

引用格式:Liu Yuli,Cai Yongjun,Zhang Xiangkun,*et al.*Design and Realization of LFM CW SAR System[J].Remote Sensing Technology and Application,2016,31(2):255-259.[刘玉立,蔡永俊,张祥坤,等.调频连续波合成孔径雷达系统设计与实现[J].遥感技术与应用,2016,31(2):255-259.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.2.0255

调频连续波合成孔径雷达系统设计与实现

刘玉立^{1,2,3},蔡永俊^{1,2,3},张祥坤^{1,2},姜景山^{1,2}

(1.中国科学院国家空间中心微波遥感技术重点实验室,北京 100190;
2.中国科学院国家空间中心,北京 100190;3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:与脉冲体制相比,线性调频连续波合成孔径雷达在小型化方向具有明显的优越性。针对在无人机等运动平台对雷达小型化的实际需求,设计并实现了一种小型化、低成本的调频连续波 SAR 系统。分析了调频连续波体制雷达高分辨率成像的基本原理,详细阐述了该雷达系统的设计思想和关键技术。最后给出了雷达系统校飞实验的成像结果,验证了系统的有效性。

关键词:调频连续波;合成孔径;系统设计

中图分类号:TN 958.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2016)02-0255-05

1 引言

随着合成孔径雷达在遥感领域应用的不断拓展,对微型 SAR 系统的需求愈来愈迫切。传统的脉冲体制 SAR 系统,设备复杂、重量重、体积大,不适用于小型无人机及低成本民用项目^[1]。线性调频连续波合成孔径雷达(LFMCW SAR)是调频连续波技术与合成孔径雷达技术结合的一种微波成像雷达,其特殊体制决定了在小型化方面的明显优势^[2]。首先,雷达接收机采用去斜的信号处理方式,将回波信号与参考信号进行混频,产生较小的差频带宽,从而能以较低的采样率获得所需信息,大大降低了数据处理量;其次,LFMCW SAR 连续发射线性调频信号,占空比 100%,时宽大,峰值功率低,因此发射机很容易用固态功率放大器器件实现,大幅度降低了系统的复杂度及功耗水平,减少了成本。

2 基本原理

FM CW SAR 利用信号相干处理技术(脉冲压缩和合成孔径)获得二维高分辨率雷达图像^[3]。在

距离向,LFMCW SAR 通过发射线性调频连续波信号,并对回波信号进行去斜处理完成脉冲压缩,实现高分辨率;在方位向,雷达的小孔径天线与目标做相对运动,方位向回波由于多普勒效应也具有线性调频信号形式,经聚焦处理实现高分辨率。

2.1 距离向高分辨率

距离向通过去斜技术(Dechirp)完成脉冲压缩:将接收信号与发射信号的副本进行混频,得到与目标信息有关的差频信号,将该差频信号数字化后进行频谱分析,完成脉冲压缩,从而获得距离向高分辨率。发射信号为锯齿波扫频信号,如图 1 所示。

调频连续波 SAR 发射信号表达式为:

$$S_t(t)=\exp(j2\pi f_c t+j\pi k_t t^2) \tag{1}$$

其中: f_c 为载波频率, $k_t=\Delta f/T$ 为线性调频信号的调频斜率。斜距 R 处的目标回波信号为:

$$S_r(t)=\exp\left[j2\pi f_c\left(t-\frac{2R}{c}\right)+j\pi k_t\left(t-\frac{2R}{c}\right)^2\right] \tag{2}$$

与发射信号能量的一部分混频后,每一脉冲周期的 $T-\tau$ 时间内的差频信号表达式为:

收稿日期:2015-01-26;修订日期:2015-03-10
作者简介:刘玉立(1989—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事微波、毫米波天线、电路的理论与技术及微波遥感系统研究。
E-mail:liuyuli13@mails.ucas.ac.cn。
通讯作者:张祥坤(1972—),男,山东烟台人,副研究员,主要从事合成孔径雷达信号处理与系统研究,微波遥感理论与技术研究。E-mail:zhangxiangkun@mirlab.cn。

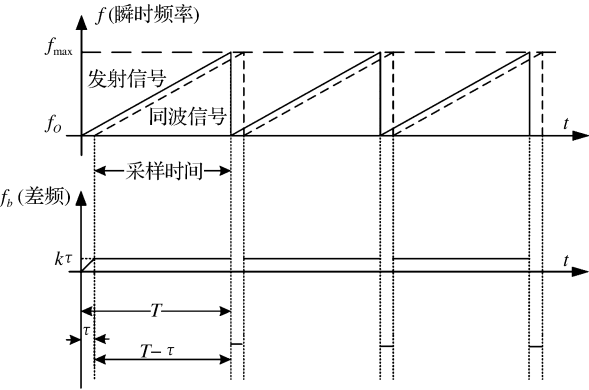


图 1 发射信号、接收信号示意图

Fig.1 Diagram of transmitted and received signal

$$S_{IF}(t) = \exp \left[-j2\pi \left(f_0 \tau + k_t \tau t - \frac{1}{2} k_t \tau^2 \right) \right] \quad (3)$$

其中： $2\pi f_0 \tau - \pi k_t \tau^2$ 为一常数项，故式(3)为频率为 $f = k_t \tau$ 的单频信号。由傅立叶变换知识可知，该周期信号频谱的主瓣宽度为^[4] $\Delta f_b = \frac{1}{T - \tau} \approx \frac{1}{T}$ 。对于距离向相差 Δy 的两个目标，因回波延迟不同而导致的去斜后的瞬时频率差为 $f_{b1} - f_{b2} = k_t \frac{2\Delta y}{c}$ 。若要分辨距离向的两个目标，需满足 $f_{b1} - f_{b2} > \Delta f_b$ 。故距离向分辨力的理论值为 $\delta_y \approx \frac{c}{2k_t T} = \frac{c}{2B}$ ，其中 B 为发射信号带宽。

2.2 方位向高分辨率

雷达平台与目标的相对运动会产生多普勒效应，使得回波信号为线性调频形式，其瞬时频率表达式为^[5]：

$$f_d = f_0 - \frac{2v^2}{\lambda R_0} (t - t_0) \quad t \in \left(t_0 - \frac{T_d}{2}, t_0 + \frac{T_d}{2} \right) \quad (4)$$

其中： f_0 为发射信号频率， v 为雷达运动速度， R_0 为目标与航线的垂直斜距， T_d 为合成孔径时间，可表示为 $T_d = \frac{L_s}{v} = \frac{R_0 \lambda}{v D_x}$ 。 L_s 为合成孔径天线长度， D_x 为天线方位向孔径。对该线性调频信号进行匹配滤波，则其输出端的信号频谱呈 sinc 函数的形状，其半功率点带宽是合成孔径时间 R_d 的倒数 $\Delta f_d = 1/T_d$ 。对于不同方位向的两个目标，多普勒频率变化过程的始点和终点不同，故从频域看，在同一时刻，两个回波信号的瞬时频率不一样。若两个目标方位向距离差为 Δx ，其瞬时频率差为：

$$f_{d1} - f_{d2} = \frac{2v^2}{\lambda R_0} \frac{\Delta x}{v} = \frac{2v}{\lambda R_0} \Delta x \quad (5)$$

若要分辨方位向的两个目标，需满足 $f_{d1} - f_{d2} > \Delta f$ 。故方位分辨力的理论值为 $\delta_x = \frac{D_x}{2}$ 。

3 系统设计

雷达系统基于轻小型化、低功耗的设计理念，硬件核心包括射频单元和数字单元两部分。系统组成如图 2 所示。

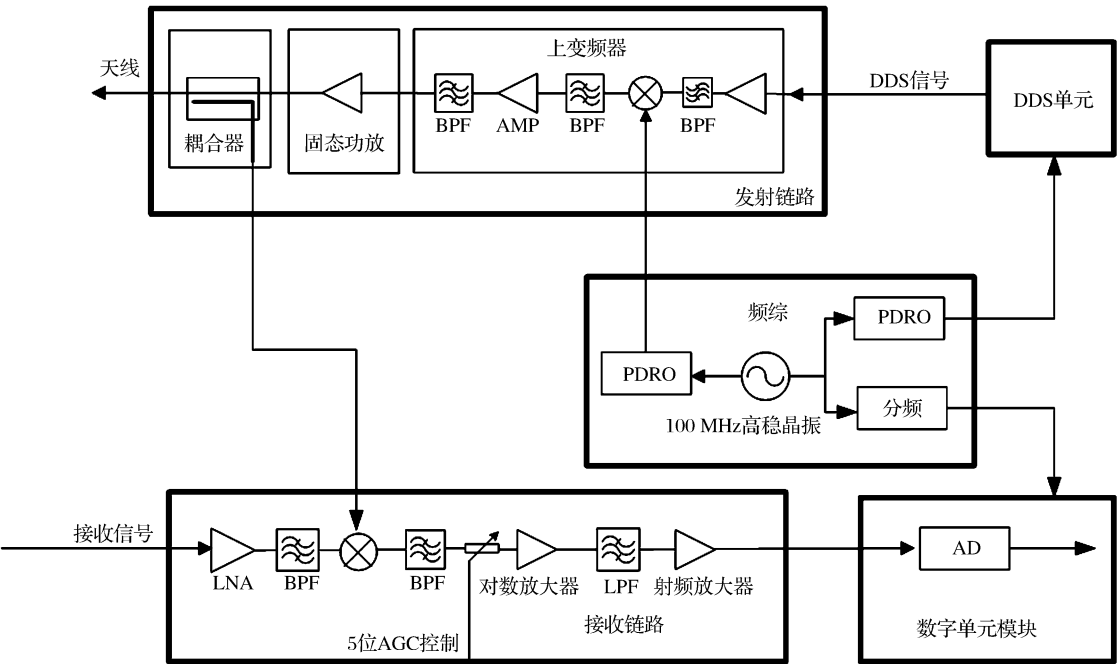


图 2 LFM CW SAR 系统框图

Fig.2 Block diagram of LFM CW SAR system

3.1 系统总体设计

为减小系统的体积和重量,将射频单元中发射机、接收机、DDS、频综单元集成为综合的收发前端。其中,频综单元采用锁相介质振荡器(PDRO),为 DDS 和发射模块提供本振基准信号,同时为数字单元提供时钟信号;DDS 单元产生具有良好线性调频度的扫频信号;发射通道完成基带信号调制和放大,为天线提供发射信号;功率耦合模块耦合一部分发射信号至接收端作为本振参考信号;接收通道接收天线的回波信号并完成去斜。数字单元采集去斜后的回波数据,经过压缩后记录在固态存储器中,并对数据进行预处理;同时产生其他单元所需的脉冲控制信号,并监测各分机状态。系统的主要技术指标如下:

表 1 雷达主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of radar

参数	技术指标
调制波形	锯齿 FMCW
中心频率/GHz	Ka 波段(36.05)
扫频带宽/MHz	300
PRF/Hz	1 000
发射功率/dBm	23
天线增益/dB	25
波束宽度/°	5°×15°
作用距离/m	1 000
AD 采样	10 MHz,16 bit
重量/kg	<5

3.2 系统单元设计

(1) 发射通道。系统发射通道主要由频率合成单元(DDS)、上变频器、固态功放及耦合器组成。频率合成单元采用基于 DDS 专用芯片的设计方案,可产生频率纯正,频率、相位、幅度可编程的模拟信号^[6]。系统距离向分辨率与系统带宽成反比,要实现高分辨率成像需增大调制带宽。但同时应考虑工程可实现性,带宽过大会使得非线性等问题突出,且大带宽会引入更多的噪声,降低系统灵敏度,影响成像质量^[7]。该系统带宽选为 300 MHz,理论距离分辨率为 0.5 m。脉冲重复频率(PRF)可视为对方位向多普勒频率的离散采样,为确保方位向不发生模糊需满足 $PRF \geq 2B_d$,其中 B_d 为方位向多普勒带宽。但 PRF 过高会使得所有目标不能在一个脉冲周期内到达,造成距离向模糊,综合考虑选取 $PRF = 1\,000$ Hz。故 DDS 在控制信号触发下,产生频率为 $750\text{ MHz} \pm 150\text{ MHz}$,幅度为 0 dBm 的 chirp 信号,扫频

周期为 1 ms。DDS 信号经放大、滤波后与本振上变频至 $36.05\text{ GHz} \pm 150\text{ MHz}$ 。由于信号具有大的时带积,峰值功率低,故功放采用固态功率放大器件,放大至 23 dBm 输出至天线,同时通过功率耦合模块耦合 10 dBm 至接收端作为本振参考信号。

(2) 接收通道。该单元包括低噪声放大器、去斜混频器、中频放大等组件。为了尽可能不失真地接收微弱回波信号,需对回波信号进行低噪声放大。去斜混频器完成回波信号与发射信号副本的混频,得到与距离向有关差频信号。由于天线泄露的影响,发射泄露信号亦会经放大后作用在混频器,为保证泄露信号不会使得混频器饱和,混频器需要有高的三阶交调点。为提高雷达的动态范围,限制杂波干扰电平,链路中加入对数放大器,增益随接收信号幅度增大而减小;同时为调节系统总增益,加入 5 位 AGC 数控衰减器,使用 LVTTTL 电平,以 1 dB 为步进间隔实现 0~32 dB 的精确增益调节。接收机动态范围为 $-90 \sim -30\text{ dBm}$,总增益对弱信号为 60 dB,对强信号为 45 dB。

(3) 数据采样单元。该单元完成对雷达信号的数据采集及存储,同时实现对 DDS 的触发控制及接收机的 AGC 调整。AD 采样模块负责对来自接收机的去调频信号进行采样,采用去调频接收技术大大降低了对信号采样带宽的要求,因而大大降低了 AD 采样模块的设计成本。信号经过去斜后的信号带宽表达式^[8]为:

$$B = \frac{2k_t}{c}(R_{\max} - R_{\min})$$

(6)

其中: k_t 为调频斜率。根据奈奎斯特采样定律,AD 采样率至少需满足 $F_s > 2B$ 。系统 AD 采样率选为 10 MHz,精度 16 位,采样信号功率小于 10 dBm。FPGA 采集 AD 传来的数据,每采 1 ms,计数器加 1,当计数器达到 1 000 时,将该 1 s 的数据形成一个数据包,并以时间作为文件名存储到板上固态存储器中。在采集过程中同时监测信号幅度,给出合适的 AGC 控制。

(4) 天线单元。系统工作频段选取为 Ka 波段,频率较高,故天线易于实现小型化。由于该体制雷达发射信号占空比 100%,发射机与接收机需同时工作,若天线隔离度不够,发射泄露信号会使得接收机达到饱和,严重影响成像效果^[9]。为增大隔离度,系统采用收发天线分离结构,隔离度为 60 dB。天线距离向波束宽度由测绘带宽确定,方位向波束宽

度需满足方位向的分辨率要求,为满足实际需求,该系统天线 3 dB 波束宽度选取为 E 面 5°,H 面 15°。同时为增加方向性,减小旁瓣和后瓣影响,天线使用介质透镜矩形喇叭天线,增益为 25 dB。

4 成像算法

4.1 FMCW SAR 斜距

FMCW SAR 发射信号时长一般在毫秒量级,所以相比脉冲 SAR,脉内雷达的运动引起的瞬时斜距的改变就不能忽略,准确的斜距模型如式(6)所示^[10]

$$R = \sqrt{R_0^2 + v^2(t_r + t_m)^2} \tag{7}$$

将式(7)在 $t_r = 0$ 处泰勒展开,由于在很短的时间内高次项可忽略,所以展开后斜距可表示为:

$$R = \sqrt{R_0^2 + v^2 t_m^2} + \frac{v^2 t_m}{\sqrt{R_0^2 + v^2 t_m^2}} t_r \tag{8}$$

所以,由于雷达的连续运动引入的附加多普勒频移为:

$$f_d = -\frac{2}{\lambda} \frac{d\varphi'}{dt} = -\frac{2}{\lambda} \frac{v^2 t_m}{\sqrt{R_0^2 + v^2 t_m^2}} = f_a \tag{9}$$

其中: f_a 为多普勒频率,可知多普勒偏移等于方位向多普勒频率,所以脉内雷达运动可以等效地认为在距离向产生了附加距离走动,在脉冲 SAR 体制中,由于脉冲宽度很小,这个偏移可以忽略,而在 FMCW SAR 处理中,由于发射时宽较长,该项不能忽略,不进行补偿必然影响图像的聚焦。

4.2 回波信号模型

去斜接收信号为接收信号与发射信号的混频信号,暂不考虑幅度的影响,相位如式(10)^[11]所示:

$$\begin{aligned} \varphi &= 2\pi \left(-f\tau - kt_r\tau + \frac{1}{2}k\tau^2 \right) \\ &= -\frac{4\pi R(t_m)}{\lambda} - \frac{4\pi k R(t_m)}{c} t_r + \pi k \tau^2 + 2\pi f_d t_r \\ &= -\frac{4\pi R(t_m)}{\lambda} + 2\pi \left(f_d - k \frac{2R(t_m)}{c} \right) t_r + \pi k \tau^2 \end{aligned} \tag{10}$$

其中:第一项为方位相位,第二项为距离相位,包含了多普勒偏移,第三项为剩余视频相位(RVP),为去斜处理特有的相位。成像处理采用距离多普勒算法(RDA),脉内雷达运动的影响可以在方位多普勒域与距离单元徙动一并去除,从而消除 FMCW SAR 大时宽发射信号给成像处理带来的附加影响,而成像处理其余步骤与传统 SAR 处理方法相同。

4.3 算法流程

完整的成像处理流程图如图 3 所示。

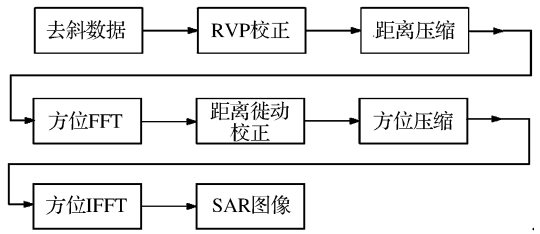


图 3 成像处理流程框图

Fig.3 Flow diagram of imaging processing

5 实验结果

为了检验雷达系统性能及成像精度,系统调试完成后,2014 年 11 月在威海地区进行了机载遥感实验。雷达架设在小型机上,在 500 m 高空以 55 m/s 的速度对地面进行条带式成像。机上的采集存储板将中频信号数字化后存储在固态存储器中。飞机返回地面后,通过 USB 口将数据导出至地面处理计算机中进行后处理,获得了良好的成像结果。下图所示为雷达成像结果与谷歌光学图片对比,从中可清晰地看到主干道以及其他散射特征明显的物体,证明系统有效可行。

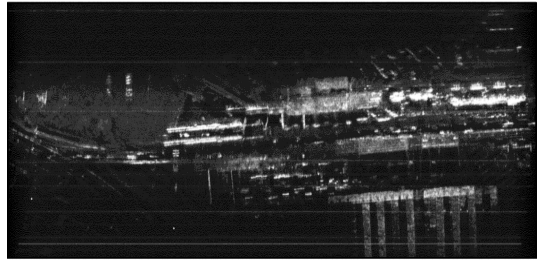


图 4 雷达成像结果

Fig.4 Result of radar imaging



图 5 谷歌光学图片

Fig.5 Google optical image

6 结 语

调频连续波合成孔径雷达由于采用特殊体制,体积功耗重量大大降低,从而使其在无人机等小型运动平台上得到越来越广泛的应用。本文设计并实

现了一种小型化机载雷达系统,具有体积小、功耗低、质量轻、可维护性强等特点,系统已通过飞行试验验证,性能稳定可靠,成像效果良好。随着雷达应用的不断拓展,该体制雷达必将会有更加广阔的应用前景。

参考文献(References):

- [1] Jahagirdar D R. A High Dynamic Range Miniature DDS-based FMCW Radar[C]//IEEE Radar Conference, 2012: 870-873.
- [2] Jiang Zhihong, Zhao Yi, Huang Fukan. Development of FM-CW SAR[J]. Modern Radar, 2008, 30(2): 20-24. [江志红, 赵懿, 皇甫堪. 调频连续波 SAR 的研究进展[J]. 现代雷达, 2008, 30(2): 20-24.]
- [3] Geng Shumin, Jiang Zhihong, Cheng Zhu. Study on Imaging Algorithm of FM-CW SAR[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(10): 2346-2349. [耿淑敏, 江志红, 程翥. FM-CW SAR 距离-多普勒成像算法研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2346-2349.]
- [4] Zhang Yuling, Qu Changwen, He You. Research on Imaging Algorithm of FM-CW SAR[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2007, 22(6): 637-640. [张玉玲, 曲长文, 何友. 调频连续波 SAR 成像算法研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2007, 22(6): 637-640.]
- [5] Luo Y H, Song H J, Wang R. An Accurate and Efficient Extended Scene Simulator for FMCW SAR with Static and Moving Targets[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(10): 1672-1676.
- [6] Yan Jingye, Jiang Jingshan, Zhang Yunhua. An Analysis of Major Parameters Affecting the Spectral of DDS Digital Chirp[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(1): 182-188. [闫敬业, 姜景山, 张云华. 影响 DDS 输出 Chirp 信号频谱的主要参数分析[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 182-188.]
- [7] Yamaguchi Y, Mitsumoto M, Sengoku M. Synthetic Aperture FM-CW Radar Applied to The Detection of Objects Buried in Snowpack[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(1): 11-18.
- [8] Connan G, Griffiths H D, Brennan P V. FMCW-SAR Development for Internal Wave Imaging[C]//IEEE Conference Proceeding OCEANS'97, Halifax, 1997: 73-78.
- [9] Farrukh F A, Ahsan F, Yasin M. Design and Development of Offline Processor and Test Data Generator for FMCW SAR[C]//International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, 2013: 459-462.
- [10] Wang R, Luo Y H, Deng Y K. Motion Compensation for High-Resolution Automobile FMCW SAR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(5): 1157-1161.
- [11] Yu W, Zhao S, Song X. Modified Frequency Scaling Processing Algorithm for Nonlinear FMCW SAR[C]//IEEE 11th International Conference on Signal Processing, 2012: 1861-1865.

Design and Realization of LFMCW SAR System

Liu Yuli^{1,2,3}, Cai Yongjun^{1,2,3}, Zhang Xiangkun^{1,2}, Jiang Jingshan^{1,2}

(1. National Microwave Remote Sensing Laboratory, Beijing 100190, China;

2. Nation Space Science Center, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Compared with the impulse system, LFMCW SAR has obvious superiority in Miniaturization aspect. To satisfy the actual demand of radar miniaturization in motion platform such as unmanned aerial vehicle, this study designs a small size, low cost and low power miniature SAR system. This paper analyses the basic principle of LFMCW radar system's high resolution imaging, then elaborates its design idea and key technology. Imaging results of flight test onboard are given in the end, which verifies the effectiveness and feasibility of this radar system.

Key words: LFMCW; Mini SAR; System design