

干涉 SAR 模拟器通道幅相特性实时校正方法

何志华, 何 峰, 黄海风, 梁向农

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 干涉 SAR 模拟器是构建单航过 InSAR 系统地面半实物仿真系统的重要地检设备, 模拟器通道幅相非理想特性会影响对干涉性能的准确评估. 研究了基于实时滤波校正模拟器通道幅相特性的方法: 采用相关加窗处理从闭环数据中提取通道幅相特性, 提出了复 Remez 算法和遗传算法相结合的方法设计复 FIR 滤波器系数, 采用 FPGA 实现高数据率数据的实时滤波. 通过实时校正将模拟器通道间幅相一致性误差峰峰值从 1 dB/10 度量级提高至 0.1 dB/1 度水平, 半实物试验验证了本文实时校正方法的有效性.

关键词: 干涉 SAR 模拟器; 通道幅相特性; 实时校正; 半实物仿真

中图分类号: TP957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 09-1710-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.007

Channel Characteristic Real-Time Correction of InSAR Signal Simulator

HE Zhi-hua, HE Feng, HUANG Hai-feng, LIANG Dian-nong

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: InSAR signal simulator is an important equipment in the hardware-in-loop simulation of distributed SAR, the non-ideal channel characteristic of which will affect the evaluation accuracy. The correction of channel amplitude and phase characteristic based on the real-time filtering is studied. A novel correlation and windowing method is used to extract the channel characteristic in the loop data. A method based on the complex Remez algorithm and the genetic algorithm is used to design the complex FIR coefficients. Finally, a FPGA technique is used to implement the complex FIR filter. The channel mismatch peak-peak value of the simulator is corrected from 1 dB/10 degree to 0.1 dB/1 degree. The hardware-in-loop simulation validates the proposed real-time correction approach.

Key words: InSAR signal simulator; channel amplitude and phase characteristic; real-time correction; hardware-in-loop simulation

1 引言

干涉 SAR 回波信号模拟器能够灵活地产生包含空间几何、场景和各种误差特性的复杂射频回波信号, 在 InSAR 系统设计、硬件调试、性能指标测试、系统集成维护和任务规划等 SAR 研制和应用全生命周期内发挥着重要作用, 是在地面构建 InSAR 半实物仿真系统, 进行雷达测试以及半实物仿真试验的重要地检设备^[1,2]. 实际情况下, 由于模拟器硬件链路中模拟滤波器、数模转换器和模数转换器等器件的非理想特性, 会恶化 SAR 距离向脉冲压缩响应性能, 影响对 SAR 成像性能的准确测试^[3,4]. 特别是模拟器通道之间幅相特性的不一致性, 会降低 InSAR 两幅图像之间的相干性, 引入干涉相

位偏差, 进而影响对 InSAR 干涉性能的准确测试. 从技术实现上来讲, 模拟器发射通道幅相一致性指标与干涉雷达接收机之间的幅相一致性指标在同一水平, 但作为测试设备, 对模拟器幅相一致性的要求比雷达要高一个数量级. 未校正前, 干涉 SAR 模拟器的通道一致性误差最多为单通道幅相误差的两倍, 约在 1 dB/10°量级, 最大将引入干涉相位偏差为 3°, 干涉相位标准差为 1°, 已经大于某些小量误差源对 InSAR 干涉测高性能的影响, 如干涉 SAR 载荷间的通道不一致^[5]、时间和相位同步误差^[6], 因此应通过校正将模拟器幅相一致性指标提高一个数量级至 0.1 dB/1°.

传统的预失真校正技术不能满足干涉 SAR 模拟器在实时模拟模式下对幅相误差现场灵活校正的需求^[7],

需要采用实时 FIR 滤波的方法校正模拟器幅相特性^[4,8]. 由于模拟器系统传递函数不具有共轭对称性, 问题可转化为复系数 FIR 校正滤波器的设计与实现问题, 包括如下三个关键环节: 幅相特性的准确提取, 复系数 FIR 滤波器的优化设计, 以及硬件复系数 FIR 滤波器的 FPGA 实现.

2 通道幅相特性提取

应用干涉 SAR 模拟器能够在地面环境构建 InSAR 半实物闭环测试环路, 验证 InSAR 系统通道不一致、时间和相位同步等硬件误差对干涉测高性能的影响. 图 1 为模拟器的组成框图和实物图, 模拟器工作在 X 波段, 带宽 150MHz, 由中频、射频和存储三大子系统以及显控软件组成, 具有一个接收通道和两个发射通道, 射频输出信号功率范围为 $-80 \sim 10\text{dBm}$, 可模拟 InSAR 系统一发双收工作模式下的回波信号. 进行干涉 SAR 半实物试验对模拟器通道间幅相一致性指标要求为: 幅度波动 $\leq 0.4\text{dB}$, 二次相位 $\leq 2^\circ$, 三次相位 $\leq 1^\circ$.

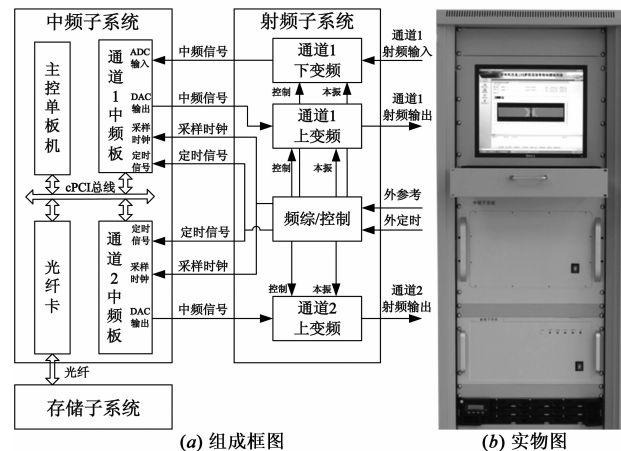


图1 干涉SAR回波信号模拟器

高精度幅相特性估计方法是模拟器幅相误差实时校正的基础. 为了避免仪器测量引入的测量误差, 可以利用模拟器自身发射并接收的闭环信号, 如线性调频信号, 估计得到通道幅相特性^[3,4,9,10]. 常用方法是用闭环失真信号频谱除以理想线性调频信号的频谱得到幅相特性的估计值^[4,9,10], 该方法估计出的幅相特性包含噪声和杂散等不属于模拟器幅相特性的误差, 当直接用于模拟器实时校正的数字滤波器系数设计时, 实际应用效果并不理想, 甚至可能会在时域出现较大冲激, 使得实时校正方法失效. 为解决现有通道幅相特性估计精度不高的问题, 采用一种新的基于相关加窗的模拟器高精度幅相特性估计方法.

将模拟器任意一个发射通道和接收通道连接形成

通道闭环, 理想线性调频信号经过模拟器该通道闭环后得到闭环失真信号, 闭环失真信号包含了模拟器硬件闭环链路中的滤波器、连接电缆等引起的幅频和相频特性畸变, 也同时包含了量化等因素引入的噪声和杂散分量.

参考图 2 所示的闭环失真信号模型, 闭环失真信号 $P_e(t)$ 的频谱为

$$P_e(f) = P_0(f)H_e(f) + N(f) \quad (1)$$

其中, $P_0(f)$ 是理想线性调频信号 $p_0(t)$ 的频谱, $N(f)$ 是噪声和杂散信号 $n(t)$ 的频谱, $H_e(f)$ 是待估计的模拟器通道闭环幅相特性.

通常用频谱比对应法直接得到模拟器幅相特性的估计^[4,9,10]

$$\hat{H}_e(f) = P_e(f)/P_0(f) = H_e(f) + N(f)/P_0(f) \quad (2)$$

该方法的最大缺点是受闭环信号包含的噪声和杂散影响严重, 即使采用多帧平均处理, 也难以得到满意的估计结果^[9,10], 因此, 需要采用一种有效稳健的方法将反映系统幅相特性的信号分量与噪声和杂散分量分离开.

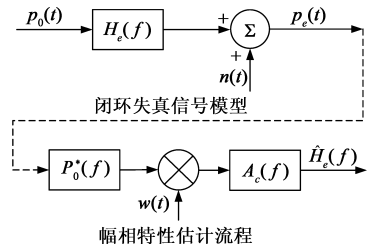


图2 闭环失真信号模型与幅相特性估计流程

对宽带信号进行相关处理或匹配滤波后信号能量集中在主瓣及其附近, 如对理想线性调频信号进行相关处理后, 在主瓣及其周围 20 个分辨单元内的信号能量占信号总能量比值超过 99%. 受之启发, 可采用相关加窗处理的方式抑制闭环失真信号中噪声和杂散的对幅相特性估计的影响, 幅相特性估计流程如图 2 所示, 首先将闭环失真信号与理想线性调频信号进行相关运算, 然后对相关后的信号在时域加窗截取, 最终估计得到的幅相特性为

$$\hat{H}_e(f) = A_c(f) \int_{-\infty}^{\infty} H_e(g) A^2(g) W(f-g) dg + A_c(f) \int_{-\infty}^{\infty} N(g) P_0^*(g) W(f-g) dg \quad (3)$$

其中, $A(f)$ 为理想线性调频信号的幅频特性; $w(t)$ 为信号截取时域窗函数, 用于选取相关处理后信噪比较高的主瓣及其周围信号, $W(f)$ 是时域窗函数的傅里叶变换; $A_c(f)$ 是为了补偿提取处理过程引入幅频响应变化的修正函数

$$A_c(f) = \left[\int_{-\infty}^{\infty} A^2(g) W(f-g) dg \right]^{-1} \quad (4)$$

从另外一个角度,对相关后的信号在时域加窗截取,相当于滤除了频域噪声和杂散对应的幅相特性快变分量,仅保留了反映模拟器幅相特性的缓变分量.当窗函数长度取主瓣及其周围 20 个分辨单元时,能够反映带内最大幅相误差变化的周期数约为 20.当窗函数取矩形窗,长度取为信号长度时,窗函数频谱 $W(f) = \delta(f)$,式(3)所示的基于相关加窗的幅相特性估计方法退化为式(2)所示的频谱比对法,可见频谱比对法是相关加窗法的一个特例.

图 3 为模拟器通道 1 实测闭环失真信号,采用理想线性调频信号的带宽和时宽分别为 150MHz 和 50 μ s,信号采样率为 300MHz,信噪比约为 30dB.图 4 为根据闭环失真信号提取出的通道幅相特性,可以看出,受闭环失真信号中噪声和杂散的影响,频谱比对法的幅频特性估计结果的误差值超过 0.5dB,相频特性估计结果的误差值超过 2.5°,而且在频带边缘处的幅相特性估计值更加恶化,估计精度较低;而由相关加窗法的估计结果,几乎观察不到由噪声和杂散引起的幅频和相频特性估计误差,可见该幅频特性估计方法有效抑制了噪声和杂散,估计精度较高.图 5 和图 6 分别为模拟器通道 2 的实测闭环失真信号及其通道幅相特性提取结果,由该结果也可得到类似结论.

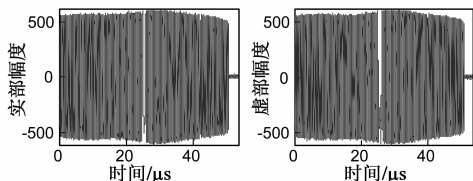


图3 通道1闭环失真信号

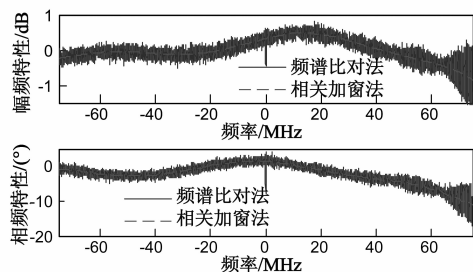


图4 通道1幅相特性提取结果

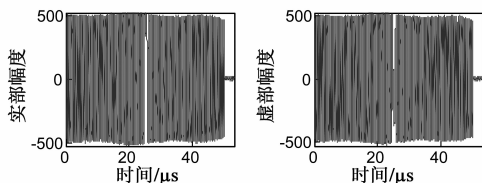


图5 通道2闭环失真信号

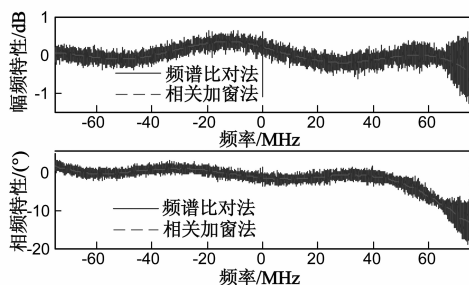


图6 通道2幅相特性提取结果

3 复系数 FIR 滤波器系数设计

已知系统幅相误差特性,可采用预失真或实时滤波的方法补偿模拟器的固有幅相误差.预失真校正方法根据事先闭环测试结果,利用计算机补偿系统幅相误差,如雷达发射信号模拟器的预失真补偿^[7].但在模拟器实时工作模式下,模拟器接收雷达发射信号后,利用 FFT/IFFT 调制场景信息,即完成雷达发射信号与场景调制信号之间的卷积,实时产生雷达点目标或面目标回波信号,如图 7 所示.其中,场景调制信号是当前方位慢时刻天线波束照射范围内所有散射元幅相调制叠加形成的冲激响应.虽然预失真幅相特性可以包含在场景调制信号中,但不能满足现场半实物试验对模拟器通道实测特性的灵活校正需求.此时可采用实时滤波的方法,将场景调制后的回波信号在 DAC 接口播放之前经过一个复 FIR 滤波器,通过现场改变滤波器系数实现模拟器幅相特性的灵活校正,如图 7 所示.因此,模拟器的幅相实时校正转化为复系数 FIR 滤波器的设计问题.

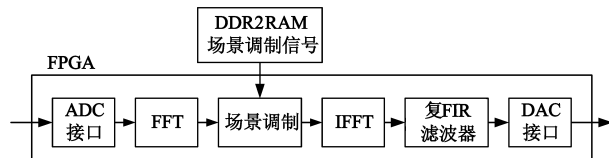


图7 模拟器实时工作模式示意图

复系数 FIR 滤波器设计问题可以归结为复 Chebyshev 逼近问题^[11,12].L. J. Karam 和 McClellan 把交错点组定理从实数域扩展到复数域,解决了复系数 FIR 滤波器的设计问题.算法分为两步,第一步是高效的复 Remez 算法,第二步是基于最陡下降的多重交换算法^[13].该算法对于低通、低群延迟等规整 FIR 滤波器能够给出理想的结果,但是由于模拟器幅相特性不是很平滑,第二步采用多重交换算法很难得到优化结果,针对这个不足,采用复 Remez 算法与遗传算法相结合的方式寻求最优解解决复系数 FIR 滤波器的设计问题.遗传算法是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法,其特点是鲁棒性强,是一种求解复杂系统优化问题的通用框架^[14].

模拟器在带内区间 $B \subset [-\pi, \pi)$ 的幅相特性为 $H_{di}(\omega) = \hat{H}_{ei}(\omega)$, $i = 1, 2$ 分别代表通道 1 和通道 2, 则校正 FIR 滤波器期望幅相应为 $D(\omega) = 1/H_{di}(\omega)$, 现需设计一个长度为 N 的滤波器系数 $\{h(k)\}_{k=0}^{N-1}$, 对应频率响应为 $H(\omega)$ 的滤波器, 使其在误差 Chebyshev 范数最小的意义上逼近期望滤波器^[13].

$$\|E(\omega)\| = \max_{\omega \in B} \{ |W(\omega)D(\omega) - H(\omega)| \} \quad (5)$$

其中, $W(\omega)$ 为连续实加权函数. 依据交错点组定理, 复 Remez 算法通过构造误差 $\|E_s\|$ 递增的 $N + 1$ 点稀疏有限子集 $B_s \subset B$ 逼近最优解, 当构造的子集 B_s 不再变化时, 得到问题的最优解, 最后求解 $N + 1$ 个线性方程组得到设计滤波器的系数^[12,13]. 在实系数 FIR 滤波器的设计问题中, 交错点仅有 $N + 1$ 个点, 复 Remez 算法总能得到问题的最优解, 在最优子集上的误差 $|\sigma| = \|E\|$. 但复系数 FIR 滤波器交错点的范围为 $[N + 1, 2N + 1]$, 当第一步复 Remez 算法的 $|\sigma| < \|E\|$ 时, 可采用多重交换算法在大于 $N + 1$ 点的子集上寻找最优解^[13]. 应用到模拟器通道特性复 FIR 实时校正滤波器系数设计时, 由于实际幅相特性不平滑, 第二步多重交换算法存在迭代时间过长, 以及陷入迭代病态的问题, 可采用遗传算法在复 Remez 算法的基础上得到问题的优化解: 以第一步复 Remez 算法得到的次优解作为初始值, 用式(5)所示的均方误差倒数作为适应度函数, 通过遗传算子的选择、交叉、变异操作淘汰差的染色体, 形成新种群, 最终通过迭代寻优得到复 FIR 滤波器设计结果. 复系数 FIR 滤波器设计及优化流程如图 8 所示.

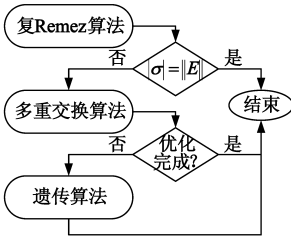


图8 复系数FIR滤波器设计及优化流程

以模拟器通道 2 闭环失真信号提取的通道幅相特性为输入, 设计复 FIR 滤波器系数实部和虚部如图 9 所示, 设计的滤波器阶数为 31 阶, 通带截止频率为 75MHz, 阻带截止频率为 100MHz, 系数量化位数为 16 位. 设计的复系数 FIR 滤波器幅相应与期望幅相应

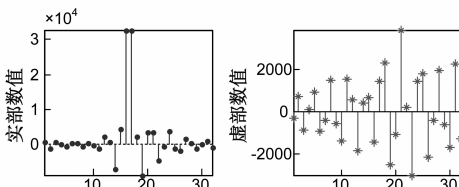


图9 通道2复FIR滤波器系数

对比如图 10 所示, 可见带内幅度逼近误差峰峰值小于 0.1dB, 相位逼近误差峰峰值小于 1°, 设计幅相应与期望一致, 表明复系数 FIR 滤波器设计的有效性.

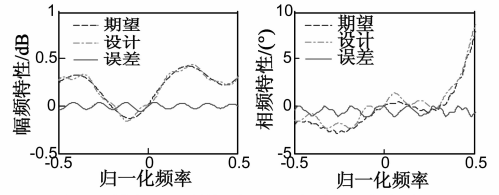


图10 模拟器通道2复FIR滤波器设计结果

4 滤波器 FPGA 实时实现

复系数 FIR 滤波器采用 Verilog 语言在 Altera 公司的 Stratix IV 系列高性能 FPGA 上编程实现, 相比 DSP 和 ASIC 等实现方式, 具有处理速度快和灵活性强的优势. 实时滤波 FPGA 模块实现框图如图 11 所示, 设计滤波器长度为 32 点, 模块输入是 IQ 两路回波数据和滤波器系数, 输出是实时滤波后的 IQ 回波数据, 假设输入数据为 $D_{ini} + jD_{inq}$, 滤波器系数为 $C_i + jC_q$, 则实时滤波输出数据为

$$\begin{aligned} D_{oi} &= D_{ini} * C_i - D_{inq} * C_q \\ D_{oq} &= D_{ini} * C_q + D_{inq} * C_i \end{aligned} \quad (6)$$

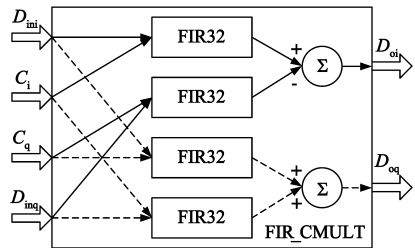


图11 滤波器FPGA实现框图

因此, 复系数 FIR 滤波器可由 4 个实系数 FIR 滤波器并行实现. 每个 32 点实 FIR 滤波器采用 FPGA 直接实现型结构, 由 8 个 4 抽头 FIR 滤波器共同实现, 每个 4 抽头 FIR 滤波器映射为 FPGA 硬核 ALTMULT_ADD.

利用模拟器显控软件将设计的复系数 FIR 滤波器系数下载到模拟器 FPGA 寄存器中, 可实现对干涉 SAR 模拟器幅相特性的灵活校正. 实时校正后, 通道 1 闭环信号如图 12 所示, 带内幅度误差为 0.08dB, 二次/三次/高次相位误差分别为 -0.13/-0.45/0.89°; 通道 2 闭环信号如图 13 所示, 带内幅度误差为 0.08dB, 二次/三次/高次相位误差分别为 0.03/-0.04/0.61°, 可见实测结

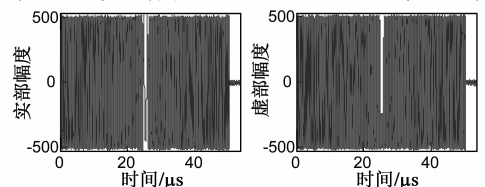


图12 实时校正后通道1闭环信号

果与滤波器设计验证结果一致,表明复系数 FIR 滤波器系数设计及其 FPGA 实时实现的正确性。

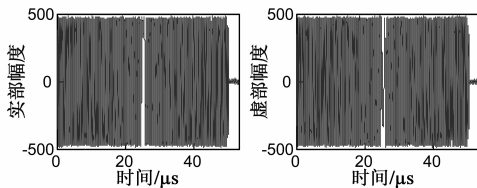


图13 实时校正后通道2闭环信号

应用第二节通道幅相特性提取方法,得到实时校正前后模拟器通道间幅相一致性对比结果如图 14 所示,可以看出,本文实时幅相校正方法显著提高了通道间幅相一致性指标,其中,幅度一致性误差由 1.06dB 校正至 0.07dB,二次/三次相位一致性误差由 $-2.77/1.55^\circ$ 校正至 $-0.16/-0.41^\circ$,剩余高次相位一致性误差峰值从 1dB/10°量级提高一个数量级至 0.1dB/1°水平,模拟器的通道幅相特性得到极大改善,满足进行干涉 SAR 试验对模拟器通道间幅相一致性指标的要求,可为干涉 SAR 测试评估提供更为准确可信的结果。

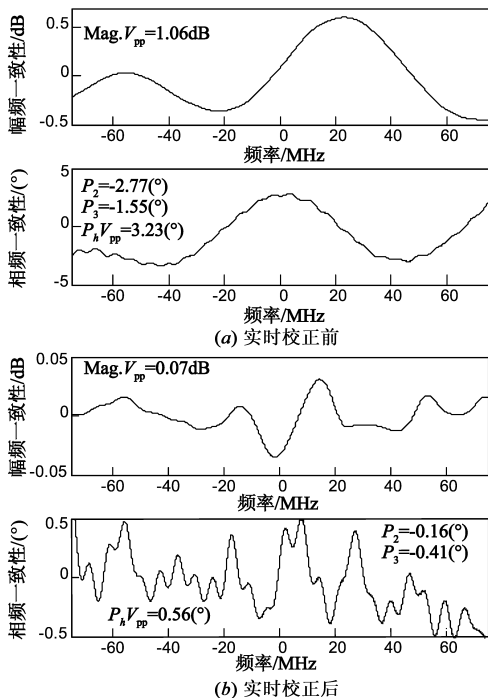


图14 实时校正前后模拟器通道间幅相一致性对比

下面,通过半实物仿真试验验证模拟器通道特性对干涉测高性能的影响。地面半实物仿真系统通过集成干涉 SAR 主辅雷达设备及其它关键实物样机,利用干涉 SAR 模拟器在地面构建回波生成-数据处理-性能评估半实物仿真大环路,用于评估干涉 SAR 系统通道

一致性误差等误差源对干涉测高的影响^[5]。为得到模拟器通道非理想特性对干涉性能的影响,设置了校正前后两组干涉对比试验,试验只采用主雷达,尽可能地隔离雷达通道不一致和热噪声等误差源的影响,试验部分评估结果如表 1 所示。由试验评估结果,实时校正前,模拟器幅相误差一方面引入 $-0.6286 - (-0.1901) \approx -0.44^\circ$ 的干涉相位偏差,另一方面增加去相干因素,增大测高精度标准差,引入的干涉相对测高精度损失为 $\sqrt{0.0279^2 - 0.0216^2} \approx 0.02$ m,这已经与雷达通道不一致引起的测高精度损失在同一量级。而实时校正模拟器幅相特性后,评估的性能指标与全数字基准试验结果非常接近,表明模拟器在半实物环路中引入的去相干可忽略,从而进一步验证了本文模拟器幅相特性实时校正方法的有效性。

表 1 半实物试验评估结果

评估指标	校正前	校正后	全数字基准
绝对解缠相位均值($^\circ$)	-0.6286	-0.1901	-0.1632
绝对测高精度标准差(m)	0.0112	0.0094	0.0092
相对测高精度(m)	0.0279	0.0216	0.0214

5 结论

本文系统地研究了干涉 SAR 模拟器通道幅相特性的实时校正方法,包括通道幅相特性的准确提取,复 FIR 滤波器系数设计及其优化,以及滤波器 FPGA 的实时实现。通过实时校正将模拟器通道间幅相一致性误差峰值从 1dB/10°量级提高一个数量级至 0.1dB/1°水平,在 In SAR 半实物干涉测高试验中引入的通道一致性误差可忽略。本文方法也同样适用于数字阵列雷达、多通道雷达接收机等其它宽带系统通道幅相特性的测试与校正,具有一定的工程实用价值。

参考文献

- [1] Cao Peng-zhi, Xu Rong-qing, Liu Rong-tan. C-SAR spaceborne synthetic aperture radar raw data simulator[A]. Aerospace and Electronics Conference, 1997[C]. Dayton: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997. 630 - 637.
- [2] 张文彬, 邓云凯, 倪江. 基于光延迟线的星载 SAR 目标回波信号模拟[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(9): 1652 - 1654.
- [3] Zhang Wen-bin, Deng Yun-kai, Ni Jiang. Spaceborne SAR echo simulator based on optic-fiber delay[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(9): 1652 - 1654. (in Chinese)
- [3] 矫伟, 梁兴东, 丁赤飏. 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[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(12): 1183 - 1186.

- Jiao Wei, Liang Xing-dong, Ding Chi-biao. Extraction and correction of SAR amplitude and phase errors based on internal calibration signal [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(12): 1183 - 1186. (in Chinese)
- [4] 张月, 鲍庆龙, 杨剑, 陈曾平. 宽带数字整列雷达通道均衡方法的设计与实现[J]. 信号处理, 2010, 26(3): 453 - 457.
Zhang Yue, Bao Qing-long, Yang Jian, Chen Zhen-ping. Design and implementation of channel equalization method for wide-band digital array radar[J]. Signal Processing, 2010, 26(3): 453 - 457. (in Chinese)
- [5] He Zhi-hua, He Feng, Huang Hai-feng, Chen Jun-li. Influence of channel mismatch on interferometric SAR performance and experiment validation [A]. 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2010 [C]. Aachen, Germany: VDE-Verlag, 2010. 1110 - 1113.
- [6] G Krieger, A Moreira, H Fiedler, I Hajnsek, M Werner, M Younis, M Zink. TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2007, 45(11): 3317 - 3341.
- [7] 万永伦, 姒强, 吕幼新, 王洪. DDWS 的波形误差校正算法及实现 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(2): 209 - 211.
Wan Yong-lun, Si Qiang, Lü You-xin, Wang Hong. Rectified algorithm of error and realization on direct digital waveform synthesizer [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(2): 209 - 211. (in Chinese)
- [8] 陆必应, 周智敏, 宋千, 梁甸农. 用复系数数字 FIR 滤波器实现超宽带正交解调接收系统的幅相误差校正 [J]. 电子学报, 2000, 28(9): 59 - 61.
Lu Bi-ying, Zhou Zhi-min, Song Qian, Liang Dian-nong. Correcting the amplitude and phase errors of UWB quadrature demodulation receivers using complex coefficients digital FIR filters [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(9): 59 - 61. (in Chinese)
- [9] 王峰, 傅有光, 孟兵, 陈丽敏. 基于傅里叶变换的雷达通道均衡算法性能分析及改进 [J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1677 - 1680.
Wang Feng, Fu You-guang, Meng Bing, Chen Li-min. Performance analysis and improvement of the equalization algorithm based on Fourier transform for radar channel [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1677 - 1680. (in Chinese)
- [10] 朱国富, 梁甸农. 超宽带正交解调接收机的误差分析与数字补偿方法 [J]. 信号处理, 2002, 8(1): 32 - 35.
Zhu Guo-fu, Liang Dian-nong. Error analysis and digital compensation methods of ultra-wideband quadrature demodulation receiver [J]. Signal Processing, 2002, 8(1): 32 - 35. (in Chinese)
- [11] L J Karam. Design of complex digital FIR filters in the Chebyshev sense [D]. Georgia Institute of Technology, 1995.
- [12] 赵瑞杰, 赖晓平. 复 FIR 数字滤波器幅值约束 Chebyshev 设计 [J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1694 - 1699.
Zhao Rui-jie, Lai Xiao-ping. Chebyshev design of complex FIR digital filters with magnitude constraints [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1694 - 1699. (in Chinese)
- [13] L J Karam, J H McClellan. Chebyshev digital FIR filter design [J]. Signal Processing, 1999, 76(1): 17 - 36.
- [14] 李善姬, 王晓丹. 利用遗传算法优化设计 FIR 数字滤波器 [J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(11): 2665 - 2666.
Li Shan-ji, Wang Xiao-dan. Optimal filter design via genetic algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(11): 2665 - 2666. (in Chinese)

作者简介



何志华 男, 1982 年出生于四川通江, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院讲师, 博士, 主要研究方向为星载 SAR/InSAR 系统仿真及信号处理。

E-mail: skynismile@163.com.



何峰 男, 1976 年出生于湖北孝感, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院副研究员, 博士, 主要研究方向为双/多基地 SAR 信号处理。

E-mail: riversummit@sina.com