

合成孔径激光成像雷达中非线性啁啾逐一扫描滤波校正算法的仿真与分析

许楠 鲁伟 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 合成孔径激光成像雷达中啁啾激光光源的非线性会严重影响距离向的成像聚焦。基于参考通道非线性测量和相移计算进行目标通道啁啾非线性补偿的概念,提出了一种对目标物点反射信号逐一滤波和校正的方法。建立了该方法从外差探测到距离向成像的一般性数学流程。以星载合成孔径激光成像雷达为模型,进行了计算机仿真,研究了滤波器宽度、非线性大小对距离向压缩脉宽的影响,通过分析得到了合适的滤波器宽度,验证了本方法的可行性。

关键词 合成孔径激光成像雷达; 非线性啁啾; 距离向分辨率; 线性调频信号

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092901.0047

Simulation of Nonlinear-Chirp Compensation by Scan-Filtering in SAIL

Xu Nan Lu Wei Liu Liren

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

Abstract The nonlinear chirp of laser reduces the range resolution of synthetic aperture imaging radar. Based on the nonlinear chirp measurement in reference channel and phase-shift algorithm, a compensation method is proposed, which filters and proofreads the target backwave one by one, and mathematical flow of this method is established. The simulation of the airborne synthetic aperture imaging radar model validates the feasibility. The effects of width of the scan filter and nonlinear chirp are discussed. The conclusion of adequate width of the scan filter is given.

Key words synthetic aperture imaging radar; nonlinear chirp; range; resolution; linear frequency modulation

1 引言

合成孔径激光成像雷达(Synthetic aperture imaging radar)理论上可在几千公里上实现厘米量级的分辨率。通常使用线性调频信号(FM-CW),利用脉冲压缩技术同时满足图像的高信噪比和高分辨率要求。但实际的可调谐激光器并不能实现理想的线性调频。啁啾非线性造成的相位误差,会导致距离向散焦,降低成像分辨率。因此必须通过一定方法对非线性啁啾进行补偿,以保证高分辨率成像。

截至上世纪末的实验中主要针对的是方位向成像,对距离向成像的讨论较少。2002年美国海军实验室首次提出了非线性啁啾的问题^[1],并通过建立

匹配参考通道补偿了非线性啁啾。该方法仅适用于实验室内、目标距离已知的条件。2005年美国航空航天公司首次完成了真正意义上二维合成孔径激光成像雷达实验^[2]。在实验装置中建立了非匹配参考通道,并建立了相移算法,从参考通道中获得任意长度目标通道中的相位误差。因此,通过建立参考通道补偿非线性啁啾,尤其是非匹配通道,是较为理想的补偿非线性啁啾的手段。国内在合成孔径激光成像雷达方面起步较晚,尚未有非线性啁啾补偿的报道。本所信息光学实验室对合成孔径激光成像雷达的光学问题进行了研究^[3~7],本文重点研究高质量的距离向成像。

收稿日期: 2008-09-17; **收到修改稿日期:** 2008-10-27

作者简介: 许楠(1981-),女,博士研究生,主要从事星间相干光通信及激光雷达成像算法等方面的研究。

E-mail: xunan@mail.siom.ac.cn

导师简介: 刘立人(1942-),男,研究员,博士生导师,目前主要从事光折变集成光学、空间激光通信和激光雷达等方面的研究。E-mail: lirenliu@mail.shenc.ac.cn

基于参考通道和相移计算的概念,本文提出了一种对目标物点反射信号逐一滤波和校正的方法:通过建立非匹配参考通道得到目标通道中非线性误差的估计值,同时使用扫描滤波器从每个回波脉冲的外差信号中滤出来自不同目标点的外差信号,并利用 SAIL 的相移算法对每个目标点外差信号逐一在距离向进行非线性啁啾补偿,补偿后的各点外差信号合并为回波外差信号,再对所有回波外差信号进行距离向脉冲压缩,获得距离向压缩图像。和对回波脉冲整体进行相移计算相比,能够更为精准地对非线性啁啾在距离向产生的相位误差进行补偿。建立了该方法的一般性数学流程,并以星载合成孔径激光成像雷达为模型进行了计算机仿真。通过对仿真结果的分析,研究了非线性啁啾补偿对距离向成像的改善效果,并对比了不同滤波器宽度和不同非线性啁啾大小下的脉冲压缩情况,讨论了不同参数下得到的压缩结果,并得到了较理想的滤波器宽度。

2 仿真模型和算法

图 1 为采用扫描滤波器和相移算法进行非线性啁啾补偿算法的仿真模型,主要由目标通道(图 1 右),用于补偿非线性啁啾的参考通道(图 1 左)以及数据处理(图 1 下)三部分组成。

仿真流程:由参考通道的回波信号和本振信号进行相干探测,得到参考通道的外差信号,对余弦形式的外差信号进行解包络,得到参考通道相位,并利用相移算法由参考通道相位得到目标通道距离向相位的估计值。将此估计值恢复为指数函数包络形式,作为目标通道距离向的补偿函数。在目标通道

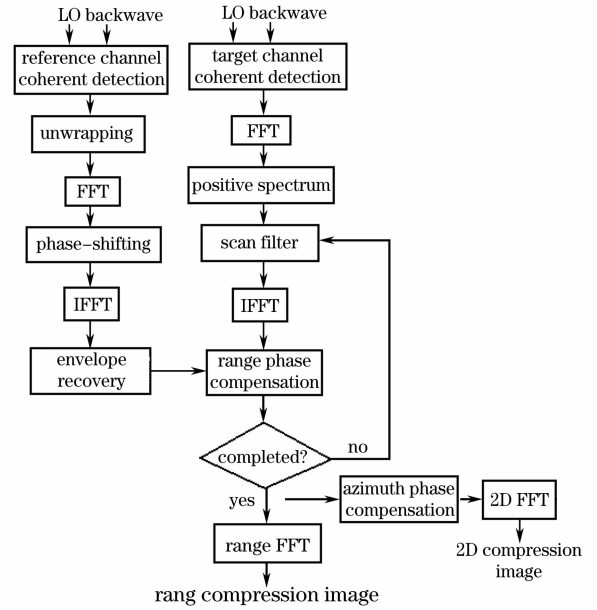


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flowchart

中,回波信号和本振信号同样进行相干探测,由目标通道外差信号的正频部分得到指数形式的目标通道外差信号。采用扫描滤波器对每个目标外差信号中不同目标点的外差信号进行滤波,利用参考通道得到目标通道距离向的补偿函数与每个目标点外差信号相乘,对距离向进行相位补偿,补偿后的各点外差信号合并为回波外差信号。所有脉冲距离向相位补偿后,进行距离向脉冲压缩,得到距离向合成孔径图像。在距离向相位补偿后,进一步对方位向相位完全补偿,在距离向和方位向同时进行脉冲压缩,可得到目标点成像。

参考通道回波信号和本振信号的相位分别为发射光相位不同延时下的信号

$$\begin{cases} \varphi_{R-S}(\hat{t}) = \varphi(\hat{t} - \tau_{R-S}) = 2\pi \left[f_0(\hat{t} - \tau_{R-S}) + \frac{1}{2}\dot{f}(\hat{t} - \tau_{R-S})^2 + \frac{1}{6}\ddot{f}(\hat{t} - \tau_{R-S})^3 \right], \\ \varphi_{R-LO}(\hat{t}) = \varphi(\hat{t} - \tau_{R-LO}) = 2\pi \left[f_0(\hat{t} - \tau_{R-LO}) + \frac{1}{2}\dot{f}(\hat{t} - \tau_{R-LO})^2 + \frac{1}{6}\ddot{f}(\hat{t} - \tau_{R-LO})^3 \right], \end{cases} \quad (1)$$

式中 f_0, \dot{f}, \ddot{f} 分别为初始频率、一阶啁啾速率、和二阶啁啾速率。 τ_{R-S} 和 τ_{R-LO} 分别为参考通道回波信号和本振信号以发射光发射时刻为基准的延时。

则得到参考通道外差信号

$$I(\hat{t}) = A_R \text{rect}(\hat{t}/\Delta T) \cos[\varphi_{R-L}(\hat{t}) - \varphi_{R-S}(\hat{t})], \quad (2)$$

式中 A_R 为信号幅值, ΔT 为啁啾脉宽。

对参考通道外差信号进行解包络运算得到参考通道相位,即参考通道本振光和信号光相位差

$$\varphi_R(\hat{t}) = \arccos I(\hat{t}) = \varphi_{R-L}(\hat{t}) - \varphi_{R-S}(\hat{t}), \quad (3)$$

对参考通道相位进行傅里叶变换,得到参考通道相位频谱 $\varphi_R(\hat{f})$ 。由相移算法^[2],得到目标通道中每个目标点的相位频谱

$$\varphi_{\text{TR},n}(\hat{f}) = P_n(\hat{f})\varphi_{\text{R}}(\hat{f}) = \frac{\sin[\pi n_r \gamma_r (\tau_{\text{T-LO}} - \tau_{\text{T-S},n})/2N_r]}{\sin(\pi n_r \gamma_r (\tau_{\text{R-LO}} - \tau_{\text{R-S}})/2N_r)} \varphi_{\text{R}}(\hat{f}), \quad (4)$$

式中 P_n 为第 n 个目标点的相移因子, N_r 为距离向采样点数, n_r 为点数序列号, γ_r 为距离向采样率。

逆傅里叶变换后得到时域的目标通道每个目标点的相位 $\varphi_{\text{TR},n}(\hat{t})$ 。将相移得到的目标通道相位, 恢复为负指数包络形式, 作为目标通道的距离向相位补偿函数

$$g_{\text{TR},n}(\hat{t}) = \exp[-j\varphi_{\text{TR},n}(\hat{t})], \quad (5)$$

目标通道外差信号为^[3~7]:

$$\begin{aligned} I_{\text{T}}(\hat{t}, M, N) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{\text{T}}(\hat{t}, m, n) = \\ &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_{\text{T}} \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{\Delta T - \tau_{\text{T-S},n}}\right) \left| \rho(\alpha_n, \beta_n) \exp\left[-\frac{\alpha_n^2 \sin^2 \varphi + (\beta_n - m\Delta Y)^2}{\omega^2(z)}\right] \right|^2 \times \\ &= \frac{2J_1[\pi(d\theta_{m,n}/\lambda)]}{\pi(d\theta_{m,n}/\lambda)} \cos[\varphi_{\text{T},n}(\hat{t}, n) + \varphi_{a,n}(m, n)], \end{aligned} \quad (6)$$

式中 N 为目标点数, M 为方位向采样点数, α_n 和 β_n 为第 n 个目标点在目标平面上的坐标, A_{T} 为信号幅值, $\tau_{\text{T-S},n}$ 为第 n 个目标延时, ΔY 为方位向分辨率, 束腰 $\omega(z) = \lambda z_0 / \pi \omega_0$, $\omega_0 = d/4$, d 为收发口径, 第 m 个方位

点和每个目标之间夹角 $\theta_{m,n} = \sqrt{\left(\frac{x_n}{z_0}\right)^2 + \left(\frac{y_n - m\Delta Y}{z_0}\right)^2}$ 。

距离向相位 $\varphi_{\text{T},n}(\hat{t}, n)$ 为目标回波和本振波的相位差, 目标回波和本振波相位为发射光相位的延时信号

$$\begin{cases} \varphi_{\text{T-S},n}(\hat{t}, n) = \varphi(\hat{t} - \tau_{\text{T-S},n}) = 2\pi \left[f_0(\hat{t} - \tau_{\text{T-S},n}) + \frac{1}{2}\dot{f}(\hat{t} - \tau_{\text{T-S},n})^2 + \frac{1}{6}\ddot{f}(\hat{t} - \tau_{\text{T-S},n})^3 \right], \\ \varphi_{\text{T-LO}}(\hat{t}) = \varphi(\hat{t} - \tau_{\text{T-LO}}) = 2\pi \left[f_0(\hat{t} - \tau_{\text{T-LO}}) + \frac{1}{2}\dot{f}(\hat{t} - \tau_{\text{T-LO}})^2 + \frac{1}{6}\ddot{f}(\hat{t} - \tau_{\text{T-LO}})^3 \right], \end{cases} \quad (7)$$

方位向相位 $\varphi_{a,n}(m, n) = \frac{\pi}{\lambda} [\alpha_n^2 \sin^2 \varphi + (\beta_n - m\Delta Y)^2] \frac{1}{F_{\text{equ}}}$ 。

由距离向傅里叶变换得到目标通道外差信号的距离向频谱

$$\begin{aligned} I_{\text{T}}(\hat{f}, m) &= \text{FFT}[I_{\text{T}}(\hat{t}, M, N)] = \sum_{n=1}^N \sum_{m=-M}^M A_{\text{T}}(m, n) \text{sinc}[(\Delta T - \tau_{\text{T-S},n})\hat{f}] \otimes \\ &\{F\{\exp[j\varphi_{\text{T},n}(\hat{t}, n)]\} + F\{\exp[-j\varphi_{\text{T},n}(\hat{t}, n)]\}\} \otimes \{F\{\exp[j\varphi_{a,n}(m, n)]\} + F\{\exp[-j\varphi_{a,n}(m, n)]\}\} - \\ &\{F\{\exp[j\varphi_{\text{T},n}(\hat{t}, n)]\} - F\{\exp[-j\varphi_{\text{T},n}(\hat{t}, n)]\}\} \otimes \{F\{\exp[j\varphi_{a,n}(m, n)]\} - F\{\exp[-j\varphi_{a,n}(m, n)]\}\}, \end{aligned} \quad (8)$$

取出正频部分频谱

$$\begin{aligned} I_{\text{T}^+}(\hat{f}, f_m) &= \text{FFT}_2[I_{\text{T}}(\hat{t}, M, N)] = \sum_{n=1}^N \sum_{m=-M}^M A_{\text{T}}(m, n) \text{sinc}[(\Delta T - \tau_{\text{T-S},n})\hat{f}] \otimes \\ &\{F\{\exp[j\varphi_{\text{T},n}(\hat{t}, n)]\} \otimes \{F\{\exp[j\varphi_{a,n}(m, n)]\} + F\{\exp[-j\varphi_{a,n}(m, n)]\}\} - \\ &F\{\exp[j\varphi_{\text{T},n}(\hat{t}, n)]\} \otimes \{F\{\exp[j\varphi_{a,n}(m, n)]\} - F\{\exp[-j\varphi_{a,n}(m, n)]\}\}, \end{aligned} \quad (9)$$

根据不同目标点外差信号的不同拍频, 用扫描滤波器 $f_n(\hat{f}) = \text{rect}\left(\frac{\hat{f} - f_{b,n}}{T_{f,n}}\right)$ 对目标通道外差信号的正频部分进行滤波。其中 $f_{b,n}$ 为第 n 个目标点的外差信号拍频, 针对第 n 个目标点外差信号滤波器的宽度 $T_{f,n} \leq \Delta T - \tau_{\text{T-S},n}$ 。将滤波结果进行逆傅里叶变换后, 得到指数形式的目标通道外差信号

$$g_{\text{T},n}(\hat{t}, M, N) = A_{\text{T}}(m, n) \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_{f,n}}\right) \exp\{j[\varphi_{\text{T},n}(\hat{t}, n) + \varphi_{a,n}(m, n)]\}, \quad (10)$$

用参考通道得到的每个目标点距离向相位补偿函数和滤出的每个目标点脉冲相乘, 进行距离向相位补偿后相加

$$\begin{aligned} g_{\text{T-c}}(\hat{t}, m) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=-M}^{M-1} g_{\text{T},n}(\hat{t}, m, n) \times g_{\text{TR},n}(\hat{t}, n) = \\ &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_{\text{T}}(m, n) \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_{f,n}}\right) \exp[j\varphi_{a,n}(m, n)] \exp[j\varphi_{\text{T},n}(\hat{t}, n)] \exp[-j\varphi_{\text{TR},n}(\hat{t}, n)]. \end{aligned} \quad (11)$$

所有脉冲距离向补偿后,在距离向进行傅里叶变换,得到距离向压缩图像

$$G_{r-c}(\hat{f}, m) = \text{FFT}[g_{r-c}(\hat{t}, m)] = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_T(m, n) \text{sinc}(T_f \hat{f}) \otimes \{F\{\exp[j\varphi_{T,n}(\hat{t}, n)]\} \otimes F\{\exp[-j\varphi_{TR,n}(\hat{t}, n)]\}\} \exp[j\varphi_{a,n}(m, n)], \quad (12)$$

所有距离向补偿后的脉冲进行方位向相位的完全补偿

$$g_{b-c}(\hat{t}, M, N) = \sum_{m=1}^M g_{r-c}(\hat{t}, m) \times \exp[-j\varphi_a(m, n)] = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_T(m, n) \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_f}\right) \exp[j\varphi_{T,n}(\hat{t}, n)] \exp[-j\varphi_{TR,n}(\hat{t}, n)], \quad (13)$$

距离向和方位向二维傅里叶变换后得到成像点

$$G_{b-c}(\hat{f}, f_m) = \text{FFT}^2[g_{b-c}(\hat{t}, M, N)] = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_T(m, n) \text{sinc}(T_f, \hat{f}) \otimes \{F\{\exp[j\varphi_{T,n}(\hat{t}, n)]\} \otimes F\{\exp[-j\varphi_{TR,n}(\hat{t}, n)]\}\}. \quad (14)$$

3 系统设计

系统设计以真实环境中条带扫描工作模式下的星载合成孔径激光成像雷达为模型。搭载合成孔径激光成像雷达的卫星平台以 7.2 km/s 的速度在 400 km 高度飞行,以 45° 观察角度对目标进行探测,与目标物面的中心点斜距 z_0 为 560 km。目标物面上点目标 (α_n, β_n) , 对应与垂直面坐标为 (x_n, y_n, z_n) , 两个坐标系之间存在关系: $x_n = \alpha_n \sin \varphi$, $y_n = \beta_n$, $z_n = \alpha_n \cos \varphi$ 。合成孔径激光成像雷达收发天线的口径 d 为 0.19 m, 在目标物面上光学足趾直径 D 为 11.2 m。工作波长为 1.55 μm , 脉冲周期 T 为 15.6 ms, 脉宽 ΔT 为 7.8 ms。要求距离向和方位向的成像分辨率均为 10 cm, 则啁啾带宽 B 为 4.243×10^9 Hz, 对应波长扫描范围 $\Delta\lambda$ 为 0.034 nm, 则有波长啁啾率 $\Delta\lambda/\Delta T$ 为 4359 nm/s, 频率啁啾率 $\dot{f} = B/\Delta T = 5.44 \times 10^{14}$ Hz/s。

系统不考虑啁啾周期内的相位误差,只研究啁啾周期内的相位误差。设计发射光与同时间发射的本振光的第 K 个 ($K=50$) 周期进行外差探测,则目标通道外差信号差频的中心频率为 $f_0 = \dot{f}\Delta T/K = 84.86$ MHz, 等效延时 $\Delta\tau_0 = \Delta T/K = 0.156$ μs , 对应等效中心距离 $R_{\text{equ}} = 23.4$ m。

根据距离向分辨率 10 cm 的要求,选择距离向采样率 132 MHz, 一个回波脉宽内距离向采样点数为 1024。为保证图像中横纵坐标比例一致,方位向间隔和距离向相匹配。方位向采样率 144 kHz, 方位向采样点数 311。

4 仿真结果

仿真中选用 3 个点目标(如图 2): 在目标平面

(α, β) 上坐标分别为 (5, 5)、(0, 0)、(-5, -5)。在与目标平面夹角 45° 垂直平面 (x, y, z) 上坐标为 (3.535, 5, 3.535)、(0, 0, 0)、(-3.535, -5, -3.535), 每个点的回波延时分别为 0.158 μs 、0.156 μs 、0.154 μs 。为简化计算,所有点目标反射率取 1, 所有电信号幅值取 1。

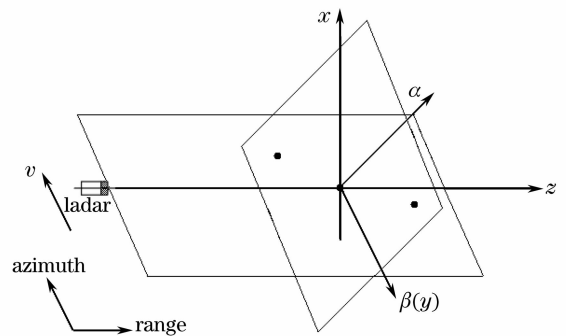


图 2 目标坐标图

Fig. 2 Coordinate system of targets

定义非线性比例 K 为半个啁啾脉宽内一阶相位和二阶相位的比例: $\dot{\varphi} \frac{T}{2} : \ddot{\varphi} \left(\frac{T}{2}\right)^2 = K : 1$, 则有二阶频率和一阶频率关系

$$\ddot{f} = 4\dot{f}/[KT + 2(\tau_{T-LO} + \tau_{T-S})] \approx 4\dot{f}/KT, \quad (15)$$

根据波长扫描线性度在 1% [1], 仿真选取 $K=50$, 即 $\ddot{f} = 5.58 \times 10^{18}$ Hz/s²。

图 3 为公式(4)表示的频域相移结果,通过频域相移因子[图 3(b)],由参考通道相位频谱[图 3(a)]得到目标通道中每个目标点对应的相位估计值的频谱[图 3(c)]。

图 4 为时域相移结果,图 4(a)为参考通道相位,图 4(b)~图 4(c)为目标通道中每个目标点对应的相位估计值。

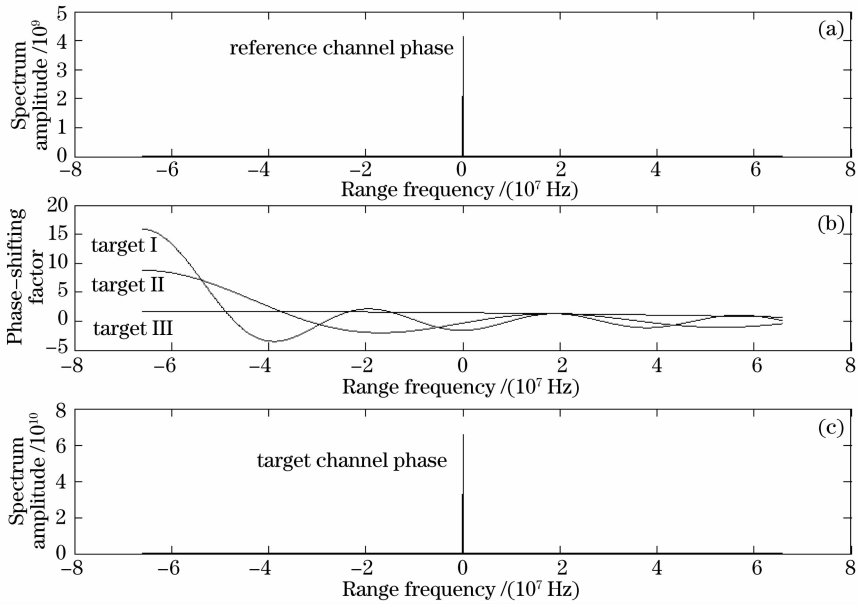


图 3 参考通道相位频谱(a), 相移因子(b)和目标通道估计相位的频谱幅值(c)

Fig. 3 Amplitude of phase spectrum in reference channel (a), phase-shifting factor (b) and amplitude of phase spectrum in target channel (c)

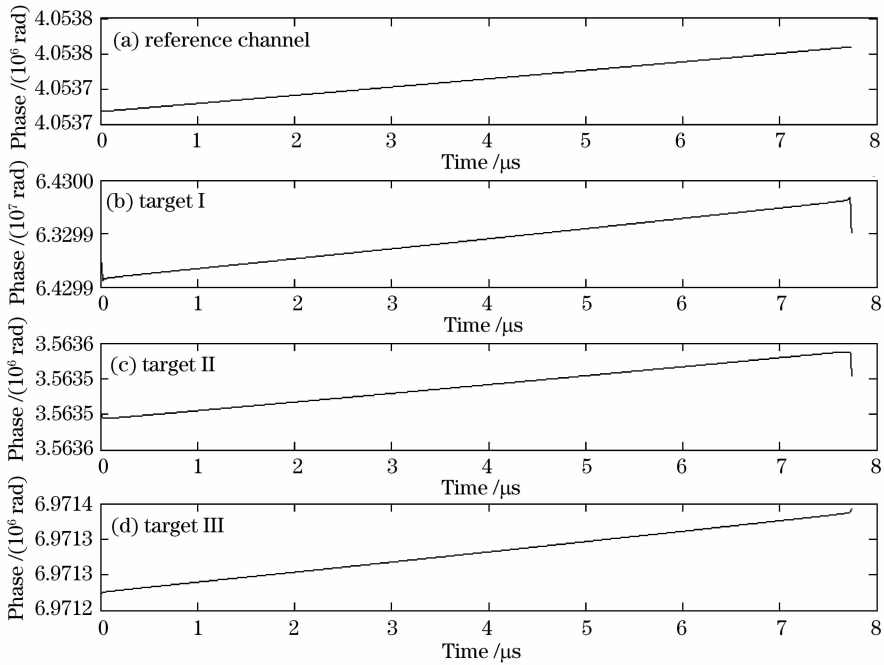


图 4 参考通道相位(a)和目标通道估计相位的频谱幅值(b)~(d)

Fig. 4 Phase in reference channel (a), estimated phase in target channel (b)~(d)

图 5 为(5)式表示的相移前后即参考通道相位 [图 5(a)] 和目标通道中每个目标点对应的相位估计值恢复指数函数包络后的频谱幅值 [图 5(b)]。

图 6 为对目标通道外差信号进行滤波, 将滤出的每个目标点对应外差信号分别进行距离向相位补偿, 所有脉冲补偿后的距离向压缩图像 [(13) 式]。可见脉冲在距离向得到了一定压缩, 在方位向则没

有压缩。

图 7 为距离向相位补偿后, 在方位向进行完全理想的脉冲压缩, 即完全补偿方位向二次相位并压缩后的图像 (公式 (15))。可见目标点在方位向和距离向都得到了压缩, 3 个目标点根据坐标在一条直线上。

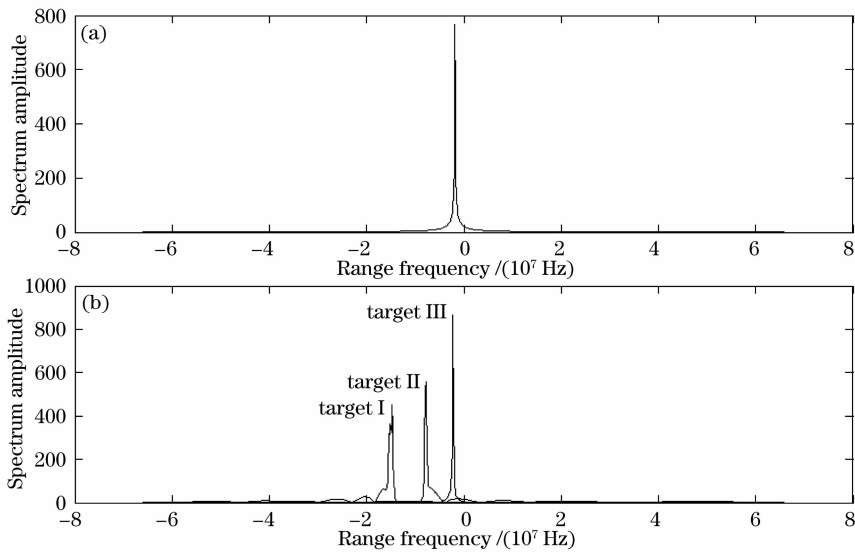


图 5 参考通道相位指数包络后的频谱幅值(a)和相位指数包络后频谱幅值(b)

Fig. 5 Spectrum amplitudes of exponential function enveloped phase in reference channel (a) and estimated phase in target channel (b)

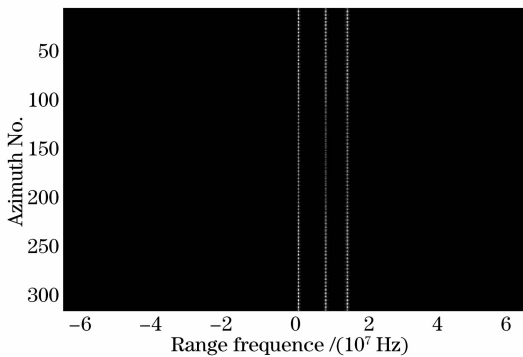


图 6 非线性啁啾补偿后的距离向频谱幅值

Fig. 6 Spectrum amplitude of nonlinear chirp compensated target backwave in range

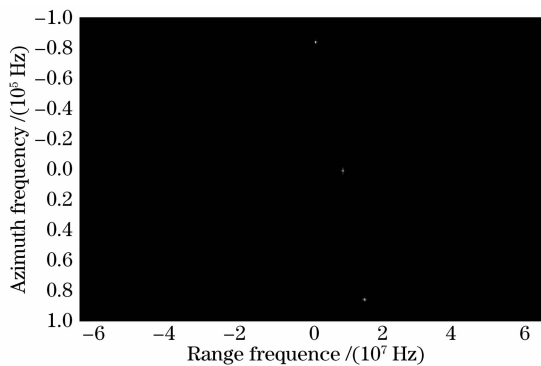


图 7 二维压缩频谱幅值

Fig. 7 Spectrum amplitude of target backwave both in range and azimuth

缩前后脉宽比例。

在非线性比例 $K=50$, 滤波器宽度 $T_{f,n}$ 为各目标点回波脉宽 $(\Delta T - \tau_{T-s,n})$ 下, 将实际压缩情况和理想压缩情况进行对比: 即不使用相移公式, 直接用目标回波的相位(距离向和方位向)对自身进行相位补偿。数据如表 1。

取非线性比例 $K=50$, 变化滤波器脉宽 T_f 和各目标点回波脉宽 $(\Delta T - \tau_{T-s,n})$ 之间比例, 比较不同滤波器脉宽下的压缩情况。具体数据如表 2。

根据表 2 中的压缩情况, 取压缩比较为理想时滤波器脉宽和各目标点回波脉宽之间的比例 0.5, 变化不同非线性比例 K , 比较不同非线性大小下的压缩情况。具体数据见表 3。

由不同滤波器宽度和不同非线性大小的压缩情况, 得到以下结论:

非线性啁啾的影响与距离长度有关: 由表 1 中目标点 III 的数据可见, 对于距离较短的点目标, 目标回波脉宽和理想压缩情况下的脉宽相同, 认为非线性啁啾的影响可以忽略。其物理意义在于: 近距离下(如仿真计算中的目标点 III)的回波延时较短, 非线性啁啾在时间积累上的影响较小。对于距离较远的点目标(如仿真计算中的目标点 I), 由于仿真计算中傅里叶变化等近似计算, 非线性啁啾补偿后的压缩脉宽和理想压缩情况下的脉宽相比仍有一定差距。

扫描滤波器宽度对压缩结果的影响: 随着扫描滤波器宽度变化, 滤波后脉冲内能量变化, 距离向补偿后的压缩脉宽随之变化。在 $T_{f,n} : (\Delta T - \tau_{T-s,n}) =$

5 分析和讨论

定义脉宽为压缩脉冲的半高全宽, 压缩比为压

0.4~0.5时,压缩比最大,认为压缩效果最好。

表1 距离向实际和理想压缩情况($K=50, T_{i,n}=\Delta T-\tau_{r-s,n}$)

Table 1 Result of practical and perfect Compression in range ($K=50, T_{i,n}=\Delta T-\tau_{r-s,n}$)

	Point object I	Point object II	Point object III
BW of target heterodyne signal /MHz	2.1914	1.2891	0.12891
BW of perfect compression /MHz	0.12891	0.12891	0.12891
Ratio of perfect compression	17	10	1
BW of practical compression /MHz	0.90234	0.51563	0.25781
Ratio of practical compression	8.5	2.5	0.5

表2 不同滤波器脉宽 T_f 下距离向压缩情况($K=50$)

Table 2 Compression result of different T_f in range ($K=50$)

$T_f:(\Delta T-\tau_n)$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Compressed BW of point I /MHz	1.0262	0.89796	0.89796	0.6414	0.89796	0.38484	0.38484	0.6414	0.89796	1.6676
Compressed ratio of point I	2.14	2.44	2.44	3.42	2.44	5.70	5.70	3.42	2.44	1.31
Compressed BW of point II /MHz	0.6414	0.51312	0.51312	0.5131	0.51312	0.25656	0.38484	0.51312	0.76968	1.5394
Compressed ratio of point II	2.01	2.51	2.51	2.51	2.51	5.02	3.35	2.51	1.67	0.84
Compressed BW of point III /MHz	0.25656	0.2565	0.25656	0.25656	0.25656	0.25656	0.51312	0.51312	0.76968	1.5394
Compressed ratio of point III	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0.25	0.17	0.08

表3 不同非线性比例 K 下的距离向压缩情况 [$T_{i,n}=0.5(\Delta T-\tau_{r-s,n})$]

Table 3 Compression result of different K in range ($T_f=0.5\Delta T$)

K	10	20	30	50	60	80	100	200	300	500
$\ddot{f}/(\text{Hz}/\text{s}^2)$	2.790×10^{19}	1.395×10^{19}	9.299×10^{18}	5.579×10^{18}	4.650×10^{18}	3.487×10^{18}	2.790×10^{18}	1.395×10^{18}	9.299×10^{17}	5.5779×10^{18}
Heterodyne BW of point I /MHz	11.215	5.543	3.6094	2.1914	1.6758	1.418	1.0313	0.38672	0.38672	0.12891
Compressed BW of point I /MHz	2.8359	1.2891	0.77344	0.38672	0.25781	0.25781	0.38672	0.38672	0.25781	0.25781
Compressed ratio of point I	3.95	4.3	4.67	5.67	6.5	5.5	2.67	1	1.5	0.5
heterodyne BW of point II /MHz	6.0586	2.96485	2.0625	1.2891	1.0313	0.77344	0.64453	0.25781	0.25781	0.12891
Compressed BW of point II /MHz	1.2891	0.64453	0.38672	0.38672	0.38672	0.25781	0.38672	0.25781	0.38672	0.38672
Compressed ratio of point II	4.70	4.6	5.33	3.33	2.67	3	1.67	1	0.67	0.33
heterodyne BW of point III /MHz	1.1602	0.64455	0.38672	0.12891	0.12891	0.12891	0.25781	0.25781	0.12891	0.12891
Compressed BW of point III /MHz	0.25781	0.38672	0.25781	0.25781	0.25781	0.25781	0.25781	0.38672	0.38672	0.38672
Compressed ratio of point III	4.5	1.67	1.5	0.5	0.5	0.5	1	0.67	0.33	0.33

非线性大小对压缩结果的影响:随着非线性的增大,回波脉宽和距离向补偿后的压缩脉宽随之减小。非线性比例 K 大于 500 ($\ddot{f} < 5.5779 \times 10^{18}$) 后,所有 3 个点目标的回波脉宽和距离向补偿后的压缩脉宽相同,认为非线性啁啾的影响可以忽略。

压缩,提高了距离向分辨率。通过对比不同滤波器宽度和不同非线性啁啾大小下的距离向脉冲压缩情况,讨论了滤波器宽度和非线性啁啾大小对非线性啁啾补偿结果的影响,得到了较理想的滤波器宽度,验证了本方法的可行性。

6 结 论

基于参考通道和相移计算的概念,提出了一种对目标物点反射信号逐一滤波和校正的方法。建立了该方法的一般性数学流程,以星载合成孔径激光成像雷达为模型对该方法进行了仿真。仿真结果验证:通过非线性啁啾的补偿,距离向脉宽得到了一定

参 考 文 献

- 1 R. L. Lucke, L. J. Rickard, M. Bashkansky *et al.*. Synthetic aperture radar (SAR): 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 Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture ladar[C]. *SPIE*, 2008, **7094**: 70940F
- 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 ladar (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 ladar (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 Liu Liren. Synthetic Aperture Ladar (IV): A unified operation mode and 2-D data collection equation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 1~6
刘立人. 合成孔径激光雷达(IV): 统一工作模式和二维数据收集方程[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 1~6