

激光雷达宽带信号产生方法研究

杜剑波^{1,2} 李道京¹ 马 萌^{1,2}

¹中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室, 北京 100190

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为提升激光雷达的分辨率和作用距离,发射信号应选取具有较大时宽的宽带相位调制信号或宽带线性调频(LFM)信号。现阶段的激光频率调制技术难以在短脉宽内产生宽带LFM信号,为此主要研究了基于马赫-曾德尔调制技术产生激光频段宽带LFM信号的方法。在利用一个双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)实现IQ正交调制产生激光频段LFM信号的基础上,提出了一种基于两个DPMZM的激光频段三倍频LFM信号产生方法。理论分析和仿真结果表明,该方法具有较好的谐波抑制能力,而且能够大幅度降低输入调制信号的带宽,可以在较低速率的数模转换条件下技术实现。

关键词 激光器;激光雷达;宽带信号;马赫-曾德尔调制器;IQ正交调制;三倍频

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.1114003

Research on Wideband Signal Generation for Ladar

Du Jianbo^{1,2} Li Daojing¹ Ma Meng^{1,2}

¹Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To improve the resolution and operating range of ladar, the transmission signal should be wideband phase-modulated signal or wideband linear frequency modulation (LFM) signal, for they have large time bandwidth product. It is hard to generate wideband LFM signal within short pulse width using the present laser frequency modulation technology. Therefore a method based on Mach-Zehnder modulation technique is studied to generate laser wideband LFM signal. Using one dual-parallel Mach-Zehnder modulator (DPMZM) can realize IQ quadrature modulation and generate laser LFM signal. Based on this, a method to generate laser-band frequency tripling LFM signal by using two DPMZMs is proposed. Theoretical analyses and simulation results show that the proposed method has good ability in harmonic suppression, and can greatly decrease the bandwidth of input modulation signal and can be realized with low-speed digital to analog conversion.

Key words lasers; ladar; wideband signal; Mach-Zehnder modulator; IQ quadrature modulation; frequency tripling

OCIS codes 280.3640; 250.4110; 190.7220; 190.2620

1 引言

自1964年第一台CO₂激光器问世以来,经过半个多世纪不断发展,激光雷达已在距离测量、大气风场测量、目标探测和遥感成像等领域获得了广泛的应用^[1]。纵观其发展历程,激光雷达呈现出体积更小、重量更轻、分辨率更高和作用距离更远的趋势。现阶段为获得高的距离分辨率,激光雷达的发射信号多以窄脉冲信号为主,但其对系统的峰值功率要求过高,限制了激光雷达作用距离和分辨能力的进一步提升。通过发射相位或频率经过调制的宽带信号,并结合脉冲压缩技术,可平衡作用距离和距离分辨率的矛盾^[2-3],从而

收稿日期: 2015-02-10; 收到修改稿日期: 2015-06-26

基金项目: 中国科学院电子学研究所2013年创新项目(Y3Z0120247)

作者简介: 杜剑波(1991—),男,博士研究生,主要从事雷达信号处理方面的研究。E-mail: jianbodu1991@163.com

导师简介: 李道京(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事雷达系统和雷达信号处理等方面的研究。

E-mail: lidj@mail.ie.ac.cn(通信联系人)

提升激光雷达的性能。根据调制方式的不同,适合脉冲压缩的激光雷达宽带信号具体分为激光频段宽带相位调制信号和宽带线性调频(LFM)信号两类。宽带相位调制信号主要包括二相码、多相码和基于 LFM 信号的相位调制信号等,其中基于 LFM 信号的相位调制信号是依据 LFM 信号相位,经相位调制方式产生出的宽带信号^[4]。宽带 LFM 信号具有较好的脉冲压缩性能,压缩后远区副瓣较低。另外,由于激光雷达波束一般较窄,探测幅宽较小,使用 LFM 信号时还可采用去斜接收方式大幅简化系统设计^[5]。因此,研究激光雷达的宽带 LFM 信号产生问题具有重要意义。

对于激光雷达,宽带 LFM 信号产生方法包括内调制和外调制两种。内调制指通过调谐腔长等方法使激光器直接输出宽带信号^[6-7],这种方法主要存在调制周期较长的问题,无法满足激光雷达常需工作在高重频模式的应用要求。外调制指用电学方法产生调制信号,将调制信号作用于激光光源信号,输出宽带信号。外调制主要可分为声光调制,电光调制等。其中声光调制利用声光衍射的原理,可实现强度调制,其存在调制带宽小的问题;电光调制通过控制电压改变晶体的折射率,可实现强度或相位调制^[4],其问题是调制信号制约了输出信号的带宽。因此,现有激光雷达宽带信号产生方法存在的调制周期长,带宽小的问题值得研究。

针对上述问题,文献[8]以成熟的激光通信技术为基础,提出利用双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM),通过 IQ 正交调制的方法实现单边带上变频,实现了激光频段 LFM 信号的形成。与使用激光相位调制器直接进行相位调制的方法相比,该方法使用两路正交信号作为调制信号,可使输入信号带宽减半^[9-10]。但是该方法仍需产生同带宽的射频频段 LFM 信号,不利于激光频段 LFM 信号带宽的进一步提升。为此,需研究新的激光频段宽带信号产生方法。

现阶段光纤承载射频技术(ROF)中利用光上倍频的方法获取高纯度单频毫米波信号已有较多研究^[11-17]。本文利用外调制的非线性特性,将较小带宽的射频频段 LFM 信号作为调制信号,通过光上倍频的方法产生大带宽的激光 LFM 信号。为保留所需频率范围内信号和抑制其他谐波频率分量的影响,设计了基于两个 DPMZM 的调制方式,以获取单边带的激光频段宽带 LFM 信号,并与文献[8]的方法做了举例对比。

2 DPMZM 基本概念

MZ 干涉的原理是将输入光信号分为两条支路,改变两条(或者其中一条)支路的相位,再将两条支路信号汇合作为输出信号,输出信号的幅度随支路信号的调制相位而变化。当两支路的相位差为 0 时,支路信号干涉相加,输出信号幅度最大;当两支路的相位差为 π 时,支路信号干涉相消,输出信号幅度为 0。

MZM 利用 MZ 干涉原理实现幅度调制,其在毫米波信号产生、新型光调制技术实现方面有较广泛的应用。MZM 按输入电极数目分为双电极 MZM 和单电极 MZM,单电极 MZM 可看作双电极 MZM 的特例。

DPMZM 是在 MZM 的两臂上分别嵌入一个 MZM,其整体可看作由一个主 MZM 和两个子 MZM 构成。DPMZM 按照子 MZM 又可具体分为单电极 DPMZM 和双电极 DPMZM。

3 基于两个 DPMZM 的激光频段三倍频 LFM 信号产生

基于两个 DPMZM,用较小带宽的射频频段 LFM 信号作为输入,经光上倍频和谐波抑制,得到激光频段三倍频 LFM 信号。

3.1 MZM 倍频原理

使用的 MZM 为双电极 MZM,两臂各含一个射频信号输入电极,其结构示意图如图 1 所示。

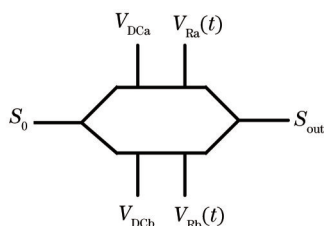


图 1 MZM 结构示意图

Fig.1 Structure diagram of MZM

图 1 中, S_0 为输入的激光光源信号, S_{out} 为输出信号。 V_{Dca} 、 V_{Dcb} 为 MZM 两臂的直流偏置电压, $V_{Ra}(t)$ 、 $V_{Rb}(t)$ 分别为初相为 φ_1 、 φ_2 的射频频段 LFM 信号, 该 MZM 两条支路的调制信号分别为

$$V_1(t) = V_{Dca} + V_R \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos(w_i t + \pi k t^2 + \varphi_1), \quad (1)$$

$$V_2(t) = V_{Dcb} + V_R \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos(w_i t + \pi k t^2 + \varphi_2), \quad (2)$$

式中 V_R 为 LFM 信号振幅, T 为脉冲宽度, w_i 为中频, k 为调频率。

则输出信号为

$$S_{out} = \frac{1}{2} \exp[j(w_0 t + \phi_0)] \left\{ \exp\left[j\pi \frac{V_1(t)}{V_\pi}\right] + \exp\left[j\pi \frac{V_2(t)}{V_\pi}\right] \right\}, \quad (3)$$

式中 w_0 为激光光源信号频率, ϕ_0 为激光光源信号初相, V_π 为 MZM 的半波电压。

根据第一类贝塞尔函数, 有

$$\exp[jz \cos(\varphi)] = \exp\left[jz \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(z) \exp\left[jn\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right]. \quad (4)$$

将(4)式带入(3)式, 该 MZM 的输出信号可化简为

$$S_{out} = \exp[j(w_0 t + \phi_0)] \cdot \exp\left[j\frac{\pi(V_{Dca} + V_{Dcb})}{2V_\pi}\right] \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n\left(\pi \frac{V_R}{V_\pi}\right) \cdot \exp\left[jn\left(w_i t + \pi k t^2 + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2}\right)\right] \cdot \cos\left[\frac{\pi(V_{Dca} - V_{Dcb})}{2V_\pi} + n \cdot \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right]. \quad (5)$$

由(5)式可以看出, 输出信号除含有频率为 $w_0 + w_i$, 带宽为 $B(B = kT)$ 的基频分量外, 还包含频率为 $w_0 + n \cdot w_i (|n| \geq 2)$, 带宽为 $n \cdot B$ 的谐波分量。因此, 将 LFM 信号作为 MZM 的射频输入信号, 利用 MZM 的非线性调制特性可产生激光频段倍频的 LFM 信号。

3.2 基于一个 DPMZM 谐波抑制的问题

通过上述分析可知, LFM 信号经 MZM 倍频后, 输出信号含有多次谐波分量, 无法直接使用。如何设计合理的滤波方式, 保留所需频率范围内的倍频信号和滤除其他谐波分量, 最终输出高纯度的激光频段宽带 LFM 信号变得尤为重要。

光滤波器实现带通滤波是一个较为直接的方法, 但现阶段高 Q 值的光滤波器实现仍有一定难度。最为重要的是, 在射频输入信号中频 w_i 较小时, 倍频的 LFM 信号的多次谐波之间相互重叠, 无法直接用光滤波器滤除其他谐波分量的干扰。

利用多个 MZM 可以实现谐波抑制, 获取高纯度的激光频段倍频的 LFM 信号。对使用一个 DPMZM 进行谐波抑制的原理进行分析, 并对其存在的问题加以讨论。

如果仅从理论上分析, 通过设置适当参数, 即可实现用一个 DPMZM 抑制基次谐波, 获取三倍频的 LFM 信号。图 2 为基于一个 DPMZM 的谐波抑制原理框图, 具体分析如下。

图 2 中的 2 个小虚框和大虚框分别对应 DPMZM 的 2 个子 MZM 和主 MZM。虚框外的移相由使用多个信号源(由高速数模转换器形成)产生相对不同相位的 LFM 信号完成, 虚框内的移相由设置 DPMZM 参数完成。

输入信号为射频频段 LFM 信号:

$$S_{in} = V_R \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos(w_i t + \pi k t^2 + \varphi). \quad (6)$$

设调制系数 $m = \frac{V_R}{V_\pi} \cdot \pi$, 并令 $\cos(w_i t + \pi k t^2 + \varphi) = \cos \varphi_i$, 则输出信号为

$$S_{out} = \frac{1}{4} \exp[j(w_0 t + \phi_0)] \cdot \left\{ \begin{array}{l} \exp(jm \cos \varphi_i) + \exp[jm \cos(\varphi_i + \pi)] \cdot \exp(j\pi) + \\ \exp\left[jm \cos\left(\varphi_i + \frac{\pi}{2}\right)\right] \cdot \exp\left(j\frac{3\pi}{2}\right) + \\ \exp\left[jm \cos\left(\varphi_i + \frac{3\pi}{2}\right)\right] \cdot \exp(j\pi) \cdot \exp\left(j\frac{3\pi}{2}\right) \end{array} \right\}. \quad (7)$$

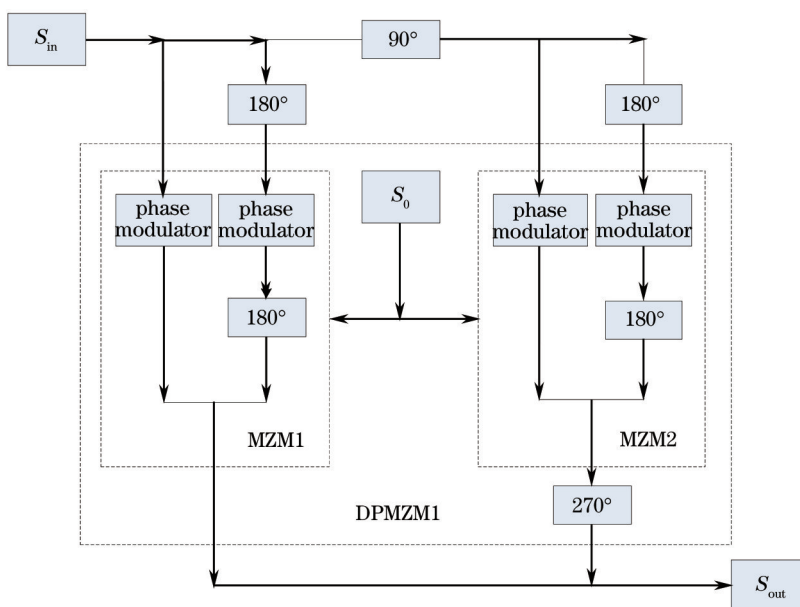


图2 基于一个DPMZM的谐波抑制原理框图

Fig.2 Harmonic suppression schematic diagram based on one DPMZM

将(7)式化简后,得

$$S_{out} = \frac{1}{4} \exp[j(\omega_0 t + \phi_0)] \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(m) \exp(jn \cdot \varphi_1) [j^n + (-1)^{n+1} \cdot j^n + j + (-1)^{n+1} \cdot j]. \quad (8)$$

根据(8)式结论,可得DPMZM的输出信号含有倍频次数为 $n=4z+1$ 的谐波分量(z 为整数)。因此,输出信号主要包含 n 为-3和1时对应的两个谐波分量(m 较小时,其他高次谐波分量的影响较小)。理论上可选取调制系数 m ,使 $J_1(m)=0$,这样即可获得三倍频LFM信号。而实际应用中,这一方法可能存在问题:1)以对人眼较为安全的1550 nm激光波段而言,其MZM半波电压一般较高,以7 V为例进行分析。在射频信号峰值功率1 W的情况下,能实现的射频信号峰值电压约7 V。图3为第一类1阶贝塞尔函数曲线,由 $m = \frac{V_R}{V_\pi} \cdot \pi$,可知在 $m=3.83$ 时,1阶贝塞尔函数 $J_1(m)=0$,对应射频峰值电压 $V_{RF}=8.53$ V;因此所需射频峰值电压 V_{RF} 已经大于通常能实现的峰值电压值。2)残余的高次谐波分量越多,其对输出信号的影响越大。因此,能否进一步减少谐波分量,削弱基次和高次谐波对三倍频LFM信号的影响值得研究。

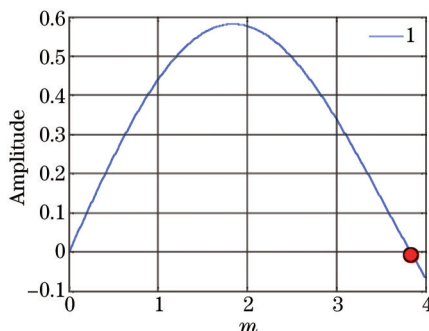


图3 第一类1阶贝塞尔函数

Fig.3 First kind 1-order Bessel function

3.3 基于两个DPMZM的谐波抑制

针对使用一个DPMZM进行谐波抑制存在的问题,用DPMZM结合偏振态旋转滤波器实现多次谐波的滤除是另一个可能的思路^[14]。但是该方法额外增加了偏振控制,使得系统实现的复杂性较高。因此,提出用两个DPMZM的方法实现谐波抑制,获取高纯度的激光频段三倍频LFM信号。使用的DPMZM为双电极DPMZM。

基于两个 DPMZM 获取三倍频 LFM 信号的结构示意图如图 4 所示。其中, S_0 为输入的激光光源信号, S_{out} 为输出的激光频段宽带 LFM 信号。 V_{DC1a} 、 V_{DC1b} 、 V_{DC2a} 、 V_{DC2b} 分别为第一个 DPMZM 各臂的直流偏置电压, U_{DC1a} 、 U_{DC1b} 、 U_{DC2a} 、 U_{DC2b} 分别为第二个 DPMZM 各臂的直流偏置电压, V_{DC3} 和 U_{DC3} 分别为两个 DPMZM 主 MZM 的直流偏置电压。 $V_{R1a}(t)$ 、 $V_{R1b}(t)$ 、 $V_{R2a}(t)$ 、 $V_{R2b}(t)$ 分别为第一个 DPMZM 各臂的射频输入信号, $U_{R1a}(t)$ 、 $U_{R1b}(t)$ 、 $U_{R2a}(t)$ 、 $U_{R2b}(t)$ 分别为第二个 DPMZM 各臂的射频输入信号。

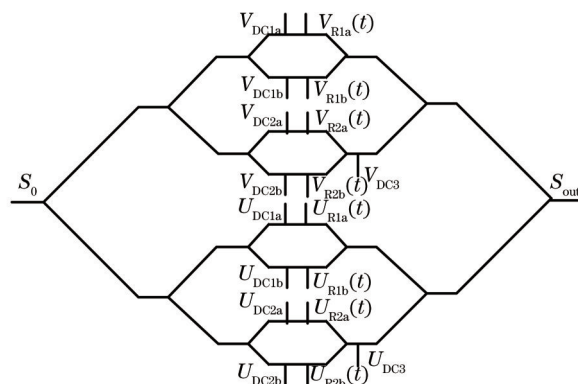


图 4 两个 DPMZM 的结构示意图

Fig.4 Structure diagram of two DPMZM

利用两个 DPMZM 联合使用进行滤波,可抑制包括一次谐波分量在内的多次谐波分量,获取高纯度的激光频段三倍频 LFM 信号,其原理框图如图 5 所示。其中输入信号 S_{in} 同 3.2 节。

第一个 DPMZM 参数设置同 3.2 节,其输出信号为

$$S_{out1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \exp[j(w_0 t + \phi_0)] \left\{ \begin{array}{l} \exp(jm \cos \varphi_i) + \exp[jm \cos(\varphi_i + \pi)] \cdot \exp(j\pi) + \\ \exp\left[jm \cos\left(\varphi_i + \frac{\pi}{2}\right)\right] \cdot \exp\left(j\frac{3\pi}{2}\right) + \\ \exp\left[jm \cos\left(\varphi_i + \frac{3\pi}{2}\right)\right] \cdot \exp(j\pi) \cdot \exp\left(j\frac{3\pi}{2}\right) \end{array} \right\}. \quad (9)$$

类似可得第二个 DPMZM 输出信号为

$$S_{out2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \exp[j(w_0 t + \phi_0)] \left\{ \begin{array}{l} \exp\left[jm \cos\left(\varphi_i + \frac{\pi}{4}\right)\right] \cdot \exp\left(j\frac{3\pi}{4}\right) + \\ \exp\left[jm \cos\left(\varphi_i + \frac{\pi}{4} + \pi\right)\right] \cdot \exp\left(j\frac{7\pi}{4}\right) + \\ \exp\left[jm \cos\left(\varphi_i + \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2}\right)\right] \cdot \exp\left(j\frac{3\pi}{4}\right) \cdot \exp\left(j\frac{3\pi}{2}\right) + \\ \exp\left[jm \cos\left(\varphi_i + \frac{\pi}{4} + \frac{3\pi}{2}\right)\right] \cdot \exp\left(j\frac{7\pi}{4}\right) \cdot \exp\left(j\frac{3\pi}{2}\right) \end{array} \right\}. \quad (10)$$

总的输出信号为

$$S_{out} = S_{out1} + S_{out2}. \quad (11)$$

将(11)式化简后,得

$$S_{out} = \frac{1}{8} \exp[j(w_0 t + \phi_0)] \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(m) \exp(jn \cdot \varphi_i) [j^n + (-1)^{n+1} \cdot j^n + j + (-1)^{n+1} \cdot j] \cdot \left\{ 1 + \exp\left[j(n+3)\frac{\pi}{4}\right] \right\}. \quad (12)$$

由(12)式可知,使用两个 DPMZM 时,输出信号含有倍频次数为 $n=8z-3$ 的谐波分量(z 为整数),相对使用一个 DPMZM 时的谐波分量减少一倍,输出信号主要包含 n 为 -3 和 $+5$ 时对应的两个谐波分量。经分析计算,在 m 较小时,可以保证 n 为 -3 和 $+5$ 时对应的两个谐波分量幅值落差在 20 dB~30 dB,即 $+5$ 次谐波分量基本可忽略,故输出信号为纯度较高的三倍频 LFM 信号。同时,由于两个 DPMZM 调制方式使谐波分量的中频差异增大,适当设置输入射频频段 LFM 信号的中频,形成一个带有载波的微波信号^[3],不仅有利于光域滤波,而且有可能便于电子学信号处理方法在激光雷达中的应用。

上述推导过程中, $\cos(w_i t + \pi k t^2 + \varphi) = \cos \varphi_i$ 。若设 $w_i = 0$,即微波调制信号中频为 0,推导仍然成立,则输

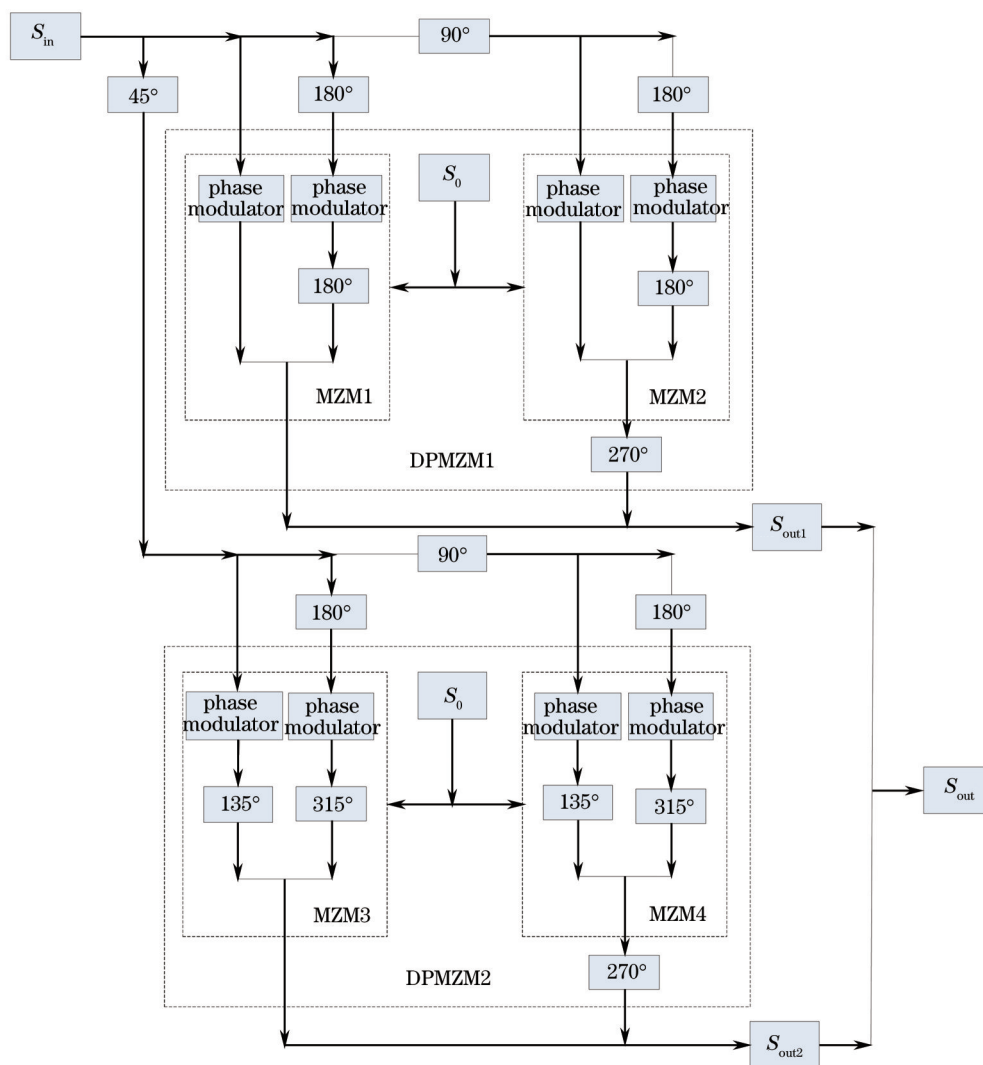


图5 基于两个DPMZM的谐波抑制原理框图

Fig.5 Harmonic suppression schematic diagram based on two DPMZM

出信号的中心频率为激光载频 w_0 。将调制信号由较小带宽的射频频段 LFM 信号改为同带宽的基带 LFM 信号,那么由高速数模转换器直放产生的基带 LFM 信号可直接作用于 MZM,进一步简化了系统,该方法适用于对三倍频 LFM 信号杂散电平容许较高的使用场合。

使用基带 LFM 信号作为输入信号,LFM 信号脉宽为 $1 \mu\text{s}$,带宽为 1 GHz ,在调制系数 m 取值分别为 $1, 2, 3$ 时,通过两个 DPMZM 获得的激光频段三倍频 LFM 信号频谱如图 6 所示,其中横坐标轴为相对激光载频的频移。由图 6 可知,获得的激光频段 LFM 信号带宽为 3 GHz ,且调制系数 m 越小,信号频谱杂散越少。在 $m < 3$ 的情况下,残余的高次谐波分量不超过 -20 dB ,对输出信号的影响较小。

4 讨 论

相比于传统激光频段宽带信号产生方法,基于两个 DPMZM 的新方法进一步降低了对输入信号带宽的要求,减弱了对高速射频信号源的依赖。对本文方法可能存在的问题作进一步讨论,并举例比较本文方法和文献[8]中的 IQ 正交调制方法,给出了相应的讨论结果和分析结论。

4.1 激光频段三倍频 LFM 信号衰减问题及解决方法

根据前面分析,若采用两个 DPMZM 联合使用的方法,可用较小带宽的射频频段 LFM 信号产生出激光频段三倍频 LFM 信号,但是其存在输出信号衰减较大的问题。为解决该问题,可从以下两个角度考虑: 1) 调制系数 m 取值应合适。 m 值越大,输出的三倍频 LFM 信号越大,但输出信号中残余的 5 次谐波分量也越强。

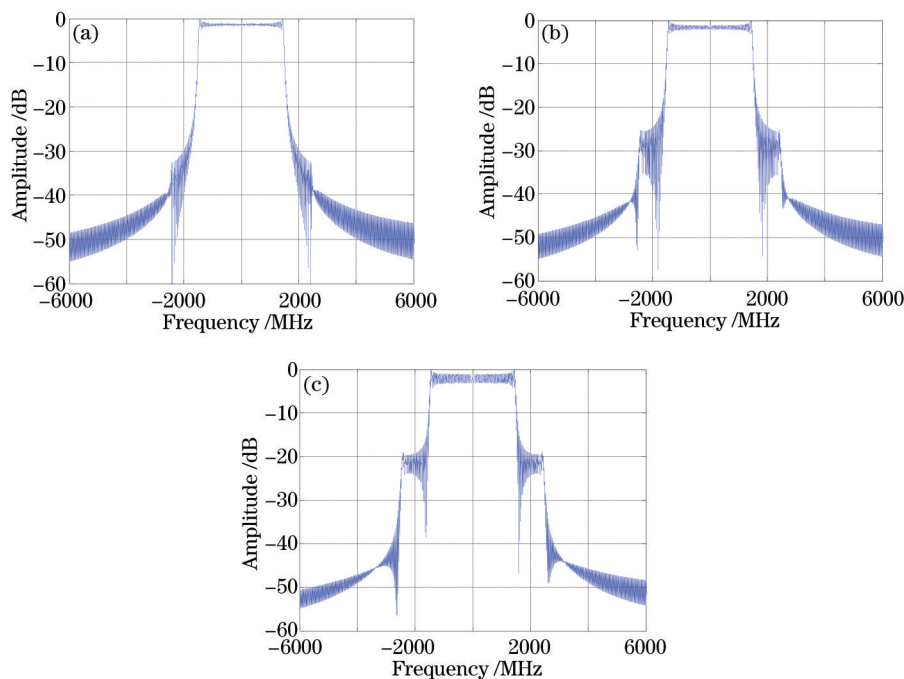


图6 激光频段三倍频 LFM 信号频谱。(a) $m=1$; (b) $m=2$; (c) $m=3$

Fig.6 Signal spectrum of laser-band frequency tripling LFM signal. (a) $m=1$; (b) $m=2$; (c) $m=3$

因此,在保证-3和+5时对应的两个谐波分量幅值落差的情况下,可适当将 m 取值增大。图7为第一类3阶和5阶贝塞尔函数曲线以及两者的比值曲线。根据两谐波分量的幅度落差要求,并结合第一类贝塞尔曲线的缓变特性(图7),可得 m 取值在[2,3]范围内较合适。2)为获取较强的三倍频 LFM 信号,可使用功率较高的激光光源作为 DPMZM 的输入;另外,利用多级光放大器对三倍频 LFM 信号进行放大,以获得高功率的激光雷达发射信号。

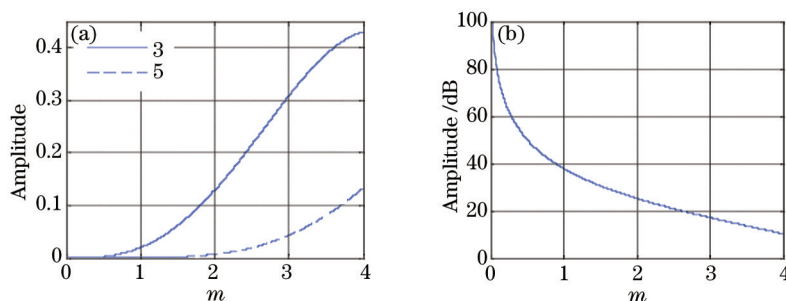


图7 第一类3阶和5阶贝塞尔函数及其比值。(a) 第一类3阶和5阶贝塞尔函数;(b) 第一类3阶和5阶贝塞尔函数比值

Fig.7 First kind 3-order and 5-order Bessel functions and their ratio. (a) First kind 3-order and 5-order Bessel functions;

(b) ratio of the first kind 3-order and 5-order Bessel functions

4.2 DPMZM 相移误差对激光频段三倍频 LFM 信号的影响及解决方法

同微波信号调制中存在移相误差一样,DPMZM 内部不可避免地存在光学移相误差。设光学移相误差在正负 2° 内服从均匀分布,仿真中的8个光学移相误差分别为 $-0.3^\circ, 1.7^\circ, 1.2^\circ, 1.8^\circ, 0.6^\circ, -1.9^\circ, 1.4^\circ, 1.7^\circ$ (已验证当移相误差为其他值时的结果类似)。仍以带宽为1GHz的基带 LFM 信号作为输入信号,在调制系数 m 取值分别为1、2、3时,通过两个 DPMZM 获得的激光频段三倍频 LFM 信号频谱如图8所示,其中横坐标轴为相对激光载频的频移。

从图中可看出 DPMZM 内相移有误差时,会引入激光基频干扰和其他杂散干扰。对 $m=1$ 情况下的信号质量影响稍明显。基频干扰的原因是相移误差使系统传递函数产生直流分量,其他杂散干扰主要是残余的一次谐波分量。

通过比较图8(a)~(c)可发现,引入的基频干扰和其他杂散干扰随着 m 的增大影响变小。其原因为随着 m

值增大,输出的三倍频 LFM 信号增大,但一次谐波分量却减小,使由相移误差导致的残余一次谐波分量也相应减小。因此当 m 按第 4.1 节中所提取值[2,3]时,DPMZM 内相移误差的影响较小。

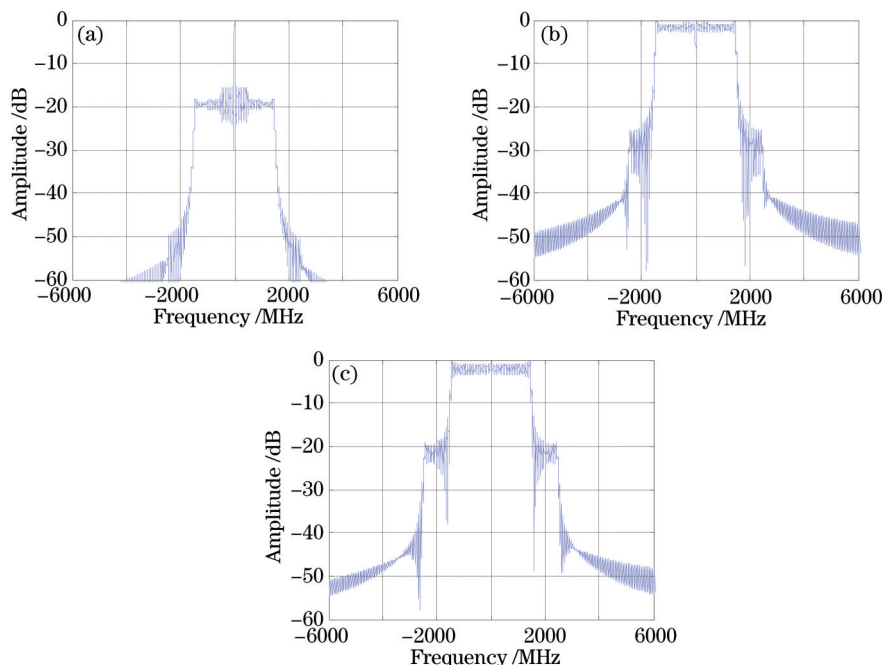


图8 DPMZM 存在相移误差时激光频段三倍频 LFM 信号频谱。(a) $m=1$; (b) $m=2$; (c) $m=3$

Fig.8 Impact of phase error in DPMZM on signal spectrum of laser-band frequency tripling LFM signal. (a) $m=1$; (b) $m=2$; (c) $m=3$

从时域来看,DPMZM 内相移误差会对输出三倍频 LFM 信号额外引入相位误差。图 9(a)是在调制系数 $m=3$,DPMZM 内含上述光学移相误差时,输出激光频段三倍频 LFM 信号的时域展开相位,由图 9 可知,其主要为 LFM 信号的二阶相位;与 DPMZM 内不含随机相移误差时输出三倍频 LFM 信号对应的展开相位相比,其增加的高阶相位误差如图 9(b)所示,相对二阶相位,该相位误差变化较快,但其幅度很小。DPMZM 内相移误差额外引入的高阶相位,连同高次谐波分量造成的相位误差,需利用信号处理完成校正,具体可参见文献[18-19]。

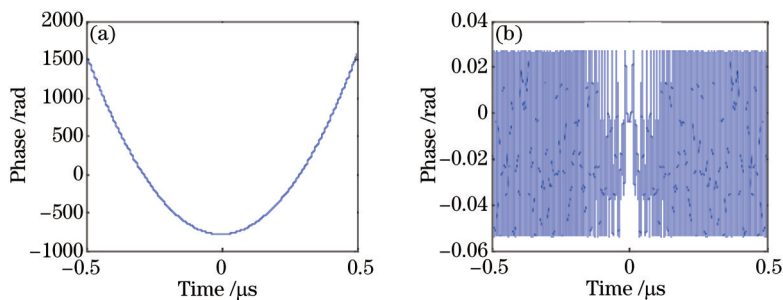


图 9 (a) 激光频段三倍频 LFM 信号时域相位; (b) DPMZM 内相移误差产生的时域相位误差

Fig.9 (a) Time-domain phase of laser-band frequency tripling LFM signal;
(b) time-domain phase error caused by phase error in DPMZM

4.3 两种方法之间的比较

在上述分析的基础上,对基于 IQ 正交调制产生激光频段 LFM 信号的方法和基于两个 DPMZM 产生激光频段三倍频 LFM 信号的方法比较分析。以产生带宽为 3 GHz 的宽带信号为例,前者仍需由射频信号源产生出带宽大于 3 GHz 的调制信号;后者通过倍频的方法,仅需射频信号源产生带宽为 1 GHz 的射频频段 LFM 信号,而这是容易实现的,因此该方法大幅降低了对射频信号带宽的要求。综合上述考虑,基于两个 DPMZM 产生激光频段三倍频 LFM 信号的方法更具优势。

5 结 论

针对目前激光频段宽带信号产生存在调制周期较长,带宽较小的问题,提出采用基于两个DPMZM产生激光频段三倍频 LFM 信号的新方法加以解决。相对于利用 IQ 正交调制产生激光频段 LFM 信号的方法,新方法利用了光上倍频后谐波抑制的原理,可实现使用较小带宽的射频频段 LFM 信号产生纯度较高的激光频段三倍频 LFM 信号,大幅度地降低了输入信号的带宽,在激光雷达宽带信号产生方面具有较大的参考和应用价值。

参 考 文 献

- 1 Dai Yongjiang. The Principle of Lidar[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- 2 J Buck, A Malm, A Zakel, *et al.*. High-resolution 3D coherent laser radar imaging[C]. SPIE, 2007, 6550: 655002.
- 3 Li Daojing, Zhang Qingjuan, Liu Bo, *et al.*. Key technology and implementation scheme analysis of air-borne synthetic aperture lidar [J]. Journal of Radars, 2013, 2(2): 143-151.
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.
- 4 Du Jianbo, Li Daojing, Ma Meng. Performance analysis and image processing of phase-modulated signal on airborne synthetic aperture lidar[J]. Journal of Radars, 2014, 3(1): 111-118.
杜剑波, 李道京, 马 萌. 机载合成孔径激光雷达相位调制信号性能分析和成像处理[J]. 雷达学报, 2014, 3(1): 111-118.
- 5 P Adany, C Allen, R Hui. Chirped lidar using simplified homodyne detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(16): 3351-3357.
- 6 Zhang Kunfeng, Hong Guanglie, Xu Xianwen, *et al.*. Realization method of range resolution of sub-millimeter in widely tunable laser radar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2674-2679.
张琨锋, 洪光烈, 徐显文, 等. 宽调谐激光雷达亚毫米级距离分辨的实现方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2674-2679.
- 7 Guo Liang. Study on Experiment and Algorithm of Synthetic Aperture Imaging Lidar[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
郭 亮. 合成孔径成像激光雷达实验与算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- 8 Gao S, Hui R. Frequency-modulated continuous-wave lidar using I/Q modulator for simplified heterodyne detection[J]. Opt Lett, 2012, 37(11): 2022-2024.
- 9 Griffiths H D, Bradford W J. Digital generation of wideband FM waveforms for radar altimeters[J]. IEEE International Conference Radar- 87, 1987: 325-329.
- 10 Zhu Mingbo, Chang Wenge, Liang Diannong. Generation of wideband LFM waveforms via digital method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(5): 93-95.
祝明波, 常文革, 梁甸农. 采用数字方法实现宽带线性调频信号产生[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(5): 93-95.
- 11 O'Reilly J J, Lane P M. Fibre-supported optical generation and delivery of 60 GHz signals[J]. Electronics Letters, 1994, 30(16): 1329-1330.
- 12 Lin C T, Shih P T, Chen J J, *et al.*. Optical millimeter-wave signal generation using frequency quadrupling technique and no optical filtering[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(12): 1027-1029.
- 13 P Shi, S Yu, Z Li, *et al.*. A novel frequency sextupling scheme for optical mm-wave generation utilizing an integrated dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. Opt Commun, 2010, 283(19): 3667-3672.
- 14 S Pan, J Yao. Tunable subterahertz wave generation based on photonic frequency sextupling using a polarization modulator and a wavelength-fixed notch filter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(7): 1967-1975.
- 15 Zhu Hailing, Pan Wei, Chen Jixin, *et al.*. Frequency multiplied microwave signal generation based on single passband microwave photonic filtering[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0105003.
朱海玲, 潘 炜, 陈吉欣, 等. 基于单通带微波光子滤波的多倍频微波信号产生[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0105003.
- 16 Zhang Jing, Wang Muguang, Shao Chenguang, *et al.*. Photonic frequency-multiplying millimeter-wave generation based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0306004.
张 敬, 王目光, 邵晨光, 等. 基于双平行马赫曾德尔调制器的光子倍频毫米波生成的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0306004.
- 17 Shang Jianming, Wang Daobin, Liu Yanjun, *et al.*. Research on the controllable frequency octupling technology for generating optical millimeter-wave by external modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0506003.

- 商建明,王道斌,刘延君,等.基于外调制器的可控八倍频光载毫米波生成技术研究[J].光学学报,2014,34(5):0506003.
- 18 Jiao Wei, Liang Xingdong, Ding Chibiao. Extraction and correction of SAR amplitude and phase errors based on internal calibration signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(12): 1883-1886.
- 矫 伟,梁兴东,丁赤飏.基于内定标信号的合成孔径雷达系统幅相误差的提取和校正[J].电子与信息学报,2005,27(12): 1883-1886.
- 19 Dong Yongwei, Liang Xingdong, Ding Chibiao. Non-linear signal processing for FMCW SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1034-1039.
- 董勇伟,梁兴东,丁赤飏.调频连续波 SAR 非线性处理方法研究[J].电子与信息学报,2010,32(5):1034-1039.

栏目编辑:苏 岑