

引用格式: GOU Jiajun, SHEN Yonghang. Nonlinear Frequency Correction Technology of DFB laser with High Frequency Modulation for FMCW LiDAR[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(2):0214003

苟家峻, 沈永行. 用于调频连续波激光雷达的高重频调制 DFB 激光器的非线性频率校正技术[J]. 光子学报, 2023, 52(2): 0214003

用于调频连续波激光雷达的高重频调制 DFB 激光器的非线性频率校正技术

苟家峻^{1,2}, 沈永行^{1,2}

(1 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2 浙江大学 光电科学与工程学院, 杭州 310027)

摘要:为获得调谐速率高至 100 kHz、调制带宽 5G 以上、频率线性度较好的光源,从可调谐分布式反馈激光器的调谐原理出发,建立了以温度为主导的调谐模型,在该模型基础上采用基于拍频一致化的迭代仿真算法,显著降低了光源的非线性度。最后搭建了实验平台,采用该算法进行了两次迭代运算。实验结果显示,相比于未校正的波形,经过两次迭代后,下扫频与上扫频的非线性度分别从 0.050 0、0.020 0 降低到了 0.004 2 与 0.002 6,分辨率改善明显。仿真与实验结果证明该方法能有效校正高频调制时 DFB 激光器调频连续波输出的频率非线性。

关键词:激光雷达;调频连续波;非线性校正;预处理;迭代算法

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235202.0214003

0 引言

激光雷达技术自诞生以来广泛服务于工业、医疗等领域^[1-3]。近年来,随着可调谐激光器技术发展与成本降低,调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)激光雷达在一些领域的优势逐步明显。在工件测量领域,得益于大的调制带宽,测量的精度很容易实现微米量级的探测^[3]。在智能驾驶领域^[4],FMCW 法相比于时间飞行法系统而言有以下几点优势,首先,由于采用了本振光进行放大,不需要采用昂贵的单光子探测模块,也不需要产生高峰值功率的脉冲;其次,采用三角波信号驱动半导体可调谐激光器,可以同时解耦出目标的距离与速度。为了获得更高测量精度的图像,一方面需要压缩光源线宽,提高相干长度。另一方面需要校正调制过程中的非线性,提高测量精度。然而,随着图像刷新速率的不断提升,调制速率不得不加快,光源非线性程度加重,成像效果严重恶化。

目前,用于 FMCW 激光雷达的扫频激光源主要有外腔扫描用单频半导体激光器^[5,6]、单频激光器外接频率线性调制的单边带调制电光调制器^[7]以及直接电流调制的分布反馈式(Distributed Feedback Laser, DFB)半导体激光器等几种技术手段。外腔扫描用半导体激光器结构相对复杂,外腔的压电陶瓷控制响应速度存疑,难以实现高重频线性频率调制输出且成本较高。单频激光器加频率可调单边带外调制电光调制器容易实现较好的线性频率调制,但技术路线复杂,频率可调射频频源的制作较为困难。相对而言,直接调制的 DFB 激光器结构简单,若能实现较好的线性频率调制,则有望获得高性价比的 FMCW 用激光源。本文主要针对直接调制 DFB 激光器开展研究。

校正频率非线性常用的方式有采用带有锁相器的光电负反馈的回路法^[8-10]、重采样法^[11,12]和波形预处理法^[13,14]等。采用带有锁相器的光电负反馈的回路法^[8-10]是指在系统中增加一个参考臂,探测过程中将参考臂

基金项目:国家自然科学基金(No. 62075190)

第一作者:苟家峻,771623508@qq.com

通讯作者:沈永行,physyh@zju.edu.cn

收稿日期:2022-10-14;录用日期:2022-11-08

<http://www.photon.ac.cn>

与参考信号进行锁相放大,利用其中的误差项实时地补偿三角波调制信号。这种方式的缺陷是电路复杂,需要较多额外的主动器件,增加了系统成本。重采样法^[11, 12, 15]则通过设置一个已知长度的参考臂,在参考臂信号的波峰或者波谷时刻对探测臂信号采样,即通过等频率间隔采样的方式,克服光源非线性。这种方式的缺陷在于为了满足奈奎斯特采样率,参考臂长度需要大于信号光光程两倍以上,不适用于长距离探测。波形预处理方式校正非线性则通过对三角波调制信号进行预处理,处理后的调制信号不再是三角波,从而使得光频随时间尽量满足线性变化的趋势,该方式操作简单,不需要复杂的电路系统。然而以往利用预处理校正的工作往往针对的都是1kHz低速调谐的情况,且缺乏仿真模拟^[13, 14]。

基于此,本文简要介绍调频连续波的测距原理,针对典型的DFB激光器进行仿真模拟,利用MATLAB自带的Simulink工具箱建立DFB激光器以温度为主导的调谐模型,分析其在100 kHz条件下以热迟滞为主导的非线性失真情况并利用拍频信号一致化的迭代算法对调制信号频率非线性进行多次校正,分析收敛情况。在仿真基础上,搭建了实验平台,对现有的DFB激光器进行校正,验证了仿真模型与迭代算法的正确性。

1 基本原理

1.1 调频连续波基本原理

在FMCW系统中,利用调制信号对可调谐半导体激光器进行驱动,产生光频随时间以三角波变化的信号。将该信号分光处理,一路作为本振光,另外一路作为信号光,通过光学发射系统入射到待测目标上,信号光的回波信号与本振光信号在光电探测器上混频作拍。测距的基本原理如图1所示。当目标静止的时候,上扫频与下扫频所得到的拍频相同,如图1(a)。当目标运动的时候,由于多普勒频移,上扫频与下扫频所对应的拍频不同,如图1(b)。根据拍频大小可以计算出目标的距离以及速度。

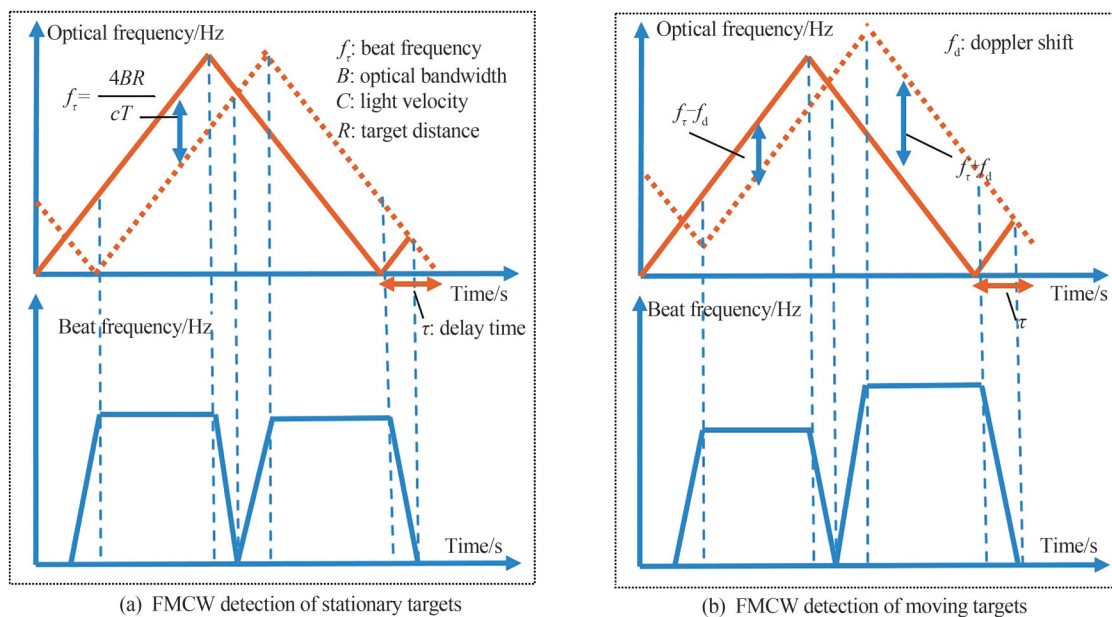


图1 调频连续波激光雷达工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of FMCW Ladar

以激光器上扫频为例进行分析,在不考虑非线性失真以及光源频率噪声的前提下,假设激光器发射的本振光 E_c 与回波信号光 E_r 的振幅分别为

$$E_c(t) = E_1 \cos(2\pi(v_0 t + \frac{\alpha}{2} t^2) + \varphi_0) \quad (1)$$

$$E_r(t) = E_2 \cos(2\pi(v_0(t - \tau(t)) + \frac{\alpha}{2} (t - \tau(t))^2) + \varphi_0) \quad (2)$$

式中, v_0 是没有进行光调制时激光器输出的光频大小, $\alpha=2B/T$ 是调制斜率, B 是激光器的调制带宽, T 是三

角波调制信号的周期, φ_0 是光源的初始相位。 $\tau(t) = 2(R - Vt)/c$ 代表延时时间, R 与 V 分别表示目标距离以及目标速度, c 代表光速。本振光信号与回波信号被探测器接收, 转化为电流信号, 假设探测器的增益为 A , 则电流信号表示为

$$I(t) = A \langle (E_e(t) + E_r(t))^2 \rangle \quad (3)$$

由于探测器带宽有限, 高频信号无法被检测到。假设时间延时相对于整个调制周期来说很短, 当待测目标静止的时候, 在利用平衡探测器去除电流信号中的直流分量后, 探测器上探测到的电信号可以表示为

$$I(t) = AE_1E_2 \cos\left(2\pi\left(v_0\frac{2R}{c} + \frac{2Ra}{c}t\right)\right) \quad (4)$$

对探测器上获得的信号进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)处理后可以求出目标的距离, 假设 $f_r = 2Ra/c$, 那么有

$$R = \frac{cT}{4B} f_r \quad (5)$$

$$\delta R = \frac{cT}{4B} \delta f_r \quad (6)$$

从式(5)、(6)可以发现, 测量精度很大程度上取决于拍频的测量精度, 而当回波信号延时相对于整个调制周期很短的时候, 拍频大小近似正比于光频信号随时间的一阶导数。从图2(a)可以看出, 在理想条件下, 光源线性度很好, 拍频长时间保持稳定, 对探测器上获得的信号进行FFT变换后所获得频谱的半高全宽(Full Width at Half Maxima, FWHM)很窄。而在实际过程中, 当光频线性度不好时, 如图2(b)所示, 拍频大小不稳定, 导致最后混频信号FFT变换后的FWHM较宽, 系统探测精度下降, 分辨率恶化。

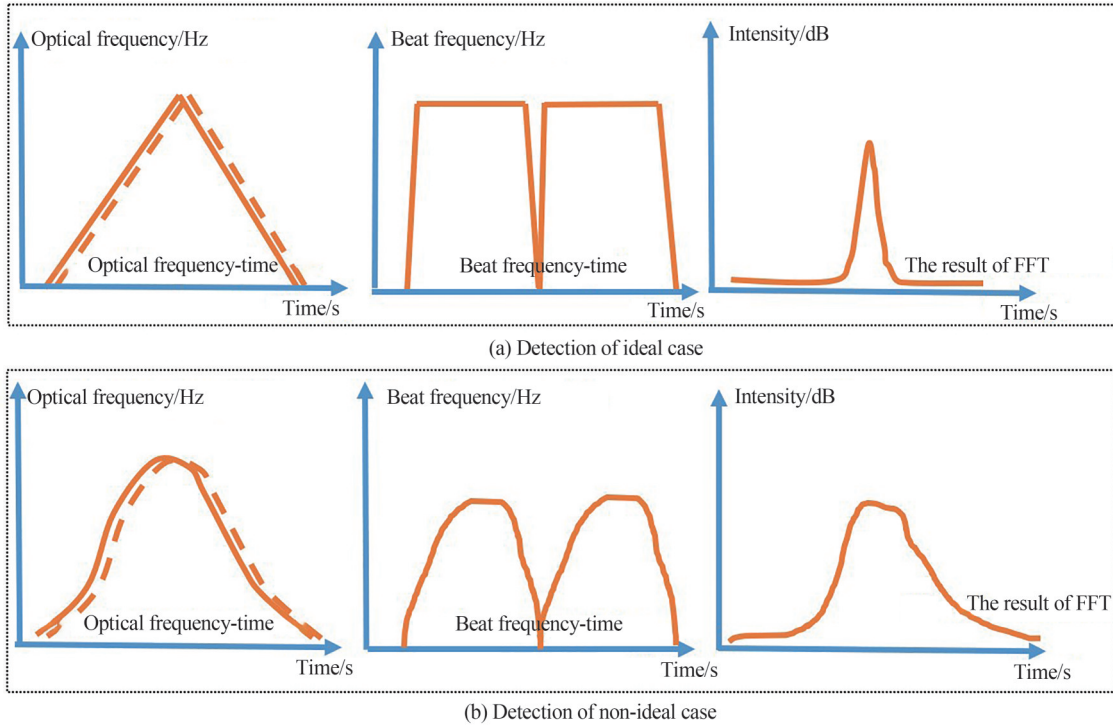


图2 非线性对探测精度的影响

Fig.2 The influence of nonlinearity on detection precision

1.2 DFB激光器调谐基本原理

为了得到针对DFB激光器的非线性校正方法, 需要建立调频工作时的非线性失真模型。DFB激光器中具有一个分布反馈的布拉格光纤光栅, 该光纤光栅最大反射率处的波长满足

$$\lambda = \frac{2n_{\text{eff}}\Lambda}{m} \quad (7)$$

式中, Λ 为光栅周期, m 为阶数, n_{eff} 为等效折射率的大小^[16]。通过改变注入DFB激光器的电流大小可以改变DFB激光器的温度与载流子浓度,二者均可以改变等效折射率 n_{eff} 的大小,从而对DFB激光器的输出光频进行调谐。其中基于载流子浓度调谐方式的响应时间为纳秒量级,远远小于基于温度调谐的响应时间^[17, 18]。在注入电流变化区间较大、调谐速率较快的情况下,光频的非线性失真主要来自于温度调谐过程中的热滞后效应^[18]。因此,在调谐模型中,可以仅考虑温度变化为主导的调谐过程^[19]。假设DFB输出的光频随温度线性变化^[19],分析DFB激光器温度随调制信号的变化过程可以间接分析光频随调制信号的变化过程。激光器的温度模型如图3所示。

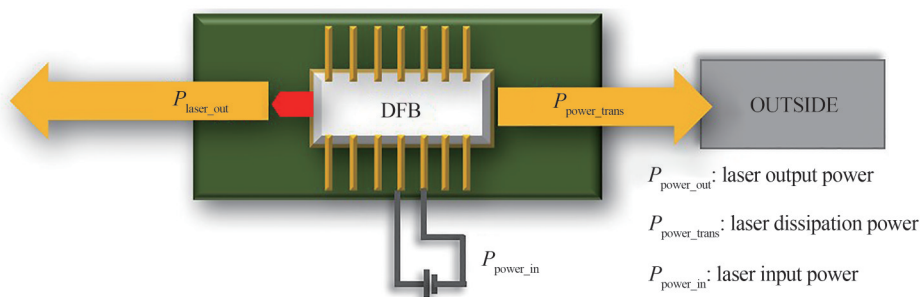


图3 DFB激光器温度调谐热力学模型

Fig.3 Thermodynamic model of temperature tuning for DFB lasers

在图3的热学模型当中,假设外界电流注入DFB激光器的功率为 $P_{\text{power_in}}$,激光输出的光功率大小为 $P_{\text{laser_out}}$,以热传递方式向外部散发的功率为 $P_{\text{power_trans}}$ 。其中,激光器的等效质量为 m ,包含了芯片和导热层的质量。等效比热容为 C ,是芯片与导热层的平均比热容。等效电阻为 R ,将芯片视为驱动电路中的负载。假设激光器各个位置的温度分布均匀,大小为 T 。激光器温度变化取决于激光器接收功率与散发功率的差值,其大小应当满足式(8)。

$$mC \frac{dT(t)}{dt} = P_{\text{power_in}} - P_{\text{power_trans}} - P_{\text{laser_out}} \quad (8)$$

假设外界的温度恒定为 T_0 ,不随时间发生变化,激光器的阈值电流为 I_{th} ,在电流大小满足阈值条件以后,激光器输出的光功率随着电流线性变化,并定义 k 为效率斜率。假设激光器的散热功率正比于激光器温度与外界温度的差值,定义 K 为总的热导率。那么,以上三个功率可以分别替换为式(9)~(11)。

$$P_{\text{power_in}} = i^2(t) \times R \quad (9)$$

$$P_{\text{laser_out}} = (i(t) - I_{\text{th}}) \times k \quad (10)$$

$$P_{\text{power_trans}} = K(T(t) - T_0) \quad (11)$$

通过设置合适的参数,由式(8)~(11)可以求出不同注入调制电流 $i(t)$ 情况下激光器温度 $T(t)$ 随时间变化的关系,也就是输出光频随时间的变化关系。随着调制信号频率的上升,激光器输出光频的非线性程度会增加。由于建立了调谐模型,可以将迭代算法用于校正仿真出来的光频非线性,从而预测迭代算法的合理性。以下将进一步对迭代算法进行描述。

2 光频非线性校正迭代算法

本文采用拍频信号一致化的迭代算法用于校正非线性。假设任意时刻激光器输出信号的振幅以及混频信号的振幅可以分别表示为

$$E_{\text{source}} = E_{\text{out}} \cos(\varphi(t)) \quad (12)$$

$$E_{\text{beat}} = AE_1 E_2 \cos(\varphi(t) - \varphi(t - \tau)) \quad (13)$$

式中, E_{out} 表示激光器出射信号的振幅, $\varphi(t)$ 为总相位。为了提高光源的线性度,需要尽可能地使得拍频值在各个时刻都保持恒定。在回波信号的延迟时间相对于整个调谐周期很短的情况下,对混频信号进行分析,

根据泰勒展开,拍频大小近似正比于光频信号随时间变化的一阶导数。

$$f_{\text{beat}} = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\varphi(t) - \varphi(t - \tau))}{dt} \approx \frac{1}{2\pi} \frac{d(2\pi\nu(t)\tau)}{dt} = \nu(t)\tau \quad (14)$$

当光频随着时间线性变化的时候,拍频以及光频的一阶导数应为一个常数。然而实际的情况是,随着调制频率上升,在热迟滞效应下,非线性失真加剧,拍频不能稳定在一个常数附近,导致对混频信号上升沿做FFT变化后所获得频谱的3 dB带宽过宽,影响了探测精度与分辨率。假设任意波发生器在一个周期中可以设置共 M 个时刻的电压大小,其中可设置的电压最大值为 U_{\max} ,最小值为 U_{\min} ,二者的差值对应了调制信号带宽 B 的相对大小。 $U_n(i)$ 为第 n 次迭代过程中任意波发生器第 i 点的值($1 < i \leq M$),为了使得拍频在任意时刻尽量相同,采用如下流程的迭代算法校正非线性。

第一步:计算相对拍频 $f_n(i)$ 随时间的变化关系,这里的频率仅需要一个相对值即可, n 表示第 n 次迭代过程, i 表示第 i 个测量时刻。在仿真模型中,可根据输入电流直接计算出每时每刻的相对光频,在实际的探测实验中,可以通过希尔伯特变换(Hilbert Transform, HT)或者短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)计算还原出相对光频随时间的变化关系。将拍频数组 $f_n(i)$ 进行累加求和运算可近似获得不同时刻光频的相对大小。

第二步:根据离散点的拍频信号频率大小,计算出下一次迭代过程中任意波发生器相邻时间点的电压相对改变量 Δu_n ,根据改变量 Δu_n 计算出对应时刻信号发生器的相对电压大小 u_n 。上述两个过程分别由式(15)、(16)表示。

$$\Delta u_n(i) = (U_{n-1}(i) - U_{n-1}(i-1)) \times \frac{1}{f_n(i)} \quad (15)$$

$$u_n(i) = \sum_{k=1}^i \Delta u_n(k) \quad (16)$$

第三步:计算下一次输入任意波发生器的电压 $U_n(i)$,对获得的任意波相对电压信号进行线性尺度变换,使得第二步中获得的相对任意波信号的最小值对应 U_{\min} ,相对任意波信号的最大值对应 U_{\max} ,在该过程中 $\max(u_n)$ 表示 u_n 数组中的最大值, $\min(u_n)$ 表示 u_n 数组中的最小值。具体计算流程如式(17)所示。

$$U_n(i) = U_{\min} + \frac{U_{\max} - U_{\min}}{\max(u_n) - \min(u_n)} \times (u_n(i) - \min(u_n)) \quad (17)$$

通过以上三个步骤,可以完成一次完整的迭代过程。利用该迭代算法结合温度调谐模型,可以预先判断算法的合理性,迭代算法流程如图4所示。

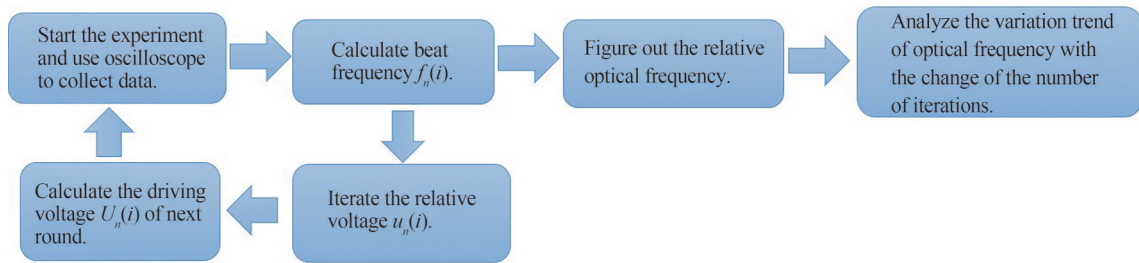


图4 光频非线性迭代校正算法流程图

Fig.4 Flow chart of nonlinear iterative correction algorithm for optical frequency

3 仿真计算

采用文献[19]中的参数假设,所用DFB激光器的具体参数如表1所示。

假设在未校正的情况下向半导体激光器注入频率100 kHz三角波调制信号作为初始信号。注入电流最小值为20 mA,最大值为200 mA。根据式(8)~(11),利用MATLAB自带的Simulink工具箱,可以计算出随着调制信号变化时光频的变化情况。对光频信号采用上文的迭代算法处理,获得校正后调制信号,将该调制信号作为新的驱动电流信号。完成第一次迭代后,重复上述过程,进行多次迭代。仿真结果如图5所示。

表1 激光器参数假设
Table 1 Laser parameter hypothesis

Parameters	Parameters values	Parameters	Parameters values
Threshold of current I_{th}	20 mA	Slope of efficiency k	0.6 W/K
Equivalent resistance R	1 Ω	Thermal conductivity of the shell K	2.177 W/cm·K
Specific heat capacity of the chip C_1	0.3 J/gp·K	Density of chip ρ_1	5.5 g/cm ³
Volume of chip V_1	9×10^{-11} cm ³	Specific heat capacity of the thermal conductivity layer C_2	0.385 J/g·K
The volume of thermal conductivity layer V_2	0.09×10^{-8} cm ³	The density of thermal conductivity ρ_2	8.96 g/cm ³
Area of chip cooling D	6×10^{-5} cm ²	The thickness of the cooling housing d	0.03 cm

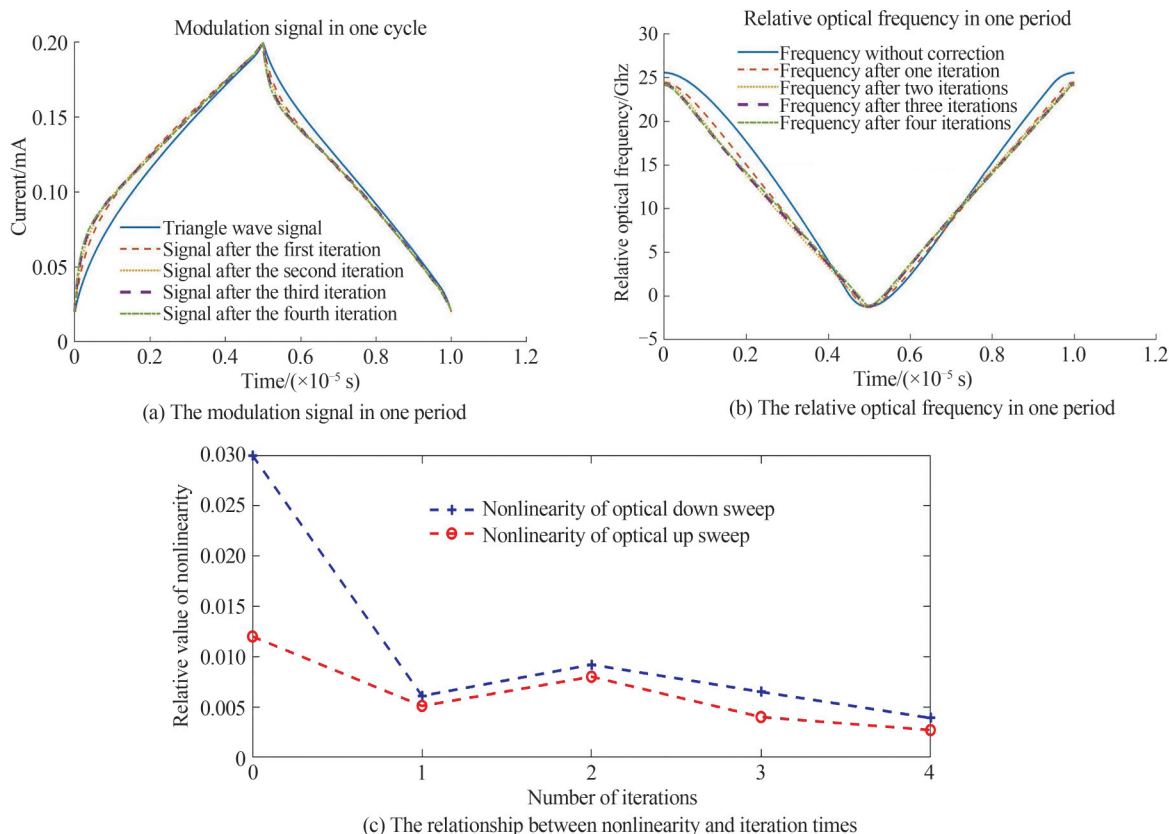


图5 仿真计算的结果
Fig.5 The result of simulation calculation

从图5(b)可以看出该迭代算法可以明显改进光源的频率线性度,光频逐步向三角波形状变化。图5(a)显示,调制信号随着迭代次数的增加,在上升沿与下降沿转换处的斜率变化愈发陡峭,这是因为激光器温度随调制信号的变化会有迟滞效应。为了在上升沿与下降沿转换获得突变较快的光频信号,注入电流信号必须也引入一个较快的突变。

为了能够量化非线性校正的效果,定义非线性度 $\mu = \Delta v_{rms}/B$,其中 B 为激光光频的带宽, Δv_{rms} 为各个采样时刻实际的激光光频与理想线性的激光光频差值的均方根值。随着迭代次数的增加,光频下降阶段与光频上升阶段所对应的非线性度随着迭代次数的变化关系如图5(c)。

从图5(c)可以看出,无论光源处于上扫频还是光频下扫频阶段,非线性度 μ 除一开始有振荡外,其余时刻都随着迭代次数的增加而降低。仿真结果说明利用迭代的方式校正高速调谐时的光源频率非线性的算法是有效的,下面将通过实验来进一步验证上述的理论模型与仿真结果。

4 光频非线性校正实验

4.1 实验平台搭建

为了验证该非线性迭代算法的正确性,搭建了如图6所示的实验平台。当进行光源非线性校正实验时,激光不进入耦合器3(Optical Coupler, OC),即忽略掉虚线部分。当进行分辨率比较实验时,激光将会进入OC3,即考虑虚线部分的光路。

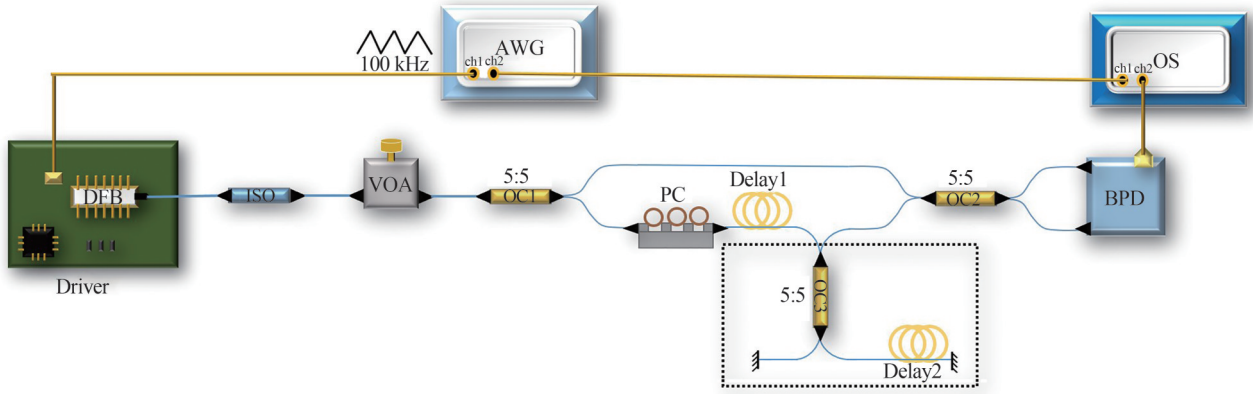


图6 FMCW探测系统结构

Fig.6 The structure of FMCW detection system

在非线性校正过程中,通过任意波发生器(Arbitrary Wave Generator, AWG)向DFB激光器驱动板输入信号。为了避免探测过程中的反馈信号对DFB激光器的干扰,出射的激光首先通过光纤隔离器(Isolator, ISO)。经过隔离器后的激光通过了一个可调光学衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA),以防止损坏灵敏度较高的平衡探测器(Balanced Photodiode, BPD)。之后激光通过一个 1×2 的 $5:5$ 耦合器(Optical Coupler, OC)分为两束,一束光作为本振光,另一束光作为信号光。由于本振光与信号光的偏振方向偏差会影响相干效率,在信号光支路中加入了偏振控制器(Polarization Controller, PC)用于调整信号光的偏振方向,使其尽量与本振光偏振方向相同,从而获得高信噪比的混频信号,之后信号光通过一段延迟线后与本振光通过OC2合束。为了减少直流分量对探测结果的影响,减少测量噪声,采用BPD进行探测。BPD将探测到的电流信号转化为电压信号,最后通过示波器(Oscilloscope, OS)采集波形。

在距离分辨率比较实验中,添加了虚线部分的光路,delay1取69.2 m,delay2取6 m。信号光通过光纤延迟线后通过一个 2×2 的OC3。在OC3另一侧的两条支路中,一条带有6 m的光纤延迟线,另一条则没有,两条光纤支路的端面均做了切平处理,以提供反射信号。

4.2 实验过程与结果

实验中采用明禾公司型号为JDS6600的任意波发生器。在一个周期中,该任意波发生器可以设定2 048个时间值。每个时刻可取0到1 V的电压,共有4 096个离散值可取。取延迟光纤1(delay 1)长度20.2 m,OC1与OC2之间两段光纤长度相差20 m,调制信号的频率取100 kHz。首先在调制信号没有进行校正的情况下进行探测,对探测到的信号分别进行STFT变换并还原出一个周期中光频随时间的变化趋势。结果如图7(a)和图7(c)所示,拍频大小在一个周期中波动很大,光源非线性失真严重。在此基础上,利用拍频信号一致化的迭代算法,对三角波调制信号进行两次校正。在第一次和第二次迭代后,STFT变换如图7(b)、图7(c)所示,两次迭代后光频在一个周期内的变化情况如图7(d)所示。

从图7可以看出,随着迭代次数的增加,拍频信号的大小趋于稳定,激光输出光频的非线性程度逐步降低。取上下扫频中间90%区域为计算区间,下扫频与上扫频的非线性度分别从0.050 0、0.020 0降低到了0.004 2、0.002 6,此时光频的变化范围大于5 GHz。从结果可以看出,该非线性度相较于一些工作^[14, 20]还是略高,主要原因有二。其一是迭代次数较少,根据仿真可知,随着迭代次数继续增加,非线性度将进一步降低,但降低的速率也将放缓;第二是实验中的激光器的调谐速率比文献[14, 20]中的更高,此时光源非线性

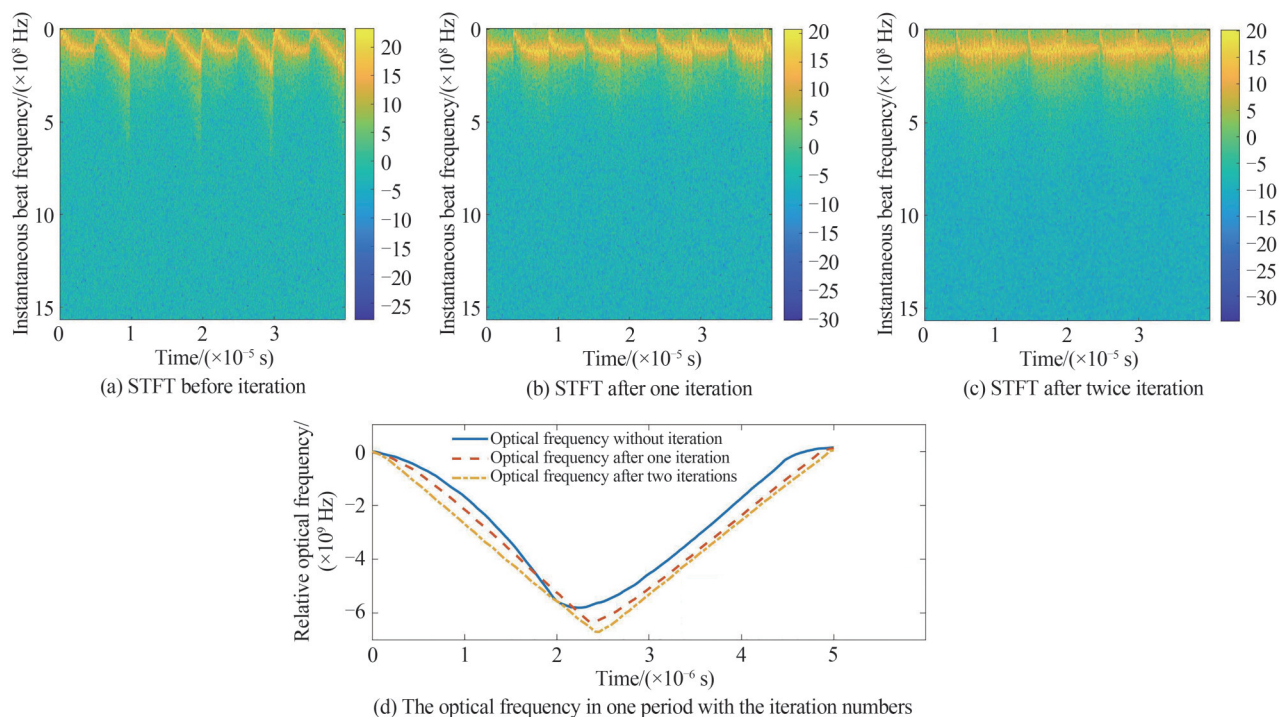


图7 非线性校正实验结果

Fig.7 Results of nonlinear correction experiment

效应加剧,校正效果会受到一定限制。另外实验中采用的低成本DFB激光器对激光频率线性度结果也有影响。如果想继续降低非线性度,可以继续进行多轮迭代,或者在已有预校正基础上,在实际测量中增加电路反馈系统。

最后,为了对比校正前后光源探测分辨率,利用该系统对等效光程51.5 m和61.5 m的目标同时测距,取delay1光纤长度69.2 m,取delay2光纤长度6 m。取调制信号上扫频过程中相同长度的一段时间,分别对校正前后探测器获得的信号进行FFT变换,结果如图8所示。

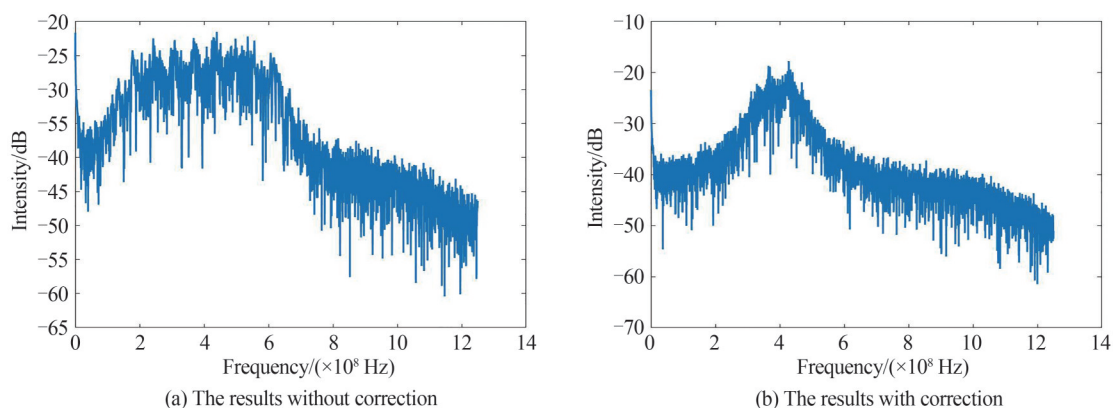


图8 分辨率实验结果

Fig.8 Resolution experimental results

根据图8(a)中FFT的计算结果,对于未作频率非线性校正的DFB光源,由于光源非线性程度过高,探测精度低,系统分辨率差,无法有效地区分相邻两个目标。而如图8(b)显示,在校正非线性后,两个探测目标所对应的FFT尖峰明显,可以有效地被区分开。

5 结论

本文针对FMCW激光雷达高速调制时所伴随的光源频率的强非线性现象,分析了DFB激光器的频率

调谐原理,确定了热效应为光源非线性的主导因素。在此基础上建立了DFB激光器的调谐模型并利用迭代算法进行非线性校正仿真。最后,针对100 KHz调制频率、5G带宽的DFB光源进行了两次迭代实验验证。

从仿真与实验的结果来看,该迭代方法可以有效地降低光源的频率非线性。随着迭代次数增加,光源的非线性校正效果明显,光源下扫频与上扫频的非线性度分别从0.050 0、0.020 0降低到了0.004 2、0.002 6,与仿真模拟相吻合。对两个相邻目标的测距结果显示,频率校正后探测系统的3 dB频率带宽有效降低,分辨率改善明显,证明了本文提出的温度模型与迭代算法的技术可行性。与以往的校正工作相比,本文结合DFB激光器调谐理论完成了更高频率的校正工作,同时,本文所提出的温度模型与迭代算法可以扩展应用于不同DFB激光器在不同调制频率下的工作场景,具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] LIU Ke, ZHANG Rongzhuo, MIAO Yinxiao, et al. Frequency-modulated laser radar measurement technology and application in the field of aeronautics and astronautics [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2021, 41(4): 1-8.
刘柯,张容卓,缪寅宵,等.调频激光雷达测量技术及在航空航天领域的应用[J].*宇航计测技术*, 2021, 41(4): 1-8.
- [2] FENEYRUP P, LEVIANDIER L, MINET J, et al. Frequency-modulated multifunction lidar for anemometry, range finding, and velocimetry - 2 experimental results [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(35): 9676-9685.
- [3] BEHNAM B, PHILLIP A M S, WU M C, et al. Lidar system architectures and circuits [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55: 135-142.
- [4] KIM I, MARTINS R J, JANG J, et al. Nanophotonics for light detection and ranging technology [J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16: 508-524.
- [5] CHUNG T Y, CHANG R R, CHEN Y H. Demonstration of FMCW LiDAR using a diode laser feedback with PQ: PMMA VBG [J]. *OSA Continuum*, 2021, 4: 2687-2694.
- [6] WU Y, DENG L H, YANG K Y, et al. Narrow linewidth external cavity laser capable of high repetition frequency tuning for FMCW LiDAR [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(21): 1123-1126.
- [7] LYU Y K, YANG T X, LU Z Y, et al. External modulation method for generating accurate linear optical FMCW [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(18): 1560-1563.
- [8] IYAMA K, WANG L T, HAYASHI K I. Linearizing optical frequency-sweep of a laser diode for FMCW reflectometry [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(2): 173-178.
- [9] SATYAN N, VASILYEV A, RAKULJIC G, et al. Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback [J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 15991-15999.
- [10] QIN J, ZHOU Q, XIE W, et al. Coherence enhancement of a chirped DFB laser for frequency-modulated continuous-wave reflectometry using a composite feedback loop [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(19): 4500-4503.
- [11] AHN T J, LEE J Y, KIM D Y. Suppression of nonlinear frequency sweep in an optical frequency-domain reflectometer by use of Hilbert transformation [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7630-7634.
- [12] VASILYEV A. The optoelectronic swept-frequency laser and its applications in ranging, three-dimensional imaging, and coherent beam combining of chirped-seed amplifiers [D]. California: California Institute of Technology, 2013.
- [13] ZHANG X, POULS J, WU M C. Laser frequency sweep linearization by iterative learning pre-distortion for FMCW LiDAR [J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9965-9974.
- [14] CAO X, WU K, LI C, et al. Highly efficient iteration algorithm for a linear frequency-sweep distributed feedback laser in frequency-modulated continuous wave lidar applications [J]. *Journal of the Optical Society of America B, Optical Physics*, 2021, 38(10): D8-D14.
- [15] SHI G, WANG W, ZHANG F. Precision improvement of frequency-modulated continuous-wave laser ranging system with two auxiliary interferometers [J]. *Optics Communications*, 2018, 411: 152-157.
- [16] LIU Jingwang, DU Zhenhui, LI Jinyi, et al. Analytical model for the tuning characteristics of static, dynamic, and transient behaviors in temperature and injection current of DFB laser diodes [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 346-350.
刘景旺,杜振辉,李金义,等.DFB激光二极管电流-温度调谐特性的解析模型[J].*物理学报*, 2011, 60(7): 346-350.
- [17] SAAVEDRA A A, PASSY R, VON DER WEID J P. Thermal drift in wavelength-switching DFB and DBR lasers [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(9): 780-781.
- [18] NORDIN D, HYYPPA K. Using a discrete thermal model to obtain a linear frequency ramping in a frequency-modulated continuous-wave system [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(7): 074202-074206.
- [19] ZHANG Jian. Study on nonlinear rectification technology of LFM DFB semiconductor laser [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 2019.
张健.线性调频DFB半导体激光器的非线性校正技术研究[D].西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2019.
- [20] ZHANG G, DING Z H, WANG K K, et al. Demonstration of high output power DBR laser integrated with SOA for the FMCW LiDAR system [J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 2599-2609.

Nonlinear Frequency Correction Technology of DFB laser with High Frequency Modulation for FMCW LiDAR

GOU Jiajun^{1,2}, SHEN Yonghang^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the development of autonomous driving technology, lidar technology has also been rapidly developed. As one of the Lidar systems, Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) calculates the distance of the target by detecting the beat signal frequency of the local light and the signal light. It can also calculate the velocity of the target by the optical Doppler effect. Compared with traditional time-of-flight lidar, FMCW lidar has many advantages. First, FMCW utilizes the principle of coherent detection to filter out the background noise effectively. The peak power of the continuous-wave is small, which is safe for human eyes. Secondly, the FMCW system can detect both the speed and distance of the target. Thirdly, when it comes to long-range detection, the FMCW system doesn't need a Single photon detector, so it can reduce the cost. However, in the field of autonomous driving, with the increase of imaging speed, the laser modulation rate has to increase, and then the nonlinearity of the laser source rises. as a result, the frequency of the beat signal varies greatly and the precision and resolution of the detection become worse. The resampling method, photoelectric negative feedback method, and pre-correction method can solve this problem. Considering the cost of the FMCW system, we use the pre-previous studies based on the auto-driving application. This paper studies the nonlinear pre-correction of DFB laser in high-speed tuning by simulation and experiments at the same time. Here, we first briefly introduce the principle of FMCW detection and analyze the influence of optical nonlinearity on detection precision. Secondly, we carry out the DFB simulation and use the Simulink toolbox of MATLAB to establish the temperature dominated tuning model of the DFB laser. Then, we assume the parameters of the DFB laser and analyze the nonlinearity distortion with the modulation rate of 100 kHz. Because the temperature hysteresis has most of the influence on optical nonlinearity, here, we do not consider the carriers' effects on frequency turning. After that, we use the iterative algorithm to correct the nonlinearity of optical frequency for many times and analyze the convergence of this algorithm. The correctness of the DFB module and iterative algorithm is verified. There are three steps in the iterative algorithm. At first, we calculate the optical frequency by STFT or Hilbert transform from the beat signal, then we calculate the differential value between two adjacent time points in the arbitrary wave generator and figure out the relative value of each point. At last, after the linear transform, we can get the real value of arbitrary wave generator at each time. Based on the simulation, we first set up an experimental platform to correct the nonlinearity of the existing DFB laser with two times of iterations. To analyze the effect of the nonlinear correction method, we detect two adjacent targets with the distance of 51.5 m and 60.5 m. The correctness of the simulation model and an iterative algorithm is verified. The results of the simulation and experiment show that the iterative method can effectively reduce the nonlinearity of the light source. With the increase of the number of iteration times, the nonlinearity improvement of the light source becomes more obvious. The nonlinearity of the lower and upper area of the optical frequency of the light source decreases from 0.050 0 and 0.020 0 to 0.004 2 and 0.002 6 respectively after two times iterations, which is consistent with the simulation. The detection results of two adjacent targets show that the 3 dB bandwidth of the detection system is effectively reduced after correction, which proves the feasibility of the iterative algorithm and modulation module.

Key words: Lidar; Frequency modulated continuous wave; Nonlinearity correction; Preprocessing; Iterative algorithm

OCIS Codes: 280.3640; 140.3518; 140.6810; 120.1880; 130.5990