

一种适用于合成孔径激光雷达宽场景成像的 频域变标算法

李小珍¹ 吴玉峰² 郭亮^{1*} 曾晓东¹

(¹ 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071
² 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要 合成孔径激光雷达(SAL)由于信号波长短,造成波束光斑脚印较小,限制了成像场景的幅宽。针对该问题,将合成孔径雷达(SAR)中常用的宽场景测绘 TOPS 模式推广应用到 SAL 中,并针对 SAL 的信号特性,提出了一种可行的成像算法:采用基于谱分析的方位预滤波方法,消除由于波束转动导致的方位信号模糊,获得信号无模糊的二维频谱;利用改进的频率变标算法(FSA)完成距离压缩及距离徙动校正,并校正平台连续运动引入的多普勒频移;结合去斜技术将信号聚焦在方位频域,获得无模糊的 SAL 图像。仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词 遥感;激光雷达;合成孔径;宽场景成像;频率变标算法;方位预滤波

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1228004

Frequency Scaling Algorithm for Synthetic Aperture Ladar Imaging with Wide-Scene

Li Xiaozhen¹ Wu Yufeng² Guo Liang¹ Zeng Xiaodong¹

(¹ School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China
² National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Due to the short wavelength of the signal in synthetic aperture ladar (SAL), the spot size is very small, which limits the imaging field. For this problem, the common wide-scene imaging mode in synthetic aperture radar (SAR), i. e., the TOPS imaging mode, is extended and applied in SAL, and according to the signal characteristic of SAL, a suitable imaging algorithm is proposed. The azimuth pre-filtering based on the spectrum analysis is adopted to eliminate the aliasing caused by the steering of the antenna beam and the signal spectrum without alias is obtained. The improved frequency scaling algorithm (FSA) is used to complete the range compression and range cell migration correction. Also, the Doppler frequency shift induced by the continuous movement of the platform is compensated. With the dechirp technique, the signal is focused in the Doppler domain and the SAL image without blurring is obtained. Simulation results are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words remote sensing; ladar; synthetic aperture; wide-scene imaging; frequency scaling algorithm; azimuth pre-filtering

OCIS codes 280.6730; 280.4750; 050.1960; 120.7280

1 引言

合成孔径激光雷达(SAL)作为激光雷达技术与

合成孔径技术的产物,以激光作为发射信号,利用大带宽激光信号和虚拟的合成孔径实现目标的超高分

收稿日期: 2013-06-20; 收到修改稿日期: 2013-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(61107006)、中央高校基本科研业务费(K5051305005)

作者简介: 李小珍(1983—),女,博士研究生,主要从事激光雷达系统设计成像方面的研究。

E-mail: xzli@mail.xidian.edu.cn

导师简介: 曾晓东(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事激光器光学、光纤传感与测量技术以及远轴光传播等方面的研究。E-mail: xdzeng@xidian.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: lguo@mail.xidian.edu.cn

辨二维成像,成为远距离获得厘米级分辨率的唯一光学观测手段^[1]。近年来,SAL 逐渐得到国内外研究人员的重视,相继进行了一些机载试验。2006 年美国雷神公司及诺斯罗普-格鲁门公司分别成功演示了机载合成孔径激光雷达实验^[2];2011 年美国洛克希德-马丁公司(LMCT)独立完成了机载合成孔径激光雷达演示样机的飞行实验^[3],对距离 1.6 km 的地面目标获得了分辨率优于 3.3 cm 的成像结果。SAL 在空间远程探测和高分辨率成像应用中具有巨大的潜力。

然而,由于激光波长一般在微米量级^[4-5],导致照射场景范围非常小。比如在 LMCT 公开的机载 SAL 实验中,1.6 km 斜距目标平面上的光斑脚印大小只有约 $\phi 1$ m,这导致了成像场景的幅宽也只有约 1 m^[3],如此小的成像场景幅宽远不能满足应用需求。因此,如何扩大 SAL 的成像场景宽度是其发展中需要解决的关键问题之一。扫描模式或称 TOPS 模式^[6]是合成孔径雷达(SAR)中实现宽场景成像的主要模式,它通过距离向和方位向的二维扫描,以牺牲一定的方位分辨率为代价,实现在较短时间对大场景进行成像,其成像算法也已经比较成熟^[7-8]。本文将 TOPS 模式推广应用到 SAL 中,实现较宽场景的成像。由于 SAR 的成像算法主要是

针对脉冲信号提出的,所以直接应用到 SAL 中,肯定会出现问题。当发射信号采用连续波时,传统的“一步一停”工作模式也将不再成立。本文根据 SAL 工作在 TOPS 模式时信号的特点,对算法进行改进,提出了一种适用于 SAL 的成像方法。

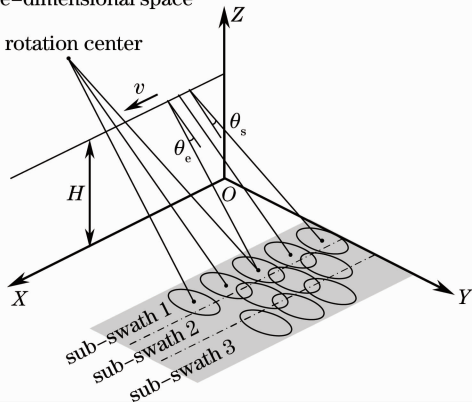
SAL 在实际工作中,通常存在一些非理想的情况,如发射信号的频率非线性问题^[9]、大气湍流的影响^[10]以及平台线振动^[11-12]等。针对这些问题,研究人员做了相关的研究,并提出了一些补偿方法,得到了良好的效果。因此,本文不考虑这些非理想情况,即假设 SAL 工作在理想情况下,重点针对成像算法进行研究。

2 信号分析

2.1 信号模型

SAL 的 TOPS 工作模式的几何模型如图 1 所示。载机平台飞行高度为 H ,以速度 v 沿 X 轴作匀速直线运动,它到场景中心的距离为 R_s 。激光器通过透镜之后的天线波束宽度为 θ_{bw} ,在数据录取的同时,波束以旋转中心为原点,从后往前扫描,扫描角度从 θ_s 到 θ_e ,旋转中心到雷达航线的最近距离为 R_{ref} 。

(a) in the three-dimensional space



(b) in the imaging plane

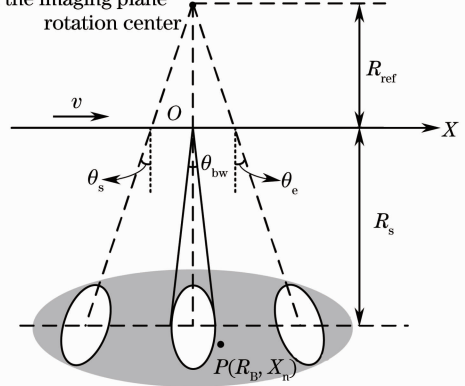


图 1 TOPS 模式几何模型

Fig. 1 Geometry of TOPS imaging mode

SAL 采用调频连续波(FMCW)作为发射信号,其信号形式可以写为

$$s_0(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_c t + j\pi\gamma \hat{t}^2), \quad (1)$$

式中 f_c 为信号中心载频, T_p 为信号时间宽度,也即脉冲重复间隔(PRI), γ 为信号调频率, \hat{t} 为距离向快

时间, $t_m = mT_p$ ($m = 1, 2, 3, \dots$) 为方位向慢时间,即每个信号的起始时间, t 为全时间,它们三者之间的关系为 $t = t_m + \hat{t}$ 。设成像场景中存在一点目标 $P(R_B, X_n)$,其中 R_B 为点目标到雷达航迹的最近距离,则其回波为

$$s_E(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - 2R(R_B; t_m)/c}{T_p}\right] \exp\left\{j2\pi f_c \left[t - \frac{2R(R_B; t_m)}{c}\right] + j\pi\gamma \left[\hat{t} - \frac{2R(R_B; t_m)}{c}\right]^2\right\}, \quad (2)$$

式中 c 为光的传播速度, $R(R_B; t_m)$ 为雷达到点目标的瞬时斜距。(2)式中忽略了对成像没有影响的常数项。在考虑信号传播过程中雷达平台的运动时, 瞬时斜距可以表示为

$$R(R_B; t_m) = \sqrt{[v(t + t_m) - X_n]^2 + R_B^2}. \quad (3)$$

$$H_{\text{dechirp}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_s/c}{T_p}\right) \exp\left[-j2\pi f_c\left(t - \frac{2R_s}{c}\right) - j\pi\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_s}{c}\right)^2\right]. \quad (4)$$

去斜后的差频输出信号为

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - 2R(R_B; t_m)/c}{T_p}\right] \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}f_c R_\Delta\right) \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_s}{c}\right)R_\Delta\right] \exp\left(j\frac{4\pi}{c^2}\gamma R_\Delta^2\right), \quad (5)$$

式中 $R_\Delta = R(R_B; t_m) - R_s$ 。(5)式中第一个指数项为方位向的相位历程, 第二个指数项为由于去斜处理产生的距离向的单频信号, 第三个指数项为剩余视频相位(RVP), 它会使多普勒有少许改变, 必须进行补偿。

2.2 信号特性分析

FMCW 信号的扫频周期较长, 平台在此期间的运动会会在距离向引入附加的多普勒频移, 为

$$f_d = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR(R_B; t_m)}{dt} \approx \frac{2}{\lambda} v \sin \theta = f_a, \quad (6)$$

式中 λ 为中心载频对应的波长, θ 为目标的瞬时斜视角, f_a 为方位频率。该多普勒频移项会使目标距离向聚焦位置发生改变, 由于其与方位向频率有关, 在距离向脉压结果中表现为距离单元徙动(RCM)剩余, 并且目标聚焦位置的改变会造成目标信号对应的方位调频率与距离对应的方位调频率失配, 严重时将影响方位的聚焦。因此, 必须对该频移项进行补偿, 可以在方位多普勒域进行。

TOPS 模式由于雷达波束方位向的扫描, 使得不同方位位置的点目标具有不同的多普勒中心, 导致全场景多普勒带宽 B_a 由两部分组成, 一部分是回波信号的瞬时多普勒带宽 B_{inst} , 另一部分为多普勒中心变化附加的带宽 B_d , 其方位信号的时频关系如图 2 所示。而为了减小数据量, 系统采用的脉冲重复频率(PRF, f_{PRF}) 通常只是略高于回波信号的瞬时多普勒带宽 B_{inst} , 因此, 对于全场景, 方位信号在

由于调频连续波信号带宽大, 若直接采用, 数据量将非常大, 通常的方法是先进行去斜处理, 去斜函数若以场景中心距离为参考, 则可以表示为

多普勒域是模糊的。对于频域的成像算法, 得到无模糊的信号频谱是至关重要的, 因此, 首先必须对原始回波信号进行去模糊处理, 可以通过方位预滤波来实现。

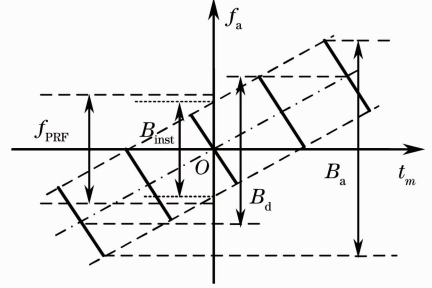


图 2 方位信号时频分布

Fig. 2 Time-frequency diagram of the azimuth signal

3 成像方法

3.1 方位预滤波

TOPS 模式在数据录取过程中由于波束的转动, 导致全场景回波信号方位多普勒带宽高于系统 PRF, 造成信号在方位频域的模糊。为了采用高效的频域算法对全场景进行成像, 需要先进行去模糊处理, 可以通过基于谱分析的方位预滤波实现。该方法通过信号与参考信号的卷积, 实现去模糊。参考信号为

$$S_{\text{ref}}(t_m) = \exp\left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} t_m^2\right). \quad (7)$$

卷积过程可以表示为

$$s_2(\hat{t}, t_m) = s(\hat{t}, t_m) \otimes_{az} S_{\text{ref}}(t_m) = \int s(\hat{t}, x) \exp\left[-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}}(x - t_m)^2\right] dx = \exp\left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} t_m^2\right) \int s(\hat{t}, x) \exp\left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} x^2\right) \exp\left(-j2\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} t_m x\right) dx, \quad (8)$$

式中 \otimes_{az} 表示方位卷积。由(8)式可以看出,卷积过程可以通过信号与二次相位函数相乘然后作傅里叶变换,再补偿一个二次相位实现。由(8)式中的傅里叶变换核可知变换后方位向频率为

$$f_a = \frac{2v^2}{\lambda R_{ref}} t_m. \quad (9)$$

因此,傅里叶变换后的 PRF 变为

$$f'_{PRF} = \frac{2v^2}{\lambda R_{ref}} \frac{N}{f_{PRF}}, \quad (10)$$

式中 N 为方位向采样点数。由(10)式可以看出,卷

积后的 PRF 与方位采样点数 N 成正比。为了达到去模糊的目的,需要保证 f'_{PRF} 高于方位信号的总带宽。

根据傅里叶变换的性质,时域卷积等效于频域的点乘,因此,为了得到原始信号的频谱,可以将卷积后的信号变换到方位多普勒域,然后与补偿信号相乘,补偿信号为

$$S_{com}(f_a) = \exp\left(-j\pi \frac{\lambda R_{ref}}{2v^2} f_a^2\right). \quad (11)$$

则原始回波信号方位无模糊的频谱为

$$S_2(\hat{t}, f_a) = \left\{ \exp\left(-j \frac{4\pi R_B \beta}{\lambda}\right) \exp(j2\pi f_a \hat{t}) \exp\left(-j \frac{2\pi X_n}{v} f_a\right) \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi \gamma}{c} \left(\frac{R_B}{\beta} - R_s\right) \left(\hat{t} - \frac{2R_s}{c}\right)\right] \text{src}(\hat{t}, f_a; R_B) \right\} \otimes \exp(-j\pi \gamma \hat{t}^2), \quad (12)$$

式中 $\text{src}(\hat{t}, f_a) = \exp\left[-j \frac{2\pi R_B \gamma^2 \lambda}{c^2} \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^3} \left(\hat{t} - \frac{2R_{ref}}{c}\right)^2\right] \exp\left[j \frac{2\pi R_B \gamma^3 \lambda^2}{c^3} \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^5} \left(\hat{t} - \frac{2R_{ref}}{c}\right)^3\right]$, $\beta = \beta(f_a) = \sqrt{1 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}}$ 。(12)式中第一个指数项为方位向的相位历程,决定方位向的聚焦;第二个指数项为多普勒平移项,由平台的连续运动引入;第三个指数项决定目标方位聚焦后的位置;第四个指数项为距离向与方位向的耦合项,与点目标位置 R_B 有关,说明耦合具有距离空变性。

3.2 RCM 校正及距离脉压

由(12)式可知,距离向与方位向的耦合具有距离空变性,使得要完全校正 RCM 比较复杂。频率变标算法(FSA)通过变标处理使得场景内所有目标具有相同的距离徙动曲线,进而可以通过整体平移来实现 RCM 的校正^[13]。改进的 FSA^[14]在原来算法的基础上,考虑到平台连续运动的影响,对算法进行改进,有效消除了平台连续运动引入的附加的多普勒频移项。改进 FSA 算法的具体实现过程可以参考文献^[14]。

3.3 方位脉压

经过 RCM 校正及距离向脉压后,信号可以表示为

$$S_3\left(\frac{f_r}{\beta}, f_a\right) = \exp\left(-j \frac{4\pi R_B \beta}{\lambda}\right) \exp\left(-j \frac{2\pi X_n}{v} f_a\right) \cdot \text{sinc}\left\{\frac{\pi T_p}{\beta} \left[f_r + \frac{2\gamma}{c} (R_B - R_s)\right]\right\}. \quad (13)$$

正如 SAR 中的方位预滤波,通过卷积实现去模糊后,信号虽然在方位多普勒域不再模糊,但是在方位时域却是模糊的^[8],因此,若像聚束 SAR 那样,直接进行方位向的匹配滤波^[15],得到的图像将会出现模糊。为了获得无模糊的图像,可以再进行一次预滤波处理,将信号转换为方位时域不模糊,然而这将

增加数据处理的复杂性,降低成像效率。为了进行快速成像,本文结合去斜技术,将数据聚焦在方位频域。首先,构造函数将方位信号的相位转化为二次形式,转化函数为

$$H_1(f_a) = \exp\left(j \frac{4\pi R_B}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v^2}}\right) \exp\left(j\pi \frac{\lambda R_s}{2v^2} f_a^2\right). \quad (14)$$

由于(13)式的信号在方位时域是模糊的,不能直接将其变换到方位时域,可以构造反旋函数,即

$$H_{deramp}(f_a) = \exp\left(j\pi \frac{\lambda R_{ref}}{2v^2} f_a^2\right). \quad (15)$$

(13)式与(14)、(15)式相乘后,方位向信号的相位被转化为二次型,并且信号在方位时域不再模糊,因此,可以进行方位向逆傅里叶变换,将其变换到方位时域,为

$$S_4\left(\frac{f_r}{\beta}, f_a\right) = \exp\left[-j\pi \frac{2v^2}{\lambda(R_{ref} + R_s)} \left(t_m - \frac{X_n}{v}\right)^2\right] \cdot \text{sinc}\left\{\frac{\pi T_p}{\beta} \left[f_r + \frac{2\gamma}{c} (R_B - R_s)\right]\right\}. \quad (16)$$

接着构造方位向去斜函数以实现方位向的聚焦,即

$$H_{az-dechirp}(t_m) = \exp\left[j\pi \frac{2v^2}{\lambda(R_{ref} + R_s)} t_m^2\right]. \quad (17)$$

最后进行方位向傅里叶变换,就可以得到 SAL 无模糊的聚焦图像。

3.4 算法描述

图 3 给出了本文算法的成像流程,主要由方位预滤波、改进 FSA 算法及去斜成像三部分组成。方位预滤波中信号 $S_{\text{ref}}(t'_m)$ 形式与 $S_{\text{ref}}(t_m)$ 相同,只是由于卷积过程中 PRF 发生了变化,因此,将变量 t_m 改为 t'_m 。改进 FSA 算法通过频域的变标处理,校正了 RCM 的距离向空变性,简化了 RCM 校正;并且考虑了数据录取过程中平台的连续运动,在方位多

普勒域校正了距离向附加的多普勒频移项。最后结合去斜技术的方位聚焦,解决了由于方位预滤波处理导致的方位信号时域混叠问题,提高了算法效率。图中 H_1 为多普勒频移校正及频率变标函数, H_2 为残留视频校正函数, H_3 为逆频率变标函数, H_{BV} 为距离徙动校正函数, H_{src} 为二次距离压缩函数, H_{RPC} 为相位保持函数,其具体函数形式参见文献[14]。

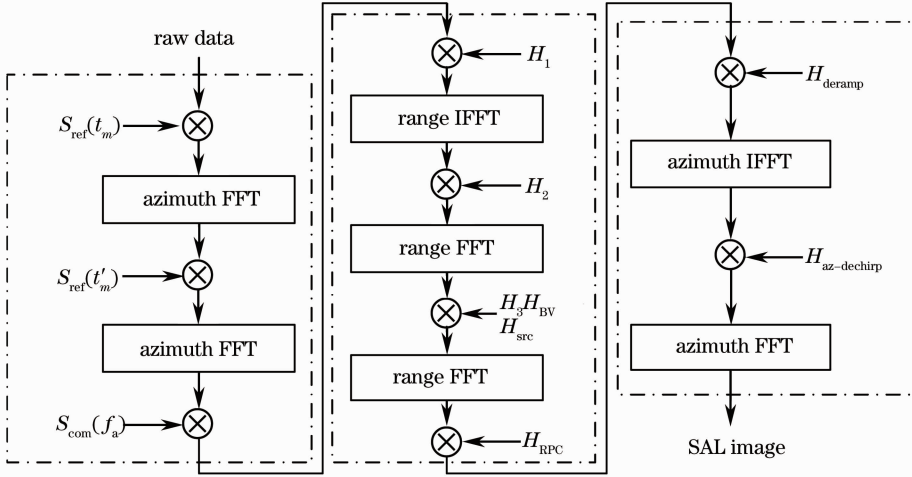


图 3 所提算法流程图

Fig. 3 Flow diagram of the proposed algorithm

4 分辨率分析

引言部分提到 TOPS 模式是通过牺牲一定的方位分辨率来换取测绘带宽的提高,本节将对 TOPS 工作模式的方位分辨率进行分析。

和条带模式一样, TOPS 模式的方位分辨率也是由多普勒带宽决定的,而多普勒带宽可以通过多普勒调频率及点目标的合成时间来确定。对于正侧视模式,多普勒调频率为

$$k_a = -\frac{2v^2}{\lambda R_B}. \quad (18)$$

TOPS 模式对应于点目标的合成孔径时间可以近似为

$$T_{\text{a-TOPS}} \approx \left(\frac{R_{\text{ref}}}{R_{\text{ref}} + R_B} \right) T_a = \left(\frac{R_{\text{ref}}}{R_{\text{ref}} + R_B} \right) \frac{\lambda R_B}{v D_a}, \quad (19)$$

式中 T_a 为条带模式对应的合成孔径时间, D_a 为天线的方位向孔径长度。则多普勒带宽为

$$B_{\text{a-TOPS}} = |k_a| \times T_{\text{a-TOPS}} \approx \left(\frac{R_{\text{ref}}}{R_{\text{ref}} + R_B} \right) \frac{2v}{D_a}. \quad (20)$$

因此, TOPS 模式的方位分辨率为

$$\rho_{\text{a-TOPS}} = \frac{v}{B_{\text{a-TOPS}}} \approx \left(\frac{R_{\text{ref}} + R_B}{R_{\text{ref}}} \right) \frac{D_a}{2}. \quad (21)$$

由(21)式可知, TOPS 模式的方位分辨率只是在条

带模式的分辨率上乘以一個尺度因子。由于 R_{ref} 为定值, (21)式表明 TOPS 模式的方位分辨率与目标的距离有关,且距离越远,分辨率越低。

5 仿真实验

为了验证本文 SAL 宽测绘带成像算法的有效性,本节给出仿真实验结果。仿真参数如表 1 所示。仿真场景设置如图 4 所示,大小为 $6.4 \text{ m} \times 4.8 \text{ m}$ (距离向 \times 方位向)。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Carrier wavelength / μm	1.5
Signal bandwidth / GHz	30
Pulse repetition interval / μs	50
Sampling frequency / MHz	30
Width of the area / m	6.4
Center line of scene / km	2
Equivalent aperture in azimuth / m	0.005
Velocity / (m/s)	50
Rotation center distance / km	1.4324
Data acquisition time / s	0.032

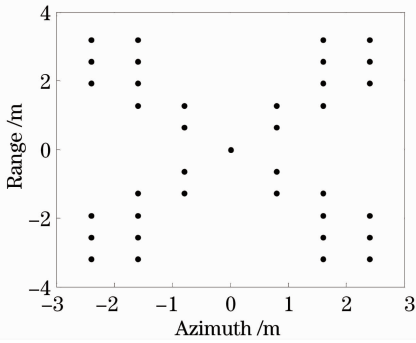
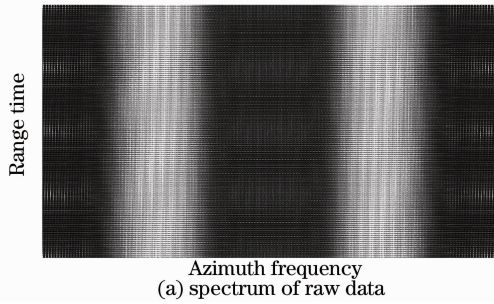


图 4 仿真场景设置

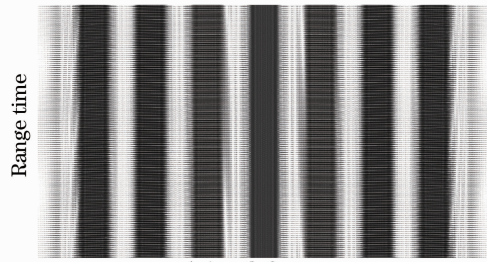
Fig. 4 Geometry of simulation scene

通过计算可知,方位信号的总带宽约为 54467 Hz, 远远大于系统 PRF(20000 Hz)。图 5(a)为原始信号的方位频谱图,可见存在严重的模糊;图 5(b)为方位预滤波之后的信号频谱,模糊已经被有效消除,信号频谱得到了很好的恢复。

图 6 为采用本文方法得到的成像结果,可见成像结果不存在模糊现象。取场景边沿及中心点进行成像性能分析,其等高线图如图 7 所示。为了进一步分析成像效果,表 2 给出了成像结果的性能参数统计,包括峰值旁瓣比(PSLR)、积分旁瓣比(ISLR)及分辨率,均与理想值接近。可见采用该方法可以得到较好的成像效果。



(a) spectrum of raw data



(b) spectrum of signal after azimuth pre-filtering

图 5 方位信号频谱图

Fig. 5 Spectra of azimuth signal

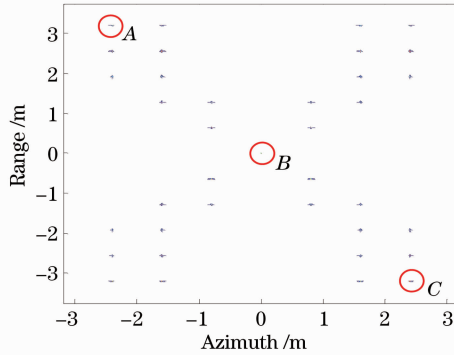
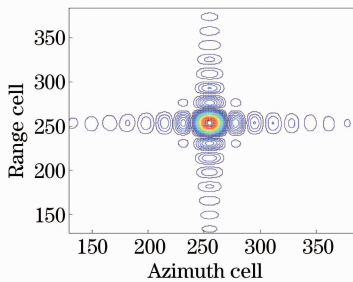
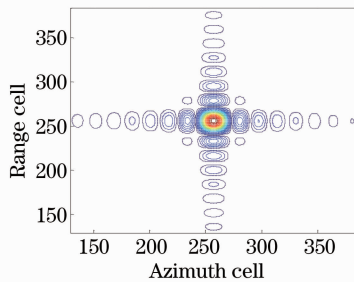


图 6 场景成像结果

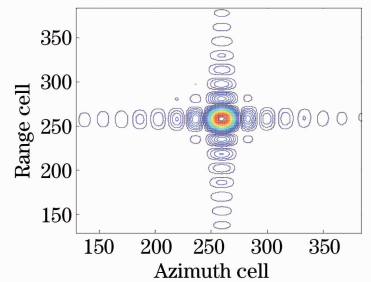
Fig. 6 Imaging result of the scene



(a) point A



(b) point B



(c) point C

图 7 成像结果等高线图

Fig. 7 Contour maps of the imaging result

表 2 成像结果的参数

Table 2 Parameters of the imaging result

Point target	Range			Azimuth		
	PSLR /dB	ISLR /dB	Resolution /cm	PSLR /dB	ISLR /dB	Resolution /cm
A	-13.23	-9.79	0.5173	-13.16	-9.82	0.9990
B	-13.20	-9.65	0.5138	-13.19	-9.76	0.9971
C	-13.25	-9.78	0.5172	-13.03	-9.73	0.9989

为了说明该方法与文献[15]的匹配滤波方法的不同,重新设置点目标并进行仿真实验。点目标分布如图 8 所示,图 9 为两种方法成像结果的对比图。图 9(a)为采用匹配滤波进行方位脉压的成像结果,可以看出其存在严重的图像模糊,这是由于方位预滤波造成信号在方位时域模糊所导致的;图 9(b)为采用本文方法的成像结果,可见图像并不存在模糊现象。该实验结果表明,当 SAL 工作于 TOPS 模式时,本文算法比文献[15]的方法更适用于数据的处理。

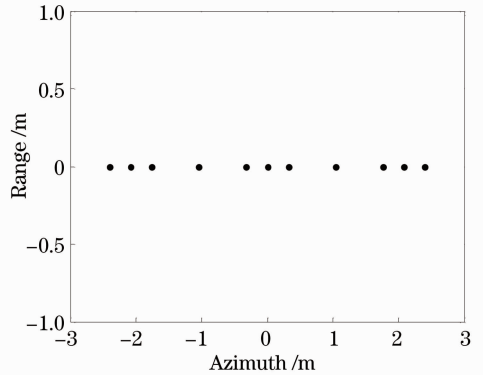
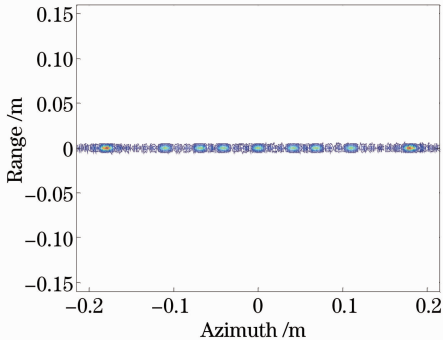
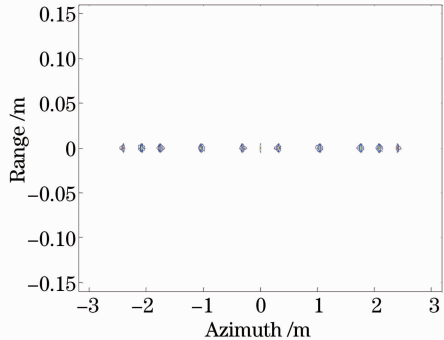


图 8 点目标分布

Fig. 8 Distributon of point targets



(a) by matched filtering method



(b) by the proposed method

图 9 成像结果对比

Fig. 9 Comparison of the imaging results

6 结 论

合成孔径激光雷达作为遥感领域的一个重要技术受到越来越多的关注。然而,微米级的信号波长导致成像场景幅宽过小,从而影响或限制了它的应用。将合成孔径雷达宽测绘带成像常用的 TOPS 模式推广应用到 SAL 中,并根据信号的特性提出了一种可行的成像算法。该方法可以在系统 PRF 略高于瞬时多普勒带宽的情况下,获得场景无模糊的图像,仿真结果验证了算法的有效性。算法中假设载机作匀速直线运动,但是在实际应用中,载机平台不可避免地会受到气流的影响而偏离理想航迹。因此,研究相应的运动补偿方法及自聚焦技术,将成为 SAL 成像领域的一个重点,这也是下一步工作的主要方向。

要方向。

参 考 文 献

- Zhou Yu, Sun Jianfeng, Luan Zhu, *et al.*. Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2446-2448.
周煜, 孙建锋, 栾竹, 等. 尺度缩小合成孔径成像激光雷达的孔径合成实验[J]. *光学学报*, 2008, 28(12): 2446-2448.
- M Dierking, B Schumm, J C Ricklin, *et al.*. Synthetic aperture LADAR for tactical imaging overview [C]. *The 14th Coherent Laser Radar Conference*, 2007.
- B W Krause, J Buck, C Ryan, *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. *CLEO-Laser Application to Photonic Applications*, 2011. PDPB7.
- Wu Jin. On the development of synthetic aperture lidar imaging [J]. *J Radars*, 2012, 1(4): 353-360.
吴谨. 关于合成孔径激光雷达成像研究[J]. *雷达学报*, 2012, 1(4): 353-360.
- Li Daojing, Zhang Qingjuan, Liu Bo, *et al.*. Key technology and

- implementation scheme analysis of air-borne synthetic aperture ladar [J]. *J Radars*, 2013, 2(2): 143–151.
- 李道京, 张清娟, 刘 波, 等. 机载合成孔径激光雷达关键技术和实现方案分析 [J]. *雷达学报*, 2013, 2(2): 143–151.
- 6 D Z Francesco, M G Andrea. TOPS AR: terrain observation by progressive scan [J]. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(9): 2352–2360.
- 7 P Prats, R Scheiber, J Mittermayer, *et al.*. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling [J]. *IEEE Trans Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(2): 770–780.
- 8 G Engen, Y Larsen. Efficient full aperture processing of TOPS mode data using the moving band chirp z -transform [J]. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3688–3693.
- 9 Liu Guoguo, Wu Jin, Zhu Bingqi, *et al.*. Nonlinear degradation and compensation on range resolution in synthetic aperture ladar experiment [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(9): 934–938.
- 刘国国, 吴 谨, 朱炳祺, 等. 合成孔径激光雷达距离像分辨率非线性恶化与补偿 [J]. *激光与红外*, 2009, 39(9): 934–938.
- 10 Robert L Lucke. Synthetic aperture ladar simulations with phase screens and Fourier propagation [C]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2004, 3: 1788–1798.
- 11 Li Zengju, Wu Jin, Liu Guoguo, *et al.*. Preliminary investigation on airborne SAL imaging with platform vibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 994–1001.
- 李增局, 吴 谨, 刘国国, 等. 振动影响机载合成孔径激光雷达成像初步研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 994–1001.
- 12 Zang Bo. Research of Synthetic Aperture Lidar Imaging Algorithms [D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- 臧 博. 合成孔径成像激光雷达算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- 13 J Mittermayer, A Moreira, O Loffeld. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm [J]. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198–2214.
- 14 Liang Yi. Signal Processing of FMCW Synthetic Aperture Radar Data [D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- 梁 毅. 调频连续波 SAR 信号处理[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- 15 Guo Liang, Xing Mengdao, Liang Yi, *et al.*. An algorithm for airborne spotlight synthetic aperture imaging ladar data processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1183–1190.
- 郭 亮, 邢孟道, 梁 毅, 等. 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法[J]. *光学学报*, 2008, 28(6): 1183–1190.

栏目编辑: 史 敏