

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.06.020

基于 DDS+PLL 的光源调制与功率稳定控制方法

马锦贵, 孙晓光, 庞喜浪, 万双爱

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要:量子传感器是基于量子操控技术的研究成果,一般具有高精度、小体积等优势。激光器是量子传感器的核心部件,有抽运和检测功能,激光器的稳定性对量子传感器具有重要的意义。提出了一种直接数字合成法(DDS)与锁相回路(PLL)相结合的方法,对激光器进行调制并抑制调制噪声,实现了激光器的稳定输出。基于现有小型量子传感器装置,在 DDS 生成 4kHz 参考信号的情况下实现了激光器电流 8kHz 调制,抑制了调制时调制电流信号噪声约 8dB,并提高了激光器输出光功率的稳定性。

关键词:量子传感器;激光器;调制;DDS;PLL;噪声抑制

中图分类号:TP391.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2022)06-0163-06

Light Source Modulation and Power Stability Control Method Based on DDS+PLL

MA Jin-gui, SUN Xiao-guang, PANG Xi-lang, WAN Shuang-ai

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: Quantum sensors are research results based on quantum control technology, and generally have the advantages of high precision, small size and so on. Lasers are core components of quantum sensors, which have pumping and detection functions. The stability of laser is of great significance to quantum sensors. In this paper, a combination method of direct digital synthesis (DDS) and phase locked loop (PLL) is proposed to perform frequency modulation and suppress modulation noise to achieve stable output of laser. In this paper, based on the existing small quantum sensor device, a 8kHz laser current modulation is realized under the condition that DDS generates a 4kHz reference signal, and the noise of modulation current signal is suppressed by about 8dB, and the stability of laser light intensity output is improved.

Key words: Quantum sensor; Laser; Modulation; DDS; PLL; Noise suppression

0 引言

随着量子技术的发展,量子传感器的出现进一步拓宽了传感器领域和范围。量子传感器是基于量子操控技术的研究成果,一般的量子传感器具有体积小、精度高或者发展潜力较大等特性^[1-5]。激光器是

小型量子传感器的主要器件,根据使用方法分为驱动激光器和检测激光器两种,其输出稳定性影响着量子传感器的性能。激光器调制可以将待测的低频区光学信号调制到高频区,从而隔离低频区 $1/f$ 等噪声影响,有利于提高量子传感器的灵敏度^[6]。受限于量子传感器的体积要求,传统的法拉第调制、光弹调制

收稿日期:2021-11-15;修订日期:2022-01-10

作者简介:马锦贵(1997-),男,硕士研究生,主要从事核磁共振陀螺控制方面的研究。

通信作者:孙晓光(1989-),男,高级工程师,主要从事原子操控技术方面的研究。

法^[7-8]等硬件系统较为复杂,难以在小体积量子传感器中实现。此外,激光器调制过程引入调制信号时,一方面调制频率受到AD模块采样频率的限制;另一方面,调制信号将引入额外噪声^[9-10],从而影响激光器输出光强。并且随着产生的调制信号频率的增大,调制信号产生过程中引入的噪声会越大,对激光器光强影响更大,严重影响激光器输出光强的稳定性。因此,需要选择合适的参考源,并抑制参考源产生信号的噪声,以实现光源的稳定调制,并减小调制对激光器光强造成的影响。

为实现对小型内部光源的有效调制,并且抑制光源调制引入的噪声,获得具有干净频谱的调制信号,参考目前光源调制方法中使用最广泛的方法,即采用直接数字合成法(Direct Digital Synthesis, DDS)^[11-12]生成正弦序列信号作为频率参考源,结合调制电路进行调制的方法,并根据信号合成理论和小体积量子传感器的工作要求,提出了基于DDS结合锁相环(Phase Locked Loop, PLL)的光源调制方法,适用于小型量子传感器。基于现有的小型量子传感器工作装置,实现了光源稳定调制的验证,并且降低了调制对激光器输出光强的影响。

1 系统组成

光源调制功能实现一般如图1所示,在整个设计方案中,交流调制参考信号通过FPGA控制DDS IP核产生,并通过PLL^[13]进行调理;FPGA通过数字信号控制集成芯片产生电压输出信号,并根据实际电路进行换算产生电流输出信号,相加之后输出具有偏置的调制电流信号,实现对激光器电流的调制。采用FPGA控制芯片输出电压时,需要结合电路控制和实际工作要求进行实际的换算,并通过线圈完成电流的转换,实现对光源的驱动电流调制。

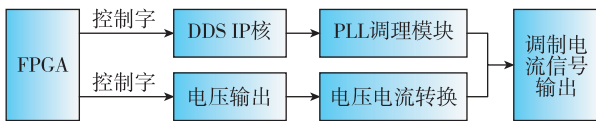


图1 总设计方案功能框图

Fig. 1 Block diagram of overall design

2 具体实施方案

2.1 调制信号产生

设 f_{DDS} 为DDS的输出频率, f_c 是参考时钟频

率,它们与相位累加器长度(N)以及频率控制字(Frequency Control Word, FSW)之间的关系为: $f_{\text{DDS}} = f_c \cdot \text{FSW}/2^N$ 。而DDS的频率分辨率 $\Delta f_{\text{DDS}} = f_c/2^N$ 。

DDS生成的信号近似为正弦信号,假设采样频率为 f_0 , $f_0 = f_{\text{DDS}}$,则实际得到的采样信号为

$$s(t) = s(n) \cdot h(t) \\ = [\sin(2\pi f_0 t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_c) \times h(t)] \quad (1)$$

其中, $T_c = 1/f_c$

$$s(n) = \sin(2\pi f_0 n T_c) \\ = \sin\left(2\pi \frac{\text{FSW} \cdot f_c}{2^N} n T_c\right) \quad (2) \\ = \sin\left(2\pi \frac{\text{FSW}}{2^N} n\right)$$

对阶梯波 $S(t)$ 做傅里叶变换,得到

$$s(\omega) = -j\pi \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{Sa}\left(\frac{f_0 - n f_c}{f_c} \pi\right) \cdot \\ \exp\left(-j \frac{n f_c - f_0}{f_c}\right) \delta(\omega + n\omega - \omega_0) + \\ j\pi \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{Sa}\left(\frac{f_0 + n f_c}{f_c} \pi\right) \cdot \\ \exp\left(-j \frac{n f_c + f_0}{f_c}\right) \delta(\omega + n\omega - \omega_0) \quad (3)$$

通过方程式(3)可以看出,理想的DDS输出频谱是包络为Sa函数的离散谱线。由奈奎斯特采样定理可知,在实际采样时,要保证采样信号的完整度,输出频率不能超过 $0.5f_c$ 。在实际应用中,DDS输出频率为采样频率的40%以下。但在实际应用过程中,调制信号不仅受到实际电路的限制,并且频率噪声和幅度噪声也在现有硬件条件下随着频率的增大而不断变大。为了满足实际调制信号的要求,可以采用在DDS输出后加入PLL调理电路,实现提高输出频率并抑制整体噪声的目的。具体的DDS+PLL调制参考信号生成功能框图如图2所示,通过状态字FSW控制DDS芯片产生的参考频率,并经R分频后进入相位检波器。PLL通过锁定VCO(压控振荡器)输出 N (一般为定值)倍于输入信号频率的频率信号。在参考频率产生过程中,DDS作为参考源使用。DDS技术具有频率转化速率快、分辨率极高、低相位噪声和低漂移,以及独有的连续相位变化等优点^[14],并且电路集成度较高,易于调试。PLL技术具有高响应频率、宽带宽、相位噪声小、杂散低、电路简单等优点,DDS的输出频率由R分频后,经PLL锁定放大 N 倍

并由 VCO 输出,总的输出频率得到提升。

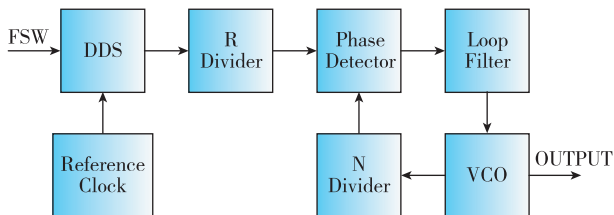


图 2 调制信号生成框图

Fig. 2 Block diagram of generating modulation signal

采用此种方法,DDS 作为本振参考源,通过 PLL 模块锁定 VCO 锁定输出频率,一方面可提高传统 DDS 作为参考源的调制频率上限;另一方面,DDS+PLL 的频率合成技术可以有效抑制 DDS 及采集电路产生的杂散和噪声电平,从而获得具有干净频谱的调制信号。

2.2 调制电路

为实现激光器的稳定输出,并且保证激光器的稳定工作,外部调制电路由以下几部分组成:

- 1)保护电路,半导体激光器需要将输入激光器电流控制在可控范围内,因此需要过流保护电路;
- 2)具有慢启动功能的直流偏置电路,用于避免电源开启瞬间电流浪涌和电压浪涌的冲击;
- 3)信号放大电路;
- 4)调制电路。

具体的系统框图如图 3 所示,调制信号和直流偏置信号经过放大器后进行相加,过流保护电路实现慢启动,以避免快开快断造成的瞬间大电流并起到限流作用。在实际使用中,直流偏置和交流的叠加通过集成芯片完成,并输出具有偏置的调制电压或电流信号。

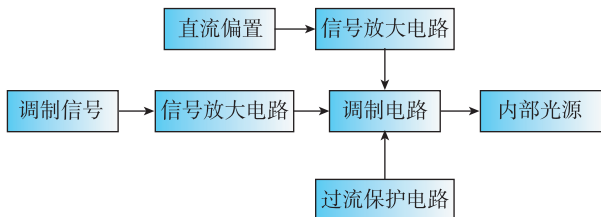


图 3 调制电路组成框图

Fig. 3 Block diagram of modulation circuit system

3 仿真测试

由调制信号生成框图可知,DDS 产生信号序列

后,经由 R 分频进入相位检波器,由 PLL 模块进行控制。DDS 产生的信号序列近似于正弦信号,由于 DDS 的杂散边缘误差主要来源于截位误差,并结合在传感器内部应用的限制,在仿真时,以掺杂具有展宽高斯白噪声的正弦信号模拟受外界限制干扰和杂散影响的 DDS 信号。PLL 采样频率设为 20kHz,模拟实际工作模式下受到其他因素限制的 AD 采集模块的实际采样频率。压控振荡器自由振荡频率 f_{VCO} 为进入相位检波器的信号频率 f_{DDS} 的 $N = 2$ 倍,在未有参考基准频率输入时,压控振荡器按照自由振荡频率输出信号,实现增大 DDS 输出频率上限的功能。仿真产生的时域图如图 4 和图 5 所示。在仿真过程中,采样频率保持为 20kHz,DDS 与 VCO 自由振荡的信号幅度均为 0.025。图 4 为 DDS 直接输出 8kHz 数字调制信号,图 5 为 DDS 直接输出 4kHz 数字调制信号并由 PLL 调理后升至 8kHz。从时域图来看,受到实际采样率的限制,DDS

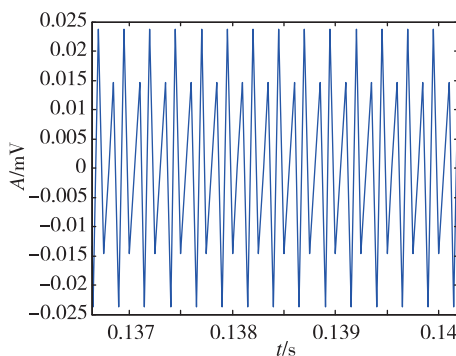


图 4 采样频率 20kHz,DDS 输出 8kHz 信号时域图

Fig. 4 Time-domain image of the 8kHz output signal of DDS with 20kHz sampling frequency

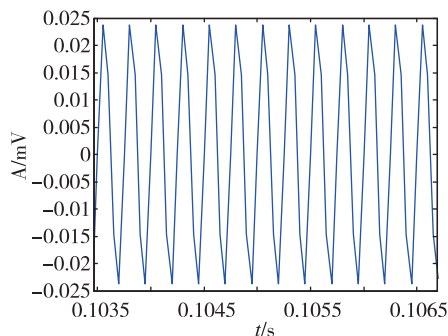


图 5 采样频率 20kHz,DDS 输出 4kHz,PLL 锁定后 VCO 输出 8kHz 信号时域图

Fig. 5 Time-domain image of 8kHz signal generated by VCO, with 4kHz signal created by DDS, PLL locked and 20kHz sampling frequency

产生的数字信号已经出现了失真现象,频率不能保持稳定;经过 PLL 调理后的波形仍然维持频率本身的特性,从时域上来看幅度受到限制,但数字信号本身特性依旧保持,并且调制信号的频率输出稳定。由于 DDS 本身的噪声电平会随着频率的增大而增大,在实际调制时可以根据分频比减小 DDS 的生成频率,从而抑制 DDS 本身的噪声电平,并通过 PLL 环节增大调制频率。

在整个系统中,环路滤波器对频率噪声有一定的抑制作用,对 DDS 生成的数字展宽有限制作用,但作用较小。具体仿真结果如图 6 所示,蓝色线为 DDS 输出 8kHz 信号,红色线为 PLL 锁定 VCO 输出 10kHz 信号,采样频率为 30kHz,从 -110dB 信号强度到 -60dB 红色线均比蓝色线的频率宽度窄,在 -110dB 信号强度下,VCO 输出比 DDS 输出信号窄约 200Hz 带宽。

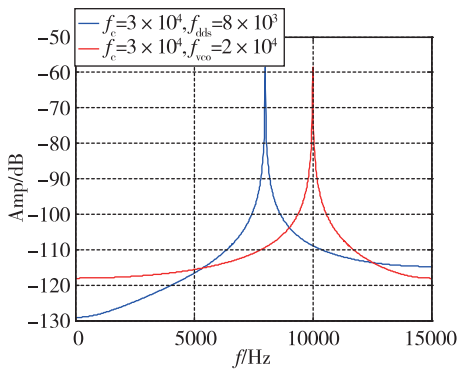


图 6 采样 30kHz, $f_{\text{dds}}=8\text{kHz}$, $f_{\text{vco}}=10\text{kHz}$ 时的数字信号 FFT
Fig. 6 Frequency domain image of 8kHz digital signal created by DDS and 10kHz digital signal created by VCO with 30kHz sampling frequency

4 实验测试

目前,大部分 FPGA 集成芯片都有不同的 IP 核作为内嵌模块,本次实际操控采用 Xilinx 公司的处理器芯片,通过其内部的 IP 核生成 DDS 参考信号,参考信号由状态字进行控制,输出具有偏置的调制电流信号供给激光器。通过电压输出芯片采集 FPGA 输出数字控制字并进行 PLL 调理后输出具有偏置的调制电压,经由电流输出芯片完成电流转换,实现对激光器的供电和电流调制。在实际供电时,通过 16 位数字信号控制输出的偏置调制电压信号,通过状态字控制调制电压信号,完全满足现在大多数小型量子传感器的工作状态需求。在实际实验验证过程中,传感器正常工作,DDS 输出

8kHz 调制信号和 DDS 输出 4kHz 调制信号,经由 PLL 调理后输出为 8kHz 信号,分别对激光器直流偏置相加完成光源的内部调制,并用光电探测器吸收后转化为电流进行采集,具体实验结果如图 7~图 10 所示。

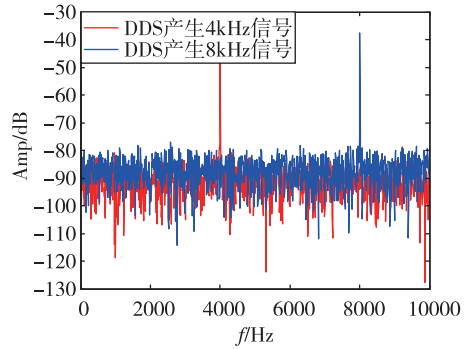


图 7 DDS 输出 4kHz 与 8kHz 信号的 FFT
Fig. 7 Frequency domain image of 4kHz digital signal and 8kHz digital signal created by DDS

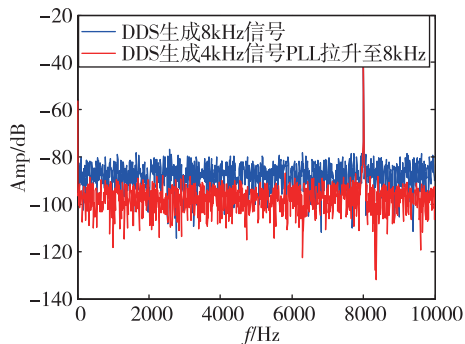


图 8 DDS 输出 8kHz 与 DDS 输出 4kHz 并经由 PLL 模块拉升至 8kHz 信号 FFT
Fig. 8 Frequency domain image of 8kHz digital signal created by DDS and 8kHz digital signal created by VCO with 4kHz signal created by DDS and PLL locked

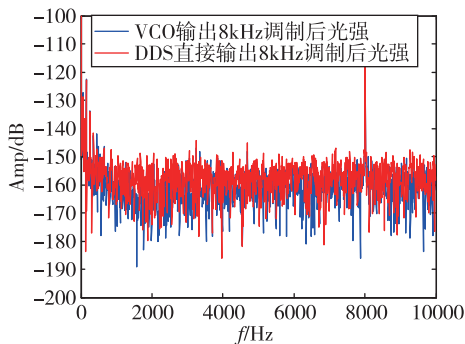
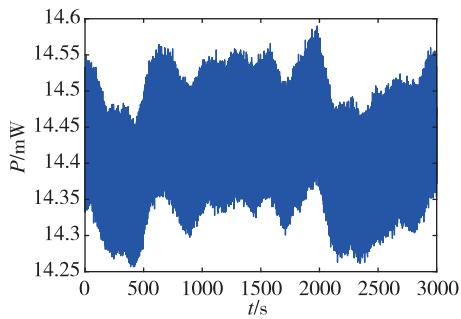
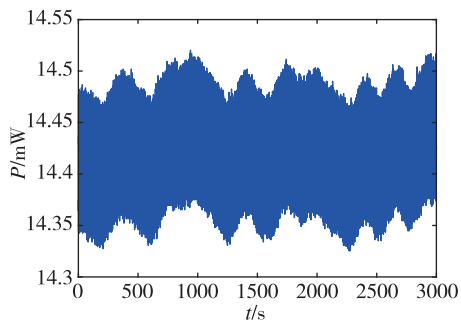


图 9 光电探测器转化光功率信号 FFT
Fig. 9 Frequency domain image of light intensity signal transformed by photoelectric pickoff



(a) DDS 调制电流输出光功率



(b) VCO 调制电流输出光功率

图 10 两种调制方式调制后光强时域图

Fig. 10 Time-domain image of light intensity signal modulated by two different current modulation modes

图 7、图 8 为控制电路空载时直接采集生成的调制信号,图 7 为 DDS 生成 4kHz 信号和生成 8kHz 信号时的频谱,蓝色线为 8kHz 信号,红色线为 4kHz 信号,8kHz 信号底噪电平比 4kHz 信号高 3~4dB,信号强度大 2dB,DDS 的噪声电平随着生成信号的频率增大而增大;图 8 为 DDS 生成 8kHz 和 DDS 生成 4kHz 后经 PLL 模块锁定 VCO 输出 8kHz 的信号,DDS 生成 4kHz 并经 PLL 锁定至 8kHz,噪声电平受到一定的抑制,底噪电平降低约 8dB,信号强度保持不变。一方面,DDS 生成低频信号时噪声电平低;另一方面,PLL 模块对信号噪声产生抑制作用,使实际生成的信号频率展宽受到一定的限制,功率谱密度变小,反映到频谱上为底部噪声电平变低。

图 9、图 10 为应用于小型量子传感器内部时的测试结果,分别由 DDS 生成 8kHz 调制信号、DDS 生成 4kHz 后经 PLL 模块锁定 VCO 输出 8kHz 产生的调制信号去调制激光器电流,并用光电探测器采集激光器输出的光强信号。图 9 为光电探测器采集光功率转化电流信号并经 AD 采集的频谱图,两种不同调制方式对光强噪声的影响约 3dB;图 10 为

光电探测器采集到的光强转化为电流信号的时域图,均为激光器在室温条件下上电启动 1h 后采集输出光功率,其中(a)为 DDS 输出 8kHz 信号调制激光器电流后,PD 采集激光器光强,(b)为 VCO 输出 8kHz 调制信号调制激光器电流后 PD 采集激光器光强。在将近 1h 采集光强时间内,DDS 输出调制光强仍在波动,VCO 调制激光器在 1h 内已经达到稳定状态,并且噪声是 DDS 噪声范围的一半,与图 9 测试得到的输出光强信号的 FFT 噪声电平结果相同,且多次实验具有重复效果。

5 结论

本文从提高光源调制频率和稳定激光器输出光强出发,提出了 DDS+PLL 的调制方法,对激光器进行调制以实现稳定激光器输出。并根据现有的小型量子传感器的激光器工作状态搭建装置,实现了光源的电流调制,在 DDS 产生 4kHz 频率的情况下完成了 8kHz 的激光器电流调制,并且经 PLL 调制后抑制了调制信号噪声电平,噪声降低约 8dB,稳定了激光器输出光强波动,激光器输出噪声降低 3dB。本文提出的 DDS+PLL 频率合成技术的调制方法,可以有效提高小型量子传感器内部光源调制频率上限,并优化激光器调制电流的噪声,为提高小型量子传感器本身灵敏度提供了一种切实有效的方法。

参考文献

- [1] Donley E A. Nuclear magnetic resonance gyroscopes [C]//Proceedings of IEEE Sensors Conference. Kona, 2010: 17-22.
- [2] Larsen M, Bulatowicz M. Nuclear magnetic resonance gyroscope: for DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program[C]// Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium. Baltimore, 2012: 1-5.
- [3] Larsen M, Meyer D. Nuclear magnetic resonance gyro for inertial navigation[J]. Gyroscopy and Navigation, 2014, 5(2):75-82.
- [4] 秦杰,汪世林,高溥泽,等.核磁共振陀螺技术研究进展[J].导航定位与授时,2014,1(2):64-69. Qin Jie, Wang Shilin, Gao Puze, et al. Research progress of NMR gyro technology[J]. Navigation Positioning and Timing, 2014, 1(2):64-69(in Chinese).
- [5] 万双爱,孙晓光,郑辛,等.核磁共振陀螺技术发展展望[J].导航定位与授时,2017,4(1):7-8.

- Wan Shuang'ai, Sun Xiaoguang, Zheng Xin, et al. Prospect of nuclear magnetic resonance gyro technology development [J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(1): 7-8 (in Chinese).
- [6] Seltzer S. Developments in alkali-metal atomic magnetometry [D]. Princeton: Princeton University, 2008.
- [7] Liu K, Liu T G, Jiang J F, et al. Investigation of wavelength modulation and wavelength sweep techniques in intracavity fiber laser for gas detection [J]. Journal of Lightwave Technology: A Joint IEEE/OSA Publication, 2011, 29(1): 15-21.
- [8] Robin S, Michaela T, Jari R, et al. Quadratic magneto-optic spectroscopy setup based on photoelastic light modulation [J]. Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications, 2018, 31: 60-65.
- [9] Maleev N A, Blokhin S A, Bobrov M A, et al. Laser source for a compact nuclear magnetic resonance gyroscope [J]. Gyroscopy and Navigation, 2018, 9(3): 177-179.
- [10] 汤汉屏. 直接数字频率合成杂散抑制方法的研究 [J]. 电讯技术, 2002, 42(5): 10-13.
Tang Hanping. Research on spurious suppression method of direct digital frequency synthesis [J]. Telecommunications Technology, 2002, 42(5): 10-13 (in Chinese).
- [11] 贾方秀, 丁振良, 袁峰. 半导体激光器高频调制系统研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2009(3): 78-83.
Jia Fangxiu, Ding Zhenliang, Yuan Feng. Research on high frequency modulation system of semiconductor laser [J]. Instrument Technology and Sensors, 2009(3): 78-83 (in Chinese).
- [12] 陈琳晶. 级联 DDS 低杂散技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
Chen Linjing. Research on cascade DDS low spurious technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2010 (in Chinese).
- [13] 金数波, 邓贤进. S 波段 DDS/PLL 频率合成技术研究 [J]. 电讯技术, 2002, 42(1): 13-16.
Jin Shubo, Deng Xianjin. Study on synthesis technology of S-band DDS/PLL frequency [J]. Elecommunications Technology, 2002, 42(1): 13-16 (in Chinese).
- [14] 高建栋, 韩壮志, 何强, 等. DDS 杂散分析及抑制方法研究 [J]. 计算机技术与自动化, 2012, 31(2): 29-32.
Gao Jiandong, Han Zhuangzhi, He Qiang, et al. DDS spurious analysis and suppression methods [J]. Computer Technology and Automation, 2012, 31(2): 29-32 (in Chinese).

(编辑: 李瑾)