

文章编号: 0258-7025(2009)09-2426-05

# 面向汽车防撞的混沌激光雷达

龚天安 王云才 孔令琴 李海忠 王安帮

(太原理工大学理学院物理系, 山西 太原 030024)

**摘要** 提出了一种抗干扰性强、距离分辨率高、面向汽车防撞系统的混沌激光雷达。该雷达采用光反馈半导体激光器产生的宽带混沌激光作为光源, 利用相关法实现目标距离的测量, 进一步通过时间微分法测量速度。实验结果表明, 雷达系统可获得优于 9 cm 的距离分辨率和亚秒量级的测量周期。仿真分析表明, 作为一种汽车防撞雷达, 该系统具有良好的抗干扰能力, 能很好地解决信道串扰及环境噪声干扰导致的虚警问题。

**关键词** 激光技术; 混沌激光; 汽车防撞雷达; 实时测距; 交叉干扰

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2426

## Chaotic Lidar for Automotive Collision Warning System

Gong Tian'an Wang Yuncai Kong Linqin Li Haizhong Wang Anbang

(Department of Physics, College of Science, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

**Abstract** An antijamming chaotic lidar system with high resolution for automotive collision warning radar application is proposed. Utilizing the broad bandwidth chaotic light emitted from a laser diode with optical feedback as the probe beam, we can locate the target by the correlation characteristics of chaotic light. Further, the velocity can be obtained by time differential method. Experimental results show this real-time chaotic lidar can obtain sub-second measurement period and 9 cm range resolution. Simulative results show that, as automotive collision warning radar, the chaotic lidar has good antijamming capability, can resolve the false alarm problem resulting by the multi-channel and noise jamming.

**Key words** laser technique; chaotic laser; automotive collision warning radar; real-time ranging; cross jamming

## 1 引 言

虚警问题是目前汽车防撞激光雷达规模化应用的主要技术障碍之一。虚警产生的部分原因是由于邻近车道上车辆的相互干扰, 因此要求对发射信号进行编码或利用伪随机信号作为探测光束<sup>[1,2]</sup>。但受伪随机码长和调制速率的限制, 随机码调制的随机信号雷达距离分辨率低, 典型的分辨率为数十米<sup>[3]</sup>, 因而仍存在虚警问题。

混沌信号是确定性系统产生的类噪声信号, 无需调制, 不受码长的限制, 拥有良好的相关特性和天然的抗干扰能力。采用宽带混沌信号作为载波的混

沌信号雷达<sup>[4,5]</sup>具有“图钉型”模糊函数、优异的距离和速度分辨率, 在汽车防撞应用方面更具有优越性<sup>[6,7]</sup>。半导体激光器在外界的扰动下(如光反馈与光注入)会输出不同的状态, 如混沌、低频起伏、相干塌陷等现象。半导体激光器的相干塌陷输出首先被提出用于激光测距<sup>[8]</sup>, 然而探测信号的混沌脉冲状波形的带宽限制了其测量精度。随后, 利用主从式光注入半导体激光器产生的混沌信号作为激光雷达的载波信号进行测距的观念被提出<sup>[9]</sup>, 但其结构没有光反馈半导体激光器简单。另外, 光注入可以提高混沌载波的带宽已得到实验验证<sup>[10]</sup>。

收稿日期: 2008-10-09; 收到修改稿日期: 2009-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(60777041)资助课题。

作者简介: 龚天安(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事混沌激光汽车防撞雷达方面的研究。

E-mail: gongtianan@163.com

导师简介: 王云才(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事半导体激光器的非线性动力学特性及其应用等方面的研究。

E-mail: wangyc@tyut.edu.cn(通信联系人)

本文基于光反馈半导体激光器产生的宽带混沌激光,提出一种应用于汽车防撞的实时混沌激光雷达系统,并对该系统的实时测距、测速能力进行了原理性的实验验证。同时仿真分析了该装置在多用户同时工作情况下的抗干扰性能和对高斯白噪声的免疫能力。

## 2 实验装置

混沌激光雷达系统实验装置如图 1 所示。实验中,半波片( $\lambda/2$ )与偏振分束器(PBS)的损耗分别为 8% 和 5%;反射镜的反射率为 85%。激光器的输出光准直后被偏振分束器分成两束,其分束比可以通过调节半波片和偏振分束器的相对角度而改变。反射镜将一束光反射并耦合进激光器,实现光反馈。另一束光作为输出光。输出光经分束器(BS)后,其中一束作为参考光,另一束作为探测光对目标进行探测。隔离器用来防止外部探测光对混沌源的干扰。探测光射向目标并被反射回来,回波信号及探测光经光电探测器(PD, 1.5 GHz)后转化为电信号,同时进入实时示波器(Tektronix TDS3052B, 500 MHz 带宽)进行实时监测。最后通过计算机对

示波器采集到的信号进行实时相关处理,得到探测信号与参考信号的相关曲线,得到目标的位置信息。

数据的采集与处理由计算机和实时示波器完成。采用泰克公司的通用接口总线(GPIB)通信模块(TDS3GV)和安捷伦公司的 GPIB 卡(82357B)实现示波器与计算机之间的通信。利用美国国家仪器(NI)公司的 Labview 软件对参考信号和探测信号进行实时相关处理。计算机通过 Labview 开发平台发送相应的指令控制示波器进行实时的数据采集与传输,其数据传输率可达 1.7 Mbit/s。该系统利用时间间隔法测量移动物体的速度,通过程序循环运行,得到确定时间间隔  $t$  内的两次测量距离差  $\Delta L$ ,计算出移动物体  $t$  时间内的平均速度  $V$ ,即  $V = \Delta L/t$ 。当时间间隔  $t$  非常小时,平均速度可以近似看作瞬时速度。

实验中所用的半导体激光器中心波长为 808 nm,阈值电流为 98 mA,最大输出功率为 500 mW。将激光器偏置电流设置为 1.795 倍的阈值电流,激光器输出的平均光功率为 200 mW。调节半波片的偏振方向,在适当的反馈强度下,激光器输出为混沌光。图 2 显示了激光器输出混沌激光的时序图(a)和功率谱(b)。图 2(a)显示了混沌激光的非周期类噪声特性。图 2(b)为图 2(a)混沌时序图所对应的频谱图,可见其带宽在 1.5 GHz 后明显下降,这是受探测器带宽 1.5 GHz 的影响,其真实带宽远大于 1.5 GHz。由于系统的小型化,混沌激光采用短外腔反馈半导体激光器产生,因此频谱出现外腔谐振峰,但并不影响雷达测量精度。

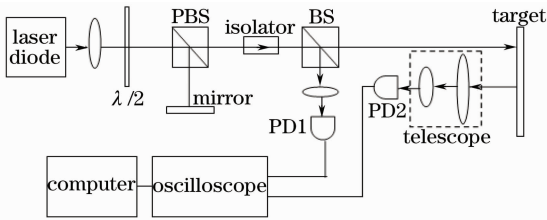


图 1 混沌激光雷达系统实验装置

Fig. 1 Experimental setup of chaotic lidar system

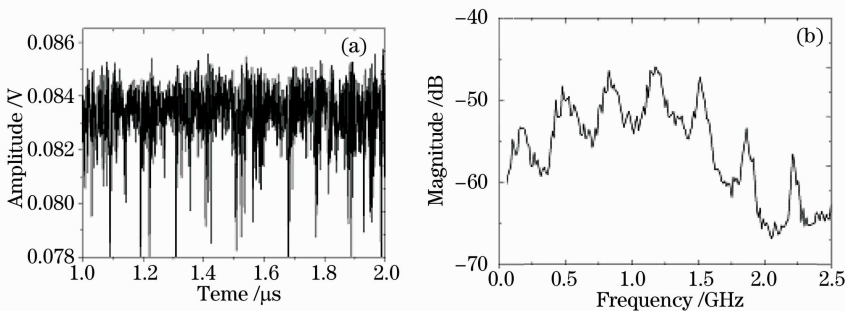


图 2 用于测距的混沌激光的时序图(a)和功率谱图(b)

Fig. 2 Time series (a) and power spectrum (b) of chaotic signal employed in lidar for ranging

## 3 距离、速度的实验验证

为了验证混沌激光雷达的可行性,用置于气垫导轨上移动的平面镜代替汽车作为目标进行了实时距离、速度测量的实验。导轨长度为 2 m 且置于雷

达前 1.6 m 处。通过一个竖直下落的物体牵引导轨上的平面镜做匀加速运动,混沌激光雷达以固定的时间间隔 0.3 s 对目标的距离进行连续测量。基于 Labview 软件程序,通过计算固定时间间隔内的

距离差即可得到平面镜的速度、加速度。为了便于比较,平面镜的速度、加速度同时由导轨上的两个光电门直接测量。

图 3 显示了平面镜距离混沌激光雷达 3.2 m 处,速度为 1.03 m/s 的测试界面图,包含了参考信号的时序图(a),功率谱图(b),回波信号与参考信号的互相关图(c)以及距离、速度测量结果(d)。相关曲线的旁瓣比为 -10.5 dB,半峰全宽(FWHM)为 0.6 ns,即相应的测距精度为 9 cm。需要指出的是,9 cm 的测距精度是受限于所用的示波器带宽 500 MHz 的限制,采用更大带宽的采集系统可以得

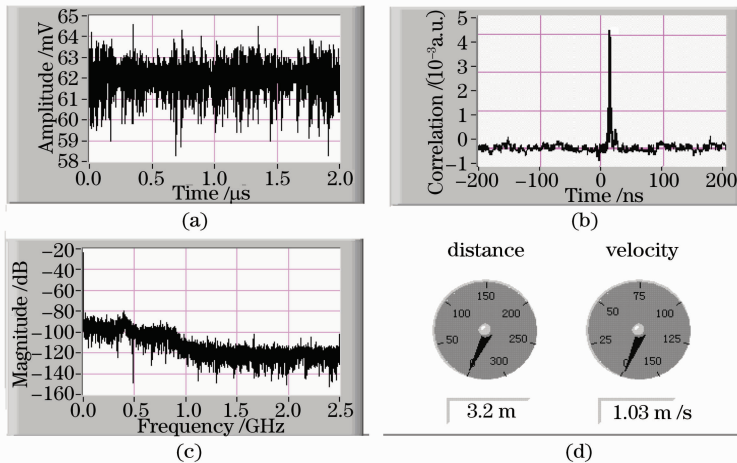


图 3 混沌激光雷达实时实验结果。(a)时序图;(b)功率谱图;(c)相关曲线;(d)距离、速度结果图

Fig. 3 Experimental results of real-time chaotic lidar. (a) Time series; (b) power spectrum; (c) correlation traces; (d) distance and velocity of the target

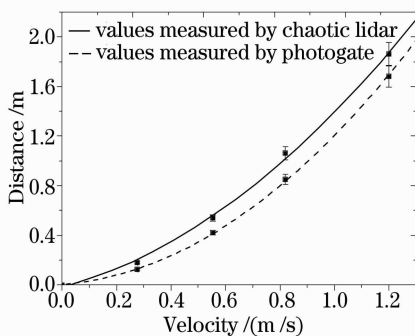


图 4 匀加速运动物体距离随速度变化的关系

Fig. 4 Distance versus the velocity of the target with constant acceleration

基于 Labview 软件开发平台完成的测量程序可实时地对目标进行测量及结果显示,其实时性取决于所用的计算机硬件配置的计算速度。根据实验中的计算机配置,得到完成一次距离测量的时间是 0.3 s,采用运算速度更快的计算机和更快的数据采集卡可提高计算速度,缩短单次测量时间,进一步增

到更高的测距精度。宽带的混沌激光具有较高的旁瓣比、良好的相关性能,将其作为探测光的混沌激光汽车防撞雷达具有较高距离分辨率的无模糊测距性能。图 4 显示了平面镜的距离随速度变化的关系,表明在初步的原理性实验中,提出的混沌激光汽车防撞雷达能够进行目标的距离及速度测量。两种方法测量结果的偏差产生的原因有:在混沌激光测距中用两次测量间隔的平均速度替代瞬时速度;受实验条件所限,光电门本身存在着较大的测量不确定度;对绝对位置的标定存在误差。

加装置的实用性。

图 5 显示了混沌激光雷达同时实时测量两个目标的测试界面图。采用文献[11]的实验装置,平面镜位于混沌激光雷达前 3.02 m 处作为第一个目标,半透半反镜置于平面镜和混沌激光雷达之间并位于混沌激光雷达前 1.3 m 处作为第二个目标。在图 5 中同时显示了混沌激光的时序图(a),功率谱图(b),两目标的相关曲线(c),以及两目标的距离(d)。

## 4 抗干扰性能仿真分析

车载雷达在实际的目标探测过程中,都会受虚假信号及环境噪声的干扰。假设每辆汽车都已装备了防撞雷达,那么相邻车道上反向行驶的车辆将有可能对己车的雷达系统施加很强的干扰,从而大大影响防撞雷达系统对于目标回波信号的正确检测,导致虚警的产生。

以图 2(a)所示的混沌激光作为参考及探测信

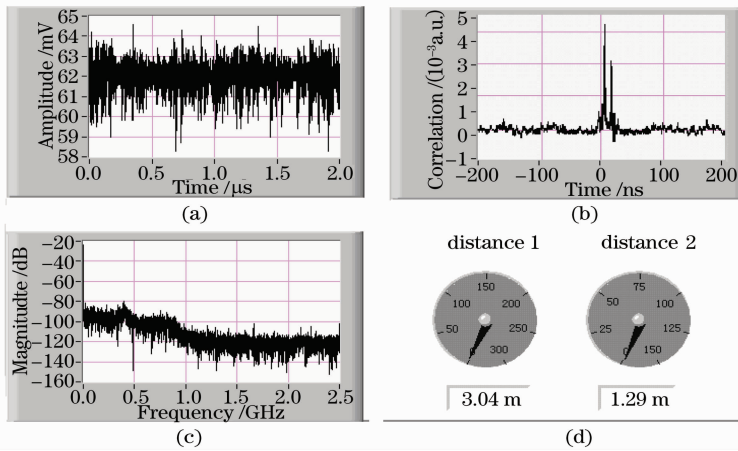


图 5 多目标测距实验的时序图(a),功率谱图(b),相关曲线(c)和距离结果(d)

Fig. 5 Time series (a), power spectrum (b), correlation traces(c) and distance (d) for multi-target ranging

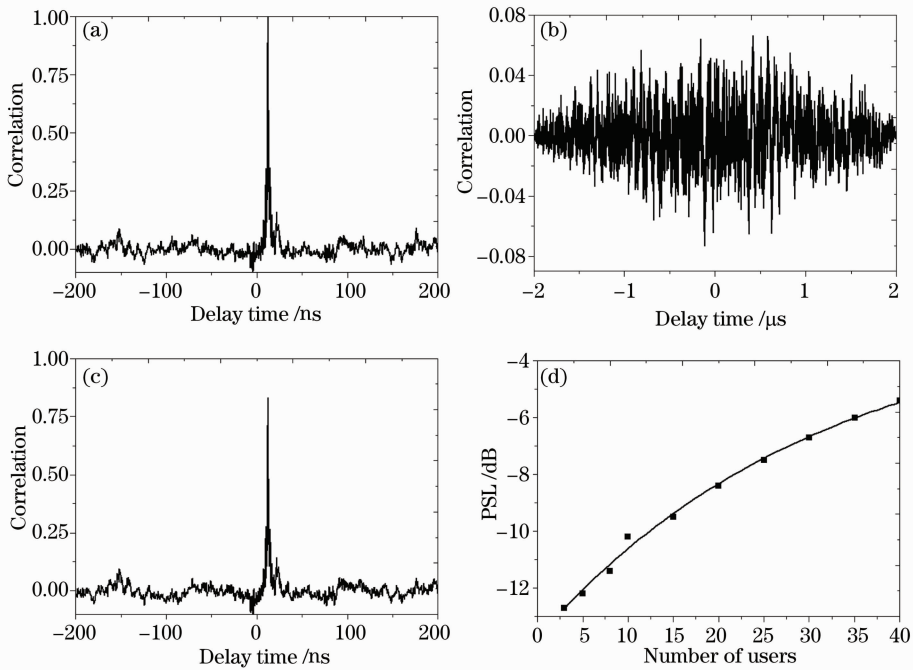


图 6 参考信号与回波信号(a),不同反馈强度下混沌信号

(b)和 6 用户同时工作时(c)的互相关曲线,以及互相关的旁瓣水平与干扰用户数的关系(d)

Fig. 6 Cross-correlation traces of reference signal and chaotic signal (a), chaotic signal at different feedback strength (b), and for six user working simultaneity (c), PSL of the cross correlation as a function of the number of users(d)

号,激光器在其他反馈强度下的混沌输出作为邻近车道的干扰信号,仿真分析系统的抗干扰能力。通常一个车辆用户在正常高速运行时,同时来自相邻车道上反向行驶的车辆交叉干扰不会超过 5 个。仿真分析时,假设 6 个车辆的车载雷达同时工作,目标障碍物位于己车前方 1.89 m 远处。图 6(a)显示了在没有外界干扰情况下,参考信号和具有时延的回波信号的相关图,其旁瓣水平比(PSL)为 -15 dB。图 6(b)为参考信号与其他反馈条件下得到的混沌信号的相关图。可见不同反馈条件下得到

的混沌信号之间没有相关性,其原因是因为混沌信号是一种具有随机性的类噪声信号,具有噪声的自相关特性,只和自身相似的信号相关能够得到  $\delta$  峰。图 6(c)显示了参考信号与回波信号的互相关曲线,其中回波信号包含有 5 个其他混沌激光雷达系统的探测信号。可见 6 个用户在同时工作时,相关曲线峰值的位置没有偏移,距离测量结果不受干扰信号的影响,相关峰值为 0.8,最高旁瓣为 0.07,相应的 PSL 为 -12 dB,与单一用户工作时的结果相比,PSL 仅增加 3 dB。图 6(d)是干扰用户数量对互相

关曲线 PSL 的影响,可见随着干扰用户的增加,旁瓣 PSL 呈现增加的趋势,当干扰用户数量达到 20 个时,虽然互相关曲线的 PSL 增加到  $-8$  dB,相关检测特性有所下降,但仍可正常工作。在实际应用中,不同的车载防撞雷达属于不同的系统,发射的混沌激光信号不具有相似性,经过相关运算不能得到  $\delta$  峰,不会产生虚假信息。所以混沌激光汽车防撞雷达具有抗干扰性,对其他车辆干扰信号具有很好的免疫能力。

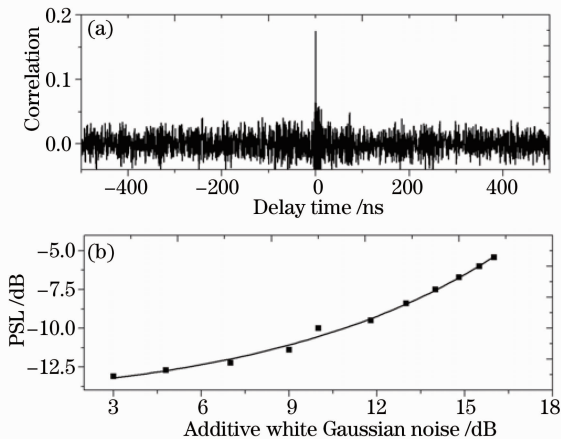


图 7 在高斯白噪声干扰下的自相关曲线(a)及高斯白噪声强度对相关曲线的旁瓣比的影响(b)

Fig. 7 Autocorrelation trace (a) and PSL (b) of the autocorrelation as a function of the AWGN level

图 7(a)是当外界高斯白噪声(AWGN)功率超过回波信号 16 dB 时参考信号与回波信号的相关曲线图,可见此时仍可很容易辨别出  $\delta$  相关峰。图 7(b)显示了 PSL 与 AWGN 强度的关系,可见随着噪声水平增大,探测光的信噪比降低。当外界噪声达 16 dB 时,PSL 增至  $-5$  dB,表明混沌激光汽车防撞雷达系统具有很高的抗噪声干扰能力。

## 5 结 论

提出了一种应用于汽车防撞系统的抗干扰的实时混沌激光雷达方案,实验验证了该技术的实时测距、测速能力,得到了亚秒级的测量周期以及距离分辨率 9 cm,结果表明混沌激光雷达具有良好的无模糊测距和测速能力。仿真结果表明,混沌激光汽车

防撞雷达具有高的抗干扰能力,能很好地解决多用户的相互干扰以及环境噪声干扰的问题,消除由于干扰导致的虚警问题。

本文旨在对混沌激光汽车防撞雷达距离速度测量的可行性进行实验验证,在实验中用平面反射镜替代汽车来进行原理性验证。对于实际漫反射目标,以及不同大气情况的实验还有待进一步验证。当采用大功率激光器、光放大器和望远镜发射,并改进接收系统时,本技术可进行长远距离的距离、速度测量。另外,作为实用的汽车防撞雷达系统,还应考虑防撞雷达的测角能力。目标的方位信息对于去除虚警是必不可少的,采用扫描天线进行目标方位信息的测量也是下一步研究的工作。

## 参 考 文 献

- 1 V. Fillimon, J. Buechler. A pre-crash radar sensor system based on pseudo-noise coding [C]. *Proc. of IEEE MIT*, 2000, 1415~1418
- 2 A. Widodo, T. Hasegawa. A vehicular driving assistant system using spread spectrum techniques [J]. *IEICE Trans. Fundamentals*, 1998, **E81-A**(11): 2334~2340
- 3 C. M. Gitins, E. T. Wetjen. Quantitative gas sensing by backscatter-absorption measurement of a pseudorandom code modulated  $\lambda=8 \mu\text{m}$  quantum cascade laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(16): 1162~1164
- 4 Shen Ying, Shang Weihua, Liu Guosui. Ambiguity function of chaotic phase modulated radar signals [C]. *Proc. of ICSP'98*, 1998, 1574~1577
- 5 M. Dawood, R. M. Narayanan. Generalised wideband ambiguity function of a coherent ultrawideband random noise radar [J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2003, **150**(5): 379~386
- 6 V. Venkatasubramanian, H. Leung. A robust chaos radar for collision detection and vehicular ranging in intelligent transportation systems [C]. *ITSC*, 2004, 548~552
- 7 Y Hara, T. Hara, T. Seo *et al.*. A chaotic signal radar system for vehicular collision-avoidance [C]. *Radar Conference, Proceedings of the IEEE*, 2002, 227~232
- 8 K. Myneni, T. A. Barr, B. R. Reed. High-precision ranging using a chaotic laser pulse train [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(11): 1496~1498
- 9 Lin Fanyi, Liu Jiaming. Chaotic lidar [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(5): 991~997
- 10 Wang Anbang, Wang Yuncai, He Hucheng. Enhancing the bandwidth of the optical chaotic signal generated by a semiconductor laser with optical feedback [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(19): 1633~1635
- 11 Bingjie Wang, Yuncai Wang, Lingqin Kong *et al.*. Multi-target real-time ranging with chaotic laser radar [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 868~870