

机载合成孔径激光雷达相位调制信号性能分析和成像处理

杜剑波^{*①②③} 李道京^{①②} 马萌^{①②③}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(微波成像技术重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 该文将相位调制信号用于机载合成孔径激光雷达,分析了3种相位调制信号的性能,研究了相位调制信号的收发方式和成像处理方法。针对机载合成孔径激光雷达观测幅宽较小的特点,对基于线性调频信号的相位调制信号,提出采用“去调相”接收方式,以大幅度降低宽带信号的AD采样率。对3种相位调制信号所做的成像仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 激光雷达; 合成孔径; 相位调制信号; 激光成像

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)01-0111-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.13094

Performance Analysis and Image Processing of Phase-modulated Signal on Airborne Synthetic Aperture Ladar

Du Jian-bo^{①②③} Li Dao-jing^{①②} Ma Meng^{①②③}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China)

^③(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this study, the performance of three phase-modulated signals used in airborne Synthetic Aperture Ladar (SAL) is investigated. The transmitting and receiving modes and imaging processing methods for these signals are studied. Considering that the swath of the airborne SAL is very narrow, in order to reduce the AD sampling rate of the wideband signal, a “phase-dechirping” receiving mode is proposed for the phase-modulated signal based on the Linear Frequency Modulation (LFM) signal. The imaging simulation results for these three phase-modulated signals validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: Ladar; Synthetic aperture; Phase-modulated signal; Laser imaging

1 引言

合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Ladar, SAL)由于采用合成孔径的原理,分辨率不随着距离的增加而下降,因此能获得更高的分辨率,在超高分辨率观测技术领域有广阔的发展前景。目前其研究已经得到了广泛的关注,并取得了明显的研究进展^[1-5]。

合成孔径激光雷达为形成高分辨率图像需要形成宽带信号。宽带信号的形式主要包括宽带频率调制和宽带相位调制信号,目前微波合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)主要使用了宽带频率调制信号,并采用了成熟的成像处理技术,实

现的图像分辨率已达到厘米量级。在激光波段,由于实现频率调制的声光器件的限制,目前能够实现的调频信号带宽较小,达不到机载SAL厘米级分辨率对应的带宽要求,现阶段只能考虑使用在激光数字通信技术支持下发展出的高速宽带激光相位调制器形成宽带相位调制信号。事实上,美国洛克希德-马丁公司的机载实验系统就是使用了相位编码信号并有效结合了微波SAR的成像处理技术^[6]。

文献[7]分析了机载SAL关键技术和实现方案,本文是文献[7]工作的继续,将相位调制信号用于机载SAL,分析了3种相位调制信号的性能,研究了相位调制信号的收发方式和成像处理方法,并给出了仿真分析结果。

2 相位调制信号的性能分析

本文使用的相位调制信号主要包括3种:二相

2013-10-15收到,2014-01-10改回;2014-01-16网络优先出版

国家自然科学基金(61271422)资助课题

*通信作者: 杜剑波 jianbodu1991@163.com

编码信号, 多相编码信号和文献[7]提出的基于线性调频信号的相位调制信号。

2.1 二相编码信号

对于二相编码信号, 子脉冲相位可以在两个状态值之间变化。现将二相编码信号设为 $x(t)$, 子脉冲设为 $x_n(t)$, 那么 $x(t) = \sum x_n[t - (n-1) \cdot \tau]$, $0 \leq t \leq N \cdot \tau$, $n=1, 2, \dots, N$, 其中 $x_n(t) = \exp(j \cdot \varphi_n)$, $0 \leq t \leq \tau$, τ 为子脉冲的宽度, N 为二相编码信号中子脉冲的个数, φ_n 取为 0 或 π 。

M 序列伪随机编码信号为二相编码信号的典型代表, M 序列是由级联线性移位反馈寄存器输出产生, 其产生电路较为容易实现^[8], 在实际中应用较多。对于级数为 m 的线性移位反馈寄存器, 其产生的 M 序列码长为 $N=2^m - 1$ 。对 M 序列二相编码信号, 可由匹配滤波器实现脉冲压缩并改善峰值信噪比。M 序列经过脉冲压缩后, 匹配滤波的输出中央处出现峰值, 但其旁瓣不具有明显的衰减性, 同时存在多普勒敏感问题, 这也是二相编码信号普遍存在的不足。

对于子脉冲宽度为 0.33 ns, 码长为 1023 的 M 序列, 其脉冲压缩结果如图 1 所示, 其远区副瓣较高, 最大值为 -28.38 dB; 其多普勒容限为 $f_{d \max} = 1.48$ MHz。对于多普勒频移超过多普勒容限的情况, 需要考虑在匹配滤波器中引入校正后的参考函数^[9]。

2.2 多相编码信号

相对于二相编码信号存在的多普勒容限较小, 以及脉冲压缩后旁瓣衰落较慢等不足, 多相编码信号在扩展多普勒容限和降低旁瓣方面有一定程度的改善。较为典型的多相编码信号有 Frank 码, P1, P2, P3, P4 码等, 本文主要分析 Frank 码的性能。设 2 维矩阵

$$\phi(p, q) = \frac{2\pi}{L} pq, \quad p = 0, 1, \dots, L-1, \quad q = 0, 1, \dots, L-1$$

其中 L 是信号子脉冲相位量化的位数; 将该矩阵的各行首尾依次连接即得码长为 L^2 的 Frank 码的子脉

冲相位序列^[10]。

对于子脉冲宽度为 0.33 ns, $L=4, 8, 16, 32$ 的 Frank 码, 其子脉冲相位序列如图 2 所示。Frank 码的相位变化类似于 LFM 信号的相位, 是近似 2 次变化的。Frank 码每隔 L 步长就对其频率进行 1 次调整, 而使其相位曲线去逼近 2 次变化曲线^[11]。不同码长的 Frank 码, 其相位逼近 2 次变化的程度也不相同; 码长越长, 逼近 2 次变化的效果越好。

对于子脉冲宽度为 0.33 ns, $L=4, 8, 16, 32$ 的 Frank 码, 其脉冲压缩结果如图 3 所示。从 Frank 码的脉冲压缩结果可以看出, 随着码长的增加, Frank 码的脉冲压缩旁瓣幅度逐渐降低; 较二相编码信号而言, 同码长的 Frank 码的脉冲压缩旁瓣在远区衰落较快。从图中可以清楚地看到, 当 $L=32$ 时, 码长为 1024 的 Frank 码经过脉冲压缩后, 其远区旁瓣优于 -40 dB。

2.3 基于线性调频信号的相位调制信号

宽带 LFM 信号具有良好的脉冲压缩性能, 采用频率调制方式在微波 SAR 系统中已获得了广泛的应用。在机载 SAL 中, 由于实现频率调制的声光器件的限制, 目前能够实现的信号带宽较小, 达不到

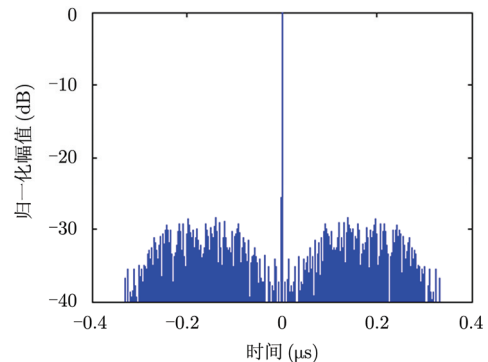
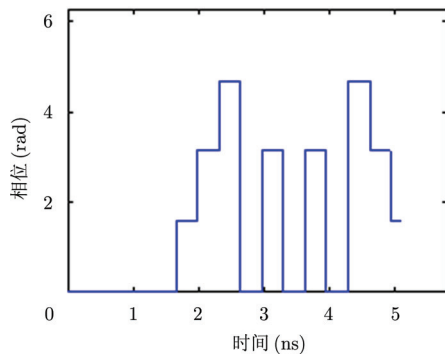
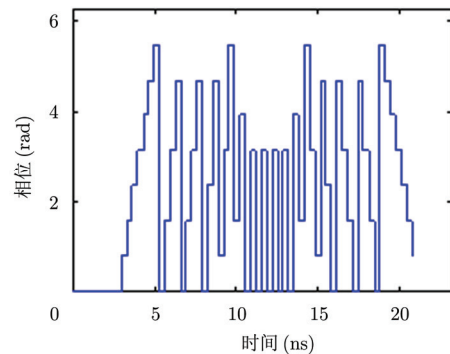


图 1 码长为 1023 的 M 序列脉冲压缩结果
Fig. 1 Pulse compression result of M sequence with code length of 1023



(a) 4PSK Frank 码子脉冲相位
(a) Sub-pulse phase sequence of 4PSK Frank code



(b) 8PSK Frank 码子脉冲相位
(b) Sub-pulse phase sequence of 8PSK Frank code

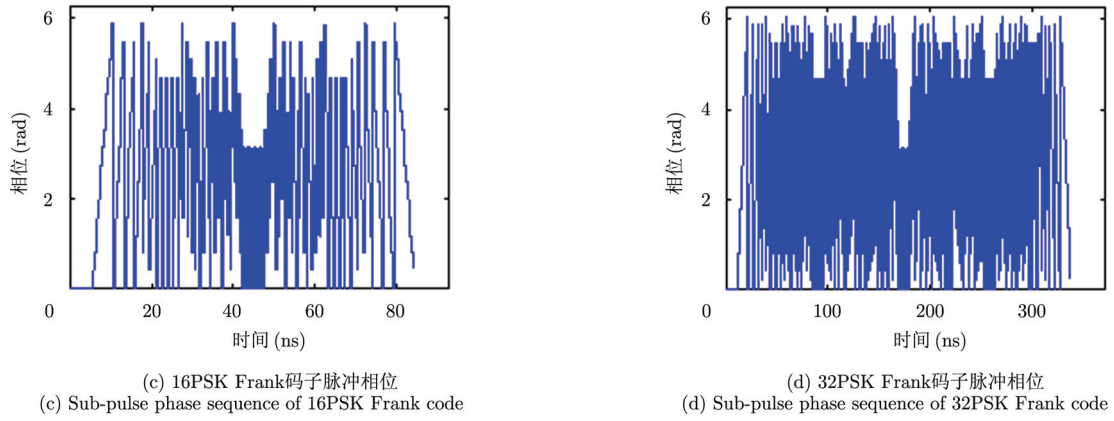


图 2 Frank 码子脉冲相位序列

Fig. 2 Sub-pulse phase sequence of Frank code

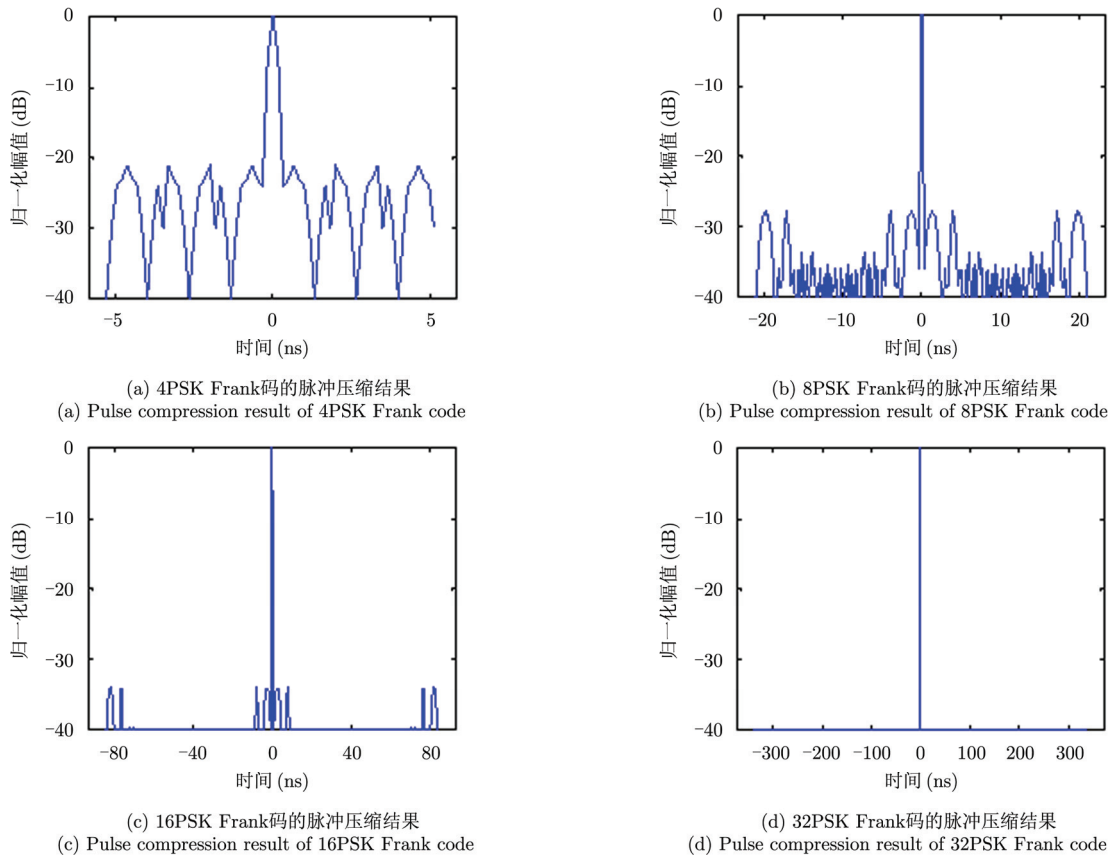


图 3 Frank 码的脉冲压缩结果

Fig. 3 Pulse compression result of Frank code

机载 SAL 厘米级分辨率对应的带宽要求，现阶段只能考虑使用在激光通信技术支持下发展出的高速宽带激光相位调制器形成宽带信号。

用调制信号产生器输出的和 LFM 信号相位相对应的调制信号作为激光相位调制器的输入，在激光基频上调制产生出激光宽带调相信号，将该激光宽带调相信号定义为基于线性调频(LFM)信号的相位调制信号，简称为 LFM 相位调制信号。本文主要分析了

2,4,8,16 值 LFM 相位调制信号的性能。对于 2 值量化情况下的 LFM 相位调制信号，其相位为量化编码后的 2 值信号，将其称之为 LFM2PSK 相位调制信号。增大量化的位数，则依次可得 LFM4PSK, LFM8PSK, LFM16PSK 相位调制信号。设该信号的脉冲宽度为 0.34 μ s，带宽为 3 GHz，采样率为 6 GHz，LFM2PSK, LFM4PSK, LFM8PSK, FM16PSK 相位调制信号波形如图 4 所示。

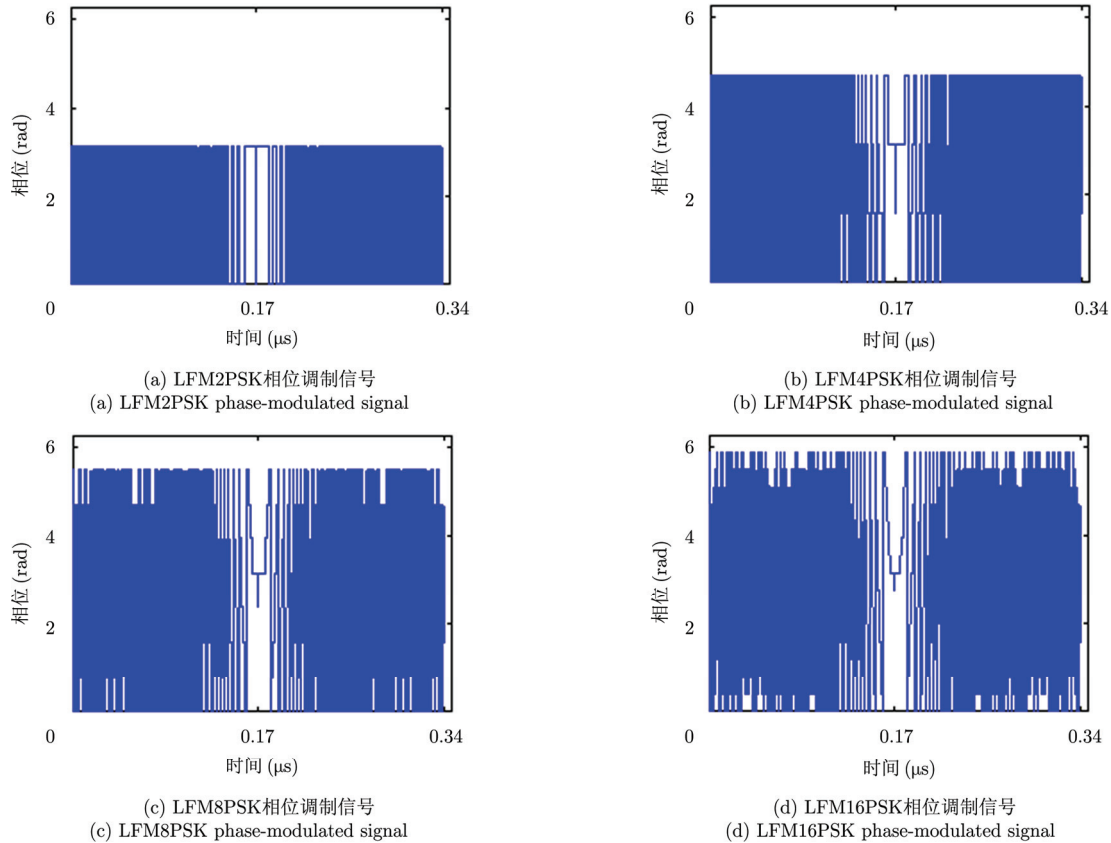


图4 LFM2PSK, LFM4PSK, LFM8PSK, LFM16PSK 相位调制信号

Fig. 4 LFM2PSK, LFM4PSK, LFM8PSK, LFM16PSK phase-modulated signal

图5为 LFM2PSK, LFM4PSK, LFM8PSK, LFM16PSK 相位调制信号的脉冲压缩结果, 显然其远区副瓣较小。随着量化位数的增加, 相位调制信号的脉冲压缩结果越来越逼近理想 LFM 信号的脉冲压缩结果。对 LFM8PSK, LFM16PSK 相位调制信号, 其脉冲压缩后的峰值旁瓣比分别为 -14.04 dB, -13.29 dB, 积分旁瓣比分别为 -10.53 dB, -10.18 dB, 已基本满足成像要求。

当激光相位调制器具有连续相位调制能力时, 其产生的 LFM 相位调制信号为连续相位调制信号。研究量化编码的 LFM 相位调制信号的意义, 一是其可以降低对调制信号产生器(由高速 D/A 形成)的要求, 二是其可以模拟激光相位调制器非线性输入输出关系带来的问题。一方面, LFM 相位调制信号量化位数越少, 对 D/A 位数的要求也就越低, 量化编码的 LFM 相位调制信号对 D/A 位数的要求显然要低于连续相位调制信号。另一方面, 即使激光相位调制器具有连续相位调制能力, 也会因为其非线性输入输出关系而使调制出的 LFM 相位调制信号可能具有跳变的相位变化, 因此, 量化编码的 LFM 相位调制信号可认为是连续相位调制信号在考虑了实

际调相器非线性情况下的一种近似的信号模型, 对该信号的分析有助于对其实际应用性能的评价。

3 相位调制信号的收发和处理

文献[7]给出了机载 SAL 系统实现方案框图, 基于相位调制信号, 本文给出的机载 SAL 相位调制信号发射、接收和数据采集系统框图如图6所示。当发射信号采用脉冲体制时, 激光光源的信号经过相位调制后, 经脉冲选通放大后发射出去; 接收到的回波信号经和激光光源本振信号相干探测 IQ 正交解调后, 送至 AD 采样后在数据记录器中存储。

针对机载 SAL 具有成像幅宽窄(约 1 m)的特点^[7], 本文利用类似于微波 SAR 对线性调频信号采用的“去调频”接收处理方式^[12,13], 对于 LFM 相位调制信号考虑对激光相位调制器输出信号作延时, 并将其作为本振信号, 对激光回波信号实施相干探测 IQ 正交解调, 实现“去调相”接收, 以大幅度降低宽带信号的 AD 采样率。

对于 LFM 相位调制信号采用“去调相”接收方式解调后, 尽管其信号相位有缠绕现象, 但解缠后其变化情况和线性调频信号的“去调频”接收情况相同, 在原理上可通过距离向的傅里叶变换实现脉

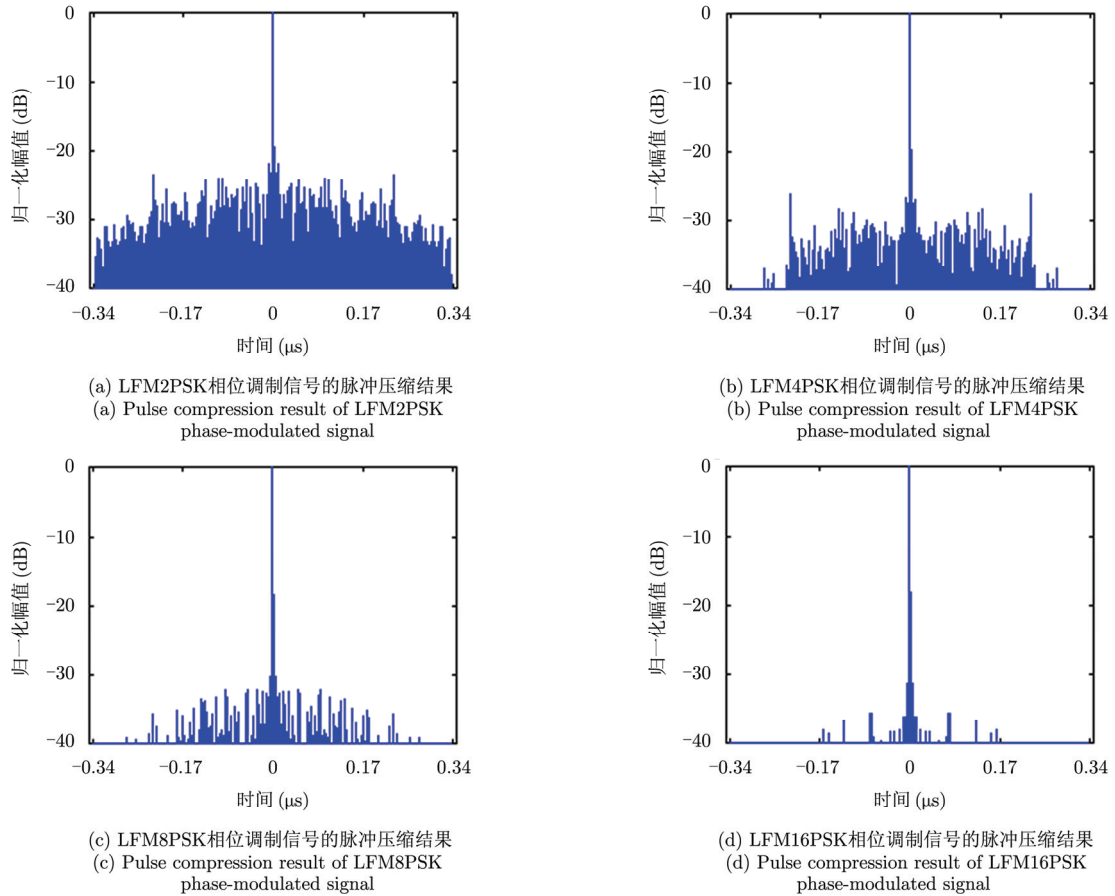


图 5 LFM2PSK, LFM4PSK, LFM8PSK, LFM16PSK 相位调制信号的脉冲压缩结果

Fig. 5 Pulse compression result of LFM2PSK, LFM4PSK, LFM8PSK, LFM16PSK phase-modulated signal

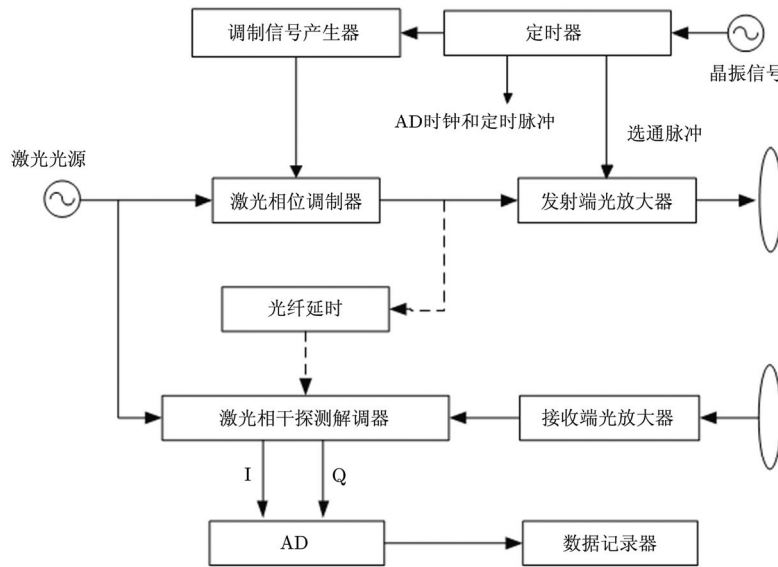


图 6 机载 SAL 相位调制信号发射、接收和数据采集系统框图

Fig. 6 Transmitting, receiving and data collection system scheme of airborne SAL phase-modulated signal

冲压缩。采用“去调相”接收方式可使系统信号收发方案大为简化，与之对应的信号关系如图 6 中的虚线部分所示。

当激光器收发采用两个孔径，根据激光信号收发隔离度高的特点，采用“去调相”接收方式，机载 SAL 也可使 LFM 相位调制信号工作在宽脉冲或

连续波模式,降低系统的峰值功率。由于使用连续波发射信号可避免激光信号脉冲调制带来的频率调制问题,因此 LFM 相位调制信号的连续波模式很值得关注。

以理想的基于 LFM 信号连续相位调制信号和 LFM16PSK 相位调制信号为例进行仿真分析。设信号脉宽为 $10\ \mu\text{s}$, 带宽为 $3\ \text{GHz}$, AD 采样率为 $500\ \text{MHz}$, 当回波信号和激光相位调制器的延时信号时

差为 $0.1\ \mu\text{s}$ (对应距离向场景尺寸为 $15\ \text{m}$)时,经过“去调相”接收和基于距离向傅里叶变换的脉冲压缩的结果如图 7 所示。和理想的基于 LFM 信号连续相位调制信号相比,在脉冲压缩过程中, LFM16PSK 相位调制信号由于量化编码而产生了新的副瓣,但在延时信号时差为 $0.1\ \mu\text{s}$ 的情况下,其副瓣的分布区离目标场景中心较远,且其电平较低,适用于机载 SAL 成像幅宽较窄的使用场合。

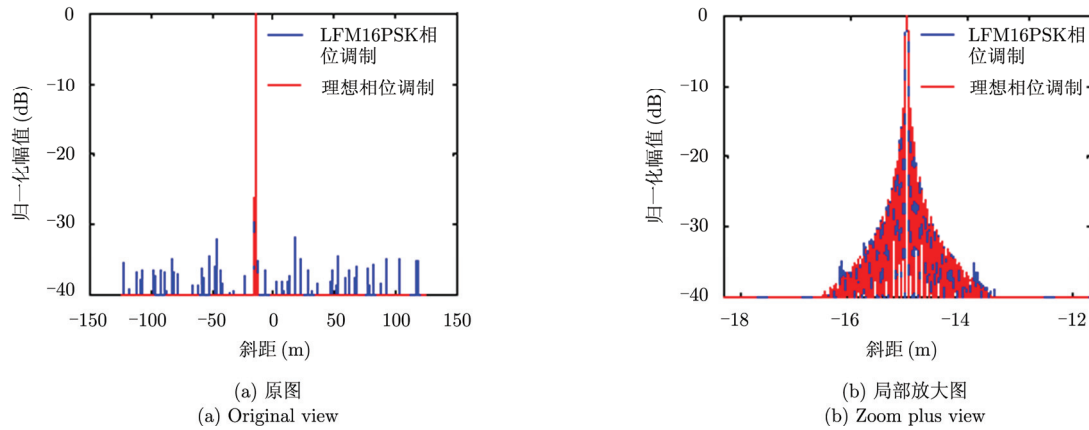


图 7 理想连续相位调制信号和 LFM16PSK 相位调制信号“去调相”后的脉冲压缩结果

Fig. 7 Pulse compression result of ideal continuous phase-modulated signal and LFM16PSK phase-modulated signal after phase-dechirping receiving

4 相位调制信号的成像仿真分析

本文仿真分析工作中,成像处理采用了距离徙动算法又称 ωK 算法^[14],机载 SAL 的系统参数和目标场景参数设置如表 1 所示,分别对窄脉冲 M 序列二相编码信号,16PSK Frank 码信号和 LFM16PSK 相位调制信号进行了成像仿真,同时对 LFM16PSK 相位调制信号增加了宽脉冲“去调相”接收方式下的成像仿真,相位调制信号的种类和参数设置如表 2 所示。

图 8,图 9,图 10 分别为 M 序列二相编码信号,16PSK Frank 码信号,LFM16PSK 相位调制信号的成像结果,图 11 为 LFM16PSK 相位调制信号在宽脉冲“去调相”接收方式下的成像结果,显示图像的归一化幅度动态范围为 $30\ \text{dB}$ 。

从成像仿真结果看,在窄脉冲条件下,M 序列二相编码信号和 16PSK Frank 码信号的距离向副瓣区离目标场景中心较远,LFM16PSK 相位调制信号的成像效果和理想的 LFM 信号成像结果相近,距离向副瓣集中在目标场景中心;在宽脉冲条件下,“去调相”接收方式下的 LFM16PSK 相位调制信号成像与窄脉冲条件下的 LFM16PSK 相位调制信号的

成像效果相近。经过插值后的距离向和方位向剖面分析,图像分辨率和理论值相符。

表 1 机载 SAL 的系统参数和目标场景参数设置

Tab. 1 Parameters setting of airborne SAL system and target scene

参数	数值
激光波长	$1.55\ \mu\text{m}$
平台高度	$1000\ \text{m}$
飞行速度	$50\ \text{m/s}$
场景中心斜距	约 $1414.2\ \text{m}$
斜视角	0°
入射角	45°
十字形点目标数目	5
场景方位向宽度	$0.2\ \text{m}$
场景地距向宽度	$1.5\ \text{m}$
点目标方位向间距	$0.05\ \text{m}$
点目标地距向间距	$0.1\ \text{m}$
合成孔径时间	$4\ \text{ms}$
脉冲重复频率	$90\ \text{kHz}$

表 2 相位调制信号的种类和参数

Tab. 2 Classes and parameters of phase-modulated signal

信号	带宽(GHz)	子码宽度(ns)	码长	脉宽(μ s)	AD 采样率(GHz)
M 序列	3	0.33	1023	0.340	6.0
Frank 码	3	0.33	256	0.085	6.0
LFM 相位调制信号	3	-	-	0.340	6.0
“去调相”方式下的 LFM 相位调制信号	3	-	-	10.000	0.5

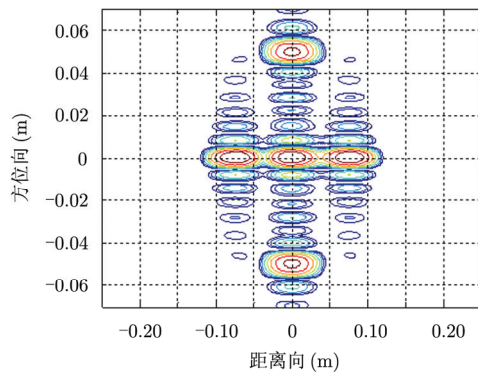


图 8 码长为 1023 的 M 序列成像结果(8 倍插值后)

Fig. 8 Imaging result of M sequence with code length of 1023 (8 multiple interpolation)

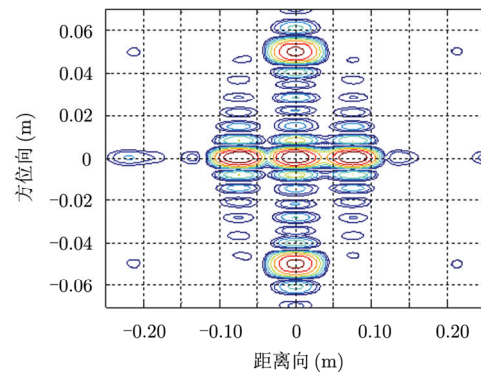


图 9 码长为 256 的 Frank 码成像结果(8 倍插值后)

Fig. 9 Imaging result of Frank code with code length of 256 (8 multiple interpolation)

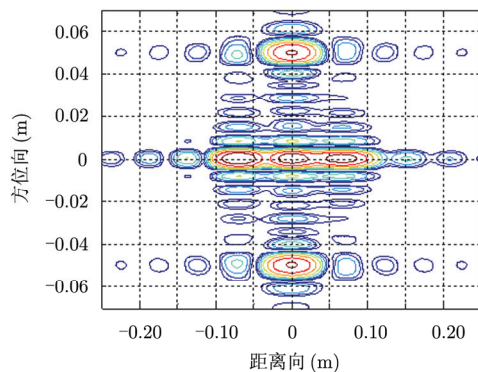


图 10 LFM16PSK 相位调制信号成像结果(8 倍插值后)

Fig. 10 Imaging result of LFM16PSK phase-modulated signal (8 multiple interpolation)

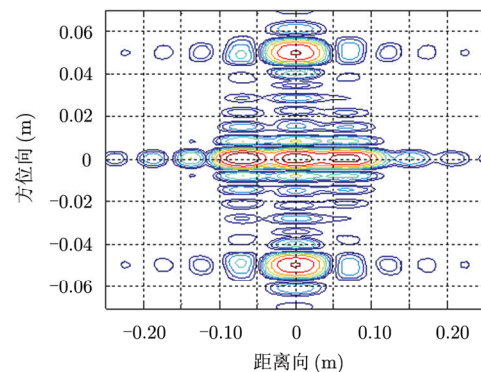


图 11 LFM16PSK 相位调制信号“去调相”接收成像结果(8 倍插值后)

Fig. 11 Imaging result of LFM16PSK phase-modulated signal after phase-dechirping receiving (8 multiple interpolation)

5 结束语

本文将相位调制信号用于机载 SAL，分析了 3 种相位调制信号的性能，研究了相位调制信号的收发方式和成像处理方法。研究表明，这 3 种相位调制信号都可以满足机载 SAL 的使用要求。

对宽脉冲 LFM 相位调制信号，由于采用“去调相”接收方式可以大幅度降低宽带信号的 AD 采样率和发射峰值功率，并减少系统的工程实现难度，该信号波形将作为机载 SAL 的主选波形。本文的研

究工作对实际机载 SAL 的研制工作具有重要的参考价值。

虽然本文在理论上对机载合成孔径激光雷达相位调制信号进行了性能分析，但考虑到实际机载 SAL 的技术实现环节复杂，分析激光信号存在的相位误差，并实施校正以满足成像要求，值得在下一步工作中深入研究。

参考文献

- [1] Ricklin J C and Tomlinson P G. Active imaging at DARPA[J].

- Proceedings of SPIE*, 2005, 5895: 589505-1-589505-9.
- [2] Liu Li-ren. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 579-599.
- [3] 郭亮, 邢孟道, 张龙, 等. 室内距离向合成孔径激光雷达成像的实验研究[J]. 中国科学E辑: 技术科学, 2009, 39(10): 1678-1684.
Guo Liang, Xing Meng-dao, Zhang Long, *et al.* Research on indoor experimentation of range SAL imaging system[J]. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*, 2009, 39(10): 1678-1684.
- [4] 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.
Wu Jin. On the development of synthetic aperture lidar imaging[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(4): 353-360.
- [5] 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.
Hong Guang-lie, Wang Jian-yu, Meng Zhao-hua, *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.
- [6] Krause B W, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. Optical Society of America/Conference on Lasers and Electro-optics(OSA/CLEO), Maryland, USA, 2011: PDPB7.
- [7] 李道京, 张清娟, 刘波, 等. 机载合成孔径激光雷达关键技术和实现方案分析[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 143-151.
Li Dao-jing, Zhang Qing-juan, Liu Bo, *et al.* Key technology and implementation scheme analysis of air-borne synthetic aperture lidar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 143-151.
- [8] Mahafza B R and Elsherbeni A Z. MATLAB Simulations for Radar Systems Design[M]. Chapman & Hall/CRC Press LLC, 2004, Chapter 4.
- [9] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009: 514-515.
Ding Lu-fei, Geng Fu-lu, and Chen Jian-chun. Principles of Radar[M]. Xi'an: Xidian University Publisher, 2009: 514-515.
- [10] Skolnik M I. Radar Handbook[M]. 3rd Edition, New York: McGraw-Hill, 2008, Chapter 8.
- [11] Richards M A. Fundamentals of Radar Signal Processing[M]. New York: McGraw-Hill, 2005, Chapter 4.
- [12] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 24-30.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 24-30.
- [13] Adany P, Allen C, and Hui R. Chirped lidar using simplified homodyne detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(16): 3351-3357.
- [14] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Norwood, MA, USA, Artech House, Inc., 2005: 323-368.

作者简介



杜剑波(1991-), 男, 安徽滁州人, 中国科学院电子学研究所读硕博连读生, 研究方向为雷达信号处理。
E-mail: jianbodu1991@163.com



马萌(1989-), 男, 河南周口人, 中国科学院电子学研究所读硕博连读生, 研究方向为雷达信号处理。
E-mail: mameng_ee@163.com



李道京(1964-), 男, 陕西西安人, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为雷达系统和雷达信号处理。
E-mail: lidj@mail.ie.ac.cn