

混沌激光雷达抗干扰性能分析

王冰洁^{1,2} 钱建军¹ 赵彤¹ 王云才^{1*} 王华奎²

(¹太原理工大学光电工程研究所, 山西 太原 030024)
(²太原理工大学信息工程学院, 山西 太原 030024)

摘要 实验和理论研究了混沌激光雷达的抗干扰性能。利用光反馈半导体激光器混沌激光雷达样机, 分别研究了其对混沌激光信号、连续波调制雷达信号和脉冲雷达信号的抗干扰能力。实验与数值模拟结果表明, 在不采取任何抗干扰措施的情况下, 混沌激光雷达对同种体制混沌信号干扰以及不同种体制的正弦调制激光信号和脉冲激光信号干扰都有较大容忍限度, 具有天然的抗干扰能力, 且其测距精度在混沌激光雷达样机量程范围内不受干扰信号影响。分析了利用简单平均算法进一步提高混沌激光雷达抗干扰性能的可行性。

关键词 激光技术; 混沌激光; 激光雷达; 激光测距; 抗干扰; 激光二极管

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0514002

Anti-jamming Performance of Chaotic Lidar

Wang Bingjie^{1,2} Qian Jianjun¹ Zhao Tong¹ Wang Yuncai¹ Wang Huakui²

(¹*Institute of Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China*)
(²*College of Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China*)

Abstract Anti-jamming performance of a chaotic lidar is investigated experimentally and numerically. Using our chaotic correlation range-finder prototype, the anti-jamming capabilities of the chaotic lidar to different undesired signals are studied. Experimental and numerical simulation results indicate that the chaotic lidar, which takes no anti-jamming measure, possesses natural anti-jamming ability and larger noise tolerance to the disturbance from the chaotic laser, continuous-wave modulation laser and pulse laser signals. The feasibility of improving the anti-jamming performance of the chaotic lidar by using an average algorithm is analyzed.

Key words laser technique; chaotic laser; lidar; laser range finding; anti-jamming; laser diode

OCIS codes 190.0190; 140.1540; 140.5960; 140.0140; 280.3640

1 引 言

目前, 激光雷达主要采用的原理是单脉冲飞行时间法或连续波信号调频技术。这两种技术共同的缺陷是相同系统之间存在着测量信号的相互干扰问题。利用脉冲编码技术对激光脉冲进行唯一性编码, 可从原理上消除互干扰问题, 但又带来脉冲编码雷达维护和调试困难。基于随机码发生器对连续激光进行调制的随机信号雷达^[1~3], 其模糊函数是理想的“图钉形”, 具有低截获概率和高抗干扰能力^[4]。但随机信号雷达需采用伪随机码调制技术, 受限于随机码的调制速率, 测量分辨率难于提高, 且伪随机

码总存在有限周期的限制, 当测量距离较长时, 不同周期内的随机码会形成虚警。

混沌信号具有宽带特性和类噪声的随机特性, 基于混沌信号的测距雷达测量精度高, 抗干扰能力强, 同时具有宽带雷达和随机信号雷达的特点和优势^[5]。依靠混沌电路产生的混沌电信号的带宽很难超过 1 GHz, 制约了测距精度的提高。

近 20 年来, 人们对半导体激光器的非线性动态特性研究表明, 通过光注入、光反馈或光电反馈等方式^[6~8], 半导体激光器可以产生大幅度的宽带混沌激光。自 2004 年 F. Y. Lin 等^[9,10] 提出基于激光

收稿日期: 2010-12-20; 收到修改稿日期: 2011-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(60777041, 60908014)、山西省科技攻关项目(20100321055-02)和山西省自然科学基金青年科技研究基金(2009021003)资助课题。

作者简介: 王冰洁(1978—), 女, 讲师, 主要从事激光雷达和激光测距等方面的研究。E-mail: wbj1131@163.com

* 通信联系人。E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

器的非线性特性实现混沌激光测距概念以来,研究者已先后实现了基于宽带混沌激光信号的汽车防撞雷达^[11]、电缆及光纤损毁点定位^[12,13]等不同应用对象的实验方案或样机。实验发现,通过光注入与光反馈的联合扰动,半导体激光器可以产生带宽大于16 GHz的混沌激光^[14],从而大大提高了混沌激光相关法测距的精度。

本文针对混沌激光雷达的抗干扰性能,利用基于光反馈半导体激光器的混沌激光测距雷达样机,研究了在不采取其他提高抗干扰能力措施的情况下,混沌激光雷达对来自同体制和不同体制激光雷达信号干扰的承受能力,并探讨了其抗干扰的原因和进一步提高抗干扰能力的措施。

2 实验装置与理论模型

混沌激光雷达的抗干扰性能分析实验装置示意图如图1所示,混沌激光雷达和干扰信号源同时发出测量信号和干扰信号,经目标反射后进入混沌激光雷达接收系统,并进行数据采集、处理和抗干扰能力分析。实验中所用的干扰信号分别选择了混沌激光信号、连续波调制激光和脉冲激光信号。所用的混沌激光测距雷达是自行研制的样机,其原理示意图如图1虚线框中所示,利用808 nm光反馈激光二极管(LD)产生混沌激光,经分束器分为参考光束和探测光束。参考光束经一定长度的光纤延迟线后由快速光电探测器(PD)转换为电信号;探测光束经由发射机入射到待测目标,被目标反射后进入接收系统,由快速光电探测器转换成电信号;利用500 MHz实时示波器作为数据采集系统对参考信号和探测信号进行采集,并输入计算机进行互相关运算,根据参考光时间序列与回波信号时间序列互相关曲线的峰值位置,可以得到被测目标的距离。该样机最大测

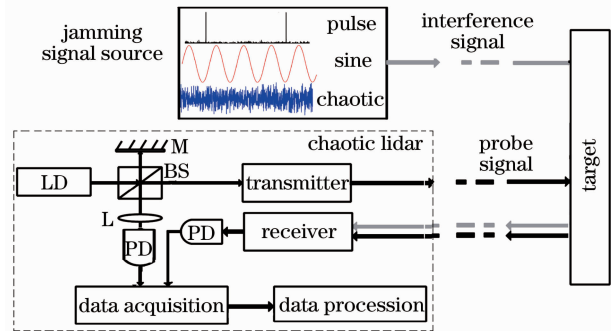


图1 混沌激光雷达抗干扰实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of anti-jamming experiment of chaotic lidar

量范围为150 m,测量精度为9 cm。

混沌激光雷达的测量精度取决于互相关曲线的半峰全宽(FWHM),而FWHM由混沌激光信号的带宽决定。混沌激光雷达的信噪比 R_{SN} 定义为互相关曲线的峰值与噪声基底的3倍标准差(包括了99.7%的信号)之比,即

$$R_{SN} = \frac{\max[\text{corr}(m)]}{3\sigma}, \quad (1)$$

式中 σ 为噪声基底的标准差, $\text{corr}(m)$ 为数据采集系统采样后的离散混沌信号序列 $x(n)$ 与其延迟 n_{lag} 的序列 $x(n-n_{lag})$ 的互相关函数,可表示为

$$\text{corr}(m) = E[x(n)x(n-n_{lag}+m)] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-|m|} x(n)x(n-n_{lag}+m), \quad (2)$$

其最大值出现在两序列的相对延迟 n_{lag} 处,即 $\text{corr}(n_{lag})$ 最大,呈 δ 函数的线型。

光反馈半导体激光器在外光反馈作用下,可以产生强度随机起伏的混沌激光。其输出特性可由光反馈下半导体激光器的速率方程来描述

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1+i\alpha}{2} \left[\frac{g(N-N_0)}{1+\epsilon|E|^2} - \tau_p^{-1} \right] E + \frac{\kappa_f}{\tau_{in}} E(t-\tau) \exp(-i2\pi\nu\tau), \quad (3)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_N} - \frac{g(N-N_0)}{1+\epsilon|E|^2} |E|^2, \quad (4)$$

式中 E 和 N 分别表示电场的复振幅和激光腔内的载流子密度, κ_f 为振幅反馈系数,则相应的强度反馈为 $10\lg \kappa_f^2$ dB, τ 为反馈时延, q 为电子电量, I 为偏置电流。模拟中,激光器的内部参数为:透明载流子密度 $N_0 = 4 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$,阈值电流 $I_{th} = 12 \text{ mA}$,微分增益 $g = 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3/\text{ns}$,载流子寿命 $\tau_N = 2 \text{ ns}$,光子寿命 $\tau_p = 2 \text{ ps}$,激光在内腔的往返时间 $\tau_{in} = 9 \text{ ps}$,线宽增强因子 $\alpha = 5.5$,增益饱和系数 $\epsilon = 3 \times 10^{-5} \mu\text{m}^3$,有源层体积 $V = 150 \mu\text{m}^3$,与实验条件相同,激光器偏置电流设置为 $1.5I_{th}$ 。

3 相同体制雷达干扰实验

实验中采用相同波长和结构的另一个光反馈半导体激光器所产生的混沌激光作为干扰信号,经目标反射后耦合进混沌激光雷达的接收系统。通过分析混沌激光雷达的信噪比和互相关曲线的FWHM随信干比 R_{SI} (即雷达测量信号与干扰信号强度的有效值之比)的变化,研究了同体制混沌信号对混沌激光雷达的干扰情况。

图 2(a)是无混沌信号干扰时混沌激光雷达对距离为 1.95 m 的目标的实验测量结果,图 2(b)是 30 路混沌激光干扰信号同时进入混沌激光雷达接收系统进行干扰时的测量结果,此时信干比为 -26.7 dB。与图 2(a)相比,可以看出混沌干扰信号影响了测量结果的信噪比,噪声基底增大,信噪比降低。但是干扰后互相关曲线主峰仍然清晰,测距结果正确。而互相关曲线的 FWHM 不变,说明测距精度不受干扰影响。

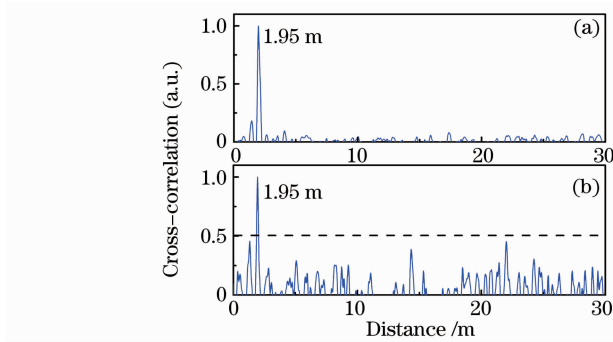


图 2(c)实验分析了单路混沌信号干扰时, R_{SN} 对 R_{SN} 和 FWHM 的影响。可以看出 R_{SN} 与 R_{SI} 满足线性关系。当 R_{SI} 小于 -26.7 dB, 即混沌干扰信号的强度高于混沌测量信号强度的 26.7 dB(467 倍)时, 依然可实现高于 3 dB 的信噪比。互相关曲线的 FWHM 基本上不随 R_{SI} 发生变化, 即测距精度不受干扰影响。这是因为互相关曲线的 FWHM 主要取决于信号的带宽, 而干扰信号对混沌测量信号的带宽没有影响。

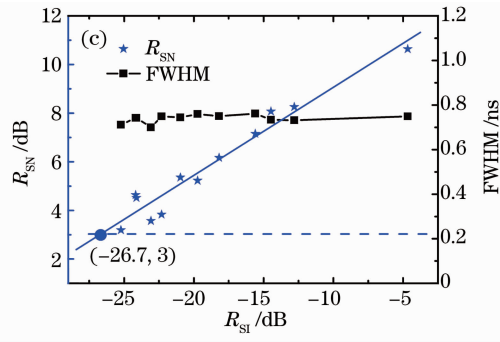


图 2 (a) 无混沌干扰信号时的测距结果, (b) 30 路混沌信号 ($R_{SI} = -26.7$ dB) 同时干扰时的测距结果, (c) 混沌信号干扰时, R_{SN} 和 FWHM 随 R_{SI} 的变化

Fig. 2 (a) Ranging result without the chaotic jamming signal, (b) ranging result with 30 chaotic jamming signals ($R_{SI} = -26.7$ dB), (c) R_{SN} and FWHM versus R_{SI}

4 不同体制雷达干扰实验

现有激光测距技术主要采用连续波调制激光信号和脉冲激光信号实现目标探测, 与混沌激光雷达体制完全不同。

4.1 连续波调制信号干扰

实验中利用信号源(Agilent E8257D)产生的正弦电信号调制半导体激光器驱动电流, 获得正弦调制激光信号作为干扰信号, 经目标反射后耦合进混

沌激光雷达的接收系统。

图 3(a)为混沌激光雷达无有源干扰时实验采集的混沌信号, 利用其作为探测信号的结果如图 3(c)所示。图 3(b)为受到正弦调制激光信号干扰后实验采集的混沌激光状态, 利用其作为探测信号的结果如图 3(d)所示。可见, 混沌激光雷达受正弦调制信号干扰后, 显然干扰信号影响了测量结果的信噪比, 噪声基底增大。但是互相关曲

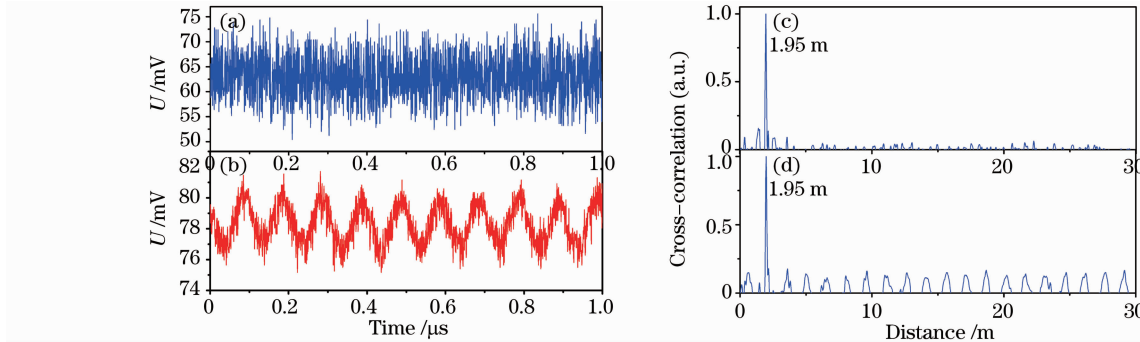


图 3 (a) 无正弦调制信号干扰的混沌测量信号, (b) 受到正弦调制信号干扰的混沌测量信号, (c) 无正弦调制信号干扰时的测距结果, (d) 受到 (b) 中正弦调制信号干扰时的测距结果

Fig. 3 (a) Chaotic signal without sine wave modulation signal jamming, (b) chaotic signal with sine wave modulation signal jamming, (c) ranging result without sinusoidal modulation jamming signal, (d) ranging result with sinusoidal modulation jamming signal shown in (b)

线主峰清晰,互相关曲线的 FWHM 不变,即测距精度不受影响。

鉴于常用连续波调制激光测距仪发射频率十几到几十兆赫兹的正弦信号,实验中首先采用频率为 10 MHz,强度不同的正弦调制激光信号作为干扰信号,分析不同 R_{SI} 对混沌激光测距雷达 R_{SN} 的影响,结果如图 4(a) (实点实线) 所示。从图中可以看出随着 R_{SI} 的增大, R_{SN} 线性增加。当正弦干扰信号强

度高于混沌测量信号 21.5 dB ($R_{SI} = -21.5$ dB) 时, 仍然可实现 3 dB 的信噪比。为了证明上述实验结果的可靠性,同时进行了数值分析,将理论结果(虚点虚线)与实验结果(实点实线)进行了比较。从图 4(a) 中的比较可知,理论分析结果与实验结果变化趋势吻合,只是由于混沌信号状态、采样率等不同导致数据点大小不同。实现 3 dB 的信噪比时,正弦干扰信号强度高于混沌测量信号 22.2 dB。

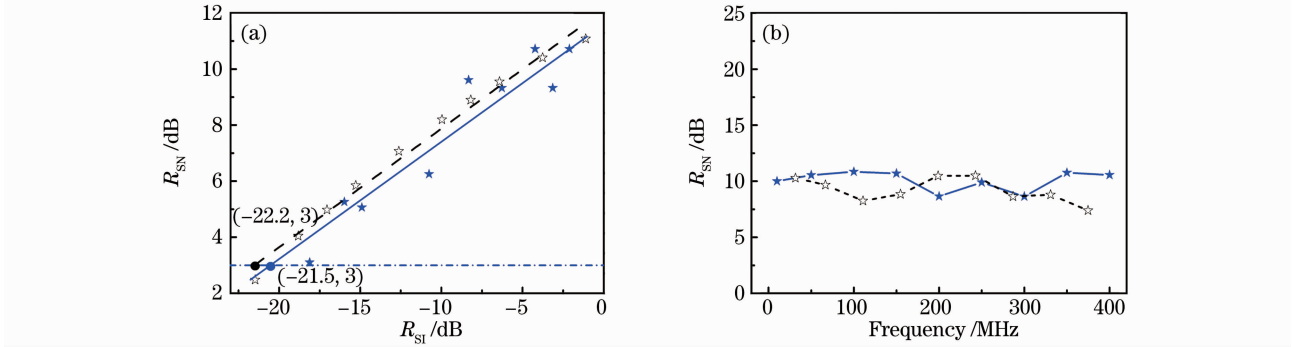


图 4 (a) 正弦调制信号干扰时 R_{SN} 随 R_{SI} 的变化(直线为拟合线), (b) 正弦调制信号干扰时, R_{SN} 随正弦调制信号频率的变化(实点实线表示实验结果, 虚点虚线表示数值分析结果)

Fig. 4 (a) R_{SN} versus R_{SI} (straight lines are regression fitting), (b) R_{SN} versus frequency (solid dots and lines are experimental results, hollow dots and lines are numerical results)

实验中还选取了强度相同, 频率不同的正弦调制激光作为干扰信号, 分析了调制频率对混沌激光雷达 R_{SN} 的影响, 实验结果如图 4(b) (图中实点实线) 所示。可见在混沌激光信号带宽 (500 MHz) 范围内, 正弦信号的频率变化对测距互相关函数的 R_{SN} 几乎无影响。数值分析的结果 (图中虚点虚线) 也证实了这一点。

4.2 脉冲激光信号干扰

由于受到实验条件的限制, 关于脉冲激光信号作为干扰信号对混沌激光雷达系统的影响, 只做了

数值模拟分析。鉴于常用激光测距仪发射重复频率 10~100 kHz、脉宽 5~30 ns 的脉冲, 模拟中采用了与混沌激光雷达发射信号波长相同, 重复频率 10 kHz、脉宽 6.3 ns 的脉冲激光信号作为干扰信号, 研究了脉冲激光干扰信号对混沌激光雷达测距精度和信噪比的影响。从图 5(b) 可以看出, 和无干扰时混沌激光雷达测距结果图 5(a) 相比, 混沌激光雷达受到脉冲激光信号严重干扰 ($R_{SI} = -28.3$ dB) 时, 噪声增大, 信噪比降低。图 5(c) 定量分析了脉冲激光干扰信号对混沌激光雷达系统信噪比的影响

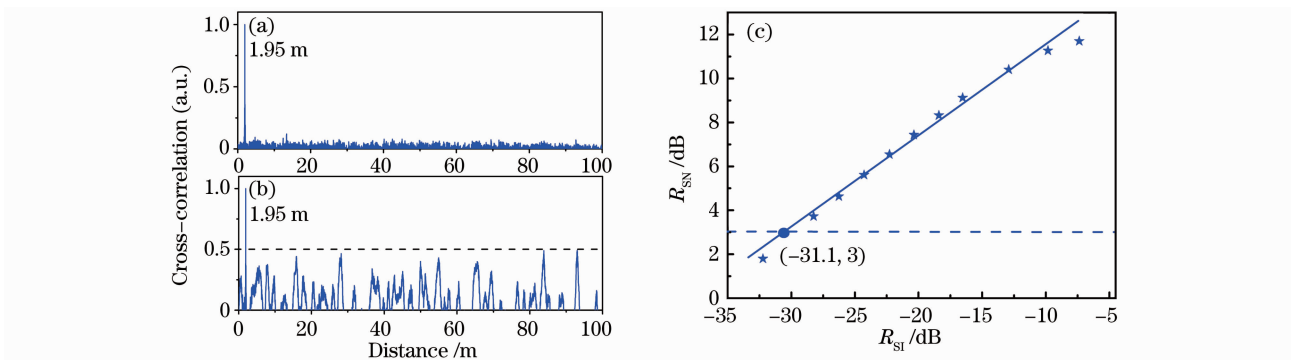


图 5 (a) 无脉冲信号干扰时的测距结果, (b) 受到脉冲信号 ($R_{SI} = -31.1$ dB) 干扰时的测距结果, (c) R_{SN} 随 R_{SI} 的变化关系(实线为拟合曲线)

Fig. 5 (a) Ranging result without pulse jamming signal, (b) ranging result with pulse jamming signal ($R_{SI} = -31.1$ dB), (c) R_{SN} versus R_{SI} (solid line is the regression fitting)

程度,可见在不采用任何提高信噪比的措施下,当脉冲干扰信号强度高于混沌测量信号 31.1 dB 时,依然可实现 3 dB 的信噪比。

同样,正弦连续波调制和脉冲干扰信号对混沌信号的带宽没有影响,所以对混沌激光雷达的 FWHM 不变,即测距精度不受干扰,这一点和同体制干扰时是相同的。

5 分析与讨论

总结上述实验和模拟结果可知,当所选用的混沌激光信号、连续波调制激光信号和脉冲激光信号分别作为有源干扰信号,其干扰强度分别达到 26.7,

21.5,31.1 dB 时,混沌激光雷达系统的测量结果仍然可达到 3 dB 的信噪比,表明混沌激光雷达具有很强的抗干扰能力,这主要得益于混沌激光信号的自相关特性。图 6 为混沌测量信号自相关曲线以及 3 种不同干扰信号和混沌测量信号的互相关曲线,其相关系数分别为 1.00,0.05,0.08,0.04,其中各干扰信号强度均高于混沌激光测量信号 10 dB,即 $R_{SI} = -10$ dB。可见混沌信号只有和自身信号相似的信号相关时才能得到类似 δ 函数的相关曲线,而与其他干扰信号(或噪声)几乎无相关性,混沌信号的这种相关特性决定了混沌激光雷达具有天然的抗干扰能力。

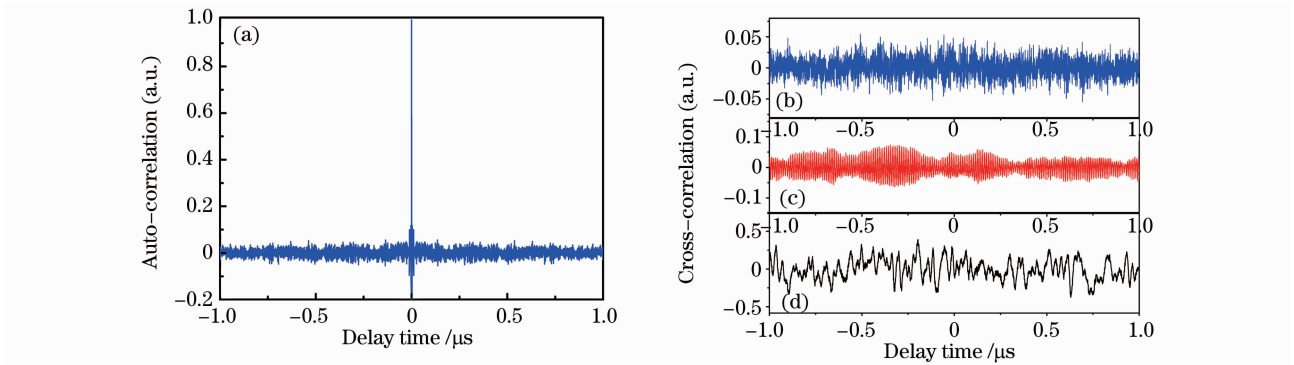


图 6 (a)混沌信号自相关曲线,(b)不同混沌信号互相关曲线,(c)混沌信号与正弦调制信号互相关曲线,(d)混沌信号与脉冲信号互相关曲线

Fig. 6 (a) Auto-correlation trace of chaotic signal, (b) cross-correlation trace of different chaotic signals, (c) cross-correlation trace of sinusoidal signal and chaotic signal, (d) cross-correlation trace of pulse signal and chaotic signal

若要进一步增强混沌激光雷达的抗干扰性能,可以从多方面考虑,如增加混沌测量信号本身的复杂度或维度,切换发射混沌激光信号的波长,对不同波长的光进行滤波以及利用数据处理算法(平均、小波变换等)改善信噪比等。其中采用平均算法改善信噪比的方法较为简单实用。采用平均算法抑制相关曲线旁瓣,改善信噪比,增加干扰信号容忍限度的结果如图 7 所示。从图中可以看出,若要保证混沌激光雷达系统测量结果的信噪比为 3 dB,仅对测量结果进行 30 次平均,对于干扰信号的容忍限度就可以增加约 23 dB。显然平均次数越多, R_{SI} 值越低,混沌激光雷达系统抗干扰能力越强。

6 结论

基于混沌激光雷达样机,实验和理论研究了该样机的抗干扰性能。结果表明,混沌激光雷达对同体制混沌信号干扰以及不同体制的正弦调制激光信号和脉冲激光信号干扰都有较大容忍限度,且其测距精度不受干扰信号影响。并且采用简单的平

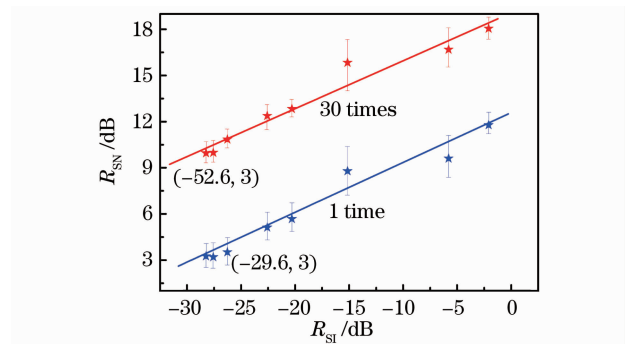


图 7 不同平均次数下 R_{SN} 随 R_{SI} 的变化关系 (实线为拟合线)

Fig. 7 R_{SN} versus R_{SI} under different averaged times (solid line is the regression fitting)

均算法即可大幅提升其抗干扰性能。

参 考 文 献

- 1 N. Takeuchi, H. Baba, K. Sakurai *et al.*. Diode-laser random-modulation cw lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1): 63~87
- 2 C. Nagasawa, M. Abo, H. Yamamoto *et al.*. Random modulation cw lidar using new random sequence[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(10): 1466~1470

- 3 Yang Fu, He Yan, Zhou Tianhua *et al.*. Simulation of space borne altimeter based on pseudorandom modulation and single-photon counting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 21~26
杨 馥, 贺 岩, 周田华等. 基于伪随机码调制和单光子计数的星载测高计仿真[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 21~26
- 4 G. S. Liu, H. Gu, W. M. Su. The development of random signal radars[C]. *IEEE Tran. Aeros. Electron. Sys.*, 1999, **35**(3): 770~777
- 5 Y. Hara, T. Hara, T. Seo *et al.*. Development of a chaotic signal radar system for vehicular collision-avoidance[C]. Radar Conference, Proceedings of the IEEE, 2002. 227~232
- 6 T. B. Simpson, J. M. Liu, A. Gavrielides *et al.*. Period-doubling route to chaos in a semiconductor laser subject to optical injection[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(26): 3539~3541
- 7 J. Mork, B. Tromborg, J. Mark. Chaos in semiconductor lasers with optical feedback: theory and experiment [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(1): 93~108
- 8 T. Tang, J. M. Liu. Chaotic pulsing and quasi-periodic route to chaos in a semiconductor laser with delayed optic-electronic feedback[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2001, **37**(3): 329~336
- 9 F. Y. Lin, J. M. Liu. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2004, **40**(6): 815~820
- 10 F. Y. Lin, J. M. Liu. Chaotic lidar[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2004, **10**(5): 991~997
- 11 Gong Tian'an, Wang Yuncai, Kong Lingqin *et al.*. Chaotic lidar for automotive collision warning system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2426~2430
龚天安, 王云才, 孔令琴等. 面向汽车防撞的混沌激光雷达[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2426~2430
- 12 Han Guohua, Wang Yuncai. Faults location for transmission lines by using chaotic laser signal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2020~2024
韩国华, 王云才. 基于混沌激光的传输线断点测量[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2020~2024
- 13 Wang Anbang, Wang Yuncai. Chaos correlation optical time domain reflectometry[J]. *Science China: Information Sciences*, 2010, **53**(2): 398~404
王安帮, 王云才. 混沌相关光时域反射仪[J]. *中国科学: 信息科学*, 2010, **53**(2): 398~404
- 14 A. B. Wang, Y. C. Wang, H. C. He. 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