光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250925002

基于光电融合的宽带低相噪信号产生方法

陈　诺*，彭若雪，肖永川，庾财斌，张　浩
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要：文章提出一种基于光电融合的宽带低相噪信号产生方法。首先利用光电振荡器（OEO）产生低相噪的本振信号作为参考信号注入直接数字频率合成（DDS）信号发生器中，在电域生成低频窄带线性调频信号，然后调制到光域，利用微波光子倍频技术从而产生高频宽带的线性调频信号。理论分析了采用微波光子倍频技术过程中，偏置点偏离及输入射频信号功率分别与倍频信号杂散抑制的变化关系。通过搭建实际链路验证了采用OEO作为参考信号相比于常规的信号发生器而言，DDS输出信号的相位噪声降低了12 dB。DDS生成频率为1.625～2.125 GHz的低频窄带信号，并通过三级级联光倍频，产生了13～17 GHz的高频宽带信号，相噪优于－112 dBc/Hz@10kHz。光倍频链路产生的高频宽带信号杂散抑制受制于调制器自动反馈控制电路的控制精度，杂散抑制优于30 dBc。该方法利用OEO作为参考信号改善DDS产生信号的相位噪声，依赖电域成熟的技术产生窄带信号，利用光子技术的大带宽特性来拓宽其载频和带宽，可产生高频、大带宽的线性调频信号，具有较高的工程应用价值。

关键词：微波光子倍频；宽带信号产生；光电振荡器；光电融合
中图分类号：TN957　**文章编号：**1001－5868(2025)06－1017－08

Broadband Low Phase Noise Signal Generation Method Based on Photoelectric Fusion

CHEN Nuo, PENG Ruoxue, XIAO Yongchuan, YU Caibin, ZHANG Hao
(**Chongqing Optoelectronic Technology Institute, Chongqing 400060, CHN**)

Abstract: A method for generating broadband low-phase-noise signals through the integration of photoelectric technology is proposed. This method first uses an optoelectronic oscillator (OEO) to generate a low-phase noise local oscillator signal as a reference signal, which is then injected into a direct digital frequency synthesis (DDS) signal generator to generate a low-frequency narrowband linear frequency modulation signal in the electrical domain. Subsequently, this signal is modulated to the optical domain, and a high-frequency broadband linear frequency modulation signal is generated using microwave photonic frequency-doubling technology. Theoretical analysis was conducted to investigate the relationship between the deviation of the bias point and the input RF signal power and the changes in the suppression of the sidebands of the frequency-doubled signal when using microwave photonic frequency-doubling technology. The actual link was set up to verify that using an optical oscillator as the reference signal resulted in a 12 dB reduction in the phase noise of the DDS output signal compared to the conventional signal generator. The DDS generates low-frequency narrowband signals with frequencies ranging from 1.625 to 2.125 GHz. High-frequency broadband signals with frequencies ranging from 13 to 17 GHz are produced through three-level cascaded optical frequency doubling. The phase noise is better than －112 dBc/Hz at 10 kHz. The suppression of the high-

收稿日期：2025－09－25.
*通信作者：陈　诺

frequency broadband signal spurs generated by the optical frequency-doubling link is limited by the control accuracy of the automatic feedback control circuit of the modulator. The spurious suppression is greater than 30 dBc. This method utilizes the OEO as the reference signal to improve the phase noise of the DDS-generated signal. It relies on mature techniques in the electrical domain to generate narrowband signals and utilizes the large-bandwidth characteristics of photon technology to broaden its carrier frequency and bandwidth. It can generate high-frequency and wideband linear frequency modulation signals and has high engineering application value.

Key words: microwave photonics frequency doubling; wideband signal generation; optoelectronic oscillator; optoelectronic integration

0 引言

脉冲压缩技术利用匹配滤波原理,能够同时提高雷达探测距离和距离分辨率,已成为现代雷达系统中的关键技术。与传统雷达不同,脉冲压缩雷达的距离分辨率主要取决于发射脉冲信号的带宽。因此,为实现高精度的探测,雷达系统正朝着大带宽的方向发展。采用线性调频(LFM)信号是当前脉冲压缩雷达中的主流波形,而采用传统电学方法生成LFM信号时,受限于器件带宽和频率响应,通常存在带宽窄、载频低的“电子瓶颈”,其带宽仅在2 GHz左右,难以满足高精度探测的技术需求[1]。

相较之下,光学技术具有带宽大、体积小、质量轻、传输损耗低等优点,使用微波光子技术可生成大带宽的脉冲压缩信号,并已在微波光子雷达中得到了成功应用[2-4]。目前,采用微波光子技术产生LFM信号的方法主要包括基于电光相位调制[5]、基于光谱整形和频时映射[6]、基于光注入半导体激光器[7]、基于光子数模转换[8]、基于微波光子倍频[9]等方案。然而,这些方法各有局限:基于电光相位调制的方法需要电信号源来提供高频本振信号,且通常采用多个调制器,导致系统结构较为复杂;光谱整形和频时映射技术虽然能实现任意波形的生成,但是生成信号的脉冲时宽会受到色散量的限制,难以实际应用在雷达系统中;基于光注入半导体激光器的技术需要激光器在P1态下工作,且其生成信号的线性度还需要进一步的改进;基于光子数模转换的方案结构相对复杂,且难以直接生成高频段的脉冲压缩信号[10-11]。

在以上方案中,微波光子倍频技术通过将电域生成的低频窄带LFM利用电光调制器的非线性来实现微波光子倍频,产生高频、大带宽的LFM信号,具有结构简单、稳定性好的优点,因而在微波光子雷达中获得较多应用[2,9,12-13]。常见的倍频方案通常采用光波滤波器[14]滤除光载波或光边带以实现信号的高倍频,但光滤波器窗口会随着环境温度发生漂移,1 pm的波长漂移对应125 MHz的频率变化,若滤波窗口与光载波失去对准,拍频过程中会产生杂散信号,窄带且矩形系数理想的光滤波器难以实现。为此,本文提出一种基于光电融合的宽带低相噪信号产生方法。首先,利用光电振荡器(OEO)产生的低相噪的本振源作为参考信号注入直接数字频率合成器(DDS),在电域生成低频窄带LFM信号,然后调制到光域,利用微波光子倍频,从而产生高频宽带的LFM信号。理论分析了微波光子倍频技术输入与输出射频信号的关系,以及偏置点偏离及输入射频信号功率与倍频信号杂散抑制的变化关系。通过实验对比了采用OEO作为参考信号与常规信号发生器的结果,验证了采用DDS电域生成频率为1.625~2.125 GHz的低频窄带信号,可通过光倍频技术产生13~17 GHz的高频宽带信号。该方法利用OEO改善相位噪声,并结合电域中成熟的技术产生低频窄带信号,利用光子技术的大带宽特性来拓宽其载频和带宽,可产生高频、大带宽的LFM信号。

1 基本原理

基于微波光子级联倍频的脉冲压缩信号的产生方法架构如图1所示,包括波形产生和光学倍频两个部分。波形产生部分由OEO和DDS波形产生模块构成,其中OEO产生的低相噪的射频信号作为参考信号注入DDS,DDS生成低频窄带信号注入光学倍频模块进行倍频。光学倍频模块的基本构成为外调制收发链路(包括大功率低噪声的激光器、强度调制器、光电探测器及后级的微波放大滤波模块)。设置电光强度调制器工作在最小点实现

载波抑制的双边带调制，进入探测器中拍频产生 2 倍频信号，再使用电滤波放大模块滤除杂散信号并补充功率。

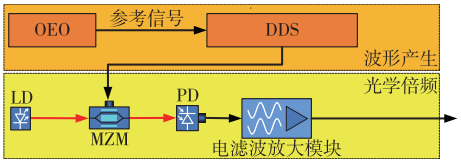


图 1　基于光电融合的宽带低相噪信号产生方法的基本架构

光学倍频模块中设定激光器的光场 $E_{\mathrm{LD}}(t)=\sqrt{P_{\mathrm{LD}}}\,e^{j\omega_c t}$，微波信号 $V_{\mathrm{RF}}(\mathrm{t})=V_{\mathrm{RF}}\sin(\omega_{\mathrm{RF}}t)$。将激光器的输出光注入调制器，射频信号调制到光信号上，控制调制器的偏置点偏置在最小点，调制器的输出光场表达式为：

$$E_{\mathrm{IM}}(\mathrm{t})=\sqrt{L_{\mathrm{MZM}}}\sqrt{P_{\mathrm{LD}}}\,e^{j\omega_c t}\cos\left(\frac{\pi}{2}+m\sin(\omega_{\mathrm{RF}}t)\right)=-\sqrt{L_{\mathrm{MZM}}}\sqrt{P_{\mathrm{LD}}}\,e^{j\omega_c t}\sin\left(m\sin(\omega_{\mathrm{RF}}t)\right)\tag{1}$$

式中，P_{LD} 为激光器输出光功率；L_{MZM} 为调制器光插损；ω_c 和 ω_{RF} 分别为光载波与射频信号的角频率；$m=\pi V_{\mathrm{RF}}/2V_{\pi}$ 为电光强度调制器的调制系数；$V_{\mathrm{RF}}=\sqrt{2Z_{\mathrm{in}}P_{\mathrm{RFin}}}$，$Z_{\mathrm{in}}$ 表示输入阻抗，V_{RF} 为射频信号的电压值；V_{π} 为电光调制器的半波电压。公式(1)可按照贝塞尔函数展开为：

$$E_{\mathrm{IM}}(t)=-2\sqrt{L_{\mathrm{MZM}}}\sqrt{P_{\mathrm{LD}}}\,e^{j\omega_c t}\sum_{n=0}^{+\infty}J_{2n+1}(m)\sin[(2n+1)\omega_{\mathrm{RF}}t]\approx-2\sqrt{L_{\mathrm{MZM}}}\sqrt{P_{\mathrm{LD}}}\,e^{j\omega_c t}J_1(m)\sin(\omega_{\mathrm{RF}}t)\tag{2}$$

式中，$J_n(*)$为 n 阶第一类贝塞尔函数。

探测器探测后的光电流输出可表示为：

$$i(t)=rP=r\left|E_{\mathrm{IM}}(t)\right|^2=2rP_{\mathrm{LD}}L_{\mathrm{MZM}}J_1^2(m)\left[1-\cos(2\omega_{\mathrm{RF}}t)\right]\tag{3}$$

式中，r 表示探测器的响应度。

输出射频功率的表达式为：

$$P_{\mathrm{out}}=2\left[rP_{\mathrm{LD}}L_{\mathrm{MZM}}J_1^2(m)\right]^2Z_{\mathrm{out}}\tag{4}$$

式中，Z_{out} 表示输出阻抗。

根据链路的增益表达式：

$$G=10\lg\left(\frac{P_{\mathrm{out}}}{P_{\mathrm{in}}}\right)\tag{5}$$

2　仿真与分析

根据公式(5)可得 2 倍频信号输出功率与输入射频功率的变化关系(即倍频增益)，如图 2 所示。仿真中设置调制器的输入光功率为 16 dBm，调制器插损为 4.5 dB，半波电压为 5 V，探测器的响应度为 0.75 A/W。

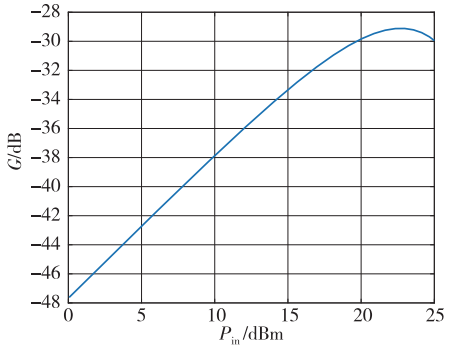


图 2　单级倍频增益与输入射频功率的关系

可以看出，当射频功率较小时，链路的倍频增益随着输入射频功率线性变化，即输入射频功率每增加 1 dB，链路的倍频增益也增加 1 dB。反映到输出射频功率上，输入射频功率每增加 1dB，输出射频功率则增加 2 dB。因此，当采用此种倍频方式进行宽带信号的倍频时，要格外注意输入信号的带内平坦度。

理论上倍频信号输出不存在一阶和三阶信号，但在实际工作中调制器的偏置点可能会发生漂移。虽然系统采用了自动反馈控制电路，但无法完全将偏置点精确控制在最小点。图 3 展示了射频输出功率随偏置角的变化关系，从图中可以看出当偏置点(最小点)偏离 1°时，一阶和三阶信号会急剧增加，这对于跨倍频程的宽带信号极为不利。

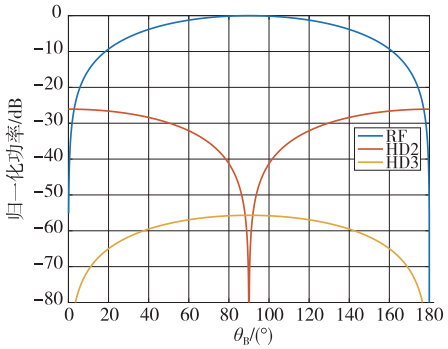


图 3　射频输出功率随偏置角的变化关系

当调制器工作在任意偏置点时，光电探测器输出的光电流信号可表示为：

$$\begin{cases} I_{(2k-1)\mathrm{RF}} = (-1)^k 2I_{\mathrm{dc}} \sin\theta_{\mathrm{B}} J_{2k-1}(m)\cos\left[(2k-1)\omega_{\mathrm{RF}}t\right] \\ I_{2k\mathrm{RF}} = (-1)^k 2I_{\mathrm{dc}} \cos\theta_{\mathrm{B}} J_{2k}(m)\cos(2k\omega_{\mathrm{RF}}t) \end{cases} \tag{6}$$

式中，θ_{B}为电光强度调制器的偏置点，I_{dc}表示正交点时的探测光电流，k为正整数。

对于倍频信号而言，奇次谐波抑制

$$r_{\mathrm{odd}} = 10\lg\left(\frac{P_{2\mathrm{nd}}}{P_{\mathrm{odd}}}\right) = 20\lg\left(\frac{\cos\theta_{\mathrm{B}} J_2(m)}{\sin\theta_{\mathrm{B}} J_{2k-1}(m)}\right) \tag{7}$$

根据公式(7)，当调制器偏置点偏离最小点5°时，谐波抑制比随输入射频功率的变化关系如图4所示。可以看出，随着输入射频功率的增加，三阶抑制比逐渐变差，而一阶抑制比则有所改善。这一现象是由于各阶输出射频功率随输入功率变化的速率不同导致的。

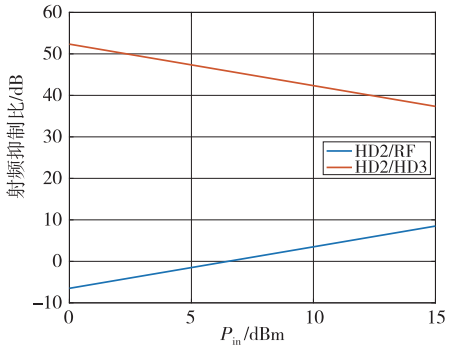


图4 谐波抑制比随输入射频功率的变化关系

如图5所示，随着输入功率的增加，三阶信号的增幅最快，二阶信号次之，一阶信号的增幅最慢。因此，相对于二阶信号，三阶信号的增幅较大导致其抑制比变差，而一阶信号的增幅较小其抑制比得到改善。同时可以看到，输入射频功率每增加1 dB，二阶信号输出射频功率增加2 dB。

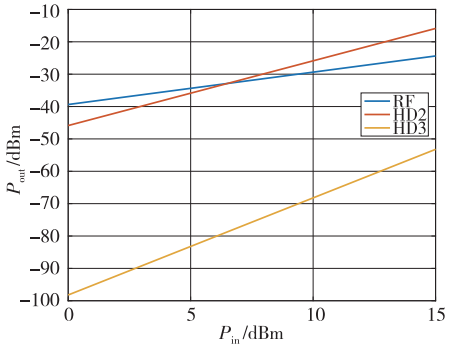


图5 输出射频功率随输入射频功率的变化关系

3 测试结果

根据图1所示的链路架构，采用货架产品对该链路进行测试。

3.1 OEO+DDS相噪测试

低相噪的频率源为OEO，在10 GHz频率下产生的信号具有−157.3 dBc/Hz@10kHz的极低相位噪声信号输出[15-16]。DDS模块采用OEO产生10 GHz信号作为参考信号，驱动生成频率范围为1.625～2.125 GHz的连续波信号、LFM信号与脉冲信号，平均输出功率为13 dBm。此外，还使用了常规的信号发生器产生与OEO等幅的10 GHz的微波信号，并将其输入DDS模块中。通过这两种不同的信号源链路分别产生频率为2 GHz的点频信号，并测试输出信号的相位噪声，结果如图6所示。可以看出，当采用OEO作为参考信号时，相比于常规的信号发生器，DDS输出信号的相位噪声降低了12 dB，表现出了显著的噪声抑制效果。

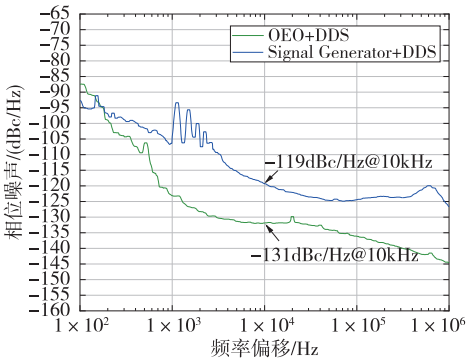


图6 DDS产生信号相位噪声实测图

3.2 光倍频模块性能测试

随后对光倍频链路的性能进行了测试，其中激光器、调制器及其自动偏置控制电路、探测器均为自主研发。激光器输出光功率为16 dBm，调制器控制在最小点。信号源输出2 GHz的射频信号注入调制器中，经过调制后完成2倍频。链路的输入与输出射频功率如图7所示，可以看出，输入射频功率每增加1 dB，输出射频功率增加2 dB，与理论推测相符合。

同时，还测试了不同输入功率下射频信号的抑制比，重点关注一阶信号和三阶信号，这主要是由于调制器的偏置控制点的不精确引起的。根据图8所示，随着输入射频功率的增加，三阶抑制比变差，一阶抑制比则有所改善，与理论推测符合。当前调制器的自动偏置控制电路在最小点的控制误差约

为±5°，通过减小这一控制误差，可以进一步改善杂散抑制度。

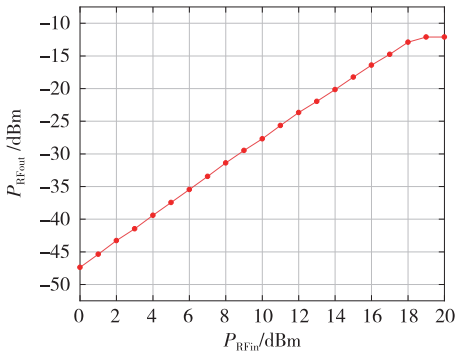


图 7　实测光 2 倍频链路射频输出与输入功率的关系

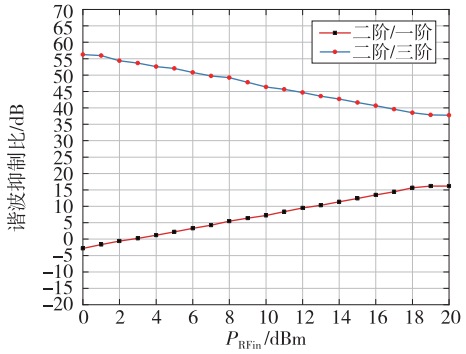


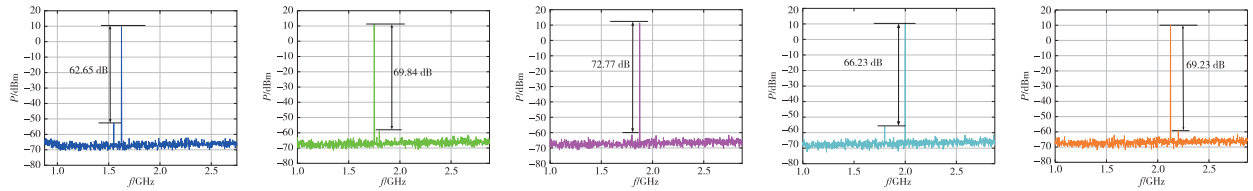
图 8　实测谐波抑制比随输入射频功率的变化关系

3.2　光电融合的宽带低相噪信号产生方法性能测试

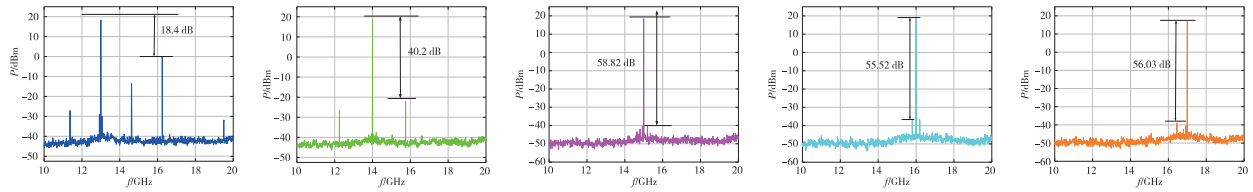
为了产生大带宽的信号，采用了 3 级级联光倍频的方案，每级调制器均工作在相同的调制深度与相同的工作点，最终实现 8 倍频的效果。具体设置为：激光器输出光功率，为每级倍频链路提供光载波。DDS 模块生成低频窄带信号作为射频信号注入第一级电光强度调制器，从而实现电光转换。设置电光强度调制器工作在最小点，以实现载波抑制的双边带调制，调制后的信号进入探测器中拍频产生 2 倍频信号，再使用电滤波放大模块滤除杂散信号并补充功率。接着，将第一级调制链路产生的 2 倍频信号作为射频信号注入第二级调制器，完成二次倍频产生 4 倍频信号。最后，采用 4 倍频信号作为射频信号注入第三级调制器，进入探测器拍频产生 8 倍频信号。

当输入射频功率为 0 dBm 时分别测试了第一级、第二级和第三级光倍频链路的倍频增益，结果分别为－45 dB，－50 dB 和－48 dB。需要注意的是，由于采用了级联倍频结构，测试增益时每级输入射频信号的频率分别为 2 GHz，4 GHz 和 8 GHz，每级电滤波放大模块的增益分别为 45 dB，42 dB 和 39 dB。

首先验证连续波信号，如图 9(a)～(e)为 DDS 产生的频率为 1.625 GHz，1.75 GHz，1.875 GHz，2 GHz，2.125 GHz 的连续波频谱，图 9(f)～(j)为经过微波光子倍频处理后，产生 13 GHz，14 GHz，15 GHz，16 GHz，17 GHz 的连续波信号。由图 9 可知，受制于调制器自动反馈控制电路的控制精度，对于跨倍频程信号，即便采用滤波器进行杂散抑制，但由于滤波器的过渡带无法理想化，光倍频信号的杂散抑制恶化严重，如图 9(a)，(b)，(f)和(g)所示。当杂散信号位于带外时，滤波器的作用得以发挥，杂散抑制效果显著改善，如图 9(c)～(e)和(h)～(j)。



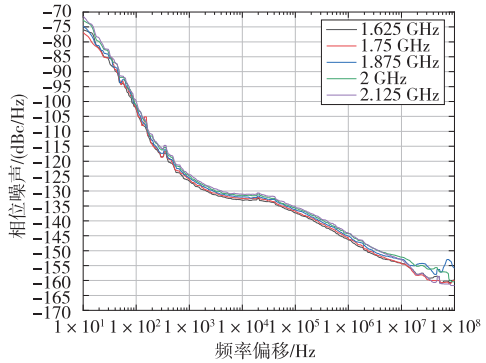
(a) DDS 产生，频率为 1.625 GHz　(b) DDS 产生，频率为 1.75 GHz　(c) DDS 产生，频率为 1.875 GHz　(d) DDS 产生，频率为 2 GHz　(e) DDS 产生，频率为 2.125 GHz



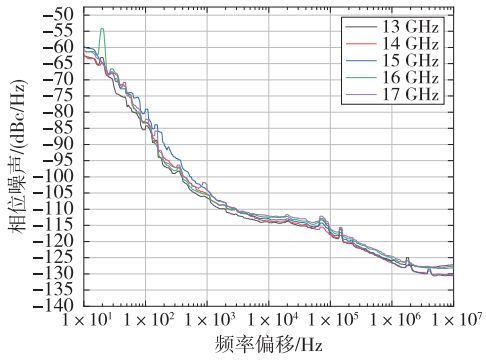
(f) 光倍频产生，频率为 13 GHz　(g) 光倍频产生，频率为 14 GHz　(h) 光倍频产生，频率为 15 GHz　(i) 光倍频产生，频率为 16 GHz　(j) 光倍频产生，频率为 17 GHz

图 9　连续波信号杂散抑制测试结果

图10展示了连续波信号相位噪声测试结果，其中图10(a)为DDS产生的频率相位噪声，图10(b)为光倍频产生的频率相位噪声。DDS产生的连续波信号的相位噪声小于等于－132 dBc/Hz@10kHz，经过八倍频之后，理论上相位噪声恶化$20\log_{10}(8)$即18 dB，因此光倍频信号的相位噪声理论上小于等于－114 dBc/Hz@10kHz，实际链路相位噪声小于等于－112 dBc/Hz@10kHz。



(a) DDS产生的频率相位噪声

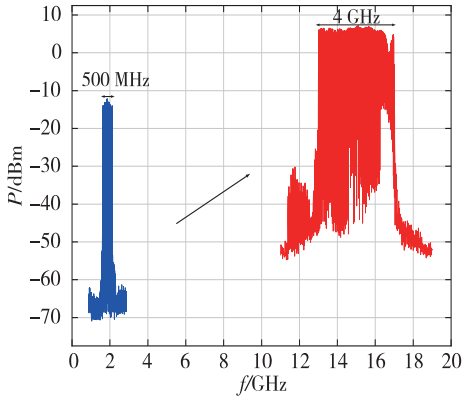


(b) 光倍频产生的频率相位噪声

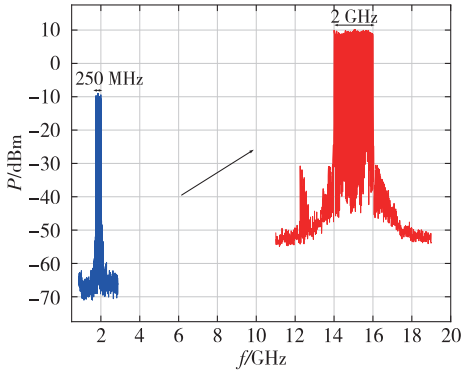
图10 连续波信号相位噪声测试结果

接着，验证LFM信号的性能。图11(a)显示了DDS带宽为500 MHz的LFM信号，经过光倍频链路处理后，生成了带宽为4 GHz、频率范围为13～17 GHz的LFM信号。图11(b)展示了DDS生成的带宽为250 MHz的LFM信号，经过光倍频链路后，生成了带宽为2 GHz、频率范围为14～16 GHz的LFM信号。与带宽为500 MHz的LFM信号相比，DDS生成的带宽为250 MHz的LFM信号具有更好的杂散抑制效果。因此，经过光倍频链路处理后，带宽为2 GHz的LFM信号的杂散抑制性能优于带宽为4 GHz的LFM信号。具体而言，光倍频链路后产生的带宽为2 GHz的LFM信号的带外杂散抑制约为40 dB，带宽为4 GHz的LFM信号的带外杂散抑制约为30 dB。为了进一步改善杂散抑制，除了提高调制器偏置控制点控制精度外，应尽量使信号产生频率处于倍频程以内，这样可以更有效发挥微波滤波器的滤波作用，从而提升杂散抑制性能。

对于光倍频信号而言，输入射频功率每增加1 dB，二阶信号输出射频功率增加2 dB。依照此种关系，通过射频级联进行光倍频，每增加一级光倍频，输出信号的平坦度恶化一倍。例如，若DDS输出信号平坦度为1 dB，则三级光倍频输出平坦度应为8 dB。实际测量结果表明，DDS产生的带宽250 MHz信号平坦度为1 dB，带宽500 MHz信号平坦度为2 dB。经过8倍频处理后，实测的2 GHz和4 GHz信号平坦度分别为1 dB和7 dB。与理论值的偏差主要来源于调制器饱和和微波放大器输出饱和的影响。



(a) DDS产生带宽500 MHz的LFM信号及光倍频产生带宽4 GHz的LFM信号



(b) DDS产生带宽250 MHz的LFM信号及光倍频产生带宽2 GHz的LFM信号

图11 LFM信号测试结果

如表1所示，与国内外同类产品相比，本系统在保持相位噪声水平相当的情况下，能够实现大瞬时带宽信号的生成。

表1　与国内外同类型产品的比较

型号	瑞士AnaPico（APVSG20G）	中电科思仪（1452D）	本文
瞬时带宽	400 MHz	2 GHz	4 GHz
相位噪声	≤−104 dBc/Hz @1kHz(10GHz)	≤−111 dBc/Hz @10kHz(20GHz)	≤−104 dBc/Hz@1kHz ≤−112 dBc/Hz@10kHz

4　结语

本文提出一种基于光电融合的宽带低相噪信号产生方法。首先利用OEO产生的低相噪的本振信号作为参考信号注入DDS在电域生成低频窄带线性调频信号。然后，将该信号调制到光域，利用光子倍频产生高频宽带的LFM信号。通过实验验证了采用OEO作为参考信号相比于常规的信号发生器而言，DDS输出信号的相位噪声降低了12 dB。通过电域生成频率为1.625～2.125 GHz的低频窄带信号，并利用三级光倍频技术，产生了13～17 GHz的高频宽带信号。然而，光倍频链路产生的高频宽带信号杂散抑制受制于调制器自动反馈控制电路的控制精度，对于跨倍频程信号而言，无法用滤波器滤除杂散信号，光倍频信号的杂散抑制恶化严重。实际测试的带宽为2 GHz的LFM信号的带外杂散抑制约为40 dB，带宽为4 GHz的LFM信号的带外杂散抑制约为30 dB。通过OEO＋DDS＋八倍频的光链路测试，得到的相位噪声优于−112 dBc/Hz@10kHz。对于光倍频信号而言，输入射频功率每增加1 dB，输出射频功率增加2 dB。

因此，在实际工程中进行宽带信号的倍频时，除了需要高精度的调制器自动反馈控制电路抑制带内杂散外，还要格外注意输入信号的带内平坦度。该方法利用OEO作为参考信号改善DDS产生信号的相位噪声，依赖电域成熟的技术产生窄带信号，利用光子技术的大带宽特性来拓宽其载频和带宽，可产生高频、大带宽的LFM信号。相比于现有的单级微波光子倍频结合光滤波器的方案，多级倍频成本提升，但其稳定性更好。每级倍频设置基本相同，系统复杂度较低，具有较高的工程应用价值。

参考文献：

[1] Yao J, Capmany J. Microwave photonics[J]. Science China Information Sciences, 2022, 65(12): 221401.

[2] Shi T, Liang D, Wang L, et al. Microwave photonic prototype for concurrent radar detection and spectrum sensing over an 8 to 40 GHz bandwidth[J]. Advanced Photonics Nexus, 2025, 4(2): 026008.

[3] Hong X, Yu Z, Yu W, et al. Independently tunable dual-band linearly-chirped microwave waveforms generation on a silicon photonic chip[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(16): 5476-5484.

[4] Zhang Z, Liu Y, Eggleton B J. Photonic generation of 30 GHz bandwidth stepped-frequency signals for radar applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(14): 4521-4527.

[5] Chen Y, Wen A, Chen Y, et al. Photonic generation of binary and quaternary phase-coded microwave waveforms with an ultra-wide frequency tunable range[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15618-15625.

[6] Gao H, Lei C, Chen M, et al. A simple photonic generation of linearly chirped microwave pulse with large time-bandwidth product and high compression ratio[J]. Optics Express, 2013, 21(20): 23107-23115.

[7] Tseng C H, Hung Y H, Hwang S K. Frequency-modulated continuous-wave microwave generation using stabilized period-one nonlinear dynamics of semiconductor lasers[J]. Optics Letters, 2019, 44(13): 3334-3337.

[8] Song Y, Hu Y, Zhu X, et al. Integrated electro-optic digital-to-analogue link for efficient computing and arbitrary waveform generation[J]. Nature Photonics, 2025, 19(10): 1107-1115.

[9] Li S, Cui Z, Ye X, et al. Chip-based microwave-photonic radar for high-resolution imaging[J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14(10): 1900239.

[10] 张　武，谭庆贵，蒋　炜，等. 面向高分辨率雷达的微波光子大带宽脉冲压缩信号生成技术研究进展[J]. 空间电子技术，2020，17(4)：71-78.
Zhang Wu, Tan Qinggui, Jiang Wei, et al. Research on microwave photonic wideband pulse compression signal generation for high-resolution radars[J]. Space Electronic Technology, 2020, 17(4): 71-78.

[11] 邵　帅，杨四刚，陈宏伟，等. 基于光子学的线性调频微波信号产生技术进展[J]. 光学学报，2024，44(15)：515-529.
Shao Shuai, Yang Sigang, Chen Hongwei, et al. Progress in photonics-based linear frequency-modulated microwave signal generation technology[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(15): 515-529.

[12] Zhu S, Zhang Y, Feng J, et al. Integrated lithium niobate photonic millimetre-wave radar[J]. Nature Photonics, 2025, 19(2): 204-211.

[13] 李　明，袁德哲，李思敏，等. 基于薄膜铌酸锂的微波光子雷达芯片[J]. 上海航天(中英文)，2024，41(3)：143-149.
Li Ming, Yuan Dezhe, Li Simin, et al. Microwave photonic radar chip based on thin-film lithium niobate[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2024, 41(3): 143-149.

[14] 张业斌，金　里，韩守保，等. 面向微波光子信道化的高精细阵列波导光栅研究[J]. 半导体光电，2025，46(4)：699-704.
Zhang Yebin, Jin Li, Han Shoubao, et al. High-accuracy arrayed waveguide grating for microwave photonic

channelization[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(4): 699-704.

[15] 庾财斌, 于 优, 张 浩, 等. 基于相位调制等效展宽激光线宽的极低相噪OEO[J]. 半导体光电, 2023, 44(5): 662-665.
Yu Caibin, Yu You, Zhang Hao, et al. Ultra-low phase noise optoelectric oscillator based on equivalent broadening of laser line-width by phase modulation [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(5): 662-665.

[16] 刘 婷, 汤振华, 王茂旭, 等. 振动下微波光收发链路附加相位噪声研究[J]. 半导体光电, 2024, 45(6): 986-989.
Liu Ting, Tang Zhenhua, Wang Maoxu, et al. Analysis of additional phase noise of microwave optical transceiver link under vibration perturbation [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(6): 986-989.

作者简介：

陈 诺(1996—),女,重庆市万州区人,硕士研究生,工程师,主要研究微波光传输与微波光处理技术。