

► **Application Note**

Radiofrequenz-Messungen mit modularem Digitizer

Moderne modulare Digitizer wie die PCIe-Digitizer der Serie M4i von Spectrum bieten eine größere Bandbreite und höhere Auflösung bei jeder gegebenen Bandbreite als je zuvor. Obwohl sie in die Kategorie der Messgeräte für allgemeine Anwendungen fallen, können sie für viele Radiofrequenz (RF)-Messungen und Messungen im unteren Mikrowellenfrequenzbereich verwendet werden. Dieser Artikel befasst sich vorrangig mit einigen Beispielen gängiger RF-Messungen, die mit diesen modularen Digitizern durchgeführt werden können.

Gründe für den Einsatz eines Digitizers in RF-Anwendungen

Modulare Digitizer bieten deutliche Vorteile für Messanwendung, wenn folgende Eigenschaften wichtig sind:

Wird ein hoher Messdurchsatz benötigt?

PCIe-basierte, modulare Mehrkanal-Digitizer können Daten mit bis zu 3,4 GByte/s übertragen, wodurch eine einfache und schnelle Verarbeitung durch den Computer möglich ist. So können sehr lange Signale (bis zu mehreren Stunden Dauer bei Einsatz eines Disk-Arrays) für die Analyse der aufgezeichneten Signale gespeichert werden.

Sind Fehlersuchen an Stromkreisen, Geräten oder innerhalb von Prozessen durchzuführen oder sind Messungen vorzunehmen, bei denen anschließend eine Analyse und Verarbeitung erforderlich sind?

Der modulare Digitizer ist das beste Tool, wenn Sie Daten messen, analysieren und verarbeiten möchten. Aufgrund ihrer engen Vernetzung bietet sich der Einsatz eines Digitizers mit einem Computer als Messinstrument an, wenn große Datenmengen mithilfe kommerzieller oder vom selbst entwickelter Analyse-Software verarbeitet werden sollen. Während bei der Fehlersuche die interaktive Anzeigefähigkeit der Tischgeräte erforderlich ist, eignen sich Digitizer immer dann, wenn es um die automatisierte Beschreibung von Signalen geht.

Werden mehrere Kanäle bei kleinem Formfaktor und minimaler Leistungsaufnahme benötigt?

Hier liegt die Stärke moderner modularer Digitizer: mehrere Kanäle pro Karte und mehrere Karten pro System - alle vollständig synchronisiert. Modulare Plattformen wie die Serie M4i von Spectrum ermöglichen es, die Anzahl an Analog- und Digitalkanälen zu erhöhen und die Möglichkeiten zur Erzeugung analoger Signale oder von Digitalpattern hinzuzufügen. Dank dieser Eigenschaft eignen sich Digitizer ideal für MIMO (Multiple Input Multiple Output)-Studien sowie für Mehrkanal-Kommunikationssysteme.

Müssen die Betriebskosten (Total Cost of Ownership) niedrig gehalten werden?

Digitizer bieten die geringsten Kosten pro Aufzeichnungs kanal sowie einfache Bedienung, schnelle Integration und hohe Zuverlässigkeit.

► **Application Note**

Auswahl eines Digitizers

RF-Messungen erfordern Digitizer mit drei Haupteigenschaften. Die erste ist die Bandbreite. Die Digitizer müssen einen Frequenzbereich unterstützen, der der beabsichtigten Messung gerecht wird. Als nächstes folgt die Auflösung, die den Dynamikbereich der Messung bestimmt. Der letzte Hauptaspekt ist die Datenübertragungsrate, die die Aktualisierungsrate der Messung beeinflusst.

In Tabelle 1 sind die Merkmale mehrerer PCIe-Digitizer von Spectrum aufgeführt, die für RF-Anwendungen in Betracht kommen.

Jeder dieser modularen Digitizer ist über eine PCIe X8-Schnittstelle mit seinem Hostcomputer verbunden. Die Schnittstelle bietet eine Datenübertragungsrate von bis zu 3,4 GB/s. Andere Digitizer-Modelle bieten niedrigere Übertragungsraten.

Modell	Kanäle	Auflösung	Abtastrate (MS/s)	Bandbreite (MHz)
M4i.2210-x8	1	8 Bit	1250	500
M4i.2211-x8	2	8 Bit	1250	500
M4i.2212-x8	4	8 Bit	1250	500
M4i.2220-x8	1	8 Bit	2500	1500
M4i.2221-x8	2	8 Bit	2500	1500
M4i.2223-x8	2	8 Bit	2500 (1 Kanal) 1250 (2 Kanäle)	1500
M4i.2230-x8	1	8 Bit	5000	1500
M4i.2233-x8	2	8 Bit	5000 (1 Kanal) 2500 (2 Kanäle)	1500
M4i.2234-x8	4	8 Bit	5000 (1 Kanal) 2500 (2 Kanäle) 1250 (4 Kanäle)	1500
M4i.4450-x8	2	14 Bit	500	250
M4i.4451-x8	4	14 Bit	500	250
M4i.4410-x8	2	16 Bit	130	65
M4i.4411-x8	4	16 Bit	130	65
M4i.4420-x8	2	16 Bit	250	125
M4i.4421-x8	4	16 Bit	250	125

Tabelle 1: Übersichtstabelle mit Digitizern von Spectrum, die sich für RF- und Mikrowellenmessungen eignen

Beispiele für Messungen mit unterschiedlichen Dynamikbereichen

Ein kurzer Blick auf die in Tabelle 1 aufgeführten Spezifikationen offenbart einen Kompromiss zwischen Auflösung und Bandbreite. Die Entscheidung für ein bestimmtes Modell hängt von der jeweiligen Anwendung ab. Wenn das gemessene Signal ein geringes Verhältnis von höchster zu niedrigster Amplitude aufweist, ist ein Digitizer mit einer geringeren Auflösung akzeptabel. Diese Art von Anwendung, wie etwa die Charakterisierung eines übertragenen Radarsignals, stellt nur geringe Anforderungen an den Dynamikbereich. Wenn ein Signal hingegen eine Mischung aus hohen und niedrigen Amplitudenanteilen aufweist, ist eine höhere Auflösung erforderlich. Anwendungen wie Software Defined Radio (SDR) und Echoortung (wie Radar) erfordern Digitizer mit großen Dynamikbereichen. Bild 1 zeigt die aufgezeichnete Signalform, wie sie nach Anschluss einer einfachen Antenne an den Eingang eines Spectrum Digitizers vom Typ M4i.4450-X8 mit einer Auflösung von 14 Bit durch die Software SBench 6 von Spectrum dargestellt und verarbeitet wird. Abgebildet sind sowohl der Zeit- als auch der Frequenzbereich der Signalform. Dieses ist ein Beispiel für ein Signal mit einem großen Dynamikbereich.

► Application Note

Das im linken Diagramm dargestellte aufgezeichnete Signal hat eine Spitze-zu-Spitze-Amplitude von 38 mV. Obwohl die schnelle Fourier-Transformation (FFT) im rechten Diagramm wie Rauschen aussieht, zeigt sie, dass der große Dynamikbereich des Digitizers mehrere RF-Quellen erfasst. Der größte Ausschlag ist ein 145-MHz-Signal mit einer Amplitude von etwa -36 dBFS (dB bezogen auf den Vollausschlag). Im UKW-Band von 88 bis 108 MHz findet sich ein Sender mit einer Spitzenamplitude von -50 dBFS. Die Spitzenamplitude zwischen Maximal- und Minimalwert des Grundrauschens beträgt etwa -120 dBFS. Der 14-Bit-Digitizer hat einen Dynamikbereich von etwa 85 dB. Die große schnelle Fourier-Transformation (500.000 Punkte) bietet einen deutlichen Vorteil für die Verarbeitung in Form des zusätzlichen Dynamikbereichs im hier dargestellten Beispiel.

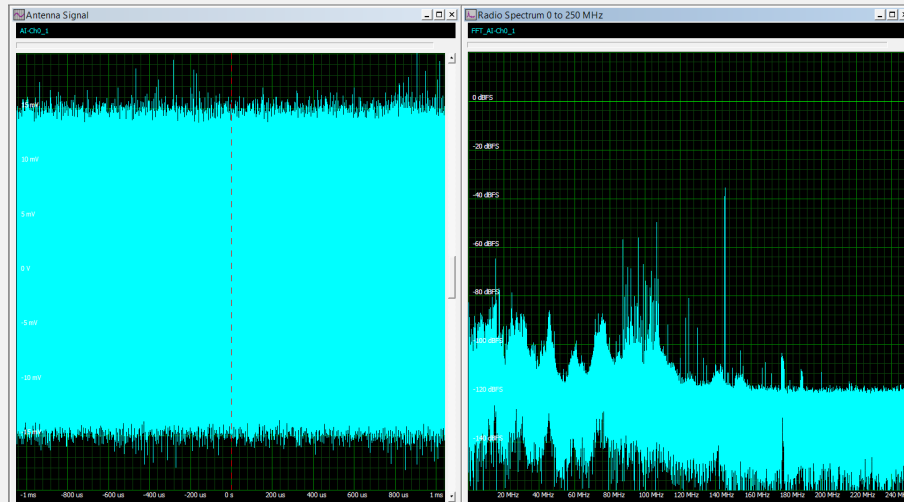


Bild 1: Nach Anschluss einer Antenne an den Eingang eines 14-Bit-Digitizers aufgezeichnetes Signal (linkes Diagramm) mit zugehöriger FFT mit einem Signalfrequenzspektrum von 0 bis 250 MHz (rechtes Diagramm)

RF-Messungen

Digitizer zeichnen Daten auf und stellen sie für Messungen und Analysen zur Verfügung. Messungen und Analysen werden mithilfe von Software durchgeführt. In diesen Beispielen wird dazu die Software SBench 6 von Spectrum verwendet. Software von Drittanbietern wie Microsoft MATLAB oder LABVIEW von National Instruments kann ebenfalls verwendet werden. Es kann auch eine kundenspezifische Software für bestimmte Mess- und Analyseverfahren programmiert werden. In allen Fällen ist eine Treibersoftware verfügbar, die die Digitizer auf die spezifischen Anwendungsprogramme abstimmt.

Die Ergebnisse einiger

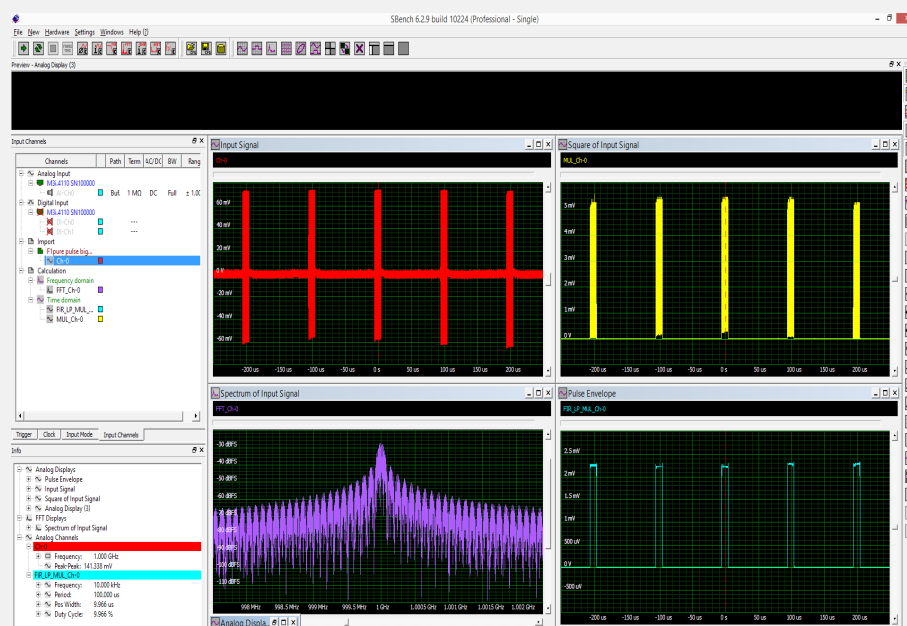


Bild 2: Beispiel einiger einfacher RF-Messungen und einer Analyse mithilfe der Software SBench 6 von Spectrum. Gemessen werden Frequenz, Amplitude, Impulswiederholungsrate (Frequenz), Periode, Tastverhältnis und Breite des aufgezeichneten Signals.

► Application Note

einfacher RF-Messungen sind in Bild 2 zu sehen. Auch in diesem Beispiel wurde SBench 6 verwendet.

Die aufgezeichnete Wellenform im Diagramm oben links ist eine pulsmodulierte 1-GHz-Sinuskurve, die für Radaranwendungen typisch ist. Das Signal wurde direkt an den Digitizer übertragen, es kann aber auch über einen Abwärtswandler an den Digitizer gesendet werden, wenn die Frequenz des Signals oberhalb der Bandbreite des Digitizers liegt. Die FFT im Diagramm unten links weist das Spektrum der aufgezeichneten Wellenform auf. SBench 6 bietet zahlreiche integrierte Messfunktionen. Im Info-Fenster links in der Mitte der Abbildung sind die Messergebnisse der aufgezeichneten Wellenformen nach Spitze-zu-Spitze-Amplitude und Frequenz aufgeführt. Die Analyse der Impulszeit erfordert eine weitere Verarbeitung zur Extraktion der Signaleinhüllenden. Dies erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird die Wellenform durch analoge Berechnung quadriert, um also die aufgezeichnete Wellenform mit sich selbst zu multiplizieren. Die quadrierte Wellenform ist im Diagramm oben rechts dargestellt. Das quadrierte Signal wird nun mit einem digitalen Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 10 MHz gefiltert. Dadurch wird die Restträgerfrequenz von 1 GHz entfernt, wodurch die gewünschte Impulseinhüllende entsteht. Die Messergebnisse zu Impulsfrequenz, Periode, Breite und Tastverhältnis werden im Info-Fenster zur entsprechenden Impulseinhüllenden dargestellt.

SBench 6 bietet die Tools zur Durchführung einer quadratischen Detektion der amplitudenmodulierten Wellenform, wodurch direkte Messungen der Impulswellenform-Parameter ermöglicht werden. MATLAB und LABVIEW bieten in Verbindung mit dem modularen Digitizer komplexere Demodulationsprozesse. Dadurch sind Frequenz- und Phasendemodulation von Radar-Chirp-Signalen und Barker-Code-Signalen möglich.

Betrachten wir nun einige grundlegende Leistungsmessungen. Das Quadrat des aufgezeichneten Signals wird erneut verwendet, um die Momentanleistung der Wellenform zu berechnen. Die quadrierte Spannung wird skaliert und durch den Widerstand von 50 Ohm dividiert, wodurch eine in Watt kalibrierte Anzeige entsteht. Parameter, die auf diese Wellenform angewendet werden, werden zur Berechnung der durchschnittlichen Leistung des Signals verwendet. Das Verfahren ist in Bild 3 dargestellt.

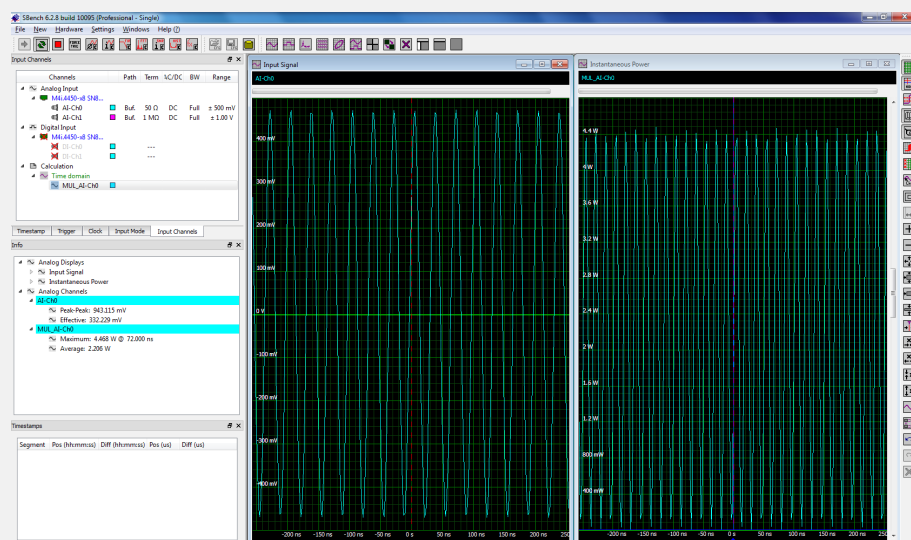


Bild 3: Berechnung der Momentan- und durchschnittlichen Leistung einer digitalisierten Sinuskurve. Die Berechnung der Momentanleistung basiert auf einer Skalierung des Quadrats des erfassten Signals und dem Dividieren des Quadrats durch den Widerstand.

Die aufgezeichnete Sinuskurve ist im linken Diagramm zu sehen. Bei den Parametern im Info-Fenster auf der linken Seite sind die Spitze-zu-Spitze- und die effektiven (RMS)-Amplituden des Sinussignals aufgeführt. Das Eingangssignal wird quadriert, indem erneut die Multiplikationsfunktion der Berechnung angewendet wird. Die Amplitude der resultierenden Wellenform wird dann durch Änderung der Signaleinstellungen skaliert. So kann der Benutzer die Anzeige mit

► Application Note

benutzerdefinierten Einheiten skalieren. Die Daten werden skaliert, indem die Werte der quadrierten Wellenform auf der Y-Achse durch den Widerstand von 50 Ohm dividiert werden.

Das Ergebnis ist im rechten Diagramm zu sehen. Auf der Y-Achse sind die Werte in Milliwatt (mW) aufgetragen. Angezeigt wird die Momentanleistung der Quelle. Ein erneuter Blick auf das Info-Fenster zeigt, dass zwei Parameter auf die Messung dieser Wellenform angewendet werden. Der erste ist der Maximalwert. Hier wird die gemessene Spitzenleistung aufgezeichnet. Der zweite ist der Durchschnittswert der Leistungswellenform. Dies ist die durchschnittliche oder mittlere Leistung.

Die Genauigkeit dieser Messungen hängt von mehreren Faktoren ab. Der wichtigste ist die Ebenheit des Frequenzgangs des Digitizers. Die meisten Breitband-Digitizer versuchen, die Ebenheit des Frequenzgangs innerhalb von 0,5 dB zu halten. Dies entspricht etwa einer Spannungsunsicherheit von 5 % beim Maximalwert. Korrekturen können durchgeführt werden, wenn eine größere Genauigkeit gefordert ist.

Mehrkanalaufzeichnung und -analyse

Quadratur modulierte Signale

Der Hochfrequenzbereich bietet zahlreiche Möglichkeiten für die Mehrkanalanalyse. Eine der am häufigsten genutzten ist die Analyse quadraturmodulierter Signale. Die In-Phase- (I) und Quadratur (Q)-Anteile des Basisbands werden miteinander kombiniert, um eine RF-Trägerfrequenz zu modulieren. Die Modulation kann eine einfache Phasenmodulation oder eine Kombination aus Phasen- und Amplitudenmodulation sein. In Bild 4 ist die Aufzeichnung der I- und Q-Anteile eines quadraturamplitudenmodulierten Signals mit 16 Zuständen (16-QAM) dargestellt. Bei diesem Modulationsverfahren werden zwei serielle Datenströme miteinander kombiniert, um vier Datenzustände mit jedem der sechzehn übertragenen Symbolzustände zu übertragen.

In den beiden Diagrammen auf der rechten Seite sind die aufgezeichneten I- und Q-Anteile dargestellt. Wenn diese Anteile in einem X-Y-Diagramm als Cross-Plot aufgetragen werden, kann man die sechzehn Amplituden-/Phasenzustände erkennen, die das Komplement dieser Signalcodierung sind. Es gibt zwölf unterschiedliche Phasenzustände und vier zusätzliche Zustände, die dieselben Phasen bei 45, 135, 225 und 315° verwenden, jedoch eine geringere Amplitude aufweisen.

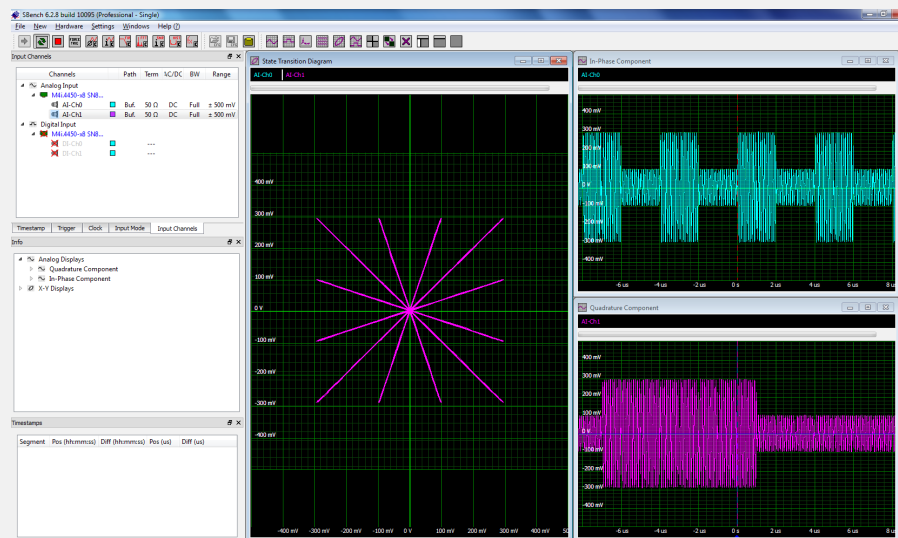


Bild 4: Aufzeichnung der I- und Q-Anteile des Basisbands eines 16-QAM-Signals mit Cross-Plot (Statusübergangsdiagramm) der Signale, die eine Phasen- und Amplitudenvariation sämtlicher sechzehn Datenzustände aufweisen

► **Application Note**

Messung von Frequenzgängen

Der Frequenzgang eines Stromkreises oder Geräts kann einfach mithilfe zweier Digitizer-Kanäle und einer Breitbandsignalquelle abgeschätzt werden. Es gibt drei Arten von Signalen, die eine gleichmäßige Amplitude bei verschiedenen Frequenzen aufweisen. Gleitsinus, Impuls und White Noise (weißes Rauschen) reagieren bei verschiedenen Frequenzen gleichmäßig auf Strahlung bestimmter Wellenlängen. Der Gleitsinus bietet den größten Dynamikbereich. Die Impulsfunktion ist in der Regel am einfachsten einzurichten und zu verwenden. White Noise weist aufgrund seines hohen Spitze-zu-effektiver-Amplitude-Verhältnisses den kleinsten Dynamikbereich auf. In Bild 5 ist das Beispiel einer Messung des Frequenzgangs eines 36-MHz-Tiefpassfilters zu sehen. Die verwendete Signalquelle ist eine Impulsfunktion eines Arbitrary Waveform-Generators (AWG) mit einer Bandbreite von 125 MHz.

Die Impulsfunktion ist im Diagramm oben links dargestellt, darunter ist die FFT dieses Eingangssignals zu sehen. Die spektrale Form begründet sich mit dem Ausgangsverhalten des AWG sowie mit der begrenzten Übergangszeit der Impulsfunktion. Zu beachten ist, dass das Spektrum bis 50 MHz relativ gleichförmig ausgeprägt ist, was bei diesem Beispiel ausreichend ist. Die Wellenform im Diagramm oben rechts ist der Ausgang des Filters. Seine FFT ist im Diagramm unten rechts dargestellt. Hier kann man die Filterkennlinie sehen. Positionsmarken können dazu verwendet werden, den -3-dB-Punkt abzuschätzen und die Bandbreite zu messen.

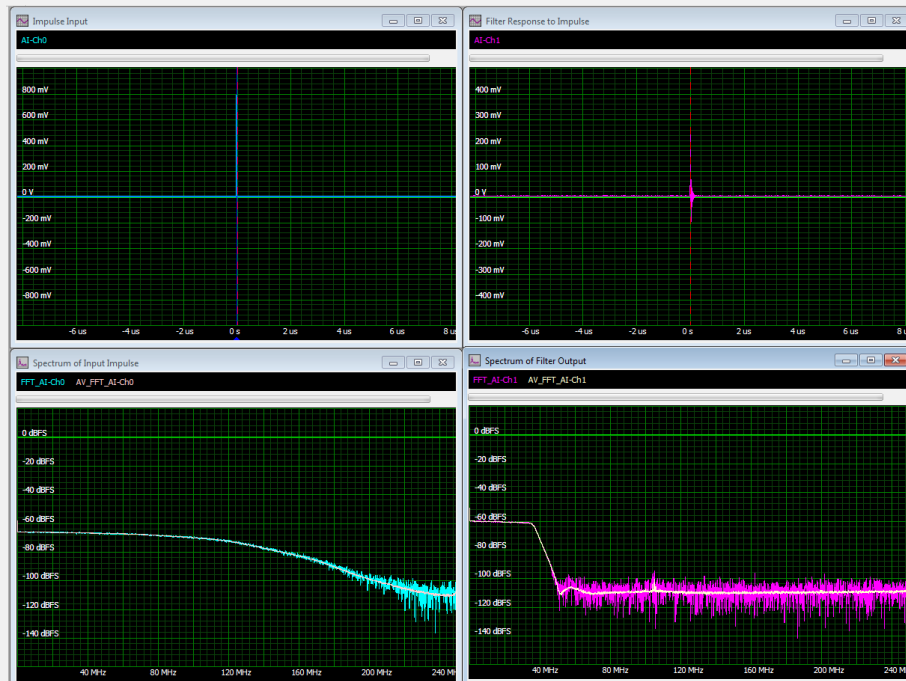


Bild 5: Verfahren zum Schätzen des Frequenzgangs eines Tiefpassfilters mithilfe einer Impulsfunktion als Eingangssignal für den Filter und mithilfe der FFT's der Eingangs- und Ausgangs-Frequenzgänge als Reaktion auf den Impuls

Dies sind zwei einfache Beispiele für RF-Messungen

bei Einsatz mehrerer Digitizer-Kanäle. Hierbei kommt die Tatsache zum Tragen, dass die Datenaufzeichnung mehrerer Kanäle vollständig synchron erfolgt. Das Konzept kann auf mehrere, durch Star-Hub-Option miteinander verbundene Digitizer erweitert werden. Dieses zusätzliche Modul bietet eine phasenstabile Synchronisierung von bis zu acht Karten desselben Typs innerhalb eines Systems. So lässt sich beispielsweise durch den Anschluss von acht Digitizern der Serie M4i an einen Star-Hub ein System mit bis zu 32 vollständig synchronisierten Kanälen erstellen. Der Star-Hub sorgt für die Verteilung der Trigger- und Taktsignale zwischen sämtlichen Karten. Dadurch werden alle angeschlossenen Karten mit demselben Takt und demselben Trigger betrieben und zwar ohne jegliche Phasenverzögerung zwischen den Kanälen. Sämtliche Triggerquellen lassen sich mit einem logischen ODER verknüpfen, sodass zudem sämtliche Kanäle aller Karten eine Triggerquelle sein können.



► Application Note

Dank der Möglichkeit, mehrere Kanäle zu nutzen, lassen sich Digitizer simultan bei mehreren Kommunikationskanälen einsetzen oder zur Anordnung mehrerer Messkanäle für Antennen- und Ausbreitungsstudien nutzen.

Modulare Digitizer bieten umfangreiche Messmöglichkeiten in RF-Anwendungen mit Bandbreiten von bis zu 1,5 GHz. Ihre Vielseitigkeit, kompakte Bauform und Mehrkanalfähigkeit lassen sich zu leistungsstarken Prüfsystemen für Ihre RF-Anwendungen kombinieren.

Autoren:

Arthur Pini *unabhängiger Berater*

Greg Tate *Asian Business Manager, Spectrum GmbH*

Oliver Rovini *Technical Director, Spectrum GmbH*