

调频连续波 SAR 非线性误差的开环校正方法

易天柱,何志华,董 臻
(国防科学技术大学,湖南长沙 410073)

摘 要: 针对 FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) SAR(Synthetic Aperture Radar)调频非线性误差对一维聚焦性能影响和该误差校正问题,该文引入 VCO(Voltage Controlled Oscillator)调频非线性高阶误差模型,从理论推导、定量分析了调频非线性误差对信号的具体影响.在 VCO 工作稳定、随时间电漂移度较小的前提下,提出了一种基于开环的 FMCW SAR 非线性校正方法.该方法首先一次补偿谐波误差,以信号压缩指标性能最优为收敛准则,通过迭代来校正因输入电压的更新和 VCO 电漂移及热噪声而引起抖动的高阶误差,进而对信号的调频非线性进行校正.信号仿真和实测数据处理结果表明该方法能对 FMCW SAR 信号源的调频非线性误差进行稳健、有效的校正,并且与传统的开环软件校正方法相比,该方法无需构建复杂的误差模型,具有简单、经济、运算量较小等优点.

关键词: 调频连续波合成孔径雷达; 压控振荡器; 信号压缩; 调频非线性; 收敛准则

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)03-0550-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.021

Open-Loop Correction Method for Nonlinear Error of Frequency Modulated Continuous Wave SAR

YI Tian-zhu, HE Zhi-hua, DONG Zhen

(National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: In order to analyse the effect of the modulated nonlinear error on 1-dimension focusing and accurately correct this error for FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)SAR(Synthetic Aperture Radar), a high order error model of VCO(Voltage Controlled Oscillator) modulated non-linearity is introduced to deduce and quantitatively analysis in theory the specific effect of the modulated nonlinear error. A nonlinear correction method for FMCW SAR based on open-loop is proposed on the premises of the stability of the VCO and low electric shift varying with time. Taking the signal's compression index as the optimal convergent rule, the method corrects the signal's modulated nonlinear error first by one-off compensation for harmonic wave error, and second by correcting the high-order swing error caused by the input voltage update, the electronic shift of VCO by iteration and the thermal noise. The simulation of the signal and the process of the real data indicate that the method can solidly and effectively corrects the modulated nonlinearity error of FMCW SAR signal source. Compared with the traditional software correction based upon open-loop, this new method can correct the nonlinear error without complicated error model and also it has the advantages of simpleness, lower cost and less computation.

Key words: FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) SAR(Synthetic Aperture Radar); VCO(Voltage Controlled Oscillator); signal compression; modulated nonlinearity; convergent rule

1 引言

调频连续波 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)SAR 自上世纪 80 年代末问世以来,以其低功耗、重量轻、发射平均功率低、低战场截获概率和无测距盲区等优点受到广泛关注,目前 FMCW SAR 已广泛应用在短距离高分辨成像领域.FMCW SAR 通常采用线性调频信号作为发射信号,该信号的产生方式有压控振荡器

VCO(Voltage Controlled Oscillator)、DDS(Direct Digital Synthesize)和 DAC(Digital-Analog Convert)等几种.和 DDS、DAC 等线性调频信号产生方式相比,VCO 具有频点高、带宽宽和简单易用等特点,但是 VCO 在工作中存在调频非线性问题,需对其调频非线性进行校正.

FMCW SAR 系统通常采用去斜技术将接收信号和参考信号进行混频得到中频信号.当发射信号的线性调频存在非线性误差时,非线性误差会使压缩后的信号

出现成对回波现象,进而扩散了目标能量,直接影响分辨率和信噪比等性能指标^[1]。所以,为了有效地改善由于非线性误差对信号压缩产生的影响,需要对 FMCW SAR 的调频非线性误差进行校正。

常用的 VCO 调频非线性校正方法有开环校正和闭环校正两种^[2],文献^[1]提出一种基于开环的同态滤波对调频非线性误差进行校正的技术,该技术实现方便、成本低廉,适合应用在对调频线性度要求不是很高的工程应用实践,但由于无法用精确的解析式描述 VCO 的压控振荡特性,其软件校正存在较大的误差;文献^[3]采用闭环校正思路,提出了一种基于高阶模糊函数拟合高阶相位项系数,通过内定标信号并利用重采样的方法进行调频非线性校正,该方法可靠性高,但模型复杂,算法计算量大。本文在此基础上研究了 FMCW SAR 的调频非线性影响,并在假设 VCO 随时间的电漂移度较小、工作稳定的前提下,提出了一种基于开环的 FMCW SAR 调频非线性校正方法,利用开环录取射频信号,估计 VCO 的输入电压-输出频率特性曲线,并应用本文提出的一次补偿、多次迭代的校正算法得到预失真电压。仿真及实测数据处理结果表明该算法在 VCO 电漂移度很小的情况下能有效稳健地对调频非线性进行校正。

2 FMCW SAR 调频非线性分析

将接收信号和发射信号经过混频之后的中频信号作傅里叶变换可得到一维脉冲压缩结果。由于 VCO 存在非线性工作区,因此需对电调输入电压进行相应的预失真。FMCW SAR 发射和接收的 LFM 信号表达式为:

$$s'(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot \exp\left[j2\pi(f_c t + \frac{1}{2} K t^2)\right] \quad (1)$$

$$s'_r(t) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \cdot \exp\left[j2\pi(f_c(t-\tau) + \frac{1}{2} K(t-\tau)^2)\right] \quad (2)$$

其中 f_c 为载波频率, K 为调频率, T 为信号扫频周期。回波信号和理想的发射信号 dechirp 之后的表达式为:

$$s'_{if}(t, \tau) = \exp\left[j2\pi(f_c \tau + K t \tau - \frac{1}{2} K \tau^2)\right] \quad (3)$$

其中 τ 为目标时延,当发射信号存在非线性误差时,雷达的发射和接收信号为:

$$s_t(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot \exp\left\{j2\pi\left[f_c t + \frac{1}{2} K t^2 + \varphi_e(t)\right]\right\} \quad (4)$$

$$s_r(t) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \cdot \exp\left\{j2\pi\left[f_c(t-\tau) + \frac{1}{2} K(t-\tau)^2 + \varphi_e(t-\tau)\right]\right\} \quad (5)$$

其中 $\varphi_e(t)$ 为调频非线性误差项。将回波信号和发射信

号作 dechirp 处理,输出的中频信号为:

$$s_{if}(t, \tau) = \exp\left\{j2\pi\left[f_c \tau + K t \tau - \frac{1}{2} K \tau^2 + \varphi_e(t) - \varphi_e(t-\tau)\right]\right\} \quad (6)$$

将 $\varphi_e(t) - \varphi_e(t-\tau)$ 利用傅里叶级数展开:

$$\begin{aligned} \Phi_e(t) &= \varphi_e(t) - \varphi_e(t-\tau) \\ &= c_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \sin(\xi_i t) + b_i \cos(\xi_i t)) \\ &= c_0 + \sum_{i=1}^n c_i \sin(\xi_i t + \varphi_i) \end{aligned} \quad (7)$$

由于 $\varphi_e(t)$ 、 $\varphi_e(t-\tau)$ 是时延关系,傅里叶级数展开后的 $\Phi_e(t)$ 直流分量 $c_0 = 0$, 其中 a_i 、 b_i 、 ξ_i 为分别各次正余弦谐波分量的幅度和频率,其中 $c_i^2 = a_i^2 + b_i^2$ 、 $\varphi_i = \arcsin \frac{b_i}{c_i}$, 利用 Jacobi 系数展开该指数误差项^[4]:

$$\begin{aligned} &\exp\left(j2\pi \sum_{i=1}^n c_i \sin(\xi_i t + \varphi_i)\right) \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{l=-\infty}^{+\infty} J_l(2\pi c_i) \cdot \exp(j \cdot l(\xi_i t + \varphi_i)) \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $J_l(\cdot)$ 是第一类 Bessel 函数, l 为展开后的 Jacobi 阶数,将 Jacobi 系数展开后的含有误差的中频信号进行傅里叶变换,由此得到含有非线性误差信号的频谱表达式为:

$$\begin{aligned} S_{if}(f) &= \int_0^T s_{if}(t) dt = \exp(j2\pi f_c \tau - j\pi K \tau^2) \\ &\cdot \int_0^T \sum_{i=1}^n \sum_{l=-\infty}^{+\infty} J_l(2\pi c_i) \cdot \exp(jl\varphi_i) \\ &\cdot \exp\{j \cdot [l\xi_i + 2\pi(K\tau - f)]t\} dt \\ &= \exp(j2\pi f_c \tau - j\pi K \tau^2) \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \{J_l(2\pi c_i) \\ &\cdot T_p \cdot \text{sinc}[\pi(f - K\tau - l\xi_i/2\pi)T_p] \\ &\cdot \exp(jl\varphi_i) \cdot \exp[j\pi(f - K\tau - l\xi_i/2\pi)T_p]\} \quad (9) \end{aligned}$$

其中 T_p 为发射信号的时宽,由式(9)可推导出,当误差信号不存在时,即 c_i 、 l 、 φ_i 都等于 0 时,其脉冲压缩频谱表达式为:

$$S_{if}(f) = \exp(j2\pi f_c \tau - j\pi K \tau^2) \cdot \exp[j\pi(f - K\tau)T_p] \cdot T_p \cdot \text{sinc}[\pi(f - K\tau)T_p] \quad (10)$$

结合式(10)和式(9)推导结果中的 $\text{sinc}[\pi(f - K\tau - l\xi_i/2\pi)T_p]$ 项可以发现由于发射信号的调频非线性误差造成在图像主瓣两旁有成对回波现象出现^[4],且成对回波在频率轴的位置与基波频率 ξ_i 及所展开的 Jacobi 阶数 l 有关。在第一类贝塞尔函数中,有下述关系成立^[4]

$$J_{-k}(z) = (-1)^k J_k(z) \quad (11)$$

第一类贝塞尔函数系数主瓣的分布示意图如图 1 所示:

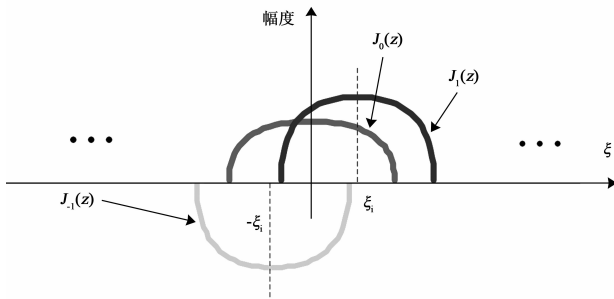


图1 第一类贝塞尔函数系数主瓣分布示意图

由公式(9)推导结果中的 $\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} J_l(2\pi c_i) \cdot T_p \cdot \text{sinc}[\pi(f - K\tau - l\xi_i/2\pi) T_p]$ 贝塞尔函数系数 $J_l(2\pi c_i)$ 和成对回波辛克函数 $\text{sinc}[\pi(f - K\tau - l\xi_i/2\pi) T_p]$, 以及图1的第一类贝塞尔函数系数主瓣分布示意图可以看出, 由于第一类贝塞尔函数系数对成对回波的加权, 导致了在信号主瓣两侧有高低旁瓣现象出现, 这个结果可由图4的含有非线性误差信号的频谱脉冲压缩仿真结果得到验证. 且含非线性误差信号的脉压结果由于成对回波现象的存在会使信号的时域主瓣有所展宽, 导致距离分辨率下降. 由此可见, 发射信号的调频非线性误差直接影响了 FMCW SAR dechirp 后信号的距离维分辨率.

3 调频非线性校正方法

在雷达系统设计中, 由于 VCO 具有频点高, 带宽宽等优点, 通常采用 VCO 产生线性调频信号. 但由于器件原因, VCO 产生的信号并非是严格意义上的线性, 需要对其调频非线性进行校正. 本文在 VCO 工作稳定、电漂移度较小的前提下提出了一种 VCO 调频非线性校正的方案, 该方案采用一次补偿、多次迭代的方法对 VCO 产生的调频非线性进行校正.

对于 VCO 而言, 其输出信号频率和输入电压满足如下关系:

$$f = g[u] + f_0 = \sum_{i=1}^{\infty} k_i u^i + f_0 \quad (12)$$

其中 f 为在电压 u 激励下的频率变化, f_0 为 VCO 的载频, k_i 为 VCO 的频率电压曲线变化的各阶系数, 这些系数可通过将录取的射频数据进行拟合得到. 设电压 u 的表示式为:

$$u = \sum_{i=1}^N l_i (f - f_0)^i \quad (13)$$

将式(9)代入式(10)可得:

$$\begin{aligned} u &= g^{-1}[f - f_0] \\ &= k_1 l_1 (f - f_0) + (k_2 l_1^2 + k_1 l_2) (f - f_0)^2 \\ &\quad + (k_3 l_1^3 + 2k_1 l_1 l_2 + k_1 l_3) (f - f_0)^3 \\ &\quad + (l_4 k_1^3 + 3l_3 k_1^2 k_2 + l_2 k_2^2 + 2l_2 k_1 k_3 + l_1 k_4) (f - f_0)^4 \\ &\quad + (l_5 k_1^5 + 4l_4 k_1^3 k_2 + 3l_3 k_1 k_2^2 \\ &\quad + 3l_3 k_1^2 k_3 + 2l_2 k_2 k_3 + 2l_2 k_1 k_4 + l_1 k_5) (f - f_0)^5 \\ &\quad + \dots \end{aligned} \quad (14)$$

由级数反演^[5], 可获得各阶项系数 l_i :

$$\begin{aligned} l_1 &= k_1^{-1} \\ l_2 &= -k_1^{-3} k_2 \\ l_3 &= -k_1^{-5} (2k_2^2 - k_1 k_3) \\ l_4 &= -k_1^{-7} (5k_2^3 - 5k_1 k_2 k_3 + k_1 k_4) \\ l_5 &= -k_1^{-9} (-14k_2^4 + 21k_1 k_2^2 k_3 - 3k_1^2 k_3^2 \\ &\quad - 6k_1^2 k_2 k_4 + k_1^3 k_5) \\ &\dots \end{aligned} \quad (15)$$

由此得到电压 u 的反函数 $u = g^{-1}(f - f_0)$, 图2为该调频非线性校正误差校正理论分析图.

将第 n 次校正后的电压作为 VCO 新的激励, 通过采集射频数据, 分析其压控振荡特性曲线, 利用式(9) VCO 的频率-电压关系, 将拟合出的各阶系数代入反演后的逆函数 $u = g^{-1}[f - f_0]$, 将拟合的理想压控振荡频率变化范围 $f^{(n+1)}$ 代入上述逆函数获得第 $(n+1)$ 次校正电压数据:

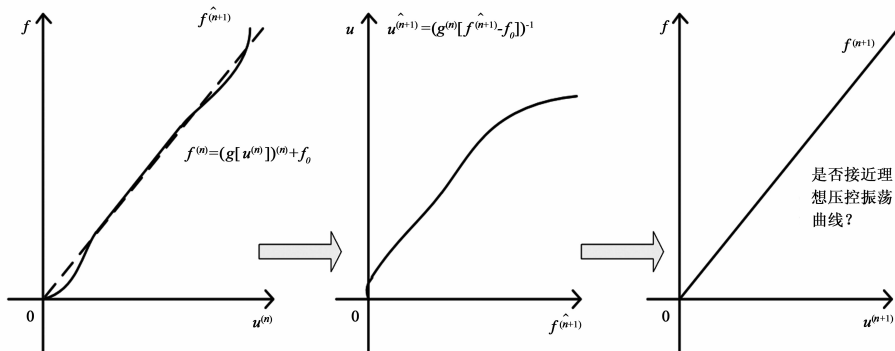


图2 调频非线性校正理论分析

$$u^{(\hat{n}+1)} = (g^{(n)}[f^{(\hat{n}+1)} - f_0])^{-1} \quad (16)$$

将该校正后的数据作为新的激励作用于 VCO, 采集经 dechirp 后的中频信号, 对其作脉冲压缩处理, 分析其各项性能指标是否满足所设定的要求. 由于 VCO 存在热

噪声及 A/D 采集时存在的误差^[6], 其系数 k_i 随着预失真电压输入的更新而更新^[7], 因此当迭代次数 n 足够大时, 其输出曲线理论上越来越接近理想的压控振荡曲线. 具体调频非线性校正流程如图 3 所示:

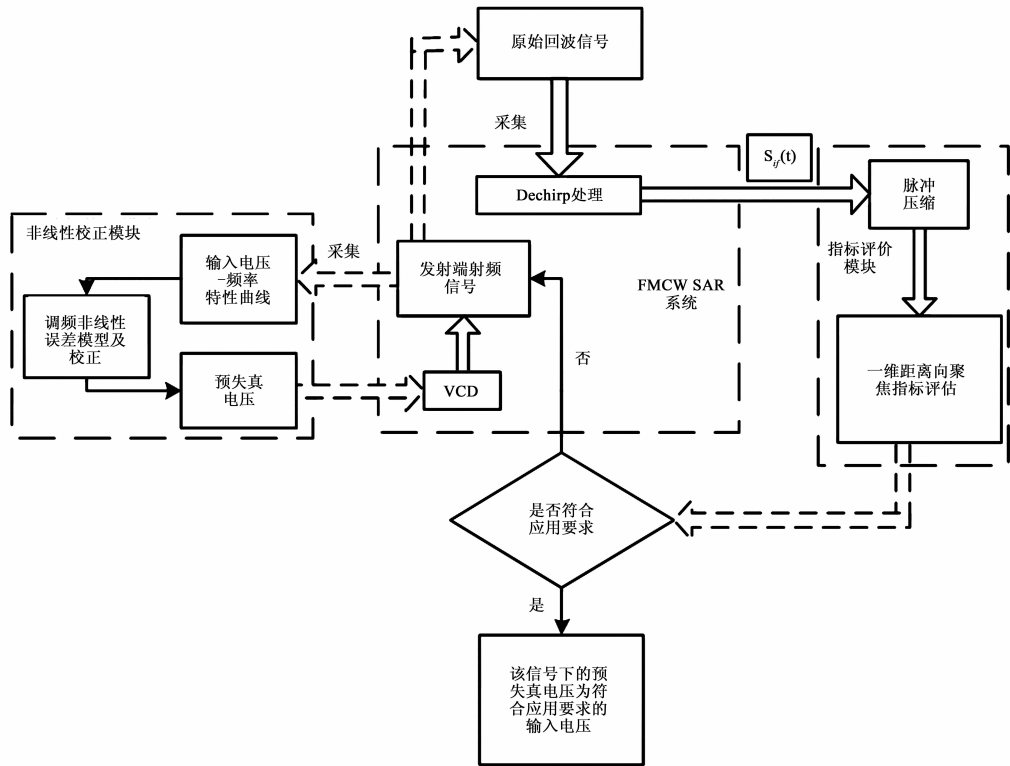


图3 调频非线性校正处理流程图

其处理步骤如下:

Step1 在 VCO 额定工作范围内输入线性变化的电压激励 VCO.

Step2 在发射端采集射频信号, 在中频输出端采集中频信号. 分析经过脉压后的中频信号, 如果其一维距离向聚焦指标评估结果符合应用要求, 则该电压信号为符合要求的输入电压, 如不符合, 则执行 Step3.

Step3 将 Step2 采集的射频信号进行输入电压-频率特性曲线分析, 将分析后的曲线特性作为调频非线性误差及校正模型的输入, 得到校正后的预失真电压.

Step4 将该预失真电压作为 VCO 新的激励源激励 VCO, 重复 Step2 ~ Step4, 直至一维距离向聚焦效果符合应用要求, 校正停止.

4 仿真及实测数据处理结果

4.1 误差仿真及校正处理结果

基于此误差模型, 本文做了相应的信号仿真和实测数据处理工作, 仿真参数设置如表 1 所示:

FMCW SAR 调频非线性仿真处理结果如图 4 所示: 由图 4 的仿真结果可以发现由于调频非线性导致

在无任何校正情况下 dechirp 处理后的脉压结果会在主瓣两旁出现成对回波现象^[8], 再次验证式(9)分析推导的正确性.

表 1 仿真参数设置

时间 $T_p/\mu\text{s}$	100
带宽 B/MHz	225
误差模型阶数	5
点目标距离/m	20

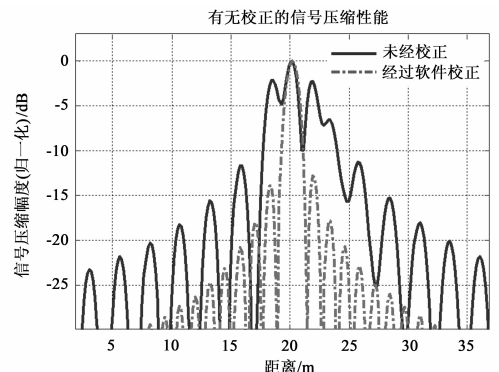


图4 有无调频非线性校正仿真结果

4.2 实测数据处理结果

该实验在如表 2 所示实验参数条件下进行:

由上述有效带宽 B 可得在该实验参数下的理论分辨率:

表 2 实验参数

载频 f_c/GHz	10
V_{pp}/V	7
$V_{\text{offset}}/\text{V}$	3.5
信号频率/Hz	10K
目标	20m 延迟线
带宽 B/MHz	225

$$\text{Res} = \frac{c}{2B} \cdot 0.886 = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 225 \cdot 10^6} \cdot 0.886 = 0.5906\text{m} \quad (17)$$

利用数字示波器 DPO71254 在 FMCW SAR 系统的发射前端采集未经非线性校正的射频信号,将采集的其中一帧信号解调至基带^[9,10,11].采集的射频信号、解调后的 VCO 基带压控振荡性能曲线及一维脉冲压缩效果图 5、图 6 和图 7 所示:

由图 6 和图 7 的实测数据处理结果可知,未经调频非线性校正的 VCO 调频非线性度是较大的.由第 1 节的 FMCW SAR 调频非线性分析结果及结合图 7 的具体脉压结果可知,该信号的分辨率为 0.7344m,和理论值 0.5906m 有较大的差距,说明该含有调频非线性误差的信号会对成像质量产生较大的影响^[10].

将采集到的未经校正的调频非线性信号代入上述

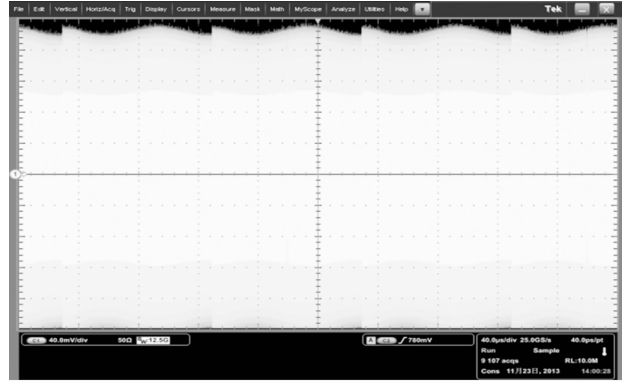


图 5 经 DPO71254 采集的射频信号

非线性校正算法,所得到的预失真电压作为新的 VCO 的电压输入数据,并将该校正后电调数据下的射频数据进行采集分析,得到经一次校正后的 VCO 基带压控振荡曲线和一维脉冲压缩效果如图 8 所示:

由图 7 和图 9 可知经过一次校正后的压控振荡曲线线性度和未经校正的压控振荡曲线相比,信号的调频线性度有所改善,同时,0.6048m 的分辨率及峰值旁瓣比 (PSLR (Peak Side-Lobe Ratio), -12.71dB) 等性能指标也有很大的改善.

4.3 不同校正次数处理结果

经过相同流程的处理,进行 VCO 调频非线性信号的第二次、第三次调频非线性校正.其相应校正之后的脉冲压缩效果如图 10,图 11 所示:

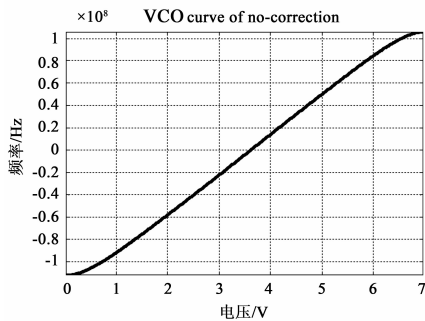


图 6 未经校正的 VCO 压控振荡曲线

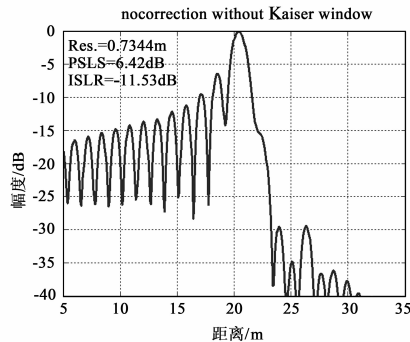


图 7 未经非线性校正的脉压效果

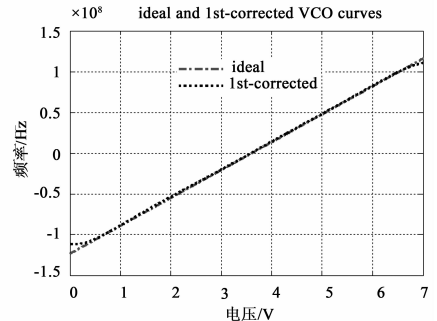


图 8 一次校正后的 VCO 压控振荡曲线

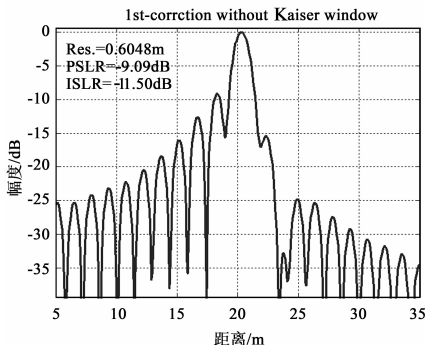


图 9 一次校正后的脉压结果

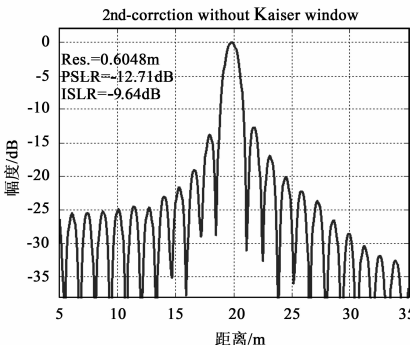


图 10 二次校正后的脉压结果

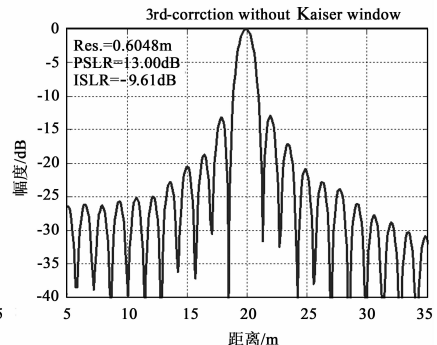


图 11 三次校正后的脉压结果

不同校正次数的具体性能指标如表 3 所示:

表 3 不同校正次数性能指标

校正次数	性能指标		
	Res/m	PSLR/dB	ISLR/dB
0	0.7344	-6.42	-11.53
1	0.6048	-9.09	-11.50
2	0.6048	-12.71	-9.64
3	0.6048	-13.00	-9.61

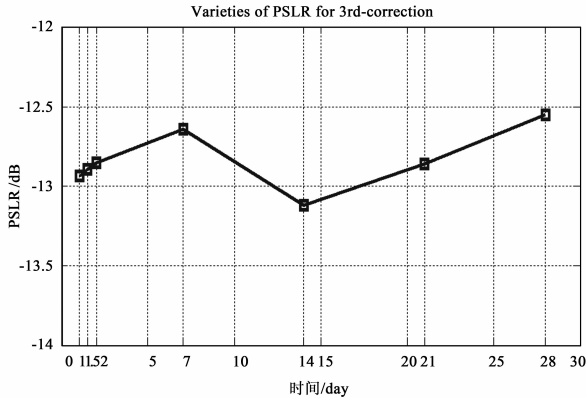


图12 三次校正PSLR随时间的变化

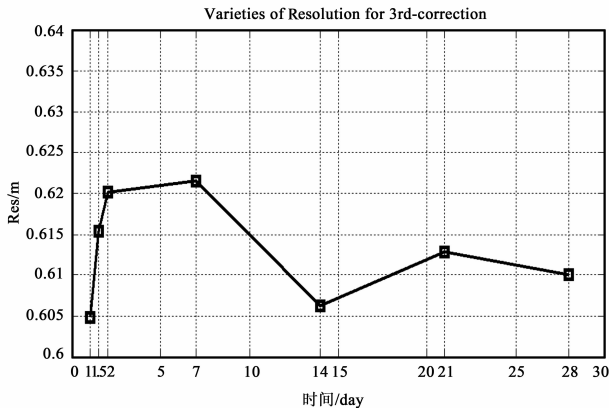


图13 三次校正Res随时间的变化图

结合图 12、图 13、表 3 以及在不同校正次数下的调频非线性校正处理的脉冲压缩后的性能指标,有下述几点结论:

(1)经过调频非线性校正后的信号线性度明显提高,脉冲压缩后的性能指标明显改善。

(2)三次校正的一维脉冲压缩的分辨率高,同时峰值旁瓣比 PSLR 与二次、一次校正相比,有一定程度的改善。

(3)从不同校正次数的结果分析,多次校正有利于改善旁瓣结构,同时,由于电漂移度较小,结合图 12 和图 13 可知,该影响在多次校正后可以忽略。

可以看出,本文提出的基于 VCO 工作稳定前提下

的开环校正处理方法可以对 VCO 的调频非线性进行有效地校正。

为考察在其他距离上的调频非线性校正后的压缩性能,本文做了在 40m 延迟线的实验,其实验参数如表 4 所示:

表 4 40m 延迟线实验参数

载频 f_c/GHz	10
V_{pp}/V	7
$V_{\text{offset}}/\text{V}$	3.5
信号频率/Hz	10K
目标	40m 延迟线
带宽 B/MHz	225

采用之前经过三次校正后的预失真电压数据作为 40m 延迟线实验的输入电压,其脉冲压缩性能结果如图 14 所示:

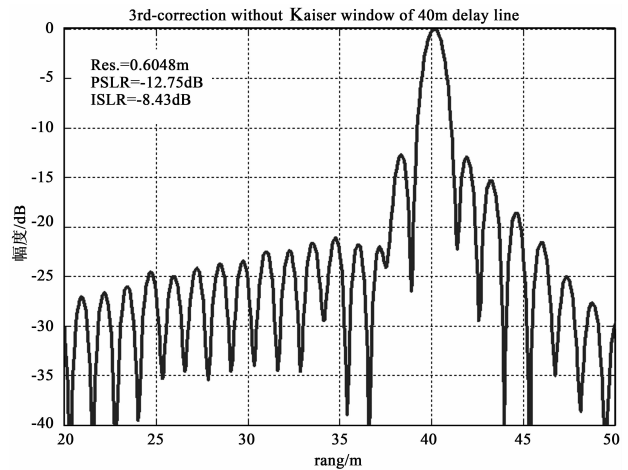


图14 40m延迟线经过三次校正后的脉压结果

比较图 11 和图 14 的脉冲压缩效果可知,在延迟线的距离从 20m 变为 40m 时,其分辨率和 PSLR 没有出现太大的变化,ISLR(Integrated Side-Lobe Ratio)上升 1dB。

5 结束语

本文在 VCO 工作稳定,随时间电漂移度较小的前提下^[12],提出了一种调频连续波 SAR 非线性误差的开环校正方法.该方法通过一次补偿^[13]多次迭代的方式对 VCO 的调频非线性进行校正.该算法与 Andrei Anghel 的重采样方法^[2]相比,达到收敛要求时算法所进行的迭代次数相当.但在具体的算法实现上,本文提出的校正算法比重采样算法更为简单,算法的运算量较少.以一个数据长度为 N ,同时具有 $K(K > = 4)$ 阶调频非线性误差信号为例,两种算法的比较如表 5 所示:

实测数据的处理结果、相关性能指标及算法之间比较表明,该校正方法可以简单、经济、有效地改善由

于 VCO 工作在调频非线性区域所带来的具体聚焦影响.

表 5 校正算法比较

算法	迭代次数	单次迭代算法运算量	
		加法	乘法
重采样	3	$N(4K+9)$	$N(K^3 - K^2/2 + 11K/2 + 13)$
本文	3	$N(3K+6)$	$N(9K^2/2 + 7K/2 + 7)$

参考文献

- [1] Jian Yang, Chang Liu, Yanfei Wang. Nonlinearity correction of FMCW SAR based on homomorphic deconvolution[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2013, 10(5): 991 – 995.
- [2] Andrei Anghel, Gabriel Vasile, Remus Cacoveanu, Cornel Ioana, Silviu Ciocchina. FMCW transceiver wideband sweep nonlinearity software correction[A]. International Radar Conference[C]. Ottawa: IEEE, 2013. 1 – 5.
- [3] Andrei Anghel, Gabriel Vasile, Remus Cacoveanu, Cornel Ioana, Silviu Ciocchina. Short-range fmcw X-band radar platform for millimetric displacements measurement[A]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Melbourne, Australia: IEEE, 2013. 1111 – 1114.
- [4] 安道祥, 等. 结合 MWD 算法的低频 UWB SAR 运动补偿[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2839 – 2845.
An Daoxiang, et al. Motion compensation for low frequency UWB SAR based on modified wavenumber domain algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(12): 2829 – 2845. (in Chinese)
- [5] Yew Lam Neo, Frank Wong, Ian G Cumming. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2007, 4(1): 93 – 96.
- [6] P V Brennan, Y Huang, M Ash, K Chetty. Determination of sweep linearity requirements in FMCW radar systems based on simple voltage-controlled oscillator sources[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2011, 47(3): 1594 – 1604.
- [7] Wang Hua, Song Qian, Zhou Zhi-min. Nonlinearity estimation and correction of VCO based on temperature-varied tuning characteristic model[A]. Microwave Conference Proceedings (APMC)[C]. Seoul, Korea: IEEE, 2013. 797 – 799.
- [8] 董勇伟, 梁兴东, 丁赤飏. FMCW SAR 非线性处理方法研究[J]. 电子信息学报, 2010, 32(5): 1034 – 1039.
Dong Yongwei, Liang Xingdong, Ding Chibiao. Non-linear signal processing for FMCW SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1034 – 1039. (in Chinese)
- [9] 耿淑敏, 皇甫堪. 去调频 FM-CW SAR 距离维成像研究[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(1): 49 – 53.

Geng Shumin, Huang Fukan. Study on range imaging of dechirp FM-CW SAR[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(1): 49 – 53. (in Chinese)

- [10] 董勇伟, 梁兴东, 丁赤飏. 一种 FMCW SAR 的非线性距离-多普勒算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(7): 1394 – 1400.
Dong Yongwei, Liang Xingdong, Ding Chibiao. Non-linear range-Doppler algorithm for FMCW SAR[J]. Journal of Systems Engineering & Electronics, 2010, 32(7): 1394 – 1400. (in Chinese)
- [11] 曲文长, 王颖, 苏峰, 等. LFM CW SAR 非线性校正成像方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(1): 50 – 53.
Qu Changwen, Wang Yin, Su Feng, et al. Research on nonlinearity correction imaging method of LFM CW SAR[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2009, 4(1): 50 – 53. (in Chinese)
- [12] 潘磊, 刘光炎. FMCW 信号的频率非线性校正分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(1): 74 – 77.
Pan Lei, Liu Guangyan. Analysis of nonlinear frequency correction way for FMCW SAR[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2010, 5(1): 74 – 77. (in Chinese)
- [13] 肖玮, 涂亚庆, 李先利. VCO 扫频非线性校正技术综述[J]. 电测与仪表, 2009, 46(528): 33 – 38.
Xiao Wei, Tu Yaqing, Li Xianli. Review of sweeping nonlinearity correction technology for VCO[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(528): 33 – 38. (in Chinese)

作者简介



易天柱 男, 1991 年出生于福建安溪, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院在读研究生, 主要研究方向为滑动聚束 SAR 系统信号处理及运动误差补偿技术。

E-mail: yitianzhu95@nudt.edu.cn



何志方 男, 1982 年出生于四川通江, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院讲师, 博士, 主要研究方向为星载 SAR/InSAR 系统仿真及信号处理。

E-mail: skynismile@163.com