

doi:10.3788/gzxb20184706.0601003

地球同步轨道空间目标地基逆合成孔径激光雷达系统分析

胡焜^{1,2}, 李道京¹, 付瀚初^{2,3,4}, 魏凯^{3,4}

(1 中国科学院电子学研究所 微波成像技术重点实验室,北京 100190)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

(3 中国科学院自适应光学重点实验室,成都 610209)

(4 中国科学院光电技术研究所,成都 610209)

摘 要:对用于地球同步轨道空间目标进行成像观测的地基逆合成孔径激光雷达系统进行了分析.讨论了地球同步轨道空间目标运动特性和观测几何模型,分析了地基逆合成孔径激光雷达系统指标,波形选择为无周期相位编码信号,提出了基于发射和本振参考通道的信号相干性保持方法.根据目标存在振动和三维自转的特点,采用正交基线干涉处理的方法进行运动相位误差估计与补偿.引入自适应光学系统实现大气时变相位误差校正,同时明确了基于正交基线干涉处理的逆合成孔径激光雷达与自适应光学在大气校正方面具有互补性.设计了初步系统方案,仿真验证了目标振动和三维自转对逆合成孔径激光雷达成像有明显的影响.

关键词:激光雷达;逆合成孔径成像;空间目标;系统分析;地球同步轨道

中图分类号:TN958.98

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)06-0601003-12

System Analysis of Ground-based Inverse Synthetic Aperture Lidar for Geosynchronous Orbit Object Imaging

HU Xuan^{1,2}, LI Dao-jing¹, FU Han-chu^{2,3,4}, WEI Kai^{3,4}

(1 Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(3 Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(4 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: In this paper, the ground-based inverse synthetic aperture lidar for geosynchronous orbit objects imaging is analyzed. The motion characteristics and observation geometric of geosynchronous orbit objects are discussed and the system parameters of inverse synthetic aperture lidar are analyzed. The waveform is chosen to be acyclic phase-coded signal. A signal coherence preserving method based on both transmitting and local oscillator reference channels is proposed. Since the object has both vibration and three-dimensional rotation, the motion phase error estimation and compensation are implemented based on orthogonal baselines interferometry processing. The adaptive optics system is introduced to complete the time-varying phase error correction, which results from atmospheric turbulence. Moreover, it's clarified that the inverse synthetic aperture lidar based on orthogonal baselines interferometry processing and the adaptive optics are complementary in the atmospheric correction. A preliminary system scheme is designed and simulation results show that the target vibration and three-dimensional rotation have a

基金项目:国家自然科学基金(No. 61771449)资助

第一作者:胡焜(1992-),男,博士研究生,主要研究方向为雷达信号处理. Email: m18700476546@163.com

导师(通讯作者):李道京(1964-),男,研究员,博导,主要研究方向为雷达系统和雷达信号处理. Email: lidj@mail.ie.ac.cn

收稿日期:2018-01-04;录用日期:2018-02-06

<http://www.photon.ac.cn>

significant influence on inverse synthetic aperture lidar imaging.

Key words: Lidar; Inverse synthetic aperture imaging; Space object; System analysis; GEO

OCIS Codes: 010.0280; 110.1650; 140.0140; 280.3640; 280.6730

0 引言

地球同步轨道(Geosynchronous Orbit, GEO)因其特殊性,运行着各国重要的太空资源.对 GEO 轨道空间目标进行成像观测,对保障空间安全具有重要意义.GEO 轨道高度约 36 000 km,用地基主动微波雷达对该轨道空间目标实施成像观测,不仅需要巨大的发射功率,而且需要尺寸巨大的天线,工程实现困难.相对于微波雷达,激光雷达具备波束窄能量集中的特点,且能够提供较大的发射功率,采用激光雷达对 GEO 轨道空间目标实施成像观测具有明显优势.激光雷达成像与光学成像一样,其空间分辨率都受系统光学孔径的限制,对于一定尺寸的孔径,其空间分辨率会随着距离的增加而下降.若激光波长为 $10.6 \mu\text{m}$,对 GEO 轨道空间目标实现 0.1 m 分辨率成像,在原理上需要 3 816 m 的光学口径,这在工程上难以实现(现有红外/可见光波段的地基天文望远镜最大口径在 10 m 量级,欧洲天文台曾计划建造 100 m 口径的天文望远镜,受到技术约束,最终设计口径为 39 m),为此可将逆合成孔径成像技术应用于激光雷达.激光信号相干性的提高,使激光逆合成孔径成像成为可能.

逆合成孔径激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Ladar, ISAL)波长短至 μm 量级,这使其具备对 GEO 轨道空间目标实施高分辨率高数据率成像观测的潜力.当激光波长为 $10.6 \mu\text{m}$,发射信号带宽大于 2 GHz,只要 GEO 轨道空间目标横向运动或自转使其和雷达之间存在 0.07 mrad(约千分之四度)的微小转角即可获得 0.1 m 分辨率的目标二维图像,且图像分辨率与距离无关,成像时间在 10 s 量级.

基于上述分析,地基 ISAL 在 GEO 轨道空间目标成像观测方面具有明显优势和良好的应用前景.国际上对激光逆合成孔径成像的研究工作开始于上世纪七十年代,比较有代表性的是 Firepond 光学装置对空间目标(Agena D 火箭推进器)和在轨卫星(LAGEOS)的成像^[1-2].2013 年,美国国防部与 Raytheon 公司签订合同,宣布由 Raytheon 公司研制远距离成像激光雷达(Long Range Imaging LADAR, LRIL),用于对 GEO 目标进行 ISAL 成像^[3].我国对于激光逆合成孔径成像的研究工作开始于本世纪初,主要集中在室内原理验证和室外近距离试验^[4-6],也提出了天基 ISAL 设想^[7],但是针对 GEO 轨道空间目标的地基 ISAL 相关工作的公开报道还不多.

本文从目标运动特性、观测几何模型、系统指标、系统方案等方面,对用于 GEO 轨道空间目标进行成像观测的地基 ISAL 进行了分析,研究表明,地基 ISAL 对 GEO 目标成像有相当难度,要解决的关键技术问题较多,在采取有效应对措施后,有可能以高数据率对 GEO 轨道空间目标进行高分辨率成像观测.

1 目标运动特性和观测几何模型

1.1 目标横向运动特性

目标横向运动成像时,需要明确等效斜视角、目标横向速度的范围.

如图 1 所示,以地心为坐标轴原点 O ,以地球静止轨道(Geostationary orbit)平面为 XOY 平面建立直角坐标系 XYZ .地球静止轨道指的是轨道倾角为 0° 的 GEO 轨道,地基 ISAL 波束应指向该轨道,光斑的速度矢量为 $\mathbf{V}_1 = (0, V_{\text{geo}}, 0)$,其中 $V_{\text{geo}} \approx 3 \text{ km/s}$ 为 GEO 轨道空间目标的速度^[8].假定目标位于 T 处,其速度矢量 $\mathbf{V}_2 = (0, V_{\text{geo}} \cos\theta_o, V_{\text{geo}} \sin\theta_o)$,其中, θ_o 为目标所在轨道的轨道倾角.

目标与雷达的相对速度矢量和相对速度分别为

$$\begin{cases} \mathbf{V} = \mathbf{V}_2 - \mathbf{V}_1 = (0, V_{\text{geo}} - V_{\text{geo}} \cdot \cos\theta_o, V_{\text{geo}} \cdot \sin\theta_o) \\ V = \|\mathbf{V}\| = \sqrt{2V_{\text{geo}}^2 - 2V_{\text{geo}}^2 \cdot \cos(\theta_o)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\theta_o \in [0, 15^\circ]$ 为目标的轨道倾角^[8].基于式(1),图 2(a)为目标与雷达的相对速度随轨道倾角的变化曲线,相对速度范围为 0 到 800 m/s.

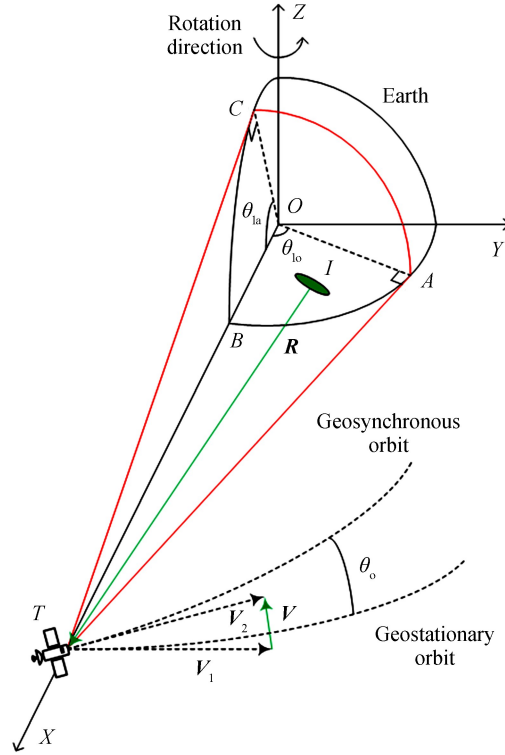


图1 观测几何模型

Fig.1 Observation geometry model

假定目标的位置为 $T=(R_1, 0, 0)$, 其中 $R_1 \approx 42\ 000\ \text{km}$ 为目标到地心的距离, 经计算, 若雷达波束能够照射到目标, 雷达的可能位置为

$$\mathbf{I} = (R_2 \sin\theta_{lo} \cos\theta_{la}, R_2 \sin\theta_{lo} \sin\theta_{la}, R_2 \sin\theta_{lo})$$
(2)

式中, $R_2 \approx 6\ 400\ \text{km}$ 为雷达到地心的距离; θ_{lo} 为雷达关于 B 点的相对经度; θ_{la} 为雷达关于 B 点的相对纬度,

B 点为目标地心连线与地球表面的交点. θ_{lo} 的最大值可由 $\triangle OTC$ 的几何关系得到 $\theta_{lo\max} = \arccos \frac{R_2}{R_1} \approx 81.3^\circ$,

其中 TC 在 YOZ 平面内, 且与地球表面相切; 同理可以得到 θ_{la} 的最大值 $\theta_{la\max} = \arccos \frac{R_2}{R_1} \approx 81.3^\circ$.

目标到雷达的距离矢量为

$$\mathbf{R} = \mathbf{IT} = (R_2 \sin\theta_{lo} \cos\theta_{la} - R_1, R_2 \sin\theta_{lo} \sin\theta_{la}, R_2 \sin\theta_{lo})$$
(3)

\mathbf{R} 与 \mathbf{V} 的夹角的余角为等效斜视角

$$\theta_s = 90^\circ - \frac{\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}}{\|\mathbf{R}\| \cdot \|\mathbf{V}\|} = 90^\circ - \arccos \frac{R_2 \sin\theta_{lo} \cos\theta_{la} \cdot V_{\text{geo}} (1 - \cos\theta_o) + R_2 \sin\theta_{la} \cdot V_{\text{geo}} \sin\theta_o}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \sin\theta_{lo} \cos\theta_{la}} \cdot \sqrt{2V_{\text{geo}}^2 - 2V_{\text{geo}}^2 \cdot \cos\theta_o}}$$
(4)

$$\theta_{lo} \in [0, 81.3^\circ], \theta_{la} \in [0, 81.3^\circ], \theta_o \in [0, 15^\circ]$$

基于式(4), 图 2(b) 给出了等效斜视角最大值与最小值随轨道倾角的变化曲线, 等效斜视角 $\theta_s \in [0^\circ, 11.5^\circ]$.

基于目标与雷达的相对速度和等效斜视角, 可以计算出目标横向速度 $V_a = V \cdot \cos(\theta_s) \in [0, 800\ \text{m/s}]$.

对于目标横向运动, 有两点需要说明. 1) 美国空间监视网 (Space Surveillance Network, SSN) 已经完成了对尺寸大于 $1\ \text{m}$ 的 GEO 轨道空间目标的编目, 根据目标在观测期间所在位置, 目标轨道和运动参数可以在该编目中进行查找^[8]. 2) 由于 GEO 轨道的特殊性, GEO 目标速度几乎恒定, 且成像时间内目标相对雷达的等效斜视角变化仅在 $0.01\ \text{mrad}$ 量级 (根据后文分析), 所以成像时间内目标的横向运动速度几乎不变. 这两点都为后文运动误差估计和成像处理提供了便利.

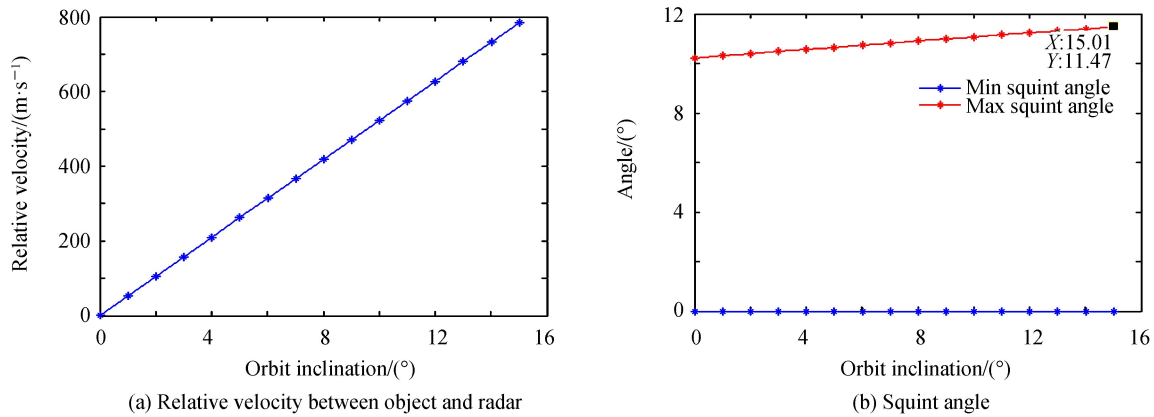


图2 目标运动参数
Fig.2 Object moving parameters

1.2 目标自转特性

首先讨论目标的最小自转幅度和角速度.GEO 轨道空间目标包括在轨卫星与空间碎片,空间碎片的自转幅度及角速度远大于在轨卫星(在轨卫星具备姿态稳定与控制系统),根据 GEO 轨道在轨卫星的最高指向精度和指向稳定度^[9],GEO 轨道空间目标最小自转幅度为 0.349 mrad,最小自转角速度为 0.003 4 mrad/s,而且自转可能存在于目标坐标系的三个方向,即存在三维空间转动.

在自转轴和自转角速度不变的情况下,只要目标自转幅度达到最小自转幅度的五分之一,本地地基 ISAL 即可仅基于目标自转实现 0.1 m 的横向分辨率,这尤其适用于对横向运动速度较小的地球静止轨道或轨道倾角较小的 GEO 轨道目标成像.

本地地基 ISAL 成像时间在 10 s 量级,在成像时间内,若目标存在微小的三维空间转动或自转轴不垂直于目标二维成像平面(目标横向速度和斜距形成的平面),将使逆合成孔径成像的阵列流形分布产生三维弯曲,导致图像散焦(尤其是目标在三维空间尺寸较大时),这种情况下,仅能依靠时频分析进行短时低分辨率成像,信号长时间相干累积难以实现.ISAL 获取的斜距-横向两维图像是目标三维图像的二维投影,由于不能精确表征目标在三维空间分布和自转特性,为实现三维目标的精确成像,在原理上需采用正交的观测结构.3 个正交布局接收望远镜和干涉处理,可为空间目标三维成像提供最小观测结构.

2 系统指标分析

考虑到地基 ISAL 使用的激光信号需要有较好的大气穿透能力,本文选择激光波长为 10.6 μm ;为了能够高分辨率地观测 GEO 轨道空间目标,作用距离应优于 36 000 km,分辨率应优于 0.1 m.波束宽度和瞬时视场设置为 0.03 mrad,在 36 000 km 处的波束覆盖范围约 1 km,由于 GEO 轨道空间目标的位置和速度粗略已知,1 km 的波束覆盖范围已能够满足对目标跟踪照射的需要.

2.1 成像分辨率和数据率

ISAL 距离分辨率主要取决于发射信号带宽,即

$$\rho_r = \frac{kC}{2B_r} \quad (5)$$

式中, C 为光速, B_r 为发射信号带宽, $k=1.3$ 为加窗展宽系数,经计算 $B_r \approx 2$ GHz.

横向分辨率的获得可基于目标横向运动,也可基于目标自转.基于目标横向运动成像时的横向分辨率为

$$\rho_a \approx \frac{k\lambda R}{2V_a T_s} \quad (6)$$

式中, λ 为激光波长, T_s 为合成孔径时间, V_a 为目标横向速度, R 为目标到雷达的距离.若 $\rho_a=0.1$ m,当 $V_a=800$ m/s, $R=36$ 000 km, $\lambda=10.6$ μm 时,成像时间 $T_s \approx 3$ s,成像数据率约 0.33 Hz,当 $V_a=200$ m/s, $R=36$ 000 km, $\lambda=10.6$ μm 时,成像时间 $T_s \approx 12$ s,成像数据率约 0.08 Hz.

基于目标自转成像时的横向分辨率为

$$\rho_a = \frac{k\lambda}{2\theta} \quad (7)$$

式中, θ 为所需的目标自转角,若 $\rho_a = 0.1$ m,由式(7), $\theta \approx 0.07$ mrad(约千分之四度).当目标自转角速度 $\omega_a = 0.0034$ mrad/s 时,成像时间为 20 s,成像数据率为 0.05 Hz.

上述分析表明,地基 ISAL 对 GEO 轨道空间目标进行成像观测,要达到 0.1 m 横向分辨率,成像时间在 10 s 量级.若采用 Ka 波段 ISAR 对 GEO 轨道空间目标进行成像观测,假设波长为 8.6 mm,由式(6)和式(7),要达到相同分辨率,所需成像时间约 10 h.使用 ISAL 观测 GEO 轨道空间目标具有明显优势.

2.2 多普勒带宽和脉冲重复频率

对于 ISAL,在横向一般采用去斜成像处理,去斜后的方位多普勒带宽为

$$B_a = \frac{2\Delta X}{\lambda} \cdot \left(\frac{V_a}{R} + \omega_a \right) \quad (8)$$

式中, ΔX 为目标的横向尺寸, ω_a 为目标自转角速度, R 为目标到雷达的距离,当 $\Delta X = 50$ m, $\lambda = 1.064$ μm , $V_a = 800$ m/s, $R = 36\,000$ km, $\omega_a = 0.0034$ mrad/s 时, $B_a \approx 8.6$ kHz.

脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)应大于方位多普勒带宽,本文地基 ISAL 的 PRF 可设置为 10 kHz,对应最大不模糊测距范围 15 km, GEO 轨道空间目标的粗略距离已知,测距模糊问题容易得到解决.

2.3 作用距离和成像信噪比

参照微波雷达方程^[10-11], ISAL 的接收机输出单脉冲信噪比表示为

$$\text{SNR} = \frac{\eta_{\text{sys}} \cdot \eta_{\text{ato}} \cdot P_t \cdot G_t \cdot \sigma \cdot A_r \cdot T_p}{4\pi \cdot \Omega \cdot F_n \cdot h \cdot f_c \cdot R^4} \quad (9)$$

式中, P_t 为发射信号峰值功率; $G_t = \frac{4\pi}{\theta_c \theta_a}$ 为发射增益, θ_c 为俯仰向波束宽度, θ_a 为方位向波束宽度; σ 为分辨单元对应的目标散射截面积(为目标散射系数 σ_0 、距离向分辨率 ρ_r 、横向分辨率 ρ_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 为激光频率; Ω 为目标后向散射立体角. ISAL 系统损耗主要包括光学系统损耗与电子学系统损耗 $\eta = \eta_{\text{ele}} \cdot \eta_{\text{opt}}$; $\eta_{\text{opt}} = \eta_t \cdot \eta_r \cdot \eta_m \cdot \eta_D \cdot \eta_{\text{oth}}$ 为光学系统损耗, η_t 为发射光学系统损耗, η_r 为接收光学系统损耗, η_m 为外差探测时视场失配导致的光学系统损耗, η_D 为光电探测器的量子效率导致的光学系统损耗, η_{oth} 为其他光学系统损耗; η_{ele} 为电子学系统损耗; η_{ato} 为大气损耗.

表 1 地基 ISAL 系统参数

Table 1 System Parameters of Ground-based ISAL

Parameters	Value	Parameters	Value
Wavelength λ	10.6 μm	Diameter of receiving telescope D	6 m
Peak power of emitting signal P_t	100 kW	Atmospheric loss(double ways) η_{ato}	0.25
Pulse width T_p	100 μs	Loss of emitting optical system η_t	0.9
Bandwidth of emitting signal B_r	2 GHz	Loss of receiving optical system η_r	0.8
Pitching beam width θ_c	0.03 mrad	View field matching loss η_m	0.5
Azimuth beam width θ_a	0.03 mrad	Loss of other optical system η_{oth}	0.5
Back scattering solid angle of object Ω	π	Quantum efficiency η_D	0.5
Back scattering parameters of object σ_0	0.2	Electronics system loss η_{ele}	0.75
Range resolution ρ_r	0.1 m	Electronics noise parameters F_n	3 dB
Cross range resolution ρ_a	0.1 m	Single pulse SNR of receiver SNR_{min}	-42.6 dB

基于表 1 给出的系统参数,目标斜距 $R = 36\,000$ km 时,接收机输出单脉冲信噪比 $\text{SNR}_{\text{min}} \approx -42.6$ dB.根据 2.1 节的分析,若基于目标自转成像,成像时间约 20 s,对应相参积累脉冲数 200 000,所能获得的图像信噪比约 10.4 dB,可满足 GEO 轨道空间目标的观测要求.若基于目标横向运动成像,目标横向速度 $V_a = 800$ m/s 时,3 s 成像时间即可获得 0.1 m 横向分辨率,对应相参积累脉冲数为 30 000,所能获得的图像信噪比约 2.2 dB,此时加长观测时间至 60 s,通过 20 视获得图像信噪比提升 6.5 dB,最终的图像信噪比约为 8.7 dB.

值得说明的是,长时间相参积累在原理上有可能形成更高的横向分辨率,同时也会导致目标散射截面积下降,由此并不能提高图像信噪比,此时需考虑相干积累和非相干积累结合的处理方案.对 ISAL,加长成像观测时间,有助于提高图像信噪比.

3 系统方案设计

3.1 波形选择

由于需要发射大功率激光信号,而高功率激光器难以高脉冲重复频率工作,本文地基 ISAL 波形考虑采用无周期相位编码信号,在一定时间段内连续发射激光信号,通过对回波信号进行裁剪以形成等效 PRF 的脉冲串再实施成像处理,如图 3(a)所示.

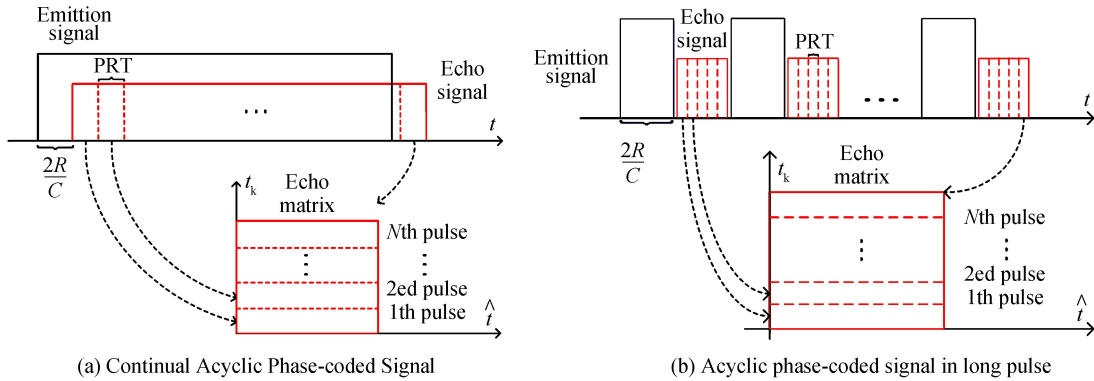


图3 回波信号裁剪时序图
Fig.3 Timing diagrams of echo signal

上述波形要求 ISAL 系统具有较高的收发隔离度,当收发隔离不易保证时,可考虑采用秒级宽脉冲无周期相位编码信号,采用时分方法解决收发隔离问题.如图 3(b)所示.GEO 轨道空间目标的回波信号时延为 0.24 s,可发射重复周期约为 0.48 s 的宽脉冲,占空比约为 50%,其中 0.24 s 用于发射,0.24 s 用于接收.根据等效 PRF 计算等效脉冲重复间隔,依次将回波信号裁剪成脉冲串即可供二维成像处理.当 PRF 为 10 kHz,裁剪后的脉冲宽度为 100 μ s.实际应用时,发射脉宽可设置得窄些,回波接收时间窗口可设置得宽些.

雷达的波形有多种,考虑到大功率激光信号的相位容易失真,故本文地基 ISAL 无周期相位编码信号可选择为 M 序列二相码或者噪声雷达常用的随机二相码,其具有码长长的特点,适用于宽脉冲,而二相码相位不连续变化特点也使其适用于可能相位失真较大的场合.

3.2 信号相干性保持

ISAL 属于相干体制雷达,信号的相干性直接影响其慢时频率分辨率,进而影响成像的横向分辨率.慢时频率分辨率可以定义为雷达与目标均为静止状态下回波信号慢时谱的宽度 Δf ,基于目标横向运动成像时,逆合成孔径成像的横向分辨率为

$$\rho_a = \frac{\Delta f \lambda R}{2V_a} \quad (10)$$

式中, λ 为激光信号的波长; R 为目标到雷达的距离; V_a 为目标的横向速度.

对于本文地基 ISAL,由于需要发射大功率宽带激光信号,在信号调制放大过程中引入的相位误差会降低信号的相干性,主要包括脉冲间随机初相和发射信号相位的非线性失真.脉冲间随机初相主要影响成像结果的横向分辨率,发射信号相位的非线性失真不仅会降低成像结果的横向分辨率,而且影响成像结果的距离向分辨率.

本文地基 ISAL 拟引入微波雷达的方法^[12],设置发射参考通道对发射信号实施记录,并在信号处理过程中对其中的相位误差进行定标校正,发射参考通道的设置如图 5 所示.

ISAL 的本振信号在激光波段,其频率比微波信号频率高三个数量级以上,相对微波信号,其频率稳定度从原理上就较差^[13],在对发射信号进行定标校正后,ISAL 能够实现的横向分辨率主要取决于本振信号的相干性,主要体现在频率稳定性和线宽两个指标上.为保持 ISAL 激光信号的相干性,一种方案是本振采用

线宽更小的激光种子源,另一种方案是基于光纤延时线的本振延时处理。

由于 GEO 轨道空间目标距离较远,回波信号对应的时延长达 0.24s,利用光纤延时线难以实现本振延时处理.本文提出本振数字延时的方法保持 ISAL 本振信号的相干性.拟设置本振参考通道,如图 5 所示,采用自外差探测的方式对本振相位误差进行估计,将估计出的本振相位误差在数字域延时目标距离对应的时间后,对回波信号进行相位补偿。

该方法经过分析与仿真验证,在经过发射信号相位误差定标校正和本振数字延时处理后,可将回波的慢时频率分辨率由 10 kHz 量级提高到 10 Hz 量级,结合相位梯度自聚焦处理,可保证横向分辨率应可达到 0.1 m,详细情况可见文献[14-15].

3.3 振动相位误差估计与补偿

ISAL 波长短至 μm 量级,实际空间目标通常采用飞轮控制姿态,目标 μm 量级的振动都会引起回波信号相位的显著变化,这给高分辨率成像带来了很多困难,需要进行振动相位误差估计与补偿。

顺轨干涉处理^[16]是一种振动相位误差估计方法,其基本思想是:沿顺轨布置两个接收望远镜,在不同时刻以相同视角对目标观测两次,两次观测的干涉相位即为振动相位误差的差分值,再进一步累积即可获得振动相位误差。

对于本文地基 ISAL,顺轨干涉方法在实施上存在两个难点.1)目标运动方向难以和顺轨基线形成确定的几何关系,这样干涉相位中就存在一定的交轨分量,导致振动相位误差估计不准确.2)由于成像时间在 10 s 量级,目标自转也会在干涉相位中进一步引入交轨分量,假定目标自转角速度为 0.003 4 mrad/s,目标尺寸为 20 m,10 s 以内目标自转最多可引入 32 个波长对应的相移,也会导致振动相位误差估计不准确。

和前文 1.2 节对目标自转影响的分析一样,为进行振动相位误差估计,在原理上也需采用正交的观测结构。

对于 ISAL,正交观测结构有内视场^[17]和外视场两种实现方式.内视场实现方式指的是在一个接收望远镜的馈源处放置 3 个正交布局的光电探测器,其优点在于基线较短容易实现,但是对远距离目标的干涉测量相位精度低.外视场实现方式指的是使用 3 个长基线正交布局的接收望远镜,实现较为复杂,但是其优点在于在进行振动相位误差估计的同时可以实现高精度三维成像^[18]。

本文地基 ISAL 拟采用内外视场结合的实现方式,用 3 个正交布局接收望远镜为振动相位误差估计提供最小观测结构(基线长度可能为 30~100 m 量级),每个望远镜系统同时采用内视场多探测器结构.在此基础上,根据目标运动参数和 ISAL 几何关系确定顺轨和交轨基线,基于一条基线的干涉相位,去除另一条基线干涉相位中的交轨分量,获取顺轨干涉分量,进行振动相位误差估计与补偿^[17],进而获得二维成像结果.通过对二维成像结果的干涉处理,对目标进行三维成像,具体实施过程可参照文献[18].

要特别说明的是,在内视场多探测器的情况下,除正交基线干涉处理外,还可利用空间相关法(Space Correlation Algorithm, SCA)对振动相位误差进行估计^[19].相关研究工作也值得深入进行。

3.4 大气时变相位误差校正

由于激光信号需要穿过整个大气层,大气湍流必然导致激光信号的波前产生形变.对于实孔径成像光学系统,波前形变会造成图像散焦.对于 ISAL,大气湍流的影响主要在能量和相位两个方面.能量方面,大气湍流会导致光电探测器上的回波信号光斑散焦,如图 4 所示,若光斑散焦范围超出光电探测器的尺寸,就会损失 ISAL 接收到的回波信号能量,从而降低成像信噪比,原理上可通过增大探测器的尺寸或采用少量光电探测器组(如 3×3 像元,对各自接收的回波信号进行求和处理)代替单个探测器以降低大气带来的散焦影响.相位方面,大气湍流会

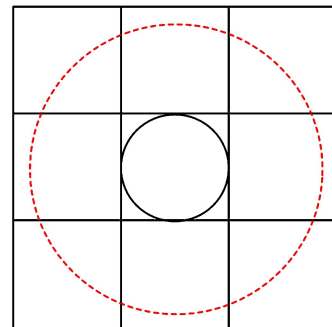


图 4 大气湍流导致光斑散焦示意图

Fig.4 Defocusing diagram of light spot caused by atmosphere

使目标回波信号同时产生空变相位误差和时变相位误差.和实孔径成像不同,ISAL 的二维图像在距离多普勒域,大气湍流引入的空变相位误差不对 ISAL 成像产生影响,但是大气湍流引入的随慢时间变化的相位误差将影响 ISAL 的信号相干累积并导致图像散焦.对于 $10.6 \mu\text{m}$ 的激光信号,弱大气湍流引入的时变相位误差变化范围约 5 rad 量级,强大气湍流引入的时变相位误差变化范围可达到 40 rad 量级^[20],远大于合成孔径成像所能允许的相位误差范围.地基 ISAL 对 GEO 目标成像时,基于 10~30 s 级慢时间信号积累,成像信噪比改善约 50 dB,这对系统的大气时变测量和校正提出了较高要求.为解决该问题,本文地基 ISAL 拟设置带有钠激光导引星的自适应光学子系统对回波信号的波前进行校正.

3.5 系统组成

自适应光学被广泛应用于大型天文望远镜,是一种针对光学波前的实时测量-控制-校正系统,其主要由波前探测器、波前控制器、波前校正器三部分组成,可将反射光的波前校正为理想状态^[21].

自适应光学技术需要在探测目标等晕区内存在足够亮的自然参考星以探测目标回光所经大气路径引起的波前畸变,但实际情况中很多区域不存在合适的自然导引星,因此可引进钠激光导引星技术,其利用地面激光器向天空辐射激光,该激光的波长为 589 nm,与钠的共振荧光谱线对准,当激光打到距离地表 85~95 km 处的钠离子层,钠原子被泵浦到高能级后将发生全向自发辐射,部分光子将被自适应光学子系统接收,形成可被探测的信号用于波前校正.

如图 5 所示,钠导引星激光源向目标-变形反射镜连线与大气边缘的交界处辐射激光,形成一颗钠导引星.由于大气湍流,该导引星辐射的激光到达变形反射镜的波前产生形变,波前探测器对其进行探测并形成控制信号,驱动波前控制器使变形反射镜产生微小形变,使得变形反射镜反射光的波前与理想波前一致.目标回波信号通过大气的路径与钠导引星辐射激光通过大气的路径基本相同,所以大气湍流导致的波前形变也基本相同.目标回波信号经过变形反射镜反射后,由大气湍流导致的波前形变得以校正,再进入接收端光

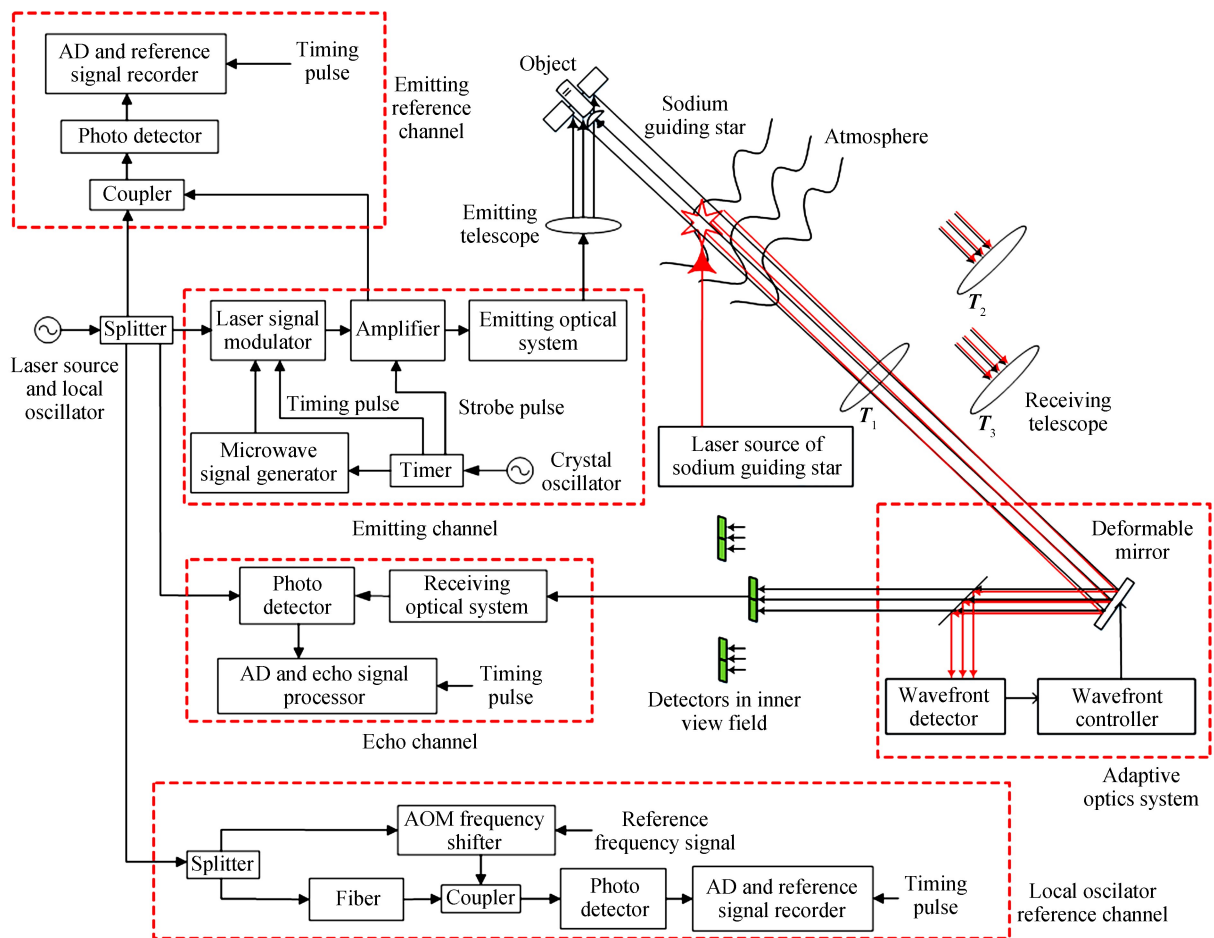


图 5 ISAL 系统组成框图
Fig.5 System composition of ISAL

学系统,在光电探测器上实施外差相干探测。

目前自适应光学的波前校正分辨率在 10 nm 量级,响应速度在 ms 量级^[21],其校正精度和速度能基本满足 ISAL 成像要求并保持接收望远镜增益。

自适应光学能够同时对大气湍流引入的空变和时变相位误差进行校正,但是如前文分析,空变相位误差不影响 ISAL 成像,所以本文地基 ISAL 所采用的自适应光学系统可以相对简单,图 5 所示自适应光学子系统中,波前控制器和波前校正器可省略,仅保留波前探测器用于提供大气湍流引入的时变相位误差曲线,对回波信号的相位补偿可在后续信号处理环节实现,波前探测器的数量应该也能减少。

大气湍流引入的时变相位误差和振动相位误差对回波信号的影响相似,外视场正交长基线干涉处理在原理上也可对大气湍流引入的时变相位误差进行估计,在存在钠激光导引星的情况下,在内视场同时增加 589 nm 波长的探测器,通过分离导引星的信号,采用内视场多探测器也可能对大气湍流引入的时变相位误差进行感知。地基 ISAL 与自适应光学应具备较强的互补性,相关问题值得深入研究。

图 5 中,本文地基 ISAL 主要由发射通道子系统、发射参考通道子系统、回波通道子系统、本振参考通道子系统以及自适应光学子系统组成。发射通道主要由定时器、宽带微波信号发生器、激光信号调制器、功率放大器和发射端光学系统组成,完成激光信号的调制、放大、发射功能。发射参考通道主要由耦合器、光电探测器和模数转换器(Analog-Digital Converter, AD)组成,被用于对发射信号相位误差进行记录。回波通道主要由接收端光学系统,光电探测器和 AD 组成,完成目标回波信号相干探测的功能。本振参考通道主要由声光调制器(Acoustic Optical Modulator, AOM)、光纤延时线、光电探测器和 AD 组成,被用于记录本振信号相位误差。自适应光学子系统通过波前探测器、波前控制器、变形反射镜形成校正波前形变的闭环系统。

除上述五个子系统,系统组成中还包括一个发射望远镜和三个 6 m 口径的接收望远镜,本文地基 ISAL 原理上就需要三个接收望远镜形成正交基线,通过干涉处理进行振动相位误差估计和三维成像。

4 仿真验证

本节基于仿真试验对 2.3 节中的成像信噪比分析、3.3 节中振动的影响分析以及 1.2 节中目标自转的影响分析进行验证,仿真所使用的 ISAL 系统参数如表 1,目标为尺寸 20 m 的卫星,如图 6 所示,为便于成像信噪比分析和成像分辨率测量,在卫星左下角设置了单散射点。

由于单脉冲信噪比远低于 0 dB,仿真试验中,采用 Keystone 变换对目标距离徙动中的一阶项进行校正^[22],再依据目标横向速度估计结果对距离徙动中的高阶项进行校正,进行平动补偿后,等效成转台模型对目标进行成像。

4.1 成像信噪比仿真验证

基于目标横向运动成像时,假定目标横向速度 $V_a = 800$ m/s,根据 2.1 节和 2.3 节的分析,3 s 即可获得 0.1 m 分辨率的成像结果,成像信噪比 2.2 dB,加长观测时间到 60 s,通过 20 视将成像信噪比提升到 8.7 dB。图 7(a)与图 7(b)分别给出了基于目标横向运动的单视成像仿真结果和多视成像仿真结果。

基于目标自转成像时,假定目标自转角速度为 $\omega_\theta = 0.0034$ mrad/s,根据 2.1 节和 2.3 节的分析,20 s 即可获得 0.1 m 分辨率的成像结果,成像信噪比 10.4 dB,成像仿真结果如图 7(c)所示,仿真中假定目标自转的转轴与图 7(a)中二维成像平面垂直。

表 2 给出了成像仿真结果的分辨率与信噪比,与 2.1 节和 2.3 节的相关分析基本一致,验证了本文系统指标分析的正确性,且说明对于本文地基 ISAL,即便目标不存在横向运动,也可基于目标自转成像。图 7 所示成像仿真结果表明,0.1 m 分辨率、10 dB 信噪比即可满足地基 ISAL 对 GEO 轨道空间目标的成像观测要求。

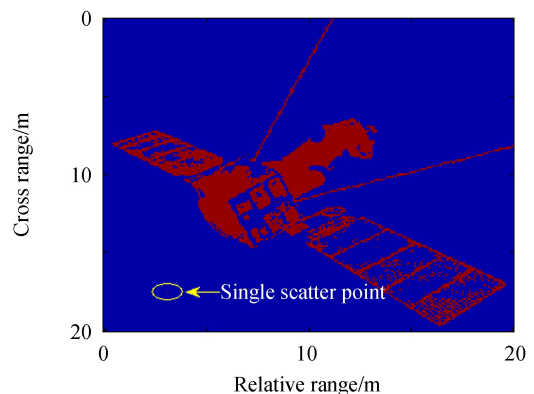


图 6 目标图示

Fig.6 Object

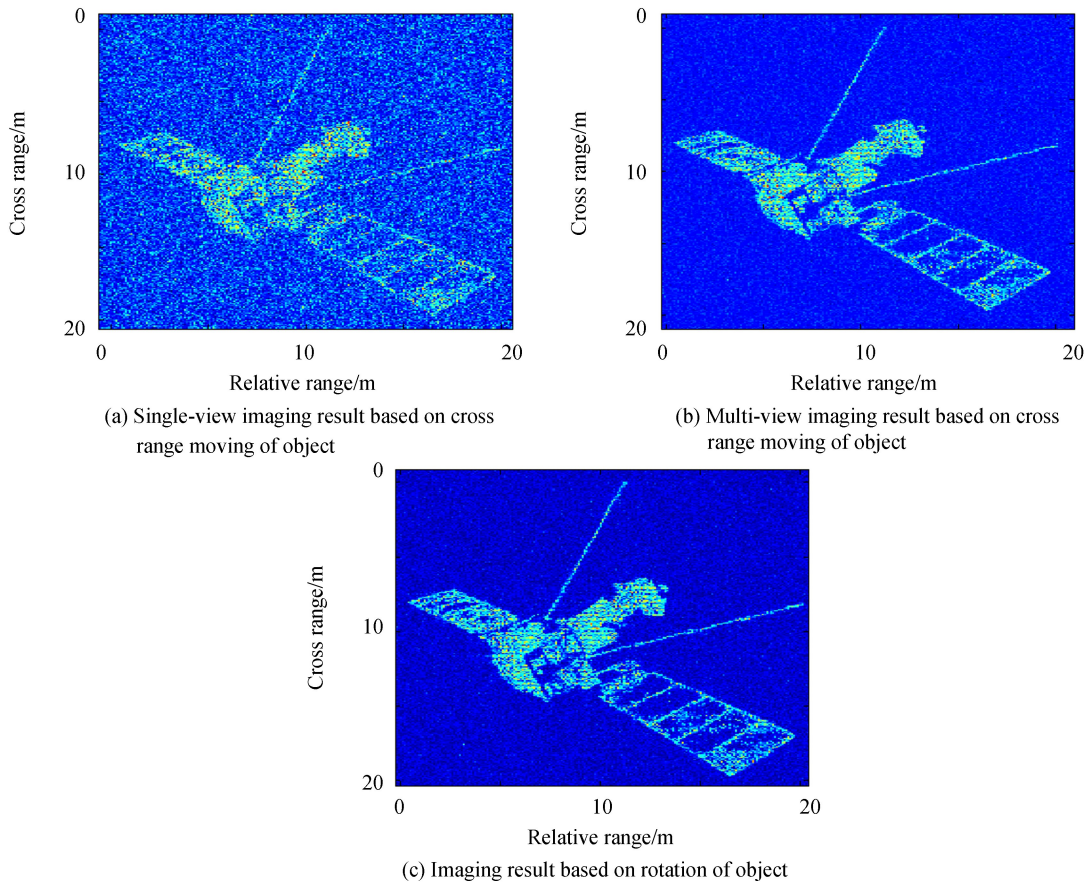


图7 成像仿真结果

Fig.7 Imaging results of simulation

表2 成像仿真结果相关参数

Table 2 Parameters of imaging results of simulation

Imaging pattern	Range resolution/m (Simulation value/ expected value)	Cross range resolution/m (Simulation value/ expected value)	Imaging SNR/dB (Simulation value/ expected value)
Cross range moving of object	0.1/0.11	0.1/0.107	8.5/8.7
Rotation of object	0.1/0.105	0.1/0.11	10.1/10.4

4.2 振动影响仿真验证

图8(b)给出了振动情况下(振动如图8(a)所示,幅度 $10.6 \mu\text{m}$, 频率 1 Hz)基于目标横向运动时(目标横向速度 $V_a = 800 \text{ m/s}$)的成像仿真结果,对比图7(a)与图8(b)发现幅度在波长量级、频率在 1 Hz 量级的振动

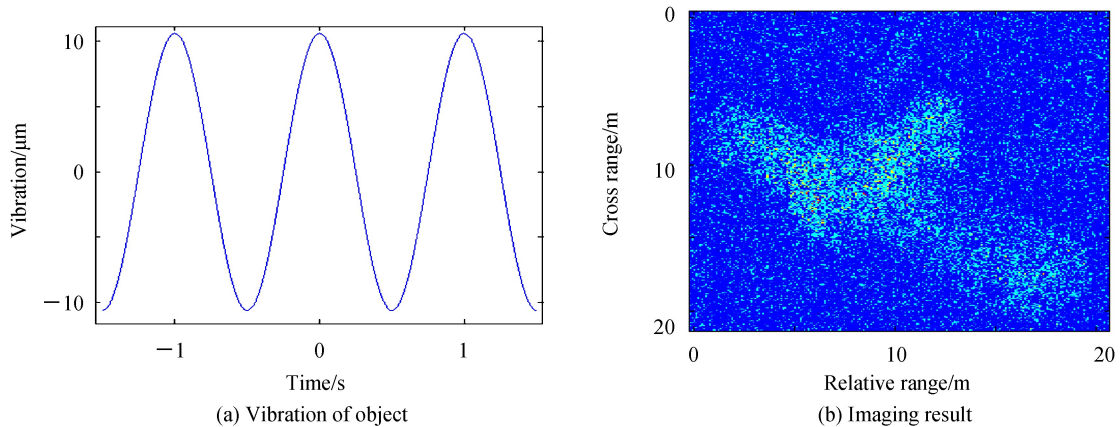


图8 目标振动情况下的成像仿真结果

Fig.8 Imaging result with vibration of object

即会引起成像结果完全散焦。

假定卫星飞轮产生的振动的幅度和频率远大于图 8(a)仿真所用的参数量级,不采用特殊措施对目标振动相位误差进行估计与补偿,难以获得高分辨率图像。

4.3 自转影响仿真验证

如图 9(a)所示,目标同时存在横向运动(横向速度 $V_a=200$ m/s,达到 0.1 m 横向分辨率需要 12 s 的成像时间)和三维自转(自转角速度 $\omega_\theta=0.0034$ mrad/s)情况下,成像仿真结果明显散焦。如图 10(b)所示,目标同时存在横向运动(横向速度 $V_a=200$ m/s,达到 0.1 m 横向分辨率需要 12 s 的成像时间)和自转(自转角速度 $\omega_\theta=0.0034$ mrad/s,自转轴与二维成像平面不垂直)情况下,成像仿真结果明显散焦。

本节成像仿真结果对 1.2 节自转影响的相关分析进行了验证,充分说明了对用于 GEO 轨道空间目标成像的地基 ISAL,由于成像时间长至 10 s 量级,目标三维自转或自转轴与二维成像平面不垂直会对影响成像质量,所以原理上需采用正交的观测结构,形成 InISAL 三维成像能力。

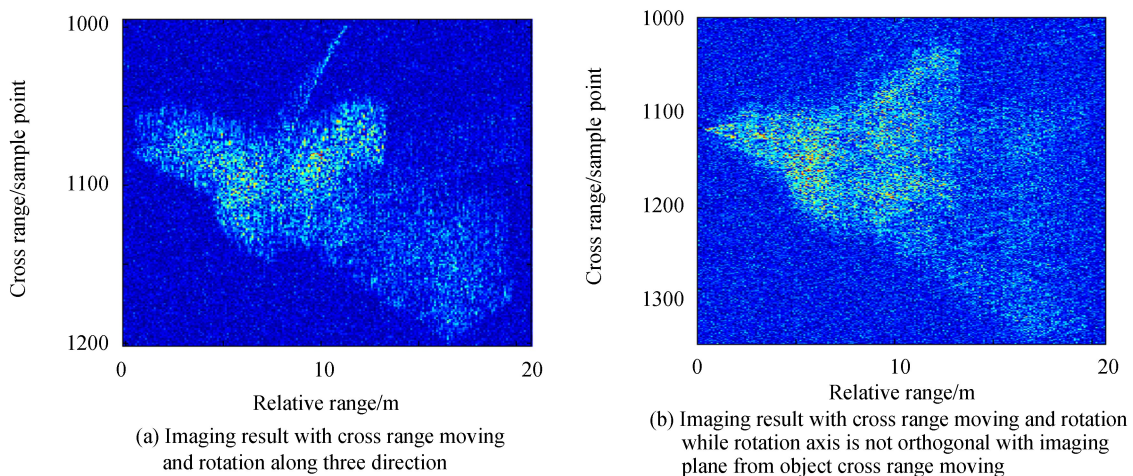


图 9 目标自转情况下的成像仿真结果
Fig.9 Imaging Results of Simulation with Object Rotation

5 结论

本文对用于 GEO 轨道空间目标成像观测的地基 ISAL 系统进行了分析,分析表明其有可能对 GEO 目标实现高分辨率高数据量成像观测,明确了目标振动、三维自转、时变大气相位误差等因素对地基 ISAL 空间目标成像带来的影响,提出了一些解决问题的方法和思路,研究结果表明,采用内视场和外视场相结合的正交观测结构是必要的。

参考文献

- [1] GSCHWENDTNER A B, KEICHER W E. Development of coherent laser radar at lincoln laboratory[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000, **12**(2):383-394.
- [2] KRAUSE B W, BUCK J, RYAN C, *et al.* Synthetic aperture ladar flight demonstration[C]. Optical Society of America/Conference on Lasers and Electro-optics (OSA/CLEO), 2011.
- [3] CONTRACTS[EB/OL].[2018-01-04]<http://archive.defense.gov/Contracts/Contract.aspx?ContractID=5140>.
- [4] XING Meng-dao. Synthetic aperture ladar techniques research[R]. National High Technology Research and Development (863)Program Report, 2008.
邢孟道. 合成孔径成像激光雷达技术研究[R]. 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目研究报告, 2008.
- [5] LIU L R. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(4): 579-599.
- [6] LUAN Z, SUN J, ZHOU Y, *et al.* Down-looking synthetic aperture imaging ladar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, **12**(11): 111101.
- [7] LI Dao-jing, DU Jian-bo, MA Meng, *et al.* The system analysis of spaceborne synthetic aperture ladar[J]. *Infrared and Laser Engine*, 2016, **45**(11):269-276.
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):269-276.
- [8] GAO Yang-te, ZHAO Bing-ji. Distribution and moving characteristic analysis of space craps[C]. The second conference

- of national THz technology and application, 2016: 437-443.
- 高阳特,赵秉吉. 地球同步轨道空间碎片分布及运动特性分析[C] 第二届全国太赫兹科学技术与应用学术交流会, 2016: 437-443.
- [9] LIAO Hui. Studies on the attitude determination and control system of an earth-oriented three-axis stabilized satellite[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000: 51-112.
廖辉. 对地定向三轴稳定卫星姿态确定和控制系统研究[D]. 西安:西北工业大学, 2000: 51-112.
- [10] 丁璐飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011: 127-130.
- [11] 斯科尼克主编, 王军等译. 雷达手册(第2版):[M]. 电子工业出版社, 2003: 18-20.
- [12] DU Jian-bo. Research on wideband signal generation and imaging processing technology for SAL[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 49-69.
杜剑波. 合成孔径激光雷达宽带信号产生和成像处理技术研究[D].北京:中国科学院大学, 2017: 49-69.
- [13] 蒲涛, 闻传花. 微波光子学原理与应用[M].北京:电子工业出版社, 2015. 240-246.
- [14] HU Xuan, LI Dao-jing, TIAN He, *et al.* Impact and correction of phase error in ladar signal to synthetic aperture imaging[J]. *Infrared and Laser Engine*, 2018, **47**(3): 0306001
胡烜,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.
- [15] HUXuan, LI Dao-jing, ZHAO Xu-feng. One method to remain signal coherence in synthetic aperture ladar based on local oscillator digital delay[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, **45**(5):0510003.
胡烜,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.
- [16] MA Meng, LI Dao-jing, DU Jian-bo. Imaging of airborne synthetic aperture ladar under platform vibration condition[J]. *Journal of Radars*, 2014, **3**(5): 591-602.
马萌, 李道京, 杜剑波. 振动条件下机载合成孔径激光雷达成像处理[J]. 雷达学报, 2014, **3**(5): 591-602.
- [17] DU Jian-bo, LI Dao-jing, MA Meng, *et al.* Vibration estimation and imaging of airborne synthetic aperture ladar based on interferometry processing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(9): 247-258.
杜剑波, 李道京, 马萌, 胡烜, 乔明. 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): 247-258.
- [18] MA Meng, LI Dao-jing. 3-D imaging for moving targets based on millimeter-wave InISAR with long orthogonal baselines[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, **35**(4):488-495.
马萌, 李道京. 正交长基线毫米波 InISAR 运动目标三维成像[J]. 红外与毫米波学报, 2016, **35**(4):488-495.
- [19] HU Xuan, LI Dao-jing. Vibration estimation of synthetic aperture lidar based on division of inner view field by two detectors along track[C].IGARSS2016.
- [20] DAI Pin-juan, LIU Guo-guo, WU Jin. Numerical simulation on synthetic aperture ladar imaging through atmospheric turbulence with phase gradient algorithm compensation[J]. *Acta Optica Sinica*. 2010, **30**(3): 739-746.
戴品娟,刘国国,吴瑾. 大气湍流下合成孔径激光雷达成像数值模拟及 PGA 补偿[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 739-746.
- [21] JIANG Wen-hang. Adaptive optical technology[J]. *Journal of Nature*, 2006, **28**(1):7-13.
姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, **28**(1):7-13.
- [22] CHEN Wen-chi, BAO Zheng, XING Meng-dao. Keystone transformation based ISAR imaging at the low SNR level[J]. *Journal of XIDIAN University*. 2003, **30**(2):155-159.
陈文驰, 保铮, 邢孟道. 基于 Keystone 变换的低信噪比 ISAR 成像[J]. 西安电子科技大学学报自然科学版, 2003, **30**(2):155-159.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61771449)

引用格式: HU Xuan, LI Dao-jing, FU Han-chu, *et al.* System Analysis of Ground-based Inverse Synthetic Aperture Lidar for Geosynchronous Orbit Object Imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0601003

胡烜,李道京,付瀚初,等.地球同步轨道空间目标地基逆合成孔径激光雷达系统分析[J].光子学报, 2018, **47**(6):0601003