

天基合成孔径激光雷达非合作目标成像系统设计与实验

李 飞¹, 张鸿翼¹, 徐卫明¹, 舒 嵘^{1,2}

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学技术大学 量子信息与量子科技前沿协同创新中心, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 合成孔径激光雷达是合成孔径技术在激光相干探测雷达领域的推广, 相比传统合成孔径雷达具有更高的分辨率。相比机载、陆基等应用环境, 空间没有大气湍流和机械振动, 非常适合合成孔径激光雷达应用, 而合成孔径激光雷达本身分辨率不随距离变化的优点, 也利于空间大尺度距离探测。建立了对非合作目标进行高分辨率成像监测天基合成孔径激光雷达成像模型, 对系统中关键参数进行分析, 针对地球静止轨道上的目标进行了系统设计, 提出系统实现工程化需要进一步突破的关键技术。结合理论分析, 设计了缩比模型验证实验, 利用转台模拟空间卫星间运动, 得到了方位向分辨率 1 mm 的目标图像, 证明了系统分析的合理性和该系统的实用性, 对天基合成孔径激光雷达技术的推广具有一定意义。

关键词: 合成孔径激光雷达; 天基雷达; 非合作目标

中图分类号: TN958.94 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1030001

Design and experiment of space borne synthetic aperture radar for non-cooperative targets imaging system

Li Fei¹, Zhang Hongyi¹, Xu Weiming¹, Shu Rong^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. Synergetic Innovation Center of Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Synthetic aperture radar is a generalization of the synthetic aperture technique in the field of laser coherent detection with a higher resolution compared to the conventional synthetic aperture radar. Compared with airborne and ground-based applications, there was no atmospheric turbulence and mechanical vibration in space. It's very suitable for the application of synthetic aperture radar. At the same time, synthetic aperture radar's advantages that the resolution doesn't change with distance change can also be conducive to large scale spatial distance detection. Non-cooperative target high resolution imaging model was established with analysis on the key parameters of the system and a geostationary orbit system was designed. The system engineering need further breakthrough key technology. Combined with theoretical analysis, a scaling model validation experiment was carried on with space satellite motion

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-15

作者简介: 李飞(1988-), 男, 博士, 主要从事合成孔径激光雷达方面的研究。Email: 13655696422@126.com

simulated by the turntable and the cross-range resolution of 1 mm was obtained, proving the practicability of the system analysis and rationality of the system. The space-based synthetic aperture radar technology has great promotion in applications.

Key words: synthetic aperture radar; space-borne radar; non-cooperative target

0 引言

空间非合作目标包括在轨人造卫星、空间碎片等,对其进行监测成像具有军事价值和意义。卫星是工作平台和各种有效载荷的有机体,外形与功能各不相同,通过对目标卫星上通信天线、光学镜头、太阳能帆板和外形尺寸的精细描绘,可以实现对目标卫星的身份识别和功能分类。合成孔径激光雷达^[1-3]具有成像时间短,分辨率极高且不随作用距离变化等优点,目前最大的限制因素是大气对回波的幅度、相位和偏振等参数的影响。空间无大气存在,非常利于合成孔径激光雷达扬长避短,实现对非合作目标的监测成像^[3-5]。参考文献[6]对天基逆合成孔径激光雷达系统进行了描述,就其中的关键参数进行了分析。文中在关键参数分析的基础上,提出了完整的天基合成孔径激光雷达系统性能分析,以 100 km 作用距离,设计了系统参数,并进一步完成了缩比验证实验,为该系统提供了实践支撑。

1 系统成像模型

图 1 中 O 为地球中心,天基合成孔径激光雷达

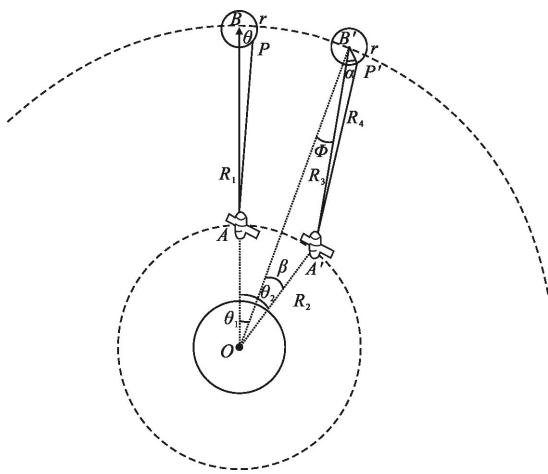


图 1 天基合成孔径激光雷达观测示意图
Fig.1 Space-borne synthetic aperture radar

卫星初始位置为 A (低轨), 目标卫星初始位置为 B (地球静止轨道), 假设两卫星均做匀速圆周运动, 轨道半径分别为 R_2, R_1 。

静止轨道卫星的调姿方式主要是三轴稳定和自旋稳定。自旋卫星成像的积累角度主要由卫星自身的自旋运动提供, 因此需要用高重频体制, 否则会造成方位向的采样不满足奈奎斯特定理。对三轴稳定卫星的成像可采用中/低重频体制。

目标卫星假设为理想的圆形物体 (是否圆形对分析没有影响, 这里为了分析方便), P 为其上一点, 距离圆心 B 距离为 r , 与 OB 夹角为 θ , 在目标卫星转动过程中, r 与 θ 均不变。初始时刻 ISAL 卫星与目标卫星与地心连线重合, 经过很短时间 Δt 后, ISAL 卫星转动到 A' 处, 对地角速度 ω_2 , 转过的角度为 θ_2 ; 目标卫星转动到 B' 处, 对地角速度 ω_1 , 转过角度 θ_1 。由于 ISAL 卫星位于低轨, 相对地心的角速度更快, $\theta_2 > \theta_1$ 。成像角为 Φ , α 为 ISAL 卫星和目标卫星中心连线与 $B'P'$ 的夹角, P' 与 A' 的距离为 R_4 , B' 与 A' 的距离为 R_3 。

根据以上参数, 有如下关系:

$$\beta = \theta_2 - \theta_1 = \Delta t (\omega_2 - \omega_1) \quad (1)$$

$$R_3 = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos\beta} \quad (2)$$

$$\frac{R_2}{\sin\phi} = \frac{R_3}{\sin\beta} \quad (3)$$

$$\alpha = \theta - \phi \quad (4)$$

$$R_4 = \sqrt{R_3^2 + r^2 - 2R_3r\cos\alpha} \quad (5)$$

以上公式进行整理, 得:

$$R_4 = \sqrt{R_3^2 + r^2 - 2R_3r\cos\alpha} = R_3 \sqrt{1 + \frac{r^2}{R_3^2} + \frac{2r}{R_3}\cos\alpha} \approx$$

$$R_3 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{2r}{R_3} \cos\alpha \right) = R_3 + r\cos\alpha \quad (6)$$

将 R_3 代入上式, 得:

$$R_4 = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos\beta} + r\cos \left[\theta - \arcsin \left(\frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos\beta}} \sin\beta \right) \right] \quad (7)$$

P' 对应的多普勒频率为:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} = \frac{2}{\lambda} \frac{\partial R_4}{\partial t} \quad (8)$$

式中: v 为目标相对雷达的径向速度。对 R_4 进行微分, 则

$$f_D = \frac{2}{\lambda} \frac{\partial \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos\beta}}{\partial t} + \frac{2}{\lambda} \frac{\partial r \cos \left[\theta - \arcsin \left(\frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos\beta}} \sin\beta \right) \right]}{\partial t} \quad (9)$$

观察上式, 对于理想的转台模型, 右边第一项为 0, 即雷达到目标中心的距离不变, 在这里该项需要进行平动补偿。由于 $\beta \rightarrow 0$, 右边第二项可以进一步改写:

$$\begin{aligned} & \frac{2}{\lambda} \frac{\partial r \cos \left[\theta - \arcsin \left(\frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos\beta}} \sin\beta \right) \right]}{\partial t} = \\ & \frac{2r}{\lambda} \sin \left[\theta - \arcsin \left(\frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos\beta}} \sin\beta \right) \right] \\ & \frac{1}{1 - \frac{\beta^2 R_2^2}{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos\beta}} \frac{\partial \beta}{\partial t} \approx \\ & \frac{2r}{\lambda} \sin \left[\theta - \arcsin \left(\frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos\beta}} \sin\beta \right) \right] \frac{\partial \beta}{\partial t} = \\ & \frac{2r}{\lambda} (\omega_2 - \omega_1) \sin \left[\theta - \arcsin \left(\frac{R_2}{R_1 - R_2} \beta \right) \right] \quad (10) \end{aligned}$$

第二项得到的多普勒频率与 P 点到中心 B 距离 r 、 P 与 BO 连线夹角以及 ISAL 相对目标卫星转过的角度有关, 而理想转台模型的多普勒频率为 $\frac{2r}{\lambda} (\omega_2 - \omega_1)$, 故除了进行平动补偿外, 还要对第二项进行修正。

2 系统关键参数分析

2.1 调制方式与系统组成

常见已进行的激光合成孔径雷达实验研究, 采用的体制有线性调频和相位编码调制两种。美国海军实验室(NRL)和美国 Aerospace 公司, 以及国内相关研究单位采用的都是线性调频体制研究合成孔径激光成像雷达^[7-9]。因为用单纯射频技术还不能生成带宽大于 4 GHz 以上的线性调频信号, 目前的实验

都是直接调谐激光器的波长来获得 chirp 线性调频波, 然而, 这样做的问题在于调谐速度慢, 单个脉冲时间宽度长, 限制了脉冲重复频率, 也就限制了 SAL 的空间采样率; 并且由于线性调频的抖动, 需要增加波长参考来同步起始波长, 目前并不适宜运动平台应用^[10-11]。

相位编码调制实现的激光合成孔径雷达采用选取自相关性较好 (可以得到更高的主瓣旁瓣比, 如图 2 所示) 的伪随机序列, 通过相位调制器对激光的相位进行调制, 调制时间极短 (常见速率有 40 Gb/s), 完全可以满足方位向采样频率要求, 适合运动平台。同时通过调整编码码元的宽度就可以得到高的带宽, 例如 0.33 ns 码元宽度, 可以实现 3 GHz 带宽, 对应距离向分辨率 $\rho_r = c/2B$, 计算为 5 cm。

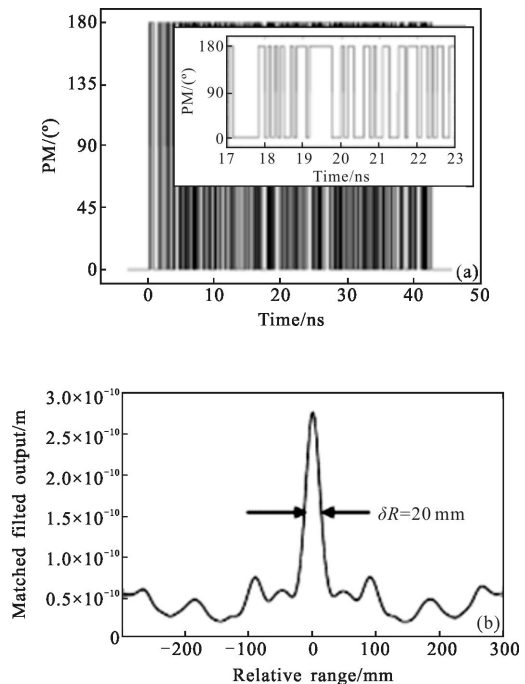


图 2 伪随机二相码波形和压缩波形示意图^[11]

Fig.2 Waveform of pseudo random codes and the compressed result

图 3 详细描述了系统工作原理, 窄线宽激光器 90% 能量经铌酸锂相位调制器后, 加载伪随机二相码信息, 被光开关斩波成脉冲光, 由光放大器进行功率放大并照射到目标。激光器 10% 的能量作为本振光, 与回波信号同时送入 I/Q 正交相干解调部分, 经光电转换及模数转换后存储到计算机, 进行目标图像重构反演。

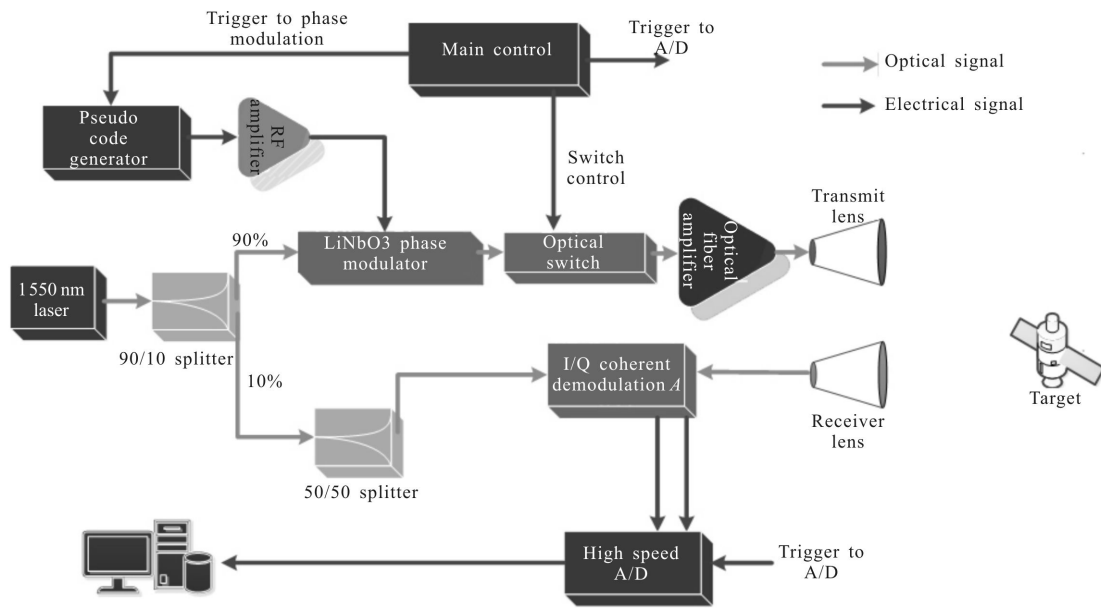


图 3 天基合成孔径激光雷达调制/解调原理图

Fig.3 Modulation and demodulation of the space-borne synthetic aperture radar

2.2 轨道高度

选取地球静止轨道作为目标卫星轨道，雷达卫星位于低轨，公转速度快于目标卫星，利于成像，同时也可实现对地高分辨成像。

对于静止轨道，其轨道高度为 35 786 km，地球半径 6 378 km，故 $R_1=42\ 164\text{ km}$ ；雷达卫星作用距离 100 km，天基雷达卫星轨道高度为对地心半径 $R_2=42\ 064\text{ km}$ 。

通过理想圆轨道高度与公转角速度间关系，可以得到：

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 2\pi / 0.009\ 952\ 01 R_1^{3/2} = 7.292\ 1e-5\ \text{rad/s} \\ \omega_2 &= 2\pi / 0.009\ 952\ 01 R_2^{3/2} = 7.318\ 2e-5\ \text{rad/s} \end{aligned} \quad (11)$$

式中： ω_1 为目标卫星公转角速度； ω_2 为雷达卫星公转角速度。

可以发现雷达卫星与目标卫星间的相对角速度较低，对于合成孔径激光雷达有充足的成像时间。但由于雷达卫星与目标卫星成像一次后到下次成像时间过长，导致观测侦察效率较低，实际应用时可以考虑对相近轨道卫星进行成像。

2.3 分辨率与成像时间

系统分辨率分为距离向分辨率与方位向分辨率，其中距离向分辨率与发射信号带宽有关：

$$\rho_r = \frac{c}{2B} \quad (12)$$

式中： B 为调制带宽。方位向分辨率由观测卫星与雷达卫星间转角变化决定：

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\phi} \quad (13)$$

式中： λ 为发射波长； ϕ 为转动角度。

根据正弦定理，有：

$$\frac{R_2}{\sin\phi} = \frac{R_3}{\sin\beta} = \frac{R_1}{\sin(\pi-\phi-\beta)} \quad (14)$$

要得到 0.05 m 的方位向分辨率 ($\lambda=1.5\ \mu\text{m}$)，对应的相对转动角度 $\phi=1.5e-5\ \text{rad}=8.6e-4^\circ$ 。将方位向分辨率表达式代入上式解得：

$$\beta = \arcsin\left[\frac{R_1 \sin(\lambda/2\rho_a)}{R_2}\right] - \lambda/2\rho_a = 3.6e-8\ \text{rad} \quad (15)$$

当目标卫星与雷达卫星运动方向相同，成像积累时间：

$$T_{\text{sa}} = \frac{\beta}{|\omega_1 - \omega_2|} = 0.138\ \text{s} \quad (16)$$

当目标卫星与雷达卫星运动方向相反，成像积累时间：

$$T_{\text{sa}} = \frac{\beta}{|\omega_1 + \omega_2|} = 2.464e-004\ \text{s} \quad (17)$$

显而易见，需要的成像时间和成像角度均很小。

图 4 中是方位向分辨率与最小成像积累时间之间的关系,可以看出,随着方位向分辨率要求的精度越高,需要最小成像时间越长。同时分辨率取 5 cm 以上时,需要最小成像时间变化不大,通过进一步技术改进,将推帚式改为聚束式成像,可以得到更长的积累时间,对回波信噪比的增加是有意义的。

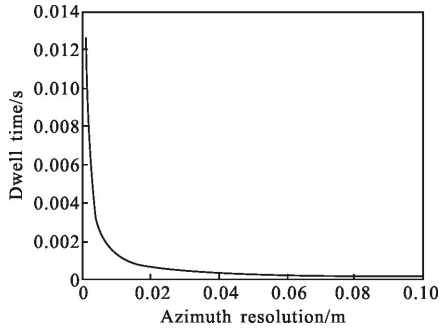


图 4 最小成像时间与方位向分辨率关系

Fig.4 Relationship of the azimuth resolution and the minimal dwell time

2.4 光学参数与重复频率

光学参数包括激光出射发散角、接收视场、接收口径、耦合/相干效率等。

出射发散角由作用距离与探测区域大小共同决定,一般可以表征目标卫星身份或功能的关键部件长度在 1 m 左右,作用距离 100 km,发散角至少

$$\psi=1/100\text{e}-3=10\ \mu\text{rad} \quad (18)$$

合成孔径长度 L 取 1 m,孔径时间 T 。

运动方向相同:

$$T=\psi/|\omega_1-\omega_2|=38.46\ \text{s} \quad (19)$$

运动方向相反:

$$T=\psi/|\omega_1+\omega_2|=0.07\ \text{s} \quad (20)$$

可见 T 远大于 T_{SA} ,即孔径时间远大于成像所需时间,故系统设置完全可以满足成像时间要求。接收视场取发散角相同值,由于 100 km 的作用距离较远,在远场可以认为发射与接收近似同光轴。由于空间无大气扰动和机械振动,接收镜头口径可适当大一些,这里取 2 m。为了保证耦合效率和相干效率,正交相干解调光学部分采用自由空间光学,由分立器件搭建而成,其耦合效率在 80% 以上,相干效率 70% 以上。

目标卫星上某一点的多普勒频率为:

$$f_D=\frac{2v}{\lambda}=\frac{2}{\lambda}\ \omega r \quad (21)$$

式中: r 为该点相对目标卫星中心的转动半径; ω 为两卫星相对角速度。

系统的重复频率至少要大于回波中最大多普勒频率 2 倍,才能保证方位向分辨率。

$$\text{prf} \geq \frac{4|\omega_1+\omega_2|r_{\text{max}}}{\lambda} \quad (22)$$

r_{max} 取 10 m,其余参数不变,重复频率至少为 4 kHz 以上。

2.5 系统信噪比

由于空间不存在大气,对能量衰减大大减小,根据点目标的雷达方程,回波能量可表示为:

$$P_r = \frac{P_t \eta_t \eta_r D^2}{4\pi \theta_r (R_1 - R_2)^4} \sigma \quad (23)$$

式中: P_r 为发射功率; D 为系统接收光学镜头孔径; R_1-R_2 为目标卫星与 ISAL 间距; σ 为目标反射平面; η_t 和 η_r 分别为系统发射与接收光学效率; θ_r 为系统发散角。

在这里只考虑相干解调时引入的散粒噪声,不考虑散斑噪声等,经过距离向脉冲压缩和方位向合成孔径后的信噪比为:

$$\text{SNR} = \frac{(T_p \Delta f)(T_{\text{sa}} \Delta f_D)}{(h\nu/\lambda \eta_d) B} P_r \quad (24)$$

式中: η_d 为光电探测器量子效率; h 为普朗克常数; ν 为光频; $h\nu/\lambda \eta_d$ 为探测器单位带宽噪声功率; B 为接收机带宽; T_p 为脉冲宽度; Δf 为信号带宽; $T_p \Delta f$ 为距离向脉冲压缩增益; T_{sa} 为方位向积累时间; Δf_D 为方位向多普勒带宽; $T_{\text{sa}} \Delta f_D$ 为方位向合成孔径增益。把 P_r 代入信噪比公式,可得:

$$\text{SNR} = \frac{(T_p \Delta f)(T_{\text{sa}} \Delta f_D)}{(h\nu/\lambda \eta_d) B} \frac{P_t \eta_t \eta_r D^2}{4\pi \theta_r^2 (R_1 - R_2)^4} \sigma \quad (25)$$

为保证成像质量,SNR 取 10 dB,距离向脉压增益: $T_p \Delta f=6\ \mu\text{s} \times 3\ \text{GHz}$,方位向积累增益(成像积累时间按照顺轨积累时间计算): $T_{\text{sa}} \Delta f_D=0.138\ \text{s} \times 3\ \text{kHz}$,接收器带宽 $B=3\ \text{GHz}$, $h\nu/\lambda \eta_d=10\ \text{pW/Hz}$, η_t 和 η_r 均取 0.9, R_1-R_2 取 100 km, θ_r 设为 $10\ \mu\text{rad}$, D 取 2 000 mm, σ 取 0.9,以上数据代入计算得: $P_t=1.73\ \text{kW}$ 。

考虑到电光之间转换效率,所需电功率在 3 kW 左右,这对于目前的天基应用来说还无法实现,需要在研制高功率窄线宽激光器的同时降低光电探测器等效噪声功率,采用优化算法在低信噪比条件下完成图像压缩。

表 1 天基合成孔径激光雷达参数

Tab.1 Parameters of space-borne synthetic aperture lidar

Parameter	Value
Range resolution/cm	5
Azimuth resolution/cm	5
R_2 /km	42 064
R_1 /km	42 164
Transmit power/kW	1.7
Distance/km	100
Angle/ μ rad	10
Synthetic aperture length/m	1
Repeat frequency/kHz	4
Sampling frequency/GS \cdot s $^{-1}$	5
Bandwidth/GHz	3

3 缩比模型实验

为进一步验证系统方案设计的合理性,并为将来天基合成孔径激光雷达的技术实现提供实践支撑,设计了参数缩比的转台实验。

针对这一复杂运动情况,设计了转台验证实验。将雷达的收发镜头置于转台上,绕转台中心做匀速圆周运动。成像目标位置固定,与转台中心有一定偏移,当雷达转动时,其与成像目标之间为不规则的曲线运动。通过设置转台转速以及目标与转台中心距离,可以有效的模拟真实空间应用环境。

采用圆柱形物体作为目标卫星,如图 5 所示,其

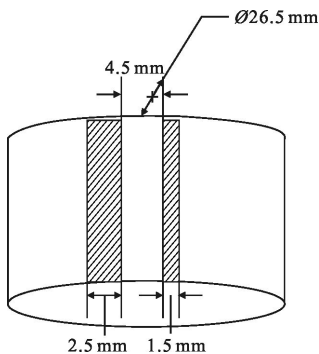


图 5 靶标示意图

Fig.5 Target sketch map

表面为白色打印纸,反光贴纸代表目标卫星上要探测的关键部件,贴纸宽度分别为 1.5 mm 和 2.5 mm,两个目标间距为 4.5 mm。为了避免环形器造成能量泄露,采用 PBS 将收发镜头组合。收发镜头置于转台上,模拟天基雷达卫星,目标卫星置于桌面,其位置不动,通过转动,对目标进行成像。

实验示意图见图 6,其中发射光经铌酸锂相位调制器调制后,从发射镜头照射到目标上,反射回波由接收镜头接收到光纤正交桥接器,与本振信号一起做相干解调,经探测器光电转换之后就得到了互相正交的两路信号,这里对其原理不再赘述。实验参数选择见表 2。

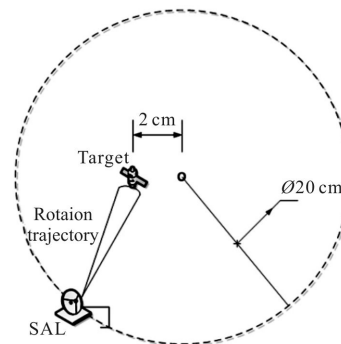


图 6 缩比验证实验系统示意图

Fig.6 Reduced scale model experiment

表 2 缩比实验参数

Tab.2 Parameters of the reduced scale model experiment

Parameter	Value
Rotation speed/($^{\circ}$) \cdot s $^{-1}$	45
Angle resolution/($^{\circ}$)	0.001 25
Range/cm	20
Spot diameter/cm	2
Bandwidth/MHz	400
Transmit power/mW	10
Sampling frequency/GS \cdot s $^{-1}$	2
Repeat frequency/kHz	1

实验目标实物图与系统实物图见图 7,其中成像目标距离转台转动的圆心有一定距离,这样就模拟了天基雷达卫星与目标卫星之间不规则运动,对所论证方案的支持更有说服力。

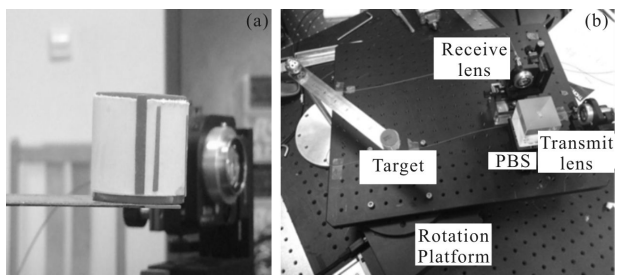


图 7 成像目标(a)与实验系统(b)

Fig.7 Target (a) and the experiment system (b)

空间非合作目标成像算法与机载合成孔径激光雷达成像算法的处理流程差别不大,采集到数据之后需要经过距离向压缩和对齐,方位向参数估计和补偿,方位向孔径合成等几个步骤,处理算法流程图如图 8 所示。

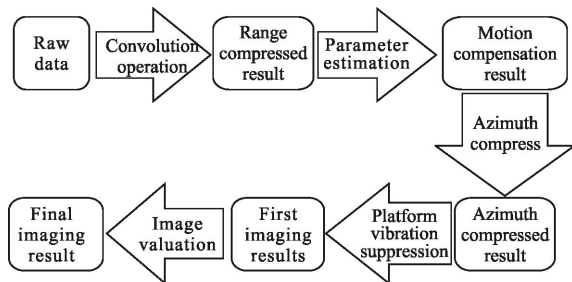


图 8 天基合成孔径激光雷达成像流程

Fig.8 Imaging process of space-borne synthetic aperture radar

图 9 是进行二维压缩后,取一个距离向剖面的局部图。方位向一共采样了 4 096 次,留了足够的采样冗余时间。有效成像采样点约为 1 500 个,对其局部放大后可以发现,在方位向较好的分辨出了两个宽度不同的目标。其中 A、B 分别对应靶标上宽窄两

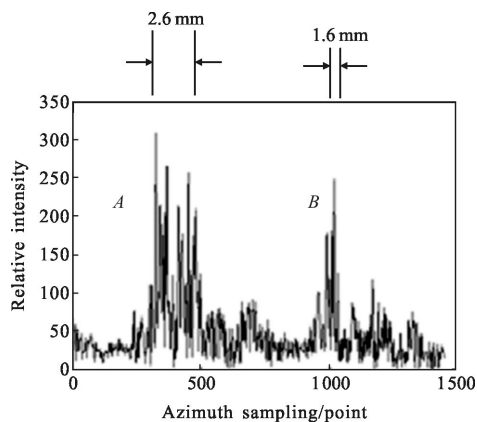


图 9 方位向压缩剖面图

Fig.9 Profile of azimuth compression

条反光条,其宽度分别为 2.5 mm 和 1.5 mm,实际压缩结果为 2.6 mm 和 1.6 mm,误差在 6%左右,考虑到实验中电子学噪声、激光能量起伏等因素,这一误差水平是满足系统设计的。

以上实验证明了天基合成孔径激光雷达的可行性与实用性,为其工程化实现提供了一定支撑。

4 结论

文中从系统模型建立、分辨率需求分析、系统信噪比分析、光学设计等方面,提出适用于空间非合作目标探测的天基合成孔径激光雷达系统,结合目前技术发展现状,提出该体制空间应用的可行方案,并论证了相关关键技术。设计了缩比模型验证实验,通过转台实验,打通该系统原理链路,为其工程应用与实现提供了一定的实践支撑。

参考文献:

[1] Li Daojing, Liu Bo, Yin Jianfeng, et al. Analysis and design of spaceborne MMW radar for space debris observation system [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, (12): 2746–2753. (in Chinese)
李道京, 刘波, 尹建凤, 等. 天基毫米波空间碎片观测雷达系统分析与设计 [J]. *宇航学报*, 2010, (12): 2746–2753.

[2] He Jing, Zhang Qun, Deng Donghu, et al. Imaging and motion feature extraction for the targets with rotating parts in ISAL [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, (6): 1284–1290. (in Chinese)
何劲, 张群, 邓冬虎, 等. 基于 ISAL 的含旋转部件目标成像及微动特征提取 [J]. *电子与信息学报*, 2012, (6): 1284–1290.

[3] Guo Liang, Xing Mengdao, Zeng Xiaodong, et al. Inverse synthetic aperture lidar imaging of indoor real data [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 637–642. (in Chinese)
郭亮, 邢孟道, 曾晓东, 等. 室内实测数据的逆合成孔径激光雷达成像 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 637–642.

[4] Li Jinming, Hu Yihua, Wang Enhong, et al. Imaging of satellite-to-satellite synthetic aperture lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1668–1672. (in Chinese)
李今明, 胡以华, 王恩宏, 等. 星对星合成孔径激光雷达成像 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(9): 1668–1672.

[5] Li Pan, Wu Shuangyang, Zheng Yongchao, et al. Overview of the development of synthetic aperture lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 55–59, 65. (in Chinese)

- 李番, 邬双阳, 郑永超, 等. 合成孔径激光雷达技术综述 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 55-59, 65.
- [6] Ruan Hang, Wu Yanhong, Zhang Shuxian. Geostationary orbital object imaging based on spaceborne inverse synthetic aperture ladar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1611-1616. (in Chinese)
- 阮航, 吴彦鸿, 张书仙. 基于天基逆合成孔径激光雷达的静止轨道目标成像 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1611-1616.
- [7] Bai Xueru. Study on new techniques for ISAR imaging of aerospace targets [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- 白雪茹. 空天目标逆合成孔径雷达成像新方法研究 [D]; 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [8] Crouch S C. Synthetic aperture LADAR techniques [D]. US: Montana State University-Bozeman, College of Letters & Science, 2012.
- [9] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture ladar techniques [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24237-24246.
- [10] Lai Zhi, Zeng Xiaodong, Feng Zhejun, et al. Obtaining synthetic aperture ladar signal based on precisely cavity tuning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1531-1537. (in Chinese)
- 来志, 曾晓东, 冯喆君, 等. 精密控制谐振腔获得合成孔径激光雷达信号的方法 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1531-1537.
- [11] Qiao Yanfeng, Liu Kun, Duan Xiangyong. Optical synthetic aperture imaging techniques and development [J]. *Chinese Optics*, 2009, 2(3): 175-183. (in Chinese)
- 乔彦峰, 刘坤, 段相永. 光学合成孔径成像技术及发展现状 [J]. 中国光学, 2009, 2(3): 175-183.