

文章编号: 0253-2239(2009)07-2011-07

# 合成孔径激光雷达非线性啾啾克服的匹配滤波算法

鲁 伟 许 楠 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

**摘要** 合成孔径激光成像雷达发射的信号一般为线性啾啾激光信号,然而激光器的实际扫频特性会产生二次及高次等非线性项。非线性项的存在会造成相位误差,导致距离向成像聚焦模糊,降低距离向成像分辨率,因此必须对光源的非线性啾啾进行补偿。因此提出非匹配参考通道匹配滤波算法对非线性啾啾相位误差进行克服。仿真结果显示,距离向图像可以得到较好压缩。同时,还分析了参考通道长度及非线性贡献比例等不同参数环境下的距离向压缩效果。

**关键词** 合成孔径激光成像雷达;非线性啾啾信号;距离向压缩;相位二次项;匹配滤波

**中图分类号** TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.2011

## Algorithm of Matched Filtering Overcoming Nonlinear Chirp Effect in Synthetic Aperture Ladar

Lu Wei Xu Nan Liu Liren

(Laboratory of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** Linear chirp laser signal is often employed as the transmitted signal of synthetic aperture laser (SAL) radar. However, actual frequency sweep properties of fiber laser always produces nonlinear terms such as quadratic and higher order terms. Existence of nonlinear terms produces phase errors during pulse time, leading to blurring of target in range direction and further reduces imaging resolution of range direction. It makes compensation of the nonlinear chirp from laser source. An algorithm of matched filtering in frequency spectrum to overcome the phase error from nonlinear chirp is developed. The results of simulation show that the image in range direction can be well compressed. At the same time, effects of signal compression in the range direction under different parameter situations, such as reference channel length as well as ratio of nonlinear contribution, are analyzed.

**Key words** synthetic aperture laser imaging radar; nonlinear chirp signal; range compression; quadratic term of phase; matched filtering

### 1 引 言

合成孔径激光雷达(SAL)是合成孔径雷达(SAR)在光学波段的应用,它以激光器为辐射源,由于其工作频率远高于微波,因此能够提供比 SAR 更高的成像分辨率。人们对激光合成孔径成像的研究适于 20 世纪 60 年代,近年来,激光器技术、光电探测技术和信息处理技术的变革使得合成孔径激光成像雷达得到迅速发展<sup>[1~3]</sup>。

合成孔径激光成像雷达一般采用线性调频的啾啾信号,激光载频在脉冲时间宽度内呈线性变化。

光源啾啾产生的原因主要是由于激光器内动态电信号调制的影响导致光源脉冲信号的相位产生动态变化,直接体现为光信号频率随时间的动态变化,这种变化可以是线性的,也可以是非线性的。然而,实际的激光器并不能实现完全的线性调频。首先,由于啾啾激光器一般为波长线性扫描型,并非直接对频率进行线性扫描<sup>[1]</sup>;其次,激光器在波长扫描时并不能保证做到完全的线性,在不同扫描速率下和使用环境中波长的线性度会有所不同,其变化范围一般在百分之几到百分之几十之间,后者因素会引起比

收稿日期: 2008-10-08; 收到修改稿日期: 2008-11-13

作者简介: 鲁 伟(1980—),男,助理研究员,主要从事大气激光传输以及激光雷达成像算法等方面的研究。

E-mail: lzc229@gmail.com

前者更大的频率非线性。在合成孔径激光雷达的成像算法中,信号啾啾中如果存在较大的频率非线性项,会导致差频信号中产生相位误差,进而导致距离向成像聚焦模糊,降低成像分辨率。因此,必须通过一定的算法对光源的非线性啾啾进行补偿,从而保证雷达的成像质量,实现图像的高分辨率。

目前,针对光源非线性啾啾影响的克服主要分为匹配通道和非匹配通道两种方案。在 Naval Research Laboratory 的匹配通道时域处理算法中,提出了非线性啾啾的问题,其解决办法是通过建立长度与目标通道完全相同的参考通道,由两通道外出电信号相乘实现相位相减,从而克服非线性啾啾在时间相位上的累加对成像的影响<sup>[1]</sup>。Aerospace 公司则提出了使用非匹配通道的处理算法克服啾啾非线性<sup>[2]</sup>,以提高距离向分辨率。实验方案中的目标通道长度远小于参考通道长度,将参考通道差频信号进行相位移相处理后再与目标通道的差频信号频谱进行匹配滤波,从而实现对光源非线性啾啾的影响进行补偿。同匹配通道方案比较,非匹配通道方案设计灵活,更适用于外场的实际应用,但对于如何利用频域相移计算对目标通道误差进行补偿这一核心算法则未见报道。

本文基于对合成孔径激光成像雷达的研究分析<sup>[4~7]</sup>,提出合成孔径激光成像雷达光源非线性啾

啾相位误差的参考通道匹配滤波克服算法。该算法的信号处理核心在于,啾啾信号的非线性高次项在参考通道和目标通道的信号频谱中分别产生具有共轭性质的相位二次项,它们经卷积计算后的结果为  $\delta$  函数,从而将非线性项的影响消除,实现距离向图像在频谱内的匹配滤波。模拟仿真结果显示,距离向图像可以得到一定效果的压缩。

## 2 算法描述

采用参考通道匹配滤波法来克服非线性啾啾产生的相位误差。具体做法是在目标通道之外再设置一个参考通道,本机振荡光源发射的激光信号通过分光计分别进入参考通道和目标通道,由于需要在各个通道内进行外差接收,因此光源信号将被分为参考信号、参考-本振信号、目标回波信号及目标-本振信号,如图 1 所示。在参考通道中,参考信号与参考-本振信号进行通道内的外差接收,对差频信号进行相位解包络,将差频信号的相位差作离散傅里叶变换,得到该信号的相位谱。利用参考通道的相移公式对该相位谱进行频域的相移处理后,得到与目标通道差频信号相位谱近似相同的相位谱。再对移相相位谱作离散反傅里叶变换,得到移相后的相位,对其进行相位包络化,得到参考通道移相处理的时域信号,再进行离散傅里叶变化得到参考通道的信号频谱。

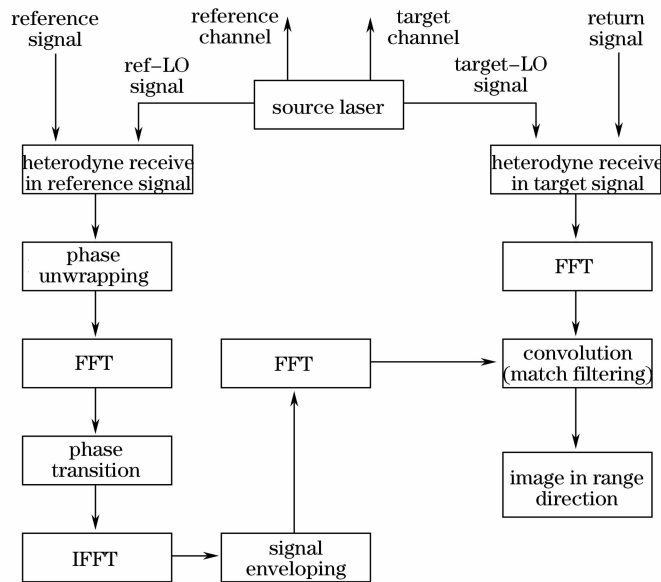


图 1 非线性啾啾相位误差补偿算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm compensating nonlinear chirp phase error

在目标通道中,目标回波信号与目标-本振信号进行通道内的外差接收。对外差信号进行离散傅里

叶变化,即得到目标通道的信号频谱。两个通道所得到的信号频谱中均含有光源啾啾信号非线性高次

项的影响,在频域内具体表现为相位的指数二次项。我们在参考通道中对移相相位进行包络化时将信号设计为与目标通道信号相反的负频信号,因此根据构成共轭对的两个指数项的卷积得到脉冲函数的性质,可在频域内对两个通道的频谱信号进行卷积计算,从而有效克服激光信号非线性啁啾在两个通道中的相位二次项的影响,该运算处理称为匹配滤波。

### 3 参考通道匹配滤波克服算法的数学建模

激光器发射的光脉冲信号表示为

$$i(t) = A \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos \varphi(t), \quad (1)$$

式中  $T$  为激光光源的脉冲宽度,  $A$  为信号幅值, 为方便计, 取单位振幅。在接收端, 参考通道中的本振激光延迟为  $\tau_{rLo}$ , 参考光路的延迟为  $\tau_r$ 。

对于参考通道, 接收的差频信号为

$$i_r(t) = \operatorname{rect}\left(\frac{t - \Delta\tau_r}{T_r}\right) \cos[\zeta_r(t)], \quad (2)$$

其中  $T_r = T - (\tau_r - \tau_{rLo})$  为差频信号的脉冲宽度,  $\Delta\tau_r = (\tau_r + \tau_{rLo})/2$  为差频脉冲的中心位移。 $i_r(t)$  进行相位解包络, 得到差频信号的时间相位  $\zeta_r(t)$

$$\begin{aligned} \zeta_r(t) &= \varphi(t - \tau_r) - \varphi(t - \tau_{rLo}), \\ &- \frac{T}{2} + \tau_r \leq t \leq -\frac{T}{2} + \tau_{rLo} \end{aligned} \quad (3)$$

$\zeta_r(t)$  可以用 Taylor 级数的形式展开, 这里取到时间的三次项, 即

$$\begin{aligned} \zeta_r(t) &= \varphi_r(\tau_{rLo} - \tau_r) + \varphi'_r(\tau_{rLo} - \tau_r)t + \\ &\varphi''_r(\tau_{rLo} - \tau_r)t^2 + \varphi'''_r(\tau_{rLo} - \tau_r)t^3. \end{aligned} \quad (4)$$

根据傅里叶变换理论, 将  $\zeta_r(t)$  表示为离散傅里叶变换的形式:

$$\zeta_r(t_n) = \sum_m \hat{\zeta}_m \exp(i2\pi m t_n / N), \quad (5)$$

式中  $m$  为离散相位的序号,  $N$  为离散相位的总数,  $t_n$  为离散时间, 时间的离散化通过采样率为  $f_s$  的模数转换器实现,  $\hat{\zeta}_m$  为  $\zeta_r(t)$  进行离散傅里叶变换的傅里叶系数。同理, 将未知的目标通道差频信号相位  $\xi_k(t_n)$  也可表示为

$$\xi_k(t_n) = \sum_m \hat{\xi}_{k,m} \exp(i2\pi m t_n / N), \quad (6)$$

式中  $\hat{\xi}_{k,m}$  为  $\xi_k(t_n)$  进行离散傅里叶变换的傅里叶系数。

根据相移计算原理, 目标通道差频信号相位  $\xi_k(t_n)$  的傅里叶系数  $\hat{\xi}_m$  可用参考通道差频信号相位  $\zeta_r(t)$  的傅里叶系数  $\hat{\zeta}_m$  表示<sup>[2]</sup>:

$$\hat{\xi}_m = \frac{\exp[-i\pi m(\tau_{zLo} + \tau_z)\Delta f] \sin[\pi m(\tau_{zLo} - \tau_z)\Delta f]}{\exp[-i\pi m(\tau_{rLo} + \tau_r)\Delta f] \sin[\pi m(\tau_{rLo} - \tau_r)\Delta f]} \hat{\zeta}_m, \quad (7)$$

式中  $\Delta f$  为采样频率间隔。上式为参考通道的相移计算公式, 它是从参考通道确定目标通道相位误差的计算基础, 通过该公式可以使参考通道的相位频谱变换为和目标通道相位频谱相同的相位频谱。将相移计算后的相位频谱做逆傅里叶变换得到参考通道新的差频信号相位:

$$\begin{aligned} \zeta_{zz}(t_n) &= \varphi_{zz}(\tau_z - \tau_{zLo}) + \varphi'_{zz}(\tau_z - \tau_{zLo})t_n + \varphi''_{zz}(\tau_z - \tau_{zLo})t_n^2 + \varphi'''_{zz}(\tau_z - \tau_{zLo})t_n^3 + \dots \\ &- T/2 + \tau_z \leq t_n \leq -T/2 + \tau_{zLo} \end{aligned} \quad (8)$$

对相移后的时间相位进行信号包络化, 相当于在参考通道产生新的时域信号

$$i_{zz}(t_n) = \operatorname{rect}[(t_n - \Delta\tau_{zz})/T_{zz}] \exp[-j\zeta_{zz}(t_n)], \quad (9)$$

式中  $T_{zz} = T - (\tau_z - \tau_{zLo})$  为相移处理后差频信号的脉冲宽度,  $\Delta\tau_{zz} = (\tau_z + \tau_{zLo})/2$  为相移后差频脉冲的中心位移。对新的信号作快速傅里叶变换得到信号频谱

$$\begin{aligned} I_{zz}(f) &= \left\{ \delta[f + f_{zz}(K)] \right\} \otimes [\operatorname{sinc}(T_{zz}f) \exp(-j2\pi\Delta\tau_{zz}f)] \otimes \exp\left[j\frac{\pi f^2}{\zeta''_{zz}(\tau_z - \tau_{zLo})}\right] \otimes F_{zz}^{*(H)}(f) \times \\ &\exp[-j\zeta_{zz}(0)], \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $f_{zz}(K) = \zeta'_{zz}(\tau_z - \tau_{zLo})/(2\pi K)$  为相移后信号的载频,  $K$  为人为设定的载频移位比例因子,  $\pi f^2/[\zeta''_{zz}(\tau_z - \tau_{zLo})]$  为非线性啁啾在频谱域内的相位二次项, 它也是模拟计算中要克服掉的项,  $F_{zz}^{*(H)}(f)$  表示非线性啁啾频谱域相位高阶项之和。

在目标通道中, 假定本机振荡激光的延迟为  $\tau_{zLo}$ ,

目标上第  $k$  个目标散射点的位置在  $(s_{x,k}, s_{y,k}, z_k)$ , 从其返回的光路时间延迟为  $\tau_{z,k}$ , 而相位二次项历程的等效焦距为  $F_{z,k}$ , 则目标通道光学外差接收机输出的差频信号为

$$i_s(t) = \sum_k \operatorname{rect}\left(\frac{t - \Delta\tau_{s,k}}{T_{s,k}}\right) \cos[\hat{\xi}_{s,k}(t)], \quad (11)$$

式中  $T_{z,k} = T - (\tau_{z,k} - \tau_{zLo})$  为差频信号的脉冲宽度,  $\Delta\tau_{s,k} = (\tau_{z,k} + \tau_{zLo})/2$  为差频脉冲的中心位移。该差频信号的时间相位  $\xi_{s,k}(t)$  为

$$\xi_{s,k}(t) = \varphi(t - \tau_{z,k}) - \varphi(t - \tau_{zLo}) + \varphi_{q,k}, \quad (12)$$

其中相位的二次项历程  $\varphi_{q,k}$  为

$$\varphi_{q,k} = \exp\left(j\pi \frac{s_{x,k}^2 + s_{y,k}^2}{F_{z,k}}\right), \quad (13)$$

该差频信号的离散时间相位表示为 Taylor 级数的

形式,即

$$\xi_{s,k}(t_n) = \xi_{z,k}(0) + \xi'_{z,k}(\tau_{zLo} - \tau_z)t_n + \xi''_{z,k}(\tau_{zLo} - \tau_z)t_n^2 + \xi'''_{z,k}(\tau_{zLo} - \tau_z)t_n^3 + \varphi_{q,k}. \quad (14)$$

对接收端接收到的从多个目标点返回的采样信号  $\sum_k i_{s,k}(t_n)$  进行快速傅里叶变换后得到 ( $f \geq 0$ ) 频率域表达的复数非聚焦像,结果的解析表达式可写为

$$\sum_k I_k(f) = \sum_k \left\{ [\delta(f - f_{z,k})] \otimes [\text{sinc}(T_{z,k}f) \exp(-j2\pi\Delta\tau_{z,k}f)] \otimes \exp\left[-j \frac{\pi f^2}{\xi''_{z,k}(\tau_{z,k} - \tau_{zLo})}\right] \otimes F_{z,k}^{(H)}(f) \right\} \times \exp\{-j[\zeta_{z,k}(0) + \varphi_{q,k}]\}, \quad (15)$$

式中  $f_{z,k} = \xi'_{z,k}(\tau_{z,k} - \tau_{zLo})/(2\pi)$  为第  $k$  个目标散射点的载频,  $-\pi f^2/[\xi''_{z,k}(\tau_{z,k} - \tau_{zLo})]$  为非线性啁啾在频谱域的相位二次项,  $F_{z,k}^{(H)}(f)$  表示非线性啁啾频谱域相位高阶项之和。

将两个通道的频谱信号输入卷积运算器,产生  $\sum_k I_k(f)$  和  $I_{zz}(f)$  的卷积结果,即匹配滤波后为聚焦像,其理想的解析结果可表示为

$$\sum_k U_k(f) = \sum_k U_k \{ \delta\{f - [f_{z,k} - f_{zz}(K)]\} \otimes [\text{sinc}(T_{z,k}f) \exp(-j2\pi\Delta\tau_{z,k}f)] \otimes [\text{sinc}(T_{zz}f) \exp(-j2\pi\Delta\tau_{zz}f)] \otimes \exp\left[-j \frac{\pi f^2}{\xi''_{z,k}(\tau_{z,k} - \tau_{zLo})}\right] \otimes \exp\left[j \frac{\pi f^2}{\zeta''_{zz}(\tau_z - \tau_{zLo})}\right] \otimes F_{z,k}^{(H)}(f) \otimes F_{zz}^{*(H)}(f) \} \exp\{j[\xi_{s,k}(0) - \zeta_{zz}(0) + \varphi_{q,k}]\}, \quad (16)$$

注意到,当  $\xi''_{z,k}(\tau_{z,k} - \tau_{zLo})$  趋近于  $\zeta''_{zz}(\tau_z - \tau_{zLo})$  时,有

$$\exp\left[-j \frac{\pi f^2}{\xi''_{z,k}(\tau_{z,k} - \tau_{zLo})}\right] \otimes \exp\left[j \frac{\pi f^2}{\zeta''_{zz}(\tau_z - \tau_{zLo})}\right] \rightarrow \delta(f), \quad (17)$$

理想的解析结果表示为

$$\sum_k U_k(f) = \sum_k U_k \{ \delta\{f - [f_{z,k} - f_{zz}(K)]\} \otimes [\text{sinc}(T_{z,k}f) \exp(-j2\pi\Delta\tau_{z,k}f)] \otimes [\text{sinc}(T_{zz}f) \exp(-j2\pi\Delta\tau_{zz}f)] \otimes F_{z,k}^{(H)}(f) \otimes F_{zz}^{*(H)}(f) \} \exp\{j[\xi_{s,k}(0) - \zeta_{zz}(0) + \varphi_{q,k}]\}, \quad (18)$$

式中  $[\text{sinc}(T_{z,k}f) \exp(-j2\pi\Delta\tau_{z,k}f)] \otimes [\text{sinc}(T_{zz}f) \exp(-j2\pi\Delta\tau_{zz}f)]$  为激光脉冲宽度决定的距离方向与传递函数相当的理想图像分辨率,  $F_{z,k}^{(H)}(f) \otimes F_{zz}^{*(H)}(f)$  为残留非线性啁啾影响卷积因子,  $\xi_{s,k}(0) - \zeta_{zz}(0)$  为啁啾产生的固定相位,  $\varphi_{q,k}$  为二次项相位历程。

## 4 系统设计与仿真结果

### 4.1 系统参数设计

星载雷达系统采用条带扫描式合成孔径激光成像雷达,图2为系统的基本模型示意图。卫星平台高度即激光雷达终端运动形成合成孔径的中心与被测物面的中心点距离为 400 km,被测倾斜平面的倾斜角  $\varphi$  为  $45^\circ$ ,则作用距离  $Z_0$  为 560 km,激光脉冲往返的渡越时间约为 3.73 ms。光学天线接收和发射口径  $d$  为 190 mm,激光光源的工作波长为  $1.55 \mu\text{m}$ ,视场为  $20 \mu\text{rad}$ ,照射在目标处的光学足趾直径约为 11.2 m。卫星平台飞行速度为 7.2 km/s,光斑扫描时间为 1.56 ms。系统要求方位向和距离向的成像分辨率  $\Delta\alpha$  和  $\Delta Y$  均为 10 cm,因此在方位向上合成孔径内的

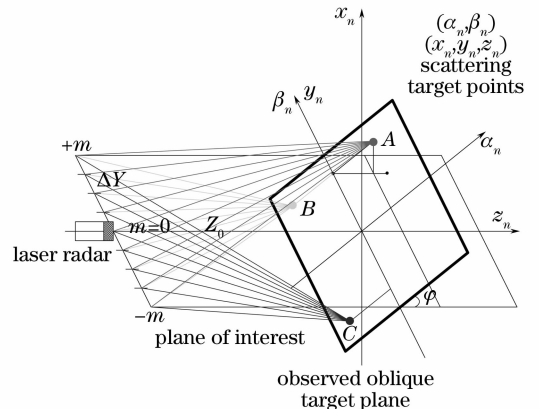


图2 条带扫描式合成孔径激光成像雷达工作示意图

Fig. 2 Sketch of strip map scan mode SAL system

二次项采样数  $M$  至少为 112 次, 计算中近似取 100 次, 发射激光脉冲周期  $T$  约为  $15.6 \mu\text{s}$ , 假设脉冲占空比为 1:1, 则脉冲宽度  $\Delta T$  为  $7.8 \mu\text{s}$ . 根据距离向分辨率与带宽的关系, 啁啾带宽  $B$  为  $4.24 \text{ GHz}$ , 啁啾率  $f$  为  $5.44 \times 10^{14} \text{ Hz/s}$ .

对于星载合成孔径激光雷达, 由于工作距离通常为几百千米, 激光脉冲从发射到返回接收终端所经历的时间远远大于参考通道单个脉冲的飞行时间, 因此在参考通道与目标通道回波脉冲进行外差混频的脉冲已不再是最初时刻与目标通道脉冲同时发射出的激光脉冲, 而是该脉冲发射后的第  $n+1$  个脉冲. 为简化计算, 在模拟计算中将之前的  $n$  个脉冲忽略, 从而将几百千米的工作距离等效为几十米, 简化了数据计算的复杂程度. 模拟计算选取倾斜物面上的 3 个点为仿真计算对象, 它们在倾斜物面坐标系中的坐标分别为  $A(5, 5)$ 、 $B(-5, 5)$  和  $C(-5, -5)$ . 经过计算, 三个目标点的等效工作距离分别为  $26.9355 \text{ m}$ 、 $19.8645 \text{ m}$  和  $19.8645 \text{ m}$ .

激光啁啾信号频率的不稳定导致时间相位中存在二次项和三次项等非线性高阶项. 由于在实验中对激光光源频率啁啾的高阶项无法给出确定性的判断, 因此在模拟计算中需要对这些高阶项的贡献进行模拟估算. 根据 Naval Research Laboratory 的报道<sup>[1]</sup>, 波长扫描线性度在 1% 附近, 因此仿真计算中取二次项为线性项贡献的  $1/R_1$ 、三次项为二次项贡献的  $1/R_2$ , 这里取  $R_1 = R_2 = 50$ , 即  $f''$  为  $5.58 \times 10^{18} \text{ Hz/s}^2$ ,  $f'''$  为  $8.58 \times 10^{22} \text{ Hz/s}^3$ .

### 4.2 仿真结果

实际的工作中终端接收到时域信号, 而通过对非线性啁啾影响进行克服则是针对参考通道差频信号的相位进行的, 因此在仿真时需要先模拟输入初始相位, 如图 3 所示.

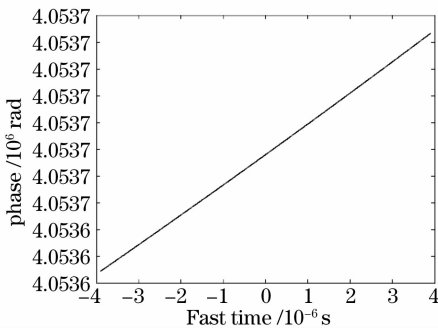


图 3 仿真模拟的参考通道外差信号的初始输入相位  
Fig. 3 Simulated input phase of heterodyne signal in reference channel

图 4 和图 5 分别给出参考通道针对三个目标点的相移后的相位和参考通道移相后信号的频谱幅值.

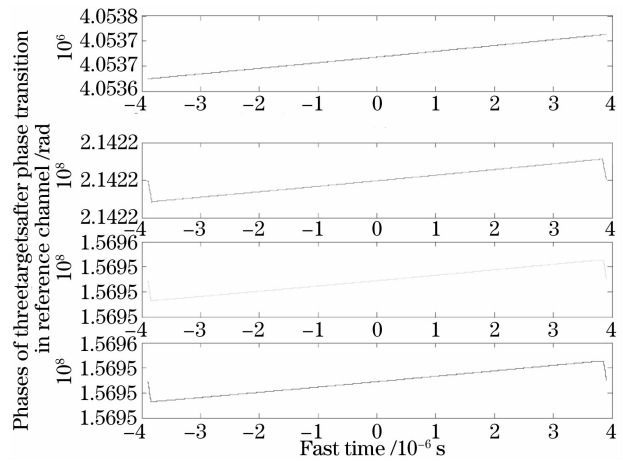


图 4 3 个目标点移相后的相位  
Fig. 4 Phases of three targets after phase transition in reference channel

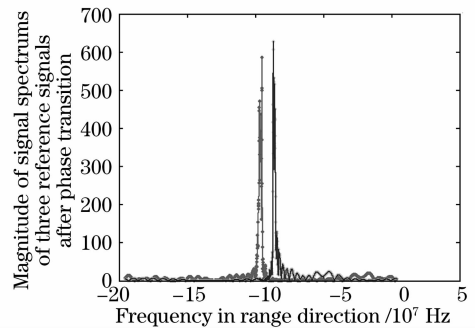


图 5 参考通道信号相移后的信号频谱幅值  
Fig. 5 Magnitudes of signal spectrums of three reference signals after phase transition process

图 6 给出目标通道 3 个点差频信号的频谱幅值. 图 7 的俯视角度可以看出, 目标点  $B$  和  $C$  由于距离向光程相同, 因此二者的频谱重合在一条线上. 由于本文仅分析距离向的图像压缩, 因此对于同时存在的方位向目标模糊, 则是在雷达依次对目标被

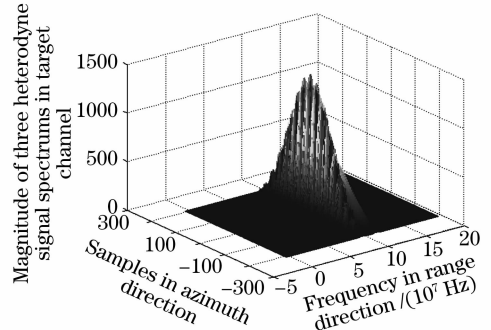


图 6 目标通道 3 个点差频信号的频谱幅值  
Fig. 6 Magnitudes of three heterodyne signal spectrums in target channel

测物面发射脉冲激光扫描后,采用二次项匹配滤波的理想算法进行方位向压缩,从而恢复出被测物面的方位向空间图像。将两个通道的频谱信号进行卷积后即得到距离向压缩后的图像,如图 8 所示。

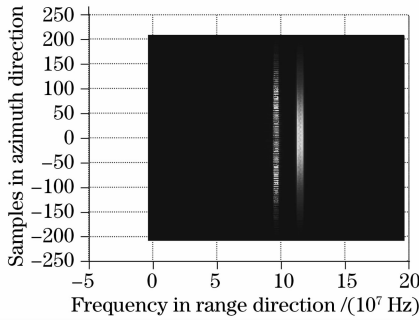


图 7 目标通道三个点差频信号的频谱幅值(俯视图)  
Fig. 7 Magnitudes of three heterodyne signal spectrums in target channel (planform)

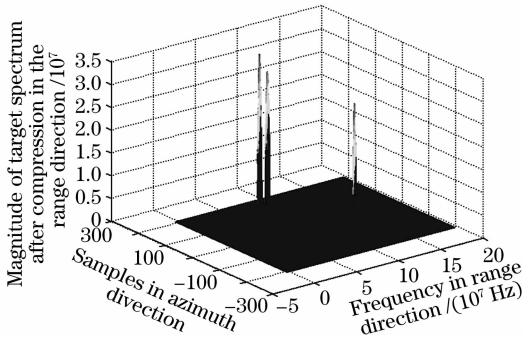


图 8 距离向压缩后的信号频谱幅值  
Fig. 8 Magnitude of target spectrum after compression in the range direction

### 5 分析与讨论

表 1 给出了 A,B,C 三个目标点差频信号频谱距离向压缩前后的效果比较,可以看出 B(-5,5)和 C(-5,-5)在距离向上的光程相同,因此二者具有

表 2 参考光路  $d_r$  和参考本振光路  $d_{rlo}$  取不同值时的信号压缩比(以 A 点为例)

Table 2 Ratio of compression for different lengths of reference optical path and reference-local optical path

$d_r/m$ $d_{rlo}/m$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
0.5	×	4	1.76	3.667	4.4	3.667	4	2.316	×	×	×	×	×	×	×
0.6	×	×	4	1.76	3.667	4.4	3.667	4	2.316	×	×	×	×	×	×
0.7	×	×	×	4	1.76	3.667	4.4	3.667	4	2.316	×	×	×	×	×
0.8	×	×	×	×	4	1.76	3.667	4.4	3.667	4	2.316	×	×	×	×
0.9	×	×	×	×	×	4	1.76	3.667	4.4	3.667	4	2.316	×	×	×
1.0	×	×	×	×	×	×	4	1.76	3.667	4.4	3.667	4	2.316	×	×
1.1	×	×	×	×	×	×	×	4	1.76	3.667	4.4	3.667	4	2.316	×

定义参考光路长度  $d_r$  与参考-本振光路长度  $d_{rlo}$  的比值为参考通道光程比,从表 2 中可以看出,

同样的压缩效果,可以看出相位二次项共轭卷积计算的算法可以使得距离向上的各个目标点同时得到压缩。对光斑足趾区域内多个目标点的信号频谱距离向压缩效果进行计算,发现各点的压缩比值分布在一定的区间内,且无明显的变化规律,这种无规分布应是由于进行移相处理时计算精度不足所产生的误差以及在计算频谱宽度时计算精度的不足导致。

表 1 A,B,C 三个目标点差频信号频谱距离向压缩前后的效果比较

Table 1 Compression effects of range direction signal heterodyne spectrum from three target points

	A(5,5)	B(-5,5)	C(-5,-5)
Spectral width before compression /MHz	4.2846	3.1	3.1
Spectral width after compression /MHz	1.1685	1.558	1.558
Ratio of compression	3.667	1.9375	1.9375

同理,方位向的压缩算法也采用和距离向压缩相同的二次项共轭对处理算法,从图 7 中也可以看出,这种算法可以使频谱图像重合在一条线上的各目标点同时得到压缩,从而使图像还原各个分离的目标点。

从数学分析中可知,对距离向进行成功压缩的计算关键在于参考通道差频信号相位谱的移相处理,该移相公式的移相因子中主要涉及目标延迟、目标-本振延迟、参考延迟及参考-本振延迟等四个时间参量,其中目标通道的两个时间参量中目标本振光路时间延迟是可变化的量,但由于其变化相对于真实的目标光路的时间延迟而言可忽略不计。因此改变参考光路和参考-本振光路的两个时间延迟,分析二者变化对频谱信号压缩的影响,表 2 给出相关计算结果。

该比值设置为 1~2 之间时,信号可以得到较为合理的压缩处理,如  $d_{rlo}=0.5\text{ m}$ ,  $d_r=0.6\sim 1.2\text{ m}$  之间

时可以得到合理的压缩比。主要原因是,当比值小于 1,即  $d_r < d_{rLo}$ ,得到的参考通道相位累积为线性递减,这违背计算的物理考虑;当比值大于 2 时,两个光程之间的差将在移相公式引入误差,导致参考通道的移相信号频谱杂乱无章。随着  $d_{rLo}$  长度的增加,该比值的上限回落到小于 2 的范围,如  $d_{rLo}$  为 1.1 m 时,  $d_r$  长度只有在 1.2~1.8 m 之间时才可得

表 3 不同非线性比例( $R_1$  和  $R_2$ )下信号频谱的距离向压缩比(以 A 点为例)

Table 3 Ratio of compression of signal spectrum for different nonlinear parameters ( $R_1$  and  $R_2$ ) (take A point as an example)

$R_2 \backslash R_1$	10	20	30	40	50	60	70	100	200	300
10	0.2034	0.2131	0.2281	28.1	23.0909	15.875	28.111	7.0728	25.4	23
20	0.3333	0.75	4.6538	4.3214	3.7813	3.9032	4	4.2857	4.1724	5.5
30	0.6875	0.75	8.556	8.5556	8.6667	8.6667	8.5556	6.4147	8.667	8.556
40	1.1111	6.3333	0.9167	4.6667	3.7333	3.7333	5.0909	5.6	6.2222	6.2222
50	1	0.9091	3.9091	4.7778	3.667	3.6667	4.4	4.4	3.667	3.667
70	0.5556	3.222	1.381	3.3333	3.3333	1.1538	1.1538	1.2	1.7059	1.7059
100	1.7273	1.4615	1.5385	1.4615	1.4615	1.4615	1.4615	1.4615	1.4615	1.4615
150	1.2222	1.2	0.9167	1.2222	1.2222	1.2222	1.2222	1.3333	1.3333	1.3333
200	1	0.9	1	0.75	0.75	0.75	0.75	0.8182	0.8182	0.8182
300	1	1	0.8182	0.8182	0.8182	0.8182	0.8182	0.8182	0.8182	0.8182

## 6 结 论

针对合成孔径激光雷达成像中光源非线性啁啾的影响,提出了一种利用信号频谱相位二次项的共轭对卷积运算实现匹配滤波的相位误差克服算法。以条带扫描式合成孔径激光成像雷达为模型,对被测目标倾斜平面上的三个目标点建立非匹配的参考通道,同时对光源非线性啁啾克服进行仿真计算。仿真结果表明,该算法可以同时对被测物面上的不同目标点上由于非线性啁啾产生的目标模糊进行相位误差克服处理,距离向图像可以得到一定的压缩,有效提高距离向分辨率。考虑到参考通道相移公式是整个算法的核心,还比较了参考光路和参考一本振光路在不同取值时的信号压缩效果。此外,还分析了不同的非线性贡献比例下信号频谱的距离向压缩效果,这些都为实验室设计提供了参考。

本课题组之前还提出一种采用滤波窗口函数对目标面上各物点的反射信号进行逐一滤波和校正的算法<sup>[8]</sup>,也具有较好的压缩效果,但该算法对滤波器的宽度有一定限制要求,且计算量较大。逐一滤波算法和本文算法分别从两个角度对目标图像进行距离向压缩,前者是按照空间顺序对目标面内各点进行逐点压缩,后者则是采用参考通道内共轭的相位二次项对目标面内各点同时完成压缩,具有一定的同步性。

到较为合理的压缩信号,这为终端系统内参考光路的设置提供了参考依据。

此外,还分析了在不同的非线性贡献比例( $R_1$  和  $R_2$ )下信号频谱的距离向压缩效果,表 3 给出相关计算结果。计算结果表明,非线性贡献比例  $R_1$  的取值范围在小于 10 或大于 70 之间且  $R_2$  的取值小于 40 的情况下,本文算法无法得到较好的压缩效果。

## 参 考 文 献

- 1 R. L. Lucke, L. J. Rickard, M. Bashkansky *et al.*. Synthetic aperture lidar (SAL): fundamental theory, design equations for a satellite system, and laboratory demonstration [R]. Washington: Naval Research Laboratory, 2002
- 2 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**: 7621~7629
- 3 J. Ricklin, M. Dierking, S. Fuhrer *et al.*. Synthetic aperture lidar for tactical imaging [C]. DARPA Strategic Technology Office
- 4 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (I): Defocused and phase-biased telescope for reception antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 997~1000  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(I): 离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 997~1000
- 5 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (II): Spatial phase biased telescope for transmitting antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1197~1200  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(II): 空间相位偏置发射望远镜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1197~1200
- 6 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (III): Circulated duplex telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1405~1410  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(III): 双向环路发射接收望远镜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1405~1410
- 7 Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture lidar [C]. *SPIE*, 2008, **7094**: 70940F
- 8 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. 合成孔径激光雷达中非线性啁啾逐一扫描滤波校正算法的仿真与分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 47~54