

基于多通道合成的优于 0.1 m 分辨率的机载 SAR 系统

王岩飞 刘畅* 李和平 贾颖新
(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 针对合成孔径雷达(SAR)高分辨率成像的应用需求, 该文给出一种基于单通道发射、多通道并行接收的新的高分辨率 SAR 系统实现方案。SAR 系统共有 8 个接收通道, 信号带宽达到 3.2 GHz, 具有高分辨率成像、InSAR 干涉成像以及全极化成像功能。文中提出一种新的采用空间辐射测量和频偏误差修正测量的分段测量与综合补偿的通道传递误差测量补偿方法, 有效解决了高分辨率 SAR 宽频带收发系统中关键的多通道接收幅度相位误差校正问题, 并在国内首次获得了优于 0.1 m 分辨率的 SAR 图像。文中详细介绍了系统的组成方案以及主要技术性能指标, 重点探讨和分析了多通道系统的频带合成、系统幅度相位误差测量补偿、运动误差补偿和成像处理等实现技术, 给出了测量、补偿和成像的试验结果。通过实际飞行试验, 验证了高分辨率 SAR 系统的技术及方案的有效性和可行性。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 高分辨率; 多通道收发技术

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)01-0029-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01370

An Airborne SAR with 0.1 m Resolution Using Multi-channel Synthetic Bandwidth

Wang Yan-fei Liu Chang Li He-ping Jia Ying-xin
(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: In order to meet the growing demands for high resolution SAR imaging, this paper describes a new single channel transmit, multi-channel parallel receive high resolution SAR system. The system operates with 8 parallel receive channels to obtain a wide bandwidth up to 3.2 GHz, and also features high resolution, InSAR and PolSAR imaging capability. A novel method of transfer error measurement and compensation is presented in the paper. This method based on radiation calibration and frequency shift correction estimation could implement multi-channel amplitude and phase correction effectively. For the first time in China, a resolution of better than 0.1 m is achieved with the airborne SAR system. This paper introduces the architecture and main specifications of the SAR system, and discusses several important aspects of high resolution imaging in detail, including the bandwidth synthesis, transfer error correction, motion compensation and image formation. Flight experiments demonstrate the high resolution imaging capability of the SAR system.

Key words: SAR; High resolution; Multi-channel transmit and receive technology

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率微波成像雷达, 可以对地面目标进行高分辨率的探测, 并且具有全天候、全天时的优势。自上个世纪 50 年代, 孔径合成技术出现以来, SAR 系统已经在地质资源调查、农作物监测、海洋观测、军事侦察等领域得到了广泛的应用^[1]。

分辨率是 SAR 系统的关键性指标之一, 分辨率的提高可以直接提高 SAR 对目标的检测和识别性能, 扩展 SAR 系统的应用领域。对更高分辨率成像

技术的研究一直 SAR 领域重要的技术发展方向之一, 已经从最初的几十米提高到分米量级。目前, 能够实现 0.1 m 分辨率的系统主要有: 美国 Sandia 国家实验室研制的 MiniSAR 系统^[2], 德国 FRAN(高频物理国家实验室)研制的 PAMIR 系统^[3]和法国 ONERA(太空实验室)研制的 RAMSES 系统^[4]。MiniSAR 系统直接发射位于 15.2~18.2 GHz 频段内的宽带线性调频信号, 采用 dechirp(去调频)方式接收回波信号。PAMIR 系统分 5 个子带发射和接收带宽为 380 MHz 的步进调频信号, 采用合成带宽的方法实现了 0.1 m 的分辨率, 该系统具有多种模式和功能^[5]; RAMSES 系统采用了与 PAMIR 类似的发

射波形,能够以直接采样和去调频两种方式接收子串信号,可以实现 0.1 m 的高分辨率。这些优于 0.1 m 分辨率的 SAR 系统,其实现的主要技术途径是通过聚束工作方式获得方位向的高分辨率,通过频带合成、去斜等方式提高系统的收发信号带宽来获得距离向的高分辨率。

中国科学院电子学研究所于 2005 年开始高分辨先进 SAR 系统的研制,2009 年初完成了系统的研制和各项飞行试验验证。该系统具有高分辨聚束成像模式、条带成像模式、全极化成像模式以及干涉合成孔径雷达(InSAR)成像模式,实现了优于 0.1 m 分辨率的 SAR 系统。本文主要针对高分辨率的实现要求,介绍了该系统的设计、组成和系统的实现方案,给出了系统的试验结果和指标实现情况。文中的第 2 节,介绍了系统的组成及实现方案;第 3 节针对多通道系统的合成过程中的误差问题,提出了将信号通道分为单通道和多通道分别测量、之后通过处理进行综合补偿的误差控制方法,详细介绍了所采用的测量技术和补偿方法;第 4 节对有关雷达成像处理中涉及到的系统幅度相位误差补偿、运动误差补偿等相关技术问题进行了讨论和分析,给出了实际试验结果;最后是对本文工作的总结。

2 系统的方案与实现

高分辨 SAR 系统的实现,在方位向是采用孔径合成的方法来实现的,在距离向则是通过增加信号的带宽来实现的。为了在距离向实现优于 0.1 m 的高分辨率,要求雷达系统的发射和接收信号的带宽要大于 1.5 GHz。

在以往的系统,宽带信号的产生方式包括^[6]:(1)频率步进方式,通过发射一系列中心频率按照一定规律步进变化的相对窄带的脉冲信号,经过若干个脉冲后,将回波信号合成为宽带信号;(2)脉冲合成方式,在发射的探测信号中,有若干个不同频带的脉冲信号组成,经过接收处理合成为宽带信号;(3)直接产生宽带脉冲信号的方式。对于宽带信号的接收,或者采用去斜方式;或者采用多个相对窄带通道并行接收的方式。采用去斜的方式,可以减少接收信号的带宽,降低后续的采样频率,带来的问题则是信号处理的范围有限,对应雷达的测绘带宽受限。采用多通道接收的方式,一般是通过分割信号的频带来降低单通道的实现难度,带来的问题则是系统比较复杂,并且要求各通道有严格一致的幅度相位特性。

基于分析和试验,电子所研制的高分辨率 SAR 系统采用单通道宽带信号产生和发射、频带分割多通道接收的方案。在高分辨率模式下,宽带线性调

频信号采用倍频方式产生,基带信号为 103.125~128.125 MHz,经过倍频链路 7 次倍频滤波以后,产生频率范围 13.2~16.4 GHz 带宽为 3.2 GHz 的线性调频信号。接收机在经过前端低噪声放大之后,分为 8 个通道下变频到中频,形成带宽为 400 MHz 的 8 路信号,如图 1 所示,8 路信号具有相同的中频和带宽,直接在中频用 8 路 A/D 进行采样,采样后的数字信号进行解调等处理。采用这一方案的主要目的是为了降低信号的相对带宽,便于系统的实现和后续的数据量化采集。

系统的构成示意图如图 2 所示。系统的极化功能通过两个不同极化的天线交替发射同时接收来实现,干涉功能则是利用了极化工作时的双接收通道,并且采用相同极化的天线来形成干涉成像测量。整个系统的组成包括:小信号单元、高功率发射机、天馈线及天线稳定平台、数字接收机、原始数据记录器、实时成像处理器和配电盒等。

雷达系统中,天线采用抛物面形式的天线,安装在稳定平台上,通过机械扫描的方式实现聚束成像。发射机采用行波管高功率宽带发射机,可以产生 2.5 kW 的峰值发射功率。采集到的雷达回波数据进行实时记录,供后续处理使用。记录器采用专门研制的固态记录器,记录速度最高可以达到 1.5 GByte/s。同时可任选其中一路数据进行实时成像处理,所选通道的信号,中频采样以后进行数字解调,之后进行成像处理,主要用于实时在线监视和分析。表 1 给出了 SAR 系统的主要参数指标。

3 系统误差测量

实际 SAR 收发系统难以实现严格的线性相位

表 1 高分辨率 SAR 系统主要技术指标

| 参数 | 技术指标 |
|-------------------|--|
| 工作模式 | 高分辨率模式/全极化模式/干涉模式 |
| 中心频率 | 14.8 GHz/高分辨率模式 15.5 GHz/全极化、干涉模式 |
| 信号带宽 | 3.2 GHz/高分辨率模式 400 MHz/全极化、干涉模式 |
| 发射通道数 | 1 个 |
| 高分辨率模式接收通道数 | 8 个 |
| 极化和 InSAR 模式接收通道数 | 2 个 |
| 分辨率 | 优于 0.1 m/高分辨率模式 0.5 m/全极化、干涉模式 |
| 作用距离 | >10 km |
| 测绘带宽 | >2 km |
| 极化方式 | 高分辨率和干涉模式: VV 全极化模式: HH, HV, VH, VV |

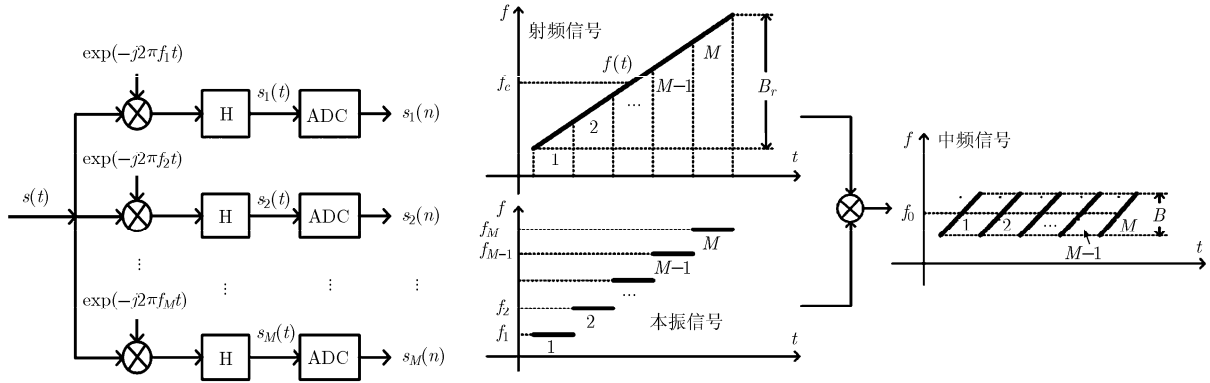


图 1 频域多通道接收模型及频谱变换示意图

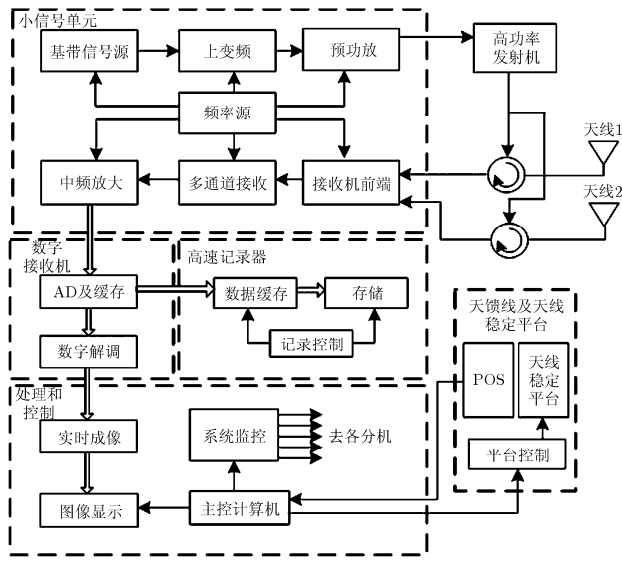


图 2 系统组成框图

和平坦的幅度频率特性，偏离希望的理想特性的幅度相位畸变称为系统的幅度相位误差。系统的幅度相位误差会使脉冲压缩后主瓣展宽，旁瓣电平升高，还可能使旁瓣产生不对称的畸变，在图像上主要表现为距离向分辨率下降和旁瓣电平的干扰。相对于较窄的收发通道，宽带系统产生的幅度相位误差会更大，特别是相位误差，会直接影响到 SAR 图像的质量，在成像处理中不能忽略。因而，要获得高分辨率清晰的雷达图像必须要在雷达的方案和实现上

控制系统的误差，并且要消除误差带来的影响。为此，针对研制的多通道宽带雷达系统，本文提出了一种误差分段测量及综合处理校正的方案。

在高分辨率模式时，SAR 系统的发射信号为单一通道的宽带信号，经过发射机放大通过天线向空间辐射，被目标反射的信号通过天线到达雷达接收机，接收机的前端是单一通道的射频宽带低噪声放大器，经过下变频以后分为 8 路子带接收通道。针对系统单通道信号发射，多通道信号接收的特点，对整个雷达系统信号回路的测量分为两个部分：一是对宽带收发通道中单通道部分的测量；另外是对多通道部分的测量。

如图 3 所示，对雷达收发部分宽带单通道的测量采用空间辐射的测量方案。选择合适的场地，将雷达的发射部分和接收部分间隔一定距离分别放置。发射部分产生的线性调频信号，经空间发射被接收部分接收，对接收到的信号进行下变频和记录。发射信号的频率范围为 13.2~16.4 GHz，接收机接收并经过下变频以后的频率范围为 0.4~3.6 GHz，试验中采用标定过示波器直接对接收和下变频的信号进行采样。

实际雷达系统的天线是收发共用的，而在测试系统中则需要两个天线，为了避免额外的误差，可以采用同样性能的天线进行测量。此外，在测试系统中接收端是单一通道的下变频信号，实际系统则

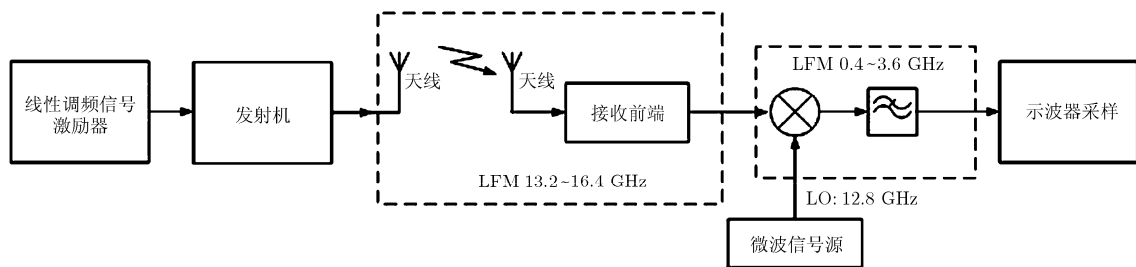


图 3 通过空间辐射的宽带收发系统测试框图

分为 8 路信号带宽相对窄的通道, 通过地面辐射测量可以获得整个雷达收发系统单一通道部分的幅度及相位特性。需要说明的是, 由于雷达发射机和接收机分别放置, 发射和接收的信号存在不确定的相位偏差, 需要在后续的补偿处理中加以考虑。

此外, 由于在雷达系统中, 中频接收机将前端接收的宽带雷达信号分成 8 个子通道接收, 因此, 需要对各个子通道的幅度相位特性进行精确测量。通常, 相位的测量需要在相同的频率上完成。然而, 由于雷达系统中每个通道都经过了一次下变频, 也就是该通道的输入输出频率不同, 对于不同的频率, 相位不能直接进行比较。为此, 对下变频接收通道的测量采用了频偏误差修正的测量技术。利用频偏误差修正的矢量网络分析仪测试技术对雷达中频接收机进行幅度相位特性测试主要分为校准和测试两个步骤。校准步骤主要用于测量系统中可能存在的各种误差项, 构建成系统误差模型; 测试步骤主要对接收机的各种参数特性(幅度、相位等)进行测试, 然后将系统误差在测试结果中去除, 从而得到下变频接收机的真实测量值。

图 4 是对 SAR 雷达中频接收机的 8 个下变频接收通道进行幅度相位特性测量的原理示意图。在利用矢量网络分析仪测试接收通道的幅度相位特性时, 利用参考混频器产生一个设定的参考信号, 由于参考信号与接收机的中频信号具有相同的频率, 所以能够进行相位的比较, 通过与设定的参考信号相比较, 可以测得下变频接收机的幅度相位特性。

通过对雷达系统特性的完整测量, 可以获得雷达收发系统的相位频率误差, 图 5 为测得的雷达接收机 8 个通道的相位特性曲线。

需要注意的是, 上述的测量方法中, 由于空间辐射测量发射和接收部分在两个不同的位置, 测量

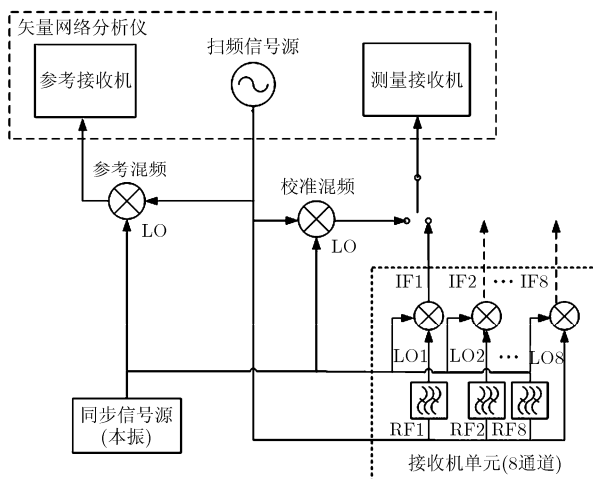


图 4 下变频接收通道幅度相位特性测试示意图

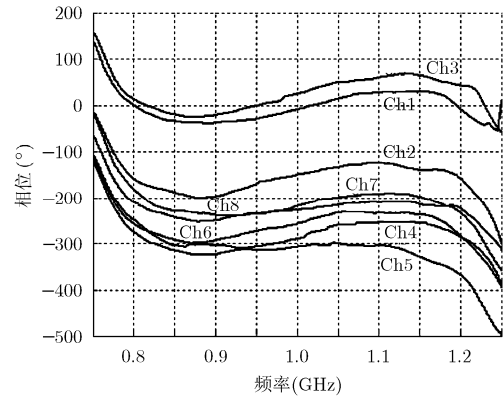


图 5 雷达接收机相位特性曲线

结果是在不同的频率基准下获得的, 因而测得的相位存在一个相位偏差。此外, 对 8 个接收通道的测量也是逐一完成的, 也存在初始相位不同步的问题。因此, 对测得的系统及各通道之间的幅度相位特性进行补偿之外, 还需要对各通道之间的相位误差进行补偿, 以确保对系统的误差进行有效的补偿, 从而获得预期的高分辨率的雷达图像。

4 高分辨率 SAR 成像处理

高分辨率多通道 SAR 系统的成像处理包括: 系统误差补偿、多通道合成、运动误差补偿和成像处理等部分。

为了实现高分辨率, 系统采用多通道方案来形成宽带信号, 对于最终所形成的宽带雷达系统, 决定其系统性能的关键因素之一就是多通道信号的合成效果。为了实现有效的通道合成, 对通道的误差进行测量和补偿是极为重要的步骤, 在测得系统的幅度和相位误差之后, 就可以在后处理时进行补偿处理, 从而消除误差的影响。

如上一节所述, 尽管可以测得各通道内的幅度相位误差, 但通道间还存在有剩余的相位误差, 这是由于测量条件的限制所带来的不可避免的误差。针对这一剩余误差问题, 可以通过信号处理的方法来估计和补偿。假设 $S_m(k)$ 为第 m 个通道的系统函数, $\phi_m(k)$ 为各通道需要补偿的相位误差, 则合成后的系统函数可以表示为

$$S(k) = \sum_{m=1}^M S_m(k) e^{j\phi_m(k)} \quad (1)$$

对 $\phi_m(k)$ 的估计主要是基于合成后的 $S(k)$ 形成的图像最优这一目标来构成优化算法。以合成图像的对比度作为目标函数, 通道间的误差补偿的越准确, 合成后信号脉冲压缩的效果也越好, 图像的对比度也越高, 基于这一目标函数就可以实现对相位误差的优化估计。此外, 还可以采取基于分数阶傅

里叶变换的改进多项式相位变换法实现高效的通道残余误差估计与补偿^[7]。

图 6 给出了多通道系统幅度相位特性测量、误差补偿及通道合成处理的流程示意图，其中测量部分是在地面预先完成的，补偿处理部分则是在雷达系统工作时对实际数据处理中完成的。

图 7 是误差补偿前后的系统响应函数对比示意图，可以看出，经过系统的测量和补偿，可以有效地消除宽带雷达收发系统带来的幅度相位误差对匹配压缩处理的影响。

图 8 给出了对实际数据进行通道合成后的成像结果对比，可以看出，经过系统误差补偿和剩余相

位误差估计和补偿之后，图像的分辨率有明显的提高。

图 9 是实际点目标在不同通道数合成后的距离向图像幅度包络对比图，提取相应的分辨率指标并与理论值进行对比，比较结果如表 2 所示。需要注意的是，成像处理中，为抑制脉冲旁瓣，对 2 维频谱采用权值 $\beta = 2.5$ 的凯泽窗进行加权，造成主瓣出现比例约为 1.18 倍的展宽。可以看出，多通道合成处理图像结果达到了预期的效果。

表 2 多通道合成点目标分辨率指标对比

| | 单通道 | 2 通道 | 4 通道 | 8 通道 |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 理论值(m) | 0.438 | 0.217 | 0.110 | 0.055 |
| 实际值(m) | 0.438 | 0.227 | 0.111 | 0.057 |

在成像处理中除了系统幅度相位误差补偿和通道合成外，还涉及到运动误差补偿问题。针对高分辨率 SAR 系统对运动误差更为敏感这一问题，系统设计采用了复合运动误差补偿方案，如图 10 所示。天线稳定平台主要用于隔离飞机的姿态变化，根据高精度惯性测量单元的测量和杂波锁定处理结果进行精确补偿。基于高精度惯性测量单元的测量数据可实现天线相位中心位置运动误差的补偿^[8]，一方面有助于聚焦处理，另一方面用于纠正由于飞机的非规则运动带来图像的几何误差。在利用惯性测量单

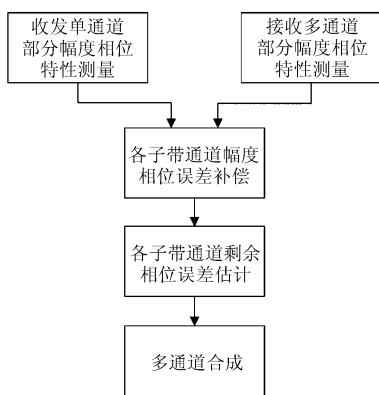
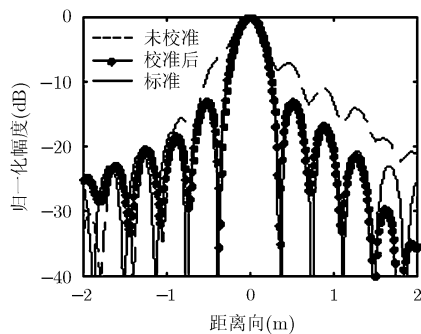
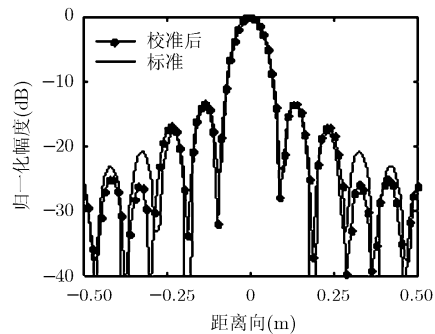


图 6 系统误差补偿及合成处理流程图

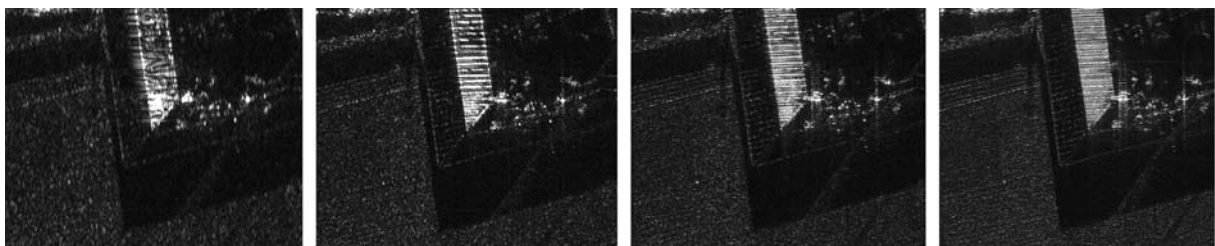


(a) 信号校准前后与标准线性调频信号冲击响应曲线(单通道)



(b) 宽带信号校准合成与标准线性调频信号冲击响应曲线(4通道)

图 7 单通道及多通道系统误差补偿结果对比



(a) 单通道图像

(b) 2通道合成图像

(c) 4通道合成图像

(d) 8通道合成图像

图 8 多通道合成 SAR 图像与单通道图像对比

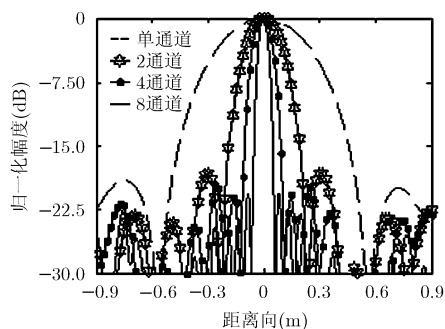


图9 误差补偿后实际点目标图像幅度包络对比

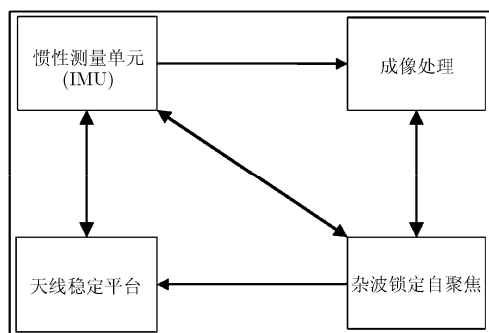


图10 高分辨率 SAR 系统运动补偿方案

元和飞机提供的导航数据补偿大部分非理想运动引入的误差后, 方案中进一步采用自聚焦处理技术^[9,10], 有效消除残余误差, 从而获得高质量的雷达图像。图 11 为获得的高分辨率 SAR 图像是采用 BP 成像算法处理得到的, 在图右上角和右下角分别为测区内一座高楼建筑的多通道和单通道的对比示意图, 可以看出在多通道合成的高分辨率图像中, 建筑的细节可以被清晰地分辨出。实际图像结果, 验证了本文所设计的系统及采用的误差测量、估计、补偿及成像处理方法的可行性和有效性。

5 结束语

针对合成孔径雷达高分辨率成像的应用和技术



图11 多通道校正合成 SAR 图像及与单通道图像对比
(右上角小图为多通道合成后的图像, 右下角小图为单通道图像)

发展需求, 本文介绍了所研制的单通道发射、多通道接收的高分辨率 SAR 系统, 包括系统的组成方案、主要技术性能指标等。系统具有最大 3.2 GHz 的信号带宽, 具有高分辨率成像、InSAR 干涉成像以及全极化成像功能。详细探讨和分析了多通道系统的频带合成、系统幅度相位误差测量补偿、运动误差补偿和成像处理等实现技术, 给出了实际飞行试验结果, 验证了研制的高分辨率 SAR 系统的技术和方案的有效性和可行性。

在过去近十年的研究中, 对高分辨率 SAR 系统相关技术问题的理论方法研究和飞行试验研究, 特别是对多通道收发、系统误差测量补偿、成像处理算法、运动误差补偿、自聚焦方法等技术和理论方法的研究, 促使我们研制的 SAR 系统的技术水平不断提高, 实现了分辨率优于 0.1 m 的技术指标, 为高分辨率 SAR 系统的研制和应用奠定了技术基础。在后续的研究工作中, 将围绕高分辨率成像应用需求, 进一步开展有针对性应用的系统设计与实现技术、信号处理技术以及目标高分辨率特性等方面的研究。随着高分辨率技术的不断发展和进步, SAR 系统无疑可以在更多应用领域发挥更大的作用。

参考文献

- [1] Ulaby F T, Moore R K, and Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive[M]. Norwood: Artech House, 1981, Vol.1: 23-33.
- [2] Doerry A W and Dubbert D F. Digital signal processing applications in high-performance synthetic aperture radar processing[J]. *Signals, Systems and Computers*, Vol. 1, 2004: 947-949.
- [3] Brener A R. Proof of concept for airborne SAR imaging with 5 cm resolution in the X-band[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 615-618.
- [4] Baque R, Bonin G, and Ruault du Plessis O. The airborne SAR-system: SETHI airborne microwave remote sensing imaging system[C]. Radar Conference-Surveillance for a Safer World, Bordeaux, France, 2009: 1-5.
- [5] Wilden H and Brener A R. The SAR/GMTI airborne radar PAMIR: technology and performance[C]. IEEE Radar Conference, Arlington, USA, 2010: 534-537.
- [6] Berens P. SAR with ultra-high range resolution using synthetic bandwidth[C]. Proceedings of IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany, 1999: 1752-1754.
- [7] 张梅, 刘畅, 王岩飞. 频带合成超高分辨率机载SAR系统的相位误差校正[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2813-2818.
Zhang Mei, Liu Chang, and Wang Yan-fei. Channel error correction for ultra-high resolution airborne SAR system with

- synthetic bandwidth[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(12): 2813–2818.
- [8] Buckreuss S. Motion compensation for airborne SAR based on inertial data, RDM and GPS[C]. Proceedings of IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, California, USA, 1994: 1971–1973.
- [9] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithm[M]. Norwood: Artech House, 1995: 245–287.
- [10] 张梅, 刘畅, 王岩飞. 频带合成机载SAR的运动补偿[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2114–2119.
- Zhang Mei, Liu Chang, and Wang Yan-fei. Motion compensation for airborne SAR with synthetic bandwidth[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2114–2119.
- 王岩飞: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向包括微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等.
- 刘畅: 男, 1978年生, 副研究员, 主要研究方向包括合成孔径雷达系统、雷达信号高速处理技术等.
- 李和平: 男, 1976年生, 副研究员, 研究方向包括合成孔径雷达系统、高速数据采集与宽带信号发生技术等.
- 贾颖新: 男, 1982年生, 助理研究员, 研究方向包括合成孔径雷达射频收发技术等.