

双频固体激光器产生相干脉冲输出的研究进展

李立新¹, 李磊²

(1. 安阳师范学院电信系, 河南 安阳 455002; 2. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要:光载波雷达(Lidar-Radar)是一种新型体制的激光雷达,它采用激光拍频产生的射频信号作为探测媒介,在保证激光探测的高空间分辨力优点的同时相对于普通激光雷达具有更强的抗大气干扰能力,其中作为探测光源的二极管抽运的双频固体激光器是其关键技术之一。针对光载波雷达的具体应用要求对光学脉冲相干的双频固体激光器进行了分析,并报道了最新研究成果。

关键词:激光雷达;光载波雷达;双频固体激光器;光学脉冲相干

中图分类号:TN241

文献标识码:A

Progress on pulse-to-pulse coherent beat note generated by two-frequency solid-state lasers

LI Li-xin¹, LI Lei²

(1. Department of Electric and Telecommunication, Anyang Normal University, Anyang 455002, China;

2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China)

Abstract: Lidar-radar is a new system hybrid laser radar using laser beam carrying radio-frequency beat note to execute the distance and velocity detection applications, which has more anti-jamming ability but maintain high spatial resolution. The research status and prospect of lidar-radar system are reviewed. As one of the key technologies, the pulsed two frequency solid-state laser are analyzed and discussed. Some of the preliminary study results are presented.

Key words: laser radar; lidar-radar; two-frequency laser; coherent from pulse to pulse

1 引言

在电磁波目标探测和识别技术上,激光雷达^[1]和传统微波雷达^[2]具有各自的优势。与微波雷达相比,激光雷达具有更小的传输孔径,可以获得高的空间分辨力;微波雷达技术成熟,抗大气干扰能力强,能够全天候工作,因此有人尝试把激光雷达和微波雷达结合起来,将射频波段的信号调制到激光束上,产生了用激光作为探测媒介,信号处理采用微波雷达技术的光载波雷达 lidar-radar 模型^[3]。产生携带有稳定微波载波的激光束是实现 lidar-radar 系统的一个关键技术,用可调频差的双频固体激光器作为光源的方案由于其相对简单的结构、窄线宽、大频差、可以实现频率连续调谐而具有独特的优势^[4]。

北京理工大学首先启动了这方面的研究工作,采用将单块非平面环形腔固体激光器^[5]出射的单频激光进行声光移频再合束,从而产生双频激光进行了连续波光载波雷达的测距测速实验,得到了初步结果。当目标往复运动时,系统解算出的速度和位移具有良好的重复性^[6]。同时该小组研制出了连续输出频差可调谐的双频固体激光器^[7]。国外主要是法国 Thales 研究所和 Rennes 大学合作进行的研究,在相关领域的研究中处于领先地位。本文报道分析了其在光载波雷达系统光源中相干激光脉冲序列方面的研究进展。

作者简介:李立新(1966-),男,副教授,主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: aysyllx@sina.com

收稿日期:2008-12-18; **修订日期:**2009-02-24

2 光载波雷达工作原理

光载波雷达系统的工作原理图如图1所示,双频激光器发射出正交偏振双频激光束,两个光频的频差 $f_{rf} = \nu_1 - \nu_2$ 处于微波频域范围内。探测目标返回光被光学系统收集以后经过光放大器进行放大以提高系统信噪比,然后入射到高速光电探测器表面产生探测信号。假设被探测目标沿视线方向运动的分量速度为 V_L ,则被目标反射的光学分量频率分别为:

$$\nu'_1 = \nu_1 - 2 \frac{V_L \nu_1}{c} \quad \nu'_2 = \nu_2 - 2 \frac{V_L \nu_2}{c} \quad (1)$$

因此光电探测器响应产生信号频率:

$$f'_{rf} = \nu'_1 - \nu'_2 = f_{rf} - 2 \frac{V_L f_{rf}}{c} \quad (2)$$

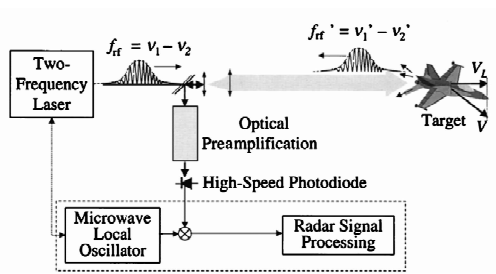


图1 光载波雷达系统示意图

可见光载波雷达的目标多普勒信号回波与微波雷达探测时接收到的多普勒回波信号频移相同,都是射频域信号,可以借鉴成熟的微波雷达信号处理技术。

3 产生激光脉冲相干性的要求和实现方法

从光学部分看,光载波雷达属于直接探测系统,直接探测的脉冲激光雷达能够提供良好的距离分辨率,但是在分辨物体形貌的探测任务上,需要在降低脉冲宽度的同时能够长距离工作,这对激光探测技术是个挑战,光载波雷达是一种解决这个问题的方法,它可以在提高距离分辨率的同时不必一味减小激光脉宽,而是利用将射频信号调制到激光脉冲上,借鉴微波雷达探测回波信号处理方法中的脉冲序列相干处理技术,兼顾测距范围的提高和多普勒测速功能的实现^[8],这时光载波雷达系统得到的信号功率可以用下式表示:

$$P_s = \frac{K}{2} R_L \Re G^2 \Phi_m^2 \quad (3)$$

式中, K 是相干脉冲数目; Φ_m 是系统接收到未放大的信号光功率; $\Re$ 是探测器的响应灵敏度; R_L 是光电信号探测器的负载阻抗; G 是光学放大器的增益。

要使脉冲双频固体激光器产生符合要求的光载波脉冲,需要解决两个问题:①如何方便地控制双频激光脉冲的宽度;②如何使双频激光脉冲输出序列

相干。下面分别加以讨论。

3.1 脉冲双频固体激光器输出脉冲宽度控制

如图2所示为法国 Rennes 大学和 Thales 研究所共同研制的 LD 抽运脉冲双频固体激光器^[3],激光谐振腔长度 2.8 cm,激光增益介质是掺杂浓度为 1at% 的 Nd:YAG 晶体,晶体表面镀对 808 nm 抽运光增透膜 ($T > 95\%$) 和 1064 nm 振荡激光高反膜 ($R > 99.5\%$) 形成 M_1 腔镜,谐振腔输出镜 M_2 为曲率半径为 200 mm 的球面镜,在 1064 nm 处透过率 $T = 1\%$,通过在腔内引入两个 $\lambda/4$ 波片 QWP_1 和 QWP_2 实现两个正交偏振激光的同时振荡形成双频输出,频差大小为 $\Delta\nu = \rho c / \pi L$,这里 c 为真空中光速, L 是谐振腔长, ρ 为 QWP_2 快轴与 QWP_1 快轴之间夹角。调 Q 功能由镀 1064 nm 增透膜的 1 mm 厚 $Cr^{4+}:YAG$ 可饱和吸收体实现,其 $[001]$ 晶轴方向与谐振腔的光轴方向一致,抽运源是 800 mW 输出 808 nm 激光二极管。通过调整抽运光耦合透镜 L_1 和 L_2 的位置可以调节脉冲双频激光器平均输出功率,在激光器后面放置偏振片可将双频激光的两个正交偏振方向的电场矢量投影到同一个方向上产生叠加,得到拍频信号,此信号频率处于微波雷达的射频域范围。当两个波片夹角 $\rho = 17^\circ$ 时,得到脉宽 36 ns 拍频 1 GHz 的双频激光脉冲信号,如图3(a)所示,其单脉冲能量约为 0.2 μJ ,重复频率 13 kHz,激光器重复频率可以通过微调抽运功率来实现稳定,拍频输出范围为 0 ~ 2.65 GHz。

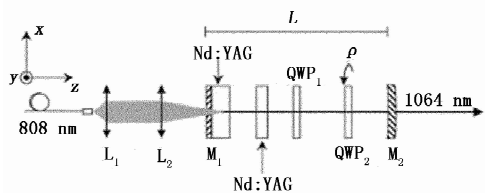


图2 脉冲运转双频固体激光器

双频脉冲激光器输出特性可以通过分析固体激光器速率方程实现,在这里忽略了输出激光正交偏振特性的影响,采用了标量处理方法:

$$\frac{dI}{dt} = - \left[\Gamma + a(a_0 - a) \frac{\sigma_{ESA}}{\sigma_{GSA}} \right] I + \kappa(n_u - n_d) I + \kappa n_u \varepsilon \quad (4a)$$

$$\frac{dn_u}{dt} = \gamma_u(P - n_u) - \zeta(n_u - n_d)I - \zeta n_u \varepsilon \quad (4b)$$

$$\frac{dn_d}{dt} = \gamma_u n_u - \gamma_d n_d + \zeta(n_u - n_d)I + \zeta n_u \varepsilon \quad (4c)$$

$$\frac{da}{dt} = \gamma(a_0 - a) - \mu a I \quad (4d)$$

式中, I 为腔内激光强度; n_u 和 n_d 分别是激光跃迁的上下能级粒子数; a 是 $Cr^{4+}:YAG$ 强度吸收系数;

Γ 是空腔衰减速率; κ 和 ζ 分别是 Nd^{3+} 原子和场的耦合系数; ε 是自发辐射系数; γ_u 和 γ_d 分别是激光上下能级弛豫速率; P 是归一化抽运速率; a_0 是 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 小信号吸收系数; $\mu = (\gamma_d/\gamma_u)\zeta R_{\text{sat}}$ 是 Cr^{4+} 粒子与场耦合系数, 其中 R_{sat} 是可饱和吸收体与增益介质中的光强比系数, σ_{ESA} 和 σ_{GSA} 分别是可饱和吸收体激发态与基态吸收截面。脉冲双频激光的特性可以用计算机做四阶龙格-库塔算法数值模拟得到, 计算中 $\sigma_{\text{ESA}}/\sigma_{\text{GSA}} = 0.27$, $\Gamma = 5.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $\gamma_u^{-1} = 230 \text{ } \mu\text{s}$, $\gamma_d^{-1} = 10 \text{ ns}$, $\kappa = \zeta = 1$, $\gamma_a^{-1} = 4.0 \text{ } \mu\text{s}$, $a_0 = 1.1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, $\varepsilon = 10^{-20}$ 。当 $R_{\text{sat}} = 0.046$ 时, 得到了图 3(a) 小方框中的数值模拟计算结果, 可以看到脉冲宽度与实验结果符合得很好。

如前所述, 如果要求双频激光具有较长的脉冲宽度, 可以通过改变 R_{sat} 的值来实现, 实验中通过调节耦合透镜 L_2 的位置以改变抽运光的光腰半径来调整脉冲宽度。当抽运光从 $240 \text{ } \mu\text{m}$ 变化到 $45 \text{ } \mu\text{m}$ 时, 输出激光脉宽由 18 ns 增加到 240 ns , 图 3(b) 为实验中得到的 150 ns 脉宽的双频激光脉冲, 对应的 R_{sat} 的值为 0.033 。值得注意的是, 当脉冲宽度从 36 ns 增加到 150 ns 时, 脉冲重复频率从 13 kHz 增加到了 75 kHz , 平均功率从 3 mW 降到了 1.3 mW 。

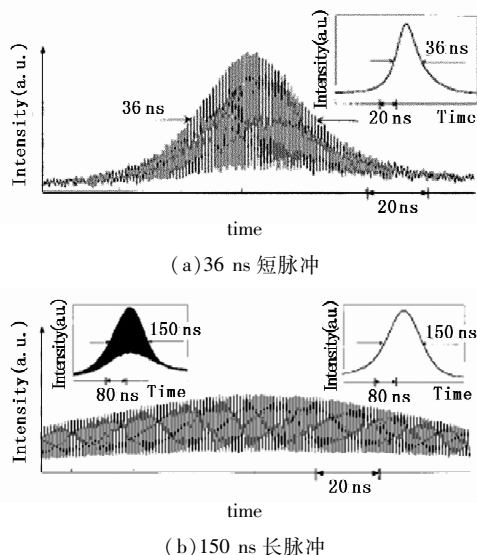


图3 拍频1GHz的双频激光脉冲信号

3.2 双频固体激光器输出脉冲相干序列的要求

光载波雷达中最重要的技术是使双频激光脉冲之间具有相干性^[9]。实现脉冲相干技术的关键是保证两个脉冲之间脉冲关断期间的频谱记忆^[10], 需要采用抽运源调制技术, 理论基础见文献^[11]。分析激光强度与粒子数关系的标量微分方程:

$$\frac{dI}{dt} = -\Gamma I + \kappa(n_u - n_d)I + \kappa n_u \varepsilon \quad (5a)$$

$$\frac{dn_u}{dt} = \gamma_u(P(t) - n_u) - \zeta(n_u - n_d)I - \zeta n_u \varepsilon \quad (5b)$$

$$\frac{dn_d}{dt} = \gamma_d n_u - \gamma_d n_d + \zeta(n_u - n_d)I + \zeta n_u \varepsilon \quad (5c)$$

上述方程组与方程组(4)相似, 只是去掉了跟可饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 有关的参数项, 同时抽运速率 P 与时间有关: $P(t) = [\eta + \Delta\eta \sin(2\pi ft)]P_{\text{th}}$, 这里 P_{th} 是激光器的阈值抽运功率, η 是平均激发参量, $\Delta\eta$ 是调制幅度, f 是调制频率。激光脉冲运转特性同样可以用龙格-库塔算法做数值求解得到, 这时首先根据一个确定的抽运功率以确定弛豫振荡频率 f_{RO} , 这里 $2\pi f_{RO} = \sqrt{(\eta - 1)\gamma_u \Gamma}$ 。选择 $\eta = 3.65$, 对应 $f_{RO} = 240 \text{ kHz}$ 。首先, 在平均激发参量 $\eta = 3.65$ 附近设定调制幅度 $\Delta\eta = 1$, 然后计算 f 接近于 f_{RO} 时激光器输出光强的变化, 图 4(a) ~ 图 4(c) 是在三个不同的调制频率上的数值模拟计算结果, 激光器显示了明显的脉冲输出特性, 在 $f = 200 \text{ kHz}$ 时, 激光输出 $1 \text{ } \mu\text{s}$ 脉宽的同频率的脉冲, 脉冲之间光强不为零。然后固定 $\eta = 3.65$ 和调制频率 $f = f_{RO} = 240 \text{ kHz}$, $\Delta\eta$ 变化时激光器的输出特性如图 4(d) ~ 图 4(f) 所示, 在 $\Delta\eta = 2$ 时得到了我们想要的结果, 当调制幅度 $\Delta\eta = 3.25$ 时, 激光器输出尖峰脉冲, 这时: ①由于调制幅度很大, 两个脉冲之间抽运功率低于阈值; ②输出 500 ns 脉宽的脉冲, 脉冲之间完全关断, 不再是相干脉冲序列。在上述分析中, 图 4(c) 和图 4(e) 符合我们对光载波雷达脉冲光源的要求。

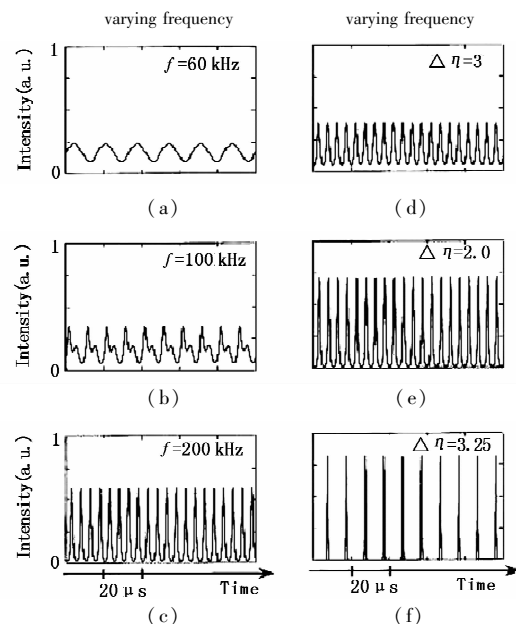


图4 抽运源频率调制型脉冲双频固体激光器数值计算结果

3.3 双频固体激光器输出脉冲相干序列的实现

上述结果需要用实验验证。采用文献^[4]中激

光器结构,如图 5 所示。激光谐振腔长度 36 mm,不再有 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 可饱和吸收体,其他参数与图 3 描述的激光器相同,调节两个波片快轴之间夹角夹使频差为 1 GHz,阈值抽运功率为 130 mW。在抽运功率 645 mW 时,测得弛豫振荡频率为 204 kHz,输出功率 45 mW,这时设定抽运源调制频率为 204 kHz,调制幅度为 $\Delta\eta = 1.5$,得到了脉宽为 900 ns,重复频率为 204 kHz 的脉冲序列,如图 6(a)所示,调制深度为 93% 且脉冲相干。用频谱仪测量了拍频频谱,频谱图为梳状结构,频率间隔 204 kHz,频谱包络图的半峰值全宽度约为 750 kHz,对应的时间带宽积 $\tau \times \nu_m \cong 0.7$,如图 6(b)所示,频率梳结构说明了脉冲序列是相干的。然后又用 $\text{Er-Yb}:\text{glass}$ 激光增益介质做了实验,抽运源为光纤输出 975 nm 激光二极管,谐振腔长 50 mm,在 260 mW 抽运功率(对应 $\eta = 2.3$)时得到 1.54 μm 双频激光输出,弛豫振荡频率 56 kHz。在调制幅度 $\Delta\eta = 1.4$ 得到了脉宽 3 μs 频谱包络半峰值全宽度 230 kHz 脉冲序列输出,如图 6(c)和图 6(d)所示,所有这些结果都与数值模拟结果符合得很好,理论和实验证明了光载波雷达脉冲相干光源的可行性。

4 结 论

光载波雷达是一种新体制的混合型雷达,其本质的探测手段是激光探测,但是它把微波频率范围的射频信号调制到激光束上,可以看作是微波多普勒探测系统,而要实现有效的脉冲探测,脉冲相干技术的实现是关键之处,这对高分辨率的光载波多普勒测速和距离探测^[12]是至关重要的,随着脉冲相干光源技术和光载波雷达技术的发展,有望在军事和医疗等领域得到广泛应用。

参考文献:

[1] A V Jelalian. Laser Radar Systems [M]. Boston Mass. : Artech House, 1992.

[2] M Skolnik. Radar Handbook [M]. 2nd ed. New York: Mac Graw Hill, 1990.

[3] L Morvan, N D Lai, and D Dolfi, et al. Building blocks for a two-frequency laser lidar-radar: a preliminary study [J]. Appl. Opt. , 2002, 41 (27) : 5702 – 5712.

[4] M Brunel, N D Lai, M Vallet, et al. Generation of tunable high-purity microwave and terahertz signals by two-frequency solid-state lasers [C]. Proc. SPIE, 2004, 5466 : 131 – 139.

[5] 吴克瑛,魏光辉,赵长明,等. 激光二极管抽运非平面单向行波环形腔单频固体激光器的设计 [J]. 光学学报, 2000, 20 (9) : 1245 – 1250.

[6] 李磊,赵长明,高岚,等. 变光外差为电外差的双频激光探测 [J]. 光学学报, 2007, 27 (2) : 249 – 252.

[7] 李磊,赵长明,张鹏,等. 激光二极管抽运频差可调谐双频固体激光器的研究 [J]. 物理学报, 2007, 56 (5) : 2663 – 2669.

[8] G Pillet, L Morvan, D Dolfi et al. Wideband dual-frequency lidar-radar for high-resolution ranging, profilometry and Doppler measurement [J]. SPIE, 2008, 7114, 71140E – 1 – 71140E – 12.

[9] N D Lai, Bretenaker F, Brunel M. Coherence of pulsed microwave signals carried by two-frequency solid-state lasers [J]. J. Lightw. Technol. , 2003, 21 (12) : 3037 – 3042.

[10] D Romanini, A Kachanov, E Lacot et al. Loss of spectral memory in the relaxation oscillations of a multimode solid-state laser [J]. Phys. Rev. , 1996, 54 (1) : 920 – 927.

[11] H G Danielmeyer, F W Jr Ostermayer. Diode-pump-modulated Nd:YAG laser [J]. J. Appl. Phys. , 1972, 43 (6) , 2911 – 2913.

[12] R Diaz, S C Chan, J M Liu. Lidar detection using a dual-frequency source [J]. Opt. Lett. , 1980, 31 (24) : 3600 – 3602.

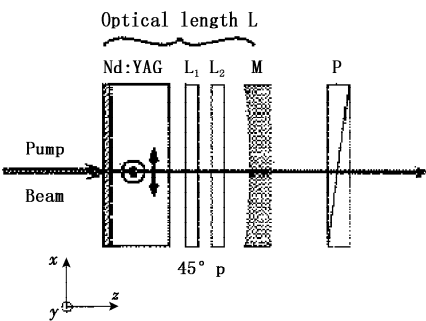


图 5 抽运功率调制双频固体激光器

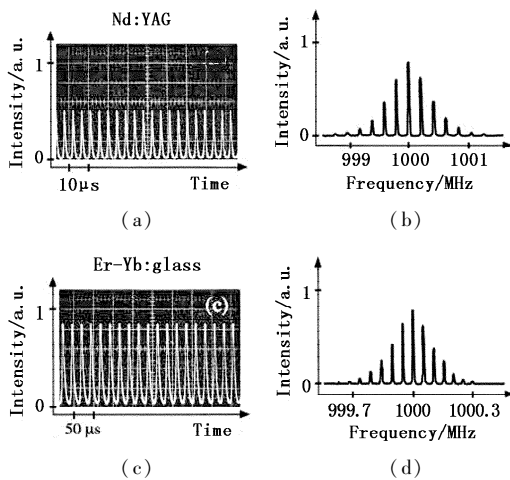


图 6 谐振腔幅度调制相干脉冲序列的实验结果

(a,b)Nd:YAG 激光器 (c,d)Er-Yb:glass 激光器