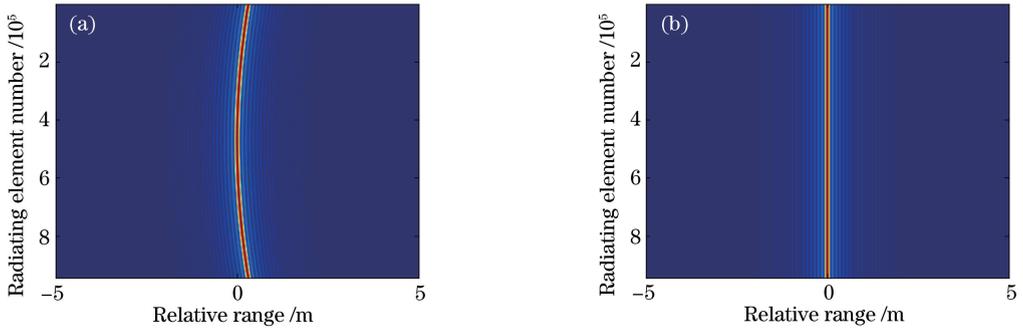


图 5 从衍射主镜不同位置入射到焦点的回波信号的脉冲压缩结果。(a)存在孔径过渡；(b)不存在孔径过渡  
Fig. 5 Pulse compression results of echo signal from different positions of diffractive primary mirror to focal point.  
(a) With aperture transition; (b) without aperture transition

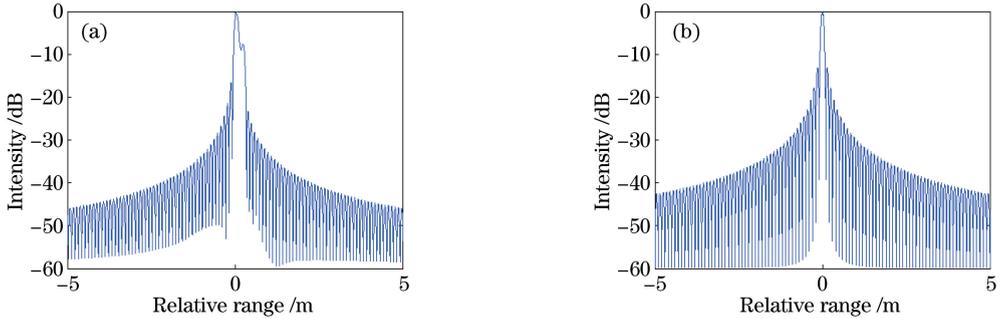


图 6 在焦点处相干累加后的回波信号的脉冲压缩结果。(a)存在孔径过渡；(b)不存在孔径过渡  
Fig. 6 Pulse compression results of summed echo signals at focal point. (a) With aperture transition;  
(b) without aperture transition

经过匹配滤波后的时域信号为

$$s_6(\hat{t}) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}[s_5(\hat{t})] H_5(f) \}, \quad (14)$$

式中  $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$  表示傅里叶逆变换。

图 7 给出了回波信号的幅频特性和相频特性，图 8 给出了匹配滤波器的幅频特性和相频特性，

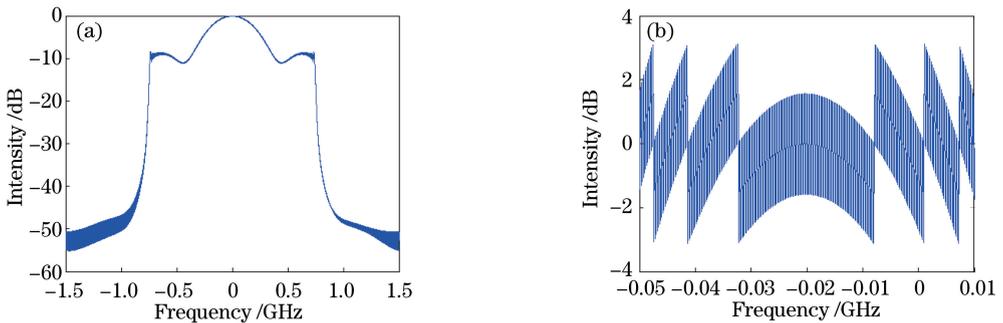


图 7 回波信号。(a)幅频特性；(b)相频特性

Fig. 7 Echo signals. (a) Amplitude-frequency characteristic; (b) phase-frequency characteristic

基于  $H_5(f)$  对匹配滤波后的信号的幅频特性进行校正：

$$s_7(f) = \frac{\text{rect}\left(\frac{f}{K_r T_p}\right) \mathcal{F}[s_6(\hat{t})]}{|H_5(f)|^2}. \quad (15)$$

图 9 给出了经过匹配滤波后的信号的幅频特性、相频特性以及时域波形。可以看出，经过匹配滤波，回波信号频谱的高阶相位被消除，但是由于幅频特性仍然存在一定的调制，所以脉冲压缩结果并不是理想的 sinc 函数波形。

先进行匹配滤波的目的是先消除高阶相位的影响，再进行幅频特性校正。

结合(13)~(15)式可以看出，经过校正后，在发射信号带宽对应的频带内，信号幅频特性的调制被消除。校正后回波信号的幅频特性、相频特性以及

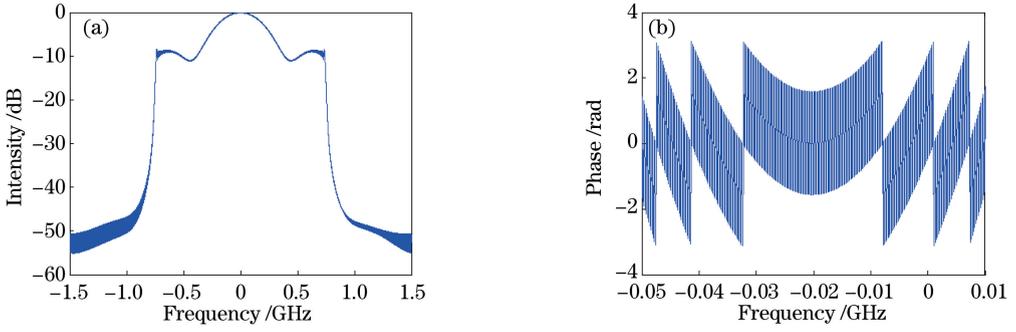


图 8 匹配滤波函数。(a)幅频特性;(b)相频特性

Fig. 8 Matched filter functions. (a) Amplitude-frequency characteristic; (b) phase-frequency characteristic

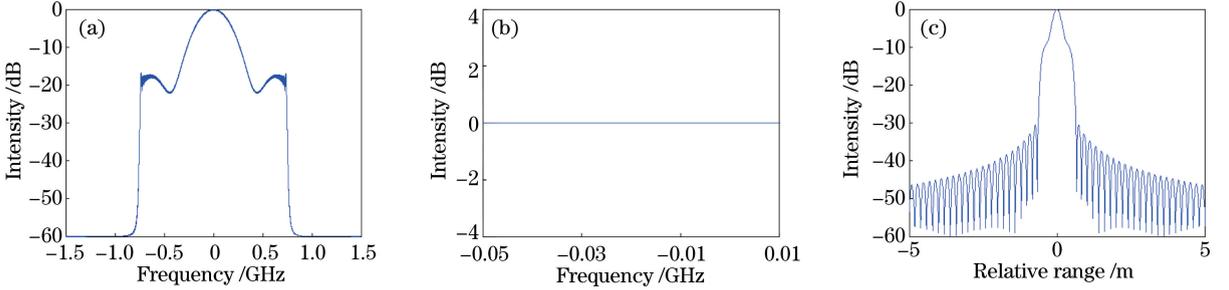


图 9 匹配滤波后的回波信号特性。(a)幅频特性;(b)相频特性;(c)时域信号

Fig. 9 Characteristics of echo signals after matched filtering. (a) Amplitude-frequency characteristic; (b) phase-frequency characteristic; (c) time domain signal

时域波形如图 10 所示。对比图 6(b)与图 10(c)可以看出,经过幅频特性补偿,脉冲压缩结果已接近理

想的 sinc 函数波形,与不存在孔径渡越时回波信号的脉冲压缩结果一致。

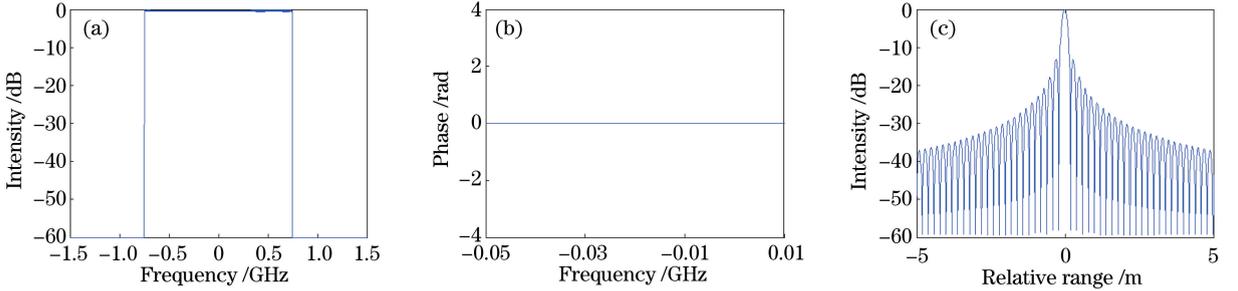


图 10 幅频特性校正后的回波信号。(a)幅频特性;(b)相频特性;(c)时域信号

Fig. 10 Echo signals after amplitude-frequency correction. (a) Amplitude-frequency characteristic; (b) phase-frequency characteristic; (c) time domain waveform

### 4.3 距离向分段补偿处理

根据第 4.2 节的相关分析,假定目标位于波束中心线上,则到达镜面不同位置的目标回波信号经过的距离近似相等,所以在孔径渡越补偿时仅需要考虑镜面不同位置到焦点的距离差即可。

若目标不在波束中心线上,则到达镜面不同位置的目标回波信号经过的距离不同,位于波束边缘的目标回波信号到达镜面两端的距离差可表示为

$$\Delta R \approx D \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right). \quad (16)$$

根据第 2 节的相关分析,天基 SAL 的方位向波束宽度远小于俯仰向波束宽度,所以此处仅考虑俯仰向波束宽度。若  $\Delta R \geq \rho_r/2$ ,则不能采用位于波束中心线上的参考点构造函数对波束内所有目标的回波信号进行统一的孔径渡越补偿,而应将波束分为若干子波束,用各子波束中心线上的参考点分别构造参考函数,以实现孔径渡越补偿,第  $k$  个子波束的波束中心线与原波束中心线的夹角(图 11)应满足

$$D \sin\left(\frac{\Delta\theta_k}{2}\right) < \frac{\rho_r}{2}. \quad (17)$$

各子波束对应的孔径渡越补偿函数推导过程与第 4.2 节相同, 仅需在公式推导过程中变更(7)式。

在推导第  $k$  个子波束的孔径渡越补偿函数时, (7) 式应变更为

$$s_1(\hat{t}, n) = \text{rect} \left\{ \left[ \hat{t} - \frac{\frac{2h}{\cos(\theta + \theta_k)} + nd \sin \theta_k}{c} \right] / T_p \right\} \exp \left\{ 2\pi j f_c \left[ \hat{t} - \frac{\frac{2h}{\cos(\theta + \theta_k)} + nd \sin \theta_k}{c} \right] \right\} \times \exp \left\{ j\pi K_r \left[ \hat{t} - \frac{\frac{2h}{\cos(\theta + \theta_k)} + nd \sin \theta_k}{c} \right]^2 \right\}, \quad (18)$$

式中  $\theta$  为 SAL 的下视角,  $\theta_k$  为第  $k$  个子波束中的参考点到 SAL 相位中心的连线与原波束中心线的夹角。

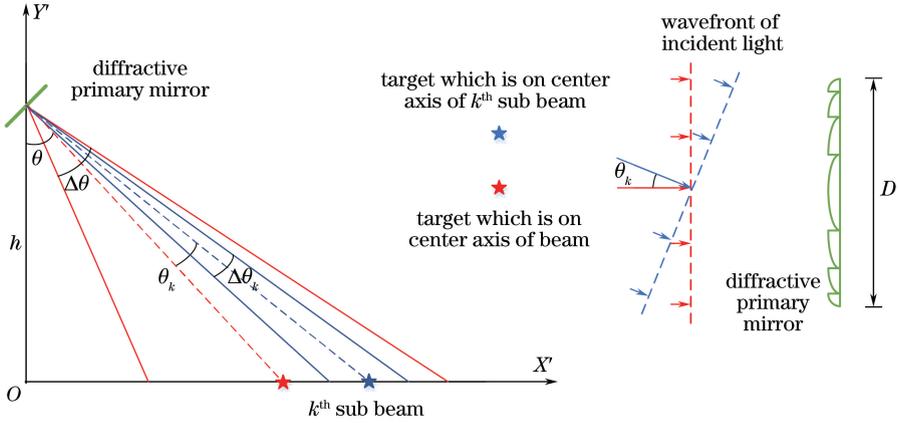


图 11 地距向几何关系

Fig. 11 Geometric relationship in ground-range direction

实际信号处理中不具备直接划分子波束的条件, 而是通过距离向分段聚焦间接达到子波束分别聚焦的目的, 第  $k$  个子波束对应的距离区间为

$$\left[ \frac{h}{\cos(\theta + \theta_k - \Delta\theta_k/2)}, \frac{h}{\cos(\theta + \theta_k + \Delta\theta_k/2)} \right].$$

在本文天基 SAL 系统参数下, 俯仰向波束宽度为 10 mrad, 划分为 3 个子波束后, 各子波束的波束

宽度满足(17)式。分别在波束下沿、中心和上沿设置三个目标, 用位于波束中心的目标构造参考函数进行孔径渡越补偿时, 补偿后的时域波形如图 12 所示, 可以看出, 位于波束下沿和波束上沿的目标旁瓣上升较多。图 13 给出了距离向分段进行孔径渡越补偿的结果, 可以看出三个点目标均得到了良好的聚焦。

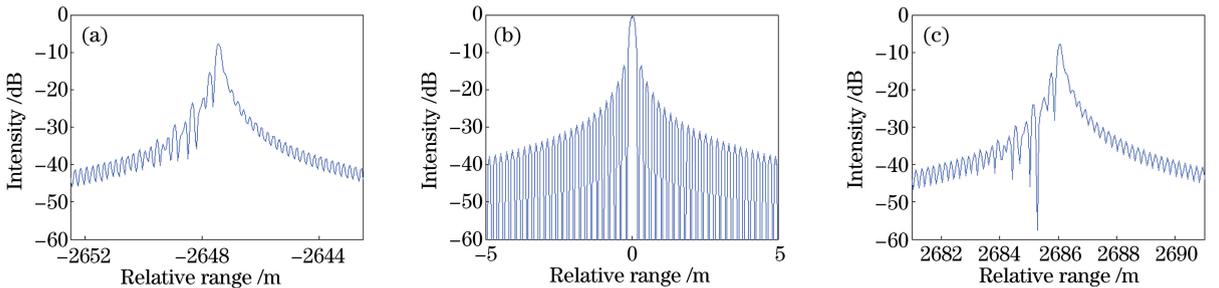


图 12 孔径渡越补偿后的时域回波信号(不进行分段补偿)。(a)位于波束下沿的目标;

(b)位于波束中心的目标;(c)位于波束上沿的目标

Fig. 12 Time domain echo signal after aperture transition compensation (without segmented compensation).

(a) Target at down edge of beam; (b) target at center of beam; (c) target at upper edge of beam

在理论分析过程中, 依据观测几何和孔径模型构造孔径渡越补偿函数, 在实际应用中, 考虑到系统

误差, 要实施孔径渡越补偿, 需要在大信噪比下进行定标处理(在地距方向设置多个定标体), 以获得孔

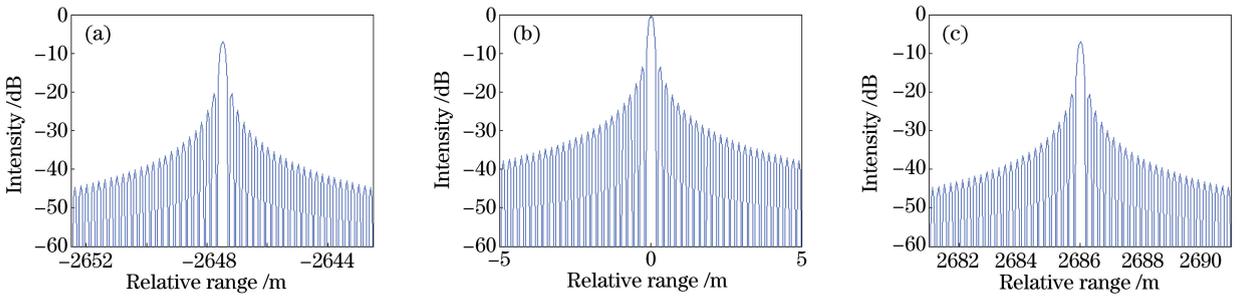


图 13 孔径渡越补偿后的时域回波信号(进行分段补偿)。(a)位于波束下沿的目标; (b)位于波束中心的目标;(c)位于波束上沿的目标

Fig. 13 Time domain echo signal after aperture transition compensation (with segmented compensation).

(a) Target at down edge of beam; (b) target at center of beam; (c) target at upper edge of beam

径渡越补偿函数。

上述分析均假定目标位于接收望远镜的远场,目标回波信号以平面波的形式到达接收望远镜。事实上,对于天基 SAL,即使目标位于接收望远镜的近场,近场效应导致的目标到望远镜上各处的距离差也远小于距离分辨率(以 460 km 近场目标为例,其到 10 m 衍射口径望远镜中心和边缘的距离差仅约  $27 \mu\text{m}$ ,远小于距离分辨率),所以第 4.2 节所述方法也同样适用于近场目标的孔径渡越补偿。

## 5 结 论

分析了 10 m 衍射口径天基 SAL 系统指标,同时研究了器件参数对衍射光学系统波束方向图的影响,并提出了基于数字信号处理的孔径渡越补偿方法。研究表明,天基 SAL 具备高分辨率、高数据率对地成像观测的优势。

10 m 衍射口径光学系统可考虑采用两级压缩光路实现,第一级压缩光路可将光学口径从 10 m 压缩到 300 mm,第二级压缩光路可将光学口径从 300 mm 压缩到 15 mm,系统接收探测性能主要由主镜尺寸决定。由于天基 SAL 工作在红外波段,10 m 口径膜基衍射光学系统对面形精度要求不高,焦距可短于 20 m,其技术实现具有一定的可行性,大口径薄膜望远镜的折叠/展开可借鉴我国已有的大型折叠/展开微波天线的研制基础。

讨论了天基主动 SAL 成像的相关问题,未来实际系统设计中,可考虑利用膜基衍射系统的栅瓣形成双波长系统,通过增设被动红外成像通道,利用大口径薄膜望远镜实现主被动结合的高分辨率对地成像,持续开展相关研究工作具有重要意义。

## 参 考 文 献

[1] Krause B W, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic

aperture lidar flight demonstration[C]. Quantum Electronics and Laser Science Conference 2011, 2011: PDPB7.

[2] Li D J, Du J B, Ma M, *et al.* System analysis of spaceborne synthetic aperture lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 262-269.

李道京, 杜剑波, 马萌, 等. 天基合成孔径激光雷达系统分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 262-269.

[3] Gunter's Space Page. EAGLE[EB/OL]. [2018-04-14]. [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/eagle.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/eagle.htm).

[4] Jiao J C, Su Y, Wang B H, *et al.* Development and application of GEO membrane based diffraction optical imaging system[J]. Space International, 2016, 40(6): 49-55.

焦建超, 苏云, 王保华, 等. 地球静止轨道膜基衍射光学成像系统的发展与应用[J]. 国际太空, 2016, 40(6): 49-55.

[5] Li D J, Hu X. Optical system and detection range analysis of synthetic aperture lidar[J]. Journal of Radars, 2018, 7(2): 263-274.

李道京, 胡焯. 合成孔径激光雷达光学系统和作用距离分析[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 263-274.

[6] Krieger G, Gebert N, Moreira A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1(4): 260-264.

[7] Skolnik M I. Radar handbook[M]. Wang J, Lin Q, Song C Z, *et al.*, Transl. 2nd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2003: 9-10

斯科尼克. 雷达手册[M]. 王军, 林强, 宋慈中, 等, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2003: 9-10

[8] Hu X, Li D J, Tian H, *et al.* Impact and correction of phase error in lidar signal to synthetic aperture imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(3): 0306001.

胡焯, 李道京, 田鹤, 等. 激光雷达信号相位误差对

- 合成孔径成像的影响和校正[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0306001.
- [9] Hu X, Li D J, Zhao X F. Maintaining method of signal coherence in synthetic aperture ladar based on local oscillator digital delay[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0510003.  
胡焜, 李道京, 赵绪锋. 基于本振数字延时的合成孔径激光雷达信号相干性保持方法[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0510003.
- [10] Du J B, Li D J, Ma M, *et al.* Vibration estimation and imaging of airborne synthetic aperture ladar based on interferometry processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0910003.  
杜剑波, 李道京, 马萌, 等. 基于干涉处理的机载合成孔径激光雷达振动估计和成像[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0910003.
- [11] Jin G F, Yan Y B, Wu M X, *et al.* Binary optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 88-140.  
金国藩, 严瑛白, 邬敏闲, 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 88-140.
- [12] Liu L P, Wang Q, Li Q. Optical design of coherent laser radar antenna system simplified by binary element[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29 (s1): 251-253.  
刘丽萍, 王骐, 李绮. 用二元光学器件简化相干激光雷达天线系统的光学设计[J]. 中国激光, 2002, 29 (s1): 251-253.
- [13] Qiu G F, Zhu L. Research on aperture fill phenomenon of wideband phased array radar[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2010, 5(4): 354-359.  
仇光锋, 朱力. 宽带相控阵雷达孔径渡越现象研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(4): 354-359.