

文章编号: 2095-4980(2018)01-0051-06

相控阵体制 SAR 系统的误差建模与补偿方法

毛永飞^{1,2}, 高文军^{1,2}, 韩运忠^{1,2}

(1.北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2.北京市电磁兼容与天线测试工程技术研究中心, 北京 100094)

摘 要: 在基于相控阵天线体制的合成孔径雷达(SAR)系统中, 中央电子设备和相控阵天线的非理想特性, 会引入幅相误差, 造成 SAR 信号幅相特性畸变, 影响 SAR 图像等数据产品的质量。本文建立了相控阵体制 SAR 系统误差的模型, 并设计了误差校正方法。研究表明: 雷达中央电子设备的非理想特性会引入固定的幅频、相频误差; 相控阵天线的非理想特性所引入的幅频、相频误差会随着波束指向的变化而变化, 该误差主要来源于有源器件在不同频点处的性能差异, 并会受到 T/R 模块移相衰减量的调制; 可通过测量或分析计算对相控阵 SAR 的系统误差进行提取, 并在 SAR 成像处理阶段实施误差补偿。

关键词: 相控阵天线; 合成孔径雷达; 系统误差补偿

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0051

Error modeling and compensation for phased array antenna SAR system

MAO Yongfei^{1,2}, GAO Wenjun^{1,2}, HAN Yunzhong^{1,2}

(1.Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2.Beijing Engineering Research Center of EMC and Antenna Test Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The non-ideal characteristics of central electronic equipment and phased array antenna in Synthetic Aperture Radar(SAR) system can introduce systematic errors, which may contribute to amplitude and phase errors of SAR signal, and hence degrades SAR images. A model is presented to derive signal errors due to non-ideal characteristics of central electronic equipment and phased array antenna, and a method is proposed to correct the errors. The model shows that the error resulting from central electronic equipment is almost invariant, while the error resulting from phased array antenna varies with the direction of the beam and is modulated by the attenuation and phase shift amount of T/R. The system error of phased array antenna SAR can be extracted by system testing or analysis calculation, and then can be compensated during SAR imaging process.

Keywords: phased array antenna; Synthetic Aperture Radar; system error compensation

SAR 能够借助平台的运动实现对观测场景的二维成像, 它不受天气和日照条件的限制, 能够全天候地对地观测^[1-2]。相控阵天线能够通过控制各 T/R 通道的移相量(延时量)和衰减量, 实现波束指向捷变和波束形状控制^[3-4]。基于相控阵天线的 SAR 系统能够更加方便快捷地实现波束扫描和波形控制, 是 SAR 系统发展的主要方向。在相控阵 SAR 系统中, 各种收发设备、传输通道、T/R 组件的非理想特性, 会造成 SAR 信号畸变, 进而影响 SAR 图像等数据产品的质量^[1,5-7]。探索相控阵 SAR 系统误差的影响机理, 并针对性地设计补偿方法, 有助于提升 SAR 成像的精确度。

1 SAR 系统误差概述

相控阵 SAR 的系统结构如图 1 所示。中央电子设备和相控阵天线的非理想特性会在 SAR 发射或接收信号中引入误差, 主要表现为沿距离向的幅相畸变, 这将导致距离向脉冲压缩效果的退化, 造成 SAR 图像距离向

散焦^[1-2,5-7]。对 SAR 系统误差进行补偿,首先要进行误差提取,即通过一定的测量手段获取中央电子设备、相控阵天线的误差调制函数;然后在 SAR 成像阶段依据此误差调制函数,进行补偿处理,以消除系统误差对 SAR 图像的不利影响。

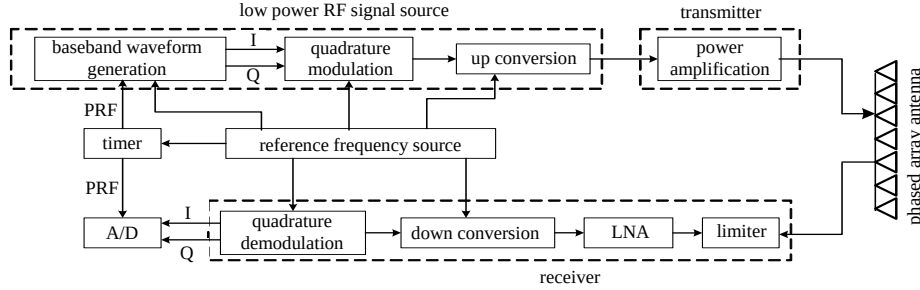


Fig.1 Structure of SAR system with phased array antenna
图1 基于相控阵天线的SAR系统结构图

2 SAR 系统误差提取

相控阵 SAR 的系统误差主要源自收发器件、传输通道、T/R 组件的非理想特性,与硬件设备密切相关。因此,基于雷达硬件系统对各项误差进行测量提取十分必要,这是后续补偿处理的依据。

2.1 中央电子设备引入误差的提取

首先剥离相控阵天线的影响,将 SAR 中央电子设备视为一个整体。即在实际测量提取误差时,将发射机的输出信号直接接入接收机,不经过天线。令 $S_{\text{Cin}}(f)$ 表示发射端的输入信号,其通常为理想的线性调频信号; $S_{\text{Cout}}(f)$ 为接收端的输出信号,其通常为含有一定幅相误差的线性调频信号。

SAR 中央电子设备的误差模型如图 2 所示,由该模型可得:

$$S_{\text{Cout}}(f) = S_{\text{Cin}}(f) A_c(f) \exp[j\phi_c(f)] \quad (1)$$

式中: $A_c(f)$ 、 $\phi_c(f)$ 分别表示 SAR 中央电子设备的幅频误差、相频误差。则 SAR 中央电子设备的误差函数可表示为:

$$H_c(f) = \frac{S_{\text{Cout}}(f)}{S_{\text{Cin}}(f)} = A_c(f) \exp[j\phi_c(f)] \quad (2)$$

显然,误差函数可通过对输入、输出信号测量并计算后获得。为了减少随机误差的影响,可进行多次重复的测量和计算,在频率域取多次误差函数的平均值作为最终结果。

2.2 相控阵天线引入误差的提取

相控阵天线包含众多 T/R 通道,一方面,通过各通道之间的移相量、延时量配置,能够实现不同的波束指向,通过各通道之间的衰减量配置,能够实现预期的天线方向图副瓣效果;另一方面,各 T/R 通道均可具备发射放大(功放芯片)、接收放大(低噪放芯片)功能,进而实现发射分集和接收分集,尤其可以降低传统雷达集中发射的功率压力。因此,相控阵天线适合用于大发射功率、有波束捷变需求(例如扫描模式,利用波束扫描进行运动误差对消)的 SAR 系统。

但相控阵天线在硬件系统和天线体制上存在一定的非理想特性,本节将分类分析相控阵天线非理想特性对 SAR 系统的影响。

2.2.1 衰减量、移相量、延时量误差

衰减器、移相器、延时器等器件的非理想特性,会引入衰减量、移相量和延时量误差,进而造成天线波束指向精确度和方向图副瓣电平的恶化,误差严重时会导致无法实现空间波束形成。此类误差的影响机理是,衰减量、移相量和延时量误差会导致相控阵天线各通道之间的相对幅度、相对相位关系错乱,使各通道信号无法在预期的波束指向上形成同相叠加,进而影响空间波束形成的效果。

解决此问题的常用方法是,对相控阵天线进行幅相校正。幅相校正通常会在天线单机的研制阶段进行考虑,

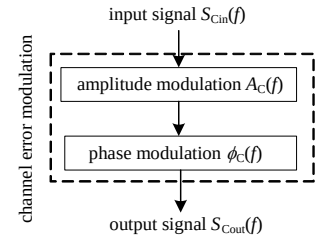


Fig.2 Error model of SAR central electronic equipment
图 2 SAR 中央电子设备的信号误差模型

幅相校正利用天线自身的校正模块或利用近场天线测试系统对各阵元通道的衰减量误差、移相量误差、初相状态进行测量,并依据测量值对各通道的幅相配置参数进行修正。

总之,此类误差会影响天线的波束形成效果,为了实现预期的天线方向图性能,通常在天线单机阶段对此类误差进行校正,故该类误差不会遗留至 SAR 系统阶段。换言之,该类误差的补偿处理主要是在相控阵天线对各通道的参数(移相量、延时量、衰减量)配置阶段,故此类误差不会遗留至 SAR 信号处理阶段。

2.2.2 功率放大器、低噪声放大器等器件的幅频/相频误差

相控阵天线单机阶段,通常会保证各频点处的方向图指标、功率指标等满足要求,但很少顾及频点之间的差异。尽管就单频点来看,各频点处的天线方向图指标均满足要求,但相控阵天线在整个带宽内的幅频曲线、相频曲线并不平坦,这会造成 SAR 信号幅频特性、相频特性的畸变。因此,需要在 SAR 系统阶段对此类误差进行分析和补偿。

此类误差主要源于各阵元通道中功率放大器、低噪声放大器等器件在幅频特性、相频特性方面存在非理想性,其影响机理是在 SAR 线性调频信号中引入幅度误差和相位误差,影响 SAR 成像处理阶段的脉冲压缩效果,进而造成压缩脉冲的主瓣展宽(分辨率恶化)或旁瓣抬高(对比度恶化)。解决此类问题的思路是,对误差进行测量或估算,并据此在 SAR 成像阶段予以补偿。

相控阵天线引入的 SAR 信号误差,是所有阵元发射/接收通道误差的叠加;各阵元发射/接收通道的幅频、相频误差,会受到该阵元通道衰减量、移相量、延时量的调制。因此, SAR 信号的误差会随着波束指向和波束形状变化。

1) 直接测量法

直接测量法即是对相控阵天线各波位所引入的 SAR 信号误差(幅频误差、相频误差)进行测量。直接测量法,一方面需要对相控阵发射、接收模式下的信号畸变量分别进行测量,因为 SAR 的回波获取时经过天线收发双程调制;另一方面,需要对所有波位的信号畸变量进行分别测量,因为不同波位的波控码(衰减量、移相量、延时量)不同,阵元通道幅频误差、相频误差的受调制情况也不同。

在某一波束指向下,当相控阵工作于发射模式时,设信号源发出的信号为 $S_{\text{Tin}}(f)$,数据采集单元接收到信号为 $S_{\text{Tout}}(f)$,阵元通道的调制函数为 $L_T(f)$ (其取值可通过衰减量、移相量、延时量的设置进行核算),如图 3 所示,则可得相控阵天线在发射状态下引入的 SAR 信号误差为:

$$H_T(f) = \frac{S_{\text{Tin}}(f)L_T(f)}{S_{\text{Tout}}(f)} \quad (3)$$

同理,在某一波束指向下,相控阵天线在接收模式下引入的 SAR 信号误差为(如图 4 所示):

$$H_R(f) = \frac{S_{\text{Rin}}(f)L_R(f)}{S_{\text{Rout}}(f)} \quad (4)$$

式中: $S_{\text{Rin}}(f)$ 为信号源发出的信号; $S_{\text{Rout}}(f)$ 为天线接收到的信号; $L_R(f)$ 为阵元通道的调制函数(其取值可通过衰减量、移相量、延时量的设置进行核算)。则该波位下,相控阵天线的误差函数可表示为

$$H_A(f) = H_T(f)H_R(f) \quad (5)$$

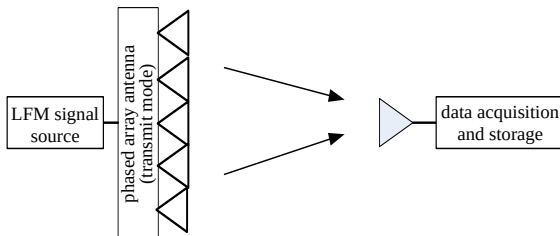


Fig.3 Measurement of signal error resulting from phased array antenna(transmit mode)

图 3 相控阵天线(发射模式)引入的信号畸变误差测量

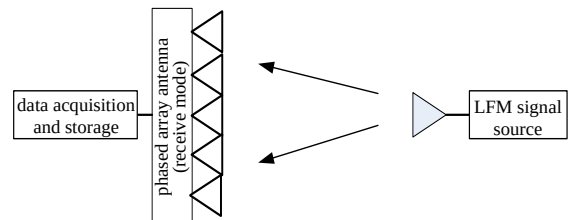


Fig.4 Measurement of signal error resulting from phased array antenna(receive mode)

图 4 相控阵天线(接收模式)引入的信号畸变误差测量

利用直接测量法来获取相控阵天线的误差函数,优点是能够较为准确直接地将相控阵天线所引入的 SAR 信号误差测量出来;缺点是需要利用微波暗室资源,需要在远场条件下进行测试,需要针对每个波位分别进行测试,需要考虑测试设备的非理想因素的影响,工作量较大。

2) 分析计算法

相控阵天线阵元发射/接收通道引入的 SAR 信号误差,主要是由功放、低噪放等器件的特性和波控码的调制

造成, 在已知器件特性和波控码的前提下, 可以对各波位引入的 SAR 信号误差进行理论计算。其中器件特性即为各通道的幅频、相频特性; 波控码即为各通道的移相衰减量。

相控阵天线单个 T 通道的误差模型如图 5(a)所示, 由该模型可得:

$$S_{\text{Tout}}(f) = D_n' S_{\text{Tin}}(f) A_n'(f) \exp[j(\phi_n'(f) + P_n')] \quad (6)$$

式中: $S_{\text{Tin}}(f), S_{\text{Tout}}(f)$ 表示该通道的输入、输出信号; $A_n'(f), \phi_n'(f)$ 表示该通道的幅频、相频误差; D_n', P_n' 表示该通道的衰减、移相调制。则单个 T 通道的误差函数可表示为:

$$H_{\text{Tn}}(f) = \frac{S_{\text{Tout}}(f)}{S_{\text{Tin}}(f)} = D_n' A_n'(f) \exp[j(\phi_n'(f) + P_n')] \quad (7)$$

同理, 由图 5(b)可得相控阵天线单个 R 通道的误差函数

$$H_{\text{Rn}}(f) = D_n'' A_n''(f) \exp[j(\phi_n''(f) + P_n'')] \quad (8)$$

相控阵天线对 SAR 信号的影响是所有 T/R 通道共同作用的结果, 故相控阵天线的误差调制函数为

$$H_A(f) = \sum_n H_{\text{Tn}} \sum_n H_{\text{Rn}} = \sum_n (D_n' A_n'(f) \exp[j(\phi_n'(f) + P_n')]) \sum_n (D_n'' A_n''(f) \exp[j(\phi_n''(f) + P_n'')]) \quad (9)$$

在实际中, 相控阵天线各通道通常选用同一型号的功放、低噪放芯片, 而同型号芯片通常有着近似的幅频、相频误差, 故可认为所有发射通道的幅频误差均为 $A_n'(f)$, 相频误差均为 $\phi_n'(f)$, 所有接收通道的幅频误差均为 $A_n''(f)$, 相频误差均为 $\phi_n''(f)$, 故上式可变为:

$$H_A(f) = \sum_n H_{\text{Tn}} \sum_n H_{\text{Rn}} = \sum_n (D_n' A'(f) \exp[j(\phi'(f) + P_n')]) \sum_n (D_n'' A''(f) \exp[j(\phi''(f) + P_n'')]) \quad (10)$$

由上式可知, 在获知阵元通道的幅频、相频率特性后(鉴于各通道的设计架构、芯片选型一致, 故认为所有通道的幅相特性一致, 通过一次测量即可获得该幅相特性), 结合各波位的移相衰减量配置, 即可计算获得相控阵天线在各种波位下的误差函数。

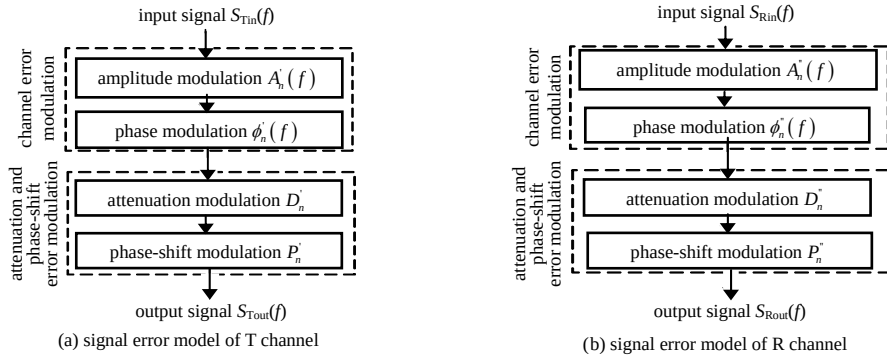


Fig.5 Signal error model of T/R channel in phased array antenna

图 5 相控阵天线 T/R 通道的信号误差模型

3 SAR 系统误差补偿

在相控阵 SAR 系统中, 实际收到的回波信号 $S_{\text{real}}(f)$ 相当于在理想回波信号 $S_{\text{ideal}}(f)$ 的基础上, 增加中央电子设备、相控阵天线误差调制的影响, 即:

$$S_{\text{ideal}}(f) H_C(f) H_A(f) = S_{\text{real}}(f) \quad (11)$$

系统误差补偿即是利用数据处理的方法, 去除误差调制的影响, 尽可能地使实际回波信号恢复至理想状态。系统误差补偿的数学表达式为

$$S_{\text{cal}}(f) = \frac{S_{\text{real}}(f)}{H_C(f) H_A(f)} \quad (12)$$

式中 $S_{\text{cal}}(f)$ 表示误差补偿后的回波信号。

在 SAR 成像处理流程中, 式(12)所示的误差补偿操作, 在距离向频域中的脉冲压缩前执行。误差补偿操作能够较好地保证 SAR 信号的脉冲压缩效果, 进而保证 SAR 图像的质量^[5,8]。

基于点目标场景,对相控阵 SAR 系统误差补偿前后的距离向脉冲压缩结果进行了仿真。图 6(a)为未进行误差补偿时的脉冲压缩结果,系统误差导致了旁瓣抬高和旁瓣不对称;图 6(b)为按照本文方法进行误差补偿后的脉冲压缩结果,取得了-13dB 的旁瓣电平(未加窗函数)和较好的旁瓣对称性。

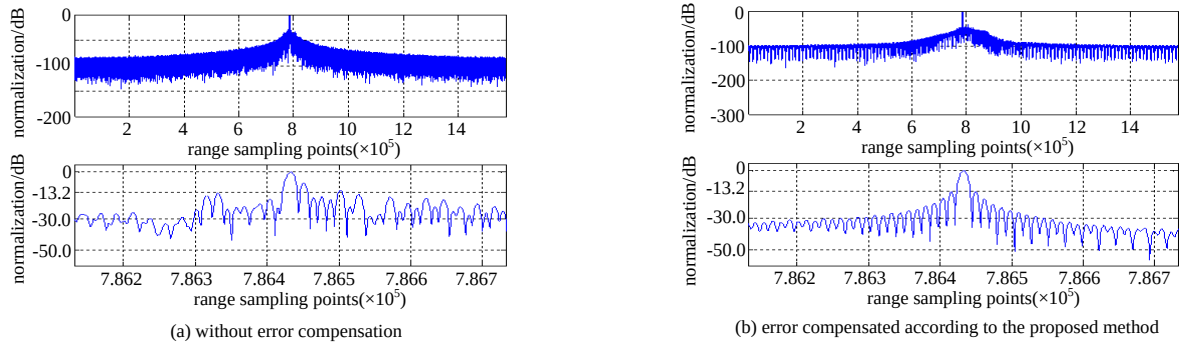


Fig.6 Pulse compression performance of SAR range signal

图 6 SAR 距离向信号的脉冲压缩效果

4 结论

在相控阵 SAR 系统中,雷达中央电子设备、相控阵天线均会引入幅相误差。其中中央电子设备引入的幅相误差较为固定,可通过直接测量法对误差进行提取;相控阵天线引入的幅相误差会随着波束指向的变化而变化,可通过逐波位测量法或分析计算法对误差进行提取。上述系统误差会造成 SAR 信号幅频、相频特性的畸变,影响 SAR 距离向的聚焦成像质量。对于上述系统误差,可以依据误差提取结果,在 SAR 成像处理阶段实现有效的补偿。相控阵 SAR 系统误差的提取与补偿方法的流程如图 7 所示。

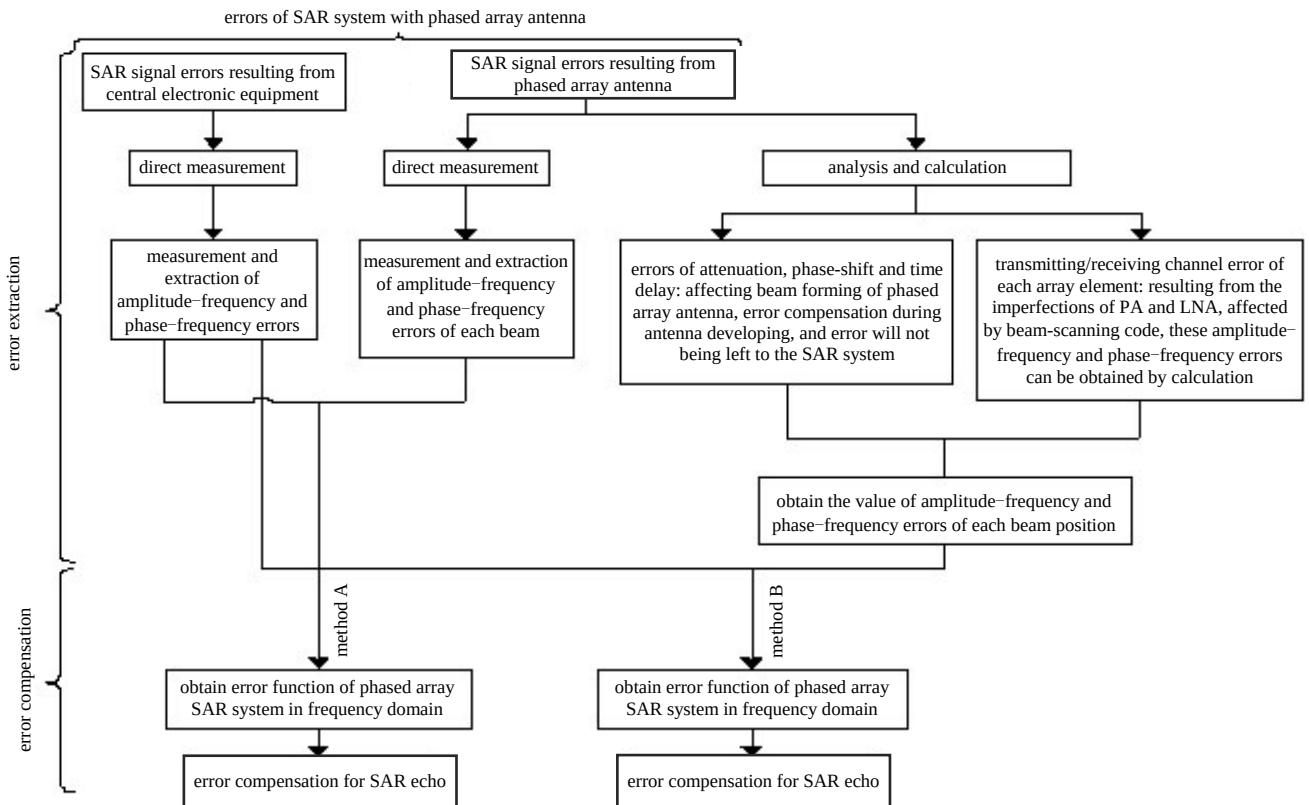


Fig.7 Diagram of error extraction and compensation for SAR system with phased array antenna

图 7 相控阵 SAR 系统误差的提取与补偿方法框图

在上述流程中,雷达中央电子设备引入的误差相对较为固定,补偿方法较为成熟;相控阵天线引入的误差相对复杂,一方面误差会随着波束指向的变化而变化,另一方面误差是相控阵天线诸多阵元通道共同作用的结果。值得注意的是,相控阵天线的衰减量、移相量、延时量误差对天线波束形成的影响较大,通常会在天线单机研制时着重考虑,并在天线实施波控码配置时被补偿掉,故一般不会对 SAR 信号造成影响;而相控阵天线中各通道的幅频/相频误差通常在天线单机阶段不被重视(相控阵天线单机通常较注重各阵元通道的一致性,而较少关注不同频点之间的幅相一致性),致使该误差遗留至 SAR 系统阶段,造成 SAR 信号的幅频、相频特性畸变,因此有必要在 SAR 处理阶段对该类误差进行着重考虑。

参考文献:

- [1] BRÄUTIGAM Benjamin, GONZALEZ Jaime Hueso, SCHWERDT Marco, et al. Terra SAR-X instrument calibration results and extension for Tan DEM-X[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 702–715.
- [2] 毛永飞, 高文军, 韩运忠. 机载 SAR 运动补偿残余误差建模及影响分析[J]. 测绘通报, 2015(1): 44–49. (MAO Yongfei, GAO Wenjun, HAN Yunzhong. Analysis of residual errors in SAR motion compensation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015, 48(1): 44–49.)
- [3] 撒文彬, 王海涛, 姜岩, 等. 相控阵天线色散误差对高分辨率星载 SAR 成像质量的影响研究[J]. 上海航天, 2016, 33(4): 38–44. (SA Wenbin, WANG Haitao, JIANG Yan, et al. Impact study of phased array antenna dispersion error on image quality of high resolution spaceborne SAR[J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(4): 38–44.)
- [4] 胡雪梅, 康明魁, 王伟, 等. 六边形相控阵阵面误差的影响分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(12): 1629–1664. (HU Xuemei, KANG Mingkui, WANG Wei, et al. On influence of structural errors for hexagonal phased array antennas[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(12): 1629–1664.)
- [5] 潘舟浩, 刘波, 李道京, 等. 毫米波三基线 InSAR 系统误差校正和信号分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2464–2470. (PAN Zhouhao, LIU Bo, LI Daojing, et al. Millimeter wave three-baseline InSAR system error correction and signal analysis[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(10): 2464–2470.)
- [6] 曾祥能, 何峰, 张永顺, 等. 星载 SAR 天线阵面形变分析与补偿方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(3): 158–163. (ZENG Xiangneng, HE Feng, ZHANG Yongshun, et al. Analysis and compensation of spaceborne SAR antenna array deformation[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(3): 158–163.)
- [7] MAGNARD C, MEIER E, SMALL D, et al. Processing of MEMPHIS millimeter wave multi-baseline InSAR data[C]// IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Honolulu, Hawaii, USA: [s.n.], 2010: 4302–4305.
- [8] 刘丹. 宽带成像相控阵雷达距离像的失真与补偿方法[C]// 第八届全国雷达学术年会. 安徽, 合肥: [s.n.], 2002: 530–534. (LIU Dan. Distortions and compensation methods of wideband phase array image radar's range profile[C]// The 8th National Conference on Radar. Hefei, Anhui: [s.n.], 2002: 530–534.)

作者简介:



毛永飞(1983–), 男, 河南省驻马店市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为合成孔径雷达、相控阵天线. email: myfchn@163.com.

勘 误

2017 年第 6 期 P927 作者简介中, “高 昊(1982–)”, 改为 “高 昊(1994–)”。