

文章编号: 0253-2239(2010)03-0758-05

合成孔径激光成像雷达中非线性啁啾补偿算法的误差分析

许楠 刘立人 鲁伟

(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)

摘要 可调谐激光器产生的非线性啁啾相位误差会降低合成孔径激光成像雷达(SAIL)的距离向分辨率。已有的补偿算法中使用的相移公式存在估算误差,外差脉冲补偿方法也存在补偿误差。由理论推导得到适合于实际有限数据的相移公式,对理想相移公式产生估算误差的物理原因进行了分析。建立了条带扫描模式下星载 SAIL 的计算机仿真模型,并对两个相移公式的估算误差、整体补偿和逐一扫描滤波补偿两种方法的补偿误差进行了模拟。仿真结果验证了理论推导结论。最后,给出了减少 SAIL 非线性啁啾补偿算法中估算误差和补偿误差的方法。

关键词 合成孔径激光成像雷达;非线性啁啾;补偿算法;误差分析;距离向分辨率

中图分类号 TN958 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0758

Error Analysis of the Nonlinear Chirp Compensation Algorithm in Synthetic Aperture Imaging Ladar

Xu Nan Liu Liren Lu Wei

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The phase errors due to the nonlinear chirp of a tunable laser reduce the range resolution in synthetic aperture imaging ladar (SAIL). The compensating algorithm was developed. The estimation errors of the phase shifting function and the compensation errors of the traditional compensation algorithm must be eliminated. The theoretical derivation of the practical phase shifting function for finite data in practical application is established and the reason for the transfer errors of the theoretical phase shifting function is analyzed. The simulation model of the airborne SAIL working in strip map mode is established, and the simulation validates the derivation results. The method for reducing errors in the nonlinear chirp compensation algorithm is given finally.

Key words synthetic aperture imaging ladar (SAIL); nonlinear chirp; compensation algorithm; error analysis; range resolution

1 引言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)理论上可在几千公里的作用距离上用真实孔径为几米的天线达到厘米量级的成像分辨率。可调谐激光器发射的线性调频信号存在非线性啁啾,所产生的相位误差不仅加宽外差探测信号的拍频、降低距离向成像分辨率,

还会进一步影响方位向的分辨率。^[1]2002年,美国海军实验室通过建立与目标距离完全匹配的参考通道来抑制非线性相位的影响,但需获得目标的先验信息。^[2]随后,美国宇航局于2006年建立了一套利用非匹配通道和相移算法来补偿非线性相位的算法。^[3]利用频域相移公式可从参考通道测量到相位

收稿日期: 2009-07-17; 收到修改稿日期: 2009-08-12

作者简介: 许楠(1981—)女,博士研究生,主要从事星间相干光通信以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,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.shenc.ac.cn

误差得到目标通道相位误差的估算值。但由于理想相移公式的估算误差,又使用了锐化判据算法来提高相移精度。

从非线性啁啾补偿中的估算误差和补偿误差两方面进行分析,建立了完整的数学推导过程,得到了适用于实际应用中处理有限长度数据的相移公式,并对比理想相移公式,分析了产生估算误差的物理原因:开窗后的实际数据在理想相移公式中引入了 sinc 函数,改变了函数曲线并进一步改变了相移公式的传递特性,最终造成了相移误差。建立了条带扫描模式下星载合成孔径激光成像雷达的计算机仿真模型,对理想相移公式和实际相移公式在实际应用中的估算情况,以及整体补偿和逐一扫描滤波补偿两种补偿方法进行了仿真和比较,验证了理论结果。最后给出了降低非线性啁啾补偿误差的方法,

对合成孔径激光成像雷达中非线性啁啾补偿算法的改进有实际意义。

2 理论分析

2.1 估算误差

为研究估算误差产生的原因,进行实际传递公式的推导。无限周期发射相位误差的离散傅里叶变换可写为

$$\hat{\varphi}(m) = \mathcal{F}[\varphi(n)] = \sum_n \varphi(n) \exp(-2\pi n m / N), \quad (1)$$

其中 $\varphi(n)$ 为发射相位误差, m 为频域序号, n 为时域序号, N 为时域序号数。在实际应用中,处理的仅为 K 个周期的发射相位误差,则该有限长度相位误差的离散傅里叶变换式可写为

$$\hat{\varphi}(m) = \mathcal{F}\left[\varphi(n) \text{rect}\left(\frac{n - KT\gamma_s/2}{KT\gamma_s}\right)\right] = \sum_n \varphi(n) \exp(-j2\pi n m / N) * [KN \text{sinc}(KNm) \exp(-j\pi KNm)], \quad (2)$$

其中 rect 为矩形函数, γ_s 为距离向采样率, $*$ 为卷积计算。在合成孔径激光成像雷达的接收系统中建立非匹配通道用于记录短延期内产生的相位误差,目标(T)和参考通道(R)的相位误差可写为

$$\begin{cases} \varphi_T(n) \text{rect}\left(\frac{n - KT\gamma_s/2}{KT\gamma_s}\right) = [\varphi_{T-LO}(n) - \varphi_{T-S}(n)] \text{rect}\left(\frac{n - KT\gamma_s/2}{KT\gamma_s}\right) = \\ [\varphi(n - \gamma_s \tau_{T-LO}) - \varphi(n - \gamma_s \tau_{T-S})] \text{rect}\left(\frac{n - KT\gamma_s/2}{KT\gamma_s}\right) \\ \varphi_R(n) \text{rect}\left(\frac{n - KT\gamma_s/2}{KT\gamma_s}\right) = [\varphi_{R-LO}(n) - \varphi_{R-S}(n)] \text{rect}\left(\frac{n - KT\gamma_s/2}{KT\gamma_s}\right) = \\ [\varphi(n - \gamma_s \tau_{R-LO}) - \varphi(n - \gamma_s \tau_{R-S})] \text{rect}\left(\frac{n - KT\gamma_s/2}{KT\gamma_s}\right) \end{cases}, \quad (3)$$

其中 τ_{T-S} 为目标信号通道延时, τ_{T-LO} 为目标本振通道延时, τ_{R-S} 为参考信号通道延时, τ_{R-LO} 为参考本振通道延时。

使用(2)式,得到目标和参考通道相位误差傅里叶变换系数比例,即实际有限数据的相移公式

$$\frac{\hat{\varphi}_T(m)}{\hat{\varphi}_R(m)} = \frac{\mathcal{F}\left[\varphi_T(n) \text{rect}\left(\frac{t_n - KT/2}{KT}\right)\right]}{\mathcal{F}\left[\varphi_R(n) \text{rect}\left(\frac{t_n - KT/2}{KT}\right)\right]} = \frac{\{\exp[-j\pi m \gamma_s (\tau_{T-S} + \tau_{T-LO})/N] \sin[\pi m \gamma_s (\tau_{T-S} - \tau_{T-LO})/N]\} * [KN \text{sinc}(KNm) \exp(-j\pi KNm)]}{\{\exp[-j\pi m \gamma_s (\tau_{R-S} + \tau_{R-LO})/N] \sin[\pi m \gamma_s (\tau_{R-S} - \tau_{R-LO})/N]\} * [KN \text{sinc}(KNm) \exp(-j\pi KNm)]}. \quad (4)$$

(4)式和美国宇航局的理论相移公式相比^[3],在分子和分母中都卷积了一个相移 sinc 函数。由于该 sinc 函数的主瓣很小,实际相移公式和理想相移公式相比压缩了主瓣和旁瓣的宽度,峰值也增大。随着函数曲线的改变造成理论相移公式的传递特性改变:低通带宽降低,放大系数增大,因此在使用理想相移公式对有限长度相位误差进行计算时,所得

到的目标通道相位误差估算值将小于实际值。

2.2 补偿误差

在已有的非线性啁啾补偿算法中,通常以一个目标通道外差脉冲信号为单位进行相位误差的估算,再将相位误差恢复指数函数包络作为补偿函数,每个目标通道的外差脉冲信号乘以补偿函数的共轭实现非线性啁啾的补偿。但在实际应用中,光学足迹内通常

包含不止一个目标点,在当前时刻接收的目标外差脉冲信号中包含来自各个目标点的不同差频分量。因此,对整个外差脉冲信号进行相位误差估算,并用该估算值对整个脉冲进行补偿,并不能保证补偿精度。我们提出了一种逐一扫描滤波的相位误差补偿方法:通过建立非匹配参考通道和相移算法,对同一光学足趾内、不同目标点外差信号中的非线性相位误差进行估计,同时使用扫描滤波器根据不同拍频,从该脉冲外差信号中滤出来自不同目标点的外差信号分量,分别进行非线性啁啾补偿。和以往对外差脉冲进行整体相移计算和整体补偿的方法相比,能够更为精准的对非线性啁啾产生的相位误差进行补偿。详细数学流程和分析可参见文献[4]。

3 仿真模型

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。系统相关设计可参考文献[5~10]。搭载合成孔径激光雷达的卫星平台以 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。合成孔径激光雷达收发天线的口径 d 为 0.19 m,在目标平面上光学足趾直径 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。要求距离向成像分辨率为 10 cm,则啁啾带宽 B 为 2.1×10^9 Hz,对应波长扫描范围 $\Delta\lambda$ 为 0.0168 nm,则有波长扫描率 $\dot{\lambda}$ 为 2154 nm/s,啁啾速率 \dot{f} 为 2.69×10^{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 10 个周期进行外差探测,则目标通道外差信号差频的中心频率 f_0 为 210 MHz,等效延时 $\Delta\tau_0$ 为 0.78 μs ,对应等效中心距离 R_{equ} 为 117 m。参考信号通道的长度为 1 m,目标和参考通道的本振通道长度均为 0.5 m。

当前光学足趾内的目标点如图 1 所示,目标点 I,II 在目标平面 (α, β) 上坐标分别为 (5 m, 5 m), (-5 m, -5 m),在与目标平面夹角 45° 垂直平面 (x, y, z) 上坐标分别为 (3.535 m, 5 m, 3.535 m), (-3.535 m, -5 m, -3.535 m)。

图 2 为计算机仿真流程,目标通道中的回波信号和本振信号进行相干探测,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。同时,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

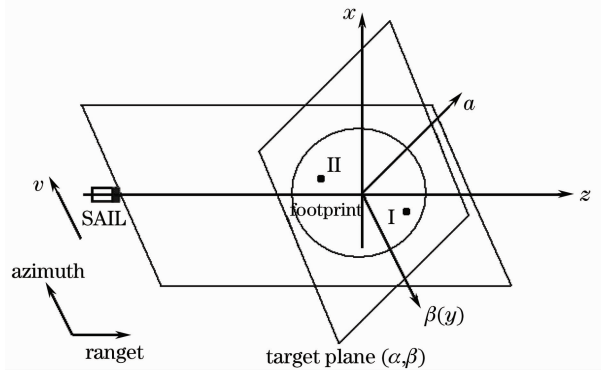


图 1 目标坐标系

Fig. 1 Coordinate systems

进行解包络,得到参考通道相位。将估计值恢复为指数函数包络形式,作为目标通道的距离向补偿函数。利用参考通道得到目标通道距离向补偿函数的共轭,与目标点外差信号相乘,对距离向进行相位补偿,补偿后的外差信号进行距离向脉冲压缩,得到距离向压缩图像。可闭合开关 S_1 至 B,同时闭合开关 S_2 ,选择使用扫描滤波器对目标脉冲外差信号中不同目标点的外差信号进行滤波,并利用目标通道扫描滤波器的参数对不同目标点分别进行相移计算和补偿。也可闭合开关 S_1 至 A,同时将开关 S_2 置空,即不使用扫描滤波器,对整个脉冲进行相移和补偿。

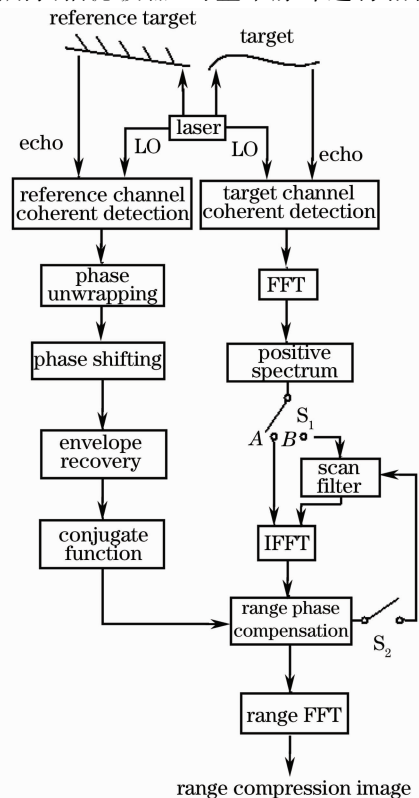


图 2 仿真流程

Fig. 2 Simulation flow chart

4 仿真结果和讨论

为简化计算,目标点反射率取 1,所有电信号幅值取 1。

图 3 为有限(10 个)周期的实际相移公式和理想相移公式的曲线。可见实际相移公式的零频峰值明显高于理想传递函数,主瓣和旁瓣宽度也有明显压缩,与理论推导结论一致。

相移计算的估算误差定义为:实际相位误差和估算相位误差的差值与估算相位误差之间的比例。

图 4 为目标点 I,II 经两相移公式的相移结果和估算误差。可以看出用实际相移公式得到的相位误差估算值更接近实际值,估算误差更小,传递精度更好。

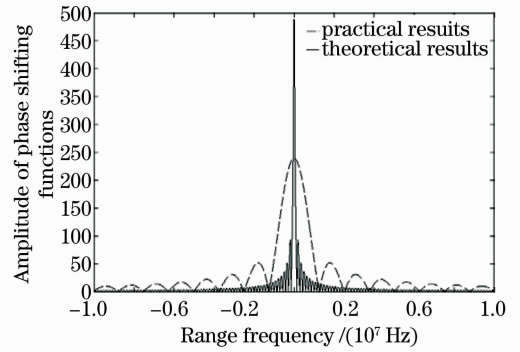


图 3 理想传递函数和实际传递函数的包络图
Fig. 3 Transfer functions for infinite and finite

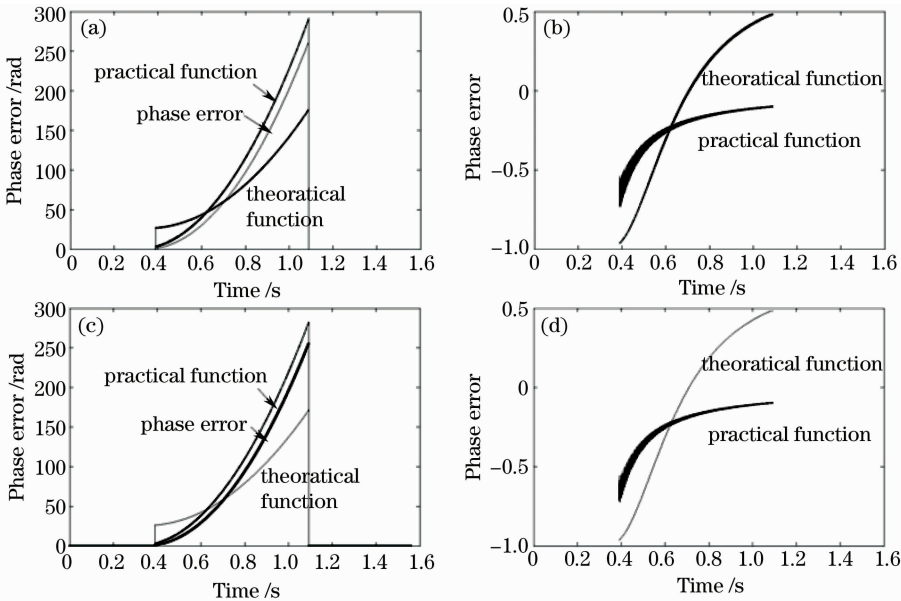


图 4 两相移公式对目标点 I(a,b),II(c,d)的相位误差估算值以及估算误差

Fig. 4 Phase shifting results and estimation errors of target point I (a,b) and II (c,d)

在非线性比例 $M=3000$ 时,目标通道距离压缩频谱如图 5(a)。可见,受非线性啁啾影响,目标点 I 和 II 在距离向都有展宽,使得两目标点几乎无法区分。先使用理想相移公式对两个目标点的相位误差分别进行估算,补偿后的距离压缩频谱如图 5(b)所示。再利用实际相移公式分别估算,得到补偿后的距离频谱如图 5(c)所示。可见使用实际相移公式估算值补偿后的距离向脉宽更窄,分辨率更高。

定义脉宽 B 为距离压缩脉冲的半高全宽,非线性啁啾抑制比 R 为补偿前后距离向带宽之差和补偿前距离向带宽之比

$$R = \frac{B_{uncomp} - B_{comp}}{B_{uncomp}} \quad (5)$$

补偿前的目标距离向带宽为 $B_{uncomp} = 2.5638$ MHz,使用理想相移公式对两目标点的相位

误差分别补偿后的距离向带宽为 $B_{comp} = 0.51276$ MHz,则非线性抑制比 $R = 0.8$ 。使用实际相移公式补偿后的距离向带宽 $B_{comp} = 0.25638$ MHz,非线性啁啾抑制比 $R = 0.9$ 。抑制比的提高说明实际相移公式对相位误差的估算更精确,配合使用扫描滤波器对足趾内各目标点的相位误差分别补偿,可进一步提高补偿精度,有效抑制非线性啁啾。

5 结 论

研究了合成孔径激光成像雷达非线性啁啾补偿算法中存在的误差,包括估算误差和补偿误差。由理论推导给出了适用于有限长度数据的相位误差传递公式,并分析了理想传递公式引起估算误差的物理原因。以星载合成孔径激光成像雷达为模型进行

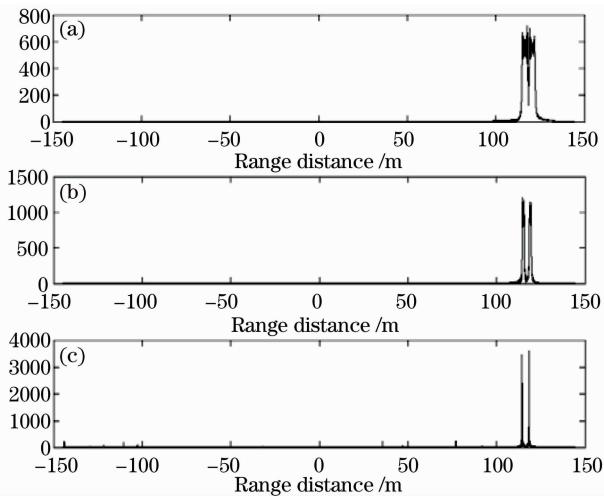


图 5 目标通道补偿前(a),使用理想相移公式(b)和实际相移公式(c)补偿后的距离向频谱

Fig. 5 Range spectrums of the target channel (a), the compensated range spectrums of ideal function (b) and practical function (c)

了计算机仿真模拟,比较了两个相移估算误差、以及配合逐一滤波补偿方法的压缩效果。仿真结果验证:使用逐一扫描滤波器对足趾内各目标点的非线性误差分别使用实际传递公式进行估算和补偿,可有效减小非线性啁啾补偿中的估算误差和补偿误差,提高距离向分辨率。

参 考 文 献

1 Xu Nan, Liu Liren, Lu Wei. Compensation of nonlinear chirp in synthetic aperture imaging lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(4): 22~27

- 许楠,刘立人,鲁伟.合成孔径激光成像雷达中的非线性啁啾补偿[J].*激光与光电子学进展*, 2009, **46**(4): 22~27
- 2 M. Bashkansky, R. L. Lucke, E. Funk *et al.*. Two dimensional synthetic aperture imaging in optical domain[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1983~1985
- 3 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
- 4 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.合成孔径激光成像雷达中非线性啁啾逐一扫描滤波器校正算法的仿真与分析[J].*光学学报*, 2009, **29**(1): 47~54
- 5 Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture lidar[C]. *SPIE*, 2008, **7094**: 7094F1~F13
- 6 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
- 7 Liu Liren. Synthetic-aperture lidar (II): satial 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
- 8 Liu Liren. Synthetic aperture lidar (III): circulated duplex telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1405~1410
- 刘立人.合成孔径激光雷达(III):双向环路发射接收望远镜[J].*光学学报*, 2008, **28**(7): 1405~1410
- 9 Liu Liren. Synthetic aperture imaging lidar (IV): unified operation mode and two-dimensional data collection equation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 1~6
- 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
- 10 Liu Liren. Synthetic aperture imaging lidar (V): imaging resolution and antenna aperture function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1408~1415
- 刘立人.合成孔径激光成像雷达(V):成像分辨率和天线孔径函数[J].*光学学报*, 2009, **29**(5): 1408~1415