

机载合成孔径激光雷达关键技术和实现方案分析

李道京^{*①②} 张清娟^{①②③} 刘 波^{①②③} 杨 宏^① 潘 洁^①

^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: 该文介绍了机载合成孔径激光雷达的研究现状,分析了国内研究工作的主要问题和系统关键技术,并结合原理样机实例,提出了合成孔径微波 SAR 电子学技术和光学技术相结合的系统实现方案,同时分析了未来实用系统指标和技术途径,论述了机载合成孔径激光雷达的应用方向。

关键词: 激光雷达; 合成孔径; 成像处理; 相干探测; 相位校正

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)02-0143-09

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.13021

Key Technology and Implementation Scheme Analysis of Air-borne Synthetic Aperture Ladar

Li Dao-jing^{①②} Zhang Qing-juan^{①②③} Liu Bo^{①②③} Yang Hong^① Pan Jie^①

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

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

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

Abstract: The current status and the domestic research problems of air-borne Synthetic Aperture Ladar (SAL) are introduced, and key technologies are analyzed. Based on a principle prototype, a system implementation scheme with a combination of SAR electronics technology and optical technology is proposed. Future practical system metrics and technological approaches are analyzed. Further, the application direction of the SAL is clarified.

Key words: Ladar; Synthetic aperture; Imaging processing; Coherent detection; Phase correcting

1 引言

激光雷达成像系统和光学成像系统一样,其空间分辨率都受系统光学孔径的限制。对于一定的工作波长,一定大小的系统光学孔径,分辨率会随着距离的增加而下降。因此,高分辨率的远距离成像需要很大的系统光学孔径,在实际系统中很多因素限制了系统光学孔径的增加。机载合成孔径激光雷达(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^[1,2]。

美国雷声公司于2006年2月报导了机载合成孔径激光雷达实验结果,该样机采用了1.5 μm 成熟的激光光源和光纤器件。2006年4月美国诺斯罗普·格

鲁门公司采用最新研发的CO₂激光器,在美国国防部先进研究项目局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)的资助下,成功演示了机载合成孔径激光雷达成像实验^[3]。上述机载实验验证了该技术在空间远程探测和高分辨率成像应用中的巨大潜力。在美国军方的继续资助下,该技术正朝实用化方向进展。2011年美国洛克希德-马丁公司独立完成了机载合成孔径激光雷达演示样机的飞行实验^[4],对距离1.6 km的地面目标实现了幅宽1 m,分辨率优于3.3 cm的成像结果。

本文分析了SAL国内研究工作中的主要问题,结合机载SAL原理样机实例,提出了合成孔径微波SAR (Synthetic Aperture Radar)电子学技术和光学技术相结合的机载SAL系统实现方案,分析了未来实用系统指标和技术途径,论述了其应用方向。

2 国内研究工作中的问题和下步工作思路

国内中国科学院上海光机所^[5,6]、西安电子科技大学^[7,8]、中国科学院电子所^[9]、中国科学院上海技

2013-03-11 收到, 2013-05-03 改回; 2013-05-21 网络优先出版

国家自然科学基金(61271422)资助课题

*通信作者: 李道京 lidj@mail.ie.ac.cn

术物理所^[10]都积极开展合成孔径激光成像技术研究工作,均取得了分辨率在毫米级的成像效果,但存在的主要问题有:

(1) 状态:主要工作停留在室内桌面试验状态,尚未形成机载 SAL 实验系统;

(2) 分辨率:桌面系统的分辨率在毫米量级,远高于航空实际应用需求的 5~10 cm 分辨率;

(3) 体制:为产生大的距离向信号带宽,采用了类似 SAR 频率步进的技术方案,用慢时间获取信号带宽;为形成方位向带宽的相对空间步进也很慢,由此产生长达数十分钟的数据获取时间,在该条件下对运动误差的测量提出了过高的要求,没有考虑到机载 SAL 合成孔径成像时间在毫秒量级的特点;

(4) 处理:从事研究工作单位多集中在光学专业,对将目前高分辨率 SAR 的成像处理技术和相位补偿方法用于 SAL 考虑不多。

值得注意的是,和广泛使用的激光通信技术一样,目前的微波 SAR 也经常使用激光光纤延时线,将宽带微波信号(常用的如 8~12 GHz)采用调幅方式调制到光波,经光纤延时后,再经包络检波解调到微波频段,注入雷达天线和接收机用于宽带微波信号的内定标。

激光调幅技术也可考虑用于激光测风雷达,此时其测距和多普勒测速虽等效在微波频段完成,但空气分子和气溶胶回波幅度对激光载波较为敏感的属性仍可保留。与此同时,该调幅技术也可考虑用于 3 维地形测绘激光雷达,在维持激光光束窄空间分辨率高的基础上,采用微波 SAR 脉冲压缩技术实现远距离高距离分辨率探测,并平衡峰值功率和平均功率的矛盾。

在激光调幅技术发展的同时,电信号在激光载波上的相位/频率相干调制和解调器件技术也得到了长足的发展,在国内机载 SAL 的研制思路,本文考虑将微波 SAR 高水平的电子学技术和光学技术结合,显然有利于机载合成孔径激光雷达的工程实现。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电子学技术和光学技术的各自优势。

3 机载 SAL 的实现方案和关键技术

本文机载 SAL 系统拟采用微波 SAR 电子学技术和光学技术结合的实现方案,涉及的关键技术包括机载 SAL 系统设计技术,高灵敏度激光信号相干调制解调技术,高分辨率宽幅成像技术,大功率高相干激光信号放大发射和接收技术,运动误差处理

和相位误差高精度补偿技术,高分辨率激光成像和数据处理技术,大气扰动抑制技术等。

为便于分析问题,给出一个机载 SAL 原理样机的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 机载 SAL 原理样机的主要技术指标

Tab. 1 Main technical index of airborne SAL prototype

载机	运 12	飞行高度	约 1 km
飞行速度	约 50 m/s	激光波长	1.55 μm
入射角	约 45°~50°	方位向合成孔径长度	0.1~0.2 m
地距向幅宽	约 1.5 m	方位向合成孔径时间	2~4 ms
最高分辨率	5 cm	作用距离	约 1.5 km

3.1 方案设计思路

系统采用脉冲压缩体制获取高距离分辨率,所需的宽带信号波形可选择为线性调频 LFM 信号或相位编码信号。采用高频率稳定度点频激光光源,将宽带信号相干调制在激光载波上利用光放大器放大后经光学系统发射,回波经光学系统接收放大后,经激光外差探测相干解调成电信号,采用微波 SAR 的技术流程进行信号处理。

为解决激光光源相位不稳定以及和微波信号源不相干问题,将激光发射信号耦合到接收机中,进行数据采集和记录,利用该耦合信号形成参考信号对回波进行脉冲压缩,同时实现激光和微波信号初相位变化校正。

合成孔径成像时间在毫秒量级(2~4 ms/1.5 km 斜距),平台振动的问题可通过光学相机稳定平台(或磁悬浮稳定平台)隔离载机振动解决,同时实现激光光束指向稳定,采用激光器倒挂在稳定平台上的方式实现其在舱外机腹下的侧视工作。

3.2 系统实现方案

基于上述思路,图 1 给出了机载 SAL 原理样机系统实现方案框图。系统主要由激光单元(含激光光源、发射和接收端放大器、激光信号相干调制器、激光相干外差探测解调器)、微波单元(含低噪声放大器 LNA、滤波器、微波信号相干调制和解调器、频率源、定时器、相位编码信号或线性调频 LFM 信号产生器等)、数据单元(含 AD 和数据记录器)、稳定平台、位置和姿态测量系统(Position Orientation System, POS)、监控单元和电源等组成。

系统实现框图考虑了相位编码和线性调频 LFM 两种信号形式,分别对应微波单元 I 和微波单

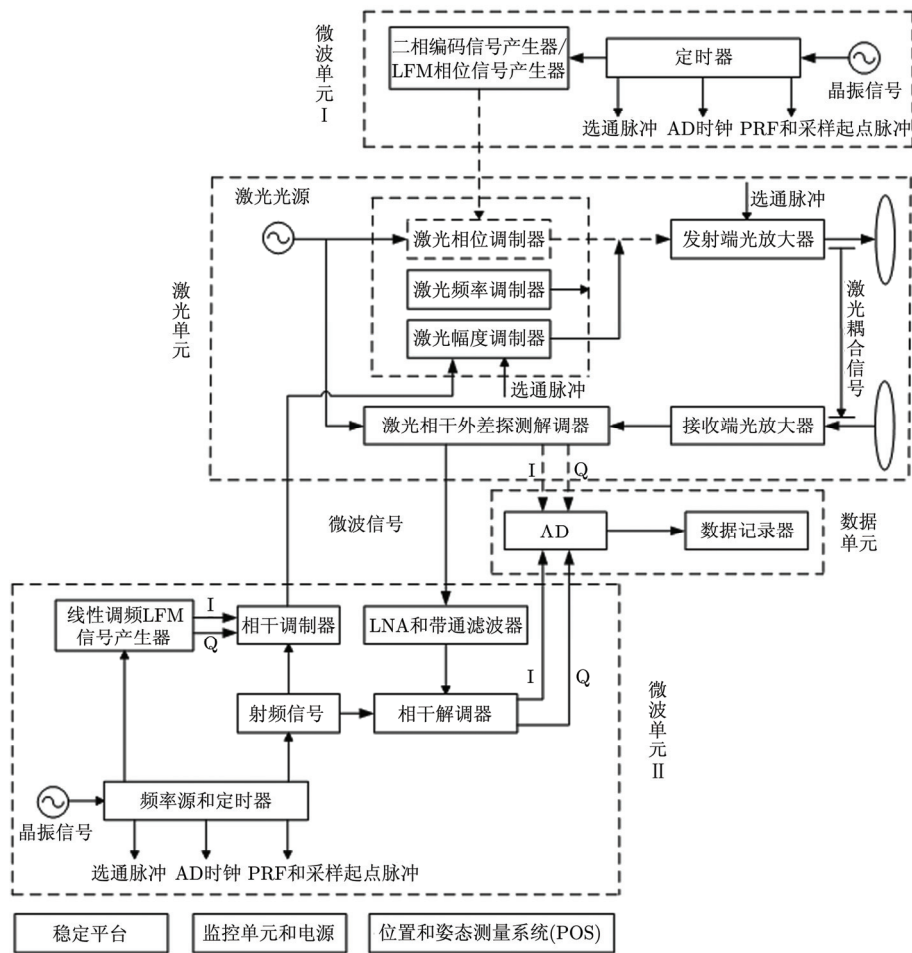


图1 机载SAL系统实现方案框图

Fig. 1 Implementation scheme of airborne SAL system

元II。当使用相位编码信号时，由码产生器电路/高速DA产生的相位编码信号直接作用于激光相位调制器，在激光载波上产生相位编码信号，利用光放大器放大后经光学系统发射。回波经光学系统接收放大后，经激光外差探测相干解调成电信号通过AD采集。当使用线性调频LFM信号时，该线性调频信号的产生、调制、发射、接收和解调过程和微波SAR接近。

载机选为“运12”飞机。由于体积重量较小，SAL原理样机主机，包括激光单元、微波单元和POS，可整体安装在一光学相机常用的PAV30/80稳定平台上，其它数据单元、监控单元和电源可安装在舱内机架上。

由于“运12”飞机飞行高度较低，飞行速度较慢，SAL主机可通过稳定平台直接挂在舱外机腹实现侧视。基于上述安装布局，载机仅需要具备可安装PAV稳定平台的窗口，机腹下具有足够的适于主机工作的离地空间，机顶可安装POS所需的GPS天线，具备DC28V供电能力，而不需对飞机进行较大的改装。

3.3 系统参数

经过分析和计算初步确定本文机载SAL原理样机参数如表2所示。

表2 机载SAL原理样机参数

Tab. 2 Parameters of airborne SAL prototype

参数	设计值
激光频率稳定度(10~20 μs)	优于 ±5 kHz
发射光束散角	约 0.8 mrad
接收光学口径	约 100 mm
发射峰值功率	10 W
发射平均功率(最大占空比 10%)	1 W
重复频率	83~90 kHz
脉冲宽度	0.5~1 μs
信号带宽	3.6 GHz
AD 数据采样率	4 GHz

3.4 主要性能指标分析

(1) 作用距离和信噪比

本文机载 SAL 原理样机最大作用距离设置为 1.5 km, 依据表 1 所列样机参数经计算分析, 系统的单脉冲信噪比可优于 15 dB。假定相干积累有效脉冲数按 100 个考虑, 可提高信噪比 20 dB, 系统成像信噪比可以优于 35 dB。

(2) 方位向信号带宽和重复频率

本文机载 SAL 原理样机最大作用距离设置为 1.5 km, 其最大脉冲宽度设置为 1 μ s, 为保证测距不模糊, 其重复周期约为 11 μ s, 对应的最高脉冲重复频率 PRF 约为 90 kHz。本文激光波束宽度(发射光束散角)确定为约 0.8 mrad, 当载机速度为 50 m/s, 正侧视时其方位向的多普勒带宽约为 51.6 kHz, 当重复频率选为 90 kHz, 其方位向过采样率为 1.7 倍; 当重复频率选为 83 kHz, 其方位向过采样率为 1.6 倍。由此确定本文重复频率变化范围为 83~90 kHz。

(3) 光源的频率稳定性和信号频谱分析

微波 SAR 信号具有较高的频率稳定度, 为进一步提高图像质量, 对微波信号源又提出了严格的相位噪声要求, 相位噪声主要产生宽带相位误差, 会使 SAR 图像的对比度、信噪比下降, 积分旁瓣比升高。

激光雷达的波长短至微米量级, 其频率稳定度较差。本文机载 SAL 原理样机实现 5 cm 分辨率所需发射信号带宽约为 3.6 GHz, 经分析, 激光脉冲间信号 500 kHz 的频率变化即可对成像产生影响。为解决光源频率不稳定问题, 距离向脉冲压缩时可在距离频域做滤波处理, 舍弃脉冲间频率变化范围对应的频率分量, 当脉冲间信号频率变化范围相对发射信号带宽较小时, 对距离向分辨率的影响不大。

目前高稳定激光器谱线宽度已可达到 10 kHz 量级, 对应的频率稳定度也在 ± 10 kHz/10~20 μ s 量级, 其光源性能可满足使用要求。

确定本文机载 SAL 原理样机最小的合成孔径时间为 2 ms, 合成孔径长度为 0.1 m, 方位分辨率为 1.1 cm, 其对应的频率分辨率为 500 Hz。回波信号方位向全孔径带宽为 51.6 kHz, 对应的全孔径方位向分辨率约为 1 mm, 全孔径合成孔径时间为 20 ms, 全分辨率合成孔径长度为 1 m, 但要实现 5 cm 分辨率, 在方位频域只需要 1 kHz 的信号带宽。

上述分析表明, 机载 SAL 成像处理不仅可使用微波 SAR 的子孔径成像方法, 子孔径时间 2 ms, 而且可通过方位频域滤波处理抑制和运动无关信号的影响。对激光信号以 1 kHz 带宽为间隔进行子孔

径成像处理后, 可再进行非相干积累提高信噪比, 等效做微波 SAR 的多视处理, 在处理过程中也可结合微波 SAR 常用的自聚焦技术。激光信号方位频谱分析和处理范围如图 2 所示。

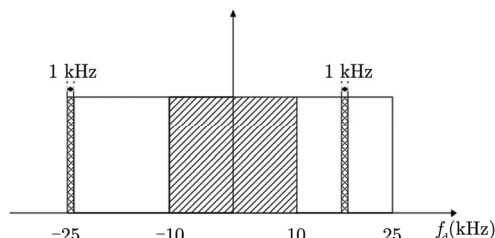


图2 激光信号方位频谱分析和处理范围

Fig. 2 Azimuth spectrum analysis and processing range of laser signal

(4) 振动影响分析

由于波长很短, 载机振动对机载 SAL 成像的影响严重, 文献[13]提出了一种振动自动抑制方法很值得关注。为减少振动影响, 本文机载 SAL 原理样机拟将整个激光单元装在具有减振器的 PAV30/80 稳定平台上。

对一个典型的减振器来说, 当振动频率从 10 Hz 变化至 250 Hz 时, 加速度量值从 1 g 衰减到 0.014 g, 衰减倍数为 71 倍; 振动频率从 100 Hz 变化至 250 Hz 时, 加速度量值从 0.11 g 衰减到 0.014 g, 衰减倍数为 7.9 倍。根据减振器的频率特性, 振动频率越高, 残留的振动幅度越小, 采用稳定平台, 可大幅度缓解 20 Hz~2 kHz 振动频率对本文成像的影响。

根据分析, 目前机械稳定平台的位置精度在 50 μ m 量级, 未来磁悬浮稳定平台的位置精度在 30 μ m 量级, 由于平台振动误差远大于波长, 振动产生的较大相位误差显然不能满足成像要求, 且会使激光回波信号频谱受到影响, 并进一步影响自聚焦技术的使用。经过分析, 方位向的振动对成像影响较小, 以下主要分析距离向振动的影响, 并引入多普勒频率对其描述。

本文机载 SAL 原理样机合成孔径成像时间在 2 ms 左右, 其信号频率分辨率约为 500 Hz, 平台振动产生的多普勒信号频率小于 500 Hz 时, 系统已不能分辨, 故振动影响分析应主要考虑振动产生的多普勒频率在 kHz 量级的信号, 并需将平台振动产生的多普勒频率控制在一定的范围里。

在对应于 250 Hz 振动频率的 4 ms 时间内, 当平台的位置移动范围为 ± 5 μ m, 在激光波长上可能产生的多普勒频率为 ± 10 kHz; 在对应于 100 Hz 振动频率的 10 ms 时间内, 当平台的位置移动范围为 ± 15 μ m, 在激光波长上可能产生的多普勒频率为

± 12 kHz; 在对应于 50 Hz 振动频率的 20 ms 时间内, 当平台的位置移动范围为 ± 25 μm , 在激光波长上可能产生的多普勒频率约为 ± 10 kHz。上述分析给出了振动产生的信号多普勒频率变化范围, 当机载 SAL 方位向运动时振动谱会以周期性正弦形式调制到激光回波信号的频谱上。

对振动影响的分析要充分考虑振动产生的机理和本文成像时间较短的特点。通常, 振动可分为低频和低频两部分。从振动产生的机理上来说, 低频振动通常都是多频分量, 但低频振动的影响需要较长的时间才能够体现, 本文毫秒量级短时间成像的特点使其影响通过频域子带滤波容易得到抑制。根据振动产生的机理, 高频振动通常都是单频分量且频率相对固定, 距离向的高频振动主要会使激光信号的方位频谱受到调制并影响成像, 通过对振动谱进行参数估计并实施频率补偿可抑制其影响。对振动影响在频域处理后, 可进一步使用自聚焦技术补偿相位误差以获得理想的成像效果。

对本文机载合成孔径激光雷达来说, 采用有效的减震措施并选用合理的信号处理方法将是后续工作的一个研究重点, 但将平台振动影响产生的多普勒频率控制在一定范围内(如 -10 kHz $\sim +10$ kHz), 对后续的成像处理具有重要意义。

(5) 数据采集方式和数据量

本文机载 SAL 原理样机距离向观测幅宽虽很小, 但为解决激光光源信号和微波信号不相干问题, 需记录发射信号并实施初相位校正。设计的一个信号采集方式如图 3 所示。

本文 5 cm 距离分辨率信号带宽约需 3.6 GHz, AD 采样率选为 4 GHz, 每脉冲距离向采样时间初步设定在 2.3 μs 时, 其距离向的采样点数约为 9 k。

数据采集过程中, 为使系统简化, 用于系统定标的耦合发射信号的记录在回波后实施, 当前时刻记录的数据用于对下一个重复周期回波信号的定标, 相关的初相位校正处理在脉冲压缩过程中同时实施。

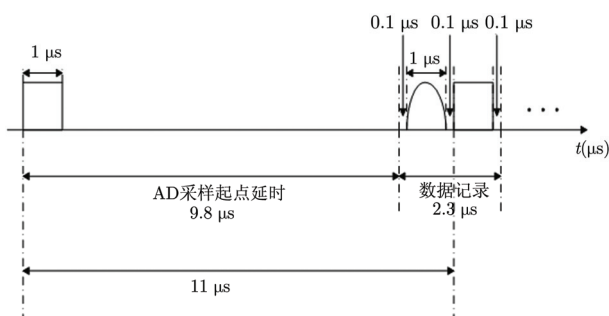


图3 数据采集和记录方式

Fig. 3 Method of data acquisition and recording

SAL 的数据获取量可以通过如下关系式分析得到:

$$\text{数据量/秒} = 2 \times (\text{距离向采样点数} \times \text{量化位数}) \times \text{PRF}$$

数据量分析如表 3 所示。

表3 机载SAL原理样机数据量

Tab. 3 Data volume of airborne SAL prototype

脉冲重复频率(kHz)	90
距离向采样点数	9216
数据量(MB/s)	829.44

本文数据率较高, 因场景较小, 合成孔径时间较短, 实际数据记录时, 可以 1 s 为单位分时记录, 对应的方位向场景尺寸约为 50 m。

3.5 技术方案分析

从目前器件的技术指标看, 本文机载 SAL 原理样机激光单元中涉及的激光光源、激光放大器、激光相干外差探测解调器、微波单元和数据单元的功能指标实现虽有一定难度但均具备可行性, 国外对相关问题的研究工作参见文献[11,12]。下面主要针对技术方案中的难点进行分析, 并提出解决问题的办法。

(1) 宽带信号波形选择和激光信号调制

宽带信号波形选择和激光信号调制器的种类和参数密切相关, 目前激光信号调制器分为调频、调相和调幅 3 种, 由于其频率调制主要使用声光器件实现, 其频率调制带宽较小, 只能用于低分辨率成像系统, 不适合本文机载 SAL 原理样机使用, 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和激光幅度调制器。

本文机载 SAL 原理样机若使用激光相位调制器, 其相位调制信号波形可考虑使用二相编码脉冲信号, 信号带宽约为 3.6 GHz, 系统实现如图 1 中所示的微波单元 I。选用 M 序列二相编码信号时, 编码信号可用码产生器电路实现, 子码宽度为 0.28 ns, 该方案要求系统的时间分辨率较高, 时间量化间隔需优于 0.14 ns, 系统时钟频率约需 8 GHz。当脉冲宽度为 1 μs , 其码长为 3571; 当脉冲宽度为 0.57 μs , 其码长为 2048; 对应的脉压副瓣电平可优于 16 dB(副瓣电平与码长的平方根成反比)。

采用二相编码信号存在多普勒容限问题, 其多普勒容限为两倍码长的倒数。对本文 1 μs 的码长信号, 其多普勒容限为 500 kHz。扩大多普勒容限的一种方法是使用多相码, 极限情况就是对信号相位

进行连续调制。若激光相位调制器具备一定的相位连续调制能力,且调制电压和调制相位具有较好的线性关系,也可考虑用线性调频 LFM 信号的相位变化曲线对应的 LFM 相位信号实施相位调制,LFM 相位信号产生需利用高速 DA 实现。二相编码信号和 LFM 信号产生的调制相位如图 4 和图 5 所示。

二相编码激光回波信号的相干外差探测,需使用宽带光电探测器并通过正交双通道将回波信号解调成 IQ 基带信号,供高速 AD 采样后提取回波信号的幅度和相位信息,其信号 2 维成像处理过程和微波 SAR 相近。

本文机载 SAL 原理样机也可考虑使用激光幅度调制器,其信号波形可考虑使用微波 SAR 常用的线性调频 LFM 信号,系统实现如图 1 中所示的微波单元 II。3.6 GHz 带宽的基带信号可通过高速 DA 来产生,正交调制在 3 GHz 的射频信号上形成频率范围为 1.2~4.8 GHz 的宽带微波信号,用于对激光信号进行调幅。由于宽带信号在基带产生,系统时钟频率约需 5 GHz。

一般认为,采用调幅信号形式存在信道衰减问题,但本文机载 SAL 原理样机由于距离向观测幅宽

很小,该问题的影响可能并不突出,故采用激光宽带调幅信号,对距离向脉冲压缩和 5 cm 距离分辨率的实现应影响不大。采用调幅信号的主要问题在于回波方位向多普勒信号的提取困难,并会导致方位向成像困难。

经过计算,本文机载 SAL 原理样机的聚焦深度约为 3.2 km,远大于距离向的观测幅宽,观测场景地物散射点应具备相同的多普勒相位变化历程,基于此性质,可考虑同时再发射 1 个窄带调幅激光脉冲信号(该信号在脉宽内不调幅,假定信号脉宽 0.5 μ s,信号带宽 2 MHz,对应的距离分辨率 75 m)在距离向低分辨率方式下获取地物散射点激光回波方位向的高分辨率多普勒信息。

宽带调幅信号和窄带调幅信号可统称为调幅信号,适当调整激光幅度调制器上选通脉冲的时序和逻辑关系,即可能实现该复合调幅信号的产生。图 6 和图 7 给出了该复合调幅信号的波形和幅度调制后的激光信号波形示意图。

上述激光回波信号通过激光相干外差探测解调器后,一方面形成的宽带微波信号经 LNA 和带通滤波器,在射频完成 IQ 基带信号解调,经高速 AD 采

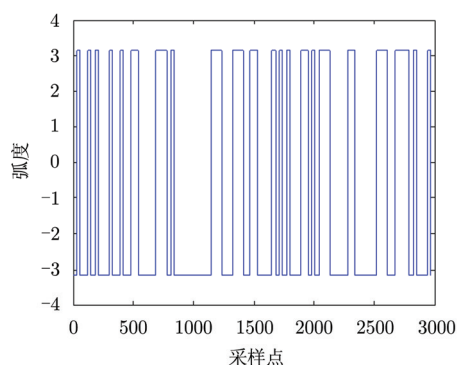


图4 二相编码信号的调制相位

Fig. 4 Modulating phase of binary phase-coded signal

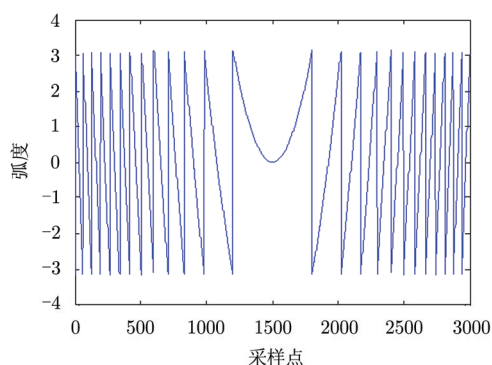


图5 LFM信号的调制相位

Fig. 5 Modulating phase of LFM signal

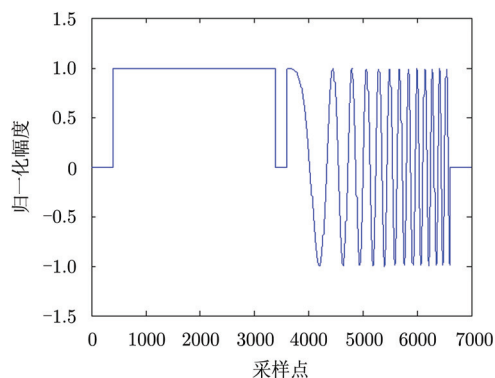


图6 复合调幅信号的波形

Fig. 6 Wave form of compound amplitude modulated signal

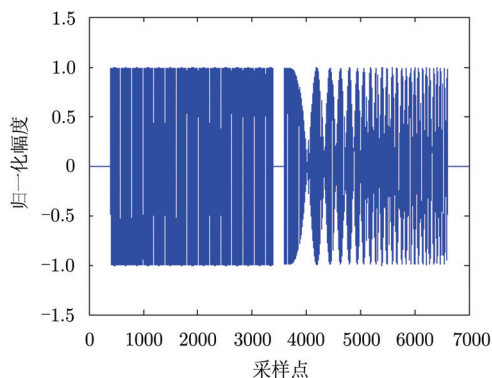


图7 幅度调制后的激光信号波形

Fig. 7 Wave form of laser signal after amplitude modulating

集后,用于距离向的高分辨率脉冲压缩;另一方面形成的窄带低频信号通过正交双通道解调成 IQ 基带信号,供 AD 采样后用于获取回波方位向的高分辨率多普勒信号。此时,用于多普勒信号获取的光电探测器可选为窄带,并可使用低速 AD。

采用复合调幅激光信号形式,客观上把机载 SAL 2 维成像所需的距离向和方位向 2 维高分辨率信号实现过程分解成了两个 1 维信号实现过程,即分别形成一个距离向高分辨率信号和一个方位向高分辨率信号。两个信号均为复信号并可经处理具备相干性,其距离向高分辨率信号具有距离频谱宽和方位多普勒频谱窄的特点,方位多普勒频谱宽度主要由射频信号波长决定;其方位向高分辨率信号具有距离频谱窄和方位多普勒频谱宽的特点,方位多普勒频谱宽度主要由激光信号波长决定。

从概念上讲,将处理得到的激光回波方位向高分辨率多普勒信号相位补入其距离向高分辨率信号,有可能合成出一距离向和方位向均为宽带的 2 维信号,实现机载 SAL 的 2 维成像。上述复合调幅信号的产生过程中,宽带调幅信号和窄带调幅信号两者在快时间是分离的,这种信号表述形式易于分析问题。从实际应用的角度考虑,两调幅信号在快时间域也可以叠加产生,其典型的信号形式如文献[10],通过滤波即可将其分离。以上这两种复合调幅信号的相关处理技术都值得进一步研究。

从上述分析结果看,用调相和调幅两种方式实现激光信号调制,均存在一些问题,相比来说在现阶段选用调相方式具有较好的可行性。

由于机载 SAL 的所需的成像分辨率在厘米量级,其信号频率调制带宽相对于光频很小,随着器件技术的发展,相信在不远的将来会出现频率调制带宽在 3~5 GHz 激光频率调制器,届时 SAL 的信号产生、接收、处理流程将和微波 SAR 趋同。

(2) 激光信号和微波信号的相干处理

为解决激光光源信号和微波信号源不相干问题,将激光发射信号耦合到接收机中,进行数据采集和记录,利用该耦合信号形成参考信号对回波信号进行初相位校正,即可去除两个源不相干带来的随机初相位,该处理可结合距离向的脉冲压缩过程完成。这项技术在 20 年前已广泛用于磁控雷达相干性的提高和 MTI 处理的实现,对本文机载 SAL 可同时去除激光发射信号调制放大过程中信号相位变化影响,提高全系统信号的相干性。

(3) 激光波束指向控制

本文机载 SAL 原理样机激光器波束宽度为 0.8

mrad 约 0.046°,为控制波束指向,拟将整个激光主机装在 PAV30/80 稳定平台上。

稳定平台的指向控制精度约为 0.1°~0.2°,为在存在指向误差的情况下实现精确成像,系统拟同时配置位置和姿态测量系统(POS510),其横滚和俯仰向测量精度为 0.005°,真航向测量精度为 0.008°,载机速度测量精度为 0.005 m/s, POS 的测量数据可用于实际激光回波数据运动误差的初校正。

激光波束指向控制误差为 0.2°时,机载 SAL 有可能产生 225 kHz 的多普勒频差,对码长较长的二相编码信号的脉冲压缩有一定影响。为扩大机载 SAL 作用距离,需使用码长较长的相位编码信号,故研究 LFM 相位信号相位调制技术具有现实意义。

(4) 成像处理算法

经过分析,正侧视时 2 ms 合成孔径时间获得的合成孔径长度为 0.1 m,方位分辨率约为 1.1 cm,对应的距离弯曲最大值为 8.3×10^{-4} mm。

经过分析,方位分辨率确定为 5 cm 时,聚焦深度为 32226 m;方位分辨率确定为 1 cm 时,聚焦深度为 129 m。

根据上述分析,本文机载 SAL 成像算法可选择为 RD 算法,非正侧视回波信号有距离走动时可考虑在使用 POS 数据的基础上用 KEYSTONE 变换进行距离徙动校正。RD 算法的选择分析,也同时说明了本文机载 SAL 采用复合调幅激光信号形式实现 2 维成像的可行性。

(5) 大气扰动抑制

文献[8]研究了大气扰动对激光成像的影响,其结论为当合成孔径长度小于大气的相干长度时,可以不考虑大气对合成孔径激光成像的影响。本文机载 SAL 原理样机作用距离较近,并采用较长的激光波长,有利于缓解大气扰动的影响。考虑到未来实用系统的要求,大气扰动抑制问题还需进一步深入研究。

4 未来实用系统指标和技术途径分析

上面分析了机载 SAL 原理样机的技术指标和实现方案,由于作用距离和幅宽较小,很难满足应用需求。一个机载 SAL 实用系统的指标如表 4 所示。

表 4 机载 SAL 实用系统技术指标

Tab. 4 Practical specifications of airborne SAL system

飞行高度	1~3 km	分辨率	0.05~0.2 m
飞行速度	约 50 m/s	地距向幅宽	1~2 km
激光波长	0.5~1.55 μm	最大作用距离	5~6 km

提高作用距离和扩大幅宽的的技术途径包括:增大激光发射功率并提高光源的相干性,将激光光源频率稳定度提高到优于 $\pm 5\text{ kHz}/(100\text{ }\mu\text{s})$;激光光学系统采用交轨向线状扩束器和多元探测器结合方式使最大瞬时地距幅宽在 250 m 左右,采用交轨向机械扫描实现 1~2 km 幅宽覆盖;成像分辨率随幅宽调整,其调整范围为 0.05~0.2 m,最高分辨率为 0.05 m。

由于系统瞬时幅宽远小于作用距离,系统可采用高脉冲重复频率距离模糊工作体制,以保证远距离探测所需的平均功率。从进一步发展技术的角度出发,也可考虑采用光纤阵列结构并使用正交信号。

5 结束语

合成孔径激光雷达技术除用于对地 2 维成像观测外,在其它方面也具有广阔的应用前景。主要应用方向包括:高分辨率成像技术研究(成像转角很小的主动激光成像,在原理上可和可见光图像融合),基础测绘(高空 3 维激光雷达距离向采用脉冲压缩,顺轨向采用合成孔径成像体制,提高空间探测分辨率),大气风场测量(目前的激光多普勒雷达距离向可改为脉冲压缩体制)。

合成孔径激光雷达由于其采用相干体制,代表着激光雷达的发展方向,具有重要的研究价值。本文介绍了机载合成孔径激光雷达的研究现状,分析了其关键技术并讨论了系统实现方案,对后续研究工作的开展具有一定的参考价值。

感谢西安电子科技大学的邢孟道教授、中国科学院上海光机所的刘立人研究员、陈为标研究员、中国科学院上海技术物理所的舒嵘研究员和凌元博士、中国科学院光电院的张珂殊研究员、中国科学院西安光机所的朱少岚研究员、中国科学院电子所的吴谨研究员对本文研究工作的无私帮助,与他们的讨论使我们受益匪浅。

参 考 文 献

- [1] Ricklin J C and Tomlinson P G. Active imaging at DARPA[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5895: 589505.
- [2] Venable S M, Duncan B D, Dierking M P, *et al.* Demonstrated resolution enhancement capability of a stripmap holographic aperture lidar system[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22): 5531-5542.
- [3] Dierking M, Schumm B, Ricklin J C, *et al.* Synthetic aperture LADAR for tactical imaging overview[C]. The 14th Coherent Laser Radar Conference(CLRC), 2007, Session 9.
- [4] Krause B W, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. OSA/CLEO/IQEC, 2011.
- [5] 周煜, 许楠, 栾竹, 等. 实验室合成孔径激光雷达点目标二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 566-568.
Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu, *et al.* Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 566-568.
- [6] 刘立人, 周煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验验证[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 112-116.
Liu Li-ren, Zhou Yu, Zhi Ya-nan, *et al.* A large aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 112-116.
- [7] 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 in China (Series E: Technological Sciences)*, 2009, 39(10): 1678-1684.
- [8] 邢孟道. 合成孔径成像激光雷达技术研究[R]. 国家高技术研究发展计划(863计划)项目研究报告, 2008年11月.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Dierking M P and Duncan B D. Periodic, pseudonoise waveforms for multifunction coherent lidar[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(10): 1908-1922.
- [12] Adany P, Allen C, and Hui R. Chirped lidar using simplified homodyne detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(16): 3351-3357.
- [13] Liu Liren. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 579-599.

作者简介



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



刘波(1984-), 男, 山东枣庄人, 中国科学院电子学研究所读博士研究生, 研究方向为雷达信号处理和运动目标成像技术。

E-mail: lynnandsky@163.com



张清娟(1987-), 女, 山东烟台人, 中国科学院电子学研究所读硕士研究生, 研究方向为多孔径SAR信号的稀疏性分析和处理。

E-mail: qingjuan0535@163.com