

## 强度编码合成孔径激光雷达原理与实验

李 飞<sup>1</sup>, 张鸿翼<sup>1</sup>, 吴 军<sup>1</sup>, 洪光烈<sup>1</sup>, 徐卫明<sup>1</sup>, 舒 嵘<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术中国科学院重点实验室, 上海 200083;  
2. 量子信息与量子科技前沿协同创新中心, 安徽 合肥 230026)

**摘 要:** 合成孔径激光雷达是合成孔径技术在激光相干探测雷达领域的推广, 相比传统合成孔径雷达具有更高的分辨率。由于传统线性调频模式受制于调频速率和非线性等因素, 无法应用于高速运动平台。从合成孔径激光雷达原理出发, 结合光通信调制手段, 详细推导了强度编码合成孔径激光雷达编码压缩原理公式, 并仿真验证了  $M$  序列应用于强度编码的压缩性能。通过对模糊函数推导与仿真, 证明强度编码信号不存在多值性模糊和互耦合误差。搭建了基于光纤的强度编码距离向分辨率验证实验系统, 选取长度 1 023、码元宽度 5 ns 的  $M$  序列进行强度编码调制, 利用 2 000 m 延时光纤进行了距离向验证。在考虑载波光幅值抖动的情况下, 得到了 0.787 5 m 的距离向分辨率, 精度误差 5%。该文从理论与实验两方面证明强度编码合成孔径激光雷达的可行性, 为工程实现提供了一定实践支撑。

**关键词:** 编码压缩; 合成孔径; 相干激光雷达; 强度调制

**中图分类号:** TN958.94 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2575-08

## Mechanism and experiment of code intensity-modulation on synthetic aperture radar

Li Fei<sup>1</sup>, Zhang Hongyi<sup>1</sup>, Wu Jun<sup>1</sup>, Hong Guanglie<sup>1</sup>, Xu Weiming<sup>1</sup>, Shu Rong<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;  
2. Synergetic Innovation Center of Quantum Information and Quantum Physics, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Synthetic aperture radar is a generalization of the synthetic aperture technique in the field of laser coherent detection with a higher resolution compared with the conventional synthetic aperture radar. Due to the frequency modulation rate and frequency nonlinear, the traditional frequency modulated mode can't be applied on the high-speed platform. In this article, combined with optical communication modulation method, the functions of synthetic aperture radar imaging based on the pseudo code intensity modulation were deduced in detail and the compression performances of  $M$  codes were simulated simultaneously. By analyzing the ambiguity function, it proves that the pseudo code intensity modulation signal is not affected by the multi value ambiguity or the intercoupling error. An experiment system of

收稿日期: 2015-01-11; 修订日期: 2015-02-15

基金项目: 国家 863 计划(2014AA7100012)

作者简介: 李飞(1988-), 博士生, 主要从事合成孔径激光雷达方面的研究。Email: stonehood@126.com

导师简介: 舒嵘(1971-), 研究员, 主要从事主动光电探测技术方面的研究。Email: shurong@mail.sitp.ac.cn

the pseudo code intensity modulation was set up by fiber of 2 000 m to test the range resolution with  $M$  codes in length of 1 023 and code width of 5 ns. Under consideration of intensity jitter of the signal carrier, a range resolution of 0.787 5 m with 5% accuracy error was obtained. Through the above analysis, it has been proved that synthetic aperture lidar based on the pseudo code intensity modulation is feasible in theory and experiments and it provides practical support for the project implementation.

**Key words:** code compression; synthetic aperture; coherent lidar; intensity modulation

## 0 引言

合成孔径激光雷达(SAL)是合成孔径雷达(SAR)在光学领域的推广,由于其波长通常在微米量级,因此可以得到更高的分辨率,原理上可以突破衍射极限的限制<sup>[1-4]</sup>。由于线性调频调制方式中后端处理设备简单,多数演示实验采用这一调制方式进行距离向探测<sup>[5-7]</sup>。但无论电光调制、声光调制还是线性调波长,调制速率与调制频率线性度一直是制约 SAL 应用于机载等快速平台的因素。随着高速光通信快速发展,编码技术<sup>[8-10]</sup>因其码元选取灵活、调制速率快、调制信号质量好等优点,受到越来越多的关注。编码技术是将自相关性能良好的码元序列,通过调制器调制到光载波的相位或强度上,通过相干接收还原得到码元,压缩后提取距离向信息。洛克希德马丁公司于 2011 年成功实现了基于相位编码的机载合成孔径激光雷达成像<sup>[11]</sup>,而强度编码的研究还未见国内外报道。文中详细推导了强度编码压缩原理公式,并进行了合成孔径激光雷达成像仿真和距离向测距验证实验,证明其可行性的同时为机载合成孔径激光雷达提供了新的实现手段。

## 1 编码调制

### 1.1 编码调制概念

编码技术<sup>[12]</sup>源于通信领域,起初是为了降低传递符号速率的同时提高信道信息率。通过对载波的相位或强度调制,将编码信息加载到载波上,在接收端解调出编码信息,完成信息传送的过程。编码调制应用于雷达是为了得到目标的相对雷达的距离信息,选取自相关性良好的编码调制到发射信号上,经过目标反射后,回波信号可能是多个目标发射的叠加,将叠加在一起的编码与调制码元进行相关运算,即可分离出不同目标间的距离信息。

编码调制雷达信号可以表示为:

$$s(t)=A(t)\exp(j\varphi(t))\exp(j\omega_0 t) \quad (1)$$

式中: $A(t)$ 为强度调制函数; $\exp(j\varphi(t))$ 为相位调制函数; $\omega_0$ 为光载波频率。对于相位调制, $A(t)$ 为常数;强度调制则将  $\exp(j\varphi(t))$ 置为常数。

调制函数由伪随机序列构成,以常见的二进制码为例,可表示为 $\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_N\}$ ,  $C_j = \pm 1 (1 \leq j \leq N)$  码元长度为  $L$ ,码元宽度为  $T$ ,则可以得到两种调制函数表达式为:

$$A(t) = \begin{cases} \sum_{k=0}^L C_j \delta(t-kT) & 0 < t < LT \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\varphi(t) = \begin{cases} \pi \sum_{k=0}^L C_j \delta(t-kT) & 0 < t < LT \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

定义编码的非周期自相关函数如下:

$$R(m) = \sum_{i=1}^{L-m} C_j C_{i+m} \quad m=0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (4)$$

若其非周期自相关函数具有如下性质,则说明码元具有良好的相关性

$$R(m) = \sum_{i=1}^{L-m} C_j C_{i+m} = \begin{cases} L & m=0 \\ a(m) \leq L & m=1, 2, \dots, L-1 \end{cases} \quad (5)$$

上式中, $a(m)$ 值相对  $L$  越小,压缩信号的主瓣旁瓣比越高,代表距离向的分辨率越高。

以常见的  $M$  序列和 P4 码为例: $M$  序列是编码调制中常用的一种伪随机码元,其具有良好的平衡性、游程特性和自相关性,其长度为  $2^n - 1$ ,  $n$  为正整数;P4 码是将线性调频信号波形调制到基带,并对实部和虚部按奈奎斯特频率采样得到的,是一种典型的多元码,由于其多普勒容限好,开始受到越来越多的关注。

取 127 位长度的  $M$  序列进行了压缩,结果见图 1。

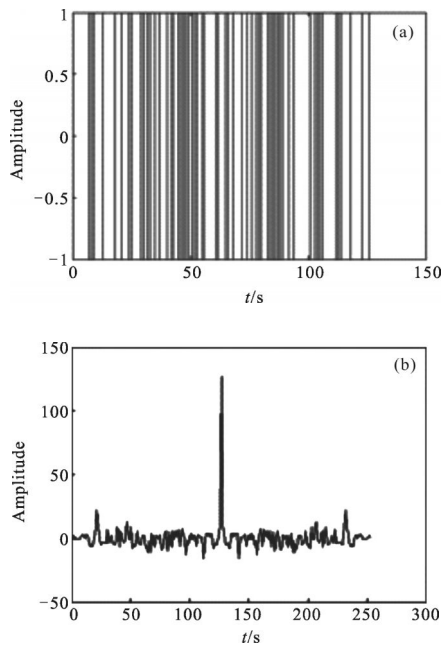


图1  $M$  序列码元及压缩结果  
Fig.1  $M$  codes and the compression result

## 2 强度编码

### 2.1 强度编码调制

设发射光信号为:

$$S(t) = E_s \exp(-j\omega_0 t) \quad (6)$$

式中:  $\omega_0$  为发射光频率。

编码码元信号表示为  $A(t)$ , 则有:

$$A(t) = \sum_{n=1}^L p(n) \text{rect}(t - (n-1)T) \quad (7)$$

其中  $p(n)$  为  $N$  元码元, 取值范围  $-N/2 \sim N/2$ , 个数为  $L$ 。发射光信号经过电光强度调制器的调制, 调制后的光信号为:

$$S_m(t) = (1 + A(t)) E_s \exp(-j\omega_0 t) \quad (8)$$

发射信号经过目标反射后回到接收系统, 设经过的延时为  $\tau$ , 设平台移动产生的多普勒频移为  $\omega_d$ , 则回波表示为:

$$S_s(t) = (1 + A(t-\tau)) E_s \exp(-j(\omega_0 + \omega_d)(t-\tau)) \quad (9)$$

本振信号设为:

$$S_L = E_L \exp(-j\omega_{L0} t) \quad (10)$$

将回波信号与本振信号在探测器光敏面上电场叠加:

$$e_D = (1 + A(t-\tau)) E_s \exp(-j(\omega_0 + \omega_d)(t-\tau)) + E_L \exp(-j\omega_{L0} t) \quad (11)$$

依据光电探测器的平方率特性<sup>[13]</sup>, 得到输出电流:

$$i_D(t) = \alpha [e_D]^2 = \alpha [S_s^2(t) + S_{L0}^2(t) + 2S_s(t)S_{L0}(t)] \quad (12)$$

式中:  $\alpha$  为探测器的相应效率;  $S_s^2(t)$  为回波信号的能量, 由于采用了强度编码调制, 其能量是按照码元变化的交流量, 但由于实际中该项相对于本振非常小 (回波能量在 nW 量级, 而本振信号为 mW 量级), 可以忽略;  $S_{L0}^2(t)$  为直接探测得到的直流能量, 经过探测器交流耦合去掉; 剩下的一项展开:

$$i_{if} = \alpha \cdot E_L E_s \left[ 1 + \sum_{n=1}^L p(n) \text{rect}(t - \tau - (n-1)T) \right] \cdot \cos((\omega_0 + \omega_d)(t - \tau) - \omega_{L0} t) \quad (13)$$

对于零差探测,  $\omega_0 = \omega_{L0}$ , 并去除其中的直流量, 上式改写为:

$$i_{if} = \alpha \cdot E_L E_s \sum_{n=1}^L p(n) \text{rect}(t - \tau - (n-1)T) \cdot \cos(\omega_d t - (\omega_0 + \omega_d)\tau) \quad (14)$$

采用  $I/Q$  正交解调的方法, 将本振光进行  $90^\circ$  相移, 同样与回波信号进行相干探测, 得到

$$i_{iQ} = \alpha \cdot E_L E_s \sum_{n=1}^L p(n) \text{rect}(t - \tau - (n-1)T) \cdot \sin(\omega_d t - (\omega_0 + \omega_d)\tau) \quad (15)$$

将公式(14)、(15)比较, 可以得到回波的多普勒信息, 即  $\tan(\omega_d t)$ , 进而分离出

$$A_s = \alpha \cdot E_L E_s \sum_{n=1}^L p(n) \text{rect}(t - \tau - (n-1)T) \quad (16)$$

通过以上处理, 完成了对回波信号幅度相位的复数化。建立一个二维的  $N_r \times N_a$  矩阵,  $N_r$  为平台距离向采样次数,  $N_a$  为平台在方位向的采样次数。将得到的数据依序存放在这个矩阵中。数据处理流程见图2, 编码作为距离向匹配滤波函数

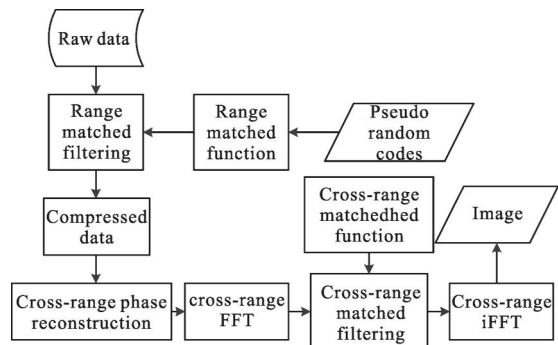


图2 强度编码合成孔径激光雷达成像流程图

Fig.2 Process of SAL imaging by code intensity-modulation

数与原始数据进行距离向匹配滤波,得到的数据进行方位向相位重构。重构数据做方位向 FFT,提取其共轭作为方位向匹配函数与重构数据匹配滤波,完成后进行 iFFT 变换即得到二维图像。在调制时,可以将编码信号加上一个直流偏置,提高发射信号平均功率;接收时,由于光电探测器是交流耦合,得到的是减去直流偏置的交流信号,完整地恢复出编码波形。

### 2.2 强度编码调制仿真分析

#### 2.2.1 M 序列强度调制仿真分析

仿真参数:码元长度 1 023,码元宽度 0.33 ns (3 GHz),载波波长 1 550 nm,距离向距离 3 000 m,采样率 3 GS/s,机载平台速度 50 m/s,合成孔径长度 1 m。

图 3 多点目标设置中一共有 15 个点目标,随机分布在 0.55 m×0.55 m 的范围内,每个分辨单元为 0.5 m,每个点的强度代表其后向散射系数。图 4 为对回波进行距离向压缩后结果及其中一列剖面图,图 5 为其中一行方位向压缩结果及最终成像结果,可以看出 M 序列编码很好的恢复出了原始目标。

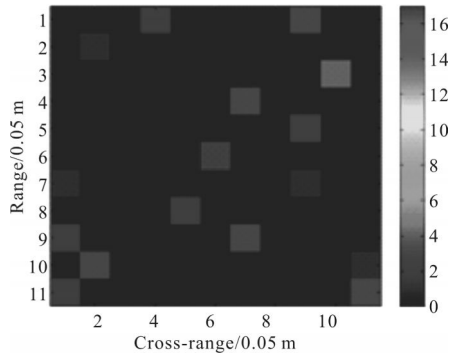


图 3 多点目标设置

Fig.3 Multi target setting

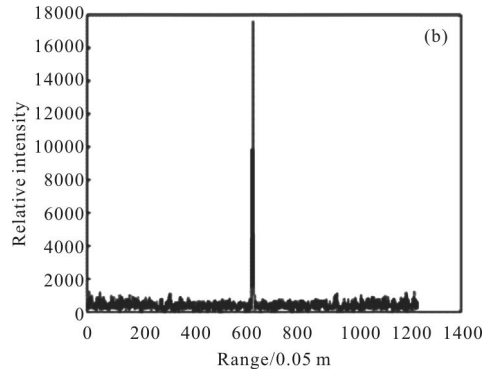
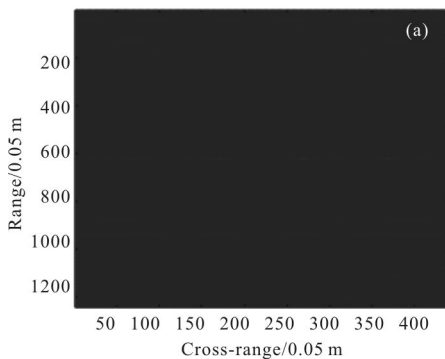


图 4 M 序列距离向压缩后结果以及其中一列数据的距离向压缩结果

Fig.4 M codes range compression and one column result

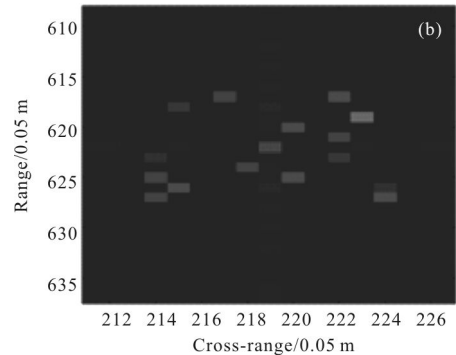
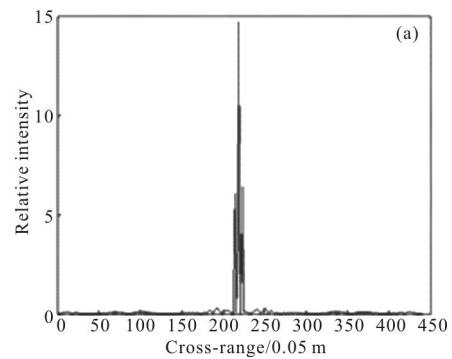


图 5 其中一行数据的方位向压缩结果和目标压缩结果

Fig.5 One row cross-range compression and target compression result

#### 2.2.2 强度编码信号模糊函数

雷达理论中定义了模糊函数来描述距离与速度的耦合程度。模糊函数<sup>[14]</sup>定义式为:

$$\chi(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t)a(t+\tau)\exp(j2\pi f_d t) dt \quad (17)$$

式中: $a(t)$ 为雷达波形信号的复数形式表示; $\tau$ 为回波延迟时间; $f_d$ 为对于雷达波形的多普勒频移。

对于强度编码调制,其调制信号的复包络为:

$$u(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{n=1}^L c_n v(t-(n-1)T) & 0 < t < LT \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $v(t)$  为子脉冲函数, 对上式进一步分解为两个函数的卷积, 有:

$$u(t) = v(t) \otimes f(t) = v(t) \otimes \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{n=1}^L c_n \delta(t - (n-1)T) \quad 0 < t < LT \quad (19)$$

对于  $v(t)$ , 其模糊函数为普通脉冲模糊函数, 表述为:

$$\chi_v(\tau, \xi) = \begin{cases} e^{j\pi\xi(T-|\tau|)} \left[ \frac{\sin(\pi\xi(T-|\tau|))}{\pi\xi(T-|\tau|)} \right] \left( 1 - \frac{|\tau|}{T} \right) & |\tau| < T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

根据模糊函数的定义,  $f(t)$  的模糊函数表述为:

$$\chi_f(\tau, \xi) = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \sum_{m=1}^L \int_{-\infty}^{\infty} c_n c_m \delta(t - (n-1)T) \cdot \delta(t + \tau - (m-1)T) e^{j2\pi\xi t} dt \quad (21)$$

上式中用  $t_r$  替换  $t - (n-1)T$ , 则有  $t = t_r + (n-1)T$ , 上式改写为:

$$\begin{aligned} \chi_f(\tau, \xi) &= \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \sum_{m=1}^L c_n c_m e^{j2\pi\xi(n-1)T} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t_r) \cdot \\ &\delta(t_r + \tau - (m-n)T) e^{j2\pi\xi t_r} dt_r = \\ &\frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \sum_{m=1}^L c_n c_m e^{j2\pi\xi(n-1)T} \cdot \\ &\delta(\tau - (m-n)T) e^{j2\pi\xi(\tau - (m-n)T)} \end{aligned} \quad (22)$$

设  $m-n=k$ , 并根据模糊函数的对偶性质对上式进一步化简

$$\chi_f(mT, \xi) = \begin{cases} \frac{1}{L} \sum_{n=1}^{L-k} c_n c_{n+k} e^{j2\pi\xi(n-1)T} & 0 \leq m \leq T \\ \frac{1}{L} \sum_{n=-k}^L c_n c_{n+k} e^{j2\pi\xi(n-1)T} & -L \leq m \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

这样可以求得整体的模糊函数为:

$$\begin{aligned} \chi_{IC}(\tau, \xi) &= \chi_v(\tau, \xi) \otimes \chi_f(\tau, \xi) = \\ &\begin{cases} \sum_{n=-L}^L e^{j\pi\xi(T-|\tau-mT|)} \left[ \frac{\sin(\pi\xi(T-|\tau-mT|))}{\pi\xi(T-|\tau-mT|)} \right] \left( 1 - \frac{|\tau-mT|}{T} \right) \cdot \\ \frac{1}{L} \sum_{n=1}^{L-k} c_n c_{n+k} e^{j2\pi\xi(n-1)T} & 0 \leq m \leq L, |\tau-mT| < T \\ \sum_{n=-L}^L e^{j\pi\xi(T-|\tau-mT|)} \left[ \frac{\sin(\pi\xi(T-|\tau-mT|))}{\pi\xi(T-|\tau-mT|)} \right] \left( 1 - \frac{|\tau-mT|}{T} \right) \cdot \\ \frac{1}{L} \sum_{n=-k}^L c_n c_{n+k} e^{j2\pi\xi(n-1)T} & -L \leq m \leq 0, |\tau-mT| < T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

选取了 1023 长度的  $M$  序列进行仿真, 图 6 为  $M$  序列强度编码模糊函数, 图 7 为典型线性调频信号模糊函数, 对比可知, 线性调频信号的模糊函数为斜刀刃形, 对于速度和距离均未知情况, 只能正确测定联合值, 无法确切知道速度与距离值; 强度编码信号的模糊函数接近图钉形, 距离与速度分离, 没有多值性模糊和互耦合误差。

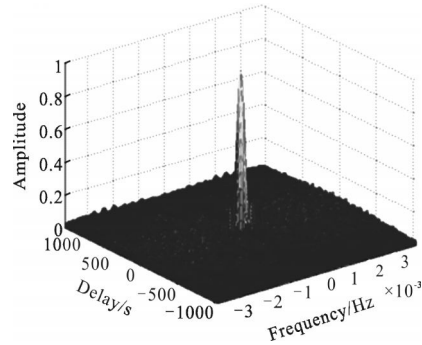


图 6  $M$  序列强度编码信号模糊函数

Fig. 6  $M$  codes intensity-modulation ambiguity function

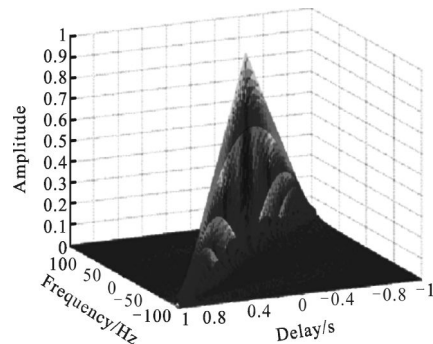


图 7 典型线性调频信号模糊函数

Fig. 7 Typical LFM ambiguity function

### 3 距离向验证实验

#### 3.1 系统原理及参数设置

对强度编码调制方式的距离向分辨率以及调制信号质量等进行了验证实验。实验示意图见图 8。

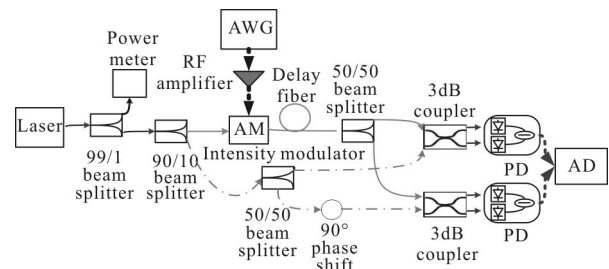


图 8 距离向验证实验框图

Fig. 8 Range demonstration of codes intensity-modulation

系统窄线宽激光器的出射光经 99:1 分束器,其中 1%的能量送入功率计,对输出光进行能量监视;99%的能量再经 90:10 分束器,其中的 90%作为发射光进入强度调制器,10%的光作为本振。由任意波形发生器产生高速码元序列,经过射频放大器放大后,对发射光进行强度编码调制。调制后的发射光经过一段延迟光纤,作为距离向的延时,与本振信号一起混频后进行 I/Q 正交相干探测。利用 AD 采集卡对探测器的输出信号进行采样。按照表 1 对系统参数进行设置

表 1 强度编码距离向实验参数

Tab.1 Parameters of range demonstration of codes intensity modulation

Length of delay fibre/m	Width of code/ns	Amplitude range/V	Type of codes	Length of codes	Sampling frequency
2 000	5	-4~+4	M/P4	1 023	1 GS/s

系统各部分的具体参数:窄线宽激光器选用 Orbits ETH 激光器,出射功率 100 mW;强度调制器为 Thorlabs 的 40 Gb/s 铌酸锂调制器;任意波形发生器产生 200 MHz 重频的信号;探测器采用 NewPort 平衡探测器,带宽为 800 MHz;AD 采集卡为安捷伦的 U1406A,采样率 1 GS/s,采样带宽 1 GHz;功率计选用 Thorlabs 的 PM100 精密功率计,具备功率记录功能。码元选取  $M$  序列,码元宽度均为 5 ns,长度为 1 023。

### 3.2 载波幅值抖动分析

由于该调制方式是对出射光强度的调制,需要严格控制载波的幅值起伏,否则会影响最终的检测结果。若激光器输出光本身存在幅值的抖动,则输出光和本振光改写为:

$$S_m(t) = (1+A(t))Q(t)E_s \exp(-j\omega_0 t) \quad (25)$$

$$S_L(t) = Q(t)E_L \exp(-j(\omega_{lo} t)) \quad (26)$$

其中  $Q(t)$  为激光输出幅值的抖动因子,最后得到的差频电流信号为:

$$i_{if} = \alpha Q(t)Q(t-\tau)E_L E_s \sum_{n=1}^L p(n) \text{rect}(t-\tau-(n-1)T) \cdot \cos(\omega_d t - (\omega_0 + \omega_d)\tau) \quad (27)$$

相当于对码元序列乘以一个随时间变化的抖动因子,最终影响成像质量。一个直观的解决方法是

对激光器的输出幅值抖动进行监测,记录下  $Q(t)$  的值,由于  $Q(t)$  变化频率很缓慢,可以近似认为  $Q(t) = Q(t-\tau)$ ,得到  $Q(t)^2$ ,代入差频电流信号进行补偿。

系统中,利用精密功率计 PM100,按照 0.03 s 的采样间隔,对输出光能量进行记录,记录精度到 0.000 01 mW,结果如图 9 所示。

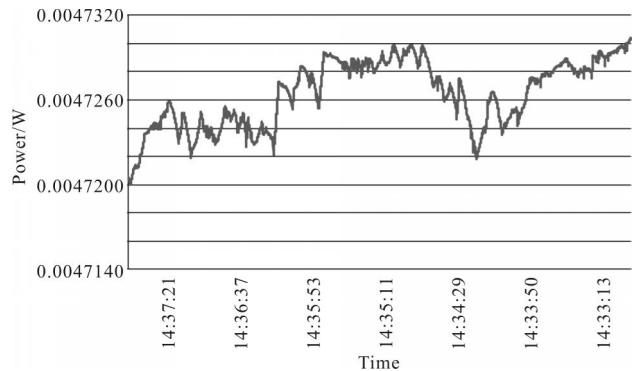


图 9 激光器输出幅值抖动测量

Fig.9 Intensity jitter of laser output

由图 10 激光器输出能量统计可知,150 s 内,激光器输出幅值抖动在 0.2% 以下,并且是一个低频变化的变量,对结果的影响很小,但考虑到实际接收时回波能量本身较弱以及后端电子学噪声、相干接收光路误差等因素对结果的影响,还是对差频电流信号进行了抖动补偿。

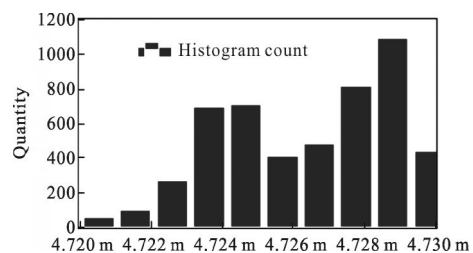


图 10 激光器输出能量统计

Fig.10 Statistics of the laser output intensity

### 3.3 实验结果分析

$M$  序列具有良好的压缩特性,主瓣旁瓣比较低,是一种应用很广泛的编码序列,具有独特的平衡特性、游程特性、相关特性等。实验中选用了宽度 5 ns,长度为 1 023 的  $M$  序列。

在二元  $M$  序列码元波形和解调后波形中(图 11),1 通道是任意波形发生器输出  $M$  序列波形,2 通道是平衡探测器的输出信号,平衡探测器输出信号很

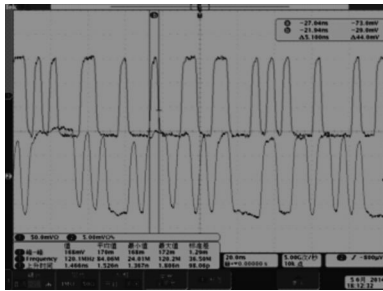


图 11  $M$  序列码元波形和解调后波形

Fig.11 Waveform of  $M$  codes and demodulated waveform

好地还原出了调制波形。对差频信号进行采样,按照 1 GS/s 的采样率对每个码元采样 5 个点,并进一步码元压缩,得到图 12 和图 13。

$I/Q$  两路均有很好的主瓣旁瓣比,图 13 中的图(b)是对图(a)主瓣位置的放大,对  $I/Q$  两路主瓣分别取其半高全宽(FWHM),主瓣宽度(见图 12 中标注)分别为 1.05 和 1.1 个码元宽度(即 5.25 ns 和 5.5 ns),对应距离向分辨率分别为 0.787 5 m 和 0.825 m,与理论值 0.75 m( $c/2B=cT/2$ )分别存在 5%和 10%误差。误差来源于编码信号电压放大过程中的码形畸变以及相干探测中本振信号所引入的相对强度噪声。对比图 12 中  $I/Q$  两路, $Q$  路存在一个较大的旁瓣,且分辨率低于  $I$  路,其原因为  $Q$  路对应的平衡探测器输出阻抗匹配存在问题,导致采样信号产生了反射。

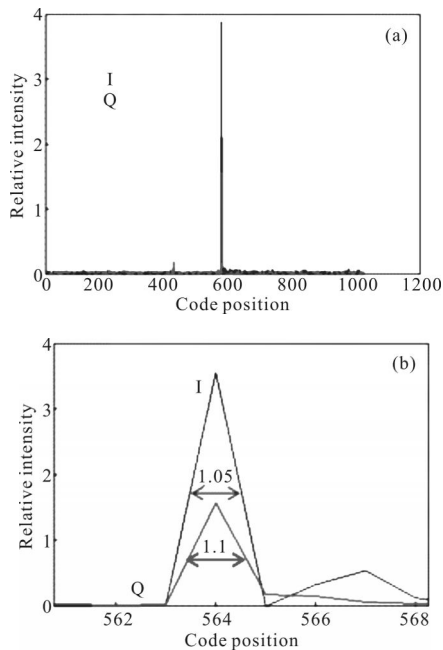


图 12  $M$  序列  $I/Q$  两路压缩结果及放大图

Fig.12 Compression results of  $I/Q$  and zoom in of  $M$  code

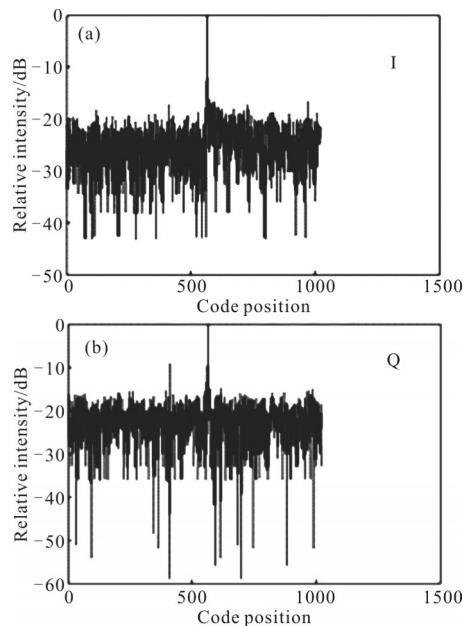


图 13  $M$  序列  $I/Q$  两路压缩后主瓣旁瓣比

Fig.13 Main-to-sidelobe ratio of  $I$  and  $Q$  of  $M$  code

铌酸锂电光调制器由于其工作性能稳定、调制速率高、线性度好、工艺技术成熟等优点,在光通信中已经广泛应用。铌酸锂调制器在长时间使用时,需要给调制器提供偏置电压保证调制函数工作点稳定,从而得到良好的调制信号。实验时间较短(5 min 以内),环境温度和光纤所受应力等稳定,工作点并无明显漂移。同时考虑到硬件成本(光电探测器、AD 采集模块、DA 转换模块以及电压驱动模块等)的增加,实验并未对强度调制器施加偏置电压。

以上实验验证了强度编码调制方法可以快速地调制大时宽带宽信号,通过选择压缩特性较好的二元  $M$  序列,可以得到高精度的距离向分辨率。从而在理论和实践上,均体现了相比传统线性调频方法的优越性,为合成孔径激光雷达的工程化提供了新的发展方向。

#### 4 结束语

文中详细分析了强度编码合成孔径激光雷达的原理及性能,并选取典型的编码序列( $M$  序列)进行了仿真与实验验证,其距离向分辨率与理论值吻合,证明了该调制方式的可行性。同时对其模糊函数的性能进行了分析,其不存在多值性模糊和互耦合误差,可以准确地独立提取距离向与方位向信息。所做工作为合成孔径激光雷达工程化提供了新的选择,

具有较为重要的参考价值。

### 参考文献:

- [1] Buck J R, Krause B W, Malm A, et al. Synthetic aperture imaging at optical wavelengths [C]//2009 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2009.
- [2] Guo Liang. Study on experiment and algorithm of synthetic aperture imaging lidar [D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)  
郭亮. 合成孔径成像激光雷达实验与算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [3] Wang Zhongsheng, Zhang Xuejun. Symmetry of pupil in spatial synthetic aperture imaging optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19 (9): 1999–2005. (in Chinese)  
王忠生, 张学军. 空间合成孔径成像光学系统的光瞳对称性[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 1999–2005.
- [4] Lin Xudong, Xue Chen, Liu Xinyue, et al. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5 (4): 337–351. (in Chinese)  
林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. *中国光学*, 2012, 5(4): 337–351.
- [5] Chen Juan. Study on signal models and imaging algorithm of synthetic aperture lidar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)  
陈娟. 合成孔径激光雷达信号模型及成像算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [6] Wu Jin. On the development of synthetic aperture lidar imaging [J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(4): 353–360. (in Chinese)  
吴谨. 关于合成孔径激光雷达成像研究[J]. *雷达学报*, 2012, 1(4): 353–360.
- [7] Zhang Kunfeng, Hong Guanglie, Xu Xianwen, et al. Realization method of range resolution of sub-millimeter in widely tunable laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2674–2679. (in Chinese)  
张琨锋, 洪光烈, 徐显文, 等. 宽调谐激光雷达亚毫米级距离分辨的实现方法 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2674–2679.
- [8] Guo Liang, Xing Mengdao, Zeng Xiaodong, et al. Inverse synthetic aperture lidar imaging of indoor real data [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 637–642. (in Chinese)  
郭亮, 邢孟道, 曾晓东, 等. 室内实测数据的逆合成孔径激光雷达成像[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 637–642.
- [9] Zhou Xingang, Zhao Huichang, Xu Yuanyin. Theory and method for evaluation of anti-jamming capability of phase modulated by pseudo random code combined with pulse Doppler fuze [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2010, 34(2): 176–181. (in Chinese)  
周新刚, 赵惠昌, 徐元银. 伪码调相 PD 引信抗干扰性能测度理论和方法[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(2): 176–181.
- [10] Li Fan, Wu Shuangyang, Zheng Yongchao, et al. Overview of the development of synthetic aperture lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 55–65. (in Chinese)  
李番, 邬双阳, 郑永超, 等. 合成孔径激光雷达技术综述 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(1): 55–65.
- [11] Krause B W, Buck J, Ryan C, et al. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]//CLEO: 2011–Laser Science to Photonic Applications, 2011.
- [12] Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction [J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 1998, 44(2): 744–765.
- [13] Hong Guanglie, Wang Jianyu, Meng Zhaohua, et al. Chirped amplitude modulation and range dimension processing of near infrared synthetic aperture lidar [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(3): 229–234. (in Chinese)  
洪光烈, 王建宇, 孟昭华, 等. Chirp 强度调制与近红外激光合成孔径雷达距离向处理 [J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(3): 229–234.
- [14] Zhang Xinbo. Engineering calculation of ambiguity function of radar signals [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1980(4): 1–9. (in Chinese)  
张新波. 雷达信号模糊函数的工程计算 [J]. *电子学报*, 1980(4): 1–9.