

经过改进的差分合成孔径激光雷达对振动的抑制

张鸿翼, 李飞, 徐卫明, 舒嵘

(中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电系统技术实验室, 上海 200083)

摘要:合成孔径激光雷达(SAL)是遥感领域的研究热点. 振动是 SAL 系统中较为突出的问题. 根据之前的研究结果, SAL 对垂直航向的线振动比较敏感. 为了抑制振动带来的相位误差, 根据差分合成孔径雷达(DSAL)实现振动抑制的原理, 提出了在距离向上交错放置的两个接收镜头实现差分接收的方案, 从原理上分析了这种交错结构的 DSAL 系统对线振动和角振动的抑制能力, 并分析了角振动对抑制效果的影响. 采用实测的 POS 数据对抑制能力进行仿真可以看到, 这种交错结构对线振动和角振动有较好的抑制效果. 该结论为在工程中实现 SAL 成像的振动抑制提供了理论基础和系统选择方案.

关键词:遥感; 差分合成孔径激光雷达; 交错结构; 线振动; 角振动; 抑制

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Suppression of the vibration effect in the ladar with differential synthetic aperture

ZHANG Hong-Yi, LI Fei, XU Wei-Ming, SHU Rong

(Space Active Electronic-Optical Systems Laboratory, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Synthetic Aperture Ladar(SAL) is the focus of remote sensing research in recent years with vibration as an important issue in this system. According to the research before, SAL is sensitive to the cross-trace line vibration. In order to eliminate the phase error brought by vibration, the staggered structure of two sub-apertures along range direction was proposed according to the principle of differential synthetic aperture ladar (DSAL). Using the measured POS data, the ability of eliminating the effect of line vibration of this staggered structure was analyzed in principle. Analysis was also made about the effect of angle vibration on this structure. The results show that the structure can eliminate the effect of line vibration as well as angle vibration. The results provide theoretical foundation and system choice for vibration elimination in SAL imaging in practice.

Key words: remote sensing, DSAL, staggered structure, line vibration, angle vibration, elimination

PACS: 42.68.Wt

引言

合成孔径激光雷达(SAL)是激光雷达与合成孔径雷达交叉的产物, SAL 载波采用的激光波长在微米量级, 理论上成像分辨率可以达到亚毫米量级. 具有成像结果更符合人眼观察习惯的优点, 代表了新一代高分辨率成像雷达的发展方向. 美国洛克马丁公司于 2011 年完成了基于相位编码体制的合成孔径激光雷达飞行实验, 达到了 5 cm 的分辨率^[1].

“运动是合成孔径技术的依据, 也是产生问题

的根源”^[2], 由于 SAL 采用激光作为载波, 波长短于微波 3-4 个量级, 对平台振动更加敏感. 对机载平台, 如果按照一步一停模式分析, 在一个步长内, 振动带来的光程变化将大于激光波长^[3], 对平台振动问题的分析和抑制对于实现机载合成孔径雷达有重要意义. 但是虽然近年来合成孔径激光雷达实验室研究较多, 但是对平台振动问题的分析较少. 文献[4]采用一个简单的模型定性地讨论了线振动对成像的影响, 而文献[5]则在文献[4]基础上进行了进一步的定量研究, 对单频率平台振动模型进行了仿

收稿日期: 2014-09-04, 修回日期: 2014-12-22

基金项目: CAS supported projects (2014AA7100012)

Foundation items: Special funds for major national projects (2013ZX01011001)

作者简介 (Biography): 张鸿翼 (1988-), 男, 山西太原人, 中国科学院大学在读博士, 主要从事合成孔径激光雷达研究. E-mail: zhanghongyi3432@sina.com

Received date: 2014-09-04, revised date: 2014-12-22

真,得到研究结论:线振动的峰值加速度是直接和图像模糊程度相关的量,存在峰值加速度阈值,大于该阈值则图像开始变得模糊,而且振动初相位对图像质量恶化也有影响.文献[6]基于文献[5]的工作从另一个角度研究了线振动对 SAL 成像的影响,得到了如下结论:线振动对 SAL 的影响主要表现为垂直航线合振动的影响,沿航线的影响可以忽略;振动影响主要是对方位向的影响,对距离向的影响可忽略.文献[7]则初步研究了角振动对 SAL 成像的影响,根据角振动引起的成对回波进行了分析和仿真,对平台角振动的影响进行了理论分析,以单频角振动建模仿真了角振动带来的成对回波现象,主要侧重点是角振动带来的回波能量起伏对压缩结果的影响,角振动对光程的变化带来的影响并未做深入分析.综合而言国内目前对平台振动的研究工作主要是分析与仿真,尚未提出对 SAL 平台振动抑制的方法,而角振动的影响也有待更深入的研究.

本文作为对文献[6]与[7]工作的延续,基于差分合成孔径激光雷达系统(DSAL)抑制平台振动的原理,提出一种易于实现的差分接收结构;分析了基于角振动带来的光程变化对这种 DSAL 系统的影响,加入符合国家军用标准的线振动数据和基于实测飞行实验的角振动 POS 数据对 DSAL 系统的平台振动抑制能力进行了仿真验证.

1 差分合成孔径雷达的原理分析

平台振动对 SAL 系统的影响主要体现在方位向平台振动对光程变化的影响.理想状态下,对于单一目标,飞机在一个合成孔径长度内光程是按照如下规律变化的:

$$R_n(t_m) = \sqrt{R_s^2 + (X_n - Vt_m)^2} \quad , \quad (1)$$

其中 t_m 是慢时间, R_s 是光束平面上垂直于航迹的长度, X_n 是点目标在飞机飞行的方位向上的投影位置,若是正侧式则 X_n 为 0, V 为飞行速度.根据公式

$$\varphi_{\text{exp}}(t_m) = \frac{4\pi f_c}{c} R_n(t_m) \quad . \quad (2)$$

我们可以计算出来光程的变化,其中 f_c 为载波频率.经过简单的近似可以将相位变化近似为:

$$\varphi_{\text{exp}}(t_m) \approx \frac{4\pi f_c V}{c R_s} \left(X_n t_m - \frac{V t_m^2}{2} + a \right) \quad . \quad (3)$$

如果考虑到线振动的影响,则需要在式(3)中添加线振动误差,关于振动误差的分析表达在文献[6]中有比较详细的分析,这里将振动带来的相位误差加入到式(3)中,得到的相位变化表示为:

$$\varphi(t_m) = \frac{4\pi f_c V}{c R_s} \left(X_n t_m - \frac{V t_m^2}{2} + a \right) + \varphi_v(t_m) \quad , \quad (4)$$

式中, $\varphi_v(t_m)$ 为平台振动带来的相位误差.由文献[5]的分析可知, $\varphi_v(t_m)$ 的幅度较大,一个步长内对 $\varphi(t_m)$ 的影响远大于 $2\pi \text{rad}$, 很难用传统的方法进行补偿.

DSAL 是从系统设计的方面来解决平台振动问题,是差分思想在雷达领域的体现:利用两个焦点在方位向上依次排布着的两个接收镜,发射镜在两个接收镜之间,从发射镜到两个接收镜之间的光程差符合理想状态下一个步长内光程发生的变化.可以认为两个接收镜受到的由振动和大气湍流带来的光程变化是一样的,这样可将振动和湍流带来的相位畸变部分差分掉,还原出理想状态下的方位向数据^[8].

具体的分析如下:假设在顺轨方向上发射镜头到两个接收镜头(L 镜头与 R 镜头)之间的距离为,参考式(1)、(2)的结论,将两个接收镜在方位向上接收到的相位表示为:

$$\begin{aligned} \varphi_l(t_m) = & -\frac{2\pi f_c}{c} \left[\sqrt{R_s^2 + (x_n - \Delta D - Vt_m)^2} \right] \\ & -\frac{2\pi f_c}{c} \left[\sqrt{R_s^2 + (x_n - Vt_m)^2} + \varphi_v(t_m) \right] \quad , \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_r(t_m) = & -\frac{2\pi f_c}{c} \left[\sqrt{R_s^2 + (x_n + \Delta D - Vt_m)^2} \right] \\ & -\frac{2\pi f_c}{c} \left[\sqrt{R_s^2 + (x_n - Vt_m)^2} + \varphi_v(t_m) \right] \quad , \quad (6) \end{aligned}$$

其中 $\varphi_v(t_m)$ 表示 t_m 时刻来自于平台振动带来的方位向相位的畸变.由于两个镜头非常靠近,可以认为振动对其光程的影响导致的相位畸变是一样的.

而 ΔD 满足这样的关系:

$$\Delta D = V\Delta t \quad , \quad (7)$$

其中 Δt 表示方位向时间的步长.这样 L 镜头与 R 镜头之间的相位差表示为:

$$\Delta \varphi d_n = -\frac{4\pi f_c}{c} \cdot \frac{V(x_n - Vt_m)}{R_s} \Delta t \quad . \quad (8)$$

而理想状态下,飞行一个步长带来的光程差为:

$$\Delta \varphi_n = -\frac{4\pi f_c}{c} \cdot \frac{V(x_n - Vt_m)}{R_s} \Delta t \quad . \quad (9)$$

DSAL 系统中前后两个接收镜所接收到的光程差等于理想状态下飞机飞行一个步长带来的光程差.在理想状态下,靠近飞机飞行方向的孔径得到的相位数据等于后一个镜头下一时刻得到的数据,而

在受到干扰的情况下,它们之间的相位梯度和理想状况下是一样的,我们可以根据前后两个接收镜头的相位梯度累加还原出理想状态下目标回波的相位变化轨迹.

从理论上分析 DSAL 系统可以消除振动带来的相位变化,但是在工程实现中存在一个突出的问题就是接收镜头的间距较难实现:按照式(7)计算,以 $V=60$ m/s, PRF 为 30 kHz 的典型值计算,为 2 mm,也就是两个接收镜头的焦点在方位向上距离应该为 4 mm,而激光雷达的接收口径一般达到几百 mm. 而使用离轴望远镜由于调整角度过小,难以实现.

为了在工程中实现 DSAL 系统,对接收系统进行了如下调整:前后两个镜头在方位向上相距还是 2 倍,但是在距离向上两个镜头交错放置,以接收镜头大小为 400 mm,步长为 2 mm 为例:

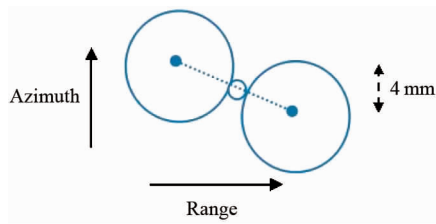


图1 接收镜头结构示意图

Fig. 1 Diagram of receiving scene of the DSAL

如图所示,在方位向上两个镜头之间的距离为理想 2 倍,而在距离向两个镜头分开一定距离,发射镜头位于接收镜头之间,由于接收孔径 $D_{ape} \gg$,所以可以将距离向两个镜头之间的距离近似为 D_{ape} .

对这种结构的接收镜,式(4)和(5)将做出如下修改:

$$\begin{aligned} \varphi l_n(t_m) = & -\frac{2\pi f_c}{c} \left[\sqrt{R_{ls}^2 + (x_n - \Delta D - Vt_m)^2} \right] \\ & - \frac{2\pi f_c}{c} \left[\sqrt{R_s^2 + (x_n - Vt_m)^2} + \varphi_{lv}(t_m) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \varphi r_n(t_m) = & -\frac{2\pi f_c}{c} \left[\sqrt{R_{rs}^2 + (x_n + \Delta D - Vt_m)^2} \right] \\ & - \frac{2\pi f_c}{c} \left[\sqrt{R_s^2 + (x_n - Vt_m)^2} + \varphi_{rv}(t_m) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\varphi_{lv}(t_m) \approx \varphi_{rv}(t_m) \quad (12)$$

其中 R_{ls} 与 R_{rs} 分别表示前后两个镜头与目标在垂直于航线方向上的距离:

$$R_{ls} = \sqrt{\left[R_s \cos(\psi) + \frac{D_{ape}}{2} \right]^2 + R_s \sin(\psi)} \quad (13)$$

$$R_{rs} = \sqrt{\left[R_s \cos(\psi) - \frac{D_{ape}}{2} \right]^2 + R_s \sin(\psi)} \quad (14)$$

上式中 ψ 是侧视角角度. 可以看到 R_{ls} 与 R_{rs} 为常数,不会随着时间变化. 对式(10)和(11)求相位差,可以推导:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_d(t_m) &= \varphi r(t_m) - \varphi l(t_m) \\ &= -\frac{2\pi f_c}{c} \left(\sqrt{R_{rs}^2 + (x_n + \Delta D - Vt_m)^2} - \left(\sqrt{R_{ls}^2 + (x_n - \Delta D - Vt_m)^2} \right) \right) \\ &= -\frac{2\pi f_c}{c} \left(\frac{R_{rs}^2 + (x_n + \Delta D - Vt_m)^2 - R_{ls}^2 - (x_n - \Delta D - Vt_m)^2}{\sqrt{R_{rs}^2 + (x_n + \Delta D - Vt_m)^2} + \sqrt{R_{ls}^2 + (x_n - \Delta D - Vt_m)^2}} \right) \\ &= -\frac{2\pi f_c}{c} \left(\frac{R_{rs}^2 - R_{ls}^2 + 4\Delta D(x_n - Vt_m)}{\sqrt{R_{rs}^2 + (x_n + \Delta D - Vt_m)^2} + \sqrt{R_{ls}^2 + (x_n - \Delta D - Vt_m)^2}} \right) \quad (15) \\ &\approx -\frac{2\pi f_c}{c} \left(\frac{R_{rs}^2 - R_{ls}^2 + 4\Delta D(x_n - Vt_m)}{R_{rs} + R_{ls}} \right) \\ &= -\frac{2\pi f_c}{c} \left[(R_{rs} - R_{ls}) + \frac{4V(x_n - Vt_m)}{R_{rs} + R_{ls}} \Delta t \right] \\ &= -\frac{2\pi f_c}{c} \left[(R_{rs} - R_{ls}) + \frac{2V(x_n - Vt_m)}{R_s} \Delta t \right] \end{aligned}$$

对比式(15)和式(9)可以看出,采用在距离向上交错的差分镜头恢复出来的相位梯度和理想情况下的相位梯度相比多了一个常数项: $-\frac{2\pi f_c}{c} (R_{rs} - R_{ls})$, 在累计相位梯度之后得到的相位会引入关于慢时间变化的一次项:

$$\varphi_{rcv}(t_m) = \frac{4\pi f_c V}{cR_s} \left(x_n t_m - \frac{Vt_m^2}{2} \right) + \frac{2\pi f_c V}{cR_s} \left(\frac{R_{rs} - R_{ls}}{\Delta t} \right) t_m + a \quad (16)$$

上式中第二项就是由于差分孔径在距离向交错形成的一次项误差,在匹配滤波之前可以进行补偿.

从理论上分析,在距离向上交错的接收镜头是可以实现理想 DSAL 功能的,但是需要进行一次项补偿.

2 角振动影响分析

文献[7]中主要是分析了线振动的影响,线振动的一些结论可以在分析角振动情况下套用. 由于 DSAL 交错镜头系统的特殊性,在距离向上镜头之间有较大的距离,需要单独分析侧滚角对 DSAL 交错镜头系统的影响.

下图为飞行过程中角振动的示意图,分别标出了俯仰角、航向角与侧滚角,在成像过程中,距离向垂直于飞机航向,沿着机翼方向,方位向沿着飞机航向.

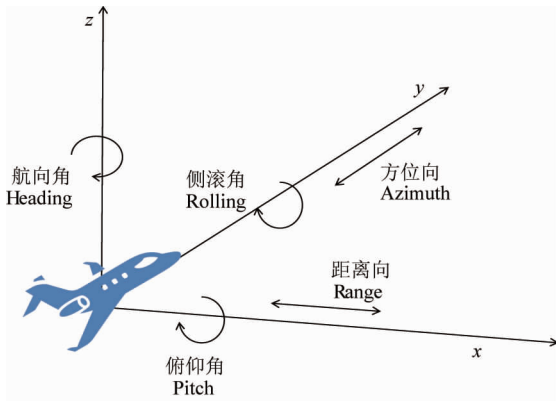


图2 角振动示意图

Fig. 2 Diagram of angular vibration

一般情况下,角振动的影响体现在光程差的变化上,方位向交错镜头的 DSAL 系统中,由于两个接收镜在距离向上交错分布,侧滚角和航向角对接收镜相对于目标的位置会产生较大影响.这里可以套用线振动的结论:侧滚角和航向角对成像的影响较大,俯仰角对成像影响较小.

经过对实测数据的仿真分析,航向角变化角度不大,带来飞机航线的变化与侧滚角带来的变化相比较小,对成像效果的影响与线振动类似可以忽略.而侧滚角相对角度变化较大,对成像效果的影响不可忽略.具体仿真结果下一章中给出.

2.1 角振动带来的光学脚印的位置变化

角振动带来的影响会体现在光学脚印的变化上:理想情况下,光学脚印在地面的变化应该是呈一条直线沿着航线移动,实际情况由于角振动的影响,光学脚印在地面会呈现一定偏移,如果角振动较大,在一个孔径时间内,垂直于航向的偏移量超过一个距离门则会带来无法补偿的距离徙动,对成像造成较大影响.

这里采用在一次机载实验中的角振动数据进行分析,通过绘制飞行过程中地面的光学脚印位置的变化定量的确定角振动带来的影响.飞行参数:运 5 飞机,平直飞行,飞行高度为 1.2 km,速度为 60 m/s.地面脚印位置和距离门的变化如下所示,这里假设距离门为 5 cm.

由图中可以看出,沿方位向飞行 18 m 在地面光斑的偏移会达到 0.4 m,孔径合成时间的典型值为 1 m,而距离门典型值为 5 cm,也就是说,可以认为在一个孔径时间内,由于角振动带来的光学脚印变化在一个距离门以内,所以角振动带来的距离徙动问题还不是很突出.在这样的条件下,角振动的影响主

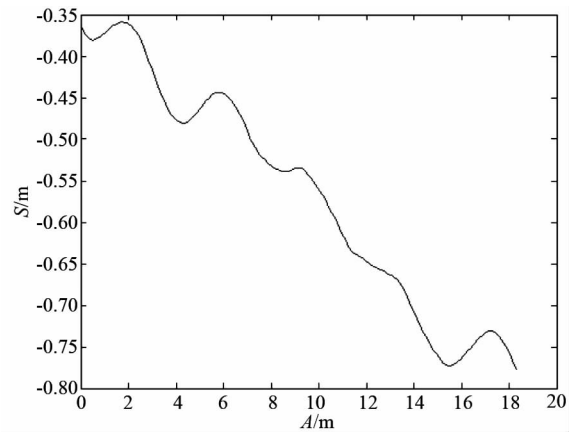


图3 一段飞行距离中光学脚印中心在地面位置的变化

Fig. 3 The position change of the footprint during a flight distance

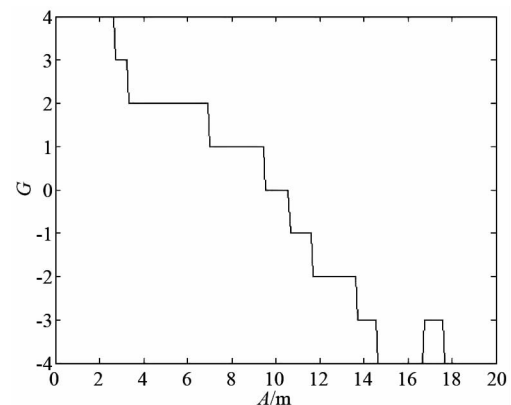


图4 一段飞行距离中距离门的变化

Fig. 4 The change of the range gate during a flight distance

要体现在光程的变化上,其影响可以按照式(10)与(11)中的最后一项表示.

采用的实测数据飞行高度为 1.2 km,飞机角振动在这个高度对的光学脚印的影响并不是很大,但是随着飞行高度增加,角振动对光学脚印的影响会增大.另一方面,侧滚角的度数和飞机型号关系较大,这里采用的 POS 数据来自于运 5 运输机,根据经验该型号运输机侧滚角较大.

所以角振动对带来的距离徙动问题的定量分析需要更精确的数据研究.可以得到结论,角振动在 1.2 km 处带来的光学脚印变化在允许范围内.

2.2 角振动对 DSAL 系统的影响

在使用距离向上交错的差分镜头在距离向上有一定的间隔,约等于 D_{ape} ,由于这个值通常在几百 mm 量级,式(12)的近似条件未必成立,主要原因是两个接收镜头在距离向上的间隔会导致差分性的降低.如图 2 所示,角振动可归为航向角,侧滚角以及

俯仰角,航向角的影响本质上就是航线偏移,可以当作是沿距离向的线振动分析。

飞机俯仰角的影响是沿着方位向,由于两个镜头在方位向距离较小,以典型值 4 mm 计算,实测 POS 数据表示俯仰角在一个孔径时间内的变化 10^{-4} rad 量级,这个量级的变化,在 4 mm 距离内造成的位置变化大概为 10^{-7} m 量级,而且根据文献[7]中的结论进行简单估算,这个量级的光程变化对压缩结果的影响很小,基本可以忽略。

如图 2,侧滚角是沿着飞行方向旋转的角度变化.两个接收镜头在距离向有较大的距离,相较于俯仰角而言,侧滚角对差分性的影响更大,侧滚角使两个接收镜头之间光程变化不一致, $\varphi_r(t_m)$ 与 $\varphi_l(t_m)$ 不相等,在累积相位梯度时会将二者的误差累积进去,对压缩造成影响.下面就实测 POS 数据对飞机侧滚角的影响进行定量分析.飞行参数参照 3.1 节,其中一段侧滚角变化如下图。

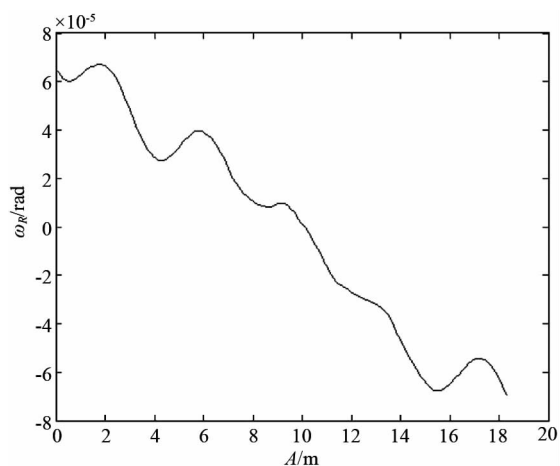


图 5 一段飞行距离内侧滚角的变化
Fig. 5 The change of Roll in a flight distance

从图中可以看出,在 18 m 的飞行距离内,侧滚角的变化约为 10^{-4} rad,其中角速度变化最大为 $\omega_{\max} \approx 0.1$ rad/s,我们假设 $D_{\text{ape}} = 0.4$ m,则一个步长范围内两个镜头之间相对位置的变化为:

$$\Delta D_{mv_{\max}} = \frac{R_{\text{step}} \omega_{\max} D_{\text{ape}}}{V}, \quad (17)$$

其中 R_{step} 表示方位向的步长,经过计算可知 $\Delta D_{mv_{\max}} = 1.3 \times 10^{-6}$ m,而波长为 $1.5 \mu\text{m}$,显然,由于侧滚角带来的振动是不可以忽略的,必须在信号处理过程中加以补偿。

由于侧滚角振动带来的相位与一个步长的相位梯度基本处于一个量级,可以通过相位累计方法将

相位的变化较为完整的恢复出来,之后可以用多普勒参数估计或者其他方法补偿侧滚角的影响;

如果不采用 DSAL 系统,线振动和角振动带来的光程变化在一个步长范围内远大于波长,利用相位解缠绕技术也无法恢复出来相位的变化趋势.即使采用多普勒参数估计的方法也无法实现补偿。

3 仿真结果与分析

这里以机载平台为例:激光波长为 1 550 nm,接收孔径 $D_{\text{ape}} = 400$ mm,目标到平台距离为 3 km,平台运动速度为 60 m/s,脉冲重复频率为 PRF = 30 kHz,信号带宽为 3 GHz,目标为单点数据.分别将线振动和角振动加入到飞行过程中,DSAL 接收镜头均采用在距离向上交错的模式。

3.1 DSAL 系统对线振动的抑制效果仿真

采用文献[6]中线振动的表示方式,Y 方向和 Z 方向线振动参数分别为 0.2_50_60 和 -0.2_50_60,这也是在文献[7]中加入的线振动方式,采用单点目标进行仿真可以看出,该参数的振动在方位向上无法聚焦:

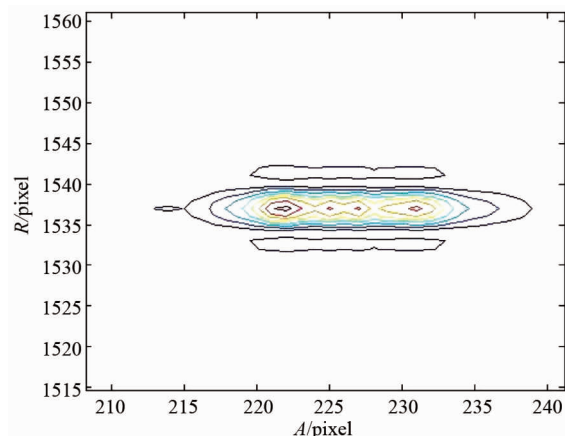


图 6 未使用 DSAL 系统,加入线振动的等高线图
Fig. 6 Contour of the point with line vibration without using DSAL system

通过两个图的对比可以看出,DSAL 系统对于加入线振动数据的方位向补偿效果是很明显的.使用传统方法无法补偿的数据通过差分镜头的接收之后可以比较完好的实现压缩。

3.2 DSAL 系统对航向角与俯仰角的抑制效果仿真

根据上文的分析,俯仰角与航向角对压缩结果的影响可以等同于线振动,俯仰角在方位向上影响较小,可以忽略,但是航向角的影响较大,在对实际光程影响效果上可以认为是线振动,可以用 DSAL

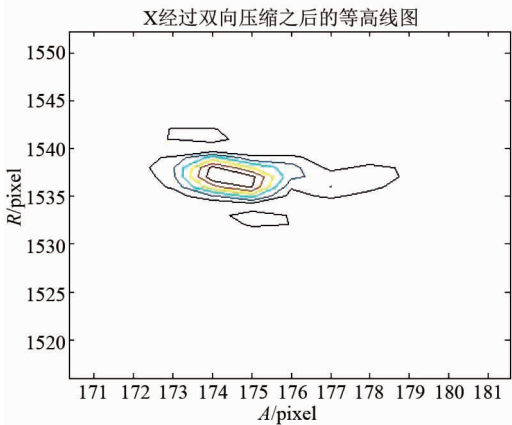


图 7 使用 DSAL 系统加入线振动的等高线图
Fig. 7 Contour of the point with line vibration using DSAL system

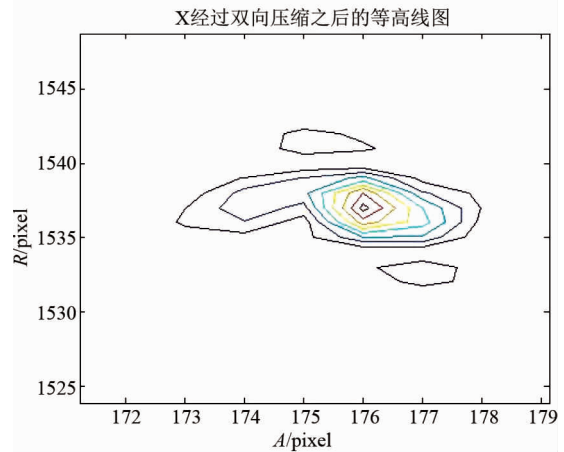


图 9 使用 DSAL 系统,加入航向角和俯仰角的等高线图
Fig. 9 Contour of the point with Course angle and pitch angle added, using DSAL system

来补偿:

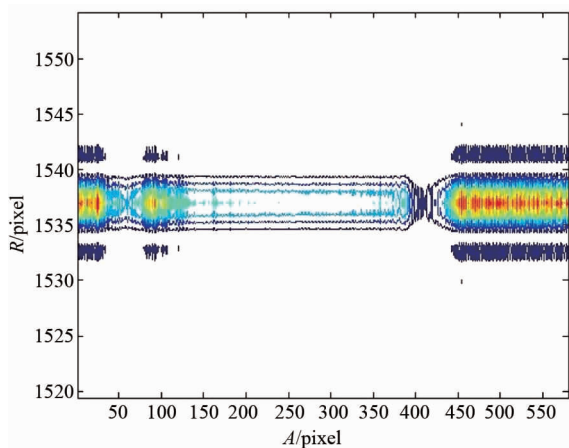


图 8 未使用 DSAL 系统,加入航向角与俯仰角的等高线图
Fig. 8 Contour of the point with Course angle and pitch angle added, without using DSAL system

了可能:

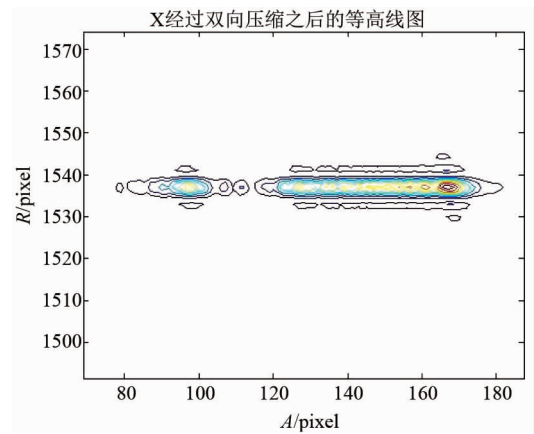


图 10 加入侧滚角之后 DSAL 成像的等高线图
Fig. 10 Contour of the points with Roll angle added, using DSAL system

从图 8 分析,航向角振动带来的光程的变化远大于线振动,对相位的污染更为严重,无法直接压缩;从图 9 可以看出,DSAL 系统对于航向角变化的抑制作用是比较明显,可以压缩为单点. 所以航向角与俯仰角也是可以由 DSAL 系统进行抑制的.

3.3 DSAL 系统对侧滚角的抑制效果仿真

由第三章内容分析,由于交错镜头设计导致接收镜头在距离向上相距较大,对侧滚角比较敏感,侧滚角带来的两个镜头之间按的光程变化使得恢复的相位信号受到污染,但是由于侧滚角带来的变化不大,得到的相位是可以解缠绕之后得到相位变化趋势的. 这样也就为使用参数估计的方法去补偿提供

可以看出,由于侧滚角的影响,由两个接收孔径接收到的相位差的累加与理想状态下的相位变化有了较大的差别:

有图 9 和图 10 的对比可以看到,侧滚角对 DSAL 的压缩结果造成了较大影响;但是带来的相位污染并没有达到无法解缠绕的地步,如图 11 所示. 很大程度上保持了相位变化的趋势,这也为基于参数估计的补偿提供了可能,而图 12 则是不采用 DSAL 系统接收到的相位变化图,可以看出,图 12 中一个孔径时间内相位变化过于剧烈,经过解缠绕也无法看到相位变化趋势,进行参数估计也就无从谈起. 在进一步的工作中,可以在 DSAL 系统的基础上利用参数估计等方法对侧滚角带来的相位污染进

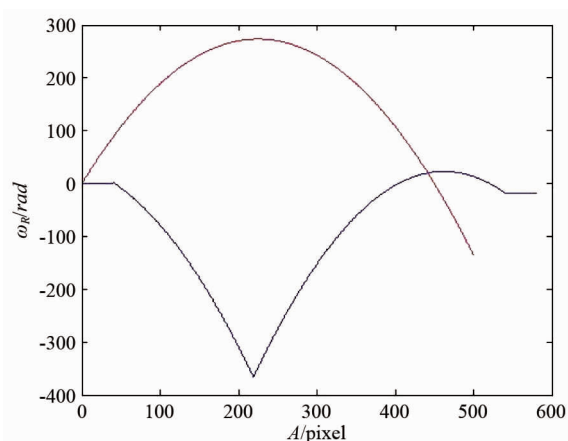


图 11 加入侧滚角的 DSAL 系统相位变化与理想相位变化的对比

Fig. 11 The comparison of phase change between DSAL system with Roll angle added and that under ideal condition

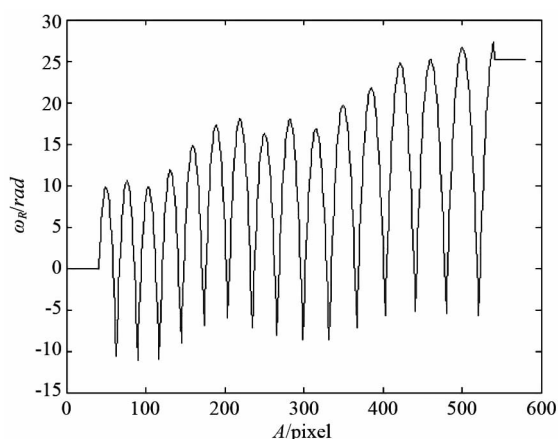


图 12 加入侧滚角不采用 DSAL 系统时一个孔径时间的相位变化

Fig. 12 The phase change in a length of synthetic aperture with Roll angle added and without DSAL system

行抑制,实现理想的压缩效果.这项工作将在新的文章中进行阐述.

4 结语

合成孔径激光雷达对平台振动问题很敏感,文献[7]分析了线振动对 SAL 相位中心带来的误差影响,本文作为对文献[7]工作的延续,对文献[8]中提出的 DSAL 系统进行了适用于工程化的改进:将两个接收镜头在距离向上交错开,使得 DSAL 系统可以用较大的接收镜头实现.在距离向上交错的接收镜头对线振动的抑制能力进行了理论分析和仿真,主要分析了侧滚角与航向角对距离向上交错的接收镜头的影响,得到结论:采用距离向上交错的

DSAL 系统可以抑制线振动的相位误差;对航向角带来的相位误差也可以抑制;侧滚角带来的相位误差 DSAL 系统可以起到一定的抑制作用,为基于参数估计方法的相位误差补偿提供了可能.仿真结果还表明,侧滚角带来的距离徙动在一个孔径长度内基本可以忽略,对压缩结果的影响主要体现在光程的变化上,侧滚角带来的相位变化的补偿算法将在另一篇论文中详细分析.

References

- [1] Brian W Krause, Joe Buck, Chris Ryan, *et al.* Synthetic Aperture Ladar Flight Demonstration [C]. OSA/CLEO. IQEC, 2011:1-2.
- [2] ZHOU Yu, XU Nan, LUAN Zhu, *et al.* 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging ladar [J]. *Acta Optica Sinica* (周煜, 许楠, 栾竹等. 尺度缩小合成孔径激光雷达的二维成像实验. *光学学报*), 2009, **29**(7):2030-2032.
- [3] XING Meng-Dao, GUO Liang, TANG Yu, *et al.* Design on the indoor optical system of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering* (邢孟道, 郭亮, 唐禹等. 合成孔径激光成像雷达实验系统设计. *红外与激光工程*), 2009, **385**(2):290-294.
- [4] LIU Li-Ren, ZHOU Yu, ZHI Ya-Nan, *et al.* A large-aperture synthetic aperture imaging ladar demonstrator and its verification in laboratory space [J]. *Acta Optica Sinica* (刘立人, 周煜, 职亚楠等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验室验证. *光学学报*), 2011, **31**(0):0900112.
- [5] BAO Zheng, XING Meng-Dao, WANG Tong. *Technologies of Radar Imaging* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京:电子工业出版社), 2005.
- [6] Philip Gatt, Don Jacob, Bert Bradford, *et al.* Performance bounds of the phase gradient autofocus algorithm for synthetic aperture ladar [C]. Proc. of SPIE, 7323: 73230:1-9.
- [7] P Dongwook. High resolution laser radar performance analysis [D]. Massachusetts; MIT Library, 1988.
- [8] LI Zeng-Ju, WU Jin, LIU Guo-Guo, *et al.* Preliminary investigation on airborne SAL imaging with platform vibration [J], *Acta Optica Sinica* (李增局, 吴谨, 刘国国等, 振动影响机载合成孔径雷达成像初步研究, *光学学报*), 2010, **30**(4):994-1001.
- [9] HONG Guang-Lie, GUO Liang. Analysis of Effects of Line Vibration on Imaging Quality of Synthetic Aperture Ladar [J]. *Acta Optica Sinica* (洪光烈, 郭亮. 线振动对合成孔径激光雷达成像的影响 [J]. *光学学报*), 2012, **32**(4):0428001
- [10] HONG Guang-Lie, GUO Liang. Effects of angle vibration on imaging quality of synthetic aperture ladar [J]. *Infrared Millim. Waves* (洪光烈, 郭亮. 角振动对合成孔径激光雷达成像的影响 [J]. *红外与毫米波学报*). *Waves*, 2011, **30**(6): 571-575.
- [11] Eddy A Stappaerts, E T Scharlemann. Differential synthetic aperture ladar [J]. *OPTICS LETTERS*, 2005, **30**(18): 2385-2387.