

# 一种基于多项式拟合的 VCO 开环线性校正法\*

郭东文<sup>1,2</sup>, 张 焱<sup>3</sup>, 刘 强<sup>3</sup>, 孙兆阳<sup>3</sup>  
(1 北京理工大学信息与电子学院 北京 100081  
2 中国载人航天工程办公室 北京 100071  
3 航天长征火箭技术有限公司 北京 100076)

**摘要:** 压控振荡器 VCO (Voltage Controlled Oscillator) 是输入控制电压影响输出频率的振荡电路, 可用于产生调频信号。应用于安检成像时, 其输出信号的线性度通过影响副瓣电平和距离分辨率, 从而决定了安检成像的效果。为了提高安检成像效果, 提出了一种基于多项式拟合的 VCO 开环线性校正法, 使 VCO 的输出频率通过分频器, 并对分频后的信号进行滤波和 AD 采集, 通过在 FPGA 中进行数字信号处理获得 VCO 输出射频信号的非线性信息, 并通过修正 DA 输出的电压信号实现对 VCO 的校正。该方法与系统发射线性调频连续波 FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 脉冲同时进行, 具有较好的实时性, 能够解决 VCO 的温度漂移问题, 在长时间合成孔径成像中具备优势。实验结果进一步验证了方法的可行性和有效性。

**关键词:** 压控振荡器; 多项式拟合; 电调特性; 线性校正

中图分类号: TN958 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)01-0105-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210901001

引用格式: 郭东文, 张焱, 刘强, 等. 一种基于多项式拟合的 VCO 开环线性校正法[J]. 遥测遥控, 2022, 43(1): 105–110.

## A VCO open-loop linearity correction method based on polynomial fitting

GUO Dongwen<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan<sup>3</sup>, LIU Qiang<sup>3</sup>, SUN Zhaoyang<sup>3</sup>

(1. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. China Manned Space Agency, Beijing 100071, China;

3. Aerospace Long March Launch Vehicle Technology Co., Ltd., Beijing 100076, China)

**Abstract:** Voltage Controlled Oscillator (VCO) is an oscillating circuit whose input control voltage affects the output frequency and can be used to generate frequency modulation signals. VCO can be applied in security imaging, and the linearity of its output frequency determines the side lobe level and distance resolution of the imaging result. Therefore, a VCO open-loop linearity correction method based on polynomial fitting is proposed to improve the imaging effect of security inspection. The output frequency of VCO passes through a frequency divider, and the divided signal is filtered and then collected by AD. The nonlinear information of the VCO output is obtained through digital signal process in FPGA. Finally, VCO is corrected by the output voltage signal of DA. When the system transmits linear frequency modulated continuous wave (FMCW) pulse, this method is applied at the same time. So it has good real-time performance and it can solve the temperature drift problem of VCO so as to be applied for long-term synthetic aperture imaging. The feasibility and effectiveness of this method are verified by experimental results.

**Key words:** Voltage controlled oscillator; Polynomial fitting; Tuning characteristics; Linearity correction

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20210901001

**Citation:** GUO Dongwen, ZHANG Yan, LIU Qiang, et al. A VCO open-loop linearity correction method based on polynomial fitting[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(1): 105–110.

\*基金项目: 科技部国家重点研发计划

收稿日期: 2021-09-01 收修改稿日期: 2021-09-08

## 引言

压控振荡器 VCO 是输入控制电压影响输出频率的振荡电路, 可用于产生调频信号, 在降频变换器、自动测试系统、雷达、无线通信系统中均有大量应用<sup>[1]</sup>。其应用于安检成像系统时, 为降低安检成像的副瓣电平、提高距离分辨能力、保证成像效果, 需确保压控振荡器输出频率具有较好的线性度。但是, VCO 的输出信号会受到变容二极管的影响, 出现 FMCW 线性度变化和幅度变化, 使 VCO 调频线性度为 2%~5%<sup>[1]</sup>, 导致距离分辨力下降, 成像效果变差。

为了提高安检成像系统的成像效果, 本文提出了一种基于多项式拟合的 VCO 开环线性校正法, 对 VCO 电调特性进行线性校正, 并通过实验验证了方法的正确性。

## 1 VCO 电调特性线性校正方法

电调特性表示电调频率与其电调电压之间的关系。目前, VCO 电调特性的线性校正方法主要包括电抗补偿线性校正法、闭环线性校正法和开环线性校正法。下面对这三类校正方法进行具体分析。

### 1.1 电抗补偿线性校正方法

电抗补偿线性校正法原理电路如图 1 所示, 其中,  $R_d$ 、 $L_s$ 、 $C_s$  为串联谐振回路的体效应管负阻、电感、电容,  $L_p$ 、 $C_p$  为并联补偿回路的电感、电容,  $R$  为等效负载电阻。此方法在电路结构中引入了电抗补偿回路<sup>[2]</sup>, 电路的谐振频率受电路结构变化而改变, 从而调整电调曲线实现了线性校正。

文献[3,4]使用此方法将 VCO 电调线性度调整为 1.5%, X 波段同轴型 VCO 在 260 MHz 电调带宽内的电调斜率比小于 1.4。文献[5]通过此方法实现了扩展 VCO 频带、改善电调特性的目标。文献[6]通过在谐振回路并联电阻, 成功地降低了调谐增益。文献[7]通过引入变容二极管补偿相位, 实现 VCO 线性校正。

### 1.2 闭环线性校正法

闭环线性校正法的核心是负反馈锁相, 基本原理是: 首先, 获得理想频率与实际频率间的偏差值; 然后, 实时调整控制电压, 使偏差值逐渐降低至零, 进而能够实时线性校正 VCO 电调特性。典型的闭环线性校正方法包括鉴频比较法和延迟鉴相法。

如图 2 所示, 鉴频比较法的基本原理<sup>[8]</sup>是: 扫描电压信号通过 VCO 后输出扫频信号, 将扫频信号送入鉴频器中(要求鉴频器具有较好的鉴频线性度, 这将影响最终的线性校正效果), 鉴频器对信号进行频率电压变换后, 将变换后的信号与原始扫描电压信号比较, 得到电压误差值, 最终控制 VCO 得到高线性扫频信号。

文献[9]是将信号变频为低频信号, 然后通过鉴频器得到线性度为 0.1% 的调频连续波信号, 其采用的八次谐波混频方法是主要创新点。

如图 3 所示, 延迟鉴相法的基本原理<sup>[8,10]</sup>是: 扫描电压信号通过 VCO 后输出扫频信号, 将扫频信号通过延迟线延迟, 此时获得两种扫频信号, 然后将两种扫频信号通过混频器得到差频信号, 根据差频信号的情况判断扫频信号是否为线性。如果差频信号频率不随时间变化, 则扫频信号为线性; 如果差频信号随时间变化, 则扫频信号不是理想线性, 此时将差频信号送入鉴相器与参考源进行比较, 通过放大器及低通滤波器后使用误差信号控制 VCO, 从而得到线性扫频信号。

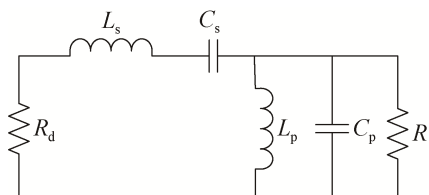


图 1 电抗补偿线性校正法原理电路  
Fig. 1 The principle circuit of reactance compensation linearity correction method

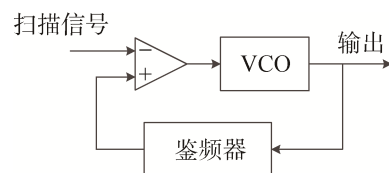


图 2 鉴频比较法线性校正原理  
Fig. 2 Linear correction principle of frequency detecting method

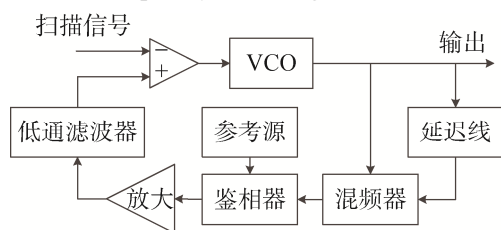


图 3 延迟鉴相法线性校正原理  
Fig. 3 Linear correction principle of delay-phase detecting method

### 1.3 开环线性校正法

开环线性校正法的基本原理是：通过获得非线性转移特性函数，使用线性校正器校正电调特性，得到线性的电调特性函数。开环线性校正方法可以分为数字线性校正、模拟乘法器线性校正、断点线性校正等<sup>[8]</sup>。

对比上述三种线性校正法，电抗补偿线性校正法存在校正效果可靠性较低、电调特性波纹大、调试过程复杂等问题；闭环线性校正法实现结构较为复杂；开环线性校正法虽然成本较低、实现较简单，但是目前已提出的这些方案仍存在电调特性线性校正效果稍差的问题<sup>[11]</sup>。为获得更好的线性效果，本文提出一种基于多项式拟合的 VCO 开环线性校正法，其原理及实现如下文所述。

## 2 基于多项式拟合的 VCO 开环线性校正法

### 2.1 基本原理

由于 VCO 电调特性函数随温度变化且线性度较差，导致基于 VCO 的 FMCW 信号源的线性度差，且存在随温度漂移现象，因此本文通过实时估计 VCO 的电调特性函数，并调整 VCO 的输入电压波形实现对电调特性函数的补偿，具体分析如下。

VCO 的电调特性函数表示为：

$$F = f(v) \tag{1}$$

式中， $v$  为 VCO 的输入电压， $F$  为 VCO 输出射频信号的频率， $f(\cdot)$  为输出信号频率与输入电压的关系。对电调特性函数  $f(v)$  进行 Taylor 展开：

$$f(v) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (v - v_c)^n \tag{2}$$

式中， $a_n$  为 Taylor 展开系数， $v_c$  决定了线性调频连续波的中心频率。一般情况下电调特性函数  $f(v)$  为缓变的单调递增函数，而且高频分量较小，因此可以保留  $N$  阶 Taylor 展开项：

$$f(v) \approx \sum_{n=0}^N \hat{a}_n (v - v_c)^n \tag{3}$$

式中， $\hat{a}_n$  表示对电调特性函数 Taylor 展开后第  $n$  阶多项式系数  $a_n$  的估计。多项式系数  $\hat{a}_n$  在 VCO 工作过程中会随着温度的变化而变化，对 VCO 电调特性函数  $f(v)$  的估计即可转化为对多项式系数  $\hat{a}_n$  的实时估计。本文提出的校正方法采用的硬件框图如图 4 所示。

在初始阶段，为了获得具有一定带宽的 FMCW 信号，将锯齿波信号输入 VCO，并通过 DA 输出：

$$v(t) = v_c + \frac{v_d}{T}t, \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \tag{4}$$

式中， $t$  为时间变量， $T$  为线性调频连续波的脉冲信号宽度， $v_c$  决定了线性调频连续波的中心频率， $v_d$  由输出信号的带宽和 VCO 的电调特性函数的斜率共同决定。

由于 VCO 输出频率和带宽比较高，无法直接采用 AD 模块采集，因此，本文在 AD 采样之前对 VCO 输出的信号进行  $M$  倍分频，降低信号频率和带宽，并通过带通滤波器滤除谐波分量和高频噪声。通过 AD 采集得到的分频信号可以表示为：

$$s(t) = \exp\{jp(t)\} \tag{5}$$

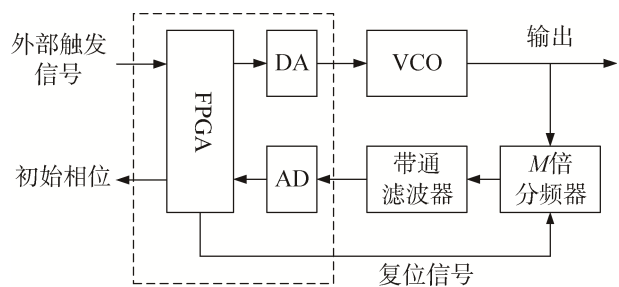


图 4 基于多项式拟合的 VCO 开环线性校正法硬件框图

Fig. 4 Hardware block of the VCO open-loop linearity correction method based on polynomial fitting

式中,  $p(t)$  为分频结果的相位:

$$p(t) = \frac{p_0}{M} + \frac{1}{M} \int_0^t f(v(\tau)) dv(\tau) \approx \frac{p_0}{M} + \frac{1}{M} \sum_{n=0}^N \frac{\hat{a}_n}{n+1} [v(t) - v_c]^{n+1} \quad (6)$$

其中  $p_0/M$  为对相位信号  $p(t)$  进行 Taylor 展开后的第 0 项系数。多项式系数  $\hat{a}_n$  和  $p_0$  可以通过最小二乘法求解:

$$\min_{p_0, \hat{a}_n} \int_t \left| \frac{p_0}{M} + \frac{1}{M} \sum_{n=0}^N \frac{\hat{a}_n}{n+1} [v(t) - v_c]^{n+1} - p(t) \right|^2 \quad (7)$$

VCO 线性校正的原理是通过调整  $v(t)$ , 使得  $p(t)$  等于理想的线性调频连续波信号相位  $p'(t)$ , 即建立方程:

$$\frac{p_0}{M} + \frac{1}{M} \sum_{n=0}^N \frac{\hat{a}_n}{n+1} [v'(t) - v_c]^{n+1} = p'(t) \quad (8)$$

通过求解  $v'(t)$ , 并通过 DA 输出就可以实现对 VCO 的校正。进一步的,  $v'(t)$  可以表示为上一次的波形  $v(t)$  的调整:

$$v'(t) = \Delta v(t) + v(t) \quad (9)$$

式中,  $\Delta v(t)$  为对  $v(t)$  信号的调整, 通常满足  $\Delta v(t) \ll v(t)$ , 因此可以对方程左边进行一阶 Taylor 近似, 得到近似后的方程:

$$\frac{p_0}{M} + \frac{1}{M} \sum_{n=0}^N \frac{\hat{a}_n}{n+1} [v(t) - v_c]^{n+1} + \frac{1}{M} \sum_{n=0}^N \hat{a}_n [v(t) - v_c]^n \Delta v(t) = p'(t) \quad (10)$$

通过方程求解可以得到需要调整的电压波形  $\Delta v(t)$ :

$$\Delta v(t) \approx \frac{Mp'(t) - p_0 - \sum_{n=0}^N \frac{\hat{a}_n}{n+1} [v(t) - v_c]^{n+1}}{\sum_{n=0}^N \hat{a}_n [v(t) - v_c]^n} \quad (11)$$

通过 DA 设置 VCO 输入电压  $v'(t) = \Delta v(t) + v(t)$ , 即可实现对 VCO 的校正。

此外, 采用 VCO 的线性调频连续波信号无法保证初始相位的稳定, 通常只能用于 Dechirp 方式的接收机中。本文提出的校正方法通过在采集开始时复位分频器, 可以准确地估计线性调频连续波信号的初始相位  $p_0$ , 极大地扩展了 VCO 的应用领域。

### 2.2 线性校正流程

本文提出的基于多项式拟合的 VCO 开环线性校正法流程<sup>[12]</sup>如图 5 所示。

该方法首先对 VCO 输出的射频信号进行  $M$  倍分频, 并对分频后的信号进行滤波和 AD 采集, 通过在 FPGA 中进行数字信号处理获得 VCO 输出射频信号的非线性信息, 并修正 DA 输出的电压信号实现对 VCO 的校正。具体校正步骤<sup>[12]</sup>如下:

① 通过 FPGA 设置 DA 输出的初始电压  $v_0(t)$ , 即未经过校正的电压。

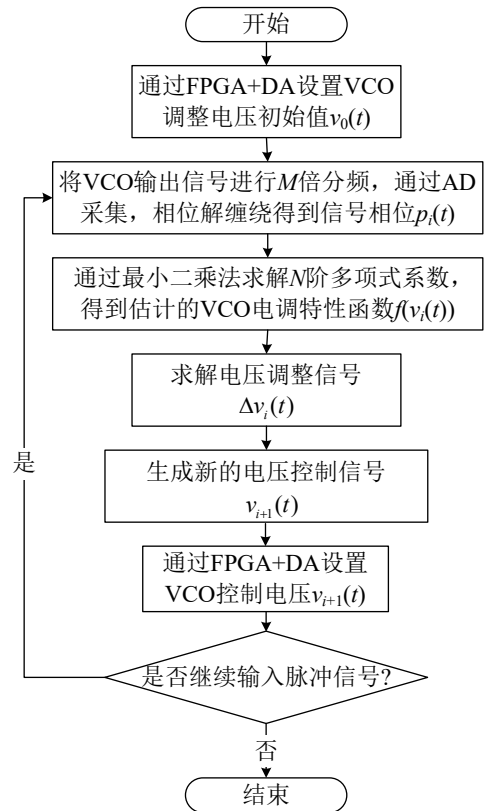


图 5 基于多项式拟合的 VCO 开环线性校正流程图

Fig. 5 The flow chart of the VCO open-loop linearity correction method based on polynomial fitting

② 对 VCO 的输出信号进行  $M$  倍分频，得到的分频信号由 AD 采集，再经过相位解缠绕获得分频信号的相位  $p_i(t)$ 。

③ 求解  $N$  阶多项式系数  $\hat{a}_n$  和初始相位估计  $\hat{p}_0$ ，得到电调特性函数  $f(v_i(t))$ 。 $\hat{p}_0$  表示对相位信号  $p_0$  的估计。

④ 求解第  $i+1$  次电压调整信号  $\Delta v_i(t)$ 。

⑤ 计算获得新的 VCO 控制电压  $v_{i+1}(t)$ ：

$$v_{i+1}(t) = v_i(t) + \alpha \Delta v_i(t), 0 < \alpha \leq 1 \tag{12}$$

式中， $\alpha$  影响迭代速度和稳定度， $\alpha$  取值越大，迭代速度越快但稳定度变差。

⑥ 将上一步获得的新的 VCO 控制电压保存在 FPGA 中，下一次触发信号到来后，将控制电压经过 DA 发送至 VCO，开始循环迭代。如果不再继续输入脉冲信号，则不再进行 VCO 校正，流程结束。

### 3 实验验证

在安检仪的线性调频连续波生成模块中使用本文提出的方法，验证其正确性。模块发射线性调频连续波，经过 VCO 输出的信号频率为 3 GHz~3.75 GHz，耦合后通过 20 倍分频，再进行 AD 校正。线性调频连续波脉冲宽度为 5.5  $\mu$ s，经过 8 倍频后生成雷达信号发射并 Dechirp 接收。实验结果如图 6 所示。

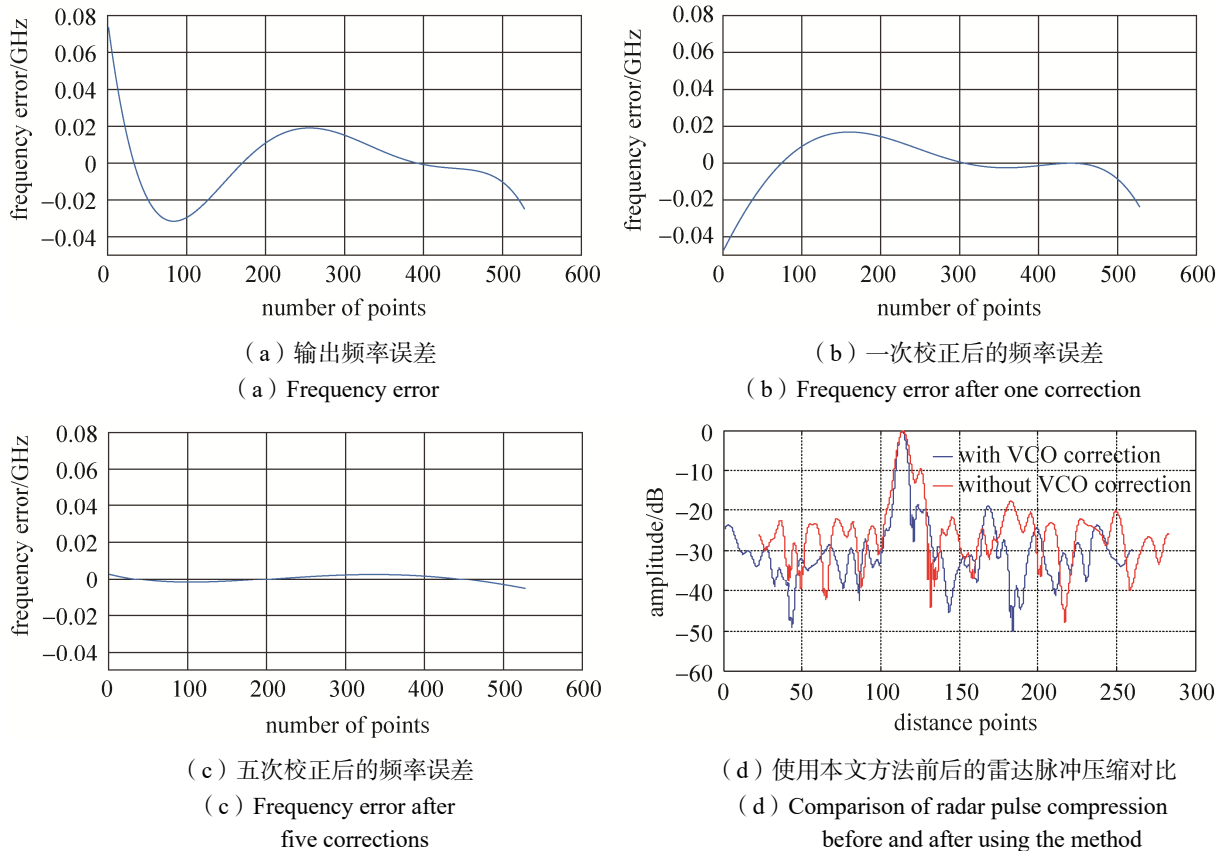


图 6 实验验证结果

Fig. 6 Experimental verification results

对 VCO 输入锯齿波，图 6 (a) 所示为 VCO 的输出频率误差；多项式阶数取 5，经过一次校正后，频率误差如图 6 (b) 所示，可以看到线性度有所改善；继续进行迭代，第五次校正后的频率误差如图 6 (c) 所示，经过对比，线性调频连续波的线性度在经过不断地迭代校正后得到了很大的提升。图 6 (d) 为使用本文方法前后雷达脉冲压缩效果。实验结果表明，线性调频连续波脉冲信号的线性度明显提升，

证明了本文提出的基于多项式拟合的 VCO 开环线性校正法的正确性和有效性。

#### 4 结束语

为了提高安检成像系统的距离分辨能力, 本文提出了一种基于多项式拟合的 VCO 开环线性校正法, 该方法通过实时估计 VCO 的电调特性函数, 并调整 VCO 的输入电压波形实现对电调特性函数的补偿, 从而实现了 VCO 电调特性的线性校正。该方法具备较好的实时性, 并能够消除温度漂移现象。实验结果表明, 该方法合理、有效地提升了线性调频连续波脉冲信号的线性度, 从而改善了安检成像的效果。

#### 参考文献

- [1] 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(12): 33–38.  
XIAO Wei, TU Yaqing, LI Xianli. Review of sweeping nonlinearity correction technology for VCO[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2009, 46(12): 33–38.
- [2] 解兰. 高线性度压控振荡器的研究[C]// 第十五届全国半导体集成电路、硅材料学术会议, 2007.  
XIE Lan. Research on high linearity voltage controlled oscillator[C]// 15th National Conference on Semiconductor Integrated Circuits and Silicon Materials, 2007.
- [3] LOCKYEAR W H. Linearize VCOs by reactance compensation [J]. Microwave, 1980, 23(2): 60–68.
- [4] 齐晓辉. FMCW 雷达物位系统的研究及设计[D]. 天津: 天津理工大学, 2011.  
QI Xiaohui. Research and design of FMCW radar level system [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2011.
- [5] 马建军, 陈安定. 一种扩展压控振荡器带宽的方法[J]. 电子与封装, 2006, 6(8): 30–32.  
MA Jianjun, CHEN Anding. A method of extending the VCO's bandwidth[J]. Electronics and Packaging, 2006, 6(8): 30–32.
- [6] KOO K H, YOON S W, KIM C W. A 34% tuning range CMOS VCO with linear frequency tuning[C]// IEEE Proc Radio Wireless Symp. Pohang, Korea, 2009: 288–291.
- [7] KWON H, KANG B. Linear frequency modulation of voltage-controlled oscillator using delay-line feedback[J]. IEEE Microwave Wireless Compon Lett, 2005, 15(6): 120–123.
- [8] 沈涛, 孙忠良. 毫米波 VCO 电调特性的线性校正方案研究[J]. 现代雷达, 1997, 19(1): 91–100.  
SHEN Tao, SUN Zhongliang. Investigation of linearization schemes for millimeter wave VCO tuning characteristics[J]. Modern Radar, 1997, 19(1): 91–100.
- [9] WILLIAMS D A. A highly linearized mm-wave voltage controlled oscillator for FMCW radar applications[C]// IEEE colloquium Sol Sta Compon Radar. London, UK, 1988: 611–615.
- [10] 冷建伟, 齐晓辉. VCO 电调特性的线性校正技术综述[J]. 微电子学, 2012, 42(3): 440–444.  
LENG Jianwei, QI Xiaohui. An overview of linearity correction technology for Tuning Characteristics of VCO[J]. Microelectronics, 2012, 42(3): 440–444.
- [11] 侯卫国, 翟霄汉, 杨作祥. 基于 FPGA 的 K 波段 VCO 宽带线性校正[J]. 兵工自动化, 2016, 35(12): 10–13.  
HOU Weiguo, ZHAI Xiaohan, YANG Zuoxiang. Linearity correction of K-band VCO broadband based on FPGA[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(12): 10–13.
- [12] 北京遥测技术研究所, 航天长征火箭技术有限公司. 一种用于安检成像的 VCO 扫频非线性校正方法: 201811603359.2[P]. (2019-04-05) [2021-08-26].

#### [作者简介]

- 郭东文 1978 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电子与信息。  
 张焱 1992 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹安检成像。  
 刘强 1991 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹安检成像。  
 孙兆阳 1988 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹安检成像。

(本文编辑: 傅 杰)