

一种宽带多通道合成孔径雷达系统幅相特性测量与校正方法

贾颖新^{*①②} 王岩飞^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要:多通道技术可以用来提高系统的频带宽度,是实现分辨率优于 0.1 m 的超高分辨率机载合成孔径雷达(SAR)系统的一种有效的技术途径。该文针对实际雷达系统中采用的单通道宽带信号发射、8 通道下变频接收来完成宽带信号收发方案,提出一种对该收发系统的幅相误差进行测量和校正的方法,该方法采用空间闭环辐射提取宽带收发通道的幅相误差,采取具有频偏误差修正的矢量网络分析技术完成多通道接收单元中各子通道幅相误差的提取,将两者结合用于补偿整个系统误差对信号合成和成像处理所带来的影响。实际测试数据和外场飞行试验结果验证了该系统测量和校正方法的有效性和可行性。

关键词:合成孔径雷达;幅相误差;超高分辨率;多通道技术

中图分类号:TN958

文献标识码:A

文章编号:1009-5896(2013)09-2168-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01064

Measurement and Calibration of Amplitude-phase Errors in Wideband Multi-channel SAR

Jia Ying-xin^{①②} Wang Yan-fei^①

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

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Multi-channel SAR technique is an effective solution to obtain high-resolution images with better than 0.1 m. A radar transceiver channel scheme which consists of one wideband transmit channel and 8 down-converter receive channels is designed and implemented in an airborne SAR system. According to the frame design of the transceiver channel, this paper focuses on proposing one solution for obtaining and calibrating the real system amplitude-phase errors accurately. A closed-loop space radiation method is used to extract amplitude-phase errors of the broadband transceiver unit and a frequency-offset error correction technique is used to extract the sub-channel amplitude-phase errors in multi-channel receiver unit. Then the combination of the two is used to compensate the entire system error which will impact bandwidth synthesis and image processing seriously. An acute test and analysis of the system error is performed. The final airborne experiments demonstrate the validity and feasibility of the system calibration.

Key words: SAR; Amplitude-phase errors; Ultra-high resolution; Multi-channel technique

1 引言

提高合成孔径雷达的成像分辨率能够有效提高成像目标的检测和识别能力,具有广泛的应用前景,是雷达探测技术的重要发展方向之一。当前国际上公开报道的机载 0.1 m 超高分辨率 SAR 成像系统主要有美国 Sandia 国家实验室研制的 MiniSAR 系统^[1],德国高频与雷达技术研究所 FRGN-FHR 研制的 PAMIR(Phased Array Multifunctional Imaging Radar)系统^[2-4]和法国宇航中心 ONERA 研制的

RAMSES(Radar Aeroporte Multi-Spectral d'Etude des Signatures)系统^[5]等。

超高分辨率的 SAR 系统工作带宽很宽,在大相对带宽情况下不可避免会带来较大的幅相误差。另外,采取频带分割对回波信号进行频域多通道接收也是超高分辨率 SAR 系统处理宽带信号所运用的主要技术手段,而在多通道接收系统中,子通道之间的幅相特性不一致会带来频带间低阶相位误差,这会直接影响最终的带宽合成,恶化成像质量。目前对于 SAR 系统幅相校正和标定的方法主要分内定标和外定标:内定标是在系统内部形成内定标环,可以对系统主要部件的幅相特性进行提取校正。文献[6]采用内定标来补偿内部环路幅相误差,但其主

2012-08-21 收到, 2013-05-21 改回

中国科学院知识创新项目(KGOX2-SW-414)资助课题

*通信作者: 贾颖新 yingxinjia@gmail.com

要针对单通道进行，而且很难提取整个系统所有功能部件的幅相误差。而且，对于超高分辨率 SAR 采用的多通道接收系统或带宽更大的系统来说，外部环路幅相畸变引起的误差同样应该考虑。外定标主要采用外定标体(角反射器、有源定标器等)对实际系统进行辐射、极化和几何校正。但外定标法的应用通常会受到成像场景类型和定标设备精度的制约^[7]。综上所述，由内外部环路引起的幅相误差最终会影响宽带信号接收合成的质量，限制成像分辨率的提高。

中国科学院电子学研究所于 2009 年完成了超高分辨率 SAR 系统的研制和各项飞行试验验证，实现了优于 0.1 m 分辨率的 SAR 系统。针对该系统中采用的单通道宽带信号发射、多通道下变频接收架构，本文提出了一种系统幅相误差提取补偿方法，该方法采用空间闭环辐射测量提取宽带收发通道的幅相误差，其中包含了天线和辐射空间在内所有单元的幅相特性。同时采取具有频偏误差修正的矢量网络分析技术完成多通道接收单元幅相误差的提取，其中不但包含各子通道内部的幅相误差，同样也包含了通道间的低阶相位误差。通过该方法能够有效提取实际系统中存在的所有确知性误差，且不受地物特性的限制，校正结果稳定准确。通过对实际数据的分析处理，验证了方法的有效性。

2 收发系统方案实现

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。多通道合成技术是提高 SAR 距离分辨率的主要技术手段^[8,9]。电子所研制的分辨率优于 0.1 m 的 SAR 系统，其发射端采用单通道宽带激励信号发射，信号带宽为 3.2 GHz，工作频率为 Ku 波段。接收端则采用多通道下变频接收，即对宽带回波信号进行有频带交叠的信道化接收，将宽带 Ku 波段雷达回波信号下变频为一固定中频的雷达信号。具体组成方案如图 1 所示。

宽带信号发生器产生宽带雷达激励信号，信号带宽 3.2 GHz，工作频率在 Ku 波段，经过高功率发射机后通过天线发射出去。回波信号首先经过宽带接收前端进行低噪声放大，然后进入多通道接收单元，多通道接收单元由 8 个下变频通道组成，8 个下变频接收通道将宽带雷达回波信号进行等间距频谱分割后下变频为 8 路中心频率 1 GHz，带宽 400 MHz 的子带信号，最后将 8 路子带信号送入后端数字接收机。

该收发系统通过对宽带雷达信号进行信道化接收，降低了收发通道上模拟器件宽带幅度平坦度和

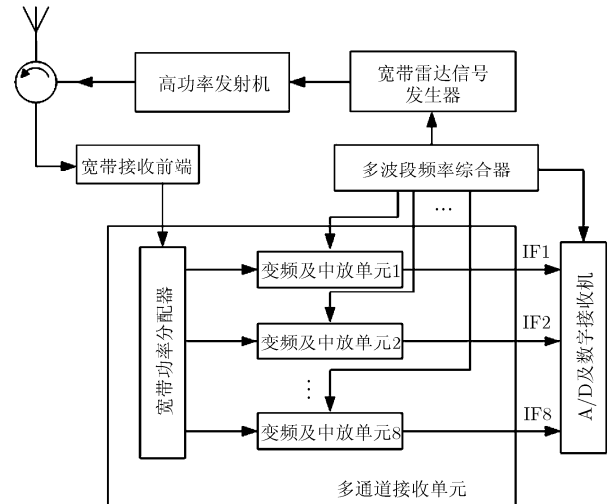


图1 宽带收发系统组成框图

相位线性度的要求，也降低了后端 A/D 数字接收机的采样率要求，有效保证了接收机的高动态范围和高灵敏度。

3 系统幅相误差的测量和提取

对于上述宽带收发系统，由于器件的非理想特性，使得系统存在幅相误差^[10]。按照误差来源可分为高频误差和低频误差。高频误差主要是由数字基带源内部 D/A 幅度量化造成的。但当量化位数大于 8 位时，误差对系统影响很小^[11]。低频误差则是由于收发链路中模拟元器件的非理想幅相特性产生的。低频误差属于确知性误差，可利用线性系统理论进行分析和补偿，相关的补偿校正方法见于各文献^[12,13]。这里针对图 1 所示分辨率优于 0.1 m 的宽带收发系统，提出一种基于空间闭环辐射测量和具有频偏误差修正的矢量网络分析技术相结合来进行幅相误差的提取和校正。

根据图 1 所示，为了提取系统幅相误差，这里将整个收发系统分为两个部分：宽带单通道收发单元和多通道接收单元。宽带单通道收发单元包括宽带信号发生器、高功率发射机、环形器、天线、宽带接收前端。这些模块的工作带宽均大于等于 3.2 GHz，它们的非理想特性会对宽带激励信号引入幅相误差。多通道接收单元主要包括 8 路下变频接收机。每个接收通道的幅相误差同样对系统性能带来影响。这里将对两个部分的幅相误差分别进行分析。

3.1 宽带单通道收发单元幅相误差提取

由于宽带单通道收发单元内存在多个功能环节，在进行系统误差提取时要尽可能仿照系统实际工作状态进行，将每个环节引入的幅相误差均包含在总误差当中，这里提出一种采用空间辐射的闭环工作方式提取系统的幅相误差的方法。

设理想的雷达激励信号频域表达式为 $S_{IN}(j\omega)$ ，宽带接收前端输出信号为 $S_o(j\omega)$ 。实际收发系统的传输模型如图 2 所示。

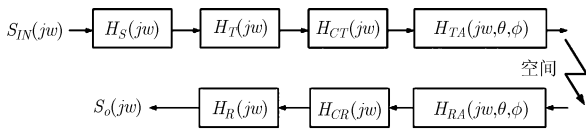


图 2 系统传输模型框图

表 1 给出各功能环节系统传输函数的具体含义。

为了能够有效提取实际工作中整个系统的传输特性，这里按照图 3 进行试验平台的搭建。

设宽带信号发生器产生的雷达激励信号为 $S_e(j\omega)$ ，则有

$$S_e(j\omega) = S_{IN}(j\omega) \times H_S(j\omega) \quad (1)$$

这里需要说明的是，对于宽带信号发生器部分，已经通过数字预失真技术对 $H_S(j\omega)$ 非理想特性进行了补偿，得到了接近理想线性调频特性的雷达激

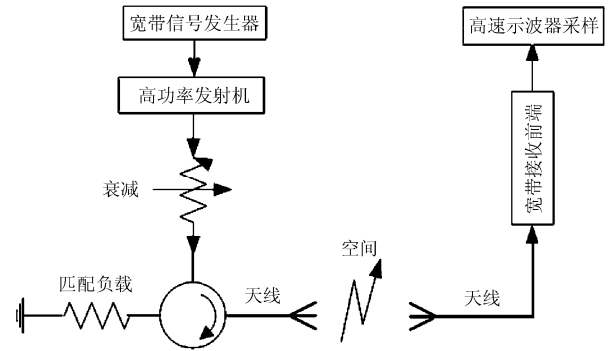


图 3 空间辐射测试原理框图

励信号，如图 4 所示，为实际宽带雷达激励信号的时频特性分析结果。

可见，信号的相位误差在 ± 0.2 rad 以内，具有接近理想的脉冲压缩特性(虚线为理想 LFM 脉压结果)。所以这里在进行系统幅相特性提取时，不再考虑 $H_S(j\omega)$ 引入的幅相误差。

信号采集需要使用数字信号分析仪来完成，仪器工作带宽要高于采集信号的最高频率，这里采用安捷伦公司的 DSA-X 系列高速数字信号分析仪采

表 1 各功能单元系统传输函数

宽带信号发生器传输函数	高功率发射机传输函数	发射时环形器传输函数	发射时天线传输函数	接收时天线传输函数	接收时环形器传输函数	宽带接收前端传输函数
$H_S(j\omega)$	$H_T(j\omega)$	$H_{CT}(j\omega)$	$H_{TA}(j\omega, \theta, \phi)$	$H_{RA}(j\omega, \theta, \phi)$	$H_{CR}(j\omega)$	$H_R(j\omega)$

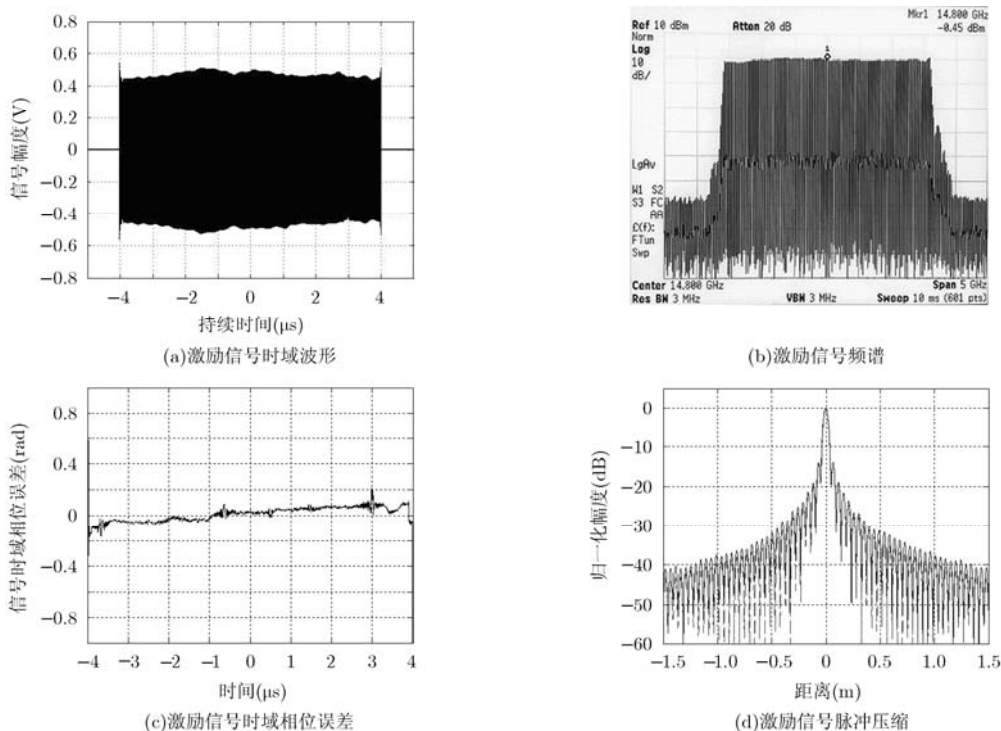


图 4 宽带雷达激励信号时频分析图

集宽带激励信号，仪器工作带宽 32 GHz，采样率 80 GS/s。

具体过程是：首先利用仪器采集宽带信号发生器产生的雷达激励信号，得到 $S_e(j\omega)$ 。然后雷达激励信号经过图 3 中多个功能环节后再通过高速示波器进行采集，得到输出信号 $S_o(j\omega)$ 。则宽带接收前端输出的信号为

$$S_o(j\omega) = S_e(j\omega) \times H_T(j\omega) \times H_{CT}(j\omega) \times H_{TA}(j\omega, \theta, \phi) \times H_{RA}(j\omega, \theta, \phi) \times H_R(j\omega) \quad (2)$$

这里需要注意的是，实际雷达系统工作时，天线是收发共用的。而在上述的空间辐射闭环测试系统中采用了两收发天线分置的工作方式，为了避免引入额外的幅相误差，需要两个天线的收发幅相特性基本一致。采用工艺成熟、一致性好、具有超宽带频率特性的抛物面天线，能够有效保证收发天线具有一致的幅相特性，所以在这里认为 $H_{TA}(j\omega, \theta, \phi)$ 和 $H_{RA}(j\omega, \theta, \phi)$ 为同一天线发射和接收时的传输函数。

为了避免空间闭合搭建不合理产生的高频失真，其测试环境是在微波暗室中进行的，同时，在进行幅相误差提取过程中，充分考虑了系统随机噪声的影响，保证系统充分预热的同时，对接收信号的采集采取了多次平均处理，来消除热噪声等随机噪声的影响。

由此可知整个空间闭环收发通道的系统传输函数为

$$H_1(j\omega) = \frac{S_o(j\omega)}{S_e(j\omega)} = H_T(j\omega) \times H_{CT}(j\omega) \times H_{TA}(j\omega, \theta, \phi) \times H_{RA}(j\omega, \theta, \phi) \times H_R(j\omega) \quad (3)$$

设雷达系统在实际工作状态下的系统传输函数为 $H(j\omega)$ ，那么有

$$H(j\omega) = H_1(j\omega) \times H_{CR}(j\omega) = \frac{S_o(j\omega)}{S_e(j\omega)} \times H_{CR}(j\omega) \quad (4)$$

即实际工作中还包含接收时环形器带来的幅相误

差，而在图 3 的空间闭环试验中该项并没有涉及。

环形器是无源三端口器件，器件频率特性稳定，很容易利用矢量网络分析仪精确测量其在接收时的传输特性，所以 $H_{CR}(j\omega)$ 可以通过矢量网络分析仪测试得到。

综上所述，最终得到了雷达系统在实际工作状态下的系统传输函数 $H(j\omega)$ 。根据系统传输函数，对幅度归一化并去除一次相位误差后，得到系统幅相误差。

图 5 为经过上述空间辐射闭环试验后，最终得到的宽带单通道收发系统幅度误差和二次以上(包含二次)相位误差特性曲线。

由图 5 可知，单通道收发系统在 3.2 GHz 带宽内的幅度平坦度在 ± 2 dB 以内，相位波动近似在 50° 以内。

3.2 多通道接收单元幅度相位误差提取

针对 8 个下变频接收通道，为了能够有效校正系统的幅度相位误差，我们希望对各个子通道的幅度相位特性进行精确测量标定。但因为每个通道都经过了一次下变频，这使得每个接收通道的输入输出频率并不相同，对于不同的频率，相位不能进行直接比较，相位的测量需要在同频上进行，这里采用了具有频偏误差修正的矢量网络分析技术^[14]。

具有频偏误差修正的矢量网络分析技术是在传统矢量网络分析仪技术的基础上，引入变频技术，即在网络分析仪的参考通道中加入与被测件输入输出频率相同的参考混频器，通过校准产生一个理论上瞬时零长度即零时延的参考相位，则对被测接收通道的相频响应是相对于这个理论零时延参考相位的响应，参考信号与接收机的中频信号具有同频，所以能够进行相位的比较。具体测试原理图如图 6 所示。

整个测试过程分为校准阶段和测试阶段。当功能开关 K 打到 S 端时，进入系统校准工作。校准阶

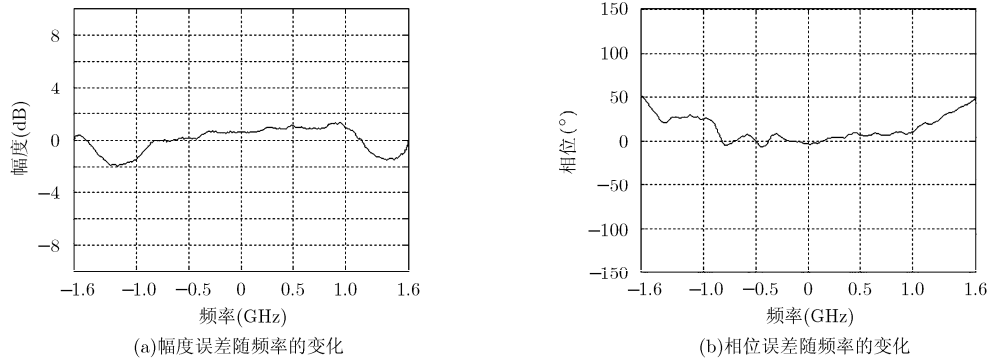


图 5 单通道系统幅相误差曲线

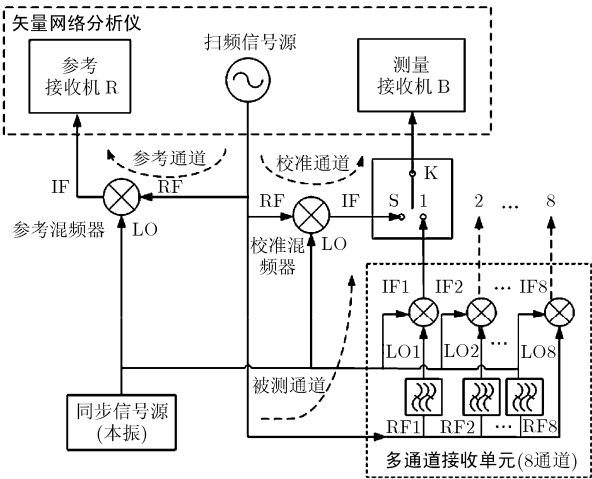


图6 测试原理框图

段主要用于测量系统中存在的各种误差项，构建系统误差模型，从而修正失配误差，并去除参考通道的频率响应，建立独立于参考通道的测试参考面。当功能开关 K 打到被测接收通道的 8 路中频 IF 输出端之一时，进入各个子通道幅相特性的测试阶段。测试阶段主要对被测件的参数特性(幅度、相位等)进行测试，然后将测试系统的误差在测试结果中去除，从而得到器件的真实测量值。

所用到的矢量网络分析仪工作带宽要高于被测信号的最高频率，必须具有频偏测量功能。这里采用安捷伦公司 PNA 系列网络分析仪进行测量。

下面利用具有频偏误差修正的矢量网络分析技术对 8 通道接收单元进行幅相测试。

输入 RF 频率范围：13.2~16.4 GHz 被等分为 8 个子带进行接收下变频。各子通道参数如表 2 所示。

表 2 子通道参数

子通道	频率范围 (GHz)	本振 (GHz)	中频 (MHz)	脉宽 (μ s)
1	13.2~13.6	12.4	800~1200	1
2	13.6~14.0	12.8	800~1200	1
3	14.0~14.4	13.2	800~1200	1
4	14.4~14.8	13.6	800~1200	1
5	14.8~15.2	14.0	800~1200	1
6	15.2~15.6	14.4	800~1200	1
7	15.6~16.0	14.8	800~1200	1
8	16.0~16.4	15.2	800~1200	1

最终分别得到 8 个接收通道的幅度相位特性，对幅度归一化并去除一次相位误差后，得到进行误差校正前 8 个子通道的幅相误差，如图 7 所示。

由图 7 可见，各通道幅度平坦度近似在 ± 1.5 dB 以内，相位波动近似在 80° 以内。另外，其相位误差特性与模拟带通滤波器相位误差特性类似，说明每个子通道的相位误差主要由通道内的带通滤波器决定。

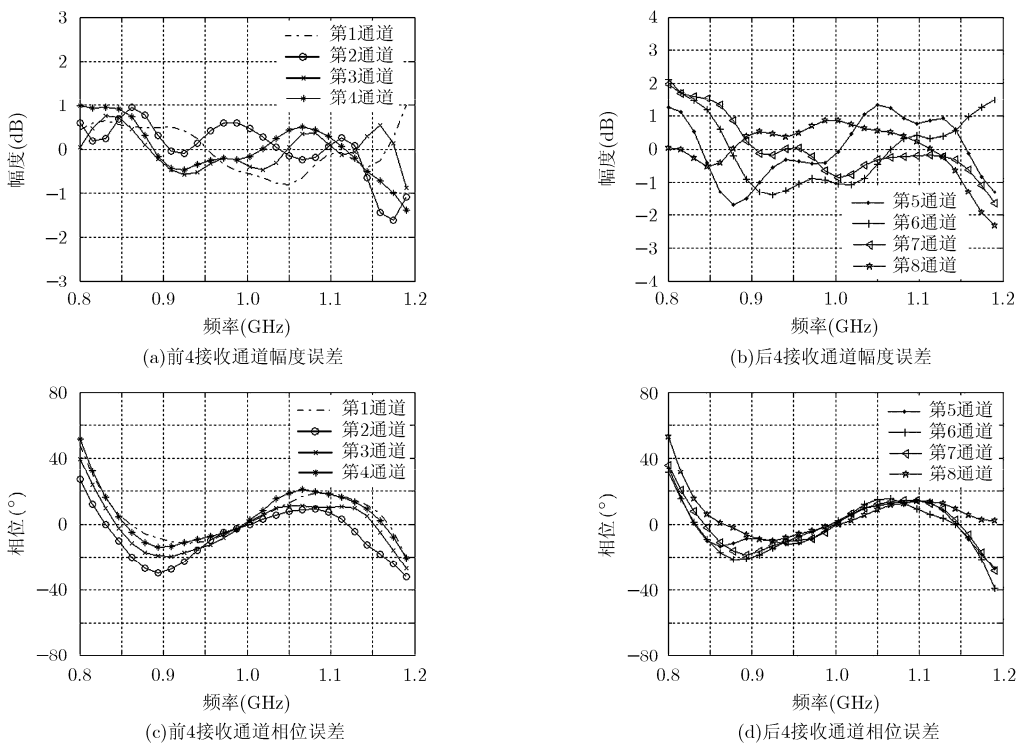


图7 多通道接收单元幅相误差曲线

通过完成对宽带单通道收发单元和多通道接收单元的幅相误差提取后,就可以将这两部分的幅度相位误差结果进一步合并,最终得到每路接收通道在实际系统工作状态下的总幅度相位误差。

设第 $N(N=1,2,\dots,8)$ 路下变频通道的总幅度相位误差函数为 $H_{NR}(jw)$, 则对应的系统校正函数为

$$C_N(jw) = \frac{1}{H_{NR}(jw)} \quad (5)$$

经过校正后的第 N 路输出信号为

$$S_{CN}(jw) = S_{ON}(jw) \times C_N(jw) \quad (6)$$

其中 $S_{ON}(jw)$ 为第 N 路未经过校正的输出频域信号。这样就完成了系统误差的补偿。

4 测量数据分析与幅相补偿

下面以第 1 通道为例,给出系统幅相误差的测试结果。图 8 给出了第 1 通道的总幅相误差特性曲线。可见,第 1 通道总的幅度误差在 ± 2 dB 以内,相位波动在 80° 以内。

这里利用幅度相位补偿前后信号脉冲压缩结果来衡量补偿效果。图 9 给出了通过空间闭环实验得到的第 1 通道输出的子带时域信号波形以及脉冲压缩结果,图 9(b)中实线为未进行幅度相位误差补偿校准的脉冲压缩结果,虚线为经过幅度相位误差补

偿校准后的脉冲压缩结果。对比较准前后,脉冲压缩峰值旁瓣比改善了约 4 dB,脉冲压缩结果接近理想线性调频信号。

由于整个误差提取测量都是在地面进行的,为了验证幅度相位补偿校准的实际效果,选取雷达实际飞行试验的单通道回波数据中某强点目标,并对比幅度相位校准前后的脉冲压缩结果(凯泽窗加权),如图 10 所示。

可以看到,经过幅度相位补偿校准后,主瓣宽度变窄,峰值旁瓣比接近 40 dBc,而未进行校正时是 25 dBc,可见通过误差校正后旁瓣的抑制度改善了 15 dB,证明了利用飞行前误差提取校正进行系统误差补偿的可行性和有效性。经过外场飞行试验,图 11 为通过上述系统幅度相位失真校正,再完成多通道频带合成^[15,16]后得到的分辨率优于 0.1 m 的 SAR 图像。

5 结束语

本文针对分辨率优于 0.1 m 的宽带机载 SAR 系统,提出了系统幅度相位误差提取校正方法。该方法通过空间辐射闭环测试提取宽带单通道收发系统的幅度相位特性,通过频偏误差修正的矢量网络分析技术提取多通道接收单元的幅度相位特性。利用

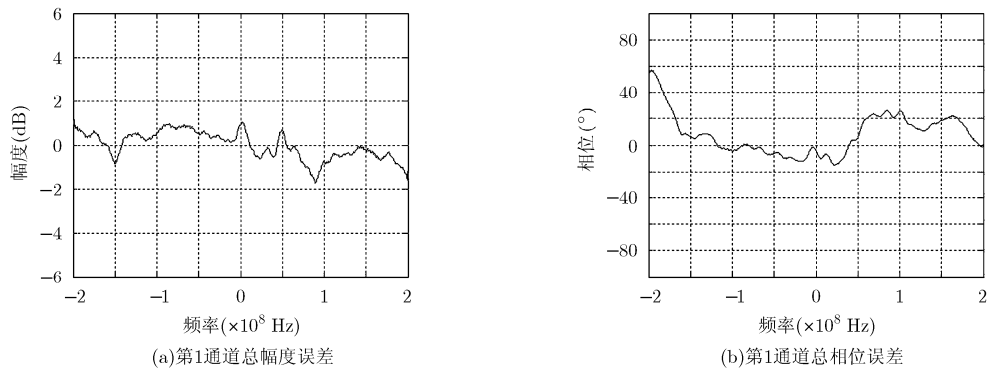


图8 第1通道总幅相误差特性曲线

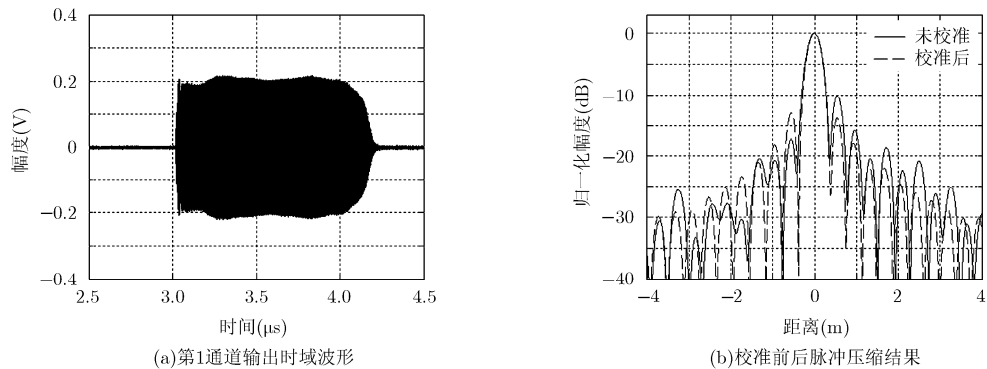


图9 闭环实验实测结果

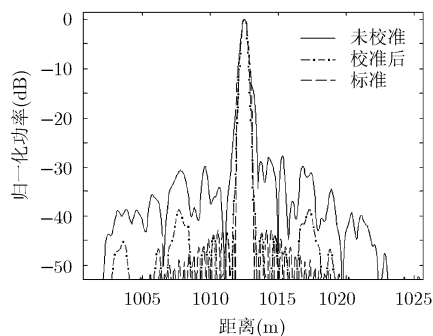


图 10 误差补偿前后实际点目标的脉冲压缩曲线

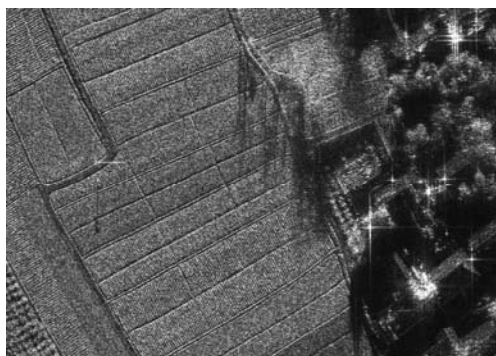


图 11 优于 0.1 m 的高分辨率 SAR 图像

该方法能够有效测量整个高分辨率 SAR 系统存在的所有确知性幅度相位误差, 并对误差进行了有效补偿。该方法准确稳定, 不受地物特征的限制, 通过对比误差补偿校准前后的实验结果证明了方法的有效性。

参考文献

[1] Doerry A W and Dubbert D F. Digital signal processing applications in high-performance synthetic aperture radar processing[C]. Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, Nov. 2003: 947-949.

[2] Ender J H G and Brenner A R. PAMIR — a wideband phased array SAR/MTI system[C]. EUSAR 2002, Cologne, Germany, 2002: 157-162.

[3] Brenner A R, Essen H, and Stilla U. Representation of stationary vehicles in ultra-high resolution SAR and turntable ISAR images[C]. EUSAR 2012, Nuremberg, Germany, April 23-26, 2012: 147-150.

[4] Ender J H G, Brenner A R, Essen H, *et al.* Advances in radar imaging at Fraunhofer-FHR[C]. 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Seoul, Korea, Sept. 26-30, 2011: 1-2.

[5] Cantalloube H M J and Dubois-Fernandez P. Airborne X-band SAR imaging with 10 cm resolution-technical challenge and preliminary results[C]. Proceedings of

IGARSS'03, Palaiseau, France, 2003: 185-187.

[6] Deng Y, Zheng H, Wang R, *et al.* Internal calibration for stepped-frequency chirp SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1105-1109.

[7] D'Aria D, Ferretti A, and Guarnieri A M. SAR calibration aided by permanent scatters[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2076-2086.

[8] Wilden H and Brener A R. The SAR/GMTI airborne radar PAMIR: technology and performance[C]. IEEE Microwave Symposium Digest, Anaheim, CA, USA, May 23-28, 2010: 534-537.

[9] Gebert N, Almeida F Q, and Krieger G. Airborne Demonstration of multichannel SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(5): 963-967.

[10] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 140-153, 163-178.

[11] Griffiths H D and Bradford W J. Digital generation of high time-bandwidth product linear FM waveforms for radar altimeters[C]. *IEE Proceeding F, Radar and Signal Processing*, 1992, 139(2): 160-169.

[12] Yu Hui and Lei Wan-ming. Amplitude-phase compensation based parallel implementation of real-time SAR/ISAR[C]. 2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Seoul, KOREA, Sept. 26-30, 2011: 1-4.

[13] Chen Shu-xuan, Jiang Li-min, and Xiang Mao-sheng. Channel error correction for wideband SAR — a joint multiple subpulses processing method[J]. *Journal of Electronics(China)*, 2011, 28(1): 134-140.

[14] Dunsmore J. Novel method for vector mixer characterization and mixer test system vector error correction[C]. 2002 IEEE MTT-S International, Microwave Symposium Digest, Seattle, Washington, USA 2002, 3: 1833-1836.

[15] 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.

[16] 胡建民, 王岩飞, 李和平. 基于回波数据的超高分辨率 SAR 通道相位误差估计与补偿[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7): 1602-1608. Hu Jian-min, Wang Yan-fei, and Li He-ping. Channel phase error estimation and compensation for ultra-high resolution SAR based on echo data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(7): 1602-1608.

贾颖新: 男, 1980 年生, 博士生, 助理研究员, 研究方向为高分辨率 SAR 收发系统设计。

王岩飞: 男, 1963 年生, 博士生导师, 研究员, 研究领域为信号处理和微波成像技术。