

一种适用于合成孔径激光雷达非线性啁啾校正的频率变标成像方法

于雯 赵思伟 宋小全

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要 合成孔径激光雷达(SAL)的激光光源啁啾非线性会严重恶化距离向分辨率,无法清晰成像。针对这一问题,建立了存在非线性啁啾误差的 SAL 回波信号模型,分析认为非线性啁啾误差影响成像的本质为成对回波效应,并提出一种校正光源啁啾非线性的改进频率变标算法。该方法应用傅里叶变换时移特性估计非线性大小,基于剩余视频相位滤波原理“三步法”完成非线性啁啾的校正处理,实现目标的精确成像。仿真实验表明分辨率和成像质量获得明显改善,从而验证了该算法的可行性和高效性。

关键词 遥感; 合成孔径激光雷达; 非线性啁啾校正; 频率变标算法; 调频连续波; 剩余视频相位滤波

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.072801

Frequency Scaling Algorithm for Nonlinearity Chirp Correction of Synthetic Aperture Ladar Imaging

Yu Wen Zhao Siwei Song Xiaoquan

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract The presence of nonlinearity chirp in the transmitted synthetic aperture ladar (SAL) signal badly deteriorates the range resolution. The signal model with nonlinearity chirp is established in this paper, by which the pair-echo effect induced by the nonlinearity term is analyzed. By estimating the nonlinearity chirp using the time-shift characteristic of the Fourier transform, a novel modified frequency scaling algorithm is proposed to correct the ladar nonlinearity based on the residual visual phase filter. Through simulation experiments, the modified algorithm confirms its superiority in terms of resolution and image quality.

Key words remote sensing; synthetic aperture ladar; nonlinearity chirp correction; frequency scaling algorithm; frequency modulated continuous wave; residual visual phase filtering

OCIS codes 280.6730; 280.3640; 100.2000

1 引言

利用激光器作辐射源的合成孔径激光雷达(SAL)由于工作频率远高于微波,能够提供比合成孔径雷达(SAR)更高的分辨率,同时克服了普通激光雷达波束窄、搜索目标困难的缺点,成为当前激光遥感技术的研究热点^[1]。目前国外重要进展以麻省理工学院林肯实验室的固体 SAL 系统、美国国家航空航天局(NASA)的扫描式 SAL 成像系统、美国空军实验室的 SAL 为代表,而国内起步较晚,尚未出现成熟的案例^[2],亟待研究。

SAL 一般采用可调谐激光器发射线性调频连续波(FMCW)信号,但实际上并不能实现理想的线性调频。信号频率啁啾非线性造成的相位误差,会导致成对回波效应,恶化距离向分辨率,需进行补偿处理。通过建立参考通道补偿啁啾非线性是较为理想的手段^[3-4],已有研究有:2002 年美国海军实验室提出建立匹配参考通道,通过相位相减消除啁啾影响^[5];2005 年美国航空航天公司提出建立非匹配参考通道,通过相移算法估计误差,利用匹配滤波补偿^[6];国内啁啾非线性补偿工作起步较晚,中国科学院上海光学精密机械研究所 2008 年提出建立参考通道估计啁啾非线性,对目标反射信号逐一滤波和校正的方法^[7];2009 年提出通过共轭相位项卷积

收稿日期: 2013-01-06; 收到修改稿日期: 2013-02-23; 网络出版日期: 2013-06-04

作者简介: 于雯(1988—),女,硕士,助理工程师,主要从事雷达信号处理与对抗等方面的研究。

E-mail: yuwen_0102@126.com

消除啁啾非线性项影响的匹配滤波方法^[8]等。但以上方法计算过程均较为复杂。

为了解决这一问题,使啁啾非线性校正成像方法原理简单、无近似处理、运算快速且作用距离不受限,本文提出一种新的非线性啁啾校正频率变标成像算法(NCCFS)。首先建立了存在非线性啁啾的合成孔径激光雷达回波信号模型,从模型出发讨论了频率非线性啁啾对成像的影响的本质,在此基础上设计了一种新的结合啁啾非线性估计补偿和距离徙动矫正的SAL频率变标改进算法,最后通过仿真实验验证了所提出方法在成像质量改善上的有效性。

2 合成孔径激光雷达信号模型

2.1 回波信号模型

调频连续波信号能量分布在整個波形重复周期内,本文选用正侧视条带工作模式,其几何关系如图1所示。其中平台以速度 v 匀速直线飞行,方位向波束宽度 θ ,阴影部分即测绘带。

由于调制特性的啁啾非线性,实际调频连续波SAL发射信号的频率为

$$f_T(t_r) = f_c + \alpha t_r + e(t_r), \quad -T_p/2 \leq t_r \leq T_p/2, \quad (1)$$

式中 f_c 为载波频率, α 为调频斜率, t_r 为距离向快时间, T_p 为发射脉冲周期, $e(t_r)$ 为频率偏移函数,将 $e(t_r)$ 积分得由非线性啁啾引入的相位误差 $\epsilon(t_r)$,则SAL发射的非线性调制波形为

$$s_T(t_r) = \text{rect}\left(\frac{t_r}{T_p}\right) \exp\left\{j2\pi\left[f_c t_r + \frac{1}{2}\alpha t_r^2 + \epsilon(t_r)\right]\right\}. \quad (2)$$

为了降低系统的采样率和处理带宽,典型的SAL系统采用外差方式接收,即用反射回波与同载频同调频率的参考信号共轭相乘得中频信号为

$$s_{IF}(t_r, t_a) = \text{rect}\left(\frac{t_r - \tau}{T_p}\right) \exp(-j2\pi f_c \tau) \cdot \exp(-j2\pi \alpha t_r) \cdot \exp(j\pi \alpha \tau^2) \cdot \exp\{-j2\pi[\epsilon(t_r) - \epsilon(t_r - \tau)]\}. \quad (3)$$

将回波延迟 τ 泰勒展开,这里瞬时距离的计算需考虑距离向快时间的影响,即

$$\tau = \frac{2}{c} \sqrt{r_0^2 + v^2 (t_r + t_a)^2} \approx \frac{2}{c} \sqrt{r_0^2 + v^2 t_a^2} + \frac{2v^2 t_a}{c r_0} t_r = \tau_0 + \frac{2v}{c} t_r \sin \theta = \tau_0 - \frac{f_d}{f_c} t_r, \quad (4)$$

式中 t_a 为方位向慢时间, r_0 为目标与航线的最短距离, f_d 为多普勒频率, τ_0 即脉冲SAR回波延迟。将 τ 展开式带入中频回波式(3)式,得到

$$s_{IF}(t_r, t_a) = \text{rect}\left(\frac{t_r}{T_p}\right) \cdot \exp(-j2\pi \alpha \tau_0 t_r) \cdot \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_s}\right) \exp(-j2\pi f_c \tau_0) \cdot \exp(j2\pi f_d t_r) \cdot \exp\{-j2\pi[\epsilon(t_r) - \epsilon(t_r - \tau_0)]\} \otimes \exp(-j\pi \alpha t_r^2). \quad (5)$$

分析(5)式,前两个指数项分别为距离和方位相位历程,聚焦形成点目标;第三、四个指数项分别为平台连续运动造成的多普勒频移项和非理想线性啁啾调频造成的误差项,需在成像处理算法中消除;最后一项为剩余视频相位(RVP)卷积项,是外差接收处理带来的,可看作延时信号通过一个线性调频系统使得不同斜距的目标其回波延迟不同。

2.2 频率非线性啁啾影响分析

由目标回波式(5)式可以看出,啁啾非线性在原始信号模型中增加了一误差项

$$\Delta\varphi = \exp\{-j2\pi[\epsilon(t_r) - \epsilon(t_r - \tau_0)]\}. \quad (6)$$

为了定量分析频率非线性啁啾的影响,需对相位误差建模。由系统频率响应的不理想造成的相位误差

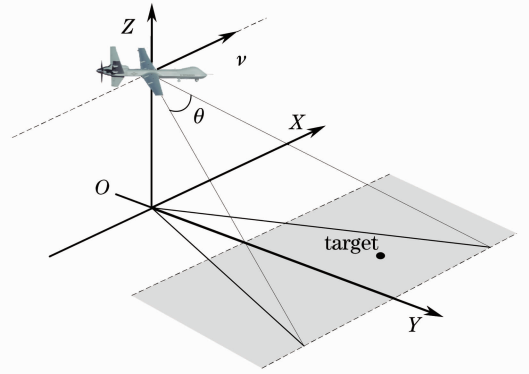


图1 正侧视条带调频连续波SAL成像几何图
Fig. 1 Geometry of the side-looking strip FMCW SAL

主要表现为周期性和非周期性两种。下面首先分析周期性误差,考虑一种简单的情况,将频率偏差建模为单频简谐波动:

$$e(t_r) = E_0/2 + A_m \sin(2\pi f_m t_r), \quad (7)$$

式中 E_0 是直流误差大小, A_m 为信号幅度, $f_m = m/T_p$ 为频率。将(7)式积分所得相位误差代入回波非线性误差(6)式得

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = \exp\left\{-j\frac{A_m}{f_m}[\cos 2\pi f_m t_r - \cos 2\pi f_m(t_r - \tau_0)]\right\} = \\ \exp\left\{-j\frac{A_m}{f_m}\sin[2\pi f_m(t_r - \tau_0)] \cdot \sin(2\pi f_m \tau_0)\right\} = \exp[j\phi_0 \sin(2\pi f_m X)], \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\phi_0 = -2A_m/f_m \sin(2\pi f_m \tau_0)$, $X = t_r - t_0$ 。利用一阶无穷 Fourier-Bessel 级数展开该非线性啁啾相位误差项得

$$\Delta\varphi = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(\phi_0) \exp(j2\pi f_m n t_r). \quad (9)$$

上式表明非线性啁啾误差将产生幅度为 $J_n(\phi_0)$, 频率为 $n f_m$ 的无穷多对成对回波分量, 导致明显的混叠和展宽现象, 即误差影响成像质量的本质为成对回波效应^[9]。当偏差 $e(t_r)$ 为复杂信号或非简谐形时, 可用傅里叶级数展开该非线性啁啾为

$$\Delta\varphi(t_r) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin(2\pi f_k t_r + \theta_k), \quad (10)$$

式中 a_k 为各次谐波振幅, f_k 为谐波频率, θ_k 为谐波初相, 此时非线性啁啾产生的影响为每项单频简谐波造成的成对回波之和。若啁啾相位误差信号为非周期的, 即一次、二次、高次误差, 此时同样可利用(10)式进行等效处理。

由此得啁啾非线性引起的成对回波会恶化 SAL 的成像质量, 需改进原始成像算法补偿啁啾非线性误差的影响。

3 NCCFS 改进成像算法

为了解决扫频啁啾非线性恶化 SAL 距离向分辨率的问题, 建立参考通道, 设计基于时频变换的非线性测量手段, 给出 NCCFS 改进算法原理和详细实现。

3.1 啁啾非线性估计和“三步法”校正

取某已知点回波延迟 τ_{ref} , (6)式中啁啾非线性误差项表示为

$$\varepsilon_{\text{IF}}(\tau_{\text{ref}}) = \varepsilon(t_r) - \varepsilon(t_r - \tau_{\text{ref}}). \quad (11)$$

对上式作傅里叶变换, 根据时移特性可得频域信号为

$$\mathcal{F}\{\varepsilon_{\text{IF}}(t_r, \tau_{\text{ref}})\} = \mathcal{F}\{\varepsilon(t_r)\} \cdot [1 - \exp(-j2\pi f_r \tau_{\text{ref}})]. \quad (12)$$

由于回波延迟 τ_{ref} 为已知量, 因此可得 $\varepsilon(t_r)$ 的频域信号, 反变换即可知啁啾非线性项的大小。仿真结果如图 2 所示。

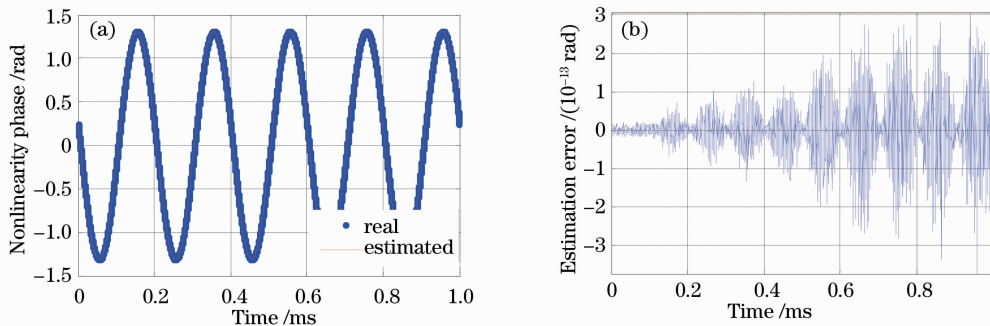


图 2 啁啾非线性估计方法性能。(a) 真实与估计非线性啁啾对比; (b) 估计误差

Fig. 2 Performance of the proposed nonlinearity measurement method.

(a) Real and estimated nonlinearity phases; (b) estimation error

可以看出,估计啁啾非线性与真实非线性大小一致,误差为 10^{-13} rad 量级,相比已有方法,该方法简单有效无约简,对作用距离没有限制,计算量低且易集成。

(6)式所示非线性啁啾误差项由两部分组成:一部分与目标距离无关,即 $\epsilon(t_r)$ 项;另一部分与目标距离有关,即 $\epsilon(t_r - t_0)$ 项。“三步法”实现扫频啁啾非线性校正的步骤为:先直接校正与目标距离无关的误差项,然后基于 RVP 滤波器的线性调频特性将与距离有关的误差项变为与距离无关,最后再进行校正。该校正方法原理简单,无近似处理,可以很方便地集成到原始频率变标算法中。

3.2 NCCFS 改进算法的详细实现

对目标回波(5)式作慢时间傅里叶变换,运用驻定相位定理得到信号距离-多普勒域表达式为

$$S_{\text{IF}}(t_r, f_a) = \text{rect}\left(\frac{t_r}{T_p}\right) \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi\alpha r_0}{c\beta(f_a)} t_r\right] \text{rect}\left[\frac{f_a}{\beta(f_a)B_a}\right] \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi\beta(f_a)r_0}{\lambda}\right] \cdot \exp\left[j \frac{2\pi f_a}{\beta(f_a)} t_r\right] \cdot f_{\text{src}}(t_r, f_a) \cdot \exp\left\{-j2\pi\left[\epsilon(t_r) - \epsilon\left(t_r - \frac{2r_0}{c\beta}\right)\right]\right\} \otimes \exp(-j\pi\alpha t_r^2), \quad (13)$$

式中 $\beta(f_a) = \sqrt{1 - (f_a^2 \lambda^2)/(4v^2)}$ 为距离徙动因子, $f_{\text{src}}(t_r, f_a)$ 为二次距离压缩因子,表示为 $f_{\text{src}}(t_r, f_a) = \exp\left[-j \frac{2\pi r_0 \alpha^2 \lambda^2}{c^2} \cdot \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^3} t_r^2\right] \cdot \exp\left[j \frac{2\pi r_0 \alpha^3 \lambda^2}{c^3} \cdot \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^5} t_r^3\right]$ 。分析该式可得对距离 r_0 上的点目标,其频偏对应的总距离徙动(RCM)为

$$R_{\text{CM}} = \frac{r_0}{\beta(f_a)} - \frac{cf_a}{2\alpha} - r_0 = \frac{r_0[1 - \beta(f_a)]}{\beta(f_a)} - \frac{cf_a}{2\alpha}. \quad (14)$$

可以看出总距离徙动不仅与最小距离 r_0 有关,而且与方位向频率 f_a 有关,包含两部分:球面波效应造成的距离和方位间的耦合;平台连续运动带来的快时间距离走动,这部分为调频连续波信号所特有。前一部分的补偿可使用频率变标(FS)算法^[10]利用线性调频信号的尺度变换特性消除,将与距离有关的徙动变为与距离无关,避免了插值处理。后一部分则需添加额外多普勒项进行补偿。

本文提出的 NCCFS 改进算法在频率变标算法的基础上结合非线性啁啾“三步法”校正和快时间距离徙动补偿,其详细实现过程如下。

改进成像方法的第一步是对 t_r 进行因子为 β 的尺度变换,同时校正与距离无关的扫频啁啾非线性,相乘的函数记为

$$H_{\text{FS}}(t_r, f_a) = \exp[j\pi\alpha(1 - \beta)t_r^2] \cdot \exp[j2\pi\epsilon(t_r)]. \quad (15)$$

对信号乘以 RVP 校正因子,将与距离有关的非线性啁啾误差项变为距离无关:

$$H_{\text{RVPC}}(f_r, f_a) = \exp\left(-j \frac{\pi f_r^2}{\alpha\beta}\right). \quad (16)$$

对二维频率域的信号作关于 f_r 的逆傅里叶变换,信号在距离-多普勒域变为

$$S_{\text{IF}}(t_r, f_a; r_0) = \exp\left(-j \frac{4\pi r_0 \beta}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi\alpha r_0}{c} t_r\right) \cdot \exp(j2\pi f_a t_r) \cdot f_{\text{src}}(\beta t_r, f_a) \cdot \exp[-j\pi\alpha(\beta^2 - \beta)t_r^2] \cdot \exp[j2\pi\epsilon_{\text{RVP}}(t_r)], \quad (17)$$

式中 $\epsilon_{\text{RVP}}(t_r)$ 代表误差信号通过(16)式所示调频系统的输出。对该回波信号乘以逆频率尺度变换函数,同时消除剩余非线性啁啾误差项:

$$H_{\text{IFS}}(t_r, f_a) = \exp[j\pi\alpha(\beta^2 - \beta)t_r^2] \cdot \exp[-j2\pi\epsilon_{\text{RVP}}(t_r)]. \quad (18)$$

由平台连续运动引入的多普勒频移项需进行校正,校正函数

$$H_{\text{DFS}}(t_r, f_a) = \exp(-j2\pi f_a t_r). \quad (19)$$

距离向的处理还需完成二次距离压缩项的校正, SRC 校正因子为

$$H_{\text{SRC}}(t_r, f_a) = f_{\text{src}}^*(\beta t_r, f_a). \quad (20)$$

此时对信号进行距离向傅里叶变换聚焦成像,方位向匹配函数为

$$H_{\text{AMF}}(f_a; r_0) = \exp\left(j \frac{4\pi r_0 \beta}{\lambda}\right). \quad (21)$$

最后对信号作方位频域逆傅里叶变换,完成方位压缩,即得到一张全聚焦的图像

$$S(t_a, f_r; r_0, x_0) = \sin c \left[\frac{T_p}{\beta} \left(f_r + \frac{2\alpha}{c} r_0 \right) \right] \cdot \sin c \left(\frac{2v^2 T_s t_a}{\lambda r_0} \right). \quad (22)$$

图 3 给出了 NCCFS 算法的实现框图, 阴影部分为区别于传统方法之处。

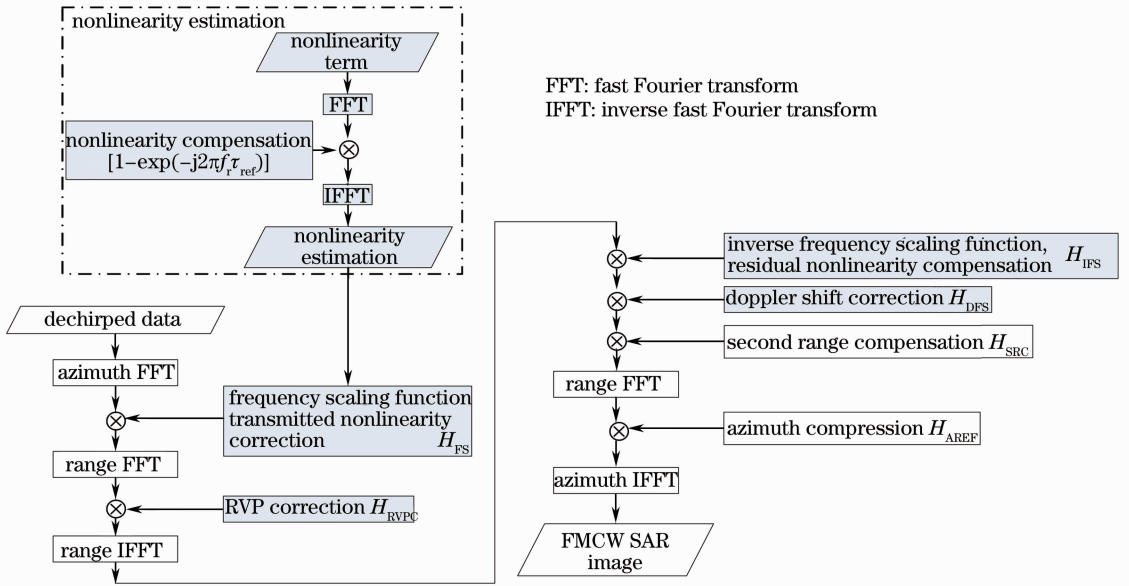


图 3 NCCFS 算法实现框图

Fig. 3 NCCFS algorithm process

4 仿真实验

为了验证 NCCFS 方法的性能, 本文仿真多点目标成像过程, 系统参数选择示于表 1 中。啁啾建模为正弦信号, 取非线性频率 $f_m = 5/T_p$ 和非线性度 $L = 10^{-4}$ 。

表 1 合成孔径激光雷达仿真主要系统参数

Table 1 System parameters for simulation

Carrier wavelength / μm	1	Pulse repetition interval / μs	100	Sampling frequency / MHz	100
Bandwidth / GHz	1.5	Velocity / (m/s)	50	Near/far range / m	500~1000

取条带中心点目标为例, 图 4 展示了其距离向压缩结果。可以看到相较原始频率变标算法导致距离向分辨率严重恶化的结果, 本文提出的 NCCFS 改进方法很好地消除了非线性啁啾的影响, 分辨率、旁瓣比和成像质量得到显著提高。

图 5 显示了最终的多点目标成像结果, NCCFS 改进方法使各点目标得到良好聚焦, 参考点处目标成像结果最优, 这是因为二次距离压缩时使用参考距离来近似 r_0 。

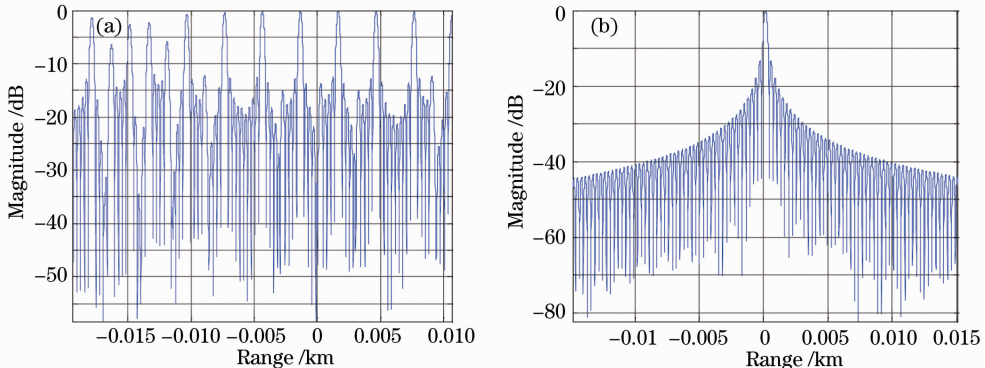


图 4 点目标距离向压缩结果。(a) 原始频率变标算法; (b) NCCFS 改进算法

Fig. 4 Range compression results with. (a) Original FS algorithm and (b) NCCFS algorithm

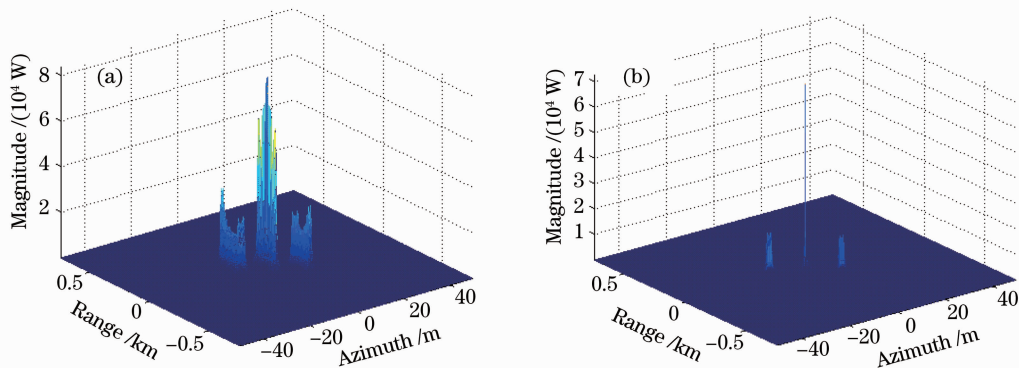


图5 多点目标成像结果。(a) 原始频率变标算法；(b) NCCFS改进算法

Fig. 5 Multi-point targets imaging results with. (a) Original FS algorithm and (b) NCCFS algorithm

由上述仿真结果可以看出,提出的 NCCFS 改进方法校正了非线性啁啾的影响,成像效果优异,非常适用于合成孔径激光雷达的实时成像处理。

5 结 论

通过改进原始频率变标方法,解决了合成孔径激光雷达成像中扫频啁啾非线性严重恶化距离向分辨率的问题,经仿真验证,NCCFS 改进方法在目标分辨率和成像质量上得到大幅改善,实现了精确成像。本研究解决了合成孔径激光雷达实际成像非线性啁啾的基本理论障碍,值得对其做进一步的研究和实践。

参 考 文 献

- Liu Liren. Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging lidar: principle[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0128001.
刘立人. 菲涅尔望远镜全孔径合成成像激光雷达[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0128001.
- Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Yanan, *et al.*. A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900112.
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室验证[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900112.
- Xu Nan, Liu Liren, Lu Wei. Compensation of nonlinear chirp in synthetic aperture imaging lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(4): 22–27.
许楠, 刘立人, 鲁伟. 合成孔径激光成像雷达中的非线性啁啾补偿[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(4): 22–27.
- Luan Zhu, Zhou Yu, Dai Enwen, *et al.*. Measurement and overcoming of nonlinear chirp in synthetic aperture imaging lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1212003.
栾竹, 周煜, 戴恩文, 等. 合成孔径激光成像雷达啁啾非线性的测量和抑制[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1212003.
- R. L. Lucke, L. J. Rickard, M. Bashkansky. Synthetic Aperture Lidar (SAL): Fundamental Theory, Design Equations for a Satellite System, and Laboratory Demonstration[M]. Washington; Naval Research Laboratory, 2002.
- S. M. Beck, J. R. Buck, W. F. Buell, *et al.*. Synthetic aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. Appl Opt, 2005, 44(35): 7621–7629.
- Xu Nan, Lu Wei, Liu Liren. Simulation of nonlinear-chirp compensation by scan-filtering in SAIL[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 47–54.
许楠, 鲁伟, 刘立人. 合成孔径激光成像雷达中非线性啁啾逐一扫捕滤波校正算法的仿真与分析[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 47–54.
- Lu Wei, Xu Nan, Liu Liren. Algorithm of matched filtering overcoming nonlinear chirp effect in synthetic aperture lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 2011–2017.
鲁伟, 许楠, 刘立人. 合成孔径激光雷达非线性啁啾克服的匹配滤波算法[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 2011–2017.
- Zhang Chengbo. Synthetic Aperture Radar Principle, System Analysis and Application[M]. Beijing; Science Press, 1989. 140–152.
张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 140–152.
- 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.