

# 合成孔径激光成像雷达距离向等延时的信号处理结构和算法

许楠<sup>1,2</sup>, 刘立人<sup>1</sup>, 鲁伟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室, 上海 201800;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**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降低距离向成像分辨率. 国外已发展了建立参考通道的非线性啁啾补偿算法. 本文证明了等延时抑制非线性啁啾和非同步触发初始相位误差的原理, 提出了一种具有三种本振延时产生方案的接收信号处理结构及算法体系, 包含: 建立等臂目标本振通道, 建立参考通道及两次外差变频、建立参考通道及相移计算. 建立了该算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进行了仿真, 验证了算法的可行性. 最后对三种方法的优缺点进行了讨论.

**关键词:** 合成孔径激光成像雷达; 等延时; 非线性啁啾; 距离向分辨率

**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 06-1405-05

## Signal Processing Construction and Algorithm of Range Equal Delay in SAIL

XU Nan<sup>1,2</sup>, LIU Li-ren<sup>1</sup>, LU Wei<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The nonlinear chirp of laser reduces the range resolution of synthetic aperture imaging radar. The compensating algorithms by establishing reference path are developed. An equal delay theory to compensate nonlinear chirp phase errors and asynchronous triggered phase errors is proposed, including three methods: establishing matched target LO path, establishing reference path and twice coherent detection, establishing reference path and phase shifting calculation. The mathematical flow of the algorithm is established. The simulation of the airborne synthetic aperture imaging radar model validates the feasibility. The characteristics of three methods are discussed finally.

**Key words:** synthetic aperture imaging radar; equal delay; nonlinear chirp signal; range resolution

## 1 引言

合成孔径激光成像雷达是实现厘米量级超高分辨率的唯一光学手段, 且具有成像速度快、图像可视性好、天线尺寸小等优点. 通常使用可调谐激光器发射的线性调频光束作为照射光源. 但可调谐激光器一般为波长线性扫描, 并且不能保证完全线性扫描, 由此引起的啁啾非线性会造成距离向脉宽的展宽, 降低距离向成像分辨率, 并会进一步影响方位向信号的处理. 因此必须通过一定的图像处理方法来补偿非线性啁啾, 以保证成像分辨率.

2002 年美国海军实验室首次成功获得了二维目标的(逆)合成孔径激光成像雷达图像<sup>[1]</sup>, 并提出了非线性啁啾的解决方案, 通过建立参考通道和二次外差探测进

行非线性啁啾补偿. 2005 年美国宇航公司也实现了二维合成孔径激光成像雷达的实验室验证<sup>[2]</sup>, 在建立参考通道和一套频域相移算法来补偿非线性啁啾. 航空航天局采用的建立参考通道和数字信号处理相结合的方法, 在一定程度上拓展了适用范围, 但增加了算法复杂性. 本实验室对合成孔径激光成像雷达的光学问题和图像处理算法进行了研究和实验室验证<sup>[3~8]</sup>, 本文重点研究适用性较强的距离向图像统一算法.

在上述报道中, 实验都采用了附加参考通道和两次变频原理. 本文首先在数学上证明了回波信号和本振信号相对延时越小, 非线性啁啾的影响越小的原理, 同时表明也可有效降低非同步触发初始相位误差, 因此具有重要意义. 在此基础上, 本文提出了一种具有三种本振延时产生方案的 SAIL 接收信号处理结构及算法体系,

包含:建立等臂目标本振通道,建立参考通道及两次外差变频、建立参考通道及相移计算.建立了一般性数学模型,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.计算机仿真证明:三种方案均可在一定程度上抑制非线性啁啾影响,并可根据实际应用情况进行灵活选择,对保证合成孔径激光成像雷达的高成像分辨率有实际意义.最后对三种方案的优缺点进行了讨论.

## 2 等延时抑制非线性啁啾的原理

非线性啁啾信号的频率除了线性变化项外,还有随时间变化的高阶项.用 Taylor 级数展开式表示为:

$$f(t) = f_0 + \dot{f}t + \frac{1}{2}\ddot{f}t^2 + \cdots \frac{1}{n!}f^{(n)}t^n + \cdots \quad (1)$$

其中,  $f_0$  为初始频率(Hz),  $\dot{f}$  为频率一阶变化率(Hz/s),  $\ddot{f}$  为二阶变化率(Hz/s<sup>2</sup>),  $f^{(n)}$  为  $n$  阶变化率(Hz/s<sup>n</sup>).

由积分关系,得到瞬时相位表达式为:

$$\varphi(t) = 2\pi[f_0t + \dot{f}\frac{t^2}{2} + \frac{\ddot{f}}{2}\frac{t^3}{3} + \cdots \frac{f^{(n)}}{n!}\frac{t^{n+1}}{n+1} + \cdots] \quad (2)$$

下面仅考虑频率二阶变化率,来说明等延时抑制非线性啁啾的原理.

目标回波信号和目标本振信号的距离向相位  $\varphi_{T-S}(t, n)$ 、 $\varphi_{T-LO}(t, n)$  分别为式(2)所表示的发射信号相位的延时信号:

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

其中,第  $n$  个目标点回波信号的延时  $\tau_{T-S, n} = 2R_{T-S, n}/c$ , 目标本振信号的延时  $\tau_{T-LO} = 2R_{T-LO}/c$ ,  $R_{T-S, n}$  为第  $n$  个目标距离,  $R_{T-LO}$  为目标本振通道长度.

目标回波信号和本振信号外差探测得到的目标通道外差信号中,距离向相位为目标回波和本振信号的相位差:

$$\begin{aligned} \varphi_T(t, n) &= \varphi_{T-LO}(t) - \varphi_{T-S, n}(t, n) \\ &= 2\pi \left\{ \begin{aligned} &\dot{f}\Delta\tau_T t + (f_0 - \dot{f}\frac{\tau_{T-S, n} + \tau_{T-LO}}{2})\Delta\tau_T \\ &+ \frac{1}{2}\dot{f}\Delta\tau_T [t^2 - (\tau_{T-S, n} + \tau_{T-LO})t \\ &+ \frac{1}{3}(\tau_{T-S, n}\tau_{T-LO} + \tau_{T-S, n}^2 + \tau_{T-LO}^2)] \end{aligned} \right. \quad (4) \end{aligned}$$

其中,  $\Delta\tau_T = \tau_{T-S, n} - \tau_{T-LO}$  为目标回波通道和本振通道的延时差.

设数据采样时间从  $t_{\text{sample}} = t + \tau_{T-S, n}$  开始, 平移公

式(4)的时间坐标轴,则有初始频率:

$$f_0(\Delta\tau_T) = f_0 + \dot{f}\frac{\Delta\tau_T}{2} \quad (5)$$

初始相位表达式为:

$$\varphi_0(\Delta\tau_T) = f_0(\Delta\tau_T)\Delta\tau_T \quad (6)$$

在一个采样周期  $T_s$  内,非线性啁啾相位误差与线性啁啾相位的比例:

$$R = \frac{\ddot{f}(\Delta\tau_T + 3T_{\text{sample}})\Delta\tau_T}{6\dot{f}T_{\text{sample}}} \quad (7)$$

可见,目标通道延时差  $\Delta\tau_T$  越接近零,非线性啁啾相位误差越小,距离向成像展宽越小.同时,在实际应用时激光器初始频率漂移造成非同步触发初始相位误差也随之减小.

计算机仿真以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.合成孔径激光成像雷达收发天线的口径  $d$  为 0.19m,在目标上光学足趾直径  $D$  为 11.2m.工作波长为 1.55 $\mu\text{m}$ ,波长扫描速率为  $\lambda = 1.7 \times 10^{-2}\text{nm/s}$ ,脉冲周期  $T$  为 15.6ms,脉宽  $\Delta T$  为 7.8ms,由频率与波长之间倒数关系引起的最小二阶频率变化率为  $\ddot{f}_{\min} = 3.74 \times 10^{14}\text{Hz/s}^2$ .要求距离向成像分辨率为 10cm,则啁啾带宽  $B$  为  $2.1 \times 10^9\text{Hz}$ ,对应频率啁啾率  $\dot{f} = B/\Delta T = 2.69 \times 10^{14}\text{Hz/s}$ .

系统不考虑啁啾周期内的方位向相位误差,只研究啁啾周期内的距离向相位误差.设计发射光与同时时间发射的本振光的第  $K$  个( $K=10$ )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  $f_0 = \dot{f}\Delta T/K = 210\text{MHz}$ ,等效延时  $\Delta\tau_0 = \Delta T/K = 0.78\mu\text{s}$ ,对应等效中心距离  $R_{\text{equ}} = 117\text{m}$ .

如图 1 所示,假定目标点在目标平面( $\alpha, \beta$ )上坐标为(5,5),在与目标平面夹角  $45^\circ$  垂直平面( $x, y, z$ )上坐标为(3.535, 5, 3.535).

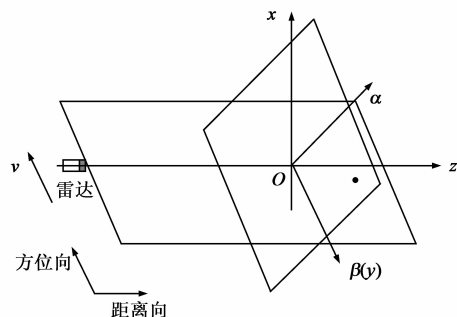


图1 目标点坐标图

非线性啁啾大小由非线性啁啾比例  $M$  表示,  $M$  定义为激光器引起的二阶频率变化率和波长完全线性引起的最小二阶变化率的比例.为简化计算,所有点目标反射率取 1,所有电信号幅值取 1.

在  $M = 2500$  时,距离压缩图像如图 2(a).在目标

通道完全等延时情况下的理想距离向图像为图 2(b). 由此可见,等延时可有效抑制非线性啁啾相位误差和非同步触发初始相位误差.

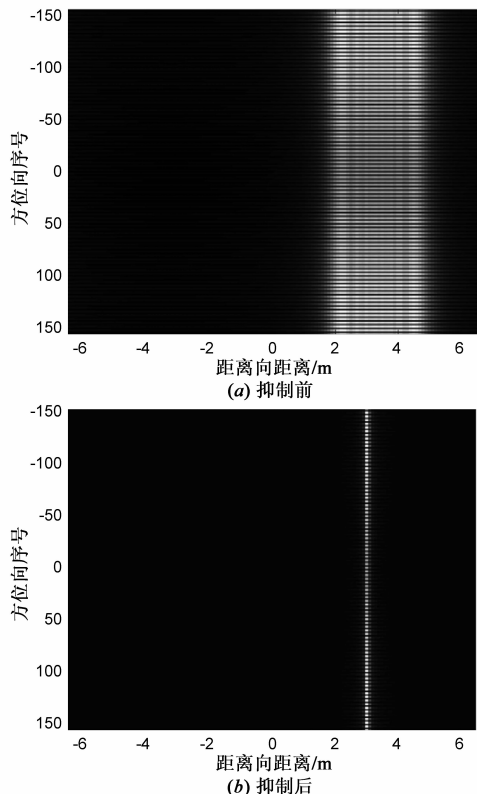


图2 等延时抑制非线性啁啾的效果

### 3 接收处理系统结构和等延时算法

等延时算法的原理为:在图 3 所示的接收处理系统基础上,缩短公式(4)中目标通道延时差  $\Delta\tau_T$ ,减小距离向的非线性相位误差以及非同步触发初始相位误差,从而提高距离向分辨率.下面分别对三种本振延时产生方案进行说明:

#### (1) 建立等臂目标本振通道

由公式(4)可见,延长当目标本振通道长度  $R_{TLO}$  接近目标距离  $R_{TS,n}$ ,则目标通道延时差  $\Delta\tau_T$  趋近于零,非线性啁啾相位误差和非同步触发初始相位误差也随之降低.

#### (2) 建立参考通道及两次外差变频

建立类似目标通道的参考通道.参考通道回波信号和本振信号的相位分别为发射信号相位不同延时下的信号:

$$\begin{cases} \varphi_{R-S}(t) = \varphi(t - \tau_{R-S}) = 2\pi[f_0(t - \tau_{R-S}) + \frac{1}{2}\dot{f}(t - \tau_{R-S})^2 + \frac{1}{6}\ddot{f}(t - \tau_{R-S})^3] \\ \varphi_{R-LO}(t) = \varphi(t - \tau_{R-LO}) = 2\pi[f_0(t - \tau_{R-LO}) + \frac{1}{2}\dot{f}(t - \tau_{R-LO})^2 + \frac{1}{6}\ddot{f}(t - \tau_{R-LO})^3] \end{cases} \quad (8)$$

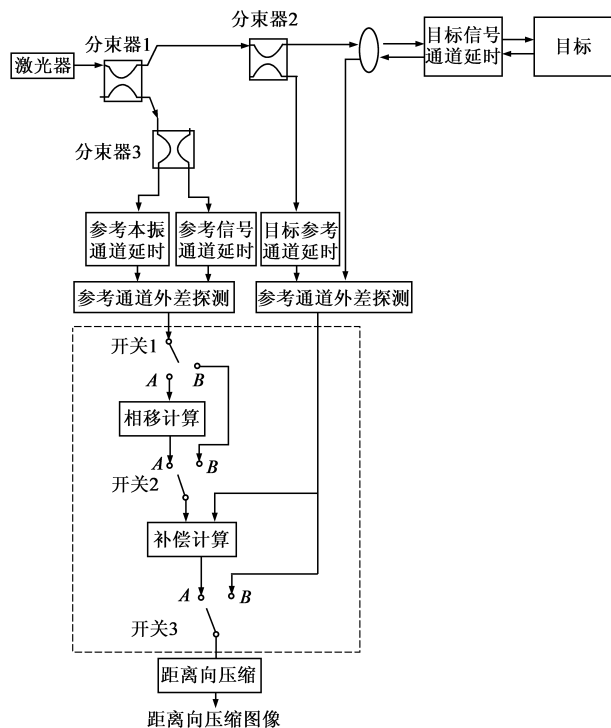


图3 接收处理系统框图

其中,参考回波信号延时  $\tau_{R-S} = 2R_{R-S}/c$ ,参考本振信号延时  $\tau_{R-LO} = 2R_{R-LO}/c$ ,  $R_{R-S}$  为参考目标距离,  $R_{R-LO}$  为参考本振通道长度.

两信号经参考通道外差探测得到参考通道外差信号,其中的距离向相位为参考回波信号和本振信号的相位差:

$$\begin{aligned} \varphi_R(t) &= \varphi_{R-LO}(t) - \varphi_{R-S}(t) \\ &= 2\pi \left\{ \dot{f}\Delta\tau_R t + \left( f_0 - \dot{f} \frac{\tau_{R-S} + \tau_{R-LO}}{2} \right) \Delta\tau_R \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2}\dot{f}\Delta\tau_R [t^2 - (\tau_{R-S} + \tau_{R-LO})t] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3}(\tau_{R-S}\tau_{R-LO} + \tau_{R-S}^2 + \tau_{R-LO}^2) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $\Delta\tau_R = \tau_{R-S} - \tau_{R-LO}$  为参考回波通道和本振通道的延时差.

参考通道外差信号与目标通道外差信号进行二次外差探测,二次外差信号的相位为目标通道外差信号和参考通道外差信号的相位差:

$$\varphi_r(t, n) = \varphi_{T,n}(t, n) - \varphi_R(t) \quad (10)$$

由式(4)、(9)可知,若参考通道延时差  $\Delta\tau_R$  接近目标通道延时差  $\Delta\tau_T$ ,则在二次外差探测过程中参考通道外差信号相位可有效抵消目标通道外差信号中的非线性相位误差和非同步触发初始相位误差.

#### (3) 建立参考通道及相移计算

类似第二种方法建立参考通道,但对通道延时不做要求,而是利用相移计算对参考通道的非线性啁啾

相位误差进行传递计算,得到目标通道延时差下产生的外差信号估算值。

相移计算通常包括鉴相、相移、恢复包络三个步骤。

首先对参考通道外差信号进行解包络运算得到参考通道相位:

$$\varphi_R(t) = \arccos \frac{I(t)}{A_R} = \varphi_{R-L}(t) - \varphi_{R-S}(t) \quad (11)$$

对参考通道相位进行傅立叶变换,得到参考通道相位频谱  $\varphi_R(f)$ 。由相移公式<sup>[2]</sup>到目标通道中每个目标点外差信号相位的频谱估算值:

$$\begin{aligned} \varphi_{TR}(f, n) &= P_n(f, n) \varphi_R(f) \\ &= \frac{\sin(\pi n_{\text{range}} \gamma_{\text{range}} \frac{\tau_{T-LO} - \tau_{T-S, n}}{2N_{\text{range}}})}{\sin(\pi n_{\text{range}} \gamma_{\text{range}} \frac{\tau_{R-LO} - \tau_{R-S}}{2N_{\text{range}}})} \varphi_R(f) \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $P_n$  为第  $n$  个目标点的相移因子,  $N_{\text{range}}$  为距离向采样点数,  $n_{\text{range}}$  为点序列号,  $\gamma_{\text{range}}$  为距离向采样率。

逆傅立叶变换后得到每个目标点的目标通道外差信号相位估算值  $\varphi_{TR}(t, n)$ , 并恢复为余弦函数的包络形式, 即得到目标外差信号估算值。目标外差信号估算值与目标通道外差信号进行二次外差探测得到二次外差信号, 其距离向相位  $\varphi_T(t)$ 、 $\varphi_{TR}(t, n)$  两相位相减, 从而抵消非线性相位和非同步触发初始相位误差影响。

#### 4 计算机仿真

图 3 所示的接收处理系统结构, 配合通道长度要求和

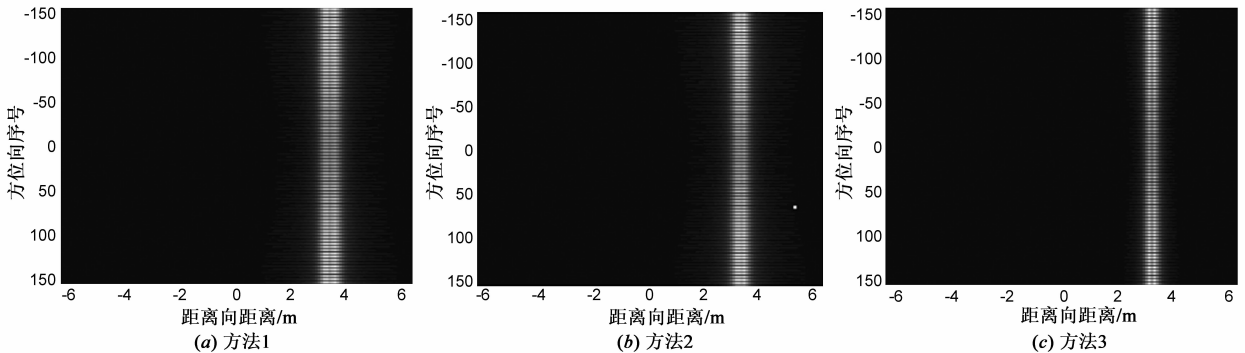


图4 三种方法补偿非线性啁啾后的距离压缩图像

图 5 为各非线性啁啾比例下三种方法的抑制比曲线。脉宽定义为脉冲的半高全宽。抑制比  $K$  定义为补偿非线性啁啾后的距离压缩带宽和没有进行补偿的距离压缩带宽的比例。

由图 5 所示的不同非线性大小下三种方法的抑制比情况, 得到以下结论:

(1) 所有抑制比均小于 1, 说明三种方法对非线性啁啾都有一定的抑制作用。

(2) 在非线性啁啾比例  $M$  小于 3000 的范围内, 抑

关闭合情况(如表 1), 实现等延时算法的三种方案。

表 1 三种方案参数

参数 方案	目标本振通道 长度要求	参考通道 长度要求	开关 1	开关 2	开关 3
方案 1	有	/	/	/	B
方案 2	无	有	B	B	A
方案 3	无	无	A	A	A

(1) 第一种方案“建立等臂目标本振通道”: 已知目标点距离, 并将目标本振通道长度延长至接近目标点距离的 110m, 开关 3 掷向位置 B。直接将目标通道外差信号进行距离向压缩, 得到距离向压缩图像。

(2) 第二种方案“建立参考通道及两次外差变频”: 已知目标点距离, 并建立参考通道, 使参考通道长度差接近目标通道长度差: 参考通道长度为 110m, 参考本振通道的长度为 1m。开关 1 掷位置 B, 开关 2 掷位置 B, 开关 3 掷位置 A。断开相移计算模块, 两通道外差信号经二次相干探测后进行距离向压缩。

(3) 第三种方案“建立参考通道及相移计算”: 同样建立参考通道, 参考信号通道长度 1m, 参考本振通道的长度为 0.5m。开关 1 掷向 A, 开关 2 掷向 A, 开关 3 掷向 A。参考通道外差信号经相移计算后, 再和目标通道外差信号二次外差探测和距离向压缩。

图 4 的 (a)(b)(c), 分别为非线性啁啾比例因子  $M = 2500$  时, 计算机仿真得到的三种工作模式距离压缩情况。

制比  $K$  随非线性比例  $M$  下降比较快, 说明在非线性啁啾较小的情况下, 三种方法均有较好抑制效果。非线性比例  $M < 3000$  也可作为选择可调谐激光器时, 对非线性啁啾这一重要性能的要求指标。

(3) 当  $M > 10000$  后, 三种方法抑制比基本饱和, 说明在非线性啁啾较大的情况下, 抑制情况不够理想。实际应用时, 应避免激光器在这个非线性啁啾范围内工作。

(4) 在抑制比  $K$  的饱和区内, 第一种方法的抑制比

最大,第二种方法其次,并接近第一种的值,第三种最小,说明第三种方法的抑制效果最好,第一种最差,第二种方法居中,且效果接近第一种。

(5)在抑制比  $K$  的饱和区,第一种方法的抑制比趋于定值 0.1,第二种方法约为 0.08,第三种约为 0.03,定值可认为是每种方法抑制比的极限值,即该方法最好的压缩情况。

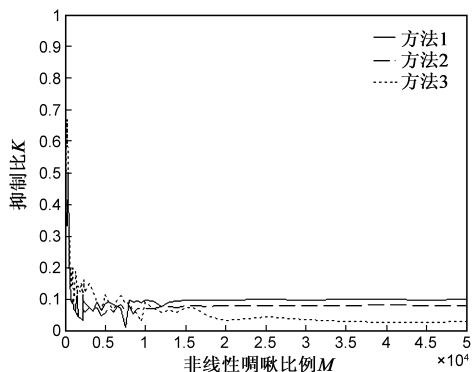


图5 三种方法的抑制比曲线

## 5 结论

本文提出了合成孔径激光成像雷达中等延时抑制非线性啁啾相位误差和非同步触发初始相位误差的原理,并在数学予以证明.在此原理的基础上,建立了一种实时观察调整方案,即在 SAIL 运动中观察外差信号并实时调整本振延时至合适长度,以达到预期效果.三种方案都需要目标的距离信息,以控制和调整本振光信号的延时.第一种方案的光学系统结构和算法最简单,对激光光源的相干性能要求低,但抑制结果不理想.并且由于本振臂直接参与信号输出,改变臂长时会丢失目标外差信号.第二种方法结构上较复杂,数据处理上增加了一个模拟或数字的处理器,抑制效果较好,但第一种方案的缺点仍然存在.第三种方案结构和算法比较复杂,对激光器相干性能要求高,抑制结果最好,并且通过算法而不是硬件上进行参考臂长的调整,具有一定优越性.但算法本身具有缺陷,提出者同时采用了锐度计算来改进相移传递精度,我们的改进方案将在另文中介绍。

## 参考文献:

- [1] L Lucke, L J Rickard, M Bashkansky, et al. Synthetic Aperture Ladar (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(35): 7621 – 7629.

- [3] Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture ladar[A]. J J Dolne, T J Karr, V L Gamiz. Unconventional Imaging IV[C]. Washington: SPIE, 2008. 70940F.
- [4] 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(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.  
Liu Liren. Synthetic aperture imaging ladar (IV): unified operation mode and two-dimensional data collection equation[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 1 – 6. (in Chinese)
- [5] 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描滤波校正算法的仿真与分析[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 47 – 54.  
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. (in Chinese)
- [6] 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.  
Lu Wei, Xu Nan, Liu Liren. Algorithm of matched filtering overcoming nonlinear chirp effect in synthetic aperture ladar [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 2011 – 2017. (in Chinese)
- [7] 周煜, 孙建锋, 栾竹, 刘立人. 尺度缩小合成孔径激光成像雷达的孔径合成实验[J]. 光学学报, 2008, 28(12): 2446 – 2448.  
Zhou Yu, Sun Jianfeng, Luan Zhu, Liu Liren. Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging ladar[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(12): 2446 – 2448. (in Chinese)
- [8] 周煜, 许楠, 栾竹, 孙建锋, 刘立人. 实验室合成孔径激光雷达点目标二维成像实验[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 566 – 568.  
Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu, Sun Jianfeng, Liu Liren. Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging ladar[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 566 – 568. (in Chinese)

## 作者简介:



许楠 女, 1981 年 3 月出生于河南省洛阳市. 中科院上海光学精密机械所博士研究生. 主要从事合成孔径激光成像雷达成像算法以及星间相干光通信关键技术的研究.  
E-mail: xunan@mail. siom. ac. cn

刘立人 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员、博士生导师. 主要从事光折变集成光学、星间激光通信和激光雷达等方面的研究. E-mail: lirenliu@mail. shcnc. ac. cn