

文章编号:2095-6134(2016)05-0664-05

基于低采样率数字去斜的 合成孔径激光雷达成像处理^{*}

胡 烜^{1,2†}, 李道京¹, 周建卫^{1,2}

(1 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室, 北京 100190; 2 中国科学院大学, 北京 100049)
(2016 年 3 月 4 日收稿; 2016 年 4 月 5 日收修改稿)

Hu X, Li D J, Zhou J W. Image processing of SAL based on low sampling rate digital dechirp [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(5): 664-668.

摘 要 将低采样率数字去斜技术用于合成孔径激光雷达(SAL),大幅度降低了系统的 AD 采样率.在此基础上,分析线性调频连续波(LFMCW)体制 SAL 系统的信号采样和成像处理问题.为降低回波延时误差带来的影响,给出一种延时估计方法.该方法通过截取单个扫频周期信号的回波进行去斜脉压,得到场景对应的延时;针对线性调频(LFM)信号的非线性失真,使用剩余视频相位(RVP)滤波法进行信号校正,保证去斜脉压质量.仿真实验验证了将低采样率数字去斜应用于 SAL 的可行性.

关键词 数字去斜; 合成孔径激光雷达; AD 采样; 延时误差; 信号校正; 成像处理

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **doi:** 10.7523/j.issn.2095-6134.2016.05.013

Image processing of SAL based on low sampling rate digital dechirp

HU Xuan^{1,2}, LI Daojing¹, ZHOU Jianwei^{1,2}

(1 National Key Lab of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In this study, low sampling rate digital dechirp is used in SAL to decrease AD sampling rate of the system. On this basis, signal sampling and imaging processing are analyzed. To depress the influence of time delay error, a method for time delay error estimation is proposed. This method estimates time delay through dechirp with part of echo signal. To ensure the quality of pulse compression, a method based on RVP filtering is used to correct nonlinear distortion of the LFM signal. The feasibility of applying the low sampling rate digital dechirp in SAL is verified by simulations.

Key words digital dechirp; SAL; AD sampling; time delay error; signal correcting; image processing

^{*} 中国科学院电子学研究所创新项目(Y3Z0120247)资助

[†] 通信作者, E-mail: 18700476546@163.com

合成孔径激光雷达 (SAL) 结合合成孔径技术和激光波长短的特点,在超高分辨率观测领域发展前景广阔^[1],但也存在数据量巨大的问题.文献[2]给出机载 SAL 系统参数:快时间采样率 4 GHz,重复频率大于 80 kHz. 如此高的二维采样率导致的大数据量,给回波存储和成像处理都带来了困难.

由于激光波束窄,SAL 成像场景幅宽小,使用 LFM 信号时,去斜接收可降低 AD 采样率和成像数据量^[3]. 模拟去斜需要复杂的延时控制电路,且采样率受延时误差影响,为简化系统并进一步降低采样率,本文将低采样率数字去斜技术^[4]应用于 SAL.

1 采样率分析

为降低峰值功率,机载 SAL 通常采用线性调频连续波 (LFMCW) 体制,这为使用数字去斜提供了条件,依据文献[2],本文确定的机载 SAL 系统参数如表 1 所示. 为避免方位多普勒模糊,本文采用 100 kHz 的高重频,对应 10 μs 的扫频周期;由于激光距离向波束较窄,场景幅宽远小于扫频周期对应的宽度,在 3 km 范围,存在的距离模糊可自动去除.

表 1 机载 SAL 系统参数	
Table 1 System parameters of airborne SAL	
参数	数值
方位波束宽度/mrad	1
场景中心斜距/km	3
重复频率/kHz	100
扫频周期/μs	10
距离向波束宽度/mrad	3
最大场景幅宽/m	15
最大延时误差/m	150
LFM 信号带宽/GHz	4

图 1 给出低采样率数字去斜的原理框图. 文献[4]从原理上证明并仿真验证了,若采样率大于模拟去斜时场景幅宽对应的谱宽,使用低采样率数字去斜技术,可获得全分辨率的脉压结果.

模拟去斜时,采样率的选择应综合考虑场景幅宽、延时误差和信号非线性失真的影响,采样率应满足

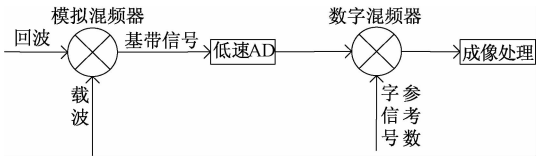


图 1 低采样率数字去斜原理框图
Fig. 1 Diagram of digital dechirp with low sampling rate

$$f_s \geq \gamma \left(\frac{2\Delta R_w}{C} + \frac{2\Delta R_e}{C} \right) + \Delta f_s, \quad (1)$$

其中, f_s 为快时间采样率, γ 为发射 LFM 信号的调频率, ΔR_w 为场景幅宽, ΔR_e 为最大延时误差 (本文中延时用斜距表示), Δf_s 为因信号非线性失真增加的采样率,一般比较小.

低采样率数字去斜时,由于去斜操作由后续信号处理实现,生成回波矩阵前,可由回波数据估计延时范围,所以采样率的选择只需要考虑场景幅宽和信号非线性影响,采样率应满足

$$f_s \geq \gamma \frac{2\Delta R_w}{C} + \Delta f_s. \quad (2)$$

由表 1 给出的系统参数, $\Delta R_e = 150 \text{ m}$, $\Delta R_w = 15 \text{ m}$, 若模拟去斜,采样率应大于 440 MHz;若低采样率数字去斜,采样率大于 40 MHz 即可. 考虑到延时估计误差以及信号非线性影响,本文将快时间采样率设置为 100 MHz. 显然,将低采样率数字去斜应用于 SAL 可进一步降低系统采样率.

2 延时估计和回波矩阵形成

LFMCW 体制下,信号的收发连续进行,需要对连续的回波信号进行裁剪,获得等效的脉冲信号,然后形成二维回波矩阵以进行后续的成像处理. 信号裁剪的时序关系如图 2 所示,假设场景最小延时为 R_{\min} , 最大延时为 R_{\max} , 回波矩阵中每个脉冲的起止时间应为单个扫频周期信号发射后 $\frac{2R_{\max}}{C}$ 到 $\frac{2R_{\min}}{C} + T_p$, T_p 为扫频周期.

回波信号的延时范围可由载机和场景的 GPS 位置信息换算得到,其误差通常较小,但是由于飞机高度和横滚角变化,机载 SAL 获取数据时,回波延时最大可能存在 150 m 左右的误差,对应 1 μs 的时序错位. SAL 重复频率高,扫频周期较短,延时误差会造成较大的能量损失. 如图 2 所示,由表 1 给出的系统参数,若延时精确已知,能

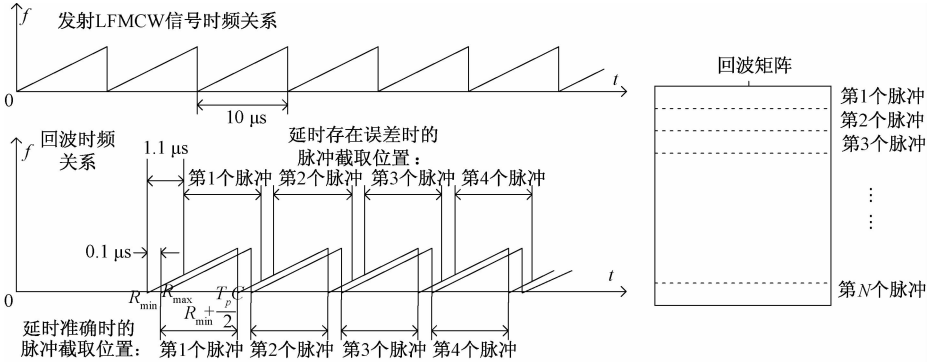


图 2 信号时频关系和回波矩阵示意图

Fig. 2 Schematic diagram of signal time-frequency relationship and echo matrix

量损失仅来自场景幅宽,为 $0.1\ \mu\text{s}/10\ \mu\text{s} = 1\%$; 若存在 $150\ \text{m}$ 的延时误差,能量损失增大为 $1.1\ \mu\text{s}/10\ \mu\text{s} = 11\%$.

为降低能量损失,在形成回波矩阵前,需取同一扫频周期信号的回波去斜脉压以进行延时估计. 设由 GPS 数据换算得到的延时为 $[R, R + \Delta R_e]$, 最大延时误差为 ΔR_e , 考虑极限情况: 若延时提前 ΔR_e , 那么延时区间 $[R + \Delta R_e + \Delta R_w, R + \Delta R_e + \frac{T_p C}{2}]$ 中的信号必然是同一扫频周期信号的回波; 若延时滞后 ΔR_e , 那么延时区间 $[R - \Delta R_e + \Delta R_w, R - \Delta R_e + \frac{T_p C}{2}]$ 中的信号必然是同一扫频周期信号的回波; 准确延时未知, 但 2 个区间交集 $[R + \Delta R_e + \Delta R_w, R - \Delta R_e + \frac{T_p C}{2}]$ 中的信号必然是同一扫频周期信号的回波, 且包含场景中所有散射点的信息, 取该段回波去斜脉压即可估计出延时范围. 根据该延时范围, 将接收到的连续回波裁剪为等效脉冲信号, 形成回波矩阵后进行成像处理.

3 基于 RVP 滤波的信号非线性失真校正

实际工程中, SAL 发射的 LFM 信号线性度往往较差^[2], 本文使用基于 RVP 滤波的方法进行信号校正^[5-6].

设点目标到雷达的距离为 R_i , 该目标反射的回波为

$$s_r(t) = \text{rect}\left(\frac{t - 2R_i/C}{T_p}\right) \cdot e^{j2\pi[f_c(t-2R_i/C) + \frac{1}{2}\gamma(t-2R_i/C)^2]} \cdot e^{j2\pi\varepsilon(t-2R_i/C)}, \quad (3)$$

其中, t 为快时间, T_p 为扫频周期, C 为光速, f_c 为载频, γ 为快时间调频率, $e^{j2\pi\varepsilon(t)}$ 为发射信号的非线性失真项, 通常可通过信号内定标获得^[7-9], 其

中, $\varepsilon(t) = \sum_{n=3}^N a_n t^n$, 含有 3 阶及以上误差项, 本质上, RVP 滤波法对非线性失真的阶次没有要求.

以 R_{ref} 为参考斜距对该回波去斜, 设 $R_\Delta = R_i - R_{\text{ref}}$, 去斜后的差频输出为

$$\begin{aligned} s_{if}(t) &= s_r(t) \cdot s_{\text{ref}}^*(t) \\ &= \text{rect}\left(\frac{t - 2R_i/C}{T_p}\right) \cdot e^{-j\frac{4\pi}{C}\gamma(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{C})R_\Delta} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{C}f_c R_\Delta} \cdot e^{j\frac{4\pi}{C^2}\gamma R_\Delta^2} \cdot e^{j2\pi\varepsilon(t - 2R_i/C)}. \end{aligned} \quad (4)$$

将该差频信号沿快时间傅里叶变换(以参考点的时间为基准)

$$\begin{aligned} S_{if}(f) &= \{T_p \text{sinc}[T_p(f + 2\frac{\gamma}{C}R_\Delta)] \cdot e^{-j(\frac{4\pi f_c}{C}R_\Delta + \frac{4\pi\gamma}{C^2}R_\Delta^2 + \frac{4\pi f}{C}R_\Delta)}\} \otimes FT\{e^{j2\pi\varepsilon(t - \frac{2R_\Delta}{C})}\}, \end{aligned} \quad (5)$$

上式卷积号前的相位项中, 第 2 项是 RVP 项, 第 3 项是包络斜置项, 均应予以去除^[10]. 这 2 项都与 R_Δ 有关, 对不同的 R_Δ 应作出不同的相位补偿. 但是从公式看, 差频信号变到频域后成为宽度很窄的 sinc 函数, 也就是说, 对斜距 R_Δ 的目标进行补偿时, 只需要补偿 $f = -2\frac{\gamma}{C}R_\Delta$ 处的相位即可. 基于上述考虑, 式(5)可化简为

$$\begin{aligned} S_{if}(f) &= T_p \cdot \varphi_\varepsilon(f + 2\frac{\gamma}{C}R_\Delta) \cdot e^{j\frac{\pi}{\gamma^2}f^2} \cdot e^{-j\frac{4\pi f_c}{C}R_\Delta}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\varphi_\varepsilon(f) = FT\{e^{j2\pi\varepsilon(t)}\}$, 对式(6)乘以 $S_c(f) = e^{-j\frac{\pi f^2}{\gamma}}$ 即可将 RVP 项和包络斜置项去除, 再逆傅

里叶变换到时域

$$s_{if}(t) = T_p \cdot e^{j2\pi\varepsilon(t)} \cdot e^{-j\frac{4\pi f_c}{C}R_{\Delta}} \cdot e^{-j2\pi\frac{2\gamma R_{\Delta}}{C}t}. \quad (7)$$

可以看出,去除 RVP 项和包络斜置项后,信号非线性失真和目标斜距不再相关,可以用 $e^{-j2\pi\varepsilon(t)}$ 统一补偿.将补偿后的信号再变到频域即可取得理想的脉压效果

$$s_{if}(t) = T_p \cdot \text{sinc}(f + \frac{2\gamma R_{\Delta}}{C}) \cdot e^{-j\frac{4\pi f_c}{C}R_{\Delta}}. \quad (8)$$

4 信号采样和成像处理仿真

信号采样和成像处理流程为:参考由 GPS 数据换算出的延时及最大延时误差,根据第 3 节给出的原则,选取一段合适的回波去斜脉压以进行延时估计(这其中也需非线性失真的校正);根据延时估计结果,将连续采集的回波裁剪成等效脉冲信号并形成回波矩阵,去斜脉压后对信号进行非线性失真校正并方位成像.

表 2 给出本文的仿真参数,点目标位置及编号如图 3 所示,场景中心的 5 个点目标斜距间隔 7 cm,方位间隔 5 mm.对比图 4(a)和图 4(b),RVP 滤波法对信号进行了有效的非线性失真校正.校正后,延时估计精度有所提高;图 4(c)是场景中心的成像结果,可以看出 5 个点目标得到了

清楚分辨;图 4(d)给出斜距最近的#1 点目标的斜距维切面放大图(斜距最远的#7 点目标与之基本相同,不再给出);图 4(e)给出#2、#4、#6 这 3 点目标的斜距维切面放大图;图 4(f)给出#2、#4、#6 这 3 点目标的方位切面放大图;可以看出,数字去斜并进行非线性失真校正后,脉冲压缩的主副瓣分布情况和高速采样下 LFM 信号脉压情况基本一致,斜距向和方位向均达到了预期分辨率.低采样率数字去斜应用于 SAL 的可行性得到验证.

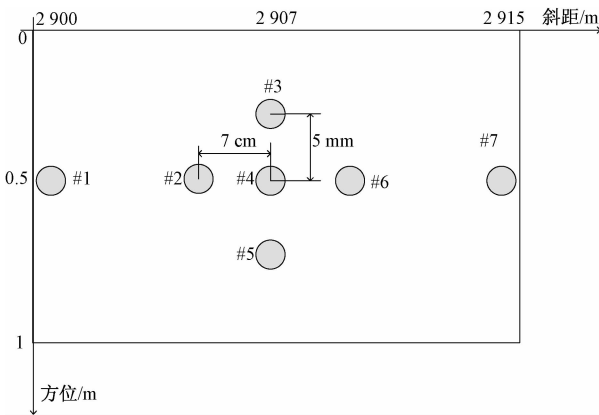


图 3 点目标位置示意图
Fig.3 Schematic diagram of target location

表 2 仿真参数
Table 2 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
方位波束宽度/mrad	1	合成孔径长度/m	3
俯仰波束宽度/mrad	3	场景斜距范围/m	2 900 ~ 2 915
斜视角/(°)	0	波长/μm	1.55
雷达速度/(m/s)	50	扫频周期/μs	10
快时间带宽/GHz	4	重复频率/kHz	100
正交解调后快时间采样率/MHz	100	发射信号线性度 ^[11]	1/1 000
发射信号频偏形式/范围/MHz	正弦/4	延时误差/m	150
斜距分辨率/cm	5	方位分辨率/mm	5
目标位置(斜距/m,方位/m)	(2 900,0.5); (2 906.93,0.5); (2 907,0.5);(2 907.07,0.5); (2 915,0.5); (2 907,0.495); (2 907,0.505)		

5 结束语

本文将低采样率数字去斜技术应用于 SAL;分析系统的快时间采样率;给出成像处理流程.仿真验证了低采样率数字去斜应用于 SAL 的可行性.在本文参数下,对带宽 4 GHz,

线性度 1/1 000 的信号,快时间采样率设置为 100 MHz 即可满足要求,大幅度降低了 SAL 系统的数据量;若将快时间采样率设置为 200 MHz,可使用单路 AD 实施采样,进一步简化系统.本文的研究工作对 SAL 的工程研制具有一定的参考价值.

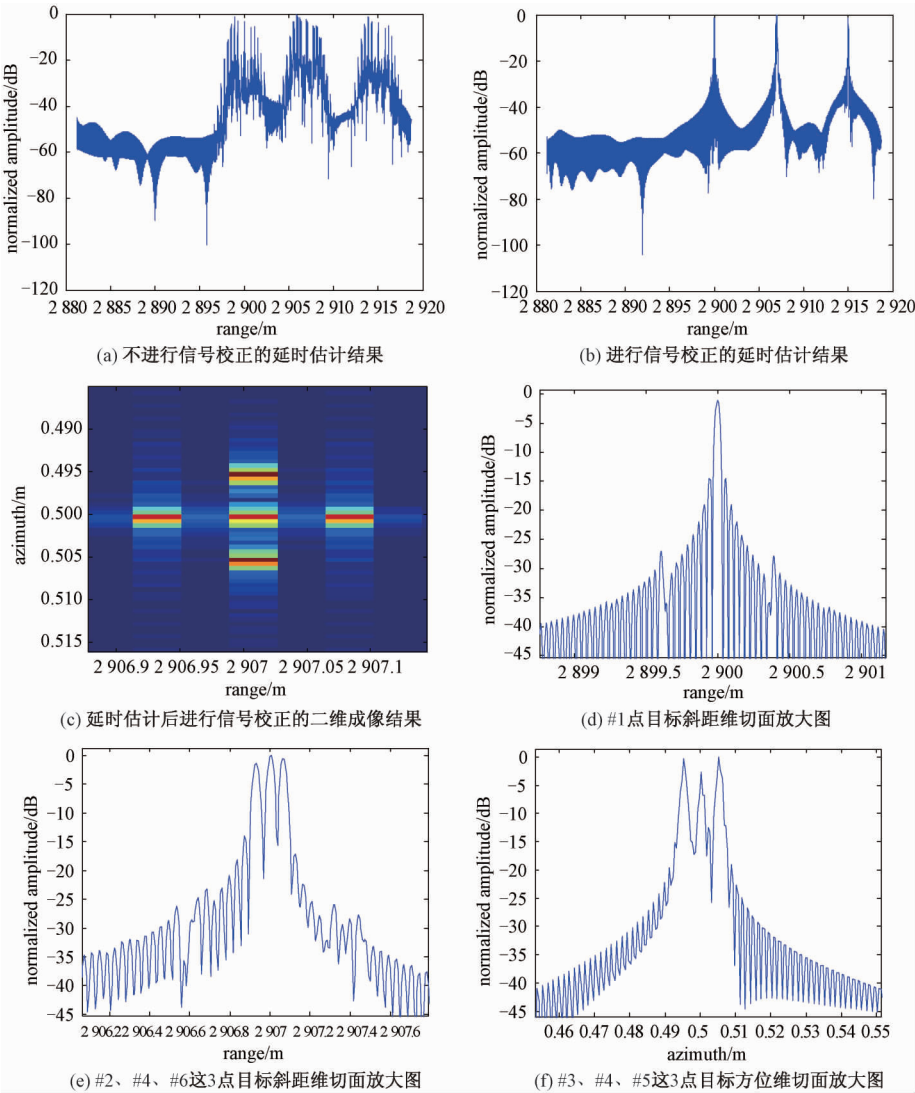


图 4 采样和成像仿真结果

Fig.4 Simulation results of sampling and imaging

参考文献

[1] Brian W K, Joe B, Chris R. Synthetic aperture ladar flight demonstration[C]. OSA/ CLEO 2011;1-2.

[2] 李道京, 张清娟, 刘波, 等. 机载合成孔径激光雷达关键技术和实现方案分析[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 143-151.

[3] 杜剑波, 李道京, 马萌. 激光雷达宽带信号产生方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11):1-10.

[4] 詹学丽, 王岩飞, 王超. 一种用于合成孔径雷达的数字去斜方法[J]. 雷达学报, 2015, 4(4): 474-480.

[5] 梁毅. 调频连续波 SAR 信号处理[D]. 西安:西安电子科技大学, 2009.

[6] 于雯, 赵思伟, 宋小全. 一种适用于合成孔径激光雷达非线性啁啾校正的频率变标成像方法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7):1-6.

[7] 梁淮宁, 金廷满, 赵毅. SAR 内定标技术和内定标精度分析[J]. 电子学报, 2007, 35(12):2 294-2 297.

[8] 杨震, 杨汝良. HJ-1-C 卫星 SAR 系统的内定标[J]. 雷达学报, 2014, 3(3):314-319.

[9] 潘舟浩, 刘波, 李道京. 毫米波三基线 InSAR 系统误差校正和信号分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2 464-2 470.

[10] 邢孟道, 保铮, 李真芳, 等. 雷达成像算法进展[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 24-30.

[11] 陆必应, 梁甸农. 调频线性度对线性调频信号性能影响分析[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(8): 1 384-1 386.