

基于频移反馈腔的全光纤射频调制脉冲激光研究

杨宏志 赵长明 张海洋 杨苏辉 李晨

All-fiber radio frequency-modulated pulsed laser based on frequency-shift feedback loop

Yang Hong-Zhi Zhao Chang-Ming Zhang Hai-Yang Yang Su-Hui Li Chen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 184201 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.184201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.184201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

钛宝石激光抽运的被动锁模 Tm: YAG 陶瓷激光实验研究

Ti: sapphire pumped passively mode-locked Tm: YAG ceramic laser

物理学报.2014, 63(1): 014205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014205>

光谱扫描滤波法提升超强飞秒激光相干信噪比分析

Theoretical analysis of scanning spectral filter method for coherent intensity contrast enhancement in femtosecond laser system

物理学报.2013, 62(15): 154202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.154202>

光纤布拉格光栅型全光纤声光调制器的特性研究

Characteristics of the fiber Bragg grating based all-fiber acousto-optic modulator

物理学报.2013, 62(3): 034208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.034208>

单光子调制锁定 Fabry-Perot 腔

Fabry-Perot cavity locked by using single photon modulation

物理学报.2012, 61(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.204203>

单光子波长调制吸收光谱用于 1.5 μm 激光器的波长锁定

Single photon wavelength modulation absorption spectrum of acetylene for 1.5 μm laser wavelength stabilization

物理学报.2012, 61(10): 104205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.104205>

基于频移反馈腔的全光纤射频调制脉冲激光研究*

杨宏志 赵长明 张海洋† 杨苏辉 李晨

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

(2017年4月6日收到; 2017年5月11日收到修改稿)

射频调制的脉冲激光是激光雷达探测领域内的一项重要研究内容. 根据声光斩波器的强度和频率调制特性, 设计了基于频移反馈腔的全光纤射频调制脉冲激光. 理论上, 建立了基于频移反馈腔的激光外差相干理论模型, 并进行了数值仿真. 根据理论模型, 实验上严格控制频移反馈腔的长度和声光斩波器触发信号的周期, 在 100 MHz 的射频信号驱动下, 产生了脉冲宽度 110 ns、重复频率约 20 kHz 的具有最高 700 MHz 射频调制的脉冲激光 (脉内调制激光); 同时微调斩波周期可以实现脉冲前沿或后沿的多样性射频调制. 通过改变反馈腔内光纤放大器的输出功率实现了射频调制深度的连续可调, 最高达到了 0.67.

关键词: 激光射频调制, 脉冲激光, 频移反馈腔, 调制深度

PACS: 42.60.Fc, 42.79.Jq, 42.60.Rn, 42.68.Wt

DOI: 10.7498/aps.66.184201

1 引言

光载微波激光雷达是指利用微波调制的激光作为探测载波, 对目标进行测距、测速和其他特性探测的一种激光雷达. 与传统的激光雷达、微波雷达不同, 其以激光作为探测载波, 具有激光雷达空间分辨率高的特点, 同时又利用微波信号进行探测, 具有微波雷达较强的抗大气扰动的能力, 是一种结合了激光雷达和微波雷达各自的优点、又在一定程度上克服了二者不足的一种新型激光雷达, 具有广泛的应用前景^[1-6]. 同时, 该体制借鉴新型的微波光子雷达, 在光纤上实现微波信号的产生、处理以及转换, 并将其作为探测载波用于目标探测^[7]. 在光载微波激光雷达系统中, 激光源作为其中的核心部件, 在一定程度上决定了雷达的工作模式、作用距离、探测精度等. 当前, 远距离目标的激光探测广泛地使用脉冲激光作为发射机. 但受限于单脉冲工作体制, 脉冲上升沿较窄, 这对后端的脉冲激光放大、回波接收等提出了较高的要求. 为了解决上述问题, 部分学者提出了采用具有射频

调制的脉冲激光, 即利用脉冲激光高峰值功率和射频信号高精度的特性实现远距离、高精度的目标探测^[1,8,9]. 其中, Brunel等^[9-11]结合双频脉冲激光和频移反馈腔实现了双频脉冲激光射频信号的相位锁定, 并将其用于目标的速度测量. Zhang等^[12]将调Q脉冲激光注入频移反馈环中, 通过脉冲叠加, 实现了脉冲的射频调制.

频移反馈激光是在常规的Fabry-Perot腔(或者环形腔)内插入移频器, 使得激光每次通过移频器时频率都发生变化. 频移反馈激光在锁模脉冲产生、光域的实时傅里叶变换、频率梳产生、啁啾光源与宽谱光源产生等方面有特殊的应用^[13-18]. 本文根据声光斩波器的调制特性设计了基于频移反馈腔的全光纤射频调制脉冲激光. 理论方面, 建立了基于频移反馈腔的激光外差相干理论模型, 数值仿真了频移反馈环路长度和斩波器触发信号周期对射频调制脉冲的影响, 验证了光纤放大器增益系数对射频调制深度的影响. 实验上, 利用声光斩波器构建频移反馈腔, 通过精确控制斩波周期和频移反馈环路的长度, 使得脉冲激光反复通过声光斩

* 国家自然科学基金(批准号: 61308054)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ocean@bit.edu.cn

波器, 获得了具有脉内射频调制的脉冲激光. 同时, 在反馈环路中加入光纤放大器, 通过改变光纤放大器的输出功率实现了射频信号调制深度的调节. 与之前的研究相比, 该方案具有以下特点: 1) 通过连续匹配斩波实现对纳秒级短脉冲的射频调制; 2) 通过改变光纤放大器的输出功率可以实现射频调制深度的连续可调; 3) 采用全光纤器件, 可靠性、稳定性以及体积方面具有一定的优势. 基于频移反馈腔的全光纤射频调制脉冲激光的研究为新体制光载微波雷达的研究奠定了理论和实验基础.

2 模型及仿真

2.1 频移反馈激光理论模型

基于频移反馈腔的射频调制脉冲激光原理图如图 1 所示. 单频种子激光从光纤合束器的一端输入, 经光纤放大器后被声光斩波器调制, 产生移频脉冲光, 再经光纤分束器 2, 其中一路反馈进入环形腔中, 另外一路输出观测. 设两个耦合器的传输矩阵为 $[a_{ij}]$, 种子激光电场为 E_{seed} , 输出频移反馈激光为 E_{FSF} , 频移反馈环路中的激光电场详见图 1 (a).

根据声光斩波器调制特性, 当触发信号周期为 T_{rep} 时, 声光斩波器产生重复频率为 $1/T_{\text{rep}}$ 的激光脉冲; 当脉冲触发信号的周期等于脉冲激光在环形腔内的传输时间, 之前被调制的脉冲激光经光纤环路延迟后会被再次调制, 即同一调制脉冲会多次通过声光斩波器, 产生射频调制的脉冲激光.

声光斩波器是利用声光效应同时实现强度调

制和频率调制的器件, 如图 1 (b) 所示; 强度调制为当触发信号上升沿到来时, 输入连续激光通过声光晶体, 产生脉冲激光; 频率调制为布拉格衍射使得激光频率发生改变. 其强度传输函数模型, 如 (1) 式所示:

$$S(t) = \text{Gauss}(t) \times \sum_n \delta(t - nT_{\text{rep}}), \quad (1)$$

其中, $\text{Gauss}(t)$ 为声光斩波器产生的脉冲包络; δ 为狄拉克函数, 用来对脉冲包络进行周期拓展; T_{rep} 是触发信号的周期.

合束器 1 输出端的激光电场 E_1 为

$$E_1(t) = a_{11}E_{\text{seed}}(t) + a_{12}E_{\text{loop}}(t). \quad (2)$$

频移反馈环路内分束器 2 的输入端激光电场 E_2 为

$$E_2(t) = \gamma \cdot G \cdot S(t) e^{j\omega t} \cdot E_1(t - \tau), \quad (3)$$

其中 $S(t) e^{j\omega t}$ 是声光斩波器的调制函数, G 是光纤放大器增益, τ 为激光在环形腔中的传输时间, γ 为腔内的其他损耗. 分束器 2 的两输出端激光电场分别为 E_{loop} 和 E_{FSF} ,

$$E_{\text{loop}}(t) = a_{21}E_2, \quad (4)$$

$$E_{\text{FSF}}(t) = a_{22}E_2. \quad (5)$$

将 (2) 和 (3) 式代入 (4) 式中, 可得到

$$E_{\text{loop}}(t) = (E_{\text{loop}}(t - \tau) \cdot a_{12} + E_{\text{seed}}(t - \tau) \cdot a_{11}) \times \gamma \cdot G \cdot S(t) e^{j\omega t} \cdot a_{21}. \quad (6)$$

调制脉冲激光在频移反馈腔中多次循环调制后, 得到频移反馈环路内的电场 $E_{\text{loop}}(t - n\tau)$:

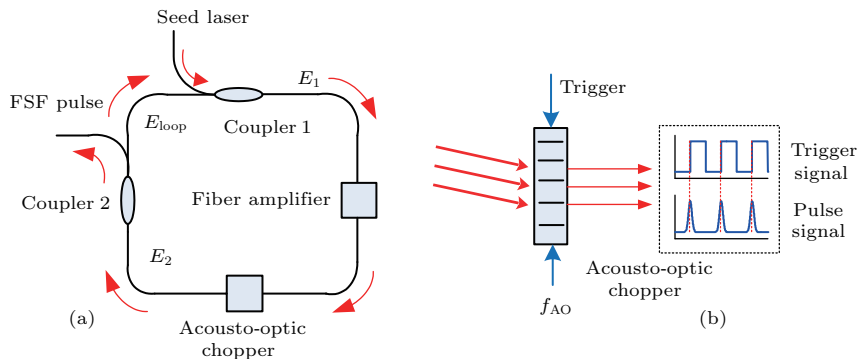


图 1 (a) 基于频移反馈腔的射频调制脉冲激光原理图; (b) 声光斩波器原理图
 Fig. 1. (a) Principle of radio frequency-modulated pulse based on frequency-shifted feedback (FSF) loop; (b) principle diagram of acousto-optic chopper.

$$\begin{aligned}
 E_{\text{loop}}(t - \tau) &= (E_{\text{loop}}(t - 2\tau) \cdot a_{12} + E_{\text{seed}}(t - 2\tau) \cdot a_{11}) \cdot \gamma \cdot G \cdot S(t - \tau) e^{j\omega_f(t-\tau)} \cdot a_{21}, \\
 E_{\text{loop}}(t - 2\tau) &= (E_{\text{loop}}(t - 3\tau) \cdot a_{12} + E_{\text{seed}}(t - 3\tau) \cdot a_{11}) \cdot \gamma \cdot G \cdot S(t - 2\tau) e^{j\omega_f(t-2\tau)} \cdot a_{21}, \\
 &\dots \\
 E_{\text{loop}}(t - n\tau) &= (E_{\text{loop}}(t - (n+1)\tau) \cdot a_{12} + E_{\text{seed}}(t - (n+1)\tau) \cdot a_{11}) \cdot \gamma \cdot G \cdot S(t - n\tau) e^{j\omega_f(t-2\tau)} \cdot a_{21}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

将(7)式多次迭代并简化:

$$E_{\text{loop}}(t) = \sum_{n=1}^n \left[E_{\text{seed}}(t - n\tau) \cdot a_{11} a_{12}^{n-1} (a_{21} \gamma G)^n \prod_{m=1}^{n-1} S(t - m\tau) \right] e^{j\omega_f[nt - \frac{n(n-1)}{2}\tau]}. \quad (8)$$

根据(4), (5)和(8)式, 得到频移反馈激光电场为

$$E_{\text{FSF}}(t) = \frac{a_{22}}{a_{21}} \sum_{n=1}^n \left[E_{\text{seed}}(t - n\tau) \cdot a_{11} a_{12}^{n-1} (a_{21} \gamma G)^n \prod_{m=1}^{n-1} S(t - m\tau) \right] e^{j\omega_f[nt - \frac{n(n-1)}{2}\tau]}. \quad (9)$$

根据光电探测器的光强响应特性, 频移反馈激光的光强 $I(t)$ 为

$$I(t) = E_{\text{FSF}}(t) * E_{\text{FSF}}^*(t). \quad (10)$$

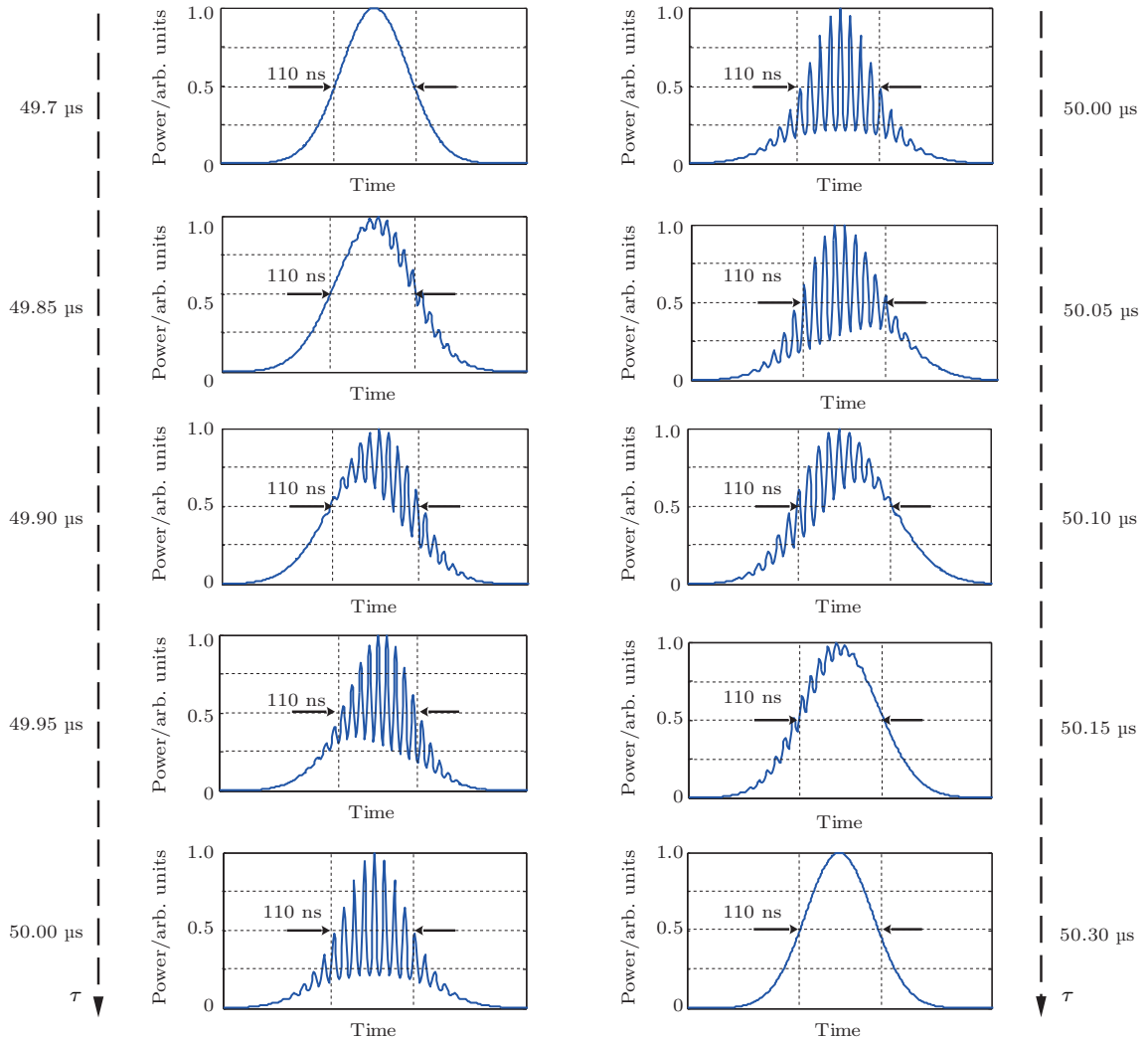


图2 声光斩波器触发信号周期对射频调制脉冲的影响, 其中激光在环形腔内的单次传输时间为 50 μs, 光纤放大器增益为 6
 Fig. 2. The influence of trigger period on radio frequency-modulated pulse by simulation. The roundtrip time is 50 μs and optically amplifier gain coefficient is 6.

2.2 仿 真

根据声光斩波器的传递函数(1)式和频移反馈激光的光强表达式(10),对输出的频移反馈脉冲激光进行数值仿真.设耦合器的电场传输矩阵 $[a_{ij}] = \begin{bmatrix} 0.544 & 0.491 \\ 0.527 & 0.484 \end{bmatrix}$;声光频移量 $\omega_f = 100$ MHz;激光在环形腔内的传输时间为 $50 \mu\text{s}$;斩波器触发信号周期可调;同时考虑到连接损耗、长光纤引入的损耗等,设 $\gamma = 0.5$.

设激光在频移反馈腔内的传输时间 $\tau = 50 \mu\text{s}$,调节声光斩波器触发信号周期,可以得到不同调制形式的脉冲,如图2所示.

由图2可知:声光斩波器产生脉冲宽度为 110 ns 的激光;当斩波器的触发信号周期(反馈腔对应的固定延迟为 $50 \mu\text{s}$)从 $49.7 \mu\text{s}$ 逐渐增大到 $50 \mu\text{s}$ 时(如图2左侧一列),脉冲激光经过无调制-

右侧调制-对称调制过程;当斩波器的斩波周期从 $50 \mu\text{s}$ 逐渐增大至 $50.3 \mu\text{s}$ 时(如图2右侧一列),脉冲激光经过了与之前完全相反的过程,即对称调制-左侧调制-无调制.通过调节斩波周期与频移反馈腔的长度,可以实现:1)射频调制的脉冲激光;2)调制形式的多样化(脉冲前、后沿调制).

当调节声光斩波器的斩波周期等于频移反馈腔内激光的传输时间时,仿真增益系数对输出脉冲光的影响,如图3所示.当增益系数 $G = 1$ 时,脉冲内射频信号的调制深度 $\eta = 0.1$ ($\eta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$),随着增益系数的提高,调制深度逐渐增大;当放大器增益系数 $G = 6$ 时,调制深度达到 $\eta = 0.67$.仿真结果表明,通过调节光纤放大器的增益系数可以调节脉冲内射频的调制深度,增益系数越大,调制深度越大.

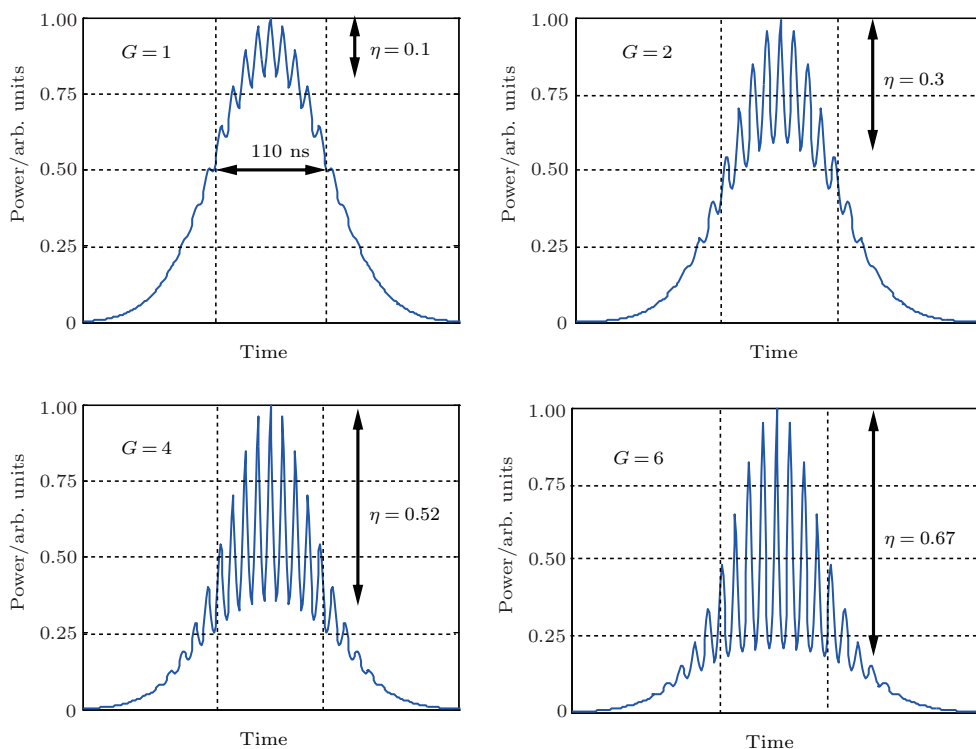


图3 不同光纤放大器增益系数的射频调制脉冲仿真图,其中触发信号周期为 $50 \mu\text{s}$,频移反馈环路长为 10 km
 Fig. 3. The simulation diagrams of radio frequency-modulated pulse with different gain coefficients. Trigger period is $50 \mu\text{s}$ and loop length is 10 km .

3 实 验

3.1 实验装置

实验装置如图4所示.窄线宽连续激光(波长 1080 nm ,线宽 $< 2 \text{ kHz}$,最大输出功率 10 mW)通

过光纤耦合器1注入频移反馈腔中,掺 Yb^{3+} 光纤放大器(最大输出功率 500 mW)提供腔内增益,被放大后的激光经过长约 10 km 的光纤延时后通过光纤声光斩波器,产生脉冲激光,光纤耦合器2的一个端口作为输出端与带宽为 3.5 GHz 高速光电探

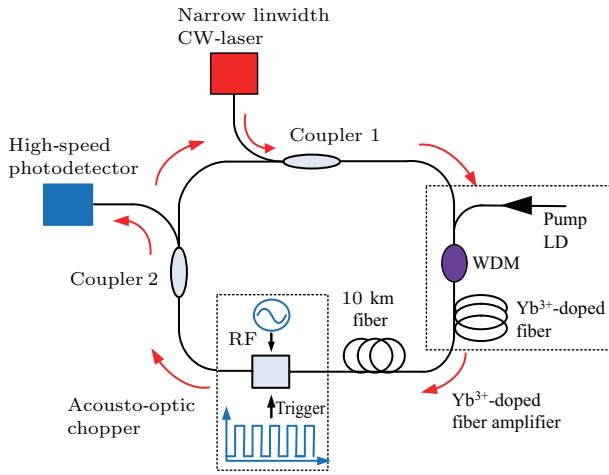


图4 实验装置图

Fig. 4. Schematic diagram of experiment setup.

测器相连; 另一输出端接耦合器1的输入端, 脉冲激光再次进入频移反馈腔内重复上述过程. 光纤放大器输出的输出功率可以通过改变激光二极管(LD), 抽运光功率实现, 触发信号由任意波形发生器提供, 其方波周期可调, 其余实验参数同仿真参数设置.

3.2 实验结果

激光脉冲在声光斩波器触发信号上升沿处产生, 如图5(a)和图5(b)所示: 调节声光斩波器的周期, 使得 $T_{\text{rep}} = \tau$, 声光斩波器产生的脉冲激光经过环形腔后可以再次被调制, 此时声光斩波器周期为 $49.135 \mu\text{s}$. 调节光纤放大器的输出功率

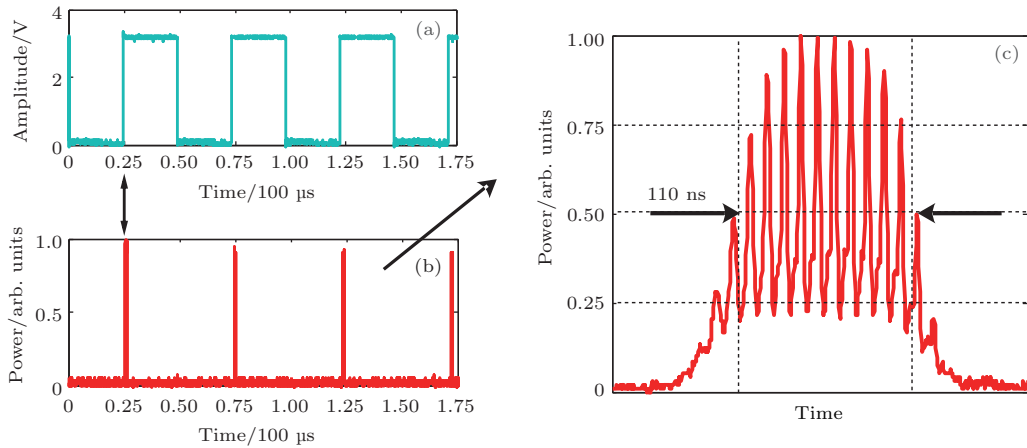


图5 基于频移反馈腔的射频调制脉冲时域图 (a) 声光斩波器的触发信号; (b) 射频调制脉冲激光; (c) 射频调制脉冲激光局部放大图

Fig. 5. The experiment investigation of radio frequency-modulated pulse based on FSF loop in time domain: (a) Trigger signal of acousto-optic chopper; (b) radio frequency-modulated pulse train; (c) a larger version of radio frequency-modulated pulse train.

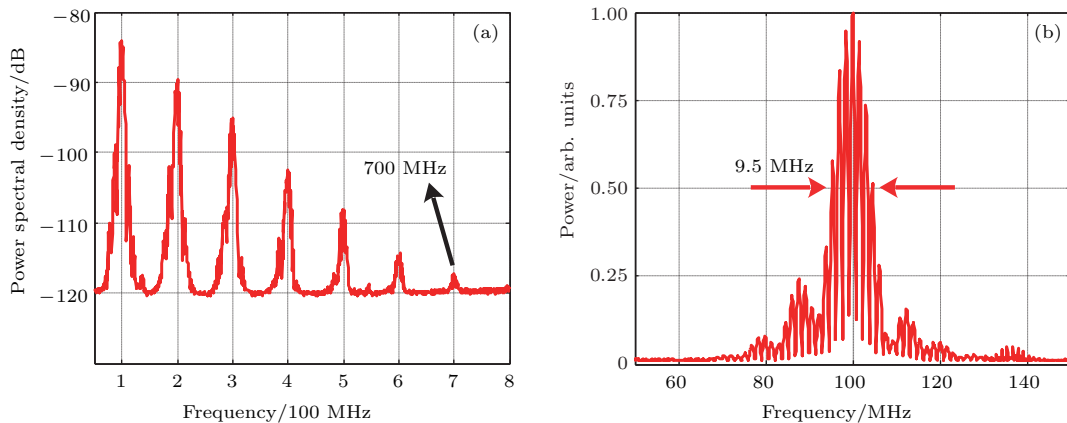


图6 基于频移反馈腔的射频调制脉冲频谱图 (a) 输出脉冲激光射频调制频谱 (分辨率带宽为 1 kHz); (b) 第一阶调制频谱图 (中心频率 100 MHz, 分辨率带宽为 1 kHz)

Fig. 6. Experimental spectral power of radio frequency-modulated pulse: (a) Output radio frequency-modulated pulse spectral power (resolution bandwidth is equal to 1 kHz); (b) first order radio frequency-modulated spectrum (central frequency 100 MHz, and resolution bandwidth is equal to 1 kHz).

为 80 mW, 此时输出的射频调制激光脉冲的脉冲宽度为 110 ns, 调制深度为 0.67, 如图 5 (c) 所示. 同时, 测量该脉冲的功率谱密度, 如图 6 (a) 所示. 射频调

制的最高调制频率达到了 700 MHz ($7\omega_f$). 基频的频谱宽度约为 9.5 MHz (图 6 (b)) 对应于 110 ns 的脉冲宽度, 符合脉冲信号时间带宽积基本定律.

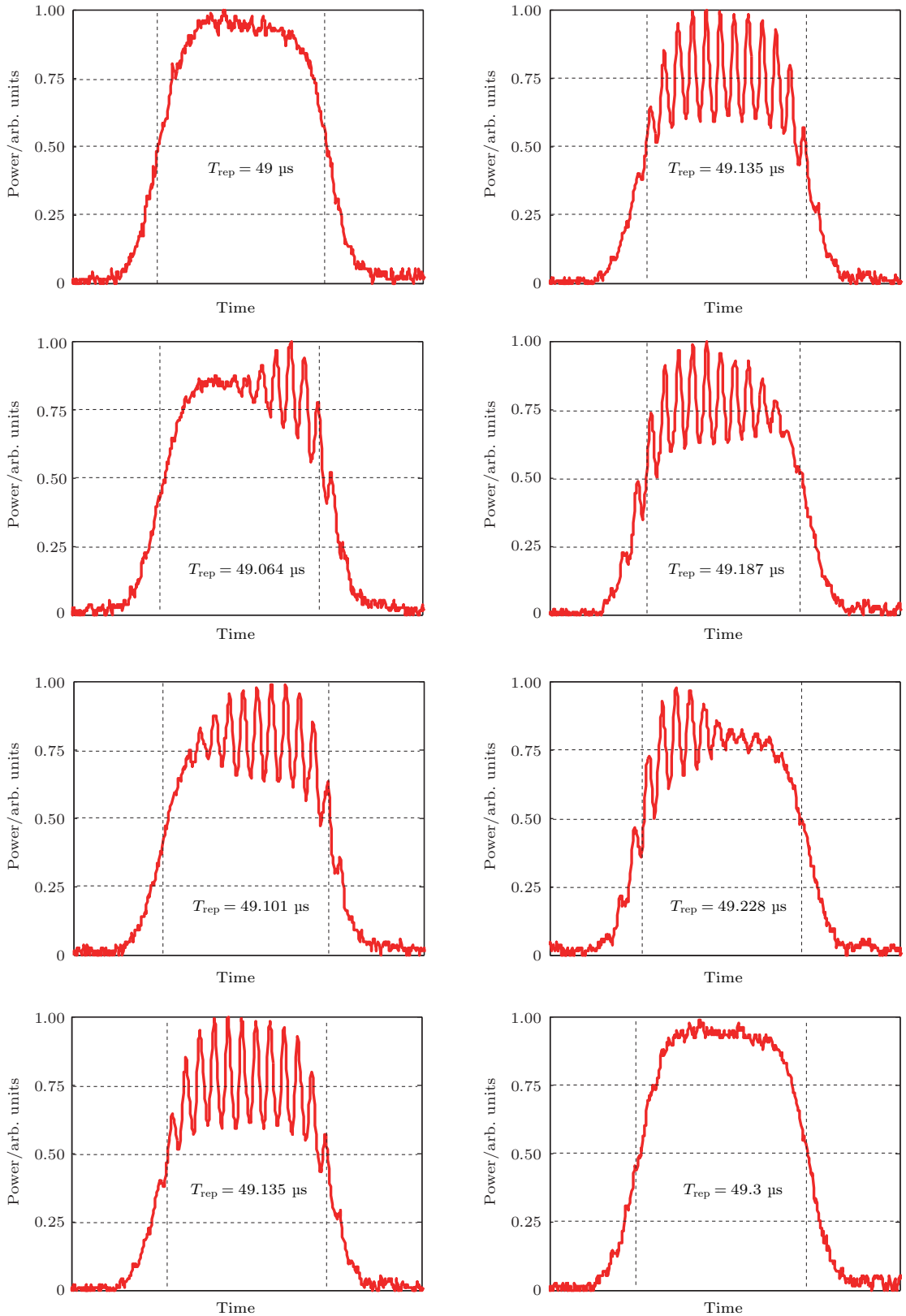


图 7 实验探究光纤声光斩波器周期对射频调制脉冲的影响

Fig. 7. The influence of trigger signal period on radio frequency-modulation pulse in experiment.

当调节触发信号周期, 使得声光斩波器触发信号周期不严格地对应频移反馈腔的腔长时, 会产生偏移调制的激光脉冲, 如图7所示. 这是由于声光斩波器产生的脉冲经过环形腔后不能完全对应再次通过. 当斩波周期小于 $49.135 \mu\text{s}$ (斩波周期小于脉冲激光在环形腔内的传输时间) 时, 声光斩波器开启触发信号, 前一脉冲还未到达声光斩波器, 因此脉冲前沿产生了无射频调制的脉冲; 随着时间的增加, 前一脉冲激光通过了声光斩波器, 而此时如果还处于声光斩波器的开启阶段, 那么脉冲后沿就具有了射频调制. 同样当斩波周期从 $49.135 \mu\text{s}$ 增加到 $49.3 \mu\text{s}$ 时, 调制信号实现了从对称调制-前沿调制-无调制的过程. 与仿真结果(图2)相比, 实验中反馈腔对应的周期为 $49.135 \mu\text{s}$ (仿真为 $50 \mu\text{s}$), 这主要是由于: 1) 反馈腔的长度除包含了 10 km 长度的光纤外, 还有光纤耦合器、声光斩波器以及光纤

放大器引入的长度; 2) 单模光纤的折射率不严格等于 1.5 . 但对比可以发现, 仿真结果与实验的变化趋势是相符合的.

如图8所示, 当改变光纤放大器的输出功率时, 脉冲内射频信号的调制深度会随之发生变化, 这是由于光纤放大器补偿了腔内移频光的损耗, 改变了移频光和非移频光的幅度比, 最终表现为射频信号调制深度的变化. 当光纤放大器输出功率为 80 mW 时, 得到了调制深度 $\eta = 0.67$ 具有射频调制的脉冲激光, 此时输出脉冲的峰值功率约为 10 mW . 与仿真结果(图3)相比, 实验中是通过控制光纤放大器的输出功率, 实现了射频调制的改变, 这主要是由于光纤放大器本身为输出功率控制而非增益控制. 但对比可以发现, 仿真结果与实验的变化趋势相符合, 即提高输出功率(增益), 调制深度也随之增加.

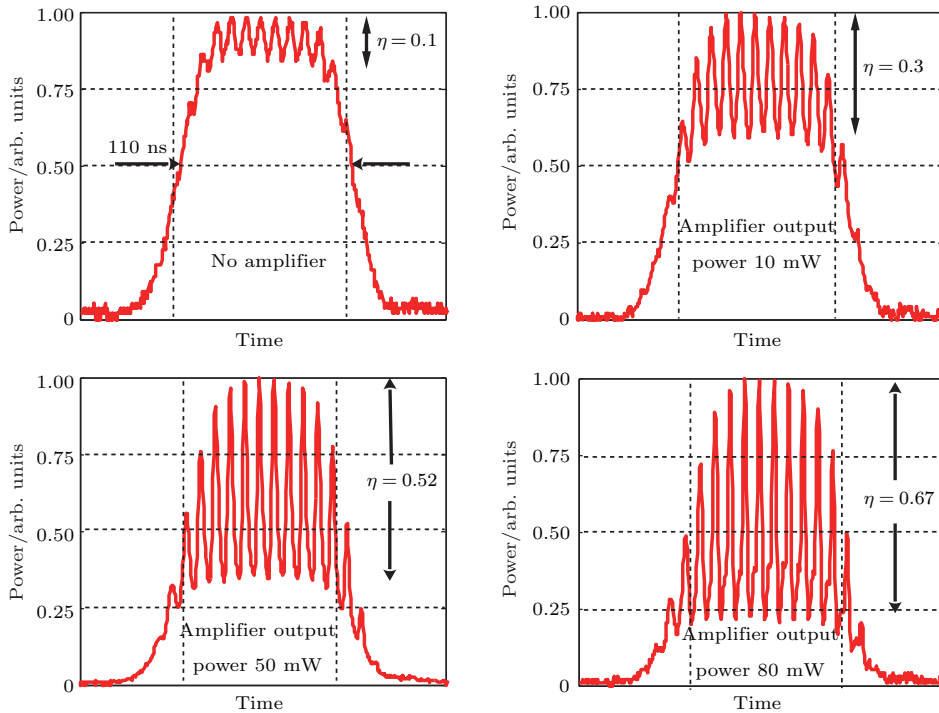


图8 实验上不同光纤放大器输出功率对射频信号调制深度的影响

Fig. 8. The influence of optically amplifier output power on the modulation depth of radio frequency-modulated pulse in experiment.

4 结 论

射频调制的脉冲激光是光载微波雷达的重要组成部分. 根据频移反馈腔和声光斩波器的频率和强度调制特性, 建立了基于频移反馈腔的激光外

差相干理论模型, 仿真了声光斩波器触发信号的周期、光纤放大器增益对射频调制脉冲的影响, 并进行了实验研究. 通过连续匹配斩波实现了对纳秒级脉冲的射频调制; 通过改变光纤放大器的输出功率可以实现射频调制深度的连续可调. 基于频移反馈腔的射频调制脉冲激光是一种新体制下的脉冲激

光, 与传统的脉冲激光相比, 其独特的反馈腔结构使得脉冲内产生了射频调制, 同时又利用脉冲内射频调制深度的可调节, 在窄脉宽激光调制以及水下探测等领域将具有广阔的应用前景.

参考文献

- [1] Morvan L, Lai N D, Dolfi D, Huignard J P, Brunel M, Bretenaker F, Floch A L 2002 *Appl. Opt.* **41** 5702
- [2] Zheng Z, Zhao C M, Zhang H Y, Yang S H, Zhang D H, Yang H Z, Liu J W 2016 *Opt. Laser Technol.* **80** 169
- [3] Cheng C H, Lee C W, Lin T W, Lin F Y 2012 *Opt. Express* **20** 20255
- [4] Pillet G, Morvan L, Dolfi D, Huignard J P 2008 *Proc. SPIE* **7114** 71140E
- [5] Dominicus L D, Collibus M F D, Fornetti G, Guarneri M, Nuvoli M, Ricci R, Francucci M 2009 *J. Eur. Opt. Soc. Rapid Pub.* **5** 10004
- [6] Diaz R, Chan S C, Liu J M 2006 *Opt. Lett.* **31** 3600
- [7] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, Serafine G, Capria A, Pinna S, Onori D, Porzi C, Scaffardi M, Malacarne A, Vercesi V, Lazzeri E, Berizzi F, Bogoni A 2014 *Nature* **507** 341
- [8] Kao D C, Kane T J, Mullen L J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1203
- [9] Vallet M, Barreaux J, Romanelli M, Pillet G, Thévenin J, Wang L, Brunel M 2013 *Appl. Opt.* **52** 5402
- [10] Brunel M, Vallet M 2008 *Opt. Lett.* **33** 2524
- [11] Thenenin J, Vallet M, Brunel M, Gilles H, Girard S 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 1104
- [12] Zhang H Y, Brunel M, Romanelli M, Vallet M 2016 *Appl. Opt.* **55** 2467
- [13] Kowalski F V, Shattil S J, Halle P D 1988 *Appl. Phys. Lett.* **53** 734
- [14] Phillips M W, Liang G Y, Barr J M R 1993 *Opt. Commun.* **100** 473
- [15] Sabert H, Brinkmeyer E 1994 *J. Lightwave Technol.* **12** 1360
- [16] Guillet d C H, Jacquin O, Hugon O, Glastre W, Lacot E, Marklof J 2013 *Opt. Express* **21** 15065
- [17] de Chatellus H G, Lacot E, Glastre W, Jacquin O, Hugon O 2013 *Phys. Rev. A* **88** 033828
- [18] Chatellus H G D, Cortés L R, Azaña J 2016 *Optica* **3** 1

All-fiber radio frequency-modulated pulsed laser based on frequency-shift feedback loop*

Yang Hong-Zhi Zhao Chang-Ming Zhang Hai-Yang[†] Yang Su-Hui Li Chen

(School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 6 April 2017; revised manuscript received 11 May 2017)

Abstract

Lidar-radar by using an radio frequency modulated (RF-modulated) laser transmitter is a powerful technique for applications involving remote sensing. The method is based on the use of an optically carried RF signal in order to acquire the merits of both the directivity of the optical beam (lidar) and the accuracy of RF signal processing (radar). Compared with single-frequency coherent lidars, lidar-radars are less sensitive to atmospheric turbulence and the speckle noise induced by target roughness. For long range detection, pulsed operation is usually required because of the high peak power. In order to meet the requirement for long range detection, an RF-modulated pulse train based on an all-fiber frequency shifted feedback loop is proposed in this paper. A continuous-wave single-frequency fiber laser (seed laser) is coupled into a fiber link and an acousto-optic chopper is used as a frequency shifter and beam chopper. A Yb³⁺-doped fiber amplifier is used to compensate for the loss of the signal in the fiber loop. The pulse duration is determined by the open time of acousto-optic chopper, which is fixed at 110 ns. A square wave generated by an arbitrary waveform generator is used as a trigger signal of the acousto-optic chopper. The RF within the pulse results from the interference of frequency shifted pulse with the seed laser. By inserting a 10 km fiber in the loop and accurately controlling the trigger cycle of the acousto-optic chopper equal to the roundtrip time of the loop, the pulse train generated by acousto-optic chopper can circulate in the loop, leading to the generation of RF-modulated pulse with about 20 kHz repetition rate and 110 ns width. The gain provided by fiber amplifier in the loop partially compensates for the loss. By adjusting the gain of fiber amplifier, the modulation depth of RF within the pulse can be continuously adjusted and the maximum modulation depth is 0.67. We also present an time-delayed scalar interference model which includes the loop length, trigger cycle, frequency-shift, and the gain. According to the theoretical model, the RF-modulated pulse affected by trigger cycle and fiber amplifier is numerically simulated. The experimental results accord well with theoretical predictions. The RF-modulated pulse has the advantage of high pulse-to-pulse coherence, which provides potential applications in lidar-radar detection. Besides, with an additional frequency doubling stage one can obtain a source for underwater detections and communications. Extension of the scheme to the 1.5 μm telecommunication window is straightforward for various radio-over-fiber applications.

Keywords: laser with radio frequency-modulation, pulse laser, frequency shifted feedback loop, modulation depth

PACS: 42.60.Fc, 42.79.Jq, 42.60.Rn, 42.68.Wt

DOI: 10.7498/aps.66.184201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61308054).

[†] Corresponding author. E-mail: ocean@bit.edu.cn