

# 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法

郭 亮 邢孟道 梁毅 唐禹

(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** 合成孔径成像激光雷达是一种新的主动式有源的成像系统, 可以获得比合成孔径雷达更高的分辨率, 和更接近光学图片的效果。首先, 在理想条件下分析了调频连续波的信号模型, 推导出在连续波系统聚束模式下一种适用于机载合成孔径成像激光雷达系统的频率变标算法。然后, 使用傅里叶变换法对符合 von Karman 谱的随机相位屏模拟大气湍流, 并分析了 Fried 参量和合成孔径长度之间的关系。最后, 仿真说明真空中采用方位预处理可以消除图像重影, 并且补偿多普勒频移项可以消除 8.6~9.3 dB 的能量损失和使图像散焦的现象。而在有大气影响时, 合成孔径长度的选择小于 Fried 参量时, 图像方位向可以良好聚焦。

**关键词** 激光雷达; 合成孔径; 调频连续波; 聚束式; 方位解模糊; 成像算法; 随机相位屏; Fried 参量

中图分类号 TN24 文献标识码: A

## Algorithm for Airborne Spotlight Synthetic Aperture Imaging Ladar Data Processing

Guo Liang Xing Mengdao Liang Yi Tang Yu

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** Synthetic aperture imaging ladar is new active imaging system, which can offer a finer azimuth resolution than that achievable in conventional synthetic aperture radar (SAR) system. The frequency-modulated-continuous-wave (FMCW) signal is analyzed, and the frequency scaling algorithm, which is suitable for airborne synthetic aperture imaging lidar (SAIL) system using FMCW signal in spotlight model, is deduced. And then, simulation of phase screen (PS) distorted by atmospheric turbulence following the von Karman spectrum by using Fourier transform is implemented in order to simulate turbulence. Finally, simulation shows that in the vacuum azimuth preprocessing can remove the ambiguity of the image and the modified algorithm can eliminate the loss of peak power about 8.6~9.3 dB and the defocusing phenomenon, while considering the effect of the atmospheric turbulence, if the synthetic aperture length does not exceed the similar Fried parameter of the atmosphere for SAIL, a well focused image can be obtained.

**Key words** ladar; synthetic aperture; frequency-modulated-continuous-wave; spotlight; remove azimuth ambiguity; imaging algorithm; random phase screen; similar Fried parameter

## 1 引 言

根据波动光学理论, 传统光学成像系统角分辨力受波长和系统孔径的限制<sup>[1]</sup> 对于一定的工作波段, 若要提高系统的角分辨力, 只能增加系统孔径。而在实际应用中很多因素限制了系统孔径的增大, 因此出现了合成孔径光学技术。合成孔径技术是利用运动进行虚拟孔径合成, 而非<sup>[2]</sup> 实孔径合成。

光波波段的合成孔径技术就一直受到人们的关注<sup>[3~6]</sup>。2006 年 4 月美国国防高级研究计划局 (DARPA) 资助的项目已经成功得到了机载合成孔径成像激光雷达 (Synthetic aperture imaging ladar, SAIL) 图片。所以, 适用于机载的合成孔径成像激光雷达成像算法已经成为当前激光遥感技术的一个研究热点<sup>[7]</sup>。

收稿日期: 2007-09-10; 收到修改稿日期: 2007-11-16

基金项目: 国家 863 计划(2006AA12Z144)资助课题。

作者简介: 郭 亮(1983-), 男, 河南开封人, 博士研究生, 主要从事合成孔径激光雷达成像方面的研究。

E-mail: aliang-2001@163.com

导师简介: 邢孟道(1975-), 男, 浙江嵊州人, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达、激光雷达成像、目标识别和天波超视距雷达信号处理等方面的研究。E-mail: xmd@xidian.edu.cn

合成孔径成像激光雷达是一种新的主动式有源的成像系统,它的基本原理与微波波段的合成孔径雷达(SAR)相似。然而,目前合成孔径成像激光雷达系统实验中,采用可调谐激光器发射调频连续波信号(FMCW),而非合成孔径雷达中的单脉冲信号<sup>[8]</sup>,所以如何借用成熟的合成孔径雷达技术是一项需要研究的课题。

传统的合成孔径雷达有多种工作模式,如条带式、聚束式等。合成孔径成像激光雷达一个突出的优势就是可以获得比合成孔径雷达更高的分辨力。而对于小范围目标的精细观察,聚束式较条带式的优势就显得尤为突出<sup>[8]</sup>。聚束工作模式能够实现条带式难以达到的高分辨力,同时也会带来较大的数据量,对后续处理提出了很高的要求<sup>[9]</sup>。

本文建立了连续波式聚束合成孔径成像激光雷达的信号模型,采用外差平衡接收的方式,降低了回波信号的带宽,减轻了光电转换和模拟/数字转换的压力。在方位维,利用聚束式有瞬时带宽和总带宽概念的特点<sup>[9]</sup>,可以选择较低的脉冲重复频率(Pulse repetition frequency, PRF),不但能够降低数据率,而且低脉冲重复频率使得发射的峰值功率大大减小,从而减小对激光发射器件的要求,而通过基于谱分析的方位预处理来解除较低脉冲重复频率引入的方位模糊,但数据量没有明显增加。并且,该方法不会像子孔径处理那样,虽然也降低了脉冲重复频率解方位模糊,但会引入复杂的频谱拼接处理<sup>[9]</sup>。最后,针对连续波合成孔径成像激光雷达模型,利用改进的频率变标(Frequency scaling, FS)算法,消除了由于平台连续运动带来的影响,并使图像完全聚焦,而且利用斑点成像中随机相位屏的方法模仿大气湍流的影响,得到了合成孔径长度和 Fried 参数的关系。仿真结果验证了本文的正确性和算法的有效性。

## 2 连续波信号和合成孔径成像激光雷达回波信号模型分析

合成孔径成像激光雷达发射的是连续波信号,不同于合成孔径雷达脉冲信号,其信号形式如图 1 所示。可以看出,发射信号为一锯齿波且接收信号是发射信号的一个复本信号,其中  $\Delta f$  为信号带宽,  $t_{\text{PRI}}$  为脉冲重复间隔(Pulse repetition interval),也就是一个脉冲宽度。发射和接收信号的差频  $f_b = \frac{\Delta f}{t_{\text{PRI}}} t_{\text{delay}} = \frac{\Delta f}{t_{\text{PRI}}} \frac{2R}{c}$  包含有目标的距离信息。当目标相对于激光雷达有径向(雷达和目标连线的方向)速度

时,其接收信号频率将会沿着频率轴上移或下移,此时差频信号含有距离和速度信息。

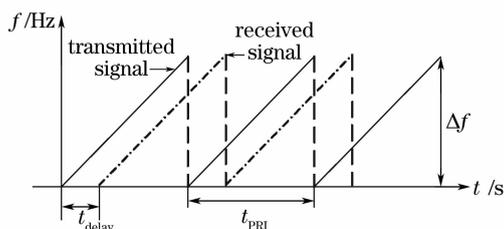


图 1 调频连续波信号形式

Fig. 1 Frequency-modulated-continuous-wave signal in frequency-time domain

合成孔径成像激光雷达工作几何关系如图 2 所示,其中  $v$  是载机飞行速度,  $h$  为载机高度,载机与成像区域的最近距离为  $R_B$ ,  $\beta$  为激光器通过透镜之后的天线波束宽度,它决定成像区域方位向的大小。

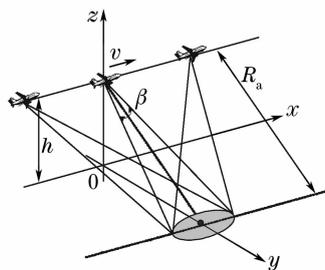


图 2 合成孔径成像激光雷达工作几何模型

Fig. 2 Synthetic aperture imaging lidar system geometry

实际中的阵列天线工作方式是众所周知的<sup>[10]</sup>。然而合成孔径成像激光雷达所利用的合成孔径技术并非使用真实的多个阵元进行阵列合成,而是利用一个阵元在载机平台飞行过程中每一组收发的信号相当于一个虚拟阵元,通过平台的运动形成一条长的合成阵列,然后,利用相应的成像算法,也就是利用这些虚拟阵元的相位信息进行信号处理的方法,来实现合成孔径的高分辨力。本文采用的是聚束工作模式,各次波束照射的都是图 2 中深色的近似圆形区域,通过飞机的飞行运动,形成了所需的合成阵列。

对于合成孔径成像激光雷达信号,发射信号可以表示为

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

式中  $T_p$  为脉冲宽度,也就是  $t_{\text{PRI}}$  脉冲重复间隔,  $\hat{t}$  为一个脉冲内的时间也称快时间即  $\hat{t} \in \left[-\frac{T_p}{2}, \frac{T_p}{2}\right]$ ,  $t_m$  为锯齿波的起始时间也称慢时间,  $t_m = nT_p$ ,  $n$  为整数,  $f_c$  为发射信号的载频,  $t$  为全时间即  $t = \hat{t} + t_m$ ,  $\gamma$  为调频率,  $\gamma = \Delta f/t_{\text{PRI}}$ 。

设在成像区域内的目标距激光雷达的瞬时距离为  $R_t$ , 考虑到大气影响, 根据文献[11] 利用相位屏模拟大气可以得到各目标点通过相位屏的相位值  $\phi(x, y)$ , 其中

$$\phi(x, y) = \mathcal{F}\{\Phi(f_x, f_y)\} = \mathcal{F}\{0.00058r_0^{-5/3}(f_x^2 + f_y^2 + f_0^2)^{-11/6}\}, \quad (2)$$

式中  $\mathcal{F}$  为傅里叶变换,  $r_0$  为 Fried 参量(大气相干长度),  $f_x, f_y$  为空间频率,  $f_0 = 2\pi/L_0$  为湍流外尺度  $L_0$  对应的空间频率。

仿真时, 把湍流影响引起的相位误差折算到回波的瞬时距离  $R_t$  中, 这样  $R'_t = R_t + \Delta r = R_t + \Delta r / (2\pi)^{[8]}$ 。由于每次回波每个点目标通过相位屏的相位都是随机的, 所以很难用解析的方法分析, 比较可行的是计算机模拟。为了方便推导(根据文献[12], 只有所选择的合成孔径长度小于大气的相干长度对于成像湍流的影响就可以忽略), 将  $R'_t$  用  $R_t$  代替。得到该目标的回波为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_t/c}{T_p}\right) \times \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(t - \frac{2R_t}{c}\right) + \frac{1}{2}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_t}{c}\right)^2\right]\right\}, \quad (3)$$

式中  $A$  为目标反射激光信号的幅度变化(假设目标为理想点目标), 是与相位无关的量。可以得到用于外差平衡接收的一个固定距离的参考信号(通常该信号取场景中心处), 可以表示为

$$s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{\text{ref}}/c}{T_p}\right) \times \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) + \frac{1}{2}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)^2\right]\right\}, \quad (4)$$

则回波经差频后的信号为

$$s(\hat{t}, t_m) = s_r(\hat{t}, t_m) s_{\text{ref}}^*(\hat{t}, t_m) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_t/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}(R_t - R_{\text{ref}})\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\gamma(R_t - R_{\text{ref}})\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[j\frac{4\pi\gamma}{c^2}(R_t - R_{\text{ref}})^2\right], \quad (5)$$

式中第一个指数项为方位向的相位历程, 第二个指数项为距离向的单频信号(由外差处理造成的), 第三个指数项为剩余视频相位(Residual video phase RVP) 项, 会对方位向的聚焦造成影响。方位向慢时间取值范围  $t_m \in [-T_a/2, T_a/2]$ , 其中  $T_a$  为一个合成孔径时间。从形式上看, (5) 式和脉冲式回波信号没有差别<sup>[8]</sup>, 但是由于载机平台发射是连续波而非

脉冲信号, 传统的合成孔径雷达的“一步一停”<sup>[8]</sup>(即雷达发射信号和接收信号时认为平台是不动的) 近似不再成立, 这时瞬时距离  $R_t$  不但和慢时间有关, 而且还和快时间有关, 可以表示为

$$R_t = \sqrt{R_B^2 + v(\hat{t} + t_m)^2}. \quad (6)$$

将  $R_t$  在  $\hat{t} = 0$  处泰勒展开近似可得

$$R_t = R_t(\hat{t}, t_m) \approx \sqrt{R_B^2 + (vt_m)^2} + \frac{v^2 t_m}{\sqrt{R_B^2 + (vt_m)^2}} \hat{t}. \quad (7)$$

令

$$R(t_m) = \sqrt{R_B^2 + (vt_m)^2},$$

则

$$R_t \approx R(t_m) + \frac{v^2 t_m}{R(t_m)} \hat{t},$$

那么由于平台连续运动引入的多普勒频移在距离向的表示为

$$f_d = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{dR_t}{dt} = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{v^2 t_m}{\sqrt{R_B^2 + (vt_m)^2}} = \frac{2}{\lambda} \cdot v \cdot \sin \theta = f_a, \quad (8)$$

式中斜视角  $\theta$  为天线相位中心在天线波束宽度内与点目标的连线和平台运动方向垂直方向之间的夹角。 $f_a$  为斜视角的函数, 恰好等于方位向的多普勒频率  $f_a$ 。此时  $R_t \approx R(t_m) - \frac{\lambda}{2} f_d \hat{t} = R(t_m) - \frac{\lambda}{2} f_a \hat{t}$ , 这里  $f_d$  为平台在发射和接收脉冲过程中存在连续运动引入的, 对于脉冲式合成孔径雷达, 由于脉冲宽度很小, 瞬时斜距和距离快时间之间的关系可以忽略。然而, 在连续波系统中这个多普勒频移项的存在将会使距离向位置发生偏移, 使图像产生几何形变和散焦, 需要进行补偿。

当平台以聚束模式工作时, 根据系统参量可知, 由平台连续运动引入的距离变化较小, 对

$$\exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\gamma(R_t - R_{\text{ref}})\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right],$$

$$\exp\left[j\frac{4\pi\gamma}{c^2}(R_t - R_{\text{ref}})^2\right]$$

的影响很小, 可以用

$$\exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}\gamma[R(t_m) - R_{\text{ref}}]\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right\},$$

和

$$\exp\left\{j\frac{4\pi\gamma}{c^2}[R(t_m) - R_{\text{ref}}]^2\right\}$$

代替, 那么(5) 式变为

$$\begin{aligned}
s(\hat{t}, t_m) = & A \cdot \text{rect}[(\hat{t} - 2R/c)/T_p] \times \\
& \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} [R(t_m) - R_{\text{ref}}]\right\} \times \\
& \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{v^2 t_m}{R(t_m)} \hat{t}\right] \times \\
& \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} \gamma [R(t_m) - R_{\text{ref}}] \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right\} \times \\
& \exp\left\{j \frac{4\pi\gamma}{c^2} [R(t_m) - R_{\text{ref}}]^2\right\}, \quad (9)
\end{aligned}$$

其中,(9)式的第二个指数项就是由于要考虑连续波情况下平台连续运动引入的指数项。

### 3 方位预滤波和改进的频率变标算法

在系统设计时,选择的脉冲重复频率小于方位多普勒总带宽,会出现由于欠采样的方位模糊问题。利用基于谱分析的方位预滤波,可以实现方位向的增采样,进而解决出现的方位谱混叠。不过方位预滤波只是实现的解模糊问题,并不是实现精确的图像聚焦处理。所以只需考虑方位向信号,即(9)式中的第一个指数项,忽略距离方位之间耦合的影响。那么,原始点目标的方位信号可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\begin{aligned}
s_a = & \text{rect}\left(\frac{t_m - t_{m,\text{center}}}{T_a}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{2v^2}{\lambda R_B} t_m^2\right) = \\
& \text{rect}\left(\frac{t_m - t_{m,\text{center}}}{T_a}\right) \cdot \exp(-jk_a t_m^2), \quad (10)
\end{aligned}$$

其中  $t_{m,\text{center}}$  为合成孔径时间  $T_a$  的中点,  $k_a = \frac{2v^2}{\lambda R_B}$  为多普勒调频率是目标的最近距离  $R_B$  的函数。方位预滤波的关键在于方位信号和一个二次相位参考函数的卷积操作,二次相位参考函数为

$$s_{a,\text{ref}} = \exp(-jk_{a,\text{ref}} t_m^2), \quad (11)$$

式中  $k_{a,\text{ref}}$  为参考信号  $R_{\text{ref}}$  的函数,一般为场景中心处,也可以选择其他位置,但必须在波束照射方位内的最近距离和最远距离之间。

卷积后信号表示为

$$\begin{aligned}
ss = & s_a \otimes s_{a,\text{ref}} = \exp(j\pi k_{a,\text{ref}} t_m^2) \times \\
& \int s_a \cdot \exp(j\pi k_{a,\text{ref}} \tau^2) \cdot \exp(-j2\pi k_{a,\text{ref}} \tau t_m) d\tau. \quad (12)
\end{aligned}$$

将上式转换到离散域:

$$\begin{aligned}
ss(n\Delta t'', R_B) = & \\
& \sum_{i=-Q/2}^{Q/2-1} s_a(i\Delta t', R_B) s_{a,\text{ref}}(n\Delta t'' - i\Delta t', R_{\text{ref}}) = \\
& \exp[jk_{a,\text{ref}}(n\Delta t'')^2] \sum_{i=-Q/2}^{Q/2-1} s_a(i\Delta t', R_B) \times \\
& \exp[jk_{a,\text{ref}}(i\Delta t')^2] \exp(-j2\pi k_{a,\text{ref}} n\Delta t' i\Delta t'), \quad (13) \\
& n = -B/2, \dots, B/2 - 1
\end{aligned}$$

式中  $\Delta t' = 1/f_{\text{PRF}}$  为原始信号脉冲重复时间,  $Q = T_a/\Delta t'$  为方位向信号点数,  $\Delta t''$  为输出数据重复时间,  $B$  为输出数据点数。令<sup>[13]</sup>

$$\frac{1}{k_a \Delta t'} = P \Delta t'', \quad \text{且} \quad P \in \mathbf{N}. \quad (14)$$

那么,(13)式可以改写为

$$\begin{aligned}
ss(n\Delta t'', R_B) = & \exp[jk_{a,\text{ref}}(n\Delta t'')^2] \times \\
& \text{DFT}\{s_a(i\Delta t', R_B) \exp[jk_{a,\text{ref}}(i\Delta t')^2]\}, \quad (15) \\
& n = -P/2, \dots, P/2 - 1
\end{aligned}$$

式中 DFT 为离散傅里叶变换,可以看出,方位预处理操作是由两次复乘和一次快速傅里叶变换( $P$  的适当选取)完成。如图 3 所示。

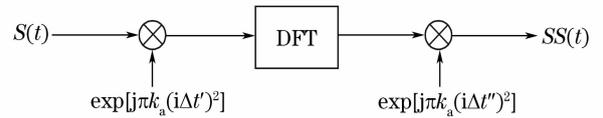


图 3 方位预处理示意图

Fig. 3 Sketch of azimuth preprocessing

分析方位预处理的卷积过程,相当于在方位频域乘以频率响应函数<sup>[10]</sup>

$$H(f_a) = \exp\left(-j\pi \frac{f_a^2}{k_{a,\text{ref}}}\right). \quad (16)$$

那么,将数据变换到方位频域(即多普勒域)乘以(16)式的共轭,才算真正完成了方位解模糊的操作。

经过完全解模糊后,利用文献[9]中的方法信号(10)式可以表示为

$$\begin{aligned}
s(\hat{t}, f_a; R_B) = & A \left\{ \exp\left(-j \frac{4\pi R_B \beta}{\lambda}\right) \cdot \exp(-j2\pi f_a \hat{t}) \cdot \right. \\
& \left. \exp\left[-j \frac{4\pi\gamma}{c} \left(\frac{R_B}{\beta} - R_{\text{ref}}\right) \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \text{src}(\hat{t}, f_a; R_B) \right\} \otimes \exp(-j\pi \gamma \hat{t}^2), \quad (17)
\end{aligned}$$

其中  $\text{src}(\hat{t}, f_a; R_B) = \exp\left[-j \frac{2\pi R_B \gamma^2 \lambda}{c^2} \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^3} \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)^2\right] \cdot \exp\left[j \frac{2\pi R_B \gamma^3 \lambda^2}{c^3} \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^5} \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)^3\right]$ ,

$$\beta = \beta(f_a) = \sqrt{1 - f_a^2 \lambda^2 / (4v^2)}.$$

(17)式第一个指数项为方位向相位历程,决定方位向的聚焦,第二个指数项为多普勒平移项,是由于平台的连续运动造成的,将会造成目标位置的偏移,第三个指数项是距离向调制信号, $\beta(f_a)$ 为尺度因子,从上式可以看出,距离单元徙动 $[R_{RCM} = R_B/\beta - R_{ref} = (R_B - \beta R_{ref})/\beta]$ 与 $\beta(f_a)$ 有关,即距离单元徙动是 $f_a$

和 $R_B$ 的函数,说明距离和方位之间存在耦合。频率变标算法就是通过变标使得场景内所有目标具有相同的距离徙动曲线,进而通过整体平移来实现距离徙动校正的<sup>[9]</sup>。改进的频率变标算法就是在原来算法的基础上,又考虑到平台连续运动的影响。具体流程如图4所示。

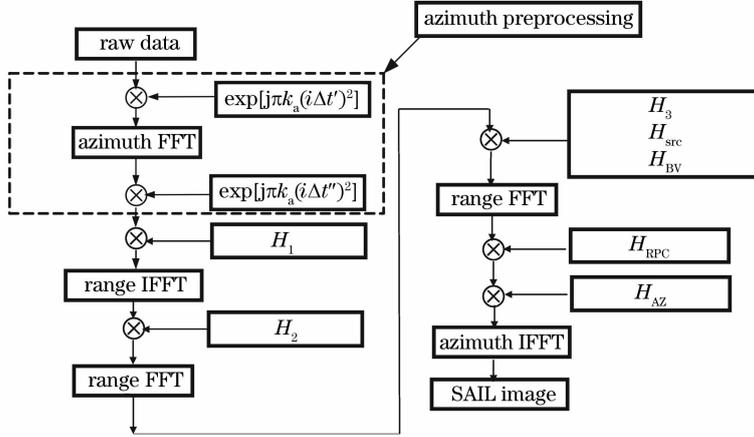


图4 改进的频率变标算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the frequency scaling (FS) algorithm

各补偿因子分别为(经过方位预处理后)

1) 多普勒频移校正即频率变标在距离时间域完成

$$H_1 = \exp(-j2\pi f_a \hat{t}) \cdot \exp[j\pi \gamma^2 (1 - \beta)], \quad (18)$$

式中,第一个指数项是校正多普勒频移(正是由于连续波特点引入的需要补偿的项),第二个指数项是进行频率变标,即进行距离空变性校正。

2) 残留视频项校正是在距离频域完成

$$H_2 = \exp\left(-j \frac{\pi f_r^2}{\gamma \beta}\right), \quad (19)$$

式中 $f_r$ 为距离频率,这一项校正由于外差接收引入的剩余视频项。

3) 逆频率变标在距离时域,方位频域完成

$$H_3 = \exp[-j\pi \gamma^2 (\beta^2 - \beta)]. \quad (20)$$

4) 二次距离压缩

$$H_{src} = \text{src}(\hat{t}, f_a; R_B)^* = \exp\left[j \frac{2\pi R_B \gamma^2 \lambda (\beta^2 - 1)}{c^2 \beta^3} \left(\hat{t} - \frac{2R_{ref}}{c}\right)^2\right] \times \exp\left[-j \frac{2\pi R_B \gamma^3 \lambda^2 (\beta^2 - 1)}{c^3 \beta^5} \left(\hat{t} - \frac{2R_{ref}}{c}\right)^3\right], \quad (21)$$

二次距离压缩函数是空变的,当采用正侧视工作模式,可以用场景中心斜距 $R_s$ 代替空变的 $R_B$ ,而用于外差接收的参考信号一般也是场景中心斜距 $R_s$ 。

5) 距离徙动校正

$$H_{BV} = \exp\left[j \frac{4\pi \gamma R_{ref}}{c} \left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \left(\beta \hat{t} - \frac{2R_{ref}}{c}\right)\right]. \quad (22)$$

6) 相位保持项

$$H_{RPC} = \exp\left(j \frac{4\pi R_{ref} f_r}{c \beta}\right). \quad (23)$$

相位保持项是在完成了二次距离压缩和距离徙动校正后乘到信号上完成在距离处理中相位的保持。

7) 方位脉压

完成距离脉压后,点目标的信号形式为

$$s\left(\frac{f_r}{\beta}, f_a; R_B\right) = A' \exp\left(-j \frac{4\pi R_B \beta}{\lambda}\right) \times \text{sinc}\left\{\frac{\pi T_p}{\beta} \left[f_r + \frac{2\gamma}{c} (R_B - R_{ref})\right]\right\}, \quad (24)$$

方位匹配函数为

$$H_{AZ} = \exp\left(j \frac{4\pi R_B \beta}{\lambda}\right). \quad (25)$$

信号乘以方位匹配函数后,再进行方位逆傅里叶变换到方位时间域,最后得到图像

$$s(f_r, t_m; R_B) = A' \text{sinc}\left\{\frac{\pi T_p}{\beta} \left[f_r + \frac{2\gamma}{c} (R_B - R_{ref})\right]\right\} \times \text{sinc}(\pi \Delta f_a t_m), \quad (26)$$

其中  $\Delta f_a$  为方位多普勒带宽。

### 4 仿真结果与分析

仿真参量设置如表 1。

表 1 参量设置

Table 1 Synthetic aperture imaging lidar parameters

Wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	10
Bandwidth $B / \text{GHz}$	15
Pulse repetition interval $t_{\text{PRI}} / \mu\text{s}$	400
Velocity $v / (\text{m/s})$	50
Distance between platform and center of the imaging area $R / \text{m}$	4000
Sampling aperture in azimuth $D / \text{cm}$	4
Width of the area $W_r / \text{m}$	10
Sampling frequency $F_s / \text{MHz}$	300
Grid interval /mm	0.01
Grid point number	1024×1024
Outer scale $L_0 / \text{m}$	20

图 5 为一个  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  的场景中多个点目标成像点的坐标。图 6 为多个点目标成像点的等高线图。可以看出,利用流程图所示的算法无论方位向还是距离向都可以很好地聚焦。

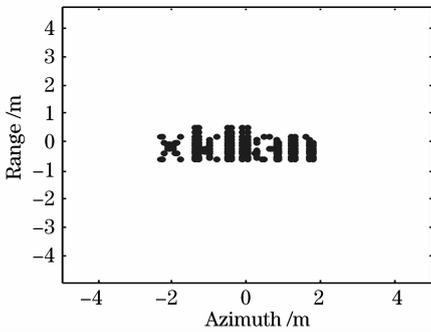


图 5 点目标坐标  
Fig. 5 Coordinates of the points

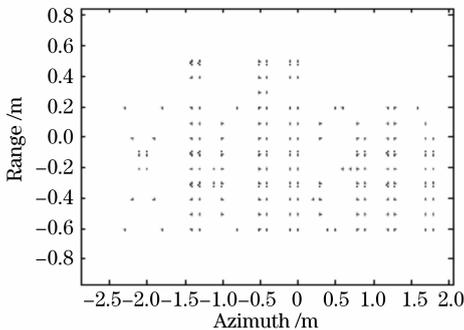


图 6 点目标成像结果图  
Fig. 6 Contour map of the points

重新设置点目标坐标为  $A(0,0)$ ,图 7 为方位预处理前、后的成像效果图。可以看出没有经过方位预处理,由于其频谱有混叠,所以造成了最后成像时

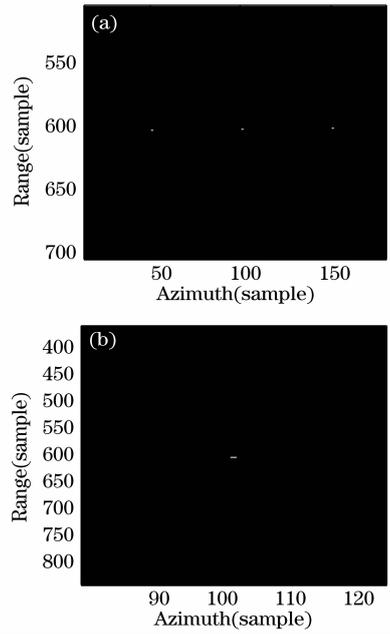


图 7 方位预处理前(a)和后(b)成像效果图  
Fig. 7 Results before (a) and after (b) azimuth preprocessing

出现多个点(重影)的现象图 7(a)中左右两个点就是由于频谱混叠出现的虚假点,而在图 7(b)中通过了方位预处理,有效的解除了方位模糊,可以等到真正的点而没有虚假的点。

图 8 为在解模糊后,单个点目标分别利用原始的频率变标算法和改进的频率变标算法的成像效果

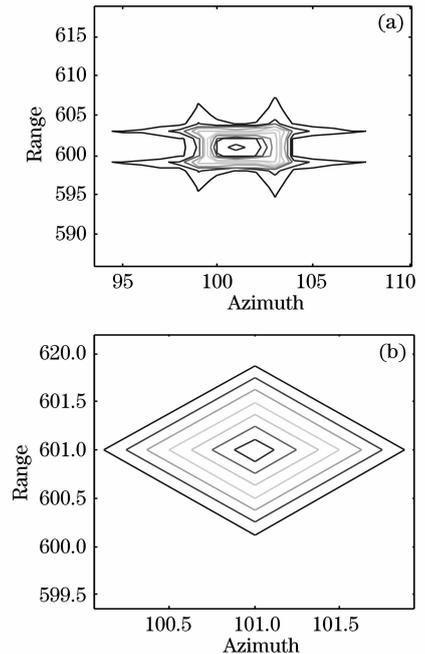


图 8 原始(a)和改进(b)的频率变标算法  
Fig. 8 One point using original (a) and modified (b) FS algorithm

图。原始的频率变标算法是针对脉冲形式波形系统的算法,在连续波系统中就不能使图像中的点聚焦。并且从图 9 可以看出原始的算法不但不能使点目标聚焦,还会使点目标在两维有 8.6~9.3 dB 的能量损失和图像的移动。

$r_0$  之比的两个点的成像结果。可以看出,选取合成孔径长度小于大气相干长度时可以很好的成像,逐渐增大合成孔径长度方位上开始出现虚假的目标,直到方位上就像没有分辨能力一样。不过,这对于距离上的压缩产生影响很小,这和文献[12]吻合。

图 10 为不同合成孔径长度  $L$  与大气相干长度

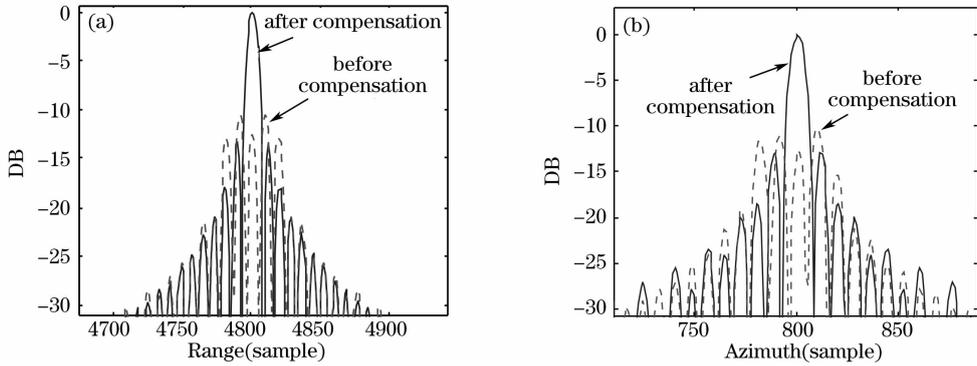


图 9 (a)距离剖面图,方位剖面图(b)

Fig. 9 Profiles of range (a) and azimuth (b)

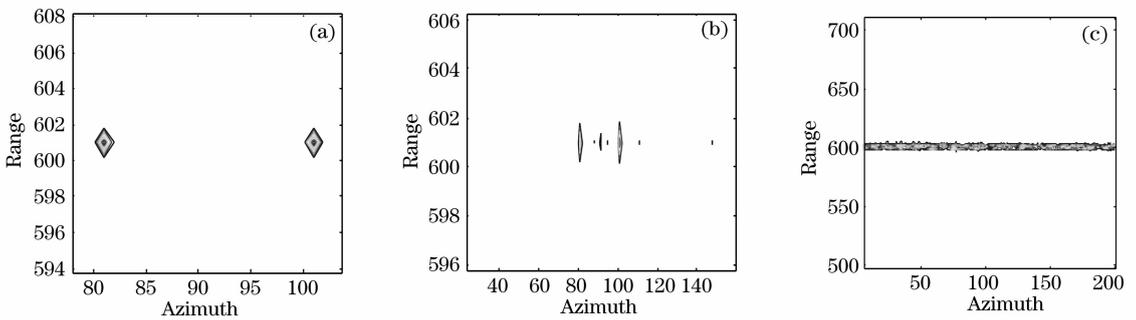


图 10 合成孔径长度与大气相干长度比为 1/2(a), 8/1 (b), 40/1 (c)

Fig. 10 Radios of synthetic aperture length to Fried parameter are 1/2 (a), 8/1 (b), 40/1 (c)

### 5 结 论

改进了已有的频率变标算法,有效地解决了由于平台连续运动带来的影响。并且,由于采用连续波信号,意味着有较长的脉冲宽度以减小发射脉冲的瞬时功率,造成不能采用较高的脉冲重复频率,在聚束模式下工作,就会造成方位混叠。本文考虑到了较低的脉冲重复频率带来的方位混叠,利用了基于谱分析的方位预处理方法有效的解决了这个问题。最后,在合成孔径成像激光雷达算法的推导中,考虑到大气对于该系统的影响,利用了随机相位屏模拟大气的方法进行了仿真,仿真说明如果合成孔径长度小于大气的相干长度,可以不考虑大气对合成孔径算法的影响。如果合成孔径长度大于大气的相干长度,这种相位误差的影响就会随着合成孔径长度与大气相干长度的比值逐渐变大,先是出现虚

假目标点和高的旁瓣直到无法聚焦成像。

### 参 考 文 献

- 1 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1978. 541~545  
M. 玻恩, E. 沃耳夫. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1978. 541~545
- 2 Wang Zhile, Zhang Wei, Long Funian. Image quality evaluation for diffraction-limited optical synthetic aperture system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 35~39  
王治乐, 张 伟, 龙夫年. 衍射受限光学合成孔径成像系统像质评价[J]. 光学学报, 2005, **25**(1): 35~39
- 3 Marcus Stephen, Barry D. Colella, Thomas J. Green. Solid-state laser synthetic aperture radar [J]. *Appl Opt.*, 1994, **33**(6): 960~964
- 4 M. Bashkansky, R. L. Lucke, Eotal Funk *et al.*. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1983~1985
- 5 Zhang Yun, Wu Jin, Tang Yongxin. Synthetic aperture lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(7): 48~50  
张 云, 吴 谨, 唐永新. 合成孔径激光雷达[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(7): 48~50

- 6 Li Fan, Wu Shuangyang, Zheng Yongchao *et al.*. Overview of the development of synthetic aperture ladar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(1): 55~65  
李 番, 邬双阳, 郑永超 等. 合成孔径激光雷达技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(1): 55~65
- 7 Wang Jianyu, Hong Guanglie. Technologies and applications of laser active remote sensing [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(suppl.): 742~748  
王建宇, 洪光烈. 激光遥感技术及其应用[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(增刊): 742~748
- 8 Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang Tong. *Technologies of Radar Imaging* [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2005. 19~30, 60~64, 165~173  
保 铮, 邢孟道, 王 彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 19~30, 60~64, 165~173
- 9 Josef Mittermayer, Alberto Moreira, Otmar Loffeld. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1999, **37**(5): 2198~2213
- 10 Wang Yongliang, Chen Hui, Peng Yingning *et al.*. *Theory of Direction-of-Arrival Estimation and Algorithm* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 30~39  
王永良, 陈 辉, 彭应宁 等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 30~39
- 11 Yang Lianchen, Shen Mangzuo, Guo Yonghong. The speckle imaging simulation of space objects[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12): 1108~1111  
杨连臣, 沈忙作, 郭永洪. 天体目标斑点成像的模拟[J]. *光子学报*, 2000, **29**(12): 1108~1111
- 12 Thomas J. Karr. Synthetic aperture ladar resolution through turbulence[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4976**: 22~33
- 13 Riccardo Lanari, Manlio Tesauro, Eugenio Sansosti *et al.*. Spotlight SAR data processing based on a two-step focusing approach[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 2001, **39**(9): 1993~2002