

基于 DBI 的宽带信号采集及频响误差校准方法研究^{*}李武¹ 张鹏² 万勇¹ 张超² 戴永寿¹

(1. 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580; 2. 中电科思仪科技股份有限公司 青岛 266555)

摘要: 新一代无线通信、物联网和虚拟现实等领域对大带宽信号测试需求与日俱增,信号分析仪是用于研究信号频谱组成的主要工具。为提升信号分析仪的大带宽信号测试能力,本文首先研究设计了一种基于数字带宽交织的宽带信号采集系统;然后针对采集系统各通道增益不平衡及频带拼接导致带内频响恶化问题,提出了一种基于多载波测试联合最小二乘法设计补偿滤波器校正带内频响误差的方法。实测实验结果表明,设计的采集系统能有效提升信号分析仪分析带宽,带宽 1.8 GHz 的采集系统带内平坦度为 ± 0.97 dB,相位线性度为 ± 0.11 rad,带内频响误差校正效果优于主流方法频率采样法。

关键词: 信号分析仪;分析带宽;数字带宽交织;带内频响误差校正

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5

Research on wideband signal acquisition based on DBI and frequency response error calibration method

Li Wu¹ Zhang Peng² Wan Yong¹ Zhang Chao² Dai Yongshou¹

(1. China University of Petroleum (East China), College of Oceanography and Space Informatics, Qingdao 266580, China;

2. Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: There is an increasing demand for large bandwidth signal testing in the fields of new generation wireless communication, internet of things and virtual reality, etc. Signal analyzers are the primary tool for studying the spectral composition of signal. To enhance the large bandwidth signal testing capability of signal analyzers, a wideband signal acquisition system based on digital bandwidth interleaving is studied and designed; aiming at the problem of deterioration of the in-band frequency response caused by the gain imbalance of each channel of the acquisition system and stitching of frequency bands, a method of correcting the in-band frequency response error by designing a compensation filter based on multi-carrier testing and the least squares method is proposed. The actual experimental results show that the designed system can effectively improve the signal analyzer's analysis bandwidth. The in-band amplitude flatness of the 1.8 GHz bandwidth acquisition system is ± 0.97 dB, the phase linearity is ± 0.11 rad, and the in-band frequency response error correction effect is better than the mainstream method of frequency sampling method.

Keywords: signal analyzer; analysis bandwidth; digital bandwidth interleaving; in-band frequency response error calibration

0 引言

随着新一代无线通信、物联网和自动驾驶等领域的快速发展,测试信号呈更高频率和更大带宽的态势发展,例如:5G 信号的毫米波频段 FR2 已经达到 400 MHz 带宽,对信号测试仪器提出了极高的技术要求。然而,由于集成电路的规模和制造工艺限制,单通道采集模式已逐渐无法满足这些需求^[1],这促使研究者探索更高效的信号分析仪

大带宽信号测试方案。尽管 Ji 等^[2]尝试通过外部控制信号分析仪,串行采集位于不同中频的宽带信号并进行拼接,虽然实现了 110 MHz 的带宽,但此方法依赖外部触发且系统响应时间缓慢,暴露出效率低下的问题。因此,探索替代单通道采集的多通道并行采集架构显得尤为重要,这不仅是技术发展的必然趋势,也是提高信号分析仪大带宽测试能力的关键。虽然现有的时间交织并行采集架构在提升采集速率和分辨率方面取得了一定成效^[3],但受限于模数转换

器(analog to digital converter, ADC)的采样保持电路,未能有效提升采集带宽^[4]。

相对而言,数字带宽交织(digital bandwidth interleaving, DBI)技术通过将大带宽信号分解为多个子带,并将高频子带信号下变频到低频段进行数字化处理,可以有效提高采集系统的速率和带宽^[5-6]。本文基于 DBI 技术,研究设计了一种适用于信号分析仪的并行采集架构,该架构通过将大带宽信号分解为多个子带,并在中频段进行数字化处理,显著提高了信号分析仪的分析带宽。该技术在信号分析仪中的应用有助于克服 ADC 芯片工艺的限制,为高频宽带信号的高效采集和分析提供了创新的解决方案。

此外,通过详细分析发现,各采集通道增益不平衡^[7]和频带拼接会导致带内频响恶化,现有带内频响误差校正方法,如硬件电路补偿^[8]、单音扫频测试联合幅度补偿^[9]和快沿脉冲测试联合群延时补偿^[10],虽能完成带内频响误差校正,但仍存在硬件复杂度高、调整不灵活、频响测试复杂和无法兼顾幅度与相位补偿的缺陷。针对这些问题,本文进一步提出了一种基于多载波测试联合最小二乘法设计补偿滤波器的校准方法,有效降低了频响测试的复杂度并显著改善了误差校准效果。

针对新场景的大带宽信号测试需求和频响误差校正方法存在的上述问题,本文基于 DBI 采集架构研究设计了一种可提升信号分析仪分析带宽的宽带信号采集系统,并提出了一种基于多载波测试联合最小二乘法设计补偿滤波器校正由前端采集电路增益不平衡和频带拼接导致的通道频响误差的方法,降低了频响测试复杂度和改善了误差校准效果。

1 信号分析仪的信号处理流程

信号分析仪的宽带信号采集与处理流程如图 1 所示。首先,输入的射频信号经过可调节的衰减器和放大器,输入信号的功率被调整至合适范围,防止输入信号功率过载。随后,低通模拟滤波器限制射频信号的输入频率范围。在微处理器的控制下,可调本振将射频信号混频至中频^[11],带通模拟滤波器滤除中频范围外的杂散信号。模拟信号在中频被 ADC 数字化后,再经过正交检测与低通滤波转换为基带信号或同相/正交(in-phase/quadrature, I/Q)信号。最终,基带信号经过矢量解调、快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)和检测等一系列处理步骤,提取并分析信号中包含的信息,最后在界面上显示采集信号的频率响应和信号解调结果等信息。

与示波器相比,由于信号分析仪采用了相对高分辨率和低采样速率的 ADC,因此在动态范围和测量灵敏度方面,信号分析仪展示出显著优势^[12],更有利于观察微弱信号。此外,信号分析仪的分析带宽定义为中频附近的可用瞬时带宽,在该范围内的信号能够被有效地数字化,并用于

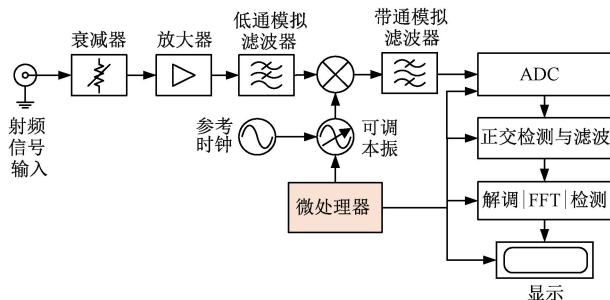


图 1 信号分析仪的宽带信号采集与处理结构简要示意图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of the wideband signal acquisition and processing structure of the signal analyzer

时域、频域和调制域中进一步分析处理。

新场景的信号分析带宽测试需求越来越高,如新一代无线网络标准 WLAN 802.11ay 的信号^[13],日益增加的信号带宽推动信号分析仪的分析带宽指标升级。信号分析仪的分析带宽受宽带 ADC 限制,由于宽带 ADC 受工艺限制,越来越难以满足如今的超宽带信号测试需求,所以需要研究并行采集架构实现更高的分析带宽。

2 基于 DBI 的宽带信号采集系统设计

基于 DBI 的 M 通道采集系统结构示意图如图 2 所示。首先将输入的大带宽射频信号分解为 M 个子带信号,通过混频技术将每个子带信号频移至中频,随后通过 ADC 采样转换为数字信号。数字信号经过数字中频正交变换后转变为基带信号,在基带进行子带信号恢复与拼接,得到系统输出。该设计突破了传统单个 ADC 在带宽上的限制,使得系统能够有效采集到单个 ADC 无法采集的大带宽信号。

输入大带宽模拟信号 $x(t)$ 首先经过带通模拟滤波器 $H_m(\Omega)$ 分解为 M 个子带,然后均经过模拟混频器采用超外差的方式混频至中频,通常选择高侧本振进行混频,因为高侧本振混频的镜像远离混频后的有用信号,最后通过抗镜像滤波器 $H_{am}(\Omega)$ 消除镜像分量,得到中频输出信号:

$$X_m(\Omega) = \frac{1}{2} X(\Omega + \Omega_{im}) H_m(\Omega + \Omega_{im}) H_{am}(\Omega) \quad (1)$$

式中: Ω 是模拟角频率, Ω_{im} 是第 m 通道的模拟本振的模拟角频率。式(1)中得到的各通道中频信号经过 ADC 采样后的输出信号为:

$$\hat{X}_m(e^{j\omega}) = \frac{1}{MT} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_m\left(\frac{\omega}{MT} + \frac{k\pi}{T}\right) \quad (2)$$

式中:数字角频率 $\omega = M\Omega_i T$, T_s 是采集系统的采样周期。

将式(2)所示 ADC 采集得到的实数信号进行数字中频正交变换转换为基带信号,ADC 采样后再进行数字中频正交混频而不是一开始在模拟端就采用模拟中频正交混频的优点是不会产生 I/Q 幅相失衡^[14],数字中频正交变换后进行 M 倍数字上采样^[15]处理提升 M 倍采样率,最后经过抗混叠滤波器 $F_{am}(e^{j\omega})$ 消除混叠分量得到各通道输出信号:

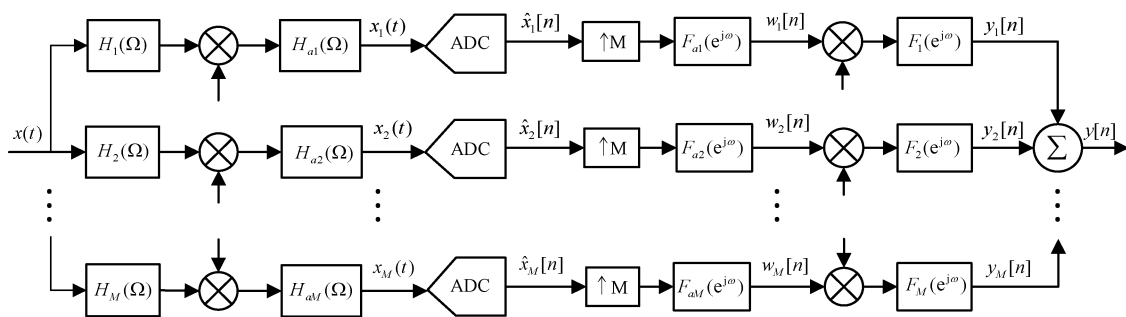


图 2 M 通道基于 DBI 的宽带信号采集系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of M channel wideband signal acquisition structure based on DBI architecture

$$W_m(e^{j\omega}) = \frac{1}{M} [\hat{X}_m(M\omega + \omega_c) - j\hat{X}_m(M\omega + \omega_c)] F_{am}(e^{j\omega})$$

(3)

式中: ω_c 是中频至基带的频移量。抗混叠滤波器的作用是消除由 M 倍数字上采样操作引入的混叠分量,通常选择半带滤波器或积分梳状滤波器作为抗混叠滤波器。复混频的目的是将式(3)得到的信号频移至指定区域,然后经过重构滤波器 $F_m(e^{j\omega})$ 实现信号的完美重构。最后完成各采集通道信号的频谱拼接,以 3 通道频带拼接为例,频谱搬移如图 3 所示,将第一通道向右频移 ω_0 , 第三通道向左频移 ω_1 , 第二通道保持不变,各采集通道输出信号为:

$$\begin{cases} Y_1(e^{j\omega}) = W_1(e^{j(\omega-\omega_0)}) \\ Y_2(e^{j\omega}) = W_2(e^{j\omega}) \\ Y_3(e^{j\omega}) = jW_3(e^{j(\omega+\omega_1)}) \end{cases} \quad (4)$$

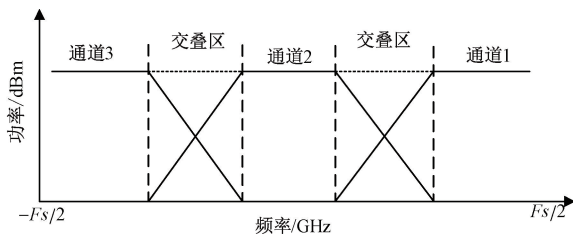


图 3 3 通道宽带信号采集系统的频带拼接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of frequency band stitching of 3 channel wideband signal acquisition system

系统输出信号为如式(4)所示各采集通道的输出信号的叠加:

$$Y(e^{j\omega}) = \sum_{n=1}^M Y_n(e^{j\omega}) \quad (5)$$

虽然采用并行采集架构实现了信号分析仪的带宽扩展,但因前端电路增益不平衡以及频率交叠区频带拼接的影响,进而使采集系统带内频响恶化,严重影响了信号测量的准确性。因此,需要对已恶化的带内频响进行校正,以使式(5)所示的采集系统输出信号满足完美重构条件^[16],即系统的输出信号是输入信号的延时和幅度增益。

3 宽带信号采集系统频响测试与误差校准

为测得宽带信号采集系统的频响,本文采用多载波测试替代单音扫频和快沿脉冲信号,不仅提高了速度,而且降低了复杂度。在补偿滤波器设计方面,本文采用最小二乘法替代主流的频率采样法,以校正带内幅频与相频响应误差。该方法通过最小化误差的能量平方,避免了截断误差,从而获得更优的补偿效果。

带内频响误差校准的流程如图 4 所示。首先,利用多载波信号测试方法获取系统的频率响应。然后,根据第 3.1 节中的描述,确定补偿滤波器的期望频率响应。随后,依据第 3.2 节中的方法,设计出满足指定频响要求的补偿滤波器,并将其与系统级联,从而实现带内频响误差的校正。

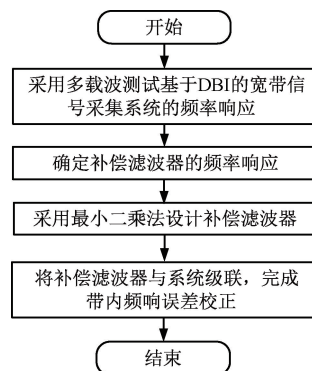


图 4 带内频响误差校准流程图

Fig. 4 In-band frequency response error calibration flow chart

3.1 基于多载波的补偿滤波器频响确定

尽管基于单音扫频的频响测试方法可以有效地测量系统的幅频响应,但是无法测得系统的相频响应。因此还需借助其他测试方法及测试仪器测得系统的相频响应。多载波信号是一种由若干频率等间隔的余弦信号组成,时域表达式如式(6)所示,其幅频与相频响应如图 5 所示,幅度单位为分贝毫瓦(dBm),相位单位为 rad。由于多载波信号包含若干频率成分,可以灵活地调整带宽,保留了幅度与相位信息^[17],在测试速度上也具有优势,所以非常适

合测试宽带信号采集系统的频响特性。

$$S(t) = \sum_{n=1}^L A_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_n) \quad (6)$$

式中: f_n 、 A_n 和 φ_n 分别是多载波信号的第 n 条谱线的频率、幅度和相位。

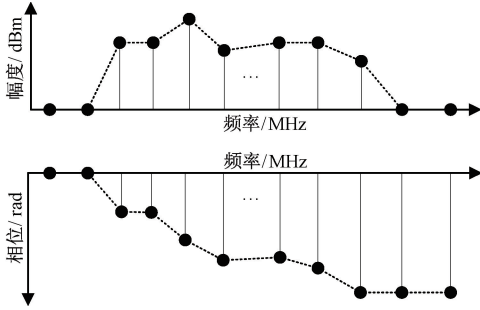


图 5 多载波信号的幅频与相频响应

Fig. 5 Amplitude and phase frequency response of the multi-carrier signal

带内幅频响应误差校正的原理示意图如图 6 所示,原始输入信号的幅频响应 $|H_I(\omega)|$ 随着频率波动,各频率分量的增益不一致,通过级联幅频响应 $|H_C(\omega)|$ 满足式(7)的补偿滤波器,使得系统的带内幅频响应接近期望幅频响应 $|H_D(\omega)|$,各频率分量信号的幅度增益一致。补偿滤波器的幅频响应 $|H_C(\omega)|$ 和待校正系统的幅频响应 $|H_I(\omega)|$ 之间的关系为:

$$|H_C(\omega)| = |H_D(\omega)| - |H_I(\omega)| \quad (7)$$

带内相频响应误差校正的关键是根据测试信号确定补偿滤波器的相频响应。通过设计固定阶数的全通滤波器校准相频响应误差的方法^[18]具有一定的局限性,不能灵活完成相频响应误差校正。针对此问题,本研究提出了一种创新的可调阶数滤波器设计方法。该方法通过将非线性相位叠加到线性相位上进行处理。具体而言,如图 7 所示,待校正系统的带内相频响应并非线性,为确保系统的相频响应为线性,首先确定期望相频响应 $\varphi_D(\omega)$ 与实际相频响应 $\varphi_I(\omega)$ 之间的相频响应差 $\varphi_d(\omega)$,然后将相频响应差 $\varphi_d(\omega)$ 叠加到具有线性相位 $\varphi_F(\omega)$ 的有限脉冲响应 (finite impulse response, FIR) 滤波器上作为实际的相频响应 $\varphi_C(\omega)$,通过设计满足式(8)的实际相频响应 $\varphi_C(\omega)$ 的补偿滤波器再与系统级联即可完成带内相频响应误差校正。

补偿滤波器的相频响应 $\varphi_C(\omega)$ 为:

$$\varphi_C(\omega) = \varphi_F(\omega) + \varphi_d(\omega) \quad (8)$$

式中:线性相位 $\varphi_F(\omega)$ 和相频响应差 $\varphi_d(\omega)$ 分别满足式(9)和式(10):

$$\varphi_F(\omega) = -N\omega/2 \quad (9)$$

$$\varphi_d(\omega) = \varphi_D(\omega) - \varphi_I(\omega) \quad (10)$$

若同时校正带内幅频响应误差与相频响应误差,补偿滤波器的传输函数为:

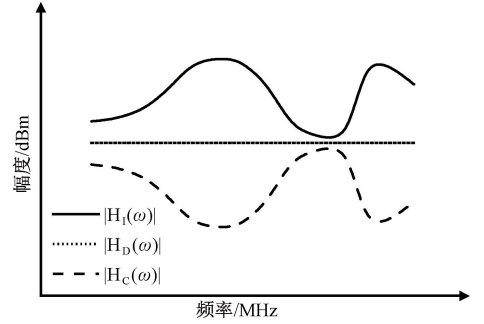


图 6 带内幅频响应误差校正的原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the principle of in-band amplitude-frequency response error calibration

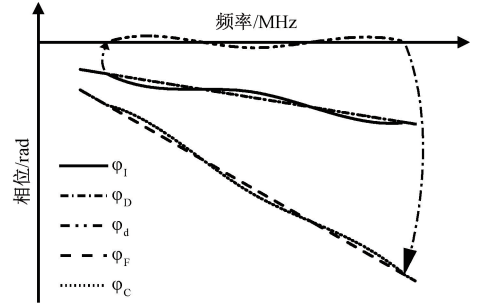


图 7 带内相频响应误差校正的原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the principle of in-band phase-frequency response error calibration

$$H_C(\omega) = |H_C(\omega)| e^{j\varphi_C(\omega)} \quad (11)$$

3.2 基于最小二乘法的补偿滤波器设计

在工程应用中,频率采样法常被用于设计补偿滤波器,该方法通过对期望的补偿滤波器的频率响应作离散傅里叶逆变换,并截断得到的系数构建补偿滤波器。然而由于截断会引入误差,从而限制了频响补偿的效果。为了解决这一问题,本文提出一种基于最小二乘法设计补偿滤波器进行通道频率响应误差校正的方法。该方法通过在频域里逼近根据式(11)得到的期望的频率响应,以最小化实际与期望频响误差函数的能量平方,从而设计出 FIR 滤波器, FIR 滤波器的传输函数与其系数之间的关系由式(12)给出:

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j\omega n} = \mathbf{G} \mathbf{h} \quad (12)$$

式中: N 为滤波器阶数, ω 为角频率,采样矩阵 $\mathbf{G} = e^{-j\omega \otimes [0, 1, \dots, N-1]}$, \otimes 表示克罗内克积,滤波器系数 $\mathbf{h} = [h(0), h(2), \dots, h(N-1)]^T$ 。为求得滤波器系数,定义目标函数 F 为:

$$F = \|H(\omega) - H_C(\omega)\|_2 \quad (13)$$

滤波器系数对应式(13)的最小二乘解,若直接求解最小二乘的逆矩阵可能存在奇异值,导致得到的结果不正确,需要首先将求逆的矩阵转为式(14)的对称矩阵,再通过求广义逆、分解法或迭代法方法进行高效求解。

$$\mathbf{h} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{H}_c \quad (14)$$

为衡量通道频响误差校正的效果,定义带内幅度平坦度 (magnitude flatness, MF) 和相位线性度 (phase linearity, PL):

$$\text{MF} = \pm (\text{Mag}_{\max} - \text{Mag}_{\min}) / 2 (\text{dB}) \quad (15)$$

$$\text{PL} = \pm (\text{Dlp}_{\max} - \text{Dlp}_{\min}) / 2 (\text{rad}) \quad (16)$$

式中: Mag_{\max} 和 Mag_{\min} 分别表示带内幅度增益的最大和最小值, Dlp_{\max} 和 Dlp_{\min} 分别表示相频响应消除趋势后^[19]的最大和最小值。

4 实验结果与分析

为验证本研究设计的基于 DBI 的宽带信号采集系统在提升信号分析仪分析带宽方面的有效性,根据第 2 节的详细理论分析,搭建了如图 8 所示的实验测试平台。宽带信号采集系统主要由两个通道的混频板和采集板组成。射频信号源产生带宽 1.8 GHz、载波间隔 10 MHz 的带宽射频 (radio frequency, RF) 信号,随后通过混频板将射频信号转换为两个中频 (intermediate frequency, IF) 信号。这些中频信号被采集板进一步数字化和恢复。采集板还负责进行频响误差的校准,以保证信号采集的准确性。最终,利用信号分析仪观测宽带信号的采集结果,以验证整个系统的性能。

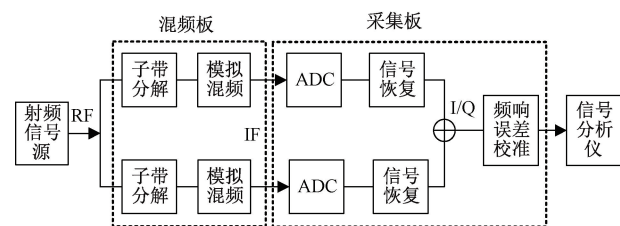


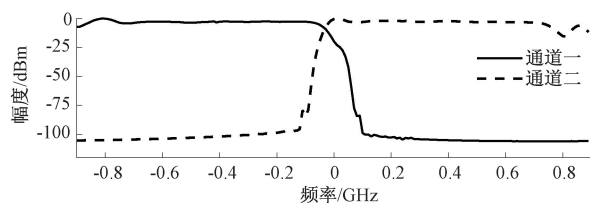
图 8 2 通道宽带信号采集系统硬件测试平台示意图

Fig. 8 Diagram of a two channel hardware testing platform

宽带采集系统各通道的频率响应测试结果如图 9(a) 和 (b) 所示,两个采集通道的频率覆盖分别为 $-0.9 \sim 0.1$ GHz 和 $-0.1 \sim 0.9$ GHz,其中交叠区域范围为 $-0.1 \sim 0.1$ GHz,每个通道的采集带宽达到 1 GHz。根据图 10 所示的实际宽带信号,系统的信号采集带宽扩展至 1.8 GHz,这验证了所设计的并行采集架构在扩展分析带宽方面的有效性。然而,观察到带内频响在宽带信号采集过程中出现了恶化现象。为了提高系统的信号采集准确性,需要设计补偿滤波器校正带内频响误差。

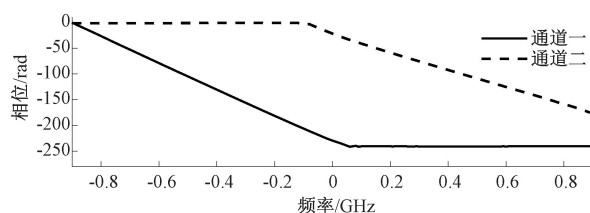
图 11(a) 和 (b) 分别展示了采取本文方法和频率采样法对宽带信号采集系统带内频响误差进行校正后,带内幅度平坦度与相位线性度随滤波器阶数变化的对比曲线。结果显示,随着滤波器阶数的增加,两种带内指标均得到改善,但资源消耗也越高。因此,在综合考虑校正效果和实际的硬件资源后,选择阶数为 130 的补偿滤波器。

校正前后的带内频响对比分别如图 12(a) 和 (b) 的虚



(a) 各通道的幅频响应

(a) Amplitude-frequency response of each channel



(b) 各通道的相频响应

(b) Phase-frequency response of each channel

图 9 宽带信号采集系统各通道的带内频响实际测试结果

Fig. 9 Actual in-band frequency response test results of each channel of the wideband signal acquisition system

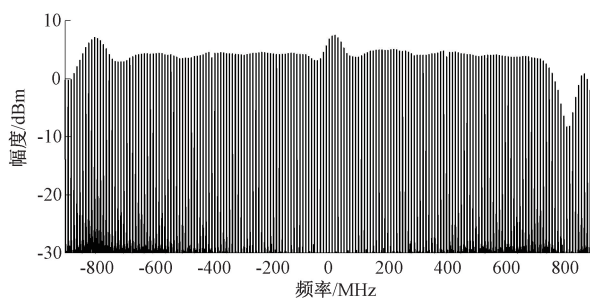
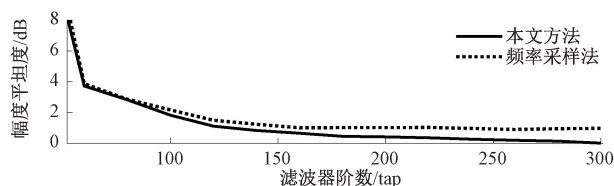


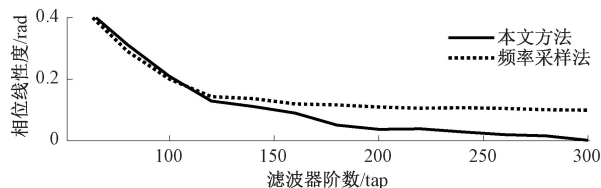
图 10 频响误差校正前实际采集的宽带信号带内幅频曲线

Fig. 10 Amplitude-frequency curve of the actually acquired wideband signal without frequency response error calibration



(a) 带内平坦度与滤波器阶数关系图

(a) Relationship between in-band MF and filter order



(b) 相位线性度与滤波器阶数关系图

(b) Relationship between in-band PL and filter order

图 11 带内幅度平坦度和相位线性度随滤波器阶数变化关系

Fig. 11 Relationship between MF and PL with the filter order

线和实线所示。校正前,带内幅度平坦度和相位线性度分别为 ± 7.99 dB 和 ± 18.87 rad;而采用本文方法校正后,带

内幅度平坦度和相位线性度分别改善至 $\pm 0.97\text{ dB}$ 和 $\pm 0.11\text{ rad}$,满足实验要求。实际采集的宽带信号带内幅频曲线如图 13 所示,表明频响误差得到了大幅校正,从而验证了提出的频响误差校正方法的有效性。

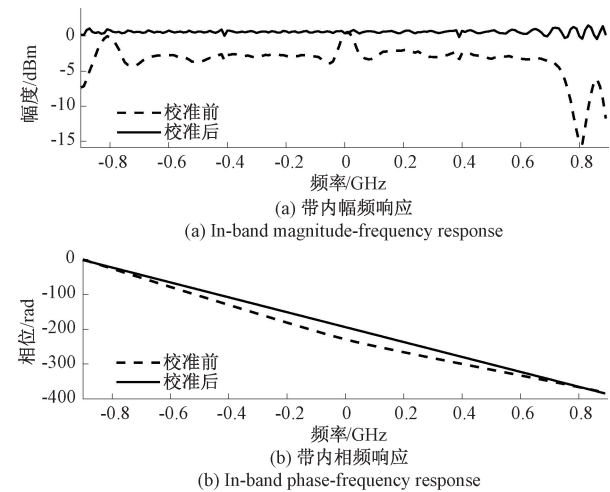


图 12 校正前后的宽带信号采集系统带内频率响应
Fig. 12 In-band frequency response of the wideband signal acquisition system with and without calibration

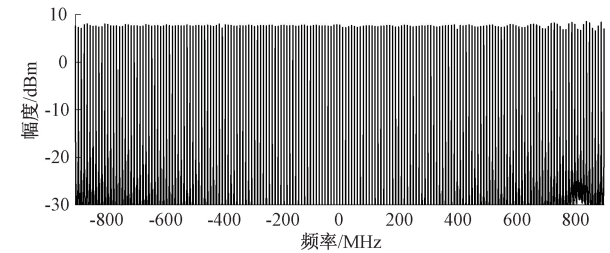


图 13 频响误差校正后实际采集的宽带信号带内幅频曲线
Fig. 13 Amplitude-frequency curve of the actually acquired wideband signal after frequency response error calibration

表 1 展示了本文方法与主流方法频率采样法在频响误差校正结果上的指标对比,计算方法分别如式(15)和(16)所示。通过对比两类指标,两种方法都能有效校正系统的带内频响误差。相比之下,采用本文方法能获得最佳的带内频响误差校正效果,体现了本文提出的带内频响误差校正方法的优越性。

表 1 频响误差校正前后的系统性能指标

Table 1 System performance indicators with and without frequency response error calibration

指标类型	误差 校正前	误差校正后	
		频率采样法	本文方法
幅度平坦度/dB	± 7.99	± 1.33	± 0.97
相位线性度/rad	± 18.87	± 0.15	± 0.11

5 结 论

针对信号分析仪的大带宽信号测试需求,本文首先基于 DBI 采集架构研究设计了一种带宽 1.8 GHz 的双通道宽带信号采集系统;然后针对设计的宽带信号采集系统存在的带内频响误差,提出了一种基于多载波测试联合最小二乘法设计补偿滤波器的方法。实测实验验证了本文设计的并行架构和带内频响误差校正方法的有效性,具有极大的工程应用价值。未来研究将聚焦实现具有更高分析带宽的宽带信号采集系统,以推广实际工程应用。

参考文献

[1] 高舰. 基于阵列采样的宽带信号高精度获取技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
GAO J. Research on high resolution sampling technology of wideband signal based on array sampling[D]. Chengdu University of Electronic Science and Technology of China, 2021.

[2] JI Y, NIELSEN J O, WEI F. On band stitching for wideband vector measurements with vector signal analyzers [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(2): 710-718.

[3] 崔文涛, 李杰, 张德彪, 等. 基于国产 ADC 芯片的 TIADC 系统时间误差自适应校准算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 132-139.
CUI W T, LI J, ZHANG D B, et al. TIADC system time error adaptive calibration algorithm based on domestic ADC chip[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 132-139.

[4] SONG J P, TIAN S L, GUO L P, et al. Digital correction of frequency-response errors in bandwidth-interleaved ADCs [J]. Electronics Letters, 2016, 52(19): 1596-1598.

[5] JIANG X C, WU J, MA Y B. Synchronous mixing architecture for digital bandwidth interleaving sampling system[J]. Electronics, 2021, 10(16): 1998.

[6] PUPALAIKIS P J, YAMRONE B, DELBUE R, et al. Technologies for very high bandwidth real-time oscilloscopes [C]. 2014 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), Coronado, CA, USA: IEEE, 2014: 128-135.

[7] 朱江森, 郑香蕊, 赵科佳, 等. 数字示波器宽带探头系统的校准研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10): 33-38.
ZHU J M, ZHENG X R, ZHAO K J, et al. Calibration of broadband probe system of digital oscilloscope[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10): 33-38.

[8] ZHAO Z Z, DU H W, YANG D Y, et al. Flatness

- improvement methods of wideband intermediate frequency channel[C]. 2023 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Qingdao, China; IEEE, 2023; 1-3.
- [9] 赵禹. 基于带宽交织技术的超宽带数据采集方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- ZHAO Y. Research on ultra wideband data sampling systems based on bandwidth interleaved technology[D]. Chengdu University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [10] 张涛. DBI 采集系统中数据处理模块设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- ZHANG T. Design of data processing module in DBI acquisition system [D]. Chengdu University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [11] 周钦山, 王峰, 韩翔, 等. 信号分析仪误码率测试技术研究及实现[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(7): 110-114.
- ZHOU Q SH, WANG F, HAN X, et al. Research and implement of bit error ratio test technology for signal analyzer[J]. Foreign Electronic Measurement Technology 2021, 40(7): 110-114.
- [12] 年夫顺. 现代测量技术发展及面临的挑战[J]. 测控技术, 2019, 38(2): 3-7.
- NIAN F SH. The development and challenges of modern measurement technology[J]. Measurement & Control Technology, 2019, 38(2): 3-7.
- [13] GHASEMPOUR Y, CLAUDIO R, CARLOS C, et al. IEEE 802.11ay: Next-generation 60 GHz communication for 100Gb/s Wi-Fi [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(12): 186-192.
- [14] MENG J, WANG H J, YE P, et al. I/Q Linear phase imbalance estimation technique of the wideband Zero-IF receiver[J]. Electronics, 2020, 9(11): 1787.
- [15] 安宇宁, 刘祖深, 江丹. 5G 毫米波大带宽信号内插器设计与实现[J]. 电子测量技术, 2022, 45(24): 29-35.
- AN Y N, LIU Z SH, JIANG D. Design and implementation of 5G millimeter wave large bandwidth signal interpolator [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(24): 29-35.
- [16] ZHAO Y, YE P, MENG J, et al. Compensation module design for overlapping band in band-interleaved data acquisition systems based on hybrid particle swarm optimization algorithm [J]. IEEE Access, 2020, 8: 178835-178848.
- [17] ZHUANG Y, CHEN D. Accurate spectral testing with impure test stimulus for multi-tone test [C]. 2018 IEEE International Test Conference in Asia(ITC-Asia), Harbin, China; IEEE, 2018: 97-102.
- [18] DENG T B. Phase-compensating-system design using generalised stability-triangle[J]. International Journal of Electronics Letters, 2021, 9(1): 88-104.
- [19] MA Y B, WU J, JIANG X C, et al. An efficient calibration method for digital bandwidth interleaving sampling system [J]. Journal of Instrumentation, 2023, 18(11): P11001.

作者简介

李武, 硕士研究生, 主要研究方向为大带宽信号采集及其误差校准。

E-mail: liwu@s. upc. edu. cn

张鹏, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波电子测量仪器、超宽带信号采集及其校准补偿算法等。

E-mail: zhangpeng002@ceyear. com

万勇(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为系统故障诊断与智能信息处理。

E-mail: wanyong@upc. edu. cn

张超, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波电子测量仪器开发。

E-mail: zhangchao@ceyear0com

戴永寿, 博士, 教授, 主要研究方向为信号与信息处理、计算机测控技术等。

E-mail: daiys@upc. edu. cn