Application Note

Signalverarbeitung für Digitizer

Modulare Digitizer ermöglichen die präzise und hoch auflösende Aufzeichnung von Daten, die schnell auf einen Host-Rechner übertragen werden können. Signalverarbeitungsfunktionen im Digitizer oder im Host-Rechner ermöglichen die Aufbereitung der aufgezeichneten Daten oder die Extraktion extrem nützlicher Informationen aus einer einfachen Messung.

Moderne Support-Software für Digitizer wie SBench 6 von Spectrum und viele Programme von Drittanbietern verfügen über zahlreiche Signalverarbeitungsfunktionen. Zu diesen gehören Wellenform-Arithmetik, Funktionen zur Bildung des Ensemble- und gleitenden Mittelwerts, schnelle Fourier-Transformation (FFT), erweiterte Filterfunktionen und Histogramme. Dieser Beitrag geht auf alle diese Funktionen ein und zeigt typische Beispiele gängiger Anwendungen für diese Tools.

Analoge Berechnung (Wellenform-Arithmetik)

Die analoge Berechnung umfasst die Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division aufgezeichneter Wellenformen. Diese Funktionen werden auf Daten angewendet, um die Signalqualität zu verbessern oder alternative Funktionen abzuleiten. Ein Beispiel ist die Verwendung der Subtraktionsfunktion, um differenzielle Anteile in eine differenzielle Wellenform mit weniger (aufgezeichneten) Gleichtaktstörungen zu überführen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, das Produkt aus Strom- und Spannungswellenformen zur Berechnung der Momentanleistung heranzuziehen.

Jede dieser arithmetischen Funktionen wird nacheinander auf die einzelnen Abtastwerte von Wellenformen angewendet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die kombinierten Wellenformen dieselbe Aufzeichnungslänge aufweisen. In Bild 1 sind die Menüeinträge in SBench 6 zur Auswahl von „Analog Calculation“ (Analoge Berechnung) dargestellt.

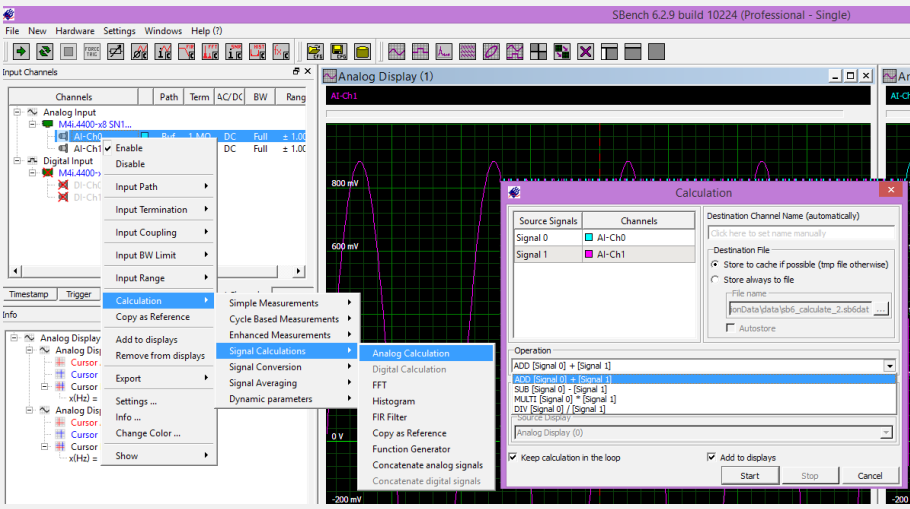

Bild 1. Zu jedem Signal stehen in SBench 6 mehrere Auswahlmöglichkeiten für die Signalverarbeitung zur Verfügung. Hier wurden „A1-Ch0“ sowie „Analog Calculations“ (Analoge Berechnung) gewählt. Im Dialogfenster „Calculation“ (Berechnung) wurden die Signale A1-Ch0 und A1Ch1 hinzugefügt.

Nach Rechtsklick auf den gewünschten Quellkanal wird ein Auswahlfenster angezeigt. Nach Auswahl von „Calculation“ (Berechnung) stehen weitere Menüeinträge zur Auswahl von Messungen zur Verfügung, beispielsweise „Signal Calculations“ (Signalberechnungen), „Signal Conversion“ (Signalwandlung) oder „Signal Averaging“ (Signalmittelwertbildung). Zu den Auswahlmöglichkeiten unter „Signal Calculations“ (Signalberechnungen) gehören „FFT“ (schnelle Fourier-Transformation), „Histogram“ (Histogramm), „FIR Filter“ (FIR-Filter) und einige weitere Funktionen. Bei der Wahl von „Analog Calculation“ (Analoge Berechnung) öffnet sich das Dialogfenster „Calculation“ (Berechnung), wo der Benutzer die Möglichkeit hat, die gewünschten arithmetischen Operationen einzurichten. In diesem Beispiel sollen die beiden Quellsignale hinzugefügt werden. Zur Wahl stehen außerdem

© Spectrum GmbH, Germany

Subtraktion (SUB), Multiplikation (MULTI) und Division (DIV). Über ähnliche Auswahlpfade kann auf alle anderen Signalverarbeitungsfunktionen zugegriffen werden, auf die noch eingegangen wird.

Im ersten Beispiel, bei dem es darum geht, eine Wellenform-Arithmetik auf praktische Probleme anzuwenden, wird ein Signalanteil von einem anderen subtrahiert, um das Differenz-Signal zu berechnen (Bild 2).

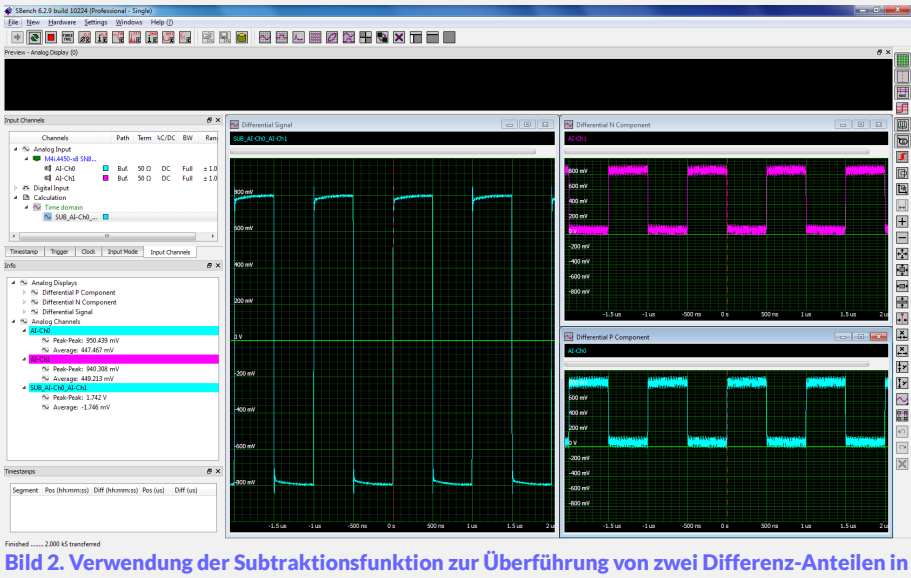

Bild 2. Verwendung der Subtraktionsfunktion zur Überführung von zwei Differenz-Anteilen in ein Differenz-Signal.

Differenz-Signale werden häufig zur Verbesserung der Signalintegrität verwendet. Im Beispiel in Bild 2 werden die „P“- und „N“-Anteile eines 1-MHz-Taktgebers (in den beiden Diagrammen auf der rechten Seite zu sehen) mit der Subtraktionsfunktion zusammengeführt. Das resultierende Differenz-Signal ist im linken Diagramm zu sehen. Im Info-Fenster (in der Mitte links) sind die Parameter zu sehen, die für die Messung des Spitze-zu-Spitze-Werts und des Mittelwerts jeder Wellenform verwendet werden. Zu beachten ist, dass die Spitze-zu-Spitze-Amplitude des Differenz-Signals zweimal so groß ist und der Mittelwert fast bei Null liegt. Zu beachten ist außerdem, dass die Gleichtaktstörungen der differenziellen Anteile beseitigt wurden.

Im zweiten Beispiel wird eine Spannungswellenform mit einer Stromwellenform multipliziert, um die Momentanleistung zu erhalten (Bild 3).

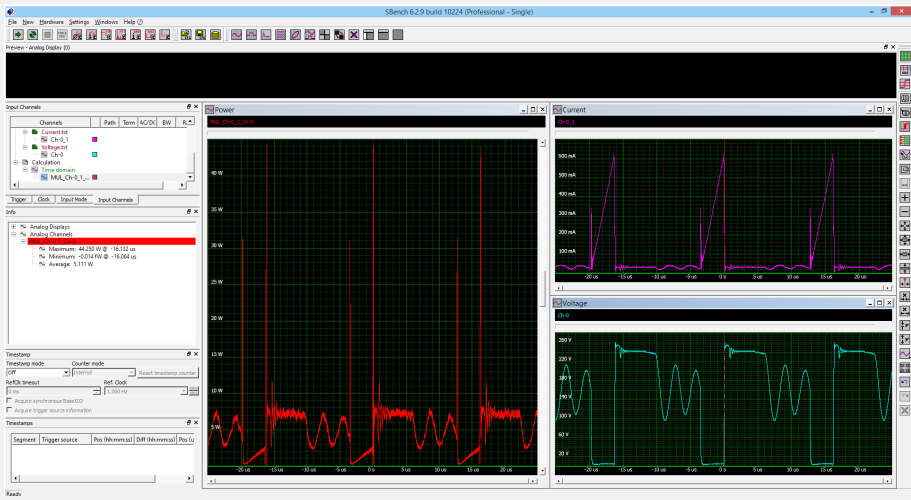

Bild 3. Verwendung der Multiplikationsfunktion zur Berechnung der Momentanleistung aus den Strom- und Spannungswellenformen eines Schaltnetzteils.

Die Ursprungs-Wellenformen sind die Spannung über den Leistungs-Feldeffekttransistor (FET) sowie der FET-Kanalstrom in einem Sperrwandler-Schaltnetzteil. Das Produkt aus diesen Wellenformen stellt die vom FET abgeleitete Momentanleistung dar. Die Stromwellenform (Diagramm oben rechts) weist eine linear ansteigende Rampe auf, während die FET-Leitung ihren Spitzenwert bei 600 mA erreicht. Die Spannung über den FET hat während der Leitung ihr Minimum, steigt jedoch auf einen Spitzenwert von 260 V an, wenn das Gerät ausgeschaltet wird. Das Produkt dieser beiden Wellenformen ist im linken Diagramm zu sehen. Hierbei handelt es sich um die Wellenform der

Momentanleistung, die deutliche Spitzen während der Übergänge zwischen den Zuständen Ein (Leitung) und Aus aufweist. Die durchschnittliche (5,111 W) und die Spitzenleistung (44,25 W) werden mithilfe von Parametern bestimmt und im Info-Fenster links in der Mitte angezeigt.

Diese Beispiele veranschaulichen, wie analoge Berechnungen für die Ableitung weiterer wichtiger Wellenformen von den ursprünglich aufgezeichneten genutzt werden können.

Mittelwertbildung

Bei der Mittelwertbildung handelt es sich um ein Signalverarbeitungstool zur Reduzierung der Einflüsse von Rauschen und nicht-synchronen periodischen Wellenformen bei aufgezeichneten Signalen. Erforderlich sind mehrere Aufzeichnungen und ein stabiler Trigger. Die Amplituden von Signalanteilen, die nicht synchron mit der Zeitvorgabe für Trigger einschließlich zufälligem Rauschen sind, werden verringert. Das Ausmaß der Verringerung hängt von der Wellenformcharakteristik und der Anzahl der Aufzeichnungen ab, die dem Mittelwert hinzugefügt werden.

Die in diesem Beitrag verwendete Software SBench 6 von Spectrum, wie auch die meisten Oszilloskope, führt eine Ensemblemittelwertbildung durch, d. h., es wird ein Mittelwert desselben Abtastorts über mehrere Aufzeichnungen hinweg gebildet. Steht ein stabiler Trigger zur Verfügung, ist der Anteil des zufälligen Rauschens des resultierenden Mittelwerts geringer als der einer Einzelaufzeichnung.

Mittelwertbildung durch Addieren

Bei der Mittelwertbildung durch Addieren wird eine feste Anzahl an Aufzeichnungen verwendet; hierbei werden die Ergebnisse aufeinander folgender Wellenformaufzeichnungen identischer Abtastorte bei gleicher Gewichtung addiert. Sobald die maximale Anzahl an Abtastungen erreicht ist, wird die Mittelwertbildung abgebrochen oder zurückgesetzt, um neu zu starten.

Bild 4 zeigt das Konzept der Ensemblemittelwertbildung durch Addieren:

Hier weisen die Pfeile auf den n-ten Punkt hin. Der Amplitudenwert des n-ten Punkts jeder Aufzeichnung wird auf die der anderen Aufzeichnungen addiert. Die Summe wird dann durch die Anzahl der Aufzeichnungen dividiert, um den n-ten Wert des Mittelwerts zu bestimmen. Dies wird für sämtliche Abtastorte in der Aufzeichnungsgruppe durchgeführt. Die resultierende gemittelte Wellenform weist dieselbe Anzahl an Punkten auf wie jede aufgezeichnete Wellenform.

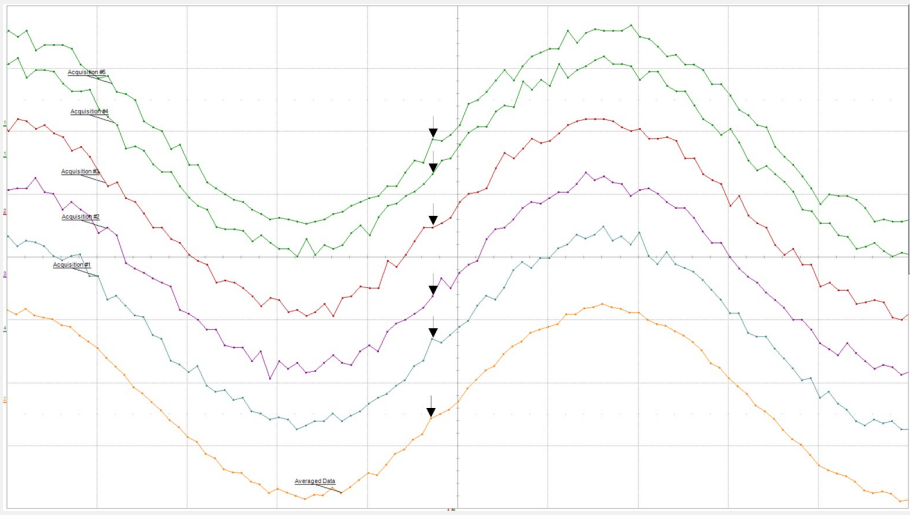

Bild 4. Durch addierte Ensemblemittelwertbildung wird der n-te Punkt mehrerer Aufzeichnungen hinzugefügt und anschließend die Summe durch die Anzahl der Aufzeichnungen geteilt, um den Mittelwert für den n-ten Punkt zu bestimmen.

Die Funktion zur Mittelwertbildung unterstützt sowohl normale Aufzeichnungen als auch mehrfache (segmentierte) Aufzeichnungen. Mehrfache Berechnungen zur Mittelwertbildung ermöglichen die Bestimmung des Mittelwerts aufeinander folgender Segmente

© Spectrum GmbH, Germany

einer Multiple-Recording-Aufzeichnung.

Welche Verbesserung kann man erwarten?

Bei der Bildung des Mittelwerts eines Signals wird das additive breitbandige Gauß'sche Rauschen um die Quadratwurzel der Anzahl der Mittelwerte reduziert. Die Mittelwertbildung über vier Aufzeichnungen hinweg kann also eine Verbesserung des Signal-Rausch-Abstands im Verhältnis zwei zu eins bewirken. Auf ähnliche Weise wird der Mittelwert nicht-synchroner periodischer Signale reduziert. Der Umfang der Reduzierung hängt von der Phasenschwankung des Störsignals von Aufzeichnung zu Aufzeichnung ab. Die Amplitude von Signalen, die mit dem Trigger synchronisiert sind, beispielsweise Verzerrungsprodukte, wird durch Mittelwertbildung nicht reduziert.

Beispiel für Mittelwertbildung

In Bild 5 ist ein typisches Beispiel für den Nutzen der Mittelwertbildung dargestellt. Das aufgezeichnete Signal (linkes Diagramm) ist eine linear gedämpfte Sinuskurve mit additivem vertikalem Rauschen. Zu beachten ist, dass die Amplitude der Sinuskurve bei vorhandenem Rauschen mit fester Amplitude abnimmt, sie verschwindet im Rauschen.

Die Mittelwertbildung über 1024 Aufzeichnungen hinweg führt zu einer Erhöhung des Signal-Rausch-Abstands bis zu dem Punkt, an dem die Sinuskurve von der gesamten Wellenform unterschieden werden kann.

Die grundsätzliche Einschränkung der addierten Ensemblemittelwertbildung besteht darin, dass sie mehrere, sich wiederholende Wellenformen mit einem stabilen Trigger erfordert.

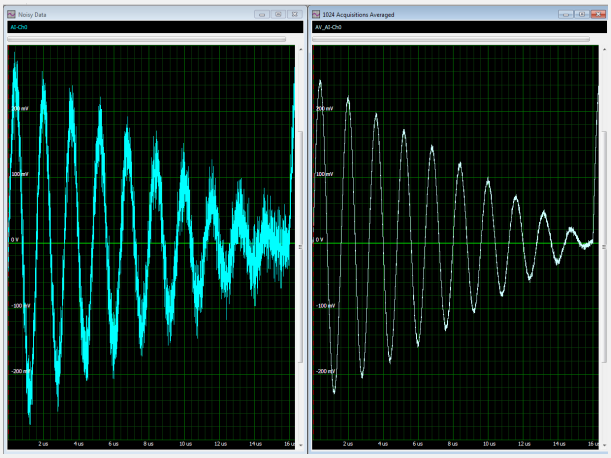

Bild 5. Beispiel für die Nutzung der Mittelwertbildung durch Addieren zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstands. Bei 1024 gemittelten Aufzeichnungen ist die Sinuskurve oberhalb des Rauschens zu sehen.

Gleitender Mittelwert

Der gleitende Mittelwert, mitunter auch als „Box-Car-Mittelwert" oder „gleitender Durchschnitt" bezeichnet, stellt das Mittel einer benutzerdefinierten Anzahl symmetrisch angeordneter, nebeneinanderliegender Abtastungen dar. Bei fünf Abtastungen ist der Prozess mathematisch über folgende Gleichung definiert:

Gemittelte Abtastung = [Abtastung (x − 2) + Abtastung (x − 1) + Abtastung (x) + Abtastung (x + 1) + Abtastung (x = 2)] / 5

Die Anzahl der für die Mittelwertbildung

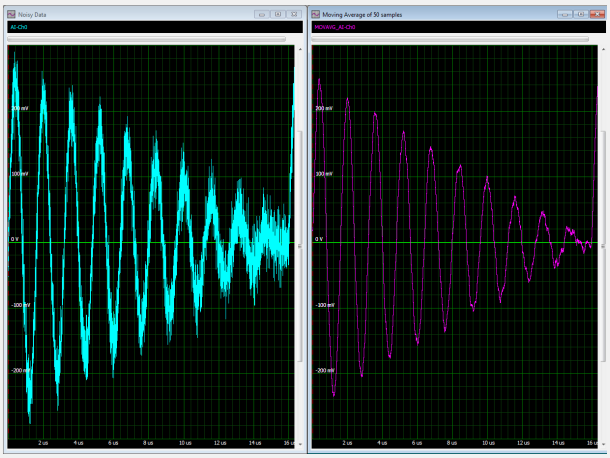

Bild 6. Beispiel für einen gleitenden Mittelwert unter Berücksichtigung von 50 nebeneinanderliegenden Abtastungen des aufgezeichneten Signals (linkes Diagramm) mit Darstellung der resultierenden Glättung im rechten Diagramm.

© Spectrum GmbH, Germany

verwendeten Abtastungen muss der Dauer der Schwankungen in der Wellenform Rechnung tragen, da der gleitende Mittelwert ansonsten die Amplitude von Begrenzungsfunktionen verringern kann.

Bild 6 zeigt ein Beispiel für die Verwendung eines gleitenden Mittelwerts für 50 nebeneinanderliegende Abtastungen (linkes Diagramm). Zu beachten sind die Glättung und Eliminierung von Rauschen (rechtes Diagramm) im Vergleich zur aufgezeichneten Wellenform.

Die Abtastungen werden einheitlich gewichtet, der Mittelwert wird über alle Abtastungen der Aufzeichnung hinweg gebildet. Der Vorteil im Vergleich zu einem gleitenden Mittelwert besteht darin, dass sich das Signal nicht wiederholen muss. Der Nachteil besteht darin, dass bei der Erzeugung einer geglätteten Wellenform ein entsprechender Verlust hochfrequenter Informationen entsteht. Die Festlegung der Anzahl der für die Mittelwertbildung zu berücksichtigenden Abtastungen muss gewissenhaft vorgenommen werden.

Schnelle Fourier-Transformation (FFT)

Die schnelle Fourier-Transformation (FFT) bildet die aufgezeichnete Wellenform vom Zeitbereichs- (Amplitude vs. Zeit) auf das Frequenzbereichsspektrum (Amplitude vs. Frequenz) ab. Das ermöglicht die Beobachtung der Frequenzanteile, aus denen sich das Signal zusammensetzt. Die FFT bewirkt keine direkte Verbesserung der Signalqualität, sie zeigt jedoch die Struktur des Signals auf und liefert Informationen dazu, wie unerwünschte Spektralanteile entfernt werden können.

Das aus einer FFT resultierende Frequenzspektrum weist eine diskrete Zeitachse auf, genauso wie das Zeitbereichssignal auf zu diskreten Zeitpunkten vorgenommenen Abtastungen basiert. Abtastungen innerhalb des Spektrums, die häufig als Spektrallinien oder Zellen bezeichnet werden, weisen Abstände entsprechend der Auflösebandbreite (Δf) auf, die umgekehrt proportional zur Aufzeichnungslänge der Signale ist. Um also die Frequenzauflösung des FFT-Spektrums zu vergrößern, muss die Aufzeichnungslänge der Signale erhöht werden.

Der Frequenzbereich bzw. die Frequenzspanne des angezeigten Spektrums liegt bei der Hälfte der Abtastrate, mit der das Signal aufgezeichnet wurde. Um die Spanne zu vergrößern, muss die Abtastrate erhöht werden.

Eine vertikale Skalierung der FFT in SBench 6 kann in linearen Einheiten (Volt) oder in logarithmischen Einheiten, ausgedrückt in Dezibel (dB), erfolgen. Die Dezibel-Skala kann auf den Vollausschlag des Digitizer-Bereichs (dBFS), 1 Milliwatt (dBm), 1 µV (dbµV) oder die größte Spitze im Spektrum bezogen werden, die als die modulierte Trägerfrequenz (dBc) angenommen wird.

Gewichtungsfunktionen

Bei der theoretischen Fourier-Transformation wird davon ausgegangen, dass die eingegebene Aufzeichnung unendlich lang ist. Eine endliche Aufzeichnungslänge kann Unterbrechungen an ihren Flanken mit sich bringen. Dadurch werden falsche Frequenzen in den Spektralbereich geschleust, die das echte Spektrum verzerren. Kommt es zu Differenzen zwischen Start- und Endphase des Signals, fällt die Signalfrequenz zwischen zwei Frequenz-Spektrallinien, wodurch das Spektrum erweitert wird.

Die Erweiterung der Spektralbasis, die sich in viele angrenzende Spektrallinien erstreckt, wird als Leck-Effekt bezeichnet. Eine Abhilfe hierfür besteht darin, sicherzustellen, dass eine ganze Zahl an Perioden im Diagramm enthalten ist oder dass keine Unterbrechungen an den Flanken auftreten. Für beide Lösungen sind eine sehr präzise Synchronisierung von Wellenform-Signalfrequenz und Digitizer-Abtastrate sowie eine exakte Einrichtung der Aufzeichnungslänge erforderlich, was normalerweise nur unter Laborbedingungen und nicht bei Signalen der realen

© Spectrum GmbH, Germany

Welt möglich ist. Eine andere Möglichkeit besteht in der Verwendung einer Fensterfunktion (Gewichtung) zum Glätten der Flanken des Signals.

Um diese Effekte zu minimieren, wird eine Gewichtungsfunktion auf das aufgezeichnete Signal angewendet, was die Endpunkte der Aufzeichnung auf Null zwingt. Die FFT in SBench 6 bietet dem Benutzer insgesamt acht Gewichtungsfunktionen. Gewichtungsfunktionen ändern die Form der Spektrallinien. Man kann sich die FFT so vorstellen, dass sie eine parallele Bank von Bandpassfiltern synthetisiert, die im Abstand von einer Auflösebandbreite zueinander verlaufen. Die Gewichtungsfunktion wirkt sich auf die Frequenzgang-Kennlinie des Filters aus. In Bild 7 ist ein Vergleich der Spektralempfindlichkeiten von vier der am häufigsten verwendeten Gewichtungsfunktionen dargestellt.

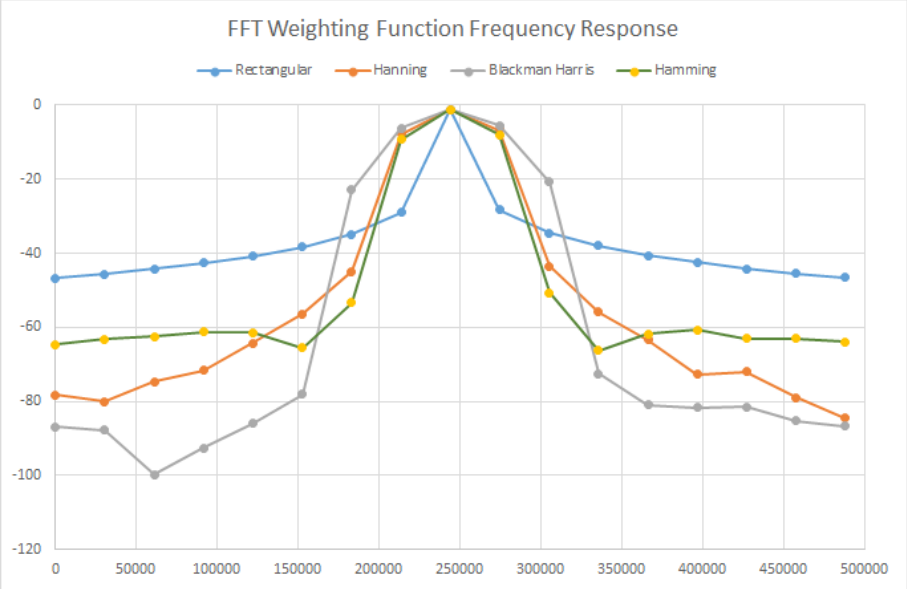

Bild 7. Vergleich der spektralen Form von vier der am häufigsten verwendeten Gewichtungsfunktionen einschließlich Rechteck- (ohne Gewichtung), Von-Hann-, Hamming- und Blackman-Harris-Funktion.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Eigenschaften jeder Gewichtungsfunktion aufgeführt.

Idealerweise sollte die Hauptkeule so schmal und flach wie möglich sein, um die echten Spektralanteile zu repräsentieren, während alle Nebenkeulen unendlich gedämpft sein sollten. Der Fenstertyp definiert die Bandbreite und Form des entsprechenden Filters, der in der FFT-Verarbeitung Anwendung finden soll. Die maximalen Amplituden der Nebenkeulen der Spektralempfindlichkeiten sind in Tabelle 1 dargestellt. Minimale Nebenkeulenausprägungen helfen bei der Unterscheidung nahe beieinanderliegender spektraler Anteile.

FFT Gewichtungsfenster und ihre Parameter				
Fenstertyp	**Highest Side Lobe (dB)**	**Scallop Loss (dB)**	**ENBW (bins)**	**Coherent Gain (dB)**
Rechteck	-13	3.92	1.0	0.0
Hanning	-32	1.42	1.5	-6.02
Hamming	-43	1.78	1.37	-5.35
Blackman-Harris	-67	1.13	1.71	-7.53

Tabelle 1. Charakteristiken der vier am häufigsten verwendeten Gewichtungsfunktionen

Wie bereits erwähnt, ist die Achse der FFT-Frequenz diskret, und ihre Spektrallinien liegen um das Vielfache der Auflösebandbreite auseinander. Wenn die Frequenz des Eingangssignals zwischen zwei nebeneinanderliegende Spektrallinien fällt, wird die Energie zwischen den Spektrallinien verteilt, und die Spitzenamplitude wird verringert. Dies bezeichnet man als „Lattenzaun-Effekt“ oder „Leck-Effekt“. Eine Erweiterung der Spektralempfindlichkeit verringert die Amplitudenschwankungen. In der Spalte zu den Leck-Verlusten in Tabelle 1 sind die Amplitudenschwankungen zu jeder Gewichtungsfunktion angegeben.

Gewichtungsfunktionen wirken sich auf die Bandbreite der Spektralempfindlichkeit aus. Die effektive Rauschbandbreite (ERB) spezifiziert die relative Änderung der Bandbreite mit Bezug zu

der der Rechteck-Gewichtung. Um die Spektraldichte auf die Messbandbreite (spektrale Leistungsdichte) zu normalisieren, muss die Spektraldichte durch das Produkt aus ERB und Auflösebandbreite (Δf*ERB) dividiert werden.

Die kohärente Verstärkung spezifiziert die Änderung der spektralen Amplitude einer Gewichtungsfunktion in Relation zur Rechteck-Gewichtung. Es handelt sich hierbei um eine feste Verstärkung über alle Frequenzen, die leicht normalisiert werden kann.

Die Rechteck-Gewichtungsfunktion ist die Antwort des aufgezeichneten Signals ohne jegliche Gewichtung. Sie hat die schmalste Bandbreite, weist jedoch recht stark ausgeprägte Nebenkeulen auf. Da der Amplitudengang innerhalb des aufgezeichneten Zeitbereichs über alle Punkte hinweg gleichmäßig ist, wird er für Signale verwendet, die ein transientes Verhalten aufweisen, also wesentlich kürzer als die Aufzeichnungslänge sind. Er wird auch verwendet, wenn eine bestmögliche Präzision der Frequenz erforderlich ist.

Die Hanning- und Hamming-Gewichtungsfunktionen weisen eine gute, vielseitig nutzbare Empfindlichkeit auf und bieten eine gute Frequenzauflösung sowie eine angemessene Empfindlichkeit der Nebenkeulen.

Blackman-Harris zielt auf die bestmögliche Genauigkeit der Amplitude und eine hervorragende Unterdrückung von Nebenkeulen.

Anwendungsbeispiele für FFT

Bild 8 zeigt ein typisches Beispiel für den Nutzen der FFT. Das Signal eines Ultraschall-Entfernungsmessers wird mit einem Breitband-Messmikrofon und einem 14-Bit-Digitizer der Baureihe M4i von Spectrum aufgezeichnet.

Das aufgezeichnete Zeitbereichssignal ist im linken Diagramm zu sehen. Die Aufzeichnung des Zeitbereichs umfasst 16.384 Abtastungen, die mit einer Abtastrate von 3,90625 MHz aufgezeichnet wurden. Die Dauer beträgt 4,2 ms. Die resultierende FFT (rechtes Diagramm) weist 8.192 Spektrallinien in Abständen von einer Auflösebandbreite von 238 Hz auf (dem Kehrwert der Aufzeichnungslänge von 4,2 ms), und zwar während einer Spanne von 1,95 MHz (der halben Abtastrate). Das Spektrum unten rechts entspricht der vollen Spanne. In der vergrößerten Darstellung oben rechts sind nur die ersten 100 kHz zu sehen, um die wichtigsten Spektralanteile besser erkennen zu können.

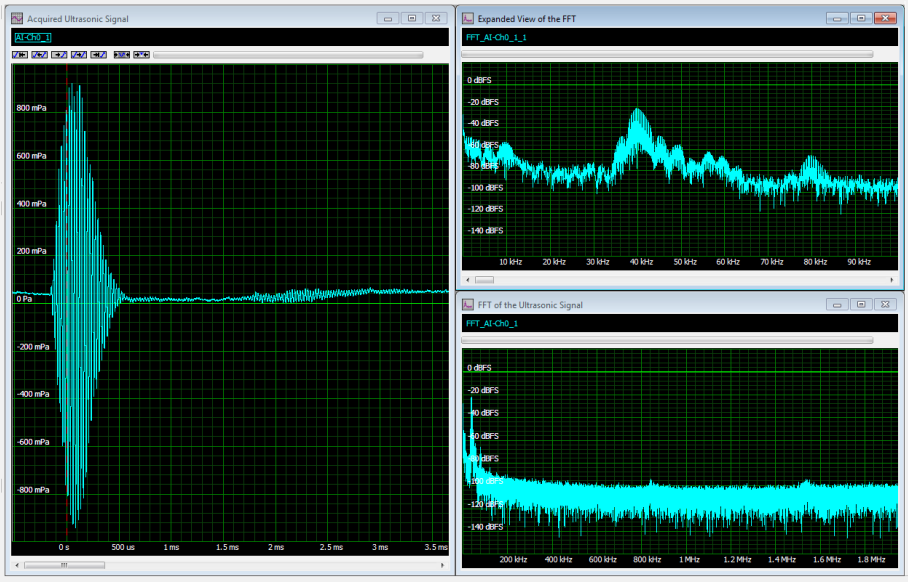

Bild 8. 40-kHz-Ultraschallimpuls (links) und die zugehörigen FFTs (volles Spektrum unten rechts, Vergrößerung oben rechts) mit Darstellung der wichtigsten Spektralempfindlichkeiten bei 40 kHz sowie der unerwünschten nieder- und höherfrequenten Anteile.

Die FFT ermöglicht ein besseres Verständnis der Elemente, aus denen sich dieses Signal zusammensetzt. Es handelt sich um ein transientes Signal, dessen Dauer kürzer als die Aufzeichnungslänge ist. In diesem Fall wurde die Rechteck-Gewichtungsfunktion verwendet. Das

© Spectrum GmbH, Germany

primäre Signal ist die 40-kHz-Signalfolge, die deutlich erkennbar der Frequenzanteil mit der größten Amplitude ist. Es gibt ein 80-kHz-Signal, das die zweite Oberschwingung des 40-kHz-Anteils ist. Ihre Amplitude liegt etwa 45 dB unterhalb des 40-kHz-Anteils des Signals. Es gibt zudem viele niederfrequente Anteile zwischen 0 Hz und 10 kHz. Die größten Anteile – in der Nähe von DC – sind Grundrauschen, das im Raum, in dem das Gerät verwendet wurde, vorkommt.

Das Ziel besteht hier in der Messung der zeitlichen Verzögerung zwischen der gesendeten Signalfolge und der 40-kHz-Reflexion. Um diese Messung zu verbessern, können wir die Frequenzanteile des Signals entfernen, die außerhalb der 40-kHz-Anteile liegen. Diese Spektralansicht wird uns bei der Einrichtung eines Filters zur Entfernung unerwünschter Frequenzanteile unterstützen.

Filtern

Die professionelle Software SBench 6 enthält digitale Filter mit endlicher Impulsantwort (finite impulse response, FIR) in Tiefpass-, Bandpass- und Hochpasskonfigurationen. Der Filter kann direkt in SBench 6 durch Eingabe des gewünschten Filtertyps, der Grenzfrequenz bzw. Grenzfrequenzen und der Filterreihenfolge erstellt werden. SBench 6 informiert den Benutzer, wenn ein Filter nicht realisierbar ist und schlägt Lösungen zur Umgehung des jeweiligen Problems vor. Alternativ kann man von anderen Quellen abgeleitete Filterkoeffizienten eingeben. Diese Filter können auf das aufgezeichnete Signal angewendet werden, und man kann die Ergebnisse mit den originalen oder gemittelten Aufzeichnungen vergleichen. In Bild 9 wurde ein FIR-Bandpassfilter mit Grenzfrequenzen von 30 und 50 kHz auf das aufgezeichnete Signal angewendet.

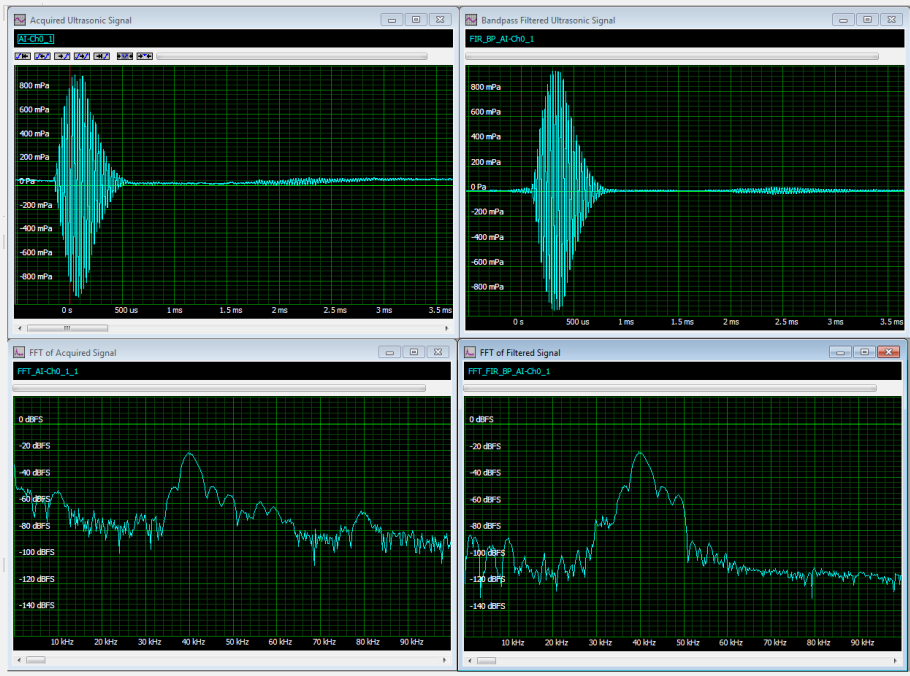

Bild 9. Dargestellt sind die Effekte der Anwendung eines FIR-Bandpassfilters mit Grenzfrequenzen von 30 bis 50 kHz auf das 40-kHz-Ultraschallsignal. Die rohe Wellenform und die zugehörige FFT sind links dargestellt. Das gefilterte Signal und die zugehörige FFT sind rechts zu sehen. Zu beachten ist der flache Verlauf der gefilterten Grundlinie, die das Ergebnis der Unterdrückung der Aufzeichnung niederfrequenter Anteile ist.

Im oberen linken Diagramm ist die rohe Wellenform zu sehen. Darunter ist die FFT des Originalsignals zu sehen, welches wir bereits gesehen haben. Das obere rechte Diagramm enthält die durch den Bandpassfilter gefilterte Wellenform. Die FFT des gefilterten Signals ist im unteren rechten Diagramm zu sehen. Zu beachten ist, dass der Bandpassfilter die Aufzeichnung der Niederfrequenzen und der zweiten Oberschwingung bei 80 kHz unterdrückt hat. In der Ansicht des Zeitbereichs des gefilterten Signals ist nun eine flach verlaufende Grundlinie zu sehen. Die Reflexionen sind deutlicher erkennbar, was letztlich das Ziel der Verarbeitung ist. Auch hier bietet die FFT aufschlussreiche Einblicke in den Filterprozess.

© Spectrum GmbH, Germany

Histogramme

Bislang wurden Daten sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich betrachtet. Mit jeder dieser Ansichten kann man die Daten, die aufgezeichnet werden, besser verstehen. Man kann die Daten auch auf der statistischen Ebene betrachten, die sich um die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten bestimmter Amplitudenwerte dreht. Dies wird mit dem Histogramm erzielt, bei dem die Häufigkeit des Auftretens in Relation zum Amplitudenwert dargestellt wird. Das Histogramm ist eine auf einer endlichen Aufzeichnungslänge basierende Einschätzung der wahrscheinlichen Verteilung eines Signals. Mit SBench 6 können Histogramme aufgezeichneter Wellenformen erstellt werden. Einige Beispiele sind in Bild 10 dargestellt, einschließlich Sinus-, Dreieck- und Rauschwellenformen mit den zugehörigen Histogrammverteilungen.

In der oberen Reihe von Wellenformen sind eine Sinus-, eine Dreieck- und eine Rauschwellenform zu sehen. Darunter sind die zugehörigen Histogramme dargestellt.

Die horizontale Achse des Histogramms ist die Amplitude des Signals. Auf der vertikalen Achse ist die Anzahl der Werte in einem kleinen Wertebereich aufgetragen (Binning).

Jede Histogrammverteilung unterscheidet sich von den anderen, wobei sich die Unterschiede auf die verschiedenen Signalcharakteristiken gründen. Die Verteilung der Sinuskurve weist hohe Spitzen in beiden Extremen sowie einen sattelförmigen mittleren Bereich auf. Der Grund für diese Form liegt darin, dass die Änderungsrate der Sinuswelle mit jedem Zyklus variiert. Sie ist beim Nulldurchgang am größten und bei den Spitzen am geringsten. Wird die Sinuskurve mit einer gleichmäßigen Abtastrate abgetastet, gibt es mehr Abtastungen an der positiven (Spitze ganz rechts in den Histogrammen) und negativen Spitze (Spitze ganz links) und die wenigsten Abtastungen beim Nulldurchgang (horizontal in der Mitte des Histogramms).

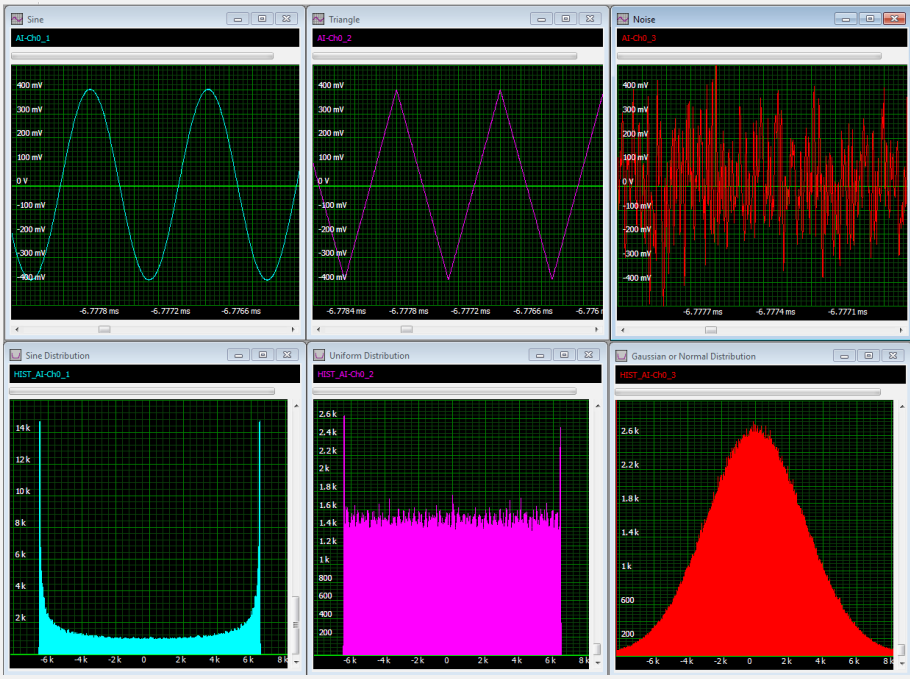

Bild 10. Einige Beispiele häufiger Wellenformen einschließlich Sinus-, Dreieck- und Rauschwellenformen mit den zugehörigen Histogrammen

Die Dreieckwelle weist eine konstante Flanke auf – entweder positiv oder negativ. Das resultierende Histogramm weist eine gleichmäßige Verteilung mit Ausnahme der Extrembereiche auf. Die Spitzen sind vorhanden, weil der Signalgeber über eine begrenzte Bandbreite verfügt, die zu einer Abrundung der Spitzen führt, und weil mehr Abtastungen an diesen Punkten aufgezeichnet werden.

© Spectrum GmbH, Germany

Das Histogramm der Rauschsignale resultiert in einer Normalverteilung (Gauß´sches Rauschen). Sicher muss an dieser Stelle nicht eingehend auf diese Verteilung eingegangen werden, da die meisten Leser über ausreichende Statistikkenntnisse verfügen sollten. Die einzigartige Charakteristik der Gauß-Verteilung besteht darin, dass sie nicht begrenzt ist. Für die anderen Verteilungen gelten Amplitudengrenzwerte, während der horizontale Bereich fest vorgegeben ist. Die Gauß-Verteilung verfügt über „Enden“, die sich theoretisch unendlich fortsetzen (in praktischen Messungen werden die Enden durch Clipping [Abschneiden] im Analog/Digital-Wandler begrenzt).

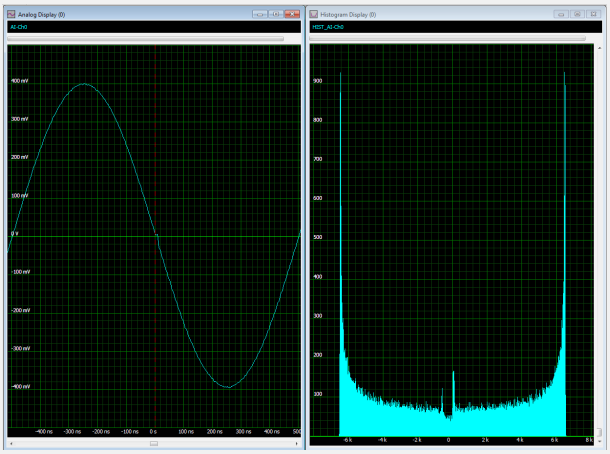

Bild 11. Sinuskurve mit einem Störimpuls im Nulldurchgang und das zugehörige Histogramm. Zu beachten sind die Spitzen nahe der Mitte des Histogramms.

Histogramme bieten also eine andere Möglichkeit der Betrachtung aufgezeichneter Signale. Sie eignen sich gut für das Aufzeigen von Asymmetrien (Verzerrung) und wenig wahrscheinlichen „Störimpulsen“ in Wellenformen. In Bild 11 ist ein Histogramm einer Sinuskurve mit einem Störimpuls im Nulldurchgang zu sehen.

Im Histogramm sind deutliche Spitzen in der Nähe des Nulldurchgangs zu erkennen, die im Sinus-Histogramm in Bild 10 nicht vorhanden sind.

Zusammenfassung

Tools für die Signalverarbeitung wie analoge Berechnungen, Mittelwertbildung, FFT, Filterfunktionen und Histogramme helfen bei der Interpretation aufgezeichneter Daten und ermöglichen die Ableitung sekundärer Signale, wodurch neue Rückschlüsse aus vorhandenen Daten gezogen werden können.

Authoren:

Arthur Pini	Unabhängiger technischer Berater
Oliver Rovini	Technischer Leiter, Spectrum GmbH
Greg Tate	Asian Business Manager, Spectrum GmbH

© Spectrum GmbH, Germany