

基于天基逆合成孔径激光雷达的静止轨道目标成像

阮航¹, 吴彦鸿², 张书仙³

(1. 装备学院 研究生管理大队, 北京 101416; 2. 装备学院 信息装备系, 北京 101416;
3. 北京测量通信总体研究所, 北京 100094)

摘要: 由于没有大气扰动的影响, 利用天基逆合成孔径激光雷达 (ISAL) 对静止轨道目标成像成为可能。初步设计了对静止轨道目标成像的天基 ISAL 的运行轨道, 分别分析了在顺行轨道和逆行轨道下, 天基 ISAL 轨道高度对重访周期、成像分辨率和成像积累时间的影响; 给出了 ISAL 方位成像的最小无模糊脉冲重复频率 (PRF), 分析了回波信噪比与成像距离、收发孔径之间的关系。研究表明, 利用逆行轨道的天基 ISAL 对静止轨道目标成像是初步可行的。

关键词: 天基逆合成孔径激光雷达; 静止轨道; 目标监视; 轨道高度

中图分类号: TN959.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1611-06

Geostationary orbital object imaging based on spaceborne inverse synthetic aperture radar

Ruan Hang¹, Wu Yanhong², Zhang Shuxian³

(1. Company of Postgraduate Management, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China;
2. Department of Information Equipment, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China;
3. Beijing Institute of Tracking & Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Without the turbulence of atmosphere, it is possible to image geostationary orbital objects via spaceborne inverse synthetic aperture radar (ISAL). The orbital altitude of spaceborne ISAL for geostationary orbital objects imaging was preliminary designed, the influence of orbital altitude on revisiting period, imaging resolution and coherent accumulation time was analyzed in direct orbit and retrograde orbit, respectively. The minimum pulse repetition frequency (PRF) for unambiguous azimuth imaging was presented, and relations between imaging range, transmit-receive aperture diameter and SNR were analyzed. The results show that it is initial feasible to image geostationary orbital objects using spaceborne ISAL in retrograde orbit.

Key words: spaceborne ISAL; geostationary orbit; object reconnaissance; orbital altitude

收稿日期: 2012-10-15; 修订日期: 2012-11-20

作者简介: 阮航 (1987-), 男, 博士生, 主要从事逆合成孔径激光雷达成像方面的研究工作。Email: dragonhang9@163.com

导师简介: 吴彦鸿 (1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信息获取与处理, 信息对抗等方面的研究工作。

Email: mail2wyh@163.com

0 引言

由于结合了相干激光技术和逆合成孔径技术,逆合成孔径激光雷达(ISAL)能够克服衍射极限的限制,方位向分辨率不会因作用距离的增加而恶化,具有远距离实现高分辨二维图像的能力^[1]。

ISAL 的上述优势对高精度成像侦察等军事领域具有重要意义,国内外开展了广泛的研究并取得了一定进展^[2-3]。然而,由于 ISAL 是一种相干体制的激光雷达,大气对光波信号的幅度、相位、传播方向和偏振等方面产生影响,使其在大气环境中的应用受到了严重的限制。

地球静止轨道卫星具有特殊军事及民用价值,涵盖了预警、侦察、中继和通信等功能。若能实现对其他国家重要静止轨道卫星的高分辨成像侦察,则可获取卫星的结构和搭载设备的类型、尺寸等信息,并可进一步分析其工作频段、光学卫星的成像能力和卫星承担的任务等。此外,由于静止轨道卫星距离地球远、数量多,一旦发生故障,利用地基微波段逆合成孔径雷达(ISAR)或传统的天基激光成像系统难以获取其细节特征和状态等信息,无法为故障分析提供支持。为此,在地球静止轨道附近部署 ISAL 成像系统,对空间目标监视和卫星故障诊断等方面具有重要作用,应用前景广阔。目前,对于天基 ISAL 的研究非常少^[4-5]。文中借鉴了参考文献[6]中天基 ISAR 的研究思路,对天基 ISAL 静止轨道目标成像进行了探索性研究,对其运行轨道进行了设计,分析了成像分辨率和成像时间、脉冲重复频率、回波信噪比与收发孔径大小等系统关键指标,为研究天基 ISAL 对静止轨道目标成像奠定了基础。

1 天基 ISAL 的轨道设计

对静止轨道目标成像的天基 ISAL 系统轨道设计准则如下:

(1) 天基 ISAL 和静止轨道卫星的轨道高度应设计得比较接近,以使系统的发射功率在合理的范围;(2) 为保证对静止轨道目标尽可能多的成像时机,还需要有较高的重访频率;(3) 为实现快速高分辨 ISAL 成像,静止轨道目标相对 ISAL 雷达的转动角速度不能太小。

卫星轨道分为顺轨和逆轨。一般而言,静止轨道

卫星都采用顺行轨道。由于天基 ISAL 的作用距离所限,其与静止轨道卫星的轨道高度相对比较接近。如果天基 ISAL 采用顺轨运行方式,二者的相对运动速度非常慢,重访周期较长,效率十分低下,不符合对目标空间监视的需求;如果采用逆轨运行方式,重访周期将大大缩短,从而提高了对静止轨道目标的监视能力,其意义将非常重大,然而,其代价是在发射时要更多的能量。

卫星的轨道周期为:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \quad (1)$$

式中: a 为轨道半长轴; μ 为万有引力常数与地球质量的乘积,这里采用 WGS84 中的值,即 $\mu=3\ 986\ 005\times 10^8\text{ m}^3/\text{s}^2$ 。

对于圆轨道的卫星,将 μ 代入公式(1)中,其轨道周期可写为:

$$T=0.009\ 952\ 01(R+H)^{3/2} \quad (2)$$

式中: R 为地球半径,其值取为 $6\ 378.14\text{ km}$; H 为卫星轨道高度,km。

对于理想的地球静止轨道卫星,其轨道高度 $H_g=35\ 786\text{ km}$,则轨道周期 $T_g=86\ 164\text{ s}$,相对地心的角速度 $\omega_g=2\pi/T_g=7.292\ 1\times 10^{-5}\text{ rad/s}$ 。

以天基 ISAL 的轨道高度 $H=34\ 786\text{ km}$ 为例,其轨道周期 $T_s=83\ 117\text{ s}$,相对地心角速度 $\omega_s=7.559\ 4\times 10^{-5}\text{ rad/s}$ 。下面对上述轨道高度的天基 ISAL 在顺轨和逆轨时的情况进行分析。

(1) 天基 ISAL 采用顺行轨道

静止轨道卫星与天基 ISAL 的角速度之差为:

$$\Delta\omega=|\omega_s-\omega_g|=2.673\times 10^{-6}\text{ rad/s} \quad (3)$$

按目标运动的相对性,可将静止轨道卫星与地球看成静止的,而天基 ISAL 以 $\Delta\omega$ 的角速度绕地球质心运动,其对静止轨道卫星的重访周期为:

$$\Delta T=\frac{2\pi}{\Delta\omega}=2.350\ 6\times 10^{-6}\text{ s}=27.206\text{ d} \quad (4)$$

可见,采用顺轨运行方式下的天基 ISAL 对静止轨道目标的重访周期十分漫长,将严重限制对目标的监视效率。

当天基 ISAL 与静止轨道卫星的星下点位置重合时,二者的相对运动速度大小为:

$$\Delta v=\omega_s(R+H_s)-\omega_g(R+H_g) \quad (5)$$

当轨道高度相差 $1\ 000\text{ km}$ 时,重访点时刻二者

的相对运动速度为 37.110 7 m/s。

(2) 天基 ISAL 采用逆行轨道

静止轨道卫星与天基 ISAL 的角速度之差为：

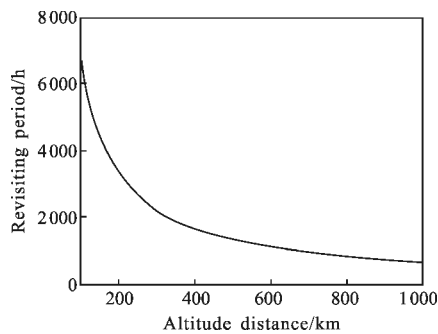
$$\Delta\omega = |\omega_s + \omega_g| = 1.4852 \times 10^{-4} \text{ rad/s} \quad (6)$$

重访周期为：

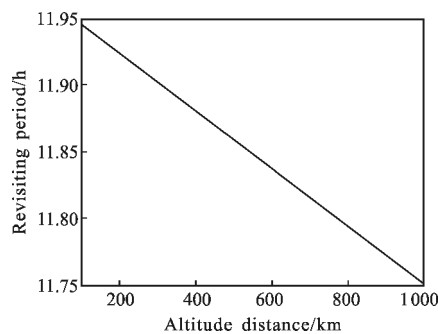
$$\Delta T = 42\,307 \text{ s} = 11.751\,9 \text{ h} \quad (7)$$

同样可计算在星下点重合时刻二者的瞬时相对速度,其值为 6 186.4 m/s。

图 1 给出了顺轨和逆轨情况下二者轨道高度差与重访周期的关系曲线。可见,采用逆轨运行的天基 ISAL 平台重访周期小于 12 h,比较符合对目标高效率监视的需要。同时,轨道高度差的变化对重访周期的影响并不大,因而天基 ISAL 轨道可以设计得离静止轨道较近,可同时降低对激光器发射功率和相干长度的要求。如果在相同的轨道高度上平均部署 N 颗天基 ISAL 卫星,不仅可以同时监视多个静止轨道目标,且对同一目标的重访周期将降至 $\Delta T/N$ 。



(a) 顺行轨道
(a) Direct orbit



(b) 逆行轨道
(b) Retrograde orbit

图 1 轨道高度差与重访周期关系曲线

Fig.1 Revisiting period versus orbital altitude distance

综上所述,利用天基 ISAL 对静止轨道卫星成像

时,采用逆轨运行的 ISAL 平台可基本满足对目标的高重访率、高分辨快速成像的需求。

2 成像分辨率与成像时间

ISAL 的距离向分辨率由其发射信号的带宽决定,即:

$$\rho_r = \frac{c}{2B_r} \quad (8)$$

式中:c 为光在真空中传播速度;B_r 为发射信号带宽。

ISAL 的方位向分辨率由波长和观测时间内目标与雷达的相对转角确定,即:

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (9)$$

对于波长一定的 ISAL 雷达,只能通过增加相对转角的大小来获取更高的方位分辨率。当波长 $\lambda = 10 \mu\text{m}$ 时,要获取方位分辨率 0.001 m,则需要的相对转角 $\Delta\theta = 0.005 \text{ rad} (0.286\,5^\circ)$ 。

静止轨道卫星主要采取三轴稳定和自旋稳定这两种调姿方式。对自旋卫星的成像积累角度主要由其自身的自旋运动提供,由于其自旋角速度相对较大,因而需要较高的发射重频,且其方位向图像定标更加复杂。对三轴稳定卫星的成像积累角由其与雷达的相对运动产生,因而方位向分辨率更容易分析。在此针对三轴稳定卫星进行分析,其空间几何关系如图 2 所示。值得说明的是,图 2 中将地球和静止轨道卫星等效为静止的,而天基 ISAL 卫星以 $|\omega_s \pm \omega_g|$ 的角速度绕地心转动。假设当静止轨道卫星、天基 ISAL 卫星和地心处于三点共线时为零时刻(即 O' 点时刻)。

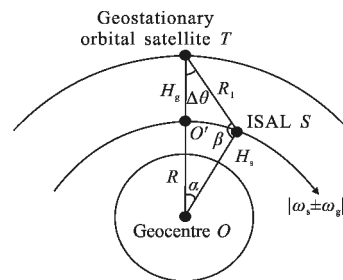


图 2 天基 ISAL 与静止轨道卫星空间几何图

Fig.2 Geometry of spaceborne ISAL and geostationary orbital satellite

在图 2 中,由于天基 ISAL 轨道设计的为低于地球静止轨道高度 $\Delta H = H_g - H_s$ 的圆轨道,因此,满足以下关系式:

$$\begin{cases} \frac{R_1}{\sin\alpha} = \frac{H_s+R}{\sin\beta} = \frac{H_s+R}{\sin\Delta\theta} \\ \alpha+\beta+\Delta\theta=\pi \end{cases} \quad (10)$$

式中: R_1 为天基 ISAL 至静止轨道卫星 T 的距离,也即成像的瞬时距离,其余各变量的定义同前。

将公式(9)代入公式(10)中,并解方程组(10),可以求出角度 α 、 β 和 R_1 的值:

$$\begin{cases} \beta=\pi-\arcsin\left[\frac{(H_s+R)\sin(\lambda/2\rho_a)}{H_s+R}\right] \\ \alpha=\pi-\Delta\theta-\beta \\ R_1=\frac{\sin\alpha}{\sin\Delta\theta}(H_s+R) \end{cases} \quad (11)$$

求出角度 α 后便可求得 ISAL 成像需要的脉冲积累时间:

$$T_{sa}=\begin{cases} \frac{\alpha}{|\omega_s-\omega_g|}, \text{顺行轨道时} \\ \frac{\alpha}{|\omega_s+\omega_g|}, \text{逆行轨道时} \end{cases} \quad (12)$$

结合公式(2)、(11)和(12)可以求得二者的轨道高度差与脉冲积累时间的关系,图 3 给出了当波长 $\lambda=10\ \mu\text{m}$ 、方位分辨率 $\rho_a=0.001\ \text{m}$ 时的关系曲线。

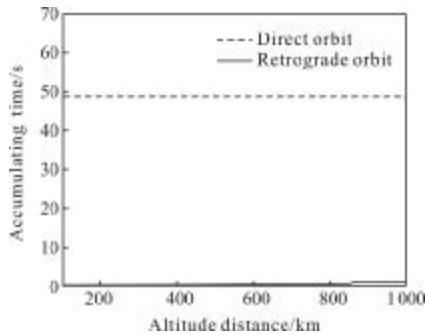


图 3 轨道高度差与脉冲积累时间的关系

Fig.3 Coherent accumulation time versus orbital altitude distance

在图 3 中,以高度差 1 000 km 为例,逆轨运行时的脉冲积累时间仅为 0.817 9 s,而顺轨运行时脉冲积累时间则长达 45.437 s,由于频率稳定度的影响,激光信号不可能在如此长时间内保持良好的相干性,且平台振动在较长的脉冲积累时间内也会引入很大的相位误差,最终造成无法成像。同时,综合以上分析,从成像的角度而言,采用逆轨运行的天基 ISAL 轨道更适合于对静止轨道卫星快速成像的要求。因此,之后的分析将只针对逆轨运行的天基 ISAL。

图 4 为天基 ISAL 从零时刻 O' 点开始相对转动

角度 $\Delta\theta$ 在不同轨道高度差时的变化曲线。从图中可见,三种轨道高度差下的相对转动角度都可近似为随时间的一阶变化,因此可认为在零时刻点附近成像时,ISAL 成像的转台模型是匀速转动的,这将有利于简化后续的成像处理。

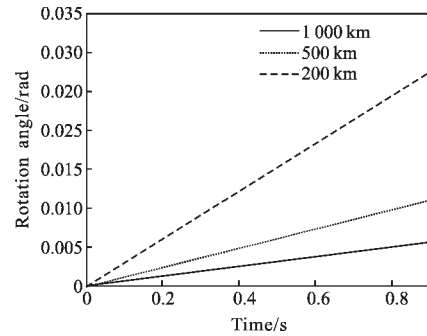


图 4 相对转动角度变化曲线

Fig.4 Curves of relative rotation angle

3 脉冲重复频率

逆合成孔径成像在运动补偿后,只需在脉冲积累时间内回波的多普勒中心不变就可获取目标的图像,只是此时目标像会偏离逆合成孔径图像的中心,甚至出现折叠。ISAL 回波的多普勒由两部分组成:分别为平动分量和转动分量产生的多普勒。目标上所有散射点的平动多普勒都相同,因而对于成像没有贡献,可以通过平动补偿去除。对方位向的高分辨率有贡献的正是转动多普勒。因此,方位向相干积累过程中,只需保证转动多普勒无模糊即可:

$$\text{PRF} \geq \frac{4\omega r}{\lambda} \quad (13)$$

式中: ω 为转动角速度; r 为目标最大转动半径; λ 为发射信号波长。图 2 中,在零时刻点 O' 附近,对于最大转动半径 r 分别为 5 m、10 m 和 15 m 的静止轨道卫星,当发射信号波长 λ 时,天基 ISAL、静止轨道卫星二者的轨道高度差与最小无模糊脉冲重复频率 PRF 之间的关系曲线如图 5 所示。从图 5 中可知,轨道高度差越大,最大转动半径越小,最小无模糊 PRF 就越小。然而,即使当轨道高度差为 1 000 km、转动半径为 5 m 时,最小无模糊 PRF 仍高达 11.53 kHz,对于要获取高功率、大信号带宽、快速调频激光信号的激光器来说仍是很大的挑战,目前可以通过信号处理的方法解决,其代价是造成了方位向分辨率的降低^[7]。

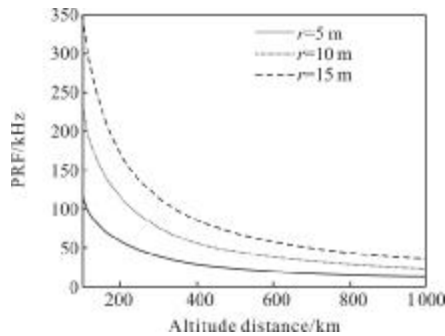


图 5 最小无模糊 PRF 与轨道高度差的关系曲线

Fig.5 Minimum unambiguous PRF versus orbital altitude distance

4 天基 ISAL 回波信噪比分析

天基 ISAL 对静止轨道目标成像不需要考虑大气衰减的影响,只需考虑光学系统中的衰减。天基 ISAL 的接收回波功率可表示为^[8]:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} T_{opt} \quad (14)$$

式中: P_t 为发射信号功率; σ 为目标散射截面; G 为发射、接收天线增益; λ 为信号波长; T_{opt} 为 ISAL 光学系统的透过率; R 为成像距离。

若只考虑激光外差检测部分引入的散粒噪声而忽略斑点噪声的影响^[9],在经过距离向脉冲压缩处理和方位向合成孔径处理后的信噪比为:

$$SNR = \frac{(T_p \Delta f)(T_{sa} \Delta f_d) P_r}{(h\nu/\lambda\eta_d) B} = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \frac{(T_p \Delta f)(T_{sa} \Delta f_d)}{(h\nu/\lambda\eta_d) B} T_{opt} \quad (15)$$

式中: η_d 为外差探测器量子效率; h 为普朗克常数; ν 为光频; $h\nu/\lambda\eta_d$ 表示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; $T_{sa} \Delta f$ 为距离向脉冲压缩增益; T_{sa} 为脉冲积累时间; Δf_d 为方位向数据多普勒带宽; $T_{sa} \Delta f_d$ 为方位向合成孔径处理增益。

对于 ISAL, $T_{sa} = \Delta\theta R/V = \lambda R/2V\rho_a$, $\Delta\theta$ 为目标相对雷达的转动积累角, V 为 ISAL 平台相对目标的运动速度, ρ_a 为方位向分辨率。假设满足 $\Delta f = B$, 系统的脉冲重复频率 $f_a = 2\Delta f_d$, 且有 $P_{av} = P_t T_p/T_{prt}$, P_{av} 为发射平均功率, T_{prt} 为脉冲重复时间, 天线增益与收发孔径 L 之间满足 $G = 4\pi^2 L^2/\lambda^2$ 。则公式(15)可化简为:

$$SNR = \frac{P_{av} \pi \sigma \eta_d T_{opt} L \Delta\theta}{8h\nu\lambda} \left(\frac{L}{R}\right)^3 = \frac{P_{av} \pi \sigma \eta_d T_{opt} L}{16h\nu V \rho_a} \left(\frac{L}{R}\right)^3 \quad (16)$$

从公式(16)可得以下结论:

(1) 增大收发孔径能够显著提高 ISAL 探测的回波信噪比, 孔径大小增加一倍, 回波信噪比将提高 12 dB; 但天线孔径不能选得太大, 否则其波束宽度将很小以至于无法完全将目标覆盖;

(2) 在相同条件下, 通过增加对目标的观测时间来增加目标相对雷达的转动积累角, 也即提高方位分辨率, 可以提高 ISAL 回波信噪比, 这实际上是增加了方位向积累脉冲数。

在此, 取 ISAL 发射平均功率 $P_{av} = 500$ W, 目标散射截面 $\sigma = 1$ m², 孔径长度 L 分别取 0.1 m、0.2 m 和 0.4 m, 方位分辨率 $\rho_a = 0.001$ m, 外差探测器量子效率 $\eta_d = 0.8$ ^[4], 光学系统透过率 $T_{opt} = 0.5$ ^[10], 激光波长 $\lambda = 10.6$ μ m。当天基 ISAL 逆轨运行时, 取平台相对目标的运动速度 $V = 6$ 100 m/s。则 ISAL 接收信噪比 SNR 在不同孔径长度下与成像距离 R 的关系曲线如图 6 所示。

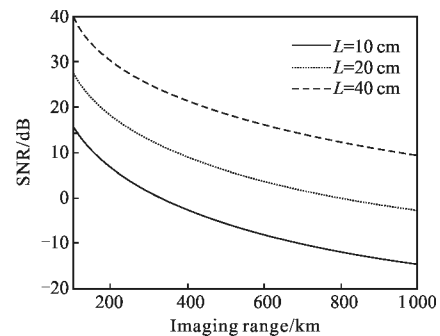


图 6 ISAL 信噪比与成像距离的关系

Fig.6 SNR of ISAL versus imaging range

从图 6 中可见, 增加收发孔径的大小能够显著提高 ISAL 接收信噪比, 这与理论分析一致。因而在 ISAL 系统的设计中, 可以充分利用这个特点, 根据所观测目标的尺寸大小来选取合适的收发孔径, 从而在波束能够完全覆盖目标的前提下, 大大降低了对激光器发射功率的要求。

5 结论

由于静止轨道的民用和军事意义及所处的真空环境, 文中提出了利用天基 ISAL 对静止轨道目标成像的概念, 并对天基 ISAL 卫星的轨道设计、成像分辨率和成像时间、脉冲重复频率和回波信噪比 4 个方面进行了较深入的研究, 结果表明, 利用天基

ISAL 对静止轨道目标成像是初步可行的。今后将在此基础上对基于天基 ISAL 静止轨道目标成像做更进一步研究。

参考文献:

- [1] Xu Nan, Liu Liren, Lu Wei. Signal processing construction and algorithm of range equal delay in SAIL [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(6): 1405-1409. (in Chinese)
许楠, 刘立人, 鲁伟. 合成孔径激光成像雷达距离向等延时的信号处理结构和算法 [J]. *电子学报*, 2010, 38(6): 1405-1409.
- [2] Krause B W, Buck J R, Ryan C, et al. Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]//2011 Conference on Laser and Electro-Optics, 2011: 1-2.
- [3] Xing Mengdao, Guo Liang, Tang Yu, et al. Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 290-294. (in Chinese)
邢孟道, 郭亮, 唐禹, 等. 合成孔径成像激光雷达实验系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 290-294.
- [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 Jinming, Hu Yihua, Li Jinshan, et al. Orbit of spaceborne SAL for geostationary satellites imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 684-689. (in Chinese)
李今明, 胡以华, 李今山, 等. 对静止轨道卫星成像的 SAL 载星轨道[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 684-689.
- [6] Gao Meiguo, Chen Defeng, Jiang Changhong, et al. Geostationary orbital objects detection based on spaceborne radar imaging [C]//9th International Conference on Signal Processing(ICSP), 2008, 2461-2464.
- [7] Zang Bo, Guo Rui, Tang Yu, et al. Real envelope imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(12): 2152-2157. (in Chinese)
臧博, 郭睿, 唐禹, 等. 逆合成孔径成像激光雷达实包络成像算法[J]. *光子学报*, 2010, 39(12): 2152-2157.
- [8] Wang Enhong, Hu Yihua, Li Lei, et al. Adaptive imaging technology of synthetic aperture lidar [J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(11): 65-68. (in Chinese)
王恩宏, 胡以华, 李磊, 等. 合成孔径激光雷达自适应成像技术[J]. *电光与控制*, 2010, 17(11): 65-68.
- [9] Karr T J. Synthetic aperture lidar for planetary sensing[C]//SPIE, 2003, 5151: 44-52.
- [10] Lucke R L, Richard L J. Photon-limited synthetic-aperture imaging for planet surface studies [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(24): 5084-5095.