

# 多发多收合成孔径激光雷达高分辨率宽测绘带成像

唐禹, 秦宝, 晏芸, 汪路锋, 邢孟道

(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)是作为未来远距离高分辨率对地区域观测的理想方式。针对传统的单发单收合成孔径激光雷达系统中高分辨率和宽测绘带的矛盾导致测绘带宽窄的问题, 提出一种多发多收合成孔径激光雷达工作体制, 该体制工作在低 PRF 模式, 保证了距离向测绘带的不模糊, 在方位向采用了多通道技术, 利用虚拟孔径和真实孔径结合实现了方位向的多普勒不模糊。通过自适应波束形成将多通道数据合成大带宽无模糊数据, 实现高分辨率宽测绘带成像。首先简述了方位向多通道技术提高方位向分辨率的原理; 随后提出了多发多收合成孔径激光雷达的工作体制, 并且给出了该工作体制下的信号模型, 针对低脉冲重复频率条件下的多普勒模糊问题, 提出了基于自适应波束形成解模糊信号处理方法。最后, 通过三发三收体制验证多发多收合成孔径激光雷达工作体制的可行性。

**关键词:** 合成孔径激光雷达; 多发多收; 高分辨率; 宽测绘带; 多普勒模糊

**中图分类号:** TN958 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0830001

## High-resolution and wide-swath imaging of the multiple-transmitter-multiple-receiver synthetic aperture ladar system

Tang Yu, Qin Bao, Yan Yun, Wang Lufeng, Xing Mengdao

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

**Abstract:** Synthetic aperture ladar (SAL) is an ideal approach for the high resolution region observation with long distance. However, there is a contradiction between the azimuth resolution and the range swath in the single transmitter single receiver SAL system. So the range swath is restricted to a much narrow range. In this paper, the multiple-transmitter-multiple-receiver SAL system was proposed to overcome this limitation. The SAL system worked in the low pulse repetition frequency (PRF) mode to make the range swath unambiguous, and azimuth multiple-channels approach made the azimuth Doppler unambiguous by the way of combination virtual aperture and the real aperture through adaptive digital beam-forming method to realization the high resolution wide swath SAL imaging. The basic principle of increasing the azimuth resolution with the Multiple-Transmitter-Multiple-Receiver SAL system was depicted. Secondly, the concept of the Multiple-Transmitter-Multiple-Receiver SAL system mode was presented, and the signal model for the SAL mode was given as well. According to the Doppler ambiguous in the low PRF system, an adaptive signal processing approach was proposed to de-ambiguous. Finally, the simulation of

收稿日期: 2015-12-06; 修订日期: 2016-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(61001210, 61475122); 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ31063303)

作者简介: 唐禹(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事雷达、激光雷达成像、运动补偿和实时成像处理机设计方面的研究。

Email: ytang@xidian.edu.cn

Three-Transmitter-Three-Receiver SAL system was provided. The performance of the simulation shows the Multiple-Transmitter-Multiple-Receiver SAL system can overcome the Doppler spectrum aliasing and increase the azimuth resolution, and proves the feasibility of the Multiple-Transmitter-Multiple-Receiver SAL system.

**Key words:** synthetic aperture lidar; multiple-transmitter-multiple-receiver; high-resolution; wide swath; Doppler ambiguity

## 0 引言

合成孔径激光雷达技术的研究始于 20 世纪 60 年代末 70 年代初,这个阶段的研究主要是对合成孔径激光雷达(SAL)在概念上进行简单的实验验证。80 年代,美国对 SAL 开展了较多的研究<sup>[1]</sup>。90 年代后,MIT 林肯实验室首次设计了波长为 1.06  $\mu\text{m}$  的单模固体激光器做发射源的合成孔径成像实验装置,获得了物体的二维像<sup>[2]</sup>。2000 年后,随着激光技术的发展和合成孔径技术的成熟,国际上掀起对合成孔径激光雷达成像研究的热潮<sup>[3-4]</sup>。2002 年美国 NRL 实验室验证了用 10 nm 的光学带宽、1.55  $\mu\text{m}$  的波长对平动目标的完全二维 SAL 成像<sup>[5]</sup>。2005 年 Steven M. Beck, Joseph R. Buck 等人研究将合成孔径与相干激光雷达应用于 SAL 中,克服衍射极限,实现了高分辨率远程二维成像<sup>[6]</sup>。2012 年,Stephen Crouch, Zeb W. Barber 在室内研究了 SAL 的成像,其采用发射带宽为 3 THz 的线性调频信号,在室内条件下得到了高分辨率的 SAL 图像<sup>[7]</sup>。国内对 SAL 系统的研制始于 2006 年,西安电子科技大学在 2008 年研制出室内的 SAL 的原理验证系统,得到了室内合成孔径成像激光雷达的图像,分辨率优于 1 mm $\times$ 1 mm<sup>[8-11]</sup>。中国科学院上海光学精密机械研究所等科研院所也进行了室内的 SAL 的研究,得到了很好的结果<sup>[12-15]</sup>。

目前对 SAL 的研究都是基于单发单收 SAL 体制的。单发单收 SAL 体制在高分辨率模式下存在测绘带宽窄的问题,严重制约了 SAL 的实用化。单发单收的 SAL 体制的距离向宽测绘带和方位向高分辨率存在矛盾:SAL 的方位向分辨率与波束宽度成正比,方位向分辨率越高,要保证方位向不发生模糊,脉冲重复频率(PRF)就越大;距离向测绘带宽与脉冲重复频率 PRF 成反比,距离向测绘带宽越大,

要保证距离向不发生模糊,脉冲重复频率 PRF 越小。因此,单发单收 SAL 体制很难同时满足距离向宽测绘带和方位向高分辨率的要求。文中提出了一种方位向多发多收 SAL 体制。该体制将合成孔径技术应用到激光雷达中,解决了传统激光雷达的图像分辨率与观测距离非一致性的缺陷,分辨率不会伴随观测距离的增大而发生恶化,同时利用方位向的多通道数据合成,解决了方位向高分辨率和距离向测绘带宽的矛盾,实现高分辨率宽测绘带成像。该体制使用低脉冲重复频率 PRF 保证距离向不发生模糊,获得距离向大测绘带宽。降低系统的脉冲重复频率,则会引起信号的多普勒模糊,笔者采用方位向多通道技术避免在低脉冲重复频率下的多普勒模糊问题。方位向多通道技术以真实的孔径代替虚拟的孔径,多个发射单元的波束形成多个子波束,每个子波束孔径占整个系统的波束孔径的一部分。子波束的多普勒带宽小于脉冲重复频率 PRF,避免了多普勒模糊,通过自适应波束形成技术将各个子通道的无模糊数据分离出,并合成大带宽无模糊数据,进一步做成像处理即可得到方位向高分辨率的 SAL 图像。

## 1 多发多收 SAL 模型及分析

### 1.1 方位向波束宽度与分辨率关系

在单发单收 SAL 体制中,距离向宽测绘带和方位向高分辨率的矛盾是无法避免的。由于方位向分辨率与波束宽度成正比,在优先获得宽测绘带前提下,增加方位向波束宽度可以提高方位向分辨率。

图 1(a)是单发单收 SAL 方位向波束示意图, $\Delta\theta_0$  是单发单收波束宽度, $v$  是收发单元沿方位向运行速度, $\rho_{az}$  是单发单收 SAL 的方位向分辨率, $f$  是透镜的焦距, $d$  是收发单元的方位向孔径长度。单发单收 SAL 的波束宽度可以由下式求得:

$$\Delta\theta_s = \frac{d}{f} \tag{1}$$

此时单发单收情况下,方位向的分辨率为:

$$\rho_{as} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_s} \tag{2}$$

此时单发单收 SAL 的脉冲重复频率选择为:

$$PRF \geq \frac{v}{\rho_{as}} \tag{3}$$

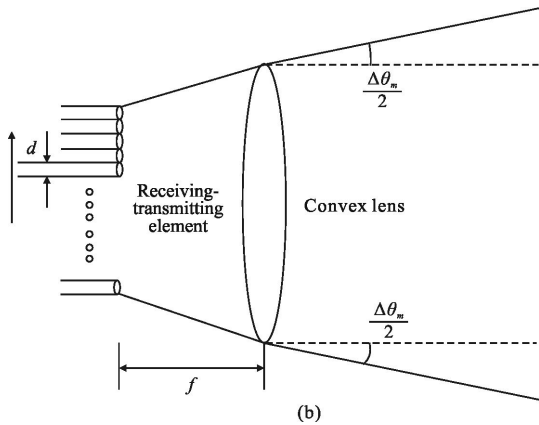
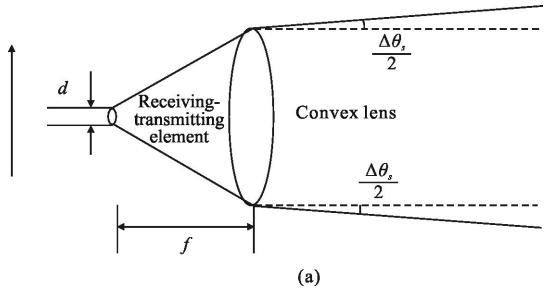


图 1 方位向波束示意图

Fig.1 Azimuth beam

在条带模式下的单发单收 SAL 体制下,要提高方位向分辨率,有两种实现方式:降低透镜的焦距,或者是增加方位向的波束宽度。在实际的应用中,通常保证凸透镜的焦距  $f$  与凸透镜的孔径  $d$  的比值一般不小于 1:1.2,如果降低透镜的焦距,相应地也需要减小透镜的孔径。而为了保证系统能够获得比较大的信号功率,通常会选择大孔径的凸透镜。经过综合考虑,要提高方位向分辨率,通过增加收发单元的方位向波束宽度实现。

图 1(b)为多发多收 SAL 方位向波束示意图。 $\Delta\theta_m$  是多发多收 SAL 的波束宽度,假设方位向一共有  $N$  个收发单元,收发单元方位向孔径长度为  $d$  和透镜的焦距  $f$  不变,方位向波束宽度为:

$$\Delta\theta_m \approx \frac{Nd}{f} \tag{4}$$

此时多发多收 SAL 的方位向分辨率  $\rho_{am}$  为:

$$\rho_{am} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_m} \tag{5}$$

采用方位向多发多收 SAL 在不减小透镜方位向尺寸的条件下,提高了 SAL 的方位向分辨率。此时多发多收 SAL 系统的脉冲重复频率的要求为:

$$PRF \geq \frac{v}{\rho_{am}} \tag{6}$$

根据上述分析,在距离向测绘带宽要求很大的条件下,降低 PRF 满足测绘带宽的要求,通过方位向多发多收单元增大了系统的方位向波束宽度,可以有效地提高方位向分辨率。

### 1.2 多发多收 SAL 模型

图 2 给出了方位向多发多收 SAL 体制示意图。凸透镜的焦距为  $f$ ,在凸透镜焦平面,有  $N$  个收发单元沿航迹方向排列。此时,每个收发单元的波束中心都会通过凸透镜的光心,因此每个收发单元都会向不同的方向发射和接收回波信号,并且会接收相邻收发单元的回波信号。图 2 中每个阵元并不是全部工作在正侧视模式,其中中间位置的收发单元工作在正侧视模式,前面的收发单元工作在后斜视模式,后面的收发单元工作在前斜视模式。椭圆区域为波束覆盖区,相邻收发单元的波束覆盖区会有部分重叠。

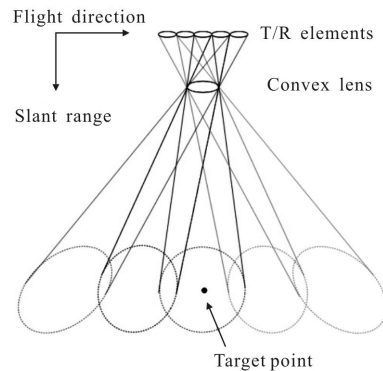


图 2 多发多收 SAL 示意图

Fig.2 Concept of Multiple-Transmitter-Multiple-Receiver SAL system

图 2 中,地面点目标  $p$  的坐标为  $(R_{ret}+r_p, x_p)$ ,收发单元  $TR_2$  坐标为  $(0,0)$ 。假设发射的激光线性调频信号的调制频率为  $\gamma$ ,  $S_i(t, \tau)$  表示第  $i$  个收发单元用 De-chirp 接收方式接收到的回波信号为:

$$S_i(t, \tau) = \sum_{k=1}^N G_{i,k} \exp\left(-j \frac{2\pi}{c} \gamma \left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) \times (R_{ip} + R_{kp} - 2R_{\text{ref}})\right) \times \exp\left(-j \frac{2\pi}{c} f_c (R_{ip} + R_{kp} - 2R_{\text{ref}})\right) \times \exp\left(j \frac{4\pi\gamma}{c^2} \left(\frac{R_{ip} + R_{kp}}{2} - R_{\text{ref}}\right)^2\right) \quad (7)$$

式中： $t$  为快时间； $\tau$  为慢时间； $f_c$  为载波频率； $N$  为收发单元数目； $R_{\text{ref}}$  为参考距离（选择中心作用距离作为参考距离）； $R_{ip}$  表示第  $i$  个接收单元到点目标  $p$  的距离； $R_{kp}$  表示第  $k$  个发射单元到点目标  $p$  的距离； $G_{i,k}$  为表示第  $k$  个发射单元发射；第  $i$  个接收单元接收回波的增益。

$$R_{ip} = \sqrt{(R_{\text{ref}} + r_p)^2 + \left(v\tau - x_p + \left(i - \frac{N+1}{2}\right)d\right)^2}$$

$$R_{kp} = \sqrt{(R_{\text{ref}} + r_p)^2 + \left(v\tau - x_p + \left(k - \frac{N+1}{2}\right)d\right)^2} \quad (8)$$

式中： $1 \leq i, k \leq N$ 。

多发多收 SAL 的回波方程(7)包含 3 个指数项：第 1 个指数项表示回波信号的距离信息，第 2 个指数项表示回波信号的方位多普勒信息，第 3 个指数项表示经过 De-chirp 接收后的剩余视频相位，通过 Deskew 操作补偿剩余视频相位<sup>[16]</sup>。经过 Deskew 补偿后的第  $i$  个接收单元接收到的回波信号  $S'_i(t, \tau)$  为：

$$S'_i(t, \tau) = \sum_{k=1}^N G_{i,k} \exp\left(-j \frac{2\pi}{c} \gamma \left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) \times (R_{ip} + R_{kp} - 2R_{\text{ref}})\right) \times \exp\left(-j \frac{2\pi}{c} f_c (R_{ip} + R_{kp} - 2R_{\text{ref}})\right) \quad (9)$$

SAL 的作用距离远远大于收发孔径的长度即满足：

$$R_{\text{ref}} \gg \frac{N+1}{2} d \quad (10)$$

因此作用距离满足以下关系：

$$R_{ip} + R_{kp} \approx 2R_{\frac{i+k}{2}, p} \quad (11)$$

上式中：

$$R_{\frac{i+k}{2}, p} = \sqrt{(R_{\text{ref}} + r_p)^2 + \left(v\tau - x_p + \left(\frac{i+k}{2} - \frac{N+1}{2}\right)d\right)^2} \quad (12)$$

因此公式(9)可以近似为：

$$S'_i(t, \tau) \approx \sum_{k=1}^N G_{i,k} \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} \gamma \left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) \times \left(R_{\frac{i+k}{2}, p} - R_{\text{ref}}\right)\right) \times \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} f_c \left(R_{\frac{i+k}{2}, p} - R_{\text{ref}}\right)\right) \quad (13)$$

利用驻定相位定理，对公式(13)作关于变量  $\tau$  的

傅里叶变换，得到第  $i$  个接收单元的多普勒信号：

$$S_i(t, f_a) = \sum_{k=1}^N G_{i,k} \exp(-j4\pi(R_{\text{ref}} + r_p) \times \sqrt{\left(\frac{f_c + \gamma t}{c} - \frac{2\gamma R_{\text{ref}}}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{f_a}{2v}\right)^2}) \times \exp\left(j \frac{4\pi}{c} \gamma \left(t + \frac{f_c}{\gamma} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) R_{\text{ref}}\right) \times \exp\left(j2\pi f_a \frac{((i+k) - (N+1))d}{2v}\right) \times \exp\left(-j2\pi f_a \frac{x_p}{v}\right) \quad (14)$$

图 3 给出了多发多收 SAL 的多普勒频谱示意图。根据图 2 可以知道，收发单元不是严格工作在正侧视模式，其中中间位置的收发单元工作在正侧视模式，前面的收发单元工作在后斜视模式，后面的收发单元工作在前斜视模式，因此多发多收 SAL 的回波多普勒频带要比单发单收的系统的多普勒频带宽。由于多发多收系统多普勒带宽不模糊要求的脉冲重复频率比每个收发单元所要求的脉冲重复频率高，在实际的多发多收的 SAL 系统，笔者会使用较小的脉冲重复频率保证获得较大的测绘带宽，对于整个多普勒带宽来说是欠采样的，欠采样处理会使整个多普勒频带模糊。

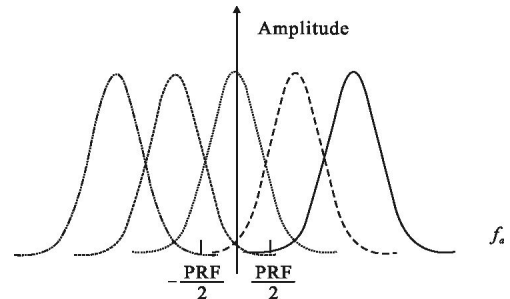


图 3 多发多收 SAL 多普勒频谱

Fig.3 Doppler spectrum of the Multiple-Transmitter-Multiple-Receiver SAL system

如果各个收发单元的间距满足如下关系：

$$\frac{v}{\text{PRF} \cdot N} = d \quad (15)$$

那么从多个收发单元的数据合成一个无模糊的 SAL 回波数据只需要将各个收发单元的数据按时间简单地排列即可。但是多发多收的 SAL 系统非均匀采样，因此需要进行特殊的信号处理来实现各个收发单元数据的合成。对于方位方向的解模糊可以采用两种方法：(1) 固定权矢量合成方法；(2) 自适应权

矢量合成方法。固定权矢量的方法是通过收发通道之间的几何关系直接计算各个接收通道数据的加权矢量,固定权矢量完全利用通道之间的几何关系来确定权矢量的大小,如果对于均匀布阵,此时的权都为 1。然而在多发多收 SAL 系统中,通道之间并不是完全的均匀分布,并且回波信号之间也存在误差,因此下面将会介绍使用自适应权矢量合成方法,根据 Capon 波束形成的最优准则,通过多通道数据解出回波的加权矢量,对多通道信号加权。该加权矢量使得信号的方差最小(即平均输出功率最小),从而可以得出较大的信噪比。在自适应波束形成处理中,加权矢量从多通道模糊信号中处理出无模糊信号,根据图 3 所示,这些无模糊的回波信号可以认为是相干信号。在频谱合成时,将解模糊得到的无模糊信号顺次拼接起来得到无模糊信号,相干合成一个大带宽无模糊信号,该合成过程为一个相参积累的过程。

## 2 多发多收 SAL 信号处理

### 2.1 多普勒解模糊

上节推导出第  $i$  个接收阵元的回波多普勒信号表示为:

$$S_i(t, f_a) = S_0(t, f_a) \sum_{k=1}^N G_{i,k} \exp(-j\varphi(i, k)) \quad (16)$$

其中

$$\varphi(i, k) = 2\pi f_a \frac{((i+k)-(N+1))d}{2v} \quad (17)$$

$$S_0(t, f_a) = \exp(-j4\pi(R_{\text{ref}} + r_p)) \times \sqrt{\left( \left( \frac{f_c + \gamma t}{c} - \frac{2\gamma R_{\text{ref}}}{c^2} \right)^2 - \left( \frac{f_a}{2v} \right)^2 \right)} \times \exp\left(-j \frac{2\pi f_a}{v} x_p\right) \times \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} \gamma \left( t + \frac{f_c}{\gamma} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) R_{\text{ref}}\right) \quad (18)$$

式中:  $S_0(t, f_a)$  为单发单收的回波信号,也就是成像时采用的信号。

通过方位向多发多收得到一系列回波信号  $S_1(t, f_a), S_2(t, f_a), \dots, S_N(t, f_a)$ , 利用这些信号合成一个大带宽无模糊信号。

根据 Capon 法,多普勒频率  $f_a$  处的自适应最优权矢量  $w(f_a)$  满足:

$$\min w^H(f_a) R(f_a) w(f_a) \quad (19)$$

且服从于:

$$w^H(f_a) v(f_a(p)) = 1 \quad (20)$$

公式(19)和(20)中,

$$v(f_a(p)) = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N G_{1,k} \exp\left(j \frac{\pi(p \cdot \text{PRF} + f_a)}{v} \times (1+k-N-1)\right) d \\ \sum_{k=1}^N G_{2,k} \exp\left(j \frac{\pi(p \cdot \text{PRF} + f_a)}{v} \times (2+k-N-1)\right) d \\ \sum_{k=1}^N G_{N,k} \exp\left(j \frac{\pi(p \cdot \text{PRF} + f_a)}{v} \times (N+k-N-1)\right) d \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$R(f_a) = E\{X(f_a)X^H(f_a)\} \quad (22)$$

$$X(f_a) \triangleq [S_1(f_a), S_2(f_a), \dots, S_N(f_a)]^T \quad (23)$$

式中:  $(\cdot)^H$  和  $(\cdot)^T$  分别表示矩阵共轭和转置;  $X(f_a)$  为多普勒频率  $f_a$  处的观测矢量;  $R(f_a)$  为多普勒频率  $f_a$  处的回波信号的统计协方差矩阵;  $E\{\cdot\}$  表示统计平均;  $v(f_a(p))$  为多普勒频率  $f_a$  处的第  $p$  个模糊分量的导向矢量。  $p=1, 2, \dots, 2M+1$  为多普勒模糊分量数目。

在实际处理过程中,公式(20)中的统计协方差矩阵可以利用样本协方差矩阵估计,样本协方差矩阵很容易通过多通道信号获得,样本协方差矩阵为:

$$\hat{R}(f_a) = \frac{1}{L} \sum_{t=1}^L X(t, f_a) X(t, f_a)^H \quad (24)$$

式中:  $L$  为快时间序列的长度,即样本数。  $X(t, f_a)$  描述多普勒频率  $f_a$  和快时间  $t$  处的观测矢量。

解公式(17)和(18)得最优自适应权矢量  $\hat{w}(f_a)$  为:

$$\hat{w}(f_a) = \frac{\hat{R}^{-1}(f_a) v(f_a(p))}{v^H(f_a(p)) \hat{R}^{-1}(f_a) v(f_a(p))} \quad (25)$$

式中:  $(\cdot)^{-1}$  表示矩阵求逆。

利用公式(25)得到的自适应最优权矢量  $\hat{w}(f_a)$  对观测矢量  $X(f_a)$  加权,得到多普勒频率  $f_a$  处的无模糊信号向量为:

$$\hat{S}_0(t, f_a) = \begin{bmatrix} S_0(-M \cdot \text{PRF} + f_a) \\ \vdots \\ S_0(M \cdot \text{PRF} + f_a) \end{bmatrix} \quad (26)$$

其中,

$$S_0(p \cdot \text{PRF} + f_a) = \exp(-j4\pi(R_{\text{ref}} + r_p)) \times \sqrt{\left( \left( \frac{f_c + \gamma t}{c} - \frac{2\gamma R_{\text{ref}}}{c^2} \right)^2 - \left( \frac{p \cdot \text{PRF} + f_a}{2v} \right)^2 \right)} \times \exp\left(-j \frac{2\pi(p \cdot \text{PRF} + f_a)}{v} x_p\right) \times \exp\left(j \frac{4\pi}{c} \gamma \left( t + \frac{f_c}{\gamma} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) R_{\text{ref}}\right) \quad (27)$$

### 2.2 频带合成

上述操作完成多普勒解模糊,根据图 4 所示,将

解模糊得到的无模糊信号顺次拼接起来得到无模糊信号  $S_{\text{DBF}}(t, f_a')$  为:

$$S_{\text{DBF}}(t, f_a') = \exp(-j4\pi(R_{\text{ref}} + r_p)) \times \sqrt{\left(\left(\frac{f_c + \gamma t}{c} - \frac{2rR_{\text{ref}}}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{f_a'}{2v}\right)^2\right)} \times \exp\left(-j\frac{2\pi f_a'}{v} x_p\right) \times \exp\left(j\frac{4\pi}{c} \gamma \left(t + \frac{f_c}{\gamma} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) R_{\text{ref}}\right) \quad (28)$$

$$\text{有 } f_a' \in \left[-\frac{(2M+1) \cdot \text{PRF}}{2}, \frac{(2M+1) \cdot \text{PRF}}{2}\right].$$

### 2.3 成像处理

通过上面的解模糊以及频带合成后, 所得到信号相当于发射频带很宽的单通道无模糊的数据。直接采用距离多普勒算法成像即可。

引入方位向压缩匹配函数:

$$H_1 = \exp\left(j4\pi R_{\text{ref}} \sqrt{\left(\left(\frac{f_c + \gamma t}{c} - \frac{2rR_{\text{ref}}}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{f_a'}{2v}\right)^2\right)}\right) \quad (29)$$

$$H_2 = \exp\left(-j\frac{4\pi}{c} \gamma \left(t + \frac{f_c}{\gamma} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) R_{\text{ref}}\right) \quad (30)$$

匹配后的信号为:

$$S(t, f_a') = \exp\left(-j4\pi r_p \sqrt{\left(\left(\frac{f_c + \gamma t}{c} - \frac{2rR_{\text{ref}}}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{f_a'}{2v}\right)^2\right)}\right) \times \exp\left(-j\frac{2\pi f_a'}{v} x_p\right) \quad (31)$$

$$\text{令 } A(f_a') = \sqrt{\left(\left(\frac{f_c + \gamma t}{c} - \frac{2rR_{\text{ref}}}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{f_a'}{2v}\right)^2\right)}, \text{ 对 } A(f_a')$$

在  $f_a' = 0$  处的泰勒级数展开近似为:

$$A(f_a') = A(0) + A'(0) f_a' = \frac{f_c + \gamma t}{c} - \frac{2\gamma R_{\text{ref}}}{c^2} \quad (32)$$

因此公式(31)可以近似为:

$$S(t, f_a') \approx \exp\left(-j4\pi r_p \left(\frac{f_c + \gamma t}{c} - \frac{2\gamma R_{\text{ref}}}{c^2}\right)\right) \times \exp\left(-j\frac{2\pi f_a'}{v} x_p\right) \quad (33)$$

将压缩后的信号作方位向逆傅里叶变换和距离向傅里叶变换即可, 最后得到高分辨率宽测绘带 SAL 图像为:

$$S(f_r, t_m) = \text{Asinc}\left\{\pi T_p \left(f_r + \frac{2\gamma r_p}{c}\right)\right\} \times \text{sinc}\left\{B_a' \left(t_m - \frac{x_p}{v}\right)\right\} \times \exp\left(j\frac{4\pi}{c} \gamma \left(\frac{f_c}{\gamma} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) r_p\right) \quad (34)$$

式中:  $A$  为包络;  $f_r$  为距离向频率,  $f_r \in \left[-\frac{f_s}{2}, \frac{f_s}{2}\right]$ ;  $f_s$  为采样频率;  $T_p$  为脉宽;  $B_a$  为多普勒带宽。

## 3 仿真结果与分析

选择地面上的九个点目标进行仿真。仿真基本参数如表 1 所示。

表 1 主要仿真参数

Tab.1 Main parameters of the simulation

Item	Value
Wavelength/nm	1550
Lens aperture/m	0.2
Center line distance/m	5000
Band width/GHz	100
PRF/kHz	10
Velocity/m · s <sup>-1</sup>	35
Pulse width/ms	0.01
Sampling frequency/MHz	10
Transmit/receive unit number	3
Azimuth beam width/mrad	0.18
T/R unit aperture/mm	0.01

如果要实现方位向 1.5 mm 分辨率的 SAL 图像, 要求最小的脉冲重复频率为:

$$\frac{v}{\rho_a} = 23.3 \text{ kHz} \quad (35)$$

而实际发射信号的 PRF 为 10 kHz, 采用将三个收发单元的数据相干合成一个全分辨率 SAL 图像。

图 4 为单发单收 SAL 体制成像结果, 横坐标为方位单元, 纵坐标为距离单元。图 5 为位于中心作用距离线上的三点(5 000, -0.1), (5 000, 0), (5 000, 0.1) 在单发单收 SAL 体制的归一化方位脉压剖面图, 横坐标为方位向距离, 单位为米(m), 纵坐标为归一化幅度, 单位为分贝(dB)。图 6 为方位向三发三收 SAL 体制成像结果, 横坐标为方位单元, 纵坐标为距离单元。图 7 为位于中心作用距离线上的三点(5 000, -0.1), (5000, 0), (5 000, 0.1) 在方位向三发三收 SAL 体制的归一化方位脉压剖面图, 横坐标为方位向距离, 单位为米(m), 纵坐标为归一化幅度, 单位为分贝(dB)。图 8(a)为单个目标(5 000, 0)的归一化距离向脉压剖面图, 横坐标为距离向距离, 单位为米(m), 纵坐标为归一化幅度, 单位为分贝(dB)。图 8(b)为单个目标(5 000, 0)的归一化方位向脉压剖面图, 横坐标

为方位向距离,单位为米(m),纵坐标为归一化幅度,单位为分贝(dB)。

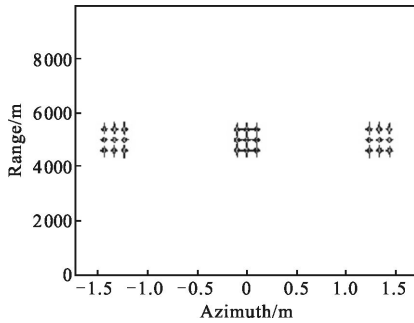


图 4 单发单收 SAL 系统成像结果

Fig.4 Imaging result of Single-Transmitter-Single-Receiver SAL system

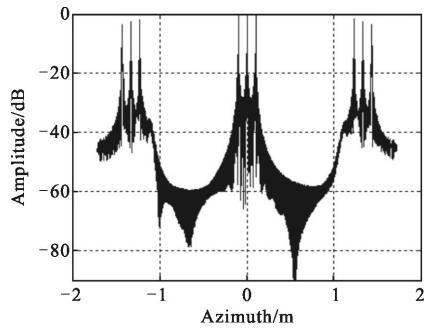


图 5 单发单收 SAL 系统的方位脉压剖面图

Fig.5 Azimuth pulse compression of the Single-Transmitter-Single-Receiver SAL system

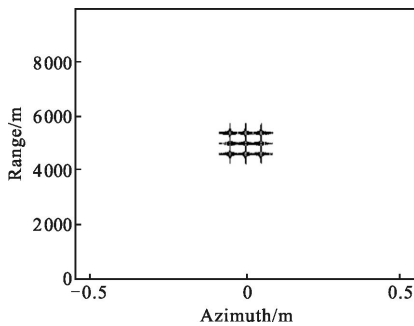


图 6 三发三收 SAL 系统成像结果

Fig.6 Imaging result of Three-Transmitter-Three-Receiver SAL system

单发单收 SAL 体制的脉冲重复频率 PRF 约为多普勒带宽的三分之一,方位向多普勒重叠三次,从图 4 和图 5 可以看出,多普勒模糊在二维成像图中表现为将一个目标点分散成三个点,除了在这个方位位置出现目标,还会在这个方位位置的左右两侧各出现一个虚假目标。方位向多发多收 SAL 体

制利用方位向上的三个收发单元的回波数据合成大带宽无模糊数据成像,可消除多普勒模糊,通过图 6 和图 7 可以清楚地看出频带合成后的图像,只在正确的方位位置出现目标点,虚假目标已经被消除。

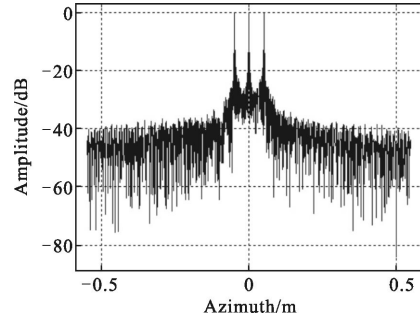


图 7 三发三收 SAL 系统的方位脉压剖面图

Fig.7 Azimuth pulse compression of Three-Transmitter-Three-Receiver SAL system

选取九点中的中间点目标分析单个目标图像方位分辨率和压缩效果。三发三收 SAL 体制利用方位向上的三个收发单元将方位向波束宽度扩大了三倍,通过频带合成获得大带宽无模糊数据,方位向分辨率提高约三倍。通过图 8(a)和图 8(b)可以看到距离向脉压和方位向脉压的峰值旁瓣比分别为-13.74 dB 和-13.24 dB,距离压缩和方位压缩效果良好。单发单收 SAL 系统的方位向分辨率为  $\rho_{az} = \frac{v}{PRF} = 0.0035 \text{ m}$ ,经过三发三收 SAL 体制解模糊和频带合成后得到的方位向分辨率约为  $\rho_{az} = 0.0012 \text{ m}$ ,比单发单收 SAL 系统提高了约 3 倍。

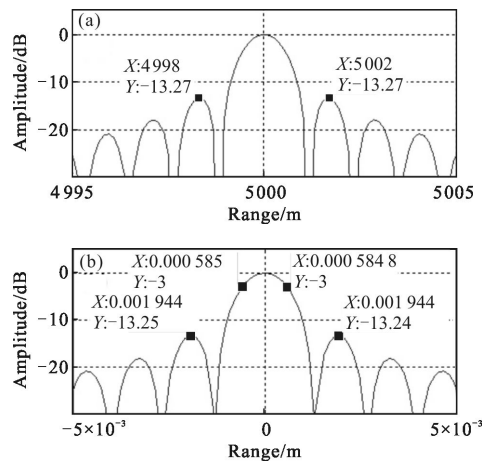


图 8 单个目标方位脉压和距离脉压剖面图

Fig.8 Azimuth pulse compression and range pulse compression of one target point

## 4 结 论

针对单发单收 SAL 体制在高分辨率成像时方位向高分辨率和距离向宽测绘带宽的矛盾,文中提出一种多发多收 SAL 工作体制,通过三发三收 SAL 体制验证了多发多收 SAL 工作体制和信号处理方法的可行性。为了保证获得大测绘带宽,系统选择低脉冲重复频率造成多普勒模糊,在信号处理中必须解多普勒模糊。文中给出的多发多收 SAL 体制可以有效地对回波信号解模糊并合成一个大带宽无模糊信号用于高分辨率成像。

采用多发多收方式实现高分辨率宽测绘带成像时,与单发单收回波信号不同,多发多收 SAL 体制最终需要将多发多收的信号相干合成为一个单发单收 SAL 的信号,多发多收的误差补偿成为影响相干合成的关键因素。误差主要有两种,一种是多通道系统的幅度相位误差,一种是载机的非理想运动引起的误差。文中基于理想情况,在研究方位向多发多收 SAL 体制时没有将误差考虑进去,因此,在下一步研究中需要研究多发多收 SAL 的误差补偿技术,包括多发多收幅度相位误差校正技术和多发多收运动补偿技术。

同时,多发多收体制在方位向用空间换时间,通过增加收发单元,降低方位向采样频率,在提高了分辨率和幅宽的同时,也增加了  $N$  倍的硬件成本。在后续研究中,笔者将会进一步研究采用硬件复用等方式缓解系统体积、质量方面的压力,优化系统设计。

### 参考文献:

- [1] Kyle T G. High resolution laser imaging system[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(13): 2651–2656.
- [2] Green T J, Marcus S, Colella B D. Synthetic aperture radar imaging with a solid-state laser[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(30): 6941–6949.
- [3] Stappaerts E A, Scharleman E T. Differential synthetic aperture radar[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(18): 2385–2388.
- [4] Yoshikado S, Aruga T. Short-range verification experiment of a trial one-dimensional synthetic aperture infrared laser radar operated in the 10 $\mu$ m Band [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(9): 1421–1425.
- [5] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, et al. Two-dimensional synthetic-aperture imaging in the optical domain [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(22): 1983–1985.
- [6] Steven M Beck, Joseph R Buck, Walter F Buell, et al. Synthetic aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7621–7629.
- [7] Stephen Crouch, Zeb W Barber. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture radar techniques[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24237–24246.
- [8] Guo Liang, Xing Mengdao, Tang Yu, et al. Research on indoor experimentation of range SAL imaging system [J]. *Science China*, 2009, 39(10): 1678–1684. (in Chinese)
- [9] Tang Yu, Guo Liang, Xing Mengdao, et al. High resolution range profile of synthetic aperture imaging lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 448–452. (in Chinese)
- [10] Guo Liang, Ma Yujie, Xing Mengdao, et al. Rotating objects imaging of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 637–641. (in Chinese)
- [11] 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): 1183–1190. (in Chinese)
- [12] Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (I): Defocused and phase-biased telescope for reception antenna [J]. *Acta Optical Sinica*, 2008, 28(5): 997–1000. (in Chinese)
- [13] Liu Liren. Synthetic-aperture radar (II): Spatial phase telescope for transmitting antenna [J]. *Acta Optical Sinica*, 2008, 28(6): 1997–2000. (in Chinese)
- [14] Liu Liren. Synthetic-aperture radar (III): Circulated duplex telescope[J]. *Acta Optical Sinica*, 2008, 28(7): 1405–1410. (in Chinese)
- [15] Liu Liren. Synthetic-aperture radar (IV): Unified operation mode and two-dimensional data collection equation [J]. *Acta Optical Sinica*, 2008, 29(1): 1–6. (in Chinese)
- [16] Wei Qing. Study of imaging methods of SAR and jamming methods against SAR [D]. Xi'an: Xidian University, 2006. (in Chinese)