

文章编号:1001-9014(2009)03-0229-06

## Chirp 强度调制与近红外激光 合成孔径雷达距离向处理

洪光烈, 王建宇, 孟昭华, 李静文, 童鹏, 舒嵘

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**合成孔径激光雷达是利用同一孔径(望远镜)与目标作相对运动并采用信号处理方法来模拟孔径阵列, 获得高方位(横向)分辨率的相干成像雷达. 采用窄线宽的单频光纤激光光源和相干探测方法; 发射光波被啁啾信号作幅度调制, 接收后进行距离向脉冲压缩; 激光雷达和目标相对运动引起的回波相位变化, 由相关运算实现相位补偿和累加(孔径合成), 以提高方位向分辨率. 提出了新的工作体制: 距离向啁啾信号调制在发射光波振幅(强度)上, 方位向多普勒频移反映在回波光波相位(频率)上, 便于解决距离向与方位向之间的耦合模糊问题. 报道了中期实验成果: Chirp 射频信号调制激光强度, 实现合成孔径激光雷达距离向的压缩.

**关键词:**合成孔径激光雷达; 脉冲压缩; 成像; 耦合

**中图分类号:** TN958.98 **文献标识码:** A

## CHIRPED AMPLITUDE MODULATION AND RANGE DIMENSION PROCESSING OF NEAR INFRARED SYNTHETIC APERTURE LADAR

HONG Guang-Lie, WANG Jian-Yu, MENG Zhao-Hua, LI Jing-Wen, TONG Peng, SHU Rong  
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Synthetic aperture ladar(SAL) is a coherent imaging ladar which uses the the relative motion of aperture to the target and simulates apertures array with signal processing to obtain high transverse resolution. In this study, single frequency fiber laser source with narrow line width and coherent detection were employed. Transmitted optical wave was modulated with chirped signal on amplitude, and the received signal was compressed on length. The relative motion between ladar and target changes the phase of echo. Phase compensation and integration were realized by correlation operation to increase azimuth resolution. A new work style was put forward. It is convenient for solving coupling hazy problem between the range and azimuth dimension. The experiment results show that the laser intensity is modulated by chirp RF, and the range dimension compress of synthetic aperture ladar is realized.

**Key words:** synthetic aperture ladar(SAL); pulse compression; imaging; coupling

### 引言

合成孔径雷达作为一种成像系统, 工作波长向光波段移动, 应该可能获得更高分辨率, 另外, 因为我们习惯了用可见光观察世界, 射频波段的反射率对比度不同于我们视觉习惯, 更容易被解读; 基模激光束不存在微波波束旁瓣回波造成的距离模糊, 正因为此, 基于距离、多普勒成像的合成孔径激光雷达的研究工作受到重视<sup>[1]</sup>.

所有光学系统和激光雷达的分辨率都受到孔径尺寸的限制, 合成孔径激光雷达(SAL)可以获得更高的分辨率, 原理上可超越衍射限制<sup>[2]</sup>.

在天基平台上, 用普通的真实孔径, 没有更好的方法(微波雷达、可见红外成像系统)可以提供厘米量级的分辨率<sup>[3,4]</sup>; 随着反演技术的进步, 激光合成孔径雷达具有三维成像的潜力<sup>[5]</sup>.

合成孔径雷达最重要的处理包括距离向的脉冲压缩和方位向的孔径合成, 而方位向和距离向之间存在着耦合模糊问题, 我们尝试通过创新工作体制

收稿日期: 2008-07-18, 修回日期: 2009-04-18

基金项目: 此实验研究得到国家自然科学基金项目(60772029)资助

作者简介: 洪光烈(1966-), 男, 安徽庐江人, 副研究员, 博士, 主要研究方向: 激光雷达.

Received date: 2008-07-18, revised date: 2009-04-18

为解决该问题提供一种途径<sup>[6]</sup>.

### 1 基本原理

合成孔径阵列的这些阵元并不是真实存在的,而是通过安装在飞行平台上的望远镜相对于目标的移动获得的,飞行在不同时刻到达不同位置,再将不同位置处的回波信号记录下来.等记录到足够数目的阵元信号后,即飞行一个合成孔径长度,再对它们进行相位补偿.使对某处目标的信号是同相相加,这时即可实现对该点的聚焦.等效孔径阵列的长度,为目标仍在脚印内时段望远镜飞行的最大距离,即被定义为合成孔径长度(对每一点目标而言),飞行一个合成孔径长度的时间称为孔径时间.在实际的SAL系统中,要实现相位补偿和叠加是一个复杂的数据处理过程<sup>[7]</sup>.SAL采用相干探测体制提取相位信息,当激光雷达相对于地面目标运动时,地面目标上反射回来的信号与本振信号通过混频产生多普勒频移相位.光电探测器接收来自目标的不同时刻的多普勒频移和距离信号,然后转换成电信号进行数据处理.合成孔径时间内的数据处理通过匹配滤波器对SAL多普勒频谱进行方位向的合成孔径处理,对距离向信号进行脉冲压缩处理得到的<sup>[8]</sup>.

### 2 实验系统的建立

激光器采用New Focus公司的TLB-6330外腔调谐激光器,光纤放大器采用IPG公司EAR-5K-1572-SF,光探测器采用New Focus公司平衡探测器1617-AC-FC, Mach-Zehnder调制器采用JDSU公司APE(TM) Microwave analog intensity modulator AM-

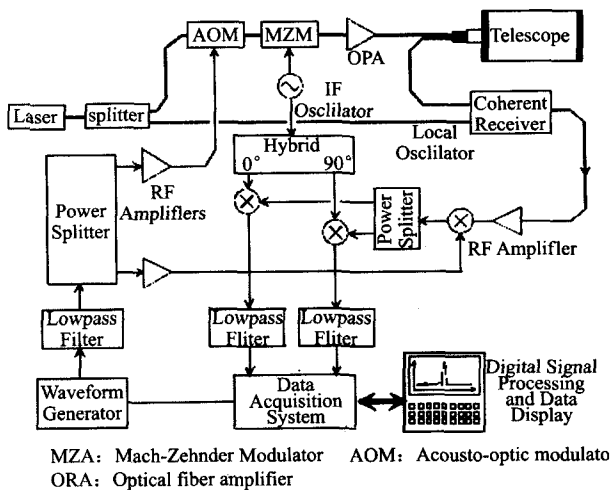


图1 SAL实验系统组成的示意图  
Fig.1 Sketch map of SAL experiment system

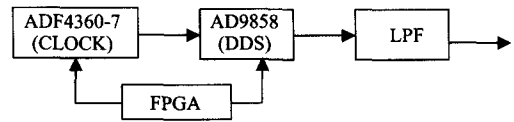


图2 啁啾信号生成流程图  
Fig.2 Flow chart of chirp signal creating

150, 声光移频器采用Brimrose公司IPF-600-60-1550-2FP.实验系统如图1所示.

#### 2.1 激光发射机

在开展SAL原理研究工作中,我们立足于当前的技术水平,同时又预计到将来的技术潜力.激光器选用可调谐半导体激光器加光纤放大器的发射机,该类激光器体积较小,电光效率较高,全固态结构,单色性好,是较有潜力的相干激光光源.发射机工作在1.5μm光纤通信波段,大多数器件采用光通信器件;这些器件具有价格优势和技术提升的潜力;相对于几何光学系统而言,纤维光学系统可靠性更高.

单频(频宽小于100kHz/ms)种子激光器发出激光cos(ω<sub>s</sub>t)分成两部分:小部分激光作为本振波;大部分激光经过声光频移后,再被Mach-Zehnder调制器强度调制,经过光功率放大后由望远镜发出.

发射光波脉冲s(t)为A<sub>f</sub>[1+βm(t)]cos(ω<sub>s</sub>t+ω<sub>IF</sub>t)·rect(t/T),ω<sub>s</sub>为发射激光的频率,ω<sub>IF</sub>声光频移等于中频,m(t)为啁啾信号,β为调制深度;T为脉冲宽度;本振光波p(t)为A<sub>c</sub>cos(ω<sub>s</sub>t)

激光发射功率:5mW;光放大器输出功率:5W;工作波段:1.5μm.

#### 2.2 基于AD9858-DDS生成啁啾信号、调制

AOM声光移频器的信号源是等幅的射频振荡源,它是通过现成的压控振荡器和锁相环来完成的

$$r(t) = \cos(\omega_{IF}t)$$

Mach-Zehnder调制器的信号是啁啾信号(chirp),其频率随时间线性变化,线性频变的啁啾信号利用直接频率综合器件(DDS)技术来产生

$$m(t) = \cos\left\{2\pi\left(f_0t + \frac{Bt^2}{2T} + \phi_0\right)\right\}$$

为达到精确的线性调谐特性,采用直接数字频率合成(DDS)技术来实现啁啾信号的生成,如图2所示.

直接数字频率合成(Direct Digital Synthesis, DDS)技术首先生成一个数字时变信号,再对其作数模转换,得到最终需要的模拟波形.其主要部件包括一个相位累加器,一个相位幅度转换器(一个正弦查找表),和一个数模转换器.图3表示了DDS内部电路原理.

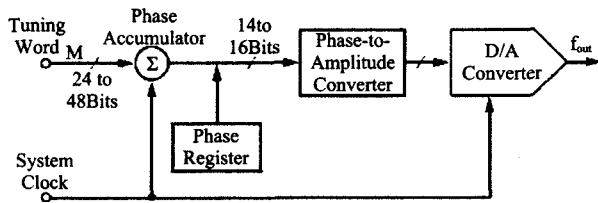


图 3 DDS 器件内部电路  
Fig. 3 Components of a direct digital synthesizer(DDS)

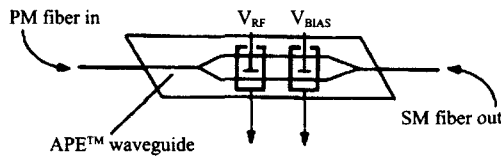


图 4 Mach-Zehnder 光调制器  
Fig. 4 Mach-Zehnder optical modulator

当 DDS 工作在扫频模式时,相位累加器中的相位增量就不是一个固定的值了,这就需要在相位累加器之前再加上一级频率累加器. 频率累加器同相位累加器的工作原理是一样的,它不停地做着重复累加,不断地产生新的瞬时频率调谐字,由此使得 DDS 的输出频率随着时间变化. 其中频率增量,由频率增量调谐字 (Delta Frequency Tuning Word, DFTW) 决定; 频率变化速率,由频率增量斜率字 (Delta Frequency Ramp Rate Word, DFRRW) 决定,它们都存储在相对应的寄存器内. 而扫频的起始频率则还是由频率调谐字 (FTW) 来决定. 设定好所有这些寄存器内的字的值,就是可以使得 DDS 开始扫频,从设定的起始频率开始,按照设定的频率增量和变化速率向上扫频,而最终得到啁啾信号.

实现射频啁啾信号调制光强度的器件是 Mach-Zehnder 电光调制器,这种调制器利用两平行偏振的调相波合成而实现强度调制功能,它在 LiNbO<sub>3</sub> 制作一对平行条形波导,两端均连接一个 3dB Y 型分支波导,条形波导两侧和中间为表面电极,相当于 M-Z 干涉仪,如图 4 所示. 当在输入端激励场为 TE 模时,则调制器的输出强度  $I$  为  $I_i(1 + \cos\Delta\phi)$ , 式中  $\Delta\phi$  为两平行波导中两调相波的相位差,它跟调制电极所加的电压成正比, APE™ 扩展响应频率模拟调制器,工作频率 DC-20GHz,偏置电压 4.5 ~ 5.5V,输入阻抗 50Ω,最大输入光功率 200mW,调制后的光波送给光放大器进行功率放大.

得到啁啾信号 50 ~ 250MHz, 声光频移量: 600MHz.

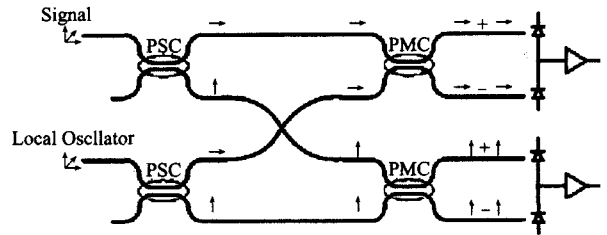


图 5 相干探测器件  
Fig. 5 Component of coherent detection

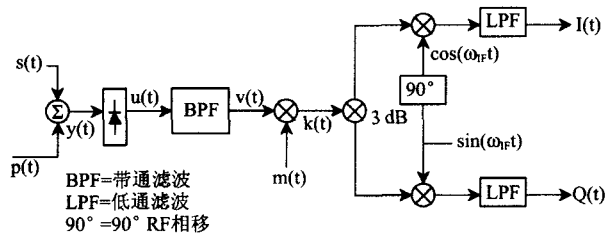


图 6 同步/正交检波原理  
Fig. 6 Principle of in phase/quadrature demodulation

### 2.3 平衡外差探测

回波被光纤滤波器滤波后,光纤耦合器将本振光波和滤波后的回波混合在一起(混频),光纤耦合器是偏振分离的耦合器,将本振波和回波按两个相互垂直的偏振方向分别混频(相干混频要求本振波和回波的偏振方向相同),提高相干效率;混合光波由探测器实现光电转换形成差频输出(中频脉冲),探测器采用平衡探测器(反向偏置的串连的两只性能参数相同的 PIN 光二极管组成),总的输出是这两个光电二极管光电流之差,它们相同的噪声(类似于共模噪声)被减掉,消除相对强度噪声. 如图 5 所示,相干探测的结果为,  $I_{ph} = 2\Re A_s [1 + \beta m(t)] A_c \cos[\omega_{IF} t + \phi(t)]$ ,  $\Re$  为探测器的响应度,  $\phi(t)$  反映了雷达与目标相对运动引起回波的相位变化(它关于时间的微分即是多普勒频率),中频  $\omega_{IF}$  反映发射波和本振波的频率差. 相干探测之后,光信号转换成以  $\omega_{IF}$  为载波的射频信号,外调制信号反映在振幅  $A_s [1 + \beta m(t)]$  上,而雷达与目标相对运动反映在相位  $\phi(t)$  上.

在带宽 600MHz 的情况下,外差探测灵敏度可达到  $1 \times 10^{-10} W$ .

### 2.4 信号解调与距离向压缩

同步/正交检波提取包含时延信息的啁啾脉冲,去掉不包含距离信息的载频

$$V(t) = A_s [1 + \beta m(t - \tau)] A_c \cos[\omega_{IF}(t) + \phi(t)] \quad (1)$$

$$k(t) = A_s m(t) [1 + \beta m(t - \tau)] A_c \cos[\omega_{IF}(t) + \phi(t)] \quad (2)$$

$$I(t) = A_s A_c m(t) [1 + \beta m(t - \tau)] \cos[\omega_{IF}(t) + \phi(t)] \cos(\omega_{IF} t)$$

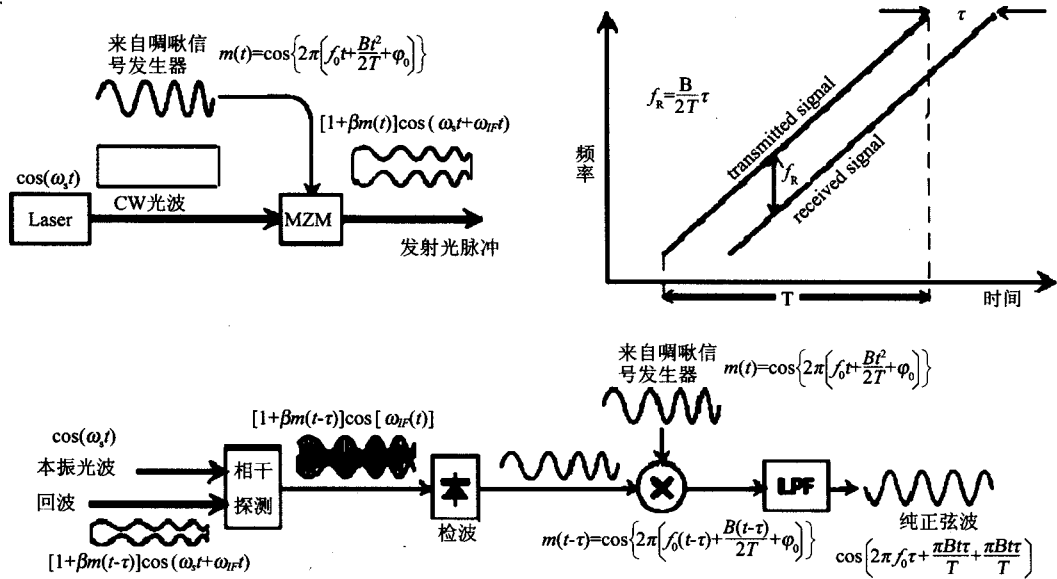


图7 距离向信号处理示意图  
Fig. 7 Sketch map of range dimension signal processing

经低通滤波,去除高频项后,  $I(t)$  变为

$$I(t) = A_s A_c m(t) [1 + \beta m(t - \tau)] \cos[\phi(t)] ,$$

同样,经进一步低通滤波,  $I(t)$  变为

$$I(t) = A_s A_c m(t) [\beta m(t - \tau)] \cos[\phi(t)] , \quad (3)$$

$$Q(t) = A_s A_c m(t) [1 + \beta m(t - \tau)] \cos[\omega_{IF} t + \phi(t)] \sin[\omega_{IF} t] ,$$

经低通滤波,去除高频项后,  $Q(t)$  变为

$$Q(t) = A_s A_c m(t) [1 + \beta m(t - \tau)] \sin[\phi(t)] ,$$

同样,经进一步低通滤波,  $Q(t)$  变为

$$Q(t) = A_s A_c m(t) [\beta m(t - \tau)] \sin[\phi(t)] , \quad (4)$$

经低通滤波

$$\sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} = m(t) m(t - \tau) , \quad (5)$$

此式表明  $\phi(t)$  不影响距离向延时  $\tau$  ( $\tau$  可以得到雷达-目标距离) 的求解,原因是  $m(t)$  调制在振幅上,  $\phi(t)$  反映在相位里 ( $\sin^2 \phi(t) + \cos^2 \phi(t) = 1$ ).

上文所涉及到的信号流  $V(t)$ ,  $k(t)$ ,  $I(t)$ ,  $Q(t)$ , 如图6所示.

啁啾源信号:

$$m(t) = \cos\left\{2\pi\left(f_0 t + \frac{Bt^2}{2T} + \varphi_0\right)\right\} , \quad (6)$$

检波后带有时延  $\tau$  的啁啾:

$$m(t - \tau) = \cos\left\{2\pi\left(f_0(t - \tau) + \frac{B(t - \tau)^2}{2T} + \varphi_r\right)\right\} , \quad (7)$$

两者通过混频和低通滤波(差频):

$$w(t) = m(t) m(t - \tau) = \frac{1}{2} \cos\left(2\pi f_0 \tau + \frac{\pi B t \tau}{T} + \frac{\pi B \tau^2}{T}\right) , \quad (8)$$

分析此信号的频率为:  $f_r = \frac{B}{2T} \tau$ , 它与光波在目标和雷达之间传播时间  $\tau$  成正比关系. 图7表示了上文所述的信号处理过程.

### 2.5 方位向压缩与孔径合成

学习微波合成孔径的处理技术,由目前 SAR 的一些成熟的成像算法经过改造移植到 SAL 上.

在孔径时间内,激光束掠过目标所产生的多普勒频移(图8所示),相干探测后输出信号的相位  $\varphi(t)$ ,

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= 2\pi f_{IF} t + \phi(t) \\ &= 2\pi f_{IF} t + \frac{2\pi}{\lambda} 2 \sqrt{R_0^2 + (x - x_0)^2} \end{aligned} , \quad (9)$$

由于  $(x - x_0) \ll R_0$ , 因此

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= 2\pi f_{IF} t + \frac{4\pi}{\lambda} \left( R_0 + \frac{(x - x_0)^2}{2R_0} \right) \\ \frac{d\varphi(t)}{2\pi dt} &= f_D = \frac{2v^2}{\lambda R_0} (t - t_0) + f_{IF} \end{aligned} , \quad (10)$$

其中,  $t = \frac{x}{v}$ ,  $x$  为方位向位移,  $v$  为雷达和目标相对运动的速度,目标与孔径之间的多普勒频移  $f_D$  是随时间线性变化的,可见回波载波受到一种线性信号调频,调频斜率为  $-\frac{2v^2}{\lambda R_0}$ ,它乘以孔径合成时间得到

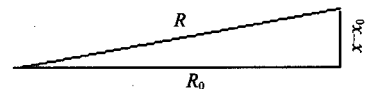


图8 光束扫掠示意图  
Fig. 8 optical beam sweeping sketch map

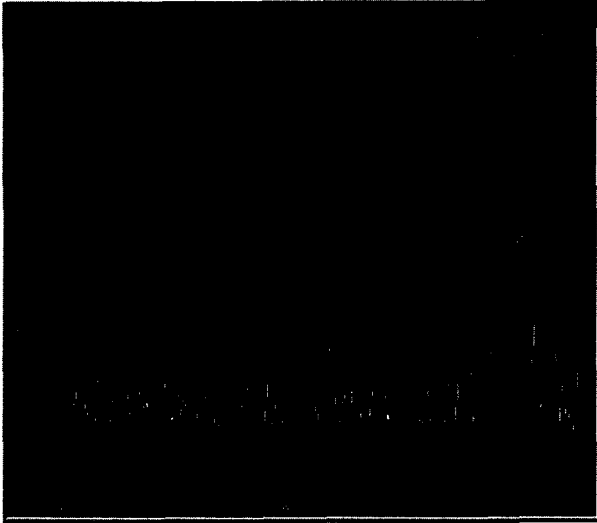


图9  $D = 1050\text{m}, B = 200\text{MHz}, T = 10\text{ms}$  实验结果  
Fig. 9 Experiment result for  $D = 1050\text{m}, B = 200\text{MHz}, T = 10\text{ms}$

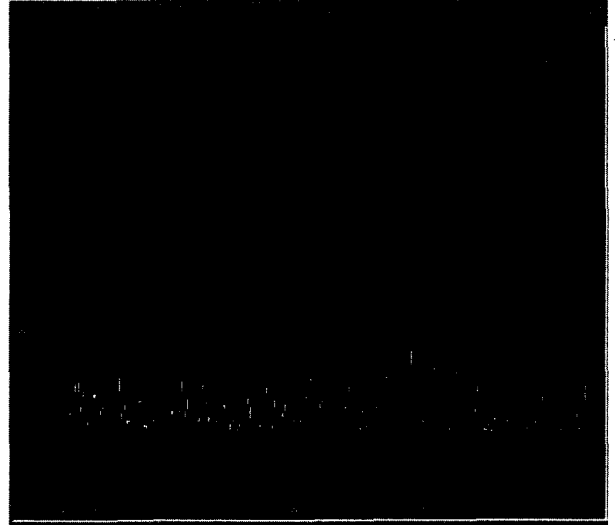


图10  $D = 1050\text{m}, B = 150\text{MHz}, T = 10\text{ms}$  实验结果  
Fig. 10 Experiment result for  $D = 1050\text{m}, B = 150\text{MHz}, T = 10\text{ms}$

多普勒带宽,对这种线性调频信号进行处理恰恰也就是用匹配滤波或相关技术.线性调频信号经过匹配滤波之后,脉冲包络受到压缩,这就等于把光斑宽度变窄了,从而提高了角度分辨率(方位分辨率)<sup>[9,10]</sup>.

### 3 阶段性结果

实验过程中,激光来回的光程大部分在光纤里,光纤总长度 1050m(光放大器发射到望远镜以及望远镜接收到探测器的连接光纤);激光在大气中传输的距离较短,即望远镜(直径 125mm)与目标的距离较短为 50m(光对准方便).单模光纤的折射率约为  $n = 1.46$ ,故激光在单模光纤中的传输速度  $V = c/n = c/1.46$ ,比真空光速要小.修改后的关系表达式为:

$$f_R = B \frac{D}{VT} = 1.46B \frac{D}{cT}, \quad (11)$$

其中, $D$  是光程长度.

1) (啁啾)带宽  $B = 200\text{MHz}$ ,起始频率 50MHz,中止频率 250MHz;(啁啾)脉冲宽度  $T = 10\text{ms}$ .

由频谱分析仪捕捉到混频后中频信号频率为  $f_R = 104.3\text{kHz}$ .依照修正公式计算可得实验值  $D_1 = 1071.6\text{m}$ ,如图 9 所示.

2) (啁啾)带宽  $B = 150\text{MHz}$ ,起始频率 50MHz,中止频率 200MHz;(啁啾)脉冲宽度  $T = 10\text{ms}$ .

由频谱分析仪捕捉到混频后中频信号频率为  $f_R = 78.2\text{kHz}$ .依照修正公式计算可得实验值  $D_2 = 1071.3\text{m}$ ,如图 10 所示.

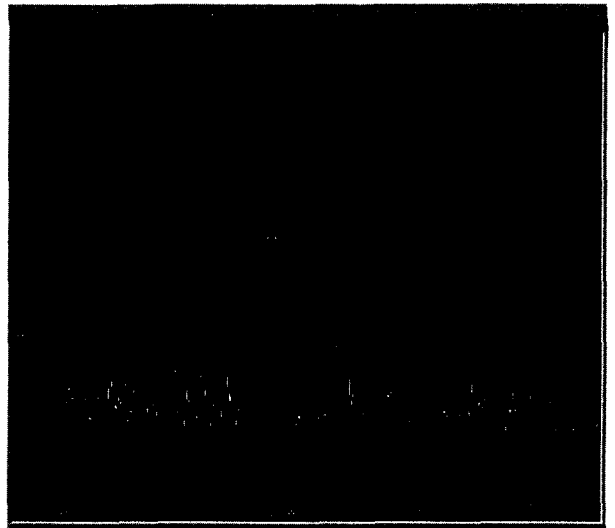


图11  $D = 1050\text{m}, B = 200\text{MHz}, T = 20\text{ms}$  实验结果  
Fig. 11 Experiment result for  $D = 1050\text{m}, B = 200\text{MHz}, T = 20\text{ms}$

3) (啁啾)带宽  $B = 200\text{MHz}$ ,起始频率 50MHz,中止频率 250MHz;(啁啾)脉冲宽度  $T = 20\text{ms}$ .

由频谱分析仪捕捉到混频后中频信号频率为  $f_R = 52.4\text{kHz}$ .依照修正公式计算可得实验值  $D_3 = 1076.7\text{m}$ ,如图 11 所示.

表1 距离与误差  
Table 1 Range and error

Value Style	Range (m)
Theoretic value	$D = 1050 \text{ fiber} + 50 \text{ atmosphere}$
Experiment value	$D_1 = 1071.6, D_2 = 1071.3, D_3 = 1076.7$
Average value	$\bar{D} = 1073.2$

其中的误差也包括光在望远镜与目标之间的大气传输路径,它的折射率为 1.0.

#### 4 结论

通过平衡外差探测,在 600MHz 带宽下,获得了  $1 \times 10^{-10}$  W 的探测灵敏度;利用 DDS 技术,生成了 50 ~ 250MHz 的 chirp 信号,实现了距离向压缩;实验已经初步证明:距离向啁啾信号调制在发射光波振幅(强度)上,方位向多普勒频移反映在回波光波相位(频率)上,在处理距离向数据时不必考虑方位向的多普勒相位变化,距离向和方位向处理可以分开进行.方位向压缩难度很大,后期再报道其结果.

#### REFERENCES

- [1] Marcus S, Colella B D, Green Jr Thomas J. Solid-state laser synthetic aperture radar[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(6):960—964.
- [2] Green Jr Thomas J, Marcus S, Colella B D. Synthetic-aperture-radar imaging with a solid-state laser[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(30):6941—6949.
- [3] ZHU Lei, Huang Geng-Hua, Ouyang Jun-Hua, et al. Study on time interval measurement system in photon counting im-

(上接 193 页)

#### REFERENCES

- [1] ZHANG Yong, GU Xing-Fa, YU Tao, et al. Absolute radiometric calibration of CBERS-02 IRMSS thermal band [J]. *Science In China Series E* (张勇,顾行发,余涛,等. CBERS-02 IRMSS 传感器热红外通道综合辐射定标. *中国科学 E 辑 信息科学*), 2005, **35**(增 I):70—88.
- [2] ZHANG Yong. Study on thermal infrared remote sensors' absolutely radiometric calibrations [D]. Doctoral dissertation of Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Science (张勇. 遥感传感器热红外数据辐射定标研究. 中国科学院遥感应应用研究所,博士学位论文), 2006.
- [3] PENG Guang-Xiong, HE Yu-Hua, LI Jing, et al. Study on CBERS-2's CCD image cross calibration and atmospheric correction[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (彭光雄,何宇华,李京,等. 中巴地球资源 02 星 CCD 图像交叉定标与大气校正研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(1):22—25.
- [4] ZHANG Yong, GU Xing-Fa, YU Tao, et al. Radiometric cross-calibration of CBERS-02 IRMSS thermal channel[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张勇,顾行发,余涛,等. 中巴地球资源卫星热红外通道的交叉辐射定标. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4):261—266.
- [5] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, JIA Feng-Min, et al. On-orbit radiometric calibration of FengYun geostationary meteorological satellite's infrared channels based on sea-

aging lidar[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (朱磊,黄庚华,欧阳俊华,等. 光子计数成像激光雷达时间间隔测量系统研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(6):461—464.

- [4] WU Gang, LI Chun-Lai, LIU Yin-Nian, et al. Study on high resolution time interval measurement module in pulsed laser ranging system[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴刚,李春来,刘银年,等. 脉冲激光测距系统中高精度时间间隔测量模块的研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3):213—221.
- [5] Yoshikado S, Aruga T. Feasibility study of synthetic aperture infrared laser radar techniques for imaging of static and moving objects[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(24):5631—5635.
- [6] Yoshikado S, Aruga T. Short-range verification experiment of a trial one-dimensional synthetic aperture infrared laser radar operated in the 10 $\mu$ m band[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(9):1421—1425.
- [7] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, et al. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *optics letters*, 2002, **27**(22):1983—1985.
- [8] Buell W, Marechal N, Buck J, et al. Demonstration of synthetic aperture imaging lidar[J]. *Proc. of SPIE*, 2005, **5791**:152—166.
- [9] Beck S M, Buck J R, Buell W F, et al. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(35):7621—7629.
- [10] Karr T J. Synthetic aperture lidar for planetary sensing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **5151**:44—52.

surface measurements in the south China sea[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戎志国,张玉香,贾凤敏,等. 利用南海水面开展我国静止气象卫星红外通道在轨辐射定标. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2):97—101.

- [6] TONG Jin-Jun, ZHANG Yong, HU Bo, et al. Effect of ncep data on the absolute radiometric calibration for thermal infrared bands of fy2c in qinghai lake[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (童进军,张勇,胡博,等. 青海湖地区 NCEP 资料对云二号 C 星热红外通道绝对辐射定标影响研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(5):337—341.
- [7] RONG Zhi-Guo, QIU Kang-Mu, HU Xiu-Qing, et al. Comparison of pre-launch calibration in lab with the radiometric calibration in orbit for FY-2B meteorological satellite's IR channel[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戎志国,邱康睦,胡秀清,等. FY2B 气象卫星红外通道发射前实验室定标与在轨辐射定标比较. *红外与毫米波学报*), 2002, **21**(6):408—412.
- [8] Hook S J, Kahle A B. The micro fourier transform interferometer—a new field spectrometer for acquisition of infrared data of natural surface[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **56**:172—181.
- [9] Hansen D V, Poulain Pierre-Marie. Quality control and interpolations of WOCE-TOGA drifter data[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, **13**:900—909.
- [10] Kalnay E, kanamitsu M, kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**,437—470.