

doi:10.3788/gzxb20144310.1028002

合成孔径激光雷达多通道 TOPS 模式及频谱恢复方法

李小珍, 郭亮, 曾晓东

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

摘 要:针对多通道循序扫描地形观测模式中单个通道的回波数据在方位向存在模糊,采用传统空域波束形成技术及方位预滤波方法均无法恢复信号频谱的问题,在分析产生模糊原因的基础上,提出了一种基于谱压缩的空域波束形成方法.该方法首先对信号进行反旋处理,压缩信号的频谱宽度;然后对多通道数据进行空域波束形成,获得无模糊的频谱;最后对信号反旋处理引入的相位项进行补偿,得到原始信号的二维频谱.点目标及场景仿真实验数据处理结果均验证了该算法的有效性.

关键词:合成孔径激光雷达;TOPS 模式;多通道;方位模糊;频谱恢复;谱压缩;波束形成

中图分类号:TN958; TN958.98

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)10-1028002-7

Multi-channel TOPS Imaging Mode and Spectrum Reconstruction Method for Synthetic Aperture Ladar

LI Xiao-zhen, GUO Liang, ZENG Xiao-dong

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Synthetic aperture ladar can work with low pulse repetition frequency and obtain wide scene with multi-channel in terrain observation by progressive scans mode. However, the frequency spectrum in azimuth of the raw data in each channel is ambiguous, which ambiguity can not be removed by conventional spacial beamforming. To solve this problem, a novel method of spacial beamforming based on spectral compressing was proposed. Firstly, a transformation in azimuth was introduced with deramp technology. Then, spacial beamforming was used to remove the ambiguity. Thirdly, a phase factor was used to compensate the phase error induced by the deramp. Finally, a conventional imaging algorithm can be used to obtain images from unambiguous data. The imaging experiment with numerical data validates the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: Synthetic aperture ladar; TOPS mode; Multi-channel; Azimuth aliasing; Spectrum reconstruction; Spectrum compression; Beam forming

OCIS Codes: 280.6730; 280.4750; 070.4790

0 引言

合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Ladar, SAL)作为一种主动式的遥感手段,可以在远距离获得厘米级的高分辨率,越来越受到国内外研究人员的重视^[1-4].近年来,相关研究人员进行了一系列的室内演示试验及外场机载实验.2006年美国雷声公司及诺斯

罗普-格鲁门公司分别成功演示了机载 SAL 实验^[5];2011年美国洛克希德-马丁公司独立完成了 SAL 演示样机的飞行实验^[6],获得了较好的成像结果.国内中科院电子所^[7]、西安电子科技大学^[8]、上海光机所^[9]和上海技物所^[10]等分别独立完成了 SAL 的室内演示实验,获得了毫米级的成像分辨率.这些试验均表明 SAL 在高分辨率成像应用中具有良好的潜力.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61107006)和中央高校基本科研业务费(Nos. K5051305005, NSIY171412)资助

第一作者:李小珍(1983-),女,博士研究生,主要研究方向为激光雷达系统设计及成像. Email: xzli@mail.xidian.edu.cn

导师:曾晓东(1956-),男,教授,博导,主要研究方向为激光器光学、光纤传感与测量技术以及远轴光传播等. Email: xdzeng@xidian.edu.cn

通讯作者:郭亮(1983-),男,副教授,博士,主要研究方向为合成孔径激光雷达成像及系统设计. Email: lguo@mail.xidian.edu.cn

收稿日期:2014-06-09; **录用日期:**2014-08-27

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

相对于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)采用的微波信号,SAL工作在光波波段,其波长比微波小3、4个数量级,短波长使SAL只需很短的合成孔径时间就能得到很高的图像分辨率,并且形成的图像更容易解读.然而,短波长同时也造成波束的光斑脚印非常小,这导致波束覆盖的场景范围非常小,限制了成像场景的幅宽.为了得到较宽的成像场景,满足应用需求,文献[11]中将SAR中常用的宽场景测绘模式循序扫描地形观测(Terrain Observation by Progressive Scans, TOPS模式推广应用到SAL中,通过控制波束指向使其在不同的子测绘带间作周期性扫描,以牺牲一定的方位分辨率为代价换取SAL的宽测绘带成像能力,取得了较好的效果.

然而, TOPS模式要得到正确的聚焦图像,必须满足系统的脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)高于回波信号的瞬时多普勒带宽.但是在实际应用中,由于受激光调制速率的限制,距离向高分辨要求的大带宽线性调频信号与高PRF是一对矛盾^[11],即越大的脉冲调制带宽就需要越低的PRF,这将会导致方位信号模糊.解决多普勒模糊的一个有效方法是在方位向采用多镜头接收方式,以空间采样来弥补时间采样的不足,后续通过空域波束形成方法对信号二维频谱进行重建.

当TOPS模式采用多通道体制来降低系统对PRF的要求时,信号的模糊来源于两部分:一是由于时间采样不足产生的模糊;二是由波束沿方位向扫描引起的模糊.由于两部分模糊同时存在,导致采用常规的空域波束形成方法^[12]或基于谱分析(SPEctrum ANalysis, SPECAN)的方位预滤波方法^[11]均无法恢复信号无模糊的二维频谱.针对此,本文提出了一种适合于多通道TOPS模式的基于谱压缩的信号频谱恢复方法.首先对信号进行反旋(Deramp)处理,压缩信号的方位频谱宽度,消除波束转动引起的模糊;然后对多通道数据进行空域波束形成,实现多通道信号频谱的重建;为了得到原始信号的二维频谱,最后对Deramp操作引入的相位进行补偿.

1 信号模型

图1为多通道TOPS模式工作几何示意图,图中以三通道为例.激光雷达平台高度为 H ,以速度 v 沿 X 轴方向匀速直线运动.激光雷达系统具有 N 个通道(假设 N 为奇数),通道间距为 d ,采用一发多收的工作方式,其中通道1发射信号,所有通道均接收回波信号.为了获得宽测绘带的成像能力,控制镜头波束指向使其周期性地若干个测绘带间轮流照射.在某一个子测绘带的数据录取过程中,镜头到场景中心的距离为 R_s ,波束绕旋转中心 O_{rot} 从后往前扫描,旋转中心到

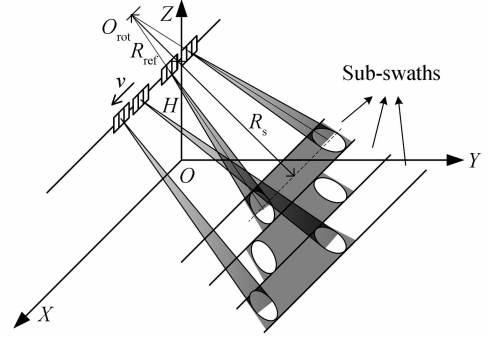


图1 多通道TOPS模式工作几何

Fig. 1 Geometry of multi-channel TOPS mode

激光雷达路线的最近距离为 R_{ref} .由于TOPS模式各子测绘带数据是分别录取、分别成像,然后进行图像拼接得到最终的宽场景成像结果的,并且各子测绘带数据录取时不会相互影响,因此,在进行TOPS模式成像算法设计时只需要对其中的一个子测绘带数据进行分析即可^[13-15].

以通道1为参考建立直角坐标系,则某方位时刻 t_m ,发射通道的相位中心位置为 $(vt_m, 0, H)$,第 i 接收通道的相位中心位置为 $(vt_m - (i-1)d, 0, H)$.根据等效相位中心原理,当收发通道不同时,若通道间距相对于激光雷达作用距离很短,可以近似认为在收发通道连线的中心发射和接收信号,只需补偿一个常数相位即可^[16].根据上述原理,第 i 接收通道的等效相位中心为 $(vt_m - \frac{i-1}{2}d, 0, H)$.本文如果不作特殊说明,后续提到的相位中心都是经过等效以后独立进行发射和接收信号的相位中心.

假设SAL发射信号为线性调频(LFM)信号,信号形式为

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

式中, f_c 为信号中心载频, T_p 为信号时间宽度, γ 为信号调频率, \hat{t} 为距离向快时间, $t = t_m + \hat{t}$ 为全时间.则第 i 通道接收的场景中某一点目标 $P(x_n, y_n, z_n)$ 的回波为

$$s_c(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_m}{T_a}\right) \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - \frac{2R_i(t_m)}{c}}{T_p}\right] \cdot \exp\left(j2\pi f_c \left(t - \frac{2R_i(t_m)}{c}\right) + j\pi\gamma \left(\hat{t} - \frac{2R_i(t_m)}{c}\right)^2\right) \quad (2)$$

式中 c 为光的传播速度, T_a 为点目标 P 的波束照射时间, $R_i(t_m)$ 为第 i 通道等效相位中心到点目标的瞬时距离,可以写为

$$R_i(t_m) = \sqrt{\left(vt_m - \frac{i-1}{2}d - x_n\right)^2 + y_n^2 + (H - z_n)^2} \quad (3)$$

SAL 为了降低对采样速度的要求,同时降低数据量,提高信号处理的效率,通常采用光外差探测的方式接收回波信号.假设参考延时为 $t_0 = 2R_s/c$,则参考信号为

$$s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect} \left[\frac{\hat{t} - \frac{2R_s}{c}}{T'_p} \right] \exp \left(j2\pi f_c \left(t - \frac{2R_s}{c} \right) + j\pi\gamma \left(\hat{t} - \frac{2R_s}{c} \right)^2 \right) \quad (4)$$

目标回波经外差探测后,输出信号为

$$s_i(\hat{t}, t_m) = \text{rect} \left(\frac{t_m}{T_a} \right) \text{rect} \left[\frac{\hat{t} - \frac{2R_i(t_m)}{c}}{T_p} \right] \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} f_c R_\Delta \right) \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} \gamma \cdot \left(\hat{t} - \frac{2R_s}{c} \right) R_\Delta \right) \exp \left(j \frac{4\pi}{c^2} \gamma R_\Delta^2 \right) \quad (5)$$

式中 $R_\Delta = R_i(t_m) - R_s$. 式(5)中,第一个指数项为方位信号的相位历程,第二个指数项为由外差探测产生的距离向单频信号,第三个指数项为外差探测产生的剩余视频相位项(RVP),可以利用它实现变标处理,校正距离徙动的空变性^[17].

若第一个通道接收到的回波序列为 $s_1(\hat{t}, t_m)$,则由式(3)易知其各相位中心的回波序列为 $s_i(\hat{t}, t_m) = s_1 \left(\hat{t}, t_m - \frac{(i-1)d}{2v} \right)$. 将 $s_i(\hat{t}, t_m)$ 变换到方位多普勒域可得

$$s_i(\hat{t}, f_a) = s_1(\hat{t}, f_a) \exp \left(-j2\pi \frac{(i-1)d}{2v} f_a \right) \quad (6)$$

式中 f_a 为方位多普勒频率, $s_1(\hat{t}, f_a)$ 为 $s_1(\hat{t}, t_m)$ 的方位频域形式.

2 信号特性及频谱恢复方法

2.1 信号特性

图2为单通道回波数据方位向信号的时频分布,由于波束沿方位向的扫描,造成回波信号的多普勒中心随时间变化,这会在方位向附加一个多普勒带宽,使全场景的多普勒总带宽 B_a 远远高于瞬时多普勒带宽 B_{inst} ,导致 TOPS 模式回波信号的多普勒频谱模糊.同时,多通道体制采用的系统 PRF 比瞬时多普勒带宽 B_{inst} 小,这又给回波信号带来了模糊.因此,多通道 TOPS 模式信号模糊来源于两方面:一是波束方位转动引起的模糊,二是系统 PRF 小于方位瞬时带宽造成的模糊.由于两方面的模糊同时存在,使得采用空域波束形成技术的解模糊方法和基于 SPECAN 的方位预滤波方法都不能用来对信号进行频谱恢复.

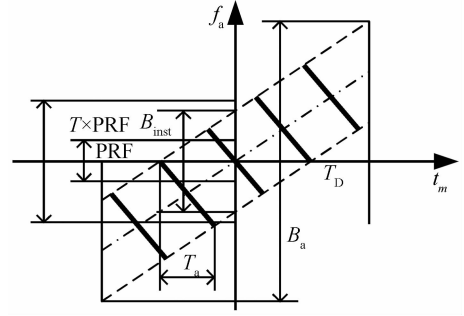


图2 单通道 TOPS 信号时频分布

Fig. 2 Time-frequency distribution of each channel signal in TOPS mode

2.2 频谱恢复方法

当采用空域波束形成技术对多通道数据进行频谱恢复时,首要条件是多通道扩展的 PRF ($N \times \text{PRF}$) 高于信号方位多普勒频谱.对于多通道 TOPS 模式,为了满足该条件,可以对回波数据方位信号带宽进行压缩,这是比较容易实现的,只需要对数据作 Deramp 处理. Deramp 函数可以构造为

$$H_{\text{drp}}(t_m) = \exp \left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} \left(t_m - \frac{(i-1)d}{2v} \right)^2 \right) \quad (7)$$

Deramp 之后信号依然可以表示为 $s_i(\hat{t}, t_m) = s_1 \left(\hat{t}, t_m - \frac{(i-1)d}{2v} \right)$,只是此时 $s_1(\hat{t}, t_m)$ 包含了 Deramp 引入的相位项,即

$$s_1(\hat{t}, t_m) = \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} f_c R_\Delta \right) \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} \gamma \left(\hat{t} - \frac{2R_s}{c} \right) R_\Delta \right] \exp \left(j \frac{4\pi}{c^2} \gamma R_\Delta^2 \right) \exp \left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} t_m^2 \right) \quad (8)$$

式(8)中忽略了对信号频谱恢复无关的幅度项. Deramp 后方位信号的时频分布如图3.可以看出,虽然此时信号带宽仍高于 PRF,但是已经小于 $N \times \text{PRF}$. 因此,对于 Deramp 之后的信号,可以采用空域波束形成技术进行多通道频谱恢复.

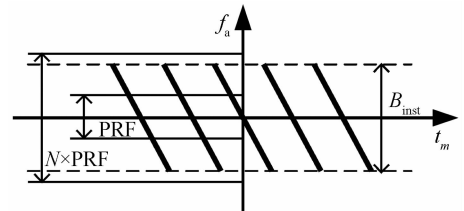


图3 Deramp 后信号时频分布

Fig. 3 Time-frequency distribution after Deramp

单通道数据作 Deramp 处理之后,方位向还存在多普勒模糊,此时式(6)需要重新写为

$$s_i(\hat{t}, f_a) = \sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} s_1(\hat{t}, f_a + m \cdot \text{PRF}) \cdot \exp \left(-j2\pi \frac{(i-1)d}{2v} (f_a + m \cdot \text{PRF}) \right) \quad (9)$$

式中 M 为模糊次数, 式中设 M 为奇数. 假设在运动过程中通道构形不变, 地面回波多普勒 f_a 与方位角 θ 的关系为

$$f_a = \frac{2v}{\lambda} \sin \theta \quad (10)$$

由于方位多普勒 f_a 与 $\sin \theta$ 成正比, 地面回波的多普勒谱在 $f_a - \sin \theta$ 二维平面里表现为一条斜直线. 当系统 PRF 小于回波的多普勒带宽时, 将使斜线在多普勒域发生折叠, 其空时谱如图 4, 图中 PRF 为多普勒带宽的 $1/3$, 所以将形成 3 重折叠.

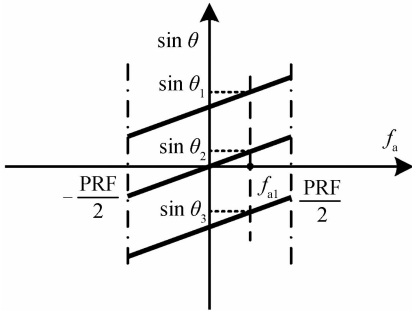


图 4 回波信号的空时谱

Fig. 4 Space-time spectrum of echos

由图 4 可以直观地看出多个多普勒频率混叠到了一起, 但是这些多普勒分量来自于不同的角度, 也就是说它们在空间 $\sin \theta$ 域是分开的, 比如图中虚线表示的多普勒频率 f_{a1} 处的信号由来自于角度为 θ_1 、 θ_2 及 θ_3 的信号叠加而成. 因此, 对于多通道数据, 可以采用空域波束形成的方法分别提取出每个模糊分量, 然后进行重排就可以解多普勒模糊. 空域波束形成方法的具体步骤可以参考文献[12], 本文将不再重复. 值得注意的是, 通过 N 个通道, 方位采样频率 PRF 可以等效提高 N 倍, 因此, 要得到无模糊的二维频谱, 需要满足通道个数 N 高于模糊次数 M .

采用空域波束形成得到信号的二维频谱后, 信号可以表示为

$$S(f_a, t_m) = \int s_1(\hat{t}, t_m) \exp\left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} t_m^2\right) \cdot \exp(-j2\pi f_a t_m) dt_m \quad (11)$$

可以看出, 重建的信号频谱包含有 Deramp 操作引入的相位项, 并不是接收信号的多普勒形式, 此时并不能用它来进行成像处理. 为了获得原始信号的二维频谱, 还需要对引入的相位项进行补偿. 首先对信号式(11)乘以一个二次相位函数, 即

$$H_1(\tau) = \exp\left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} \tau^2\right) \quad (12)$$

并且令 $\tau = -\frac{\lambda R_{\text{ref}}}{2v^2} f_a$, 则式(12)与式(11)相乘后的信号为

$$S(f_a, t_m) = \exp\left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} \tau^2\right) \cdot \int s_1(\hat{t}, t_m) \exp\left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} t_m^2\right) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} \tau t_m\right) dt_m = \int s_1(\hat{t}, t_m) \cdot \exp\left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} (\tau - t_m)^2\right) dt_m = s_1(\hat{t}, t_m) \otimes \exp\left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} t_m^2\right) \quad (13)$$

式中 \otimes 为卷积操作. 式(13)表明, 补偿二次相位后的信号为回波数据与二次相位函数的卷积. 根据傅里叶变换的性质, 时域卷积相当于频域相乘. 因此, 只要将式(13)表示的信号变化到方位多普勒域, 然后补偿一个相位函数就可以得到原始回波数据的二维频谱, 补偿函数为

$$S_{\text{com}}(f_a) = \exp\left(-j\pi \frac{\lambda R_{\text{ref}}}{2v^2} f_a'^2\right) \quad (14)$$

由于卷积操作会改变方位尺度^[11], 因此式(14)中方位频率变量用 f_a' 表示. 补偿式(14)后的信号频谱即为原始回波数据的二维频谱, 因此后续的成像处理可以直接采用现有的 TOPS 模式成像算法实现.

本文所提 SAL 多通道 TOPS 模式频谱恢复方法的整体流程如图 5. 所提方法的首要步骤是先对回波数据进行方位 Deramp 处理, 这样可以极大地压缩方位信号的频谱宽度, 使信号满足条件 $N \times \text{PRF} > B$, 其中 B 为谱压缩后信号的方位带宽, 从而使空域波束形成技术可以用于多通道解模糊. 为了获得原始信号的二维频谱, 最后还对 Deramp 引入的相位进行补偿, 使得所提方法可以与现有成像算法有效地结合.

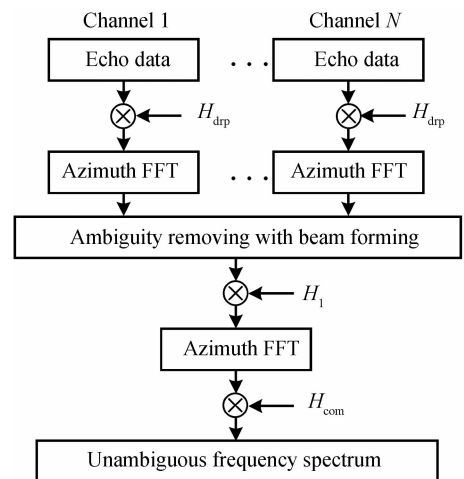


图 5 所提频谱恢复方法流程

Fig. 5 Flow diagram of the proposed spectrum recovery method

3 仿真结果

为了验证本文基于谱压缩的多通道 TOPS 模式频

谱恢复方法的有效性,本节将进行点目标及场景目标的仿真实验.仿真参数如表 1 所示.由仿真参数的平台速度及方位等效孔径长度可以计算出方位向的瞬时多普勒带宽为 $B_{\text{inst}} = \frac{2v}{D_a} = \frac{2 \times 50}{0.004} = 25\ 000\ \text{Hz} = 25\ \text{kHz}$.

一般要求系统 PRF 为瞬时多普勒带宽 B_{inst} 的 1.2~1.4 倍,这里取 1.2 倍进行仿真,则要求系统 PRF 为 30 kHz;当采用 3 通道体制时,PRF 可以降低 3 倍,也即 10 kHz.因此,在该仿真实验中 PRF 设置为 10 kHz.点目标仿真设置为 5×5 (距离向 \times 方位向)的点阵,均匀分布在大小为 $8\ \text{m} \times 10\ \text{m}$ (距离向 \times 方位向)场景内,如图 6.

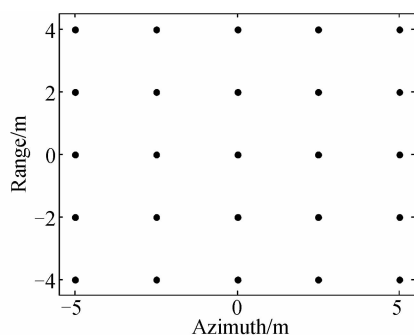


图 6 仿真场景设置

Fig. 6 Geometry of simulation scene

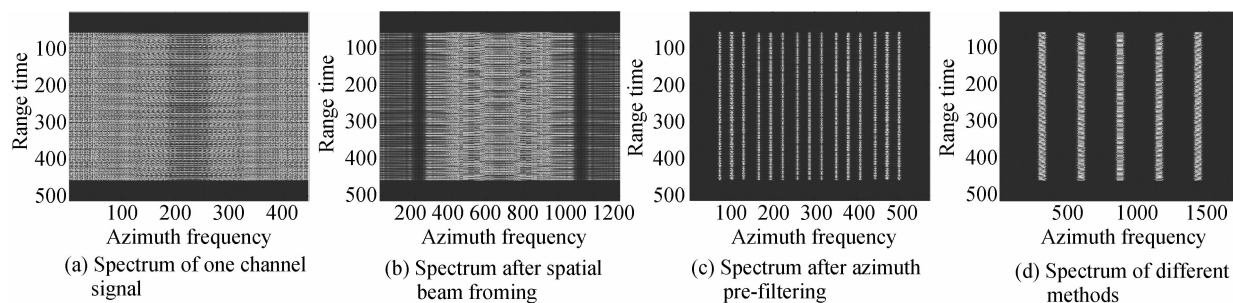


图 7 不同方法得到的信号频谱

Fig. 7 Spectrum of different methods

图 8 为利用得到的二维频谱进行成像的结果,可见成像结果不存在模糊现象.图 9 为图 8 中 A、B、C 三点的等高线图,可以看出,等高线图很规则,且主瓣旁瓣能够明显分开,说明成像效果良好.

场景仿真参数与点目标仿真参数相同,输入为带“XIDIAN”字样的图像,场景采样间隔为 $0.015\ \text{m} \times 0.005\ \text{m}$ (距离向 \times 方位向).图 10 为成像结果,其中图 10(a)为单通道数据直接成像结果,图 10(b)为采用空域波束形成技术解模糊之后的成像结果,图 10(c)为单通道数据采用方位预滤波方法解模糊后的成像结果,图 10(d)为采用本文所提方法解模糊后的成像结果.可见,由于原始单通道数据、空域波束形成、方位预滤波等都不能获得信号无模糊的频谱,因此成像结果均

根据表 1,可以计算得到方位瞬时多普勒带宽为 25 000 Hz,总带宽约为 155 318 Hz,可见无论是瞬时带宽还是总带宽均远远高于系统 PRF(10 000 Hz).图 7(a)为单通道数据的频谱,可见存在严重的模糊.图 7(b)、(c)分别为采用空域波束形成技术和方位预滤波方法得到的信号频谱,由于多通道 TOPS 模式两种模糊同时存在,因此无论采用哪一种方法均无法得到正确的频谱.图 7(d)为采用本文所提方法得到的二维频谱,可见,模糊已经被有效消除,信号频谱得到了很好的恢复.

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Carrier wavelength/ μm	1.5
Signal bandwidth/GHz	5
Pulse repetition interval/ μs	20
Number of channels	3
Distance between channel/m	0.004
PRF/Hz	10 000
Sampling frequency/MHz	20
Center line of scene/km	5
Equivalent aperture in azimuth/m	0.004
Velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	50

存在混叠,而采用本文方法可以获得信号无模糊的二维频谱,所以得到了聚焦良好的正确图像.

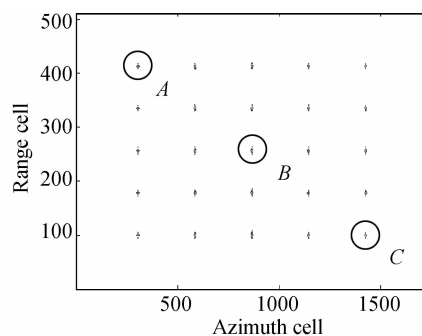


图 8 成像结果

Fig. 8 Imaging result of the points

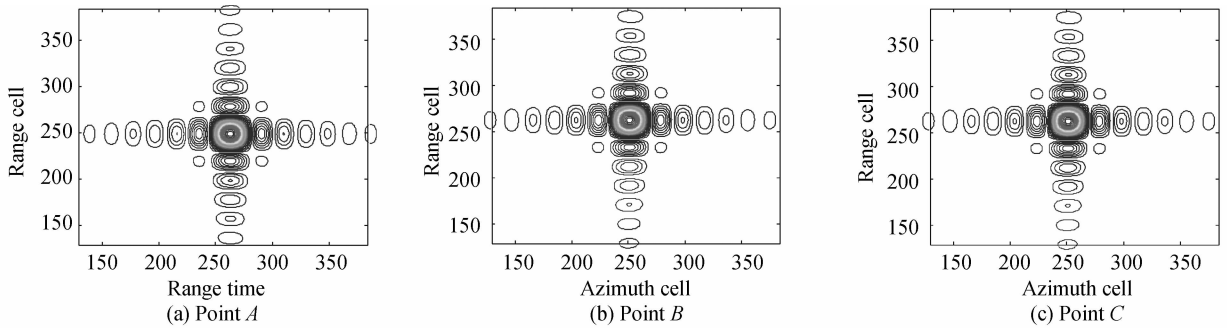


图9 点目标等高线图

Fig. 9 Contour maps of the imaging result

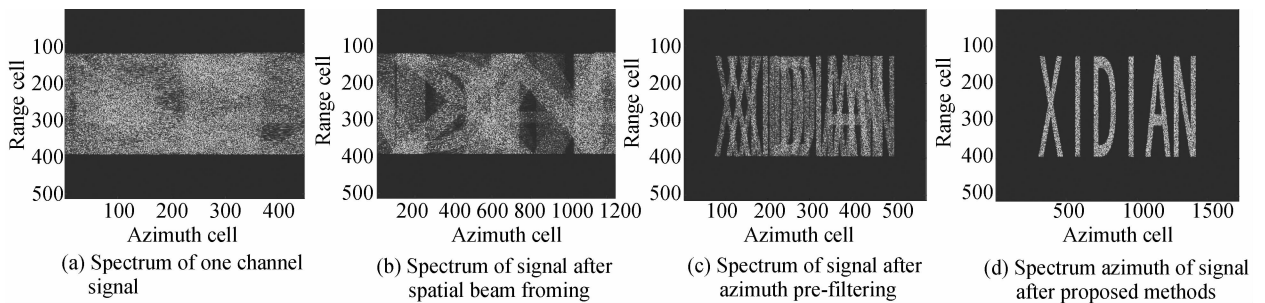


图10 不同方法得到信号频谱的成像结果

Fig. 10 Image results of different methods

4 结论

多通道 TOPS 模式在提高合成孔径激光雷达 (SAL) 成像测绘带宽的同时,可以降低系统对脉冲重复频率 (PRF) 的要求,从而解决大带宽线性调频信号调制与高 PRF 的矛盾。然而,当 PRF 小于方位瞬时带宽时,回波信号将同时存在欠采样产生的模糊及波束方位转动引起的模糊,导致空域波束形成及方位预滤波的解模糊方法均失效。在这种情况下,本文提出了一种基于谱压缩的空域波束形成方法,可以有效解决方位频谱的模糊问题。该方法的关键步骤是先对信号进行 Deramp 处理,从而极大地压缩信号的方位频谱。基于压缩后的频谱,就可以采用空域波束形成技术进行解模糊处理。为了得到原始回波信号的二维频谱,从而与成像算法能够有效的结合,最后对解模糊后的信号进行补偿,补偿掉 Deramp 引入的相位项。通过点目标及场景目标仿真实验,验证了该算法的有效性。

参考文献

- [1] WU Jin. On the development of synthetic aperture lidar imaging [J]. *Journal of 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.
- [2] HE Jin, ZHANG Qun, YANG Xiao-you, *et al.* Sampling technology of ISAIL [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7):1272-1277.
何劲, 张群, 杨小优, 等. 逆合成孔径成像激光雷达数据采样技术 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(7):1272-1277.
- [3] 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.

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.

- [4] LÜ Xu-guang, HAO Shi-qi, LENG Jiao-feng, *et al.* Combined time-frequency imaging method of SAL based on adaptive windowing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5):575-580.
吕旭光, 郝士琦, 冷蛟峰, 等. 基于自适应窗的合成孔径激光雷达联合时频成像方法 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(5):575-580.
- [5] DIERKING M, SCHUMM B, RICKLIN J C, *et al.* Synthetic aperture LADAR for tactical imaging overview [C]. The 14th Coherent Laser Radar Conference (CLRC), 2007, Session 9.
- [6] KRAUSE B W, BUCK J, RYAN C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. CLEO-Laser Application to Photonic Applications, 2011, Page(s):1-2.
- [7] LIU Li-ren, ZHOU Yu, ZHI Ya-nan, *et al.* A large aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9):112-116.
刘立人, 周煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验验证 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(9):112-116.
- [8] GUO Liang, XING Meng-dao, LIANG Yi, *et al.* Synthetic aperture imaging lidar imaging algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2):448-452.
郭亮, 邢孟道, 梁毅, 等. 合成孔径成像激光雷达成像算法研究 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(2):448-452.
- [9] LI Dao-jing, ZHANG Qing-juan, LIU Bo, *et al.* Key technology and implementation scheme analysis of air-borne synthetic aperture lidar [J]. *Journal of 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.
- [10] HONG Guang-lie, WANG Jian-yu, MENG Zhao-hua, *et al.* Chirped amplitude modulation and range dimension processing of near infrared synthetic aperture lidar [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, **28**(3):229-234.
洪光烈, 王建宇, 孟昭华, 等. Chirp 强度调制与近红外激光合

- 成孔径雷达距离向处理[J]. 红外与毫米波学报, 2009, **28**(3): 229-234.
- [11] LI Xiao-zhen, WU Yu-feng, GUO Liang, *et al.* Frequency scaling algorithm for synthetic aperture ladar imaging with wide-scene [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(12):303-310.
李小珍,吴玉峰,郭亮,等.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[J]. 光学学报, 2013, **33**(12): 303-310.
- [12] GUO Liang, ZENG Xiao-dong, XING Meng-dao, *et al.* Study of synthetic aperture lidar imaging with lower pulse repetition frequency [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(5):772-777.
郭亮,曾晓东,邢孟道,等.低脉冲重复频率合成孔径激光雷达成像[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(5):772-777.
- [13] PRATS P, SCHEIBER R, MITTERMAYER J, *et al.* Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(2):770-780.
- [14] ENGEN G, LARSEN Y. Efficient full aperture processing of TOPS mode data using the moving band chirp Z-transform [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(10):3688-3693.
- [15] GEBERT N, KRIEGER G, MOREIRA A. Multichannel azimuth processing in scan SAR and TOPS mode operation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(7):2994-3008.
- [16] 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.
- [17] JOSEF M, ALBERTO M, OTMAR L. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(5): 2198-2214.