

基于内定标信号的合成孔径雷达系统幅相误差的提取和校正

矫伟^{***} 梁兴东^{*} 丁赤飏^{*}

^{*}(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^{**}(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文根据合成孔径雷达的三路定标设计,提出了基于内定标信号的收发系统幅相误差的提取和校正方案。与从雷达回波数据中提取系统相位误差的方法相比,该方案具有两方面的优越性:提取误差不受地物特性的限制,使用方便;不但可以提取相位误差,还可以提取系统幅度误差。经验证该方案能大大改善图像质量。

关键词: 合成孔径雷达,幅相误差,内定标

中图分类号: TN958 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)12-1883-04

Extraction and Correction of SAR Amplitude and Phase Errors Based on Internal Calibration Signal

Jiao Wei^{***} Liang Xing-dong^{*} Ding Chi-biao^{*}

^{*}(The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^{**}(Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Based on the design of three-path calibrator of SAR, this paper proposes one solution of obtaining system errors information from internal calibrator signal to correct the received SAR data in frequency domain. Compared with the methodology of extracting system phase errors from SAR echo data, the method addressed in this paper has two advantages: it is convenient to use since it is independent of ground objects; it can extract system phase errors as well as amplitude errors. Experimental results indicate that the method is very effective to improve image quality.

Key words Synthetic Aperture Radar (SAR), Amplitude and phase errors, Internal calibration

1 引言

随着合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)应用的日益广泛和深入,人们对高分辨率的要求越来越迫切,而增加发射信号带宽是提高距离向分辨率的有效途径。由于相对带宽很大,宽带 SAR 收发系统难以实现严格的线性相位和平坦的幅频特性,系统幅相误差的存在影响了图像质量,本文针对这个问题给出了一种解决方案。

文献[1]给出了一种在时域估计和校正回波信号携带的系统相位误差的方法,该方法算法简单,易于实现,可以估计和校正包括系统各部分器件、天线及传播过程中的介质等各种因素引起的回波相位误差。但是,这种方法是在时域进行的,必须对类似角反射器这样的强散射点回波才能较准确地提取误差,对地物的依赖性强;该算法的另一个缺点是不能估计和校正回波信号携带的系统幅度误差,这就限制了算法的实际应用。本文提出了一种利用内定标信号在频域提取系统幅相误差并以此校正回波信号的方法,不受制于地物特

性,校正效果稳定,使用灵活;而且,该方案基于三路内定标回路,可以测量和分析雷达收发系统各部分的相位和幅度特性。

本文第2节具体介绍了提取和校正系统幅相误差的方案;第3节用实验数据验证了方案的可行性并给出了实际的校正效果;最后给出了结论。

2 提取和校正误差方案

雷达回波信号携带的误差来源于多个方面,本文主要讨论雷达收发系统内部各器件引入的误差,包括线性调频信号源(以下简称chirp信号源)、发射机、环形器、低噪声放大器(LNA)和接收主通道各器件。系统内部各器件引入的误差可以分为加性误差和乘性误差两类。加性误差具有随机性,会引起系统杂散,不是本文讨论的对象;本文集中讨论系统乘性误差,从表现形式看,乘性误差表现为回波信号幅度和相位的畸变。幅相畸变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^[2],在图像上主要表

现为距离向散焦和旁瓣电平干扰；而对于宽带系统，幅相误差更严重，因此要获得高分辨率清晰图像必须对系统幅相误差进行校正。

2.1 内定标方案

以往的内定标主要用于辐射校正，通过在雷达系统内部设置量测机构，测量出发射功率和接收机增益误差，监视雷达系统内部的动态变化，从而校正雷达图像，如E-ERS-1^[3]、SIR-C^[4]、X-SAR^[5]和RADARSAT^[6]等均采用了类似的辐射定标方案。根据实际需要不同，内定标方案也不同，如E-ERS-1，采用射频定标回路和中频定标回路两条内定标回路，RADARSAT则采用了 3 条可用的内定标回路。本文提取误差方案基于 3 条内定标回路：参考定标回路、发射定标回路和接收定标回路，利用这 3 路内定标信号来测量和分析雷达系统收发通道的幅相误差，提取这些误差并用于校正雷达回波信号，如图 1 所示。

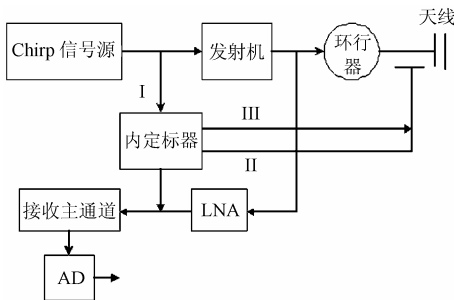


图 1 雷达收发系统功能模块

内定标器形成的 3 条定标回路为

(1) 参考定标回路(内定标回路I): 从 chirp 信号源出发, 经内定标器和接收主通道, 到 AD 转换器;

(2) 发射定标回路(内定标回路II): 从 chirp 信号源出发, 经发射机、环行器、内定标器和接收主通道, 到 AD 转换器;

(3) 接收定标回路(内定标回路III): 从 chirp 信号源出发, 经内定标器、环行器、LNA 和接收主通道, 到 AD 转换器;

设计上述 3 路内定标回路有以下好处: 首先, 3 路内定标回路避免了 1 路定标回路情况下发射机的能量辐射进入

LNA 而使内定标信号不纯的问题, 保证了在提取误差时定标回路信号的可用; 其次, 采用这样 3 路内定标回路可以获得包括环行器在内的波导部分引入的误差, 而 1 路和 2 路内定标回路无法测量; 最后, 采用上述 3 路内定标回路可以分别获得 chirp 信号源(包括接收主通道)、发射机(包括环行器和波导)和 LNA(包括环行器和波导)的幅相特性, 便于分析其性能。

2.2 提取误差方案

内定标信号携带了回路内各部分的误差, 包括内定标器的不理想性引入的误差, 由于雷达回波信号并不经过内定标器, 因此这部分误差不会对回波信号造成影响; 但是, 内定标器的不理想性会使内定标信号发生畸变, 影响系统幅相误差的提取, 进而影响到对回波信号的校正。下面首先给出内定标器近似理想情况下系统幅相误差的提取方法, 在此基础上进一步探讨内定标器误差不可忽略情况的相应方法。

2.2.1 内定标器理想情况的方案 理想情况下, 内定标器本身不会给定标信号引入误差, 内定标信号携带的误差完全来源于系统内部; 而且 3 路内定标信号携带的误差包含了系统内部各器件引入的所有误差, 这样就可以利用这 3 路内定标信号分别提取信号源(包括接收主通道)、发射机(包括发射信号时的环行器和波导)和 LNA(包括接收信号时的环行器和波导)的幅相误差, 下面分别介绍幅频和相频误差的提取方法。

(a) 系统幅频误差的提取 内定标信号的幅频可以由理想信号的幅频和内定标信号途经的系统各部分幅频误差表示, 如图 1, 3 路内定标信号的幅频分别如下各式所示:

$$A_I(f) = A(f)A_s(f)A_r(f) \tag{1}$$

$$A_{II}(f) = A(f)A_s(f)A_t(f)A_r(f)A_{hr}(f) \tag{2}$$

$$A_{III}(f) = A(f)A_s(f)A_r(f)A_a(f)A_{hr}(f) \tag{3}$$

其中 $A_I(f)$, $A_{II}(f)$ 和 $A_{III}(f)$ 分别为 3 路内定标信号的幅频, 其它变量含义见表 1。

表 1 公式中变量的定义

变量定义	$A(f)$	$A_s(f)$	$A_r(f)$	$A_t(f)$	$A_a(f)$	$A_{hr}(f)$	$A_{hr}(f)$
幅频	理想信号的幅频	信号源的幅频误差	接收主通道的幅频误差	发射机的幅频误差	低噪声放大器的幅频误差	发射时环行器的幅频误差	接收时环行器的幅频误差
变量定义	$\varphi(f)$	$\varphi_s(f)$	$\varphi_r(f)$	$\varphi_t(f)$	$\varphi_a(f)$	$\varphi_{hr}(f)$	$\varphi_{hr}(f)$
相频	理想信号的相频	信号源的相频误差	接收主通道的相频误差	发射机的相频误差	低噪声放大器的相频误差	发射时环行器的相频误差	接收时环行器的相频误差

很明显, 式(2)比式(1)就得到发射机(包括发射信号时环行器)引入的幅频误差, 即

$$\frac{A_{\text{II}}(f)}{A_1(f)} = A_s(f)A_{hr}(f) \quad (4)$$

式(3)比式(1)就得到 LNA(包括接收信号时环行器)引入的幅频误差, 即

$$\frac{A_{\text{III}}(f)}{A_1(f)} = A_a(f)A_{hr}(f) \quad (5)$$

理想线性调频信号具有平坦幅频特性, 因此 $A_1(f)$ 就是信号源(包括接收主通道)引入的幅频误差, 提取的这 3 部分幅频误差可以用来分析系统相应部分的幅频特性, 综合这 3 部分幅频误差得到收发系统总的幅频误差。系统的幅频误差也可由式(6)得到:

$$\begin{aligned} A_e(f) &= \frac{A_1(f)A_{\text{II}}(f)A_{\text{III}}(f)}{A_1(f)A_1(f)} \\ &= A_s(f)A_r(f)A_t(f)A_{hr}(f)A_a(f)A_{hr}(f) \end{aligned} \quad (6)$$

(b) 系统相频误差的提取 同样, 内定标信号的相频也可以由理想信号的相频和内定标信号途经的系统各部分相频误差表示, 如图 1, 3 路内定标信号的相频分别如下各式所示:

$$\varphi_{\text{I}}(f) = \varphi(f) + \varphi_s(f) + \varphi_r(f) \quad (7)$$

$$\varphi_{\text{II}}(f) = \varphi(f) + \varphi_s(f) + \varphi_r(f) + \varphi_t(f) + \varphi_{hr}(f) \quad (8)$$

$$\varphi_{\text{III}}(f) = \varphi(f) + \varphi_s(f) + \varphi_r(f) + \varphi_a(f) + \varphi_{hr}(f) \quad (9)$$

其中 $\varphi_{\text{I}}(f)$, $\varphi_{\text{II}}(f)$ 和 $\varphi_{\text{III}}(f)$ 分别为 3 路内定标信号的相频, 其它变量的含义见表 1。同幅频误差的提取, 式(8)减式(7)得到发射机(包括发射信号时环行器)引入的相频误差, 即

$$\varphi_{\text{II}}(f) - \varphi_{\text{I}}(f) = \varphi_t(f) + \varphi_{hr}(f) \quad (10)$$

式(9)减式(7)提取 LNA(包括接收信号时环行器)的相频误差, 即

$$\varphi_{\text{III}}(f) - \varphi_{\text{I}}(f) = \varphi_a(f) + \varphi_{hr}(f) \quad (11)$$

信号源(包括接收主通道)的相频误差($\varphi_s(f) + \varphi_r(f)$)通过对 I 路内定标信号的相位进行拟合得到, 提取的这 3 部分相频误差可以用作系统相应各部分的相频特性分析, 综合这 3 部分得到整个系统内部的相频误差, 用来校正回波信号, 如下式所示:

$$\varphi_e(f) = \varphi_s(f) + \varphi_r(f) + \varphi_t(f) + \varphi_{hr}(f) + \varphi_a(f) + \varphi_{hr}(f) \quad (12)$$

2.2.2 内定标器不理想情况分析 上面给出了内定标器理想情况下采用 3 路内定标信号和拟合组合提取系统幅相误差的方法, 一般情况下, 内定标器的幅频相频特性都可以保证, 因此上述方案具有普遍的实用意义。当然, 内定标器不可避免地会给定标信号引入误差, 并且给 3 路内定标信号引入的误差并不相同, 当误差严重时为了比较准确地提取系统幅相

误差必须考虑内定标器的不理想因素, 以幅频特性为例作一简单分析。

内定标器不理想情况下, 3 路定标信号的幅频为

$$A_{\text{I}}(f) = A(f)A_s(f)A_r(f)A_{c\text{I}}(f) \quad (13)$$

$$A_{\text{II}}(f) = A(f)A_s(f)A_r(f)A_t(f)A_{hr}(f)A_{c\text{II}}(f) \quad (14)$$

$$A_{\text{III}}(f) = A(f)A_s(f)A_r(f)A_a(f)A_{hr}(f)A_{c\text{III}}(f) \quad (15)$$

上式中 $A_{c\text{I}}(f)$, $A_{c\text{II}}(f)$ 和 $A_{c\text{III}}(f)$ 分别为内定标器的不理想给 I, II 和 III 路内定标信号引入的幅频误差, 其他符号意义同上。很明显, 如果像理想情况直接用 3 路内定标信号的幅频相比, 则无法剔除内定标器误差的影响。

通常, 内定标器的幅相特性比较稳定, 因此可以考虑用仪器测量这 3 路内定标回路引入的误差。矢量网络分析仪具有较高的测量精度, 不失为很好的选择。这样, 在内定标器引入的误差不可忽略时, 我们可以用矢量网络分析仪分别测量出内定标器给 3 路内定标信号引入的幅相误差, 对 3 路内定标信号分别补偿掉这部分误差后, 再采用上面给出的理想情况下的方法提取系统各部分的误差。

2.3 校正误差方案

上面幅相误差的提取是在频域进行的, 因此校正雷达回波信号也必须在频域, 校正时, 首先由提取的幅相误差构建误差校正函数, 如下式所示:

$$H(f) = A_e(f)\exp\{j\varphi_e(f)\} \quad (19)$$

其中 $A_e(f)$ 是系统总幅频误差, $\varphi_e(f)$ 为系统总相频误差, 分别由式(6)和式(12)得到。

假设回波信号在频域的表达式为

$$X(f) = A_x(f)\exp\{j\varphi_x(f)\} \quad (20)$$

则校正后信号的幅频为

$$A_c(f) = \frac{A_x(f)}{A_e(f)} \quad (21)$$

校正后的相频为

$$\varphi_c(f) = \varphi_x(f) - \varphi_e(f) \quad (22)$$

校正后的信号为

$$X_c(f) = \frac{X(f)}{H(f)} = A_c(f)\exp\{j\varphi_c(f)\} \quad (23)$$

采用上述方法对雷达回波信号处理后, 基本上消除了系统幅相误差的影响, 图像质量得到有效改善。

3 实验结果

根据研制的一套带宽为 500MHz 的雷达系统, 利用实验数据对本文的方案进行了一系列验证。实验首先采用 3 路内定标信号分别提取了 chirp 信号源(包括接收主通道)、发射机(包括发射信号时环行器和波导)和 LNA(包括接收信号时

环形器和波导)的幅相误差,下面仅给出发射机的幅相误差作一说明,如图2和3所示。其中图2是发射机引入的二次以上(包含二次)的相位误差,从图中可以看出,高次相位误差在 -8° 到 $+8^{\circ}$ 范围内变化,幅频误差波动范围大约为2dB。

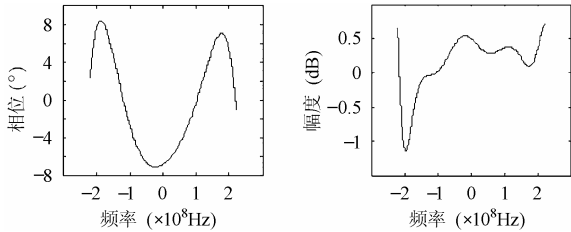


图2 发射机引入的高次相频误差 图3 发射机引入的幅频误差

图4和图5分别是实验的内定标数据中提取的整个系统的高次(二次以上)相频和幅频误差,不包含噪声。表2给出了对内定标信号校正幅相误差前后的比较,对应的脉冲压缩波形如图6和图7所示。很明显地,不校正误差时峰值旁瓣比和积分旁瓣比很差,脉冲压缩波形也发生严重畸变并且旁瓣不对称;校正后的信号压缩后参数改善很大,接近理想值。

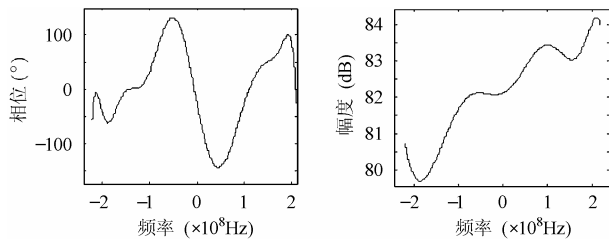


图4 整个系统的高次相频误差 图5 整个系统的幅频误差

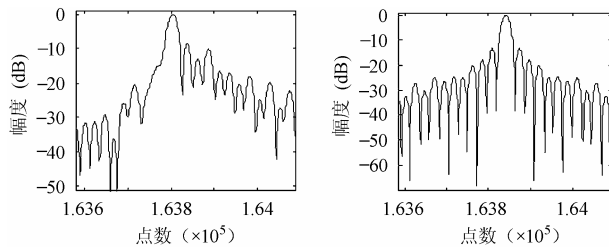


图6 未校正系统幅相误差的脉压波形 图7 校正系统幅相误差后的脉压波形

表2 距离向校正系统幅相误差前后脉压参数比较

信号/参数	未校正的信号	校正后的信号
ISLR(dB)	-4.8569	-8.8689
PSLR(dB)	-8.7975	-13.5799

图8和图9是用实际的雷达回波数据的一个脉冲进行压缩的结果,图示为选取的某强点目标的脉压波形。从两图的

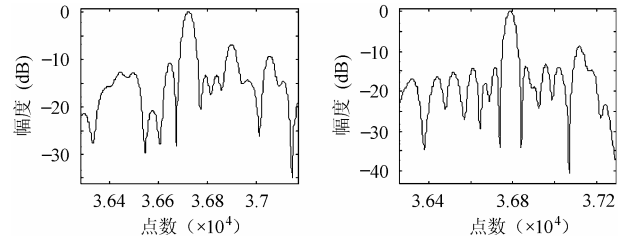


图8 强点目标雷达回波脉压波形(未校正) 图9 强点目标雷达回波脉压波形(校正后)

对比可以看出,校正幅相误差后的脉压波形旁瓣降低了,且旁瓣比较对称,幅相误差的影响基本消除。

4 结束语

本文为解决 SAR 系统幅相误差对图像质量的影响问题,提出了采用3路内定标信号提取和校正系统误差的方案,该方案算法简单,使用方便。根据实验结果,该方案能将峰值旁瓣比和积分旁瓣比改善4dB左右,对提高图像质量十分有效,成像处理时在窗函数的加权作用下,改善的效果将更明显。

参考文献

- [1] 朱国富,董臻,常文革,梁甸农.用相位梯度法校正超宽带雷达系统的相位误差.国防科技大学学报,2001,23(1):48-50.
- [2] 张澄波.综合孔径雷达原理、系统分析及应用.北京:科学出版社,1989:140-153,163-178.
- [3] 丁赤飏,彭海良,彭江萍.合成孔径雷达辐射校正(定标)技术概述.中国科学院电子学研究所,现代信息技术研究室,内部资料,1998.
- [4] Freeman A, Alves M, ChapmaZn B, et al.. SIR-C data quality and calibration result. *IEEE Trans. on GRS*, 1995, 33(4): 848-857.
- [5] Zink M, Bamler R. X-SAR radiometric calibration and data quality. *IEEE Trans. on GRS*, 1995, 33(4): 840-847.
- [6] Ahmed S, Warren H R, Symonds M D, Cox R P. The radarsat system. *IEEE Trans. on GRS*, 1990, 28(4): 598-602.

矫伟:女,1978年生,硕士生,研究方向为合成孔径雷达信号与信息处理。
梁兴东:男,1973年生,副研究员,主要研究方向为合成孔径雷达系统与信号处理。
丁赤飏:男,1969年生,研究员,博士生导师,主要研究方向为合成孔径雷达系统和成像技术、信号与信息处理技术。