

伪随机序列调制的激光外差探测

刘立生^{1,2,3} 赵 帅^{1,2,3} 郭 劲^{1,2}

- (1. 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033 ;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033 ;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 在激光外差探测中,为了增强在频谱密度上对多普勒频移峰值的识别能力,提升对目标的探测概率,提出一种采用伪随机序列对连续激光进行调制的外差探测方法。应用伪随机序列的 M 序列码对发射激光和本振光同时进行频率调制,接收信号光和经时间延迟后的本振光相干叠加形成拍频信号。其特点是二进制码调制同时作用于发射信号光和本振光,使外差信号频谱上同时出现 3 个峰值,减小了外差探测时的虚警率,提高了探测的信噪比。通过模拟仿真计算,证明了此探测模型有着良好的抗干扰能力和较好的噪声滤除能力。

关键词: 激光雷达; 外差探测; 伪随机序列; 快速傅里叶变换

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)10-1890-06

Pseudo-random frequency modulated laser heterodyne detection

Liu Lisheng^{1,2,3}, Zhao Shuai^{1,2,3}, Guo Jin^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun 130033, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to enhance the capability to identify the peak value in the power spectrum density (PSD) of the laser heterodyne signal, and improve the detection probability, a new laser heterodyne detection method, in which pseudo-random frequency modulation was conducted on the continuous wave laser, was proposed. Pseudo-random M sequence frequency modulation was carried out to modulate both the transmitted beam and the local beam. The mixing of the received signal beam and the time-delayed local beam formed the beat signal. The feature of this method was modulation of the transmitted beam and the local beam simultaneously with pseudo-random sequence, resulting 3 peak values in the PSD of the heterodyne signal, which reduced false alarm and raised signal-to-noise ratio obviously. A good performance of anti-jamming capability and noise-filtering capability was proved through simulation of this detection model.

Key words: laser radar; heterodyne detection; pseudo-random sequence; fast Fourier transform

收稿日期:2011-02-13; 修订日期:2011-03-21

基金项目:中国科学院三期创新项目(O98Y32C100)

作者简介:刘立生(1987-),男,博士,主要从事激光相干探测方面的研究工作。Email:llisheg_2005@163.com

导师简介:郭劲(1964-),男,研究员,博士生导师,主要从事光电对抗方面的研究工作。Email:guojin_1964@126.com

0 引言

激光雷达诞生于 20 世纪 60 年代,与传统微波雷达相比,具有更高的分辨率和精确度^[1],已经广泛应用于遥感、测绘、大气探测、紧急避险等诸多领域^[2]。按照探测方式将其分为直接探测激光雷达和相干探测激光雷达^[3],相干探测是利用散射的多普勒频移信号与激光本振光在探测器上进行差拍的原理,对产生的差频信号进行处理分析,得到多普勒频率^[4-5]。

光相干探测又可分为外差探测和零差探测,其中外差探测技术具有实时性、高分辨率和可溯源性等优点,被应用于纳米分辨率和大动态测量范围的精密定位和位移监测^[6-7]。由于激光外差技术在信号处理时采用的快速傅里叶变化对激光相位要求不严格,使得该技术具有高信噪比和强抗干扰能力的特点^[8-9]。

为了实现远场探测,脉冲激光要求高的峰值功率,好的频率稳定性和高的光束质量。而在人眼安全的范围内,要想获得稳定的脉冲激光是非常困难的。为此,采用连续激光,可使峰值功率降低,并增加了两束光相互作用的时间。利用伪随机 M 序列较强的自相关特性,对发射激光和本振光进行频率调制,可

以较好地滤除噪声,提高信噪比^[10]。

文中利用数值分析的方法,对伪随机 M 序列码调制的激光外差探测进行数值模拟,讨论了本振光延迟不同时间、信号光有无噪声时频谱图差别。

1 探测原理

为了实现对目标距离和速度的测量,采用伪随机序列对光波进行频率调制。振幅调制占空比为 50%,其信噪比只有其他类型的一半。由于激光器的不稳定性和大气扰动所产生的影响,使相位调制在外差探测系统中很难实现。为此,频率调制是一种既能保证信噪比,又相对容易实现的一种调制方式。

这种探测方法原理如图 1 所示,发射激光由伪随机序列调制, M 码 1 和 0 在频域上分别对应为 f_1 和 f_0 ;本振光由相同的 M 码调制,频率分别对应为 f_1' 和 f_0' ,通过时间延迟控制电路,产生 t_D 时间延迟;发射激光器和本振激光器通过频率锁定技术,保持频率差为 f_F ($f_1 - f_1' = f_F, f_0 - f_0' = f_F$);信号光和本振光在光电探测器处相干叠加,探测器将高频成分作直流信号处理,光电流随差频信号变化,进入后续信号处理电路。

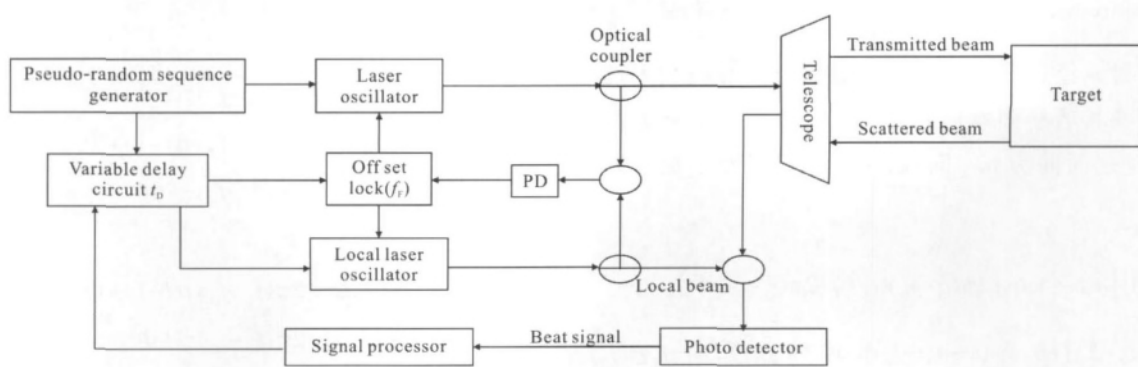


图 1 应用相关运算的伪随机序列调频外差探测方法框图

Fig.1 Block diagram of a pseudo-random heterodyne laser radar using an optical field correlation detection method

当 $t_r = t_D$ 时,外差信号只有一个频率 $f_D - f_F$;当 $t_r \neq t_D$ 时,外差信号中将会出现 3 个频率 $f_D - f_F \pm f'$,其中 $f' = f_1 - f_0$ 。其原理如图 2 所示。

应用 M 码对发射激光场进行频率调制,并保证调制过程中无频率跳变。假设激光相位是稳定的,在不考虑大气扰动的理想情况下,发射光光场方程

$E_t(t)$ 可写为:

$$E_t(t) = A_t \{ a(t) \cos \{ 2\pi f_1 + 2\pi (f_1 - f_0) \times \tau [\sum_{k=1}^{i-1} a_k - (i-1)] + \theta_0 \} + [1 - a(t)] \times \cos [2\pi f_0 + 2\pi (f_1 - f_0) \tau \sum_{k=1}^{i-1} a_k + \theta_0] \} \quad (1)$$

式中： A_t 是传输光波的振幅； τ 是比特宽度； a_i 代表伪随机序列，取值 $(0, 1)$ ； $a(t)$ 是比特宽度为 τ 的伪随机序列的时间函数； θ_0 为初始相位。 $i = \text{Int}(t/\tau) + 1$ ，其中符号 $\text{Int}(m)$ 代表小于 m 的最大整数。

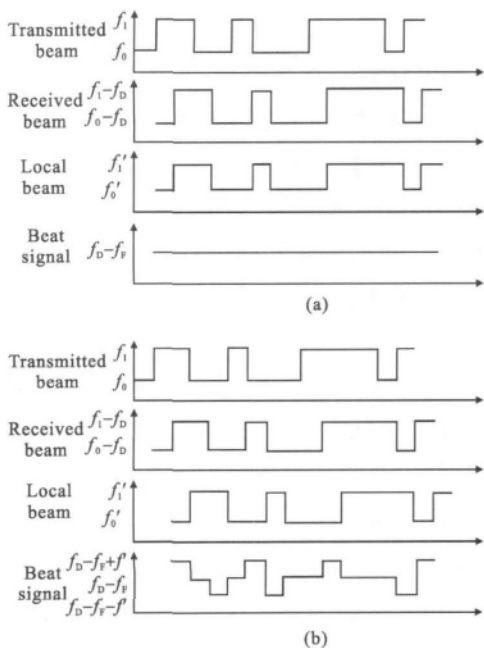


图 2 发射光、接收光、本振光和拍频信号频率-时间图

Fig.2 Time variations with the frequency of the transmitted beam, the received beam, the local beam and the beat signal

发射光经过传输，照射目标后反射，经时间 t_r 被接收镜头接收；而本振光经过了时间延迟电路的调制，其延迟时间为 t_D 。同理，接收信号光和本振光方程为：

$$E_r(t) = A_r \{ a(t-t_r) \cos\{2\pi(f_1-f_0)(t-t_r) + 2\pi(f_1-f_0)\tau \sum_{k=1}^{i_r-1} a_k - (i_r-1)\} + \theta_0 \} + [1-a(t-t_r)] \cos[2\pi(f_0-f_0)(t-t_r) + 2\pi(f_1-f_0)\tau \sum_{k=1}^{i_r-1} a_k + \theta_0] \} \quad (2)$$

$$E_L(t) = A_L \{ a(t-t_D) \cos\{2\pi(f_1-f_0)(t-t_D) + 2\pi(f_1-f_0)\tau \sum_{k=1}^{i_L-1} a_k - (i_L-1)\} + \theta_L \} + [1-a(t-t_D)] \cos[2\pi(f_0-f_0)(t-t_D) + 2\pi(f_1-f_0)\tau \sum_{k=1}^{i_L-1} a_k + \theta_L] \} \quad (3)$$

式中： A_r 和 A_L 分别为接收光和本振光的振幅。 $i_r =$

$\text{Int}(t-t_D) + 1$ ； $i_L = \text{Int}(t-t_D) + 1$ ； θ_L 为本振光的初相位。

为了便于表示接收信号光和本振光形成的拍频信号，定义如下变量：

$$s = t_r - t_D = \Delta i + \Delta \tau$$

$$\Delta i = \text{Int}(\Delta s / \tau)$$

$$\Delta \tau = \Delta s - \Delta i \tau$$

$$s = t - t_r$$

由方程(1)~(3)，可得拍频信号光 $E_{\text{sig}}(t)$ 为：

$$E_{\text{sig}}(t) = \begin{cases} A_r A_L [a_i a_{i+\Delta i} \cos\{2\pi(f_F-f_D)s + \theta_1\} + (1-a_i) \cdot (1-a_{i+\Delta i}) \cos\{2\pi(f_F-f_D)s + \theta_1\} + a_i(1-a_{i+\Delta i}) \cdot \cos\{2\pi(f_F-f_D)-(f_1-f_0)\}s + \theta_3 \} + (1-a_i)a_{i+\Delta i} \cdot \cos\{2\pi(f_F-f_D)-(f_1-f_0)\}s + \theta_4, \\ \text{Mod}(s/\tau) < \tau - \Delta \tau \\ A_r A_L [a_i a_{i+\Delta i+1} \cos\{2\pi(f_F-f_D)s + \theta_5\} + (1-a_i) \cdot (1-a_{i+\Delta i+1}) \cos\{2\pi(f_F-f_D)s + \theta_5\} + a_i(1-a_{i+\Delta i+1}) \cdot \cos\{2\pi(f_F-f_D)-(f_1-f_0)\}s + \theta_7 \} + (1-a_i)a_{i+\Delta i+1} \cdot \cos\{2\pi(f_F-f_D)-(f_1-f_0)\}s + \theta_8, \\ \text{Mod}(s/\tau) \geq \tau - \Delta \tau \end{cases} \quad (4)$$

其中，相位常量 $\theta_1 \sim \theta_8$ 具体如下：

$$\theta_1 = 2\pi f_1 \Delta \tau + \Phi$$

$$\theta_2 = 2\pi f_0 \Delta \tau + \Phi$$

$$\theta_3 = 2\pi f_0 \Delta \tau + 2\pi(f_1-f_0)\tau(i-1) + \Phi$$

$$\theta_4 = 2\pi f_1 \Delta \tau - 2\pi(f_1-f_0)\tau(i-1) + \Phi$$

$$\theta_5 = 2\pi f_1 \Delta \tau - 2\pi(f_1-f_0)\tau + \Phi'$$

$$\theta_6 = 2\pi f_0 \Delta \tau + \Phi'$$

$$\theta_7 = 2\pi f_0 \Delta \tau + 2\pi(f_1-f_0)\tau(i-1) + \Phi'$$

$$\theta_8 = 2\pi f_1 \Delta \tau - 2\pi(f_1-f_0)\tau i + \Phi'$$

相位因子 Φ 和 Φ' 为：

$$\Phi = 2\pi(f_F+f_0)\Delta i \tau + 2\pi(f_1-f_0)\tau \sum_{k=i}^{i+\Delta i-1} a_k + \theta_L - \theta_0$$

$$\Phi' = 2\pi(f_F+f_0)\Delta i \tau + 2\pi(f_1-f_0)\tau \sum_{k=i}^{i+\Delta i} a_k + \theta_L - \theta_0$$

方程(4)中， a_n 为伪随机序列取值，其值只能为 1 和 0，因此，方程(4)只有一项存在。

为了获得目标运动对激光产生的多普勒调制信息，将采用对公式(4)进行傅里叶变换的方法。外差

信号中,由于伪随机序列的调制,只能取一项,可将其看作余弦信号和矩形函数的乘积的形式。由此, $E_{sig}(t)$ 的傅里叶变换为:

$$F(f) = \frac{A_i A_L}{2} \{ a_i a_{i+\Delta i} S[(\tau-\Delta\tau), (f_F-f_D), i] \exp(j\theta_1) + (1-a_i)(1-a_{i+\Delta i}) S[(\tau-\Delta\tau), (f_F-f_D), i] \exp(j\theta_2) + a_i(1-a_{i+\Delta i}) S[(\tau-\Delta\tau), (f_F-f_D)-(f_1-f_0), i] \exp(j\theta_3) + (1-a_i) a_{i+\Delta i} S[(\tau-\Delta\tau), (f_F-f_D)-(f_1-f_0), i] \exp(j\theta_4) + a_i a_{i+\Delta i+1} S[\Delta\tau, (f_F-f_D), i] \exp(j\theta_5) + (1-a_i)(1-a_{i+\Delta i+1}) S[\Delta\tau, (f_F-f_D), i] \exp(j\theta_6) + a_i(1-a_{i+\Delta i+1}) S[\Delta\tau, (f_F-f_D)-(f_1-f_0), i] \exp(j\theta_7) + (1-a_i) a_{i+\Delta i+1} S[\Delta\tau, (f_F-f_D)-(f_1-f_0), i] \exp(j\theta_8) \} \quad (5)$$

式中: $S[\Delta t_p, f_p, i]$ 是矩形函数的傅里叶变换, 矩形函数宽度为 Δt_p , 频率为 f_p , 矩形函数的中心时间为 $i\tau - \Delta t_p/2$, 其具体形式为:

$$S[\Delta t_p, f_p, i] = \Delta t_p \text{sinc} \{ [(f-f_p)\Delta t_p] \times \exp \left[2\pi j f_p \left(i\tau - \frac{\Delta t_p}{2} \right) \right] \} \quad (6)$$

通过公式(5)可得到目标运动对激光造成的多普勒频移, 由频移便可计算得出目标的运动速度。而目标的距离信息可以通过往返时间 t_r 计算得出。

3 算法仿真

对于上述的探测方法, 通过 Matlab 数学计算软件进行了数值计算模拟。模拟条件如下: 采用 $n=9$ 的伪随机 M 序列, 共有 $N=2^n-1=511$ 个比特, 单位时间 $\tau=1 \mu\text{s}$, 对应 1 和 0 时激光的频差为 $f'=1 \text{ MHz}$, 模拟多普勒频移为 8.5 MHz , 本振光与发射激光频率差 $f_F=1.5 \text{ MHz}$ 。接收光强度为本振光强的 $1/10$ 。

并对比接收信号中有噪声和无噪声时的频谱差别, 以及 Δs 取不同值时的频谱差异。

外差探测为弱信号探测, 噪声来源主要为高斯分布的热噪声。高斯分布噪声如图 3(a)所示, 对其做快速傅里叶变换的频谱密度, 如图 3(b)所示。

由其频谱密度图可见高斯噪声在时间上是随机的、不规律的, 找不到其周期特性。

下面分析外差信号的频谱特性, 分 $\Delta s=0, 0.5\tau, \tau, 1.5\tau$ 进行讨论, 并对比了有无噪声时的差异。

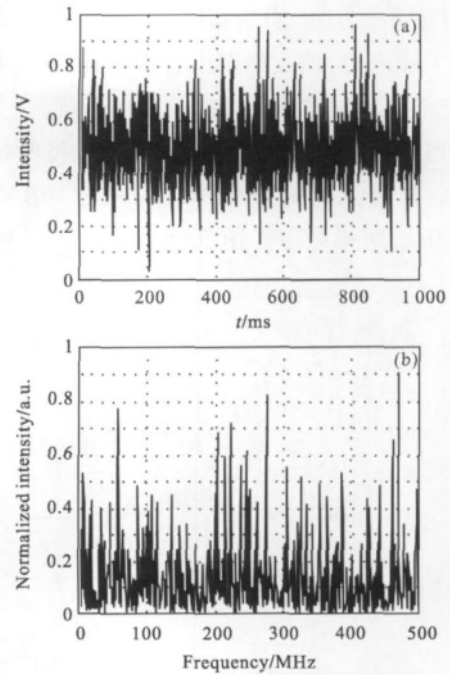


图 3 噪声信号及其频谱密度

Fig.3 Noise and its frequency spectrum

(1) 当 $\Delta s=0$ 时, 对探测信号取样, 快速傅里叶分析得其频率信息, 频谱如图 4 所示。

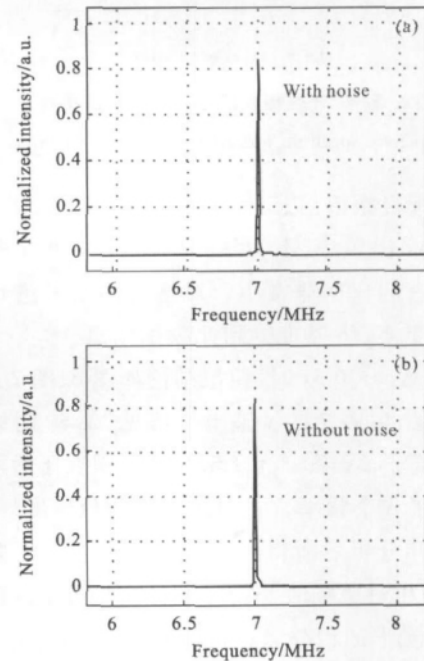


图 4 $\Delta s=0$ 时接收信号归一化频谱密度

Fig.4 Frequency spectrum normalized intensity when $\Delta s=0$

分析图 2 已经得出, 当 $\Delta s=0$ 时, 接收信号中只用一个频率 $f_D-f_F=7 \text{ MHz}$ 。

所得频谱图与理论分析相符。对比图 4(a)和图 4(b)可知,有无噪声时,两频谱图没有差别,由此可知此探测方法能够很好地滤除噪声对信号的影响。

(2) 当 $\Delta s=0.5\tau$ 时,如图 2(b)所示,接收信号中将有 3 个频谱 $f_D-f_F+f'=6\text{ MHz}$, $f_D-f_F+f'=8\text{ MHz}$ 和 $f_D-f_F=7\text{ MHz}$,所得频谱如图 5 所示。

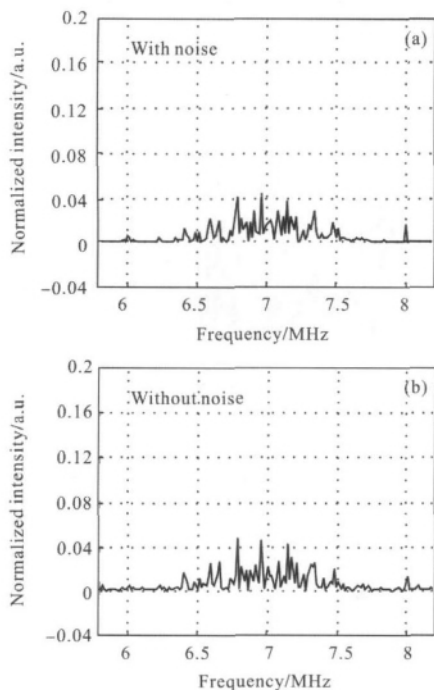


图 5 $\Delta s=0.5\tau$ 时接收信号归一化频谱密度

Fig.5 Frequency spectrum normalized intensity when $\Delta s=0.5\tau$

此时所得频谱信息并不理想,有频率丢失。其原因是:当 Δs 比较小(不为零)时,造成某个频率信息在时域所占的比例非常小,对这时的信号进行抽样和傅里叶变换,将很难得到此频率信息。

(3) 当 $\Delta s=\tau, 0.5\tau$ 时,模拟结论如图 6、图 7 所示。

对比图 4~图 7 的 y 轴坐标可见, $\Delta s=0$ 时频谱强度要明显高于 $\Delta s=0.5\tau, \tau, 1.5\tau$ 。其原因在于后两者信号中出现了 3 个频率,它们在时域是分段出现的,经快速傅里叶分析后所得频谱密度分布于 3 个频率之上,使强度相对单频时要弱许多。但频谱密度曲线在频率(x 坐标)上的积分为总光谱强度,三者是相等的。

由上面频谱密度图可见,当 $\Delta s \neq 0$,在频谱图上出现不只一个尖峰频率;是由 3 个频率是时间的分段函数所造成的,并非噪声所致。从图 4(b)可见,单频时对噪声滤除已经相当理想,多频时噪声也不产生影响。

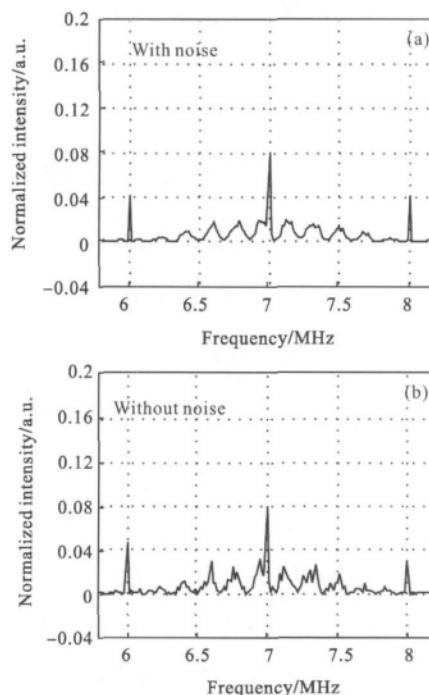


图 6 $\Delta s=\tau$ 时接收信号归一化频谱密度

Fig.6 Frequency spectrum normalized intensity when $\Delta s=\tau$

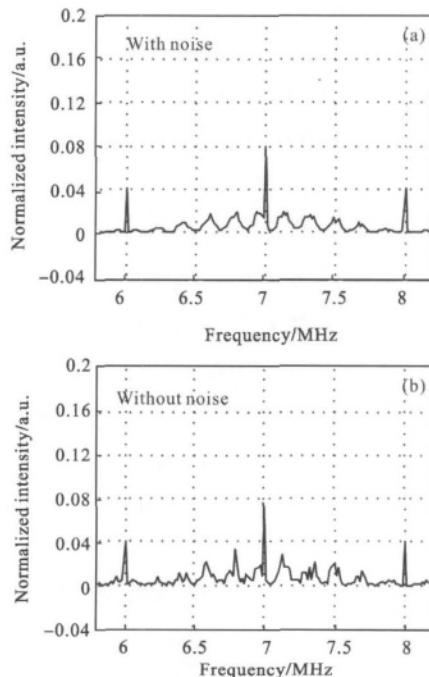


图 7 $\Delta s=0.5\tau$ 时接收信号归一化频谱密度

Fig.7 Frequency spectrum normalized intensity when $\Delta s=0.5\tau$

这个方法中所用调制码为伪随机序列 M 码,由于该序列码的随机性,在本振光和信号光相干时间范围内,只要 Δs 不为零,总会出现 3 个频率。如果此处用周期码去调制激光,则 Δs 取某些特定值时,会

造成频率的丢失。其原因如图 8 所示。

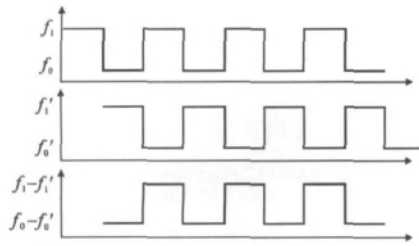


图 8 周期码调制

Fig.8 Modulation with periodical sequence

当周期码调制时, Δ_s 为比特时间的整数倍时, 会造成频率的丢失。而通过伪随机序列码进行的调制, 不会出现这种问题, 能够得到多普勒频移信息。

由上面仿真运算所得计算结果图可见: 理论推断和模拟运算结果一致, 并且在加入噪声时, 仍能够得到外差信号的频率信息。可见此探测方法能够较好地滤除随机噪声信号的影响, 提高探测信噪比。

4 结 论

应用二进制调制和外差探测相结合探测方法, 由伪随机 M 码调制本振光和发射光, 具有良好的信号提取能力和滤除噪声的能力, 提高了目标探测的概率和信噪比; 通过对目标信号进行抽样, 和快速傅里叶变换得到目标移动对激光产生的多普勒频移, 由此精确探测到目标的运动信息。文中所做的模拟仿真和理论分析相符。

参考文献:

- [1] Xue Guogang, Sun Dongsong, Yang Zhao. Modeling and performance simulation of direct detection laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(3): 244-247. (in Chinese)
薛国刚, 孙东松, 杨昭. 直接探测激光雷达模型及其性能模拟[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3): 244-247.
- [2] Zhang Dayong, Wu Wenqi, Wu Meiping. Calibration technology of airborne lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2806-2813. (in Chinese)
章大勇, 吴文启, 吴美平. 机载激光雷达系统标定方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2806-2813.
- [3] Chen Weibiao, Zhou Jun, Liu Jiqiao, et al. Doppler lidar and it's all solid-state single frequency laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008 37(1): 57-60. (in Chinese)
陈卫标, 周军, 刘继桥, 等. 多普勒激光雷达及其单纵模全固态激光器[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 57-60.
- [4] Wang Bangxin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, et al. Analysis of data processing method for Doppler wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 373-376. (in Chinese)
王邦新, 孙东松, 钟志庆, 等. 多普勒测风激光雷达数据处理方法分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 373-376.
- [5] Gatt P, Henderson S W. Laser radar detection statistics: a comparison of coherent and direct-detection receivers [C]// SPIE, 2001, 4377: 251-262.
- [6] Chen Hongfang, Zhong Zhi, Ding Xuemei. Compensation of nonlinear errors in laser heterodyne interferometers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(5): 1043-1047. (in Chinese)
陈洪芳, 钟志, 丁雪梅. 激光外差干涉的非线性误差补偿[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1043-1047.
- [7] Schattenburg M L, Smith H I. The critical role of metrology in nanotechnology [C]//SPIE, 2002, 4608: 116-124.
- [8] Ma Chaojie, Yang Hua, Li Xiaoxia, et al. Implementation of automatic target recognition by imaging lidar in complex scenes [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7): 1714-1719. (in Chinese)
马超杰, 杨华, 李晓霞, 等. 复杂场景下应用成像 Ladar 的自动目标识别[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1714-1719.
- [9] Strand O T, Berzins L V, Goosman D R. Velocimetry using heterodyne techniques [C]//SPIE, 2005, 5580: 593-599.
- [10] Kimio Asaka, Yoshihito Hirana. A pseudo-random frequency modulation continuous wave coherent lidar using an optical field correlation detection method [J]. *Optical Review*, 1998, 5(5): 310-340.