

Messung elektromagnetischer Felder mit dem Vektorfeld-Analysator

Was ist ein Vektorfeld-Analysator und wie wendet man ihn optimal an? Die Antworten liefert dieser Beitrag.



Bild 1: Eine bekannte Darstellung zur Linearität analoger Systeme

Die meisten in der Mikrowellen-/Drahtlosbranche Tätigen sind mit den üblichen HF-Messgeräten vertraut:

Palette des Bekannten

Ein Mikrowellen-Leistungsmesser (Power Meter, PM) zeigt die gesamte Mikrowellen-Signalleistung über den Frequenzbereich seines Sensors an. Das Leistungsmessgerät gibt viel Raum für unvorhergesehene Signale außerhalb der vorgesehenen Messfrequenz, die die Messungen beeinflussen können.

Ein Spektrumanalysator (SA) ist selektiver und zeigt die Signalamplitude im Verhältnis zur Frequenz über einen bestimmten Frequenzbereich an. Der abgestimmte Empfänger des Spektrumanalysators kann mehrere Signalkomponenten trennen und unabhängig voneinander messen.

Ein skalarer Netzwerkanalysator (SNA) bietet zusätzliche Möglichkeiten. Dieses Gerät liefert ein Signal, das über einen gewählten Frequenzbereich wobbeln kann, und zeigt gleichzeitig zwei oder mehr empfangene Signalamplituden über der Frequenz an, oft praktisch in Form eines Verhältnisses. Eine synchronisierte Kombination von Signalstimulus und Messantwort ermöglicht die Messung von Übertragungs- und Reflexionsparametern (SWR und Übertragungsverlust) von Mikrowellengeräten.

Ein Vektor-Netzwerkanalysator (VNA) stellt eine weitere Verfeinerung dar. Wie der SNA umfasst er eine Stimulusquelle und einen synchronisierten Mehrkanalempfänger. Die Empfängerkanäle im VNA sind jedoch kohärent: Die Amplituden und die relative Phase zwischen zwei empfangenen

Signalen können genau gemessen werden. Der VNA kann sowohl skalare Übertragungs- und Reflexionsparameter als auch vollständige S-Parameter (komplexe Übertragungs- und Reflexionskoeffizienten) anzeigen.

Neue Möglichkeiten

Mit der Weiterentwicklung der Drahtlostechnologie hat die Industrie weitere Möglichkeiten integriert, um nützliche Messungen durchzuführen. Der Leistungsmesser kann ausgelöst werden, um nach Belieben zu messen; die Zeit ist ein kontrollierter Parameter. Der Spektrumanalysator integriert sowohl Zeit- als auch Frequenzsteuerung. Der SNA bietet Zeit- und Frequenzkontrolle sowohl für die Quelle als auch für den Empfänger, verfügt aber auch über die zusätzliche Dimension mehrerer Messkanäle. Der VNA schließlich umfasst alle diese Funktionen sowie die Möglichkeit, kohärente Messungen (Amplitude/Phase) durchzuführen.

Es gibt eine Gemeinsamkeit dieser Messgeräte: Sie alle konzentrieren sich auf die Messung von Mikrowellensignalen an Anschlüssen, also festen Verbindungspunkten am Prüfobjekt.

Der Vector Field Analyzer

Im Einklang mit der Entwicklung der drahtlosen Technologie hat AMETEK NSI-MI kürzlich einen neuen Gerätetyp eingeführt, den Vector Field Analyzer (VFA). Wie die anderen Geräte kann der VFA Signale an festen Anschlüssen messen, seine einzigartige Stärke ist jedoch die Fähigkeit, genaue elektromagnetische (EM) Feldmessungen durchzuführen. Der VFA verbindet nahtlos mehrkanalige elektrische Vektormessungen (Amplitude/Phase) mit einer agilen Breitband-Frequenzsteuerung, einer präzisen Zeitsteuerung im Bereich von 10 ns und einer bequemen Integration komplexer Gerätesteuerungsschemata in den Messablauf. Noch wichtiger ist, dass das VFA elektrische Messungen mit räumlichen (Positions-)Messungen präzise koordiniert, um ein vollständiges Verständnis dreidimensionaler EM-Felder zu ermöglichen.

Background der Entwicklung

Drahtlose Systeme und Geräte sind bei der Informationsübertragung auf Antennen angewiesen, und die Antennenleistung ist für die Gesamtleistung des Systems wichtig. Die Messung der Antennenleistung fügt den Prüfanforderungen eine neue Dimension hinzu: Wir müssen jetzt ein elektrisches Feld „in der Luft“ an bekannten räumlichen Positionen relativ zum zu prüfenden Gerät messen. Dies ist eine ernsthafte Komplikation, denn wir müssen nun die relativen Positionen eines Feldes genau kennen und die relativen Positionen einer Antenne oder Sonde zur Feldmessung darin in Bezug auf das Gerät selbst. Wir leben also auch messtechnisch

Quelle:
„Measure Electromagnetic Fields with the Vector Field Analyzer“
Bruce Williams
NSI-MI Technologies
<https://www.nsi-mi.com/>

übersetzt von FS

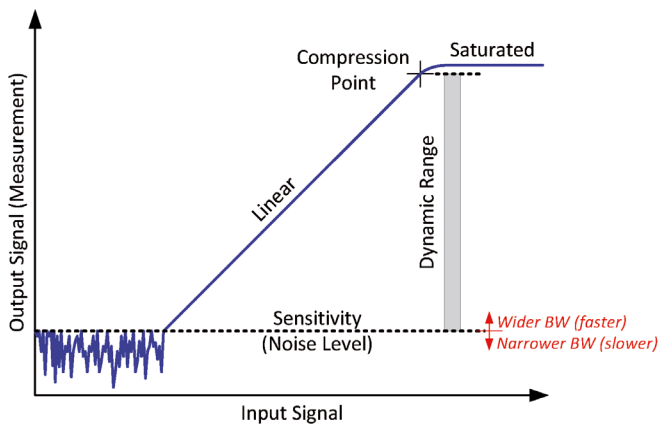


Bild 2: Testaufbau für die Prüfung einer Beispielantenne (AUT) mit VNA-System

in einer dreidimensionalen Welt, sodass Antennenfeldmessungen normalerweise an vielen Stellen eines Volumens benötigt werden. Außerdem leben wir in einer breitbandigen, mehrkanaligen Welt, in der an modernen drahtlosen Geräten dutzende, hunderte oder sogar tausende von Zuständen zu prüfen sind: Frequenzen, Polarisationen und Strahlsteuerungseinstellungen. Und schließlich leben wir in einer schnelllebigen Welt, in der die Anforderungen der Wirtschaft uns zwingen, all diese Tests genauer und in kürzerer Zeit durchzuführen als je zuvor.

All diese Faktoren tragen zum Bedarf an Geräten bei, die optimal für die Messung von Feldern in genau definierten Räumen im Gegensatz zu Signalen an festen Anschlusspunkten sind.

Elektromagnetische Feldmessung umfasst sowohl elektrische als auch mechanische Überlegungen, von denen wir hier einige ansprechen werden. Während wir uns auf den VFA konzentrieren, gelten diese Aspekte für EM-Feldmessungen, die mit jedem Messgerät durchgeführt werden können.

Elektrische Überlegungen

Die idealisierte Darstellung in Bild 1 veranschaulicht das Konzept der Linearität. Dies ist besonders wichtig, wenn wir Messungen durchführen, da wir oft einen unbekanntem Mess-

wert mit dem Wert eines Standards vergleichen, um genaue Ergebnisse zu erhalten. Dieser Vergleich funktioniert nur dann gut, wenn das Messsystem linear ist. Wir werden uns den Bereich vom niedrigsten bis zum höchsten Signalpegel notieren und dabei einige nützliche Beobachtungen machen.

Empfindlichkeit (Grundrauschen)

Um elektromagnetische Felder zu messen, wird eine Antenne (oder Feldsonde) mit einem Messempfänger über ein flexibles Kabel verbunden. So können wir die Sonde bewegen und das Feld an verschiedenen Orten messen. Aber es gibt eine praktische Grenze dafür, wie klein ein Signal (oder wie schwach ein Feld ist) dabei sein darf. (Hinweis des Übersetzers: Eine theoretische Untergrenze gibt es nicht, denn wenn man das Grundrauschen kennt, kann man dieses herausrechnen.) Die praktische Grenze wird zum Teil bestimmt durch die Eigenschaften der Sondenantenne, aber noch direkter durch den Empfänger. Jeder Empfänger hat einen Mindestpegel für das erkennbare Signal oder eine Rauschuntergrenze, unterhalb derer alle Signale maskiert werden. (Hinweis des Übersetzers: Mit Mindestpegel ist hier Leistungsgleichheit mit dem Eigenrauschen gemeint. Das ist die Wahrnehmungsgrenze

des menschlichen Ohres, nicht aber von Messtechnik. Bei kleineren Pegeln erfolgt für diese keine „Maskierung“. Auch Signale unter dem Eigenrauschen sind messbar, da sie einen entsprechend über dem Eigenrauschen liegenden Messwert verursachen. Auch bei größeren Signalen ist die Anzeige daher zu hoch, was ab einem SNR von 30, 40 oder 50 dB vernachlässigbar ist.)

Generell gilt: Ein für Feldmessungen konzipierter Empfänger sollte ein niedriges Eigenrauschen haben, da die zu messenden Signale oft recht schwach sind. In Situationen, in denen das gemessene Signal zu stark ist, ist es einfach, ein Mikrowellen-Dämpfungsglied zwischen Sondenantenne und Empfänger zu legen. Andererseits erfordert das Hinzufügen eines Verstärkers zur Erhöhung der Empfindlichkeit mehr Sorgfalt. Es gibt noch eine andere Möglichkeit, die Empfindlichkeit zu verbessern: Nehmen Sie sich mehr Zeit für die Messungen. Fast jedes Instrument, vom Leistungsmesser bis zum VFA, hat einen Regler für die Bandbreite oder Integrationszeit. Die beiden Werte stehen in einem reziproken Verhältnis zueinander: Die Wahl einer schmaleren Bandbreite erfordert mehr Zeit für jede Messung und führt zu einem niedrigeren Rauschpegel, was den dynamischen Bereich des Instruments vergrößert. Auf der anderen Seite erfordert eine große Bandbreite weniger Messzeit, was oberflächlich als großer „Gewinn“ bei vielen Tests angesehen wird. Dies erhöht aber auch das Grundrauschen und verringert den dynamischen Bereich.

Bei der Auswahl eines Empfängers für Feldmessungen ist es hilfreich, die Empfindlichkeiten bei einer bestimmten Bandbreite oder Messgeschwindigkeit zu vergleichen. Eine Bandbreite von 10 kHz ist in der Regel angemessen für diese Vergleiche.

Linearer Bereich

Jeder Messempfänger muss für genaue Messungen in seinem linearen Bereich betrieben werden. Innerhalb dieses Bereichs vom Rauschboden bis zum Kompressionspunkt können Signale hinreichend genau gemessen und verglichen werden. Bei einem Messempfänger wird sehr darauf geachtet, dass der Frequenzgang über den gesamten Bereich zwischen dem Grundrauschen und dem Kompressionspunkt linear ist, denn Unzulänglichkeiten der Komponenten können der Gesamtkurve ihre eigene Form verleihen.

Es ist allgemein bekannt, dass die Genauigkeit und Wiederholbarkeit von elektronischen Messungen mit zunehmendem Signalpegel über dem Grundrauschen innerhalb des linearen Bereichs ansteigt.

Die Auswirkung der Rauschuntergrenze auf die Unsicherheit einer Messung wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$U_{dB} \approx -20 \log_{10}[1 - 10^{(-SNR_{dB} / 20)}]$$

SNR_{dB} ist das Signal/Rausch-Verhältnis in Dezibel.

Ein Signal, das 20 dB über dem Grundrauschen liegt, kann demnach mit einer Unsicherheit von etwa 1 dB gemessen werden. Eine Erhöhung des SNR auf 40 dB reduziert diese Unsicherheit auf weniger als 0,1 dB. Es ist klar, dass ein niedriger Rauschpegel bei jeder Bandbreite besser für die Messgenauigkeit ist.

Kompressionspunkt

Der 1-dB-Kompressionspunkt wird oft verwendet, um die Leistung eines Verstärkers am oberen Ende seines Betriebsleistungsbereichs zu beschreiben. Dieser Punkt ist definiert als der Ausgangsleistungspegel, bei dem das Signal (leicht begrenzt) so erscheint, als wenn die Verstärkung um 1 dB abgenommen hätte. Ein ähnliches Konzept wird verwendet, um das Verhalten eines Messempfängers am oberen Ende seines Dynamikbereichs zu beschreiben. Da es

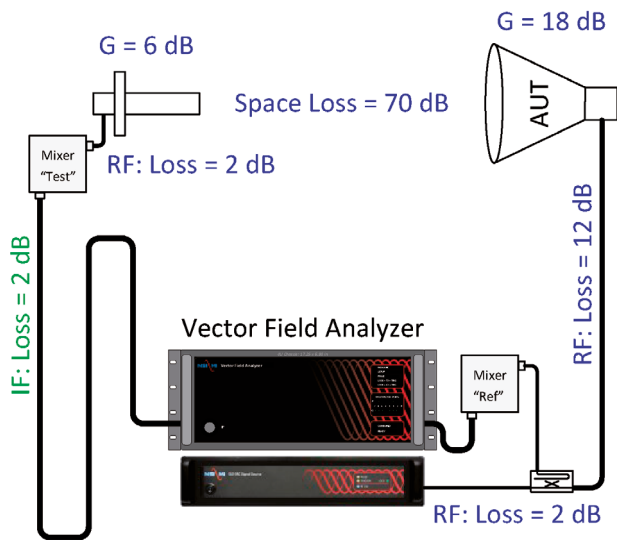


Bild 3: Testaufbau für die Prüfung einer Beispielantenne (AUT) mit VFA-System

uns um sehr genaue Messungen geht, verwenden wir hier einen strengeren 0,1-dB-Kompressionspunkt. Er ist definiert als der Punkt, an dem die angezeigte Signalamplitude (oder Feldstärke) um 0,1 dB von der „geraden Linie“ des linearen Bereichs des Systems abweicht. Ein höherer Kompressionspunkt bedeutet, dass wir höhere Signalpegel genau messen können. Kompressionspunkt und Empfindlichkeit werden beide als Signalpegel am Eingang des Empfängers ausgedrückt.

Im Allgemeinen sind die Empfindlichkeit und der Kompressionspunkt für einen modernen Empfänger komplexe Funktionen der Komponenten und der Konstruktion des Empfängers. Bei einigen Empfängern sind feinere Einstellungen wie ZF-Verstärkung, Vorverstärkung oder Dämpfung möglich, um den Empfänger besser an eine bestimmte Testsituation anpassen zu können. Durch Anpassung des verfügbaren Dynamikbereichs an die gemessenen Signalpegel können Empfänger wie der Vector Field Analyzer entweder die schnellsten Messungen für eine bestimmte Genauigkeit oder die genauesten Messungen für eine gegebene Geschwindigkeit liefern.

Sättigung

Der Bereich oberhalb des Kompressionspunktes ist nicht für Messungen geeignet, da jeder Empfänger bei Überlastung unzuverlässige Messwerte liefert. Durch ein 10-dB-Dämpfungsglied wird der Kompressionspunkt um 10 dB angehoben, aber auch das Grundrauschen. Dies wiederum kann zu einer Bandbreitenreduzierung führen, um das ursprüngliche Grundrauschen wiederherzustellen. Die erfolgreiche Durchführung schneller, genauer elektromagnetischer Messungen hängt von der sorgfältigen Einstellung der Test- und Empfängerparameter ab. Nur so ist es möglich, die Messung zu optimieren.

Dynamikbereich

Der dynamische Bereich ist einfach die volle Ausdehnung des linearen Bereichs für ein Messsystem. Er kann durch die gewählte Bandbreite (mit Auswirkungen auf die Empfindlichkeit) erweitert oder verkleinert werden, lässt sich aber auch nach oben verschieben durch eine Frontend-Dämpfung (das Dämpfungsglied beeinflusst die Empfindlichkeit und den Kompressionspunkt). Für praktischen elektromagnetischen Feldmessungen gibt es eine weitere Methode, die Empfindlichkeit und Geschwindigkeit

verbessern kann. Betrachten Sie die Aufbauten in Bild 2 und 3, also zwei Testaufbauten für die Prüfung einer Beispielantenne (AUT). Dabei haben die VNA- und VFA-Systeme die gleiche Ausgangsleistung und werden für denselben Test verwendet, wobei die Kabel gleiche Längen aufweisen und flexibel sind, um die Standorte und Bewegungen der Antennen zu berücksichtigen. Die angegebenen Parameter für Antennen, Kabel und Geräte sind allesamt typische Werte. Lange Kabel verbinden normalerweise die Antennen mit dem Empfänger, um die mechanischen Systeme zur Bewegung der Antennen nicht einzuschränken. Da sich ihre elektrischen Eigenschaften bei abrupter Biegung ändern, werden die Kabel oft auf Schienen geführt, um eine gleichmäßige, wiederholbare Bewegung auf Kosten einer größeren Länge zu ermöglichen.

Die Beispiele zeigen, wie das SNR und die Unsicherheit aufgrund von Rauschen für eine Messung geschätzt werden können bei 10 kHz ZF-Bandbreite (0,1 ms Integrationszeit). Der große Unterschied bei SNR und Unsicherheit resultiert aus den abgesetzten Mischern des VFA, die es ermöglichen, fast alle Verluste des Sondenkabels zu eliminieren. Der kompakte Fernmischer wird an der Sonde montiert und wandelt die Testfrequenz auf eine viel niedrigere Zwischenfrequenz um, wodurch die Kabelverluste stark reduziert werden. Der VFA wurde für Fernmischer ausgelegt und bietet diesen Vorteil in mehreren breiten Frequenzbereichen. Er kann auch mit internen Mischern konfiguriert werden für einfachere, kleinere Messaufgaben, bei denen die Kabellänge nicht so kritisch ist.

Anstatt diese beiden Systeme auf der Grundlage einer festen ZF-Bandbreite zu vergleichen, können wir das auch, indem wir verlangen, dass jedes ein bestimmtes Unsicherheitsniveau erfüllt. In diesem Falle sollen beide Systeme 0,05 dB Unsicherheit erfüllen oder $\text{SNR} = 45 \text{ dB}$ aus der

obigen Unsicherheitsgleichung. Dabei zeigt das VNA-System eine Unsicherheit von etwa 0,7 dB ($\text{SNR} = 22 \text{ dB}$). Zur Verbesserung der Empfindlichkeit (und des SNRs) um 23 dB müssen wir die Integrationszeit um einen Faktor von etwa 200 erhöhen. Wir nehmen die ursprünglichen 0,1 ms (von den 10 kHz Bandbreite) und multiplizieren sie mit 200, um 20 ms zu erhalten ($\text{BW} = 50 \text{ Hz}$). Demgegenüber zeigt das VFA-System zunächst eine Unsicherheit von 0,008 dB ($\text{SNR} = 61 \text{ dB}$). In diesem Fall können wir die Empfindlichkeit um 16 dB verringern, indem wir die Integrationszeit um den Faktor 40 verringern. Die benötigte Integrationszeit für das VFA-System beträgt somit nur etwa $2,5 \mu\text{s}$ ($\text{BW} = 400 \text{ kHz}$).

Das demonstriert: Messungen mit dem Remote-Mixer-VFA-System können etwa 8000-mal schneller durchgeführt werden als mit dem VNA-System mit internem Mischer, wobei die Unsicherheit ebenso gering ist.

Die Gesamtprüfzeit ist eine komplexe Funktion der mechanischen Möglichkeiten, der Komplexität des Prüfplans, der Rüstzeiten und der Messzeiten, sodass Sie wahrscheinlich nie einen Zeitreduzierungsfaktor von 8000 hinbekommen werden. In der Praxis sind jedoch Reduktionsfaktoren von 10 bis 100 üblich. Es ist leicht zu erkennen, welchen Wert es hat, einen achtstündigen Test auf zehn Minuten zu reduzieren!

Mechanische Überlegungen

Um ein elektromagnetisches Feld an mehr als einem Ort zu messen, wird üblicherweise ein mechanischer Positionierer verwendet. Er bewegt die Sondenantenne in Bezug auf die zu prüfende Antenne. In automatisierten Prüfsystemen wird die Antenne durch Schrittmotoren oder Servomotoren bewegt zwecks genauer Positionierung. Um Messungen an vielen Punkten vorzunehmen - typisch für EM-Feldmessungen - ist es zu zeitaufwändig, eine Antenne zur ersten Position zu bewegen, zu

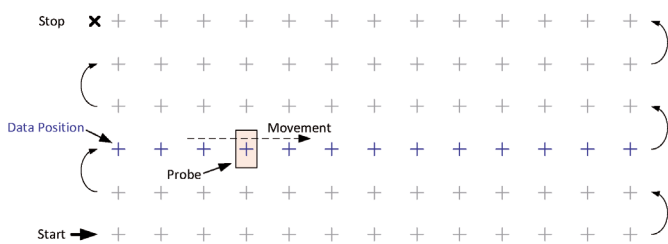


Bild 4: Abdeckung des Feldes mit einem rechteckigen Bereich des Raums

warten, bis sie anhält, ein paar Messungen durchzuführen und dann zur nächsten Position weiterzufahren. Zur Verbesserung der Testgeschwindigkeit sind Positionierer so konzipiert, dass sie einer sinnvollen Trajektorie folgen, sodass aufeinanderfolgende Datenpunkte schnell und „fliegend“ während der Bewegung der Antenne erfasst werden können. Diese sinnvollen Trajektorien umfassen gerade Linien, Drehungen um verschiedene Achsen und sanft gekrümmte Pfade, abhängig von der Art des Feldes oder der zu messenden Antenne. Das Thema der Antennenpositionierung ist sehr umfangreich und durch moderne Positionierungsgeräte gekennzeichnet, die so konfiguriert werden können, dass sie einer bestimmten Trajektorie folgen und Triggersignale an definierten Punkten von Interesse (PoI) liefern. Aus der Perspektive der Messung wollen wir diese Triggersignale nutzen, um die erforderlichen Messungen so effizient wie möglich durchzuführen.

Beispiel für die Positionierung

Betrachten wir einen planaren Scan, bei dem die Feldsonde eine Ebene im Raum abbildet, indem sie sich entlang einer Linie bewegt, in die orthogonale Richtung schreitet und in die entgegengesetzte Richtung zurückkehrt, um die nächste Linie von Punkten zu erfassen. Von der Vorderseite der Sonde aus betrachtet, decken wir einen rechteckigen Bereich des Raums mit einem regelmäßigen Messraster ab, um das Feld punktweise zu messen (Bild 4). Der Motion Controller ist so konfi-

guriert, dass er einen Triggerimpuls erzeugt, BEVOR jeder Punkt erreicht wird, sodass ein vollständiger Satz von Messungen auf die gewünschte Position zentriert wird. Da die Bewegungsrichtung umgekehrt ist, unterscheiden sich die Triggerpositionen zwischen Vorwärts- und Rückwärtslinien (Bild 5).

Jetzt zoomen wir heran und zeigen nur einige wenige Rasterpunkte. Wir sehen einen einfachen Prüfplan, der drei Messungen an jeder Datenposition bei den Frequenzen f_1 , f_2 und f_3 vorschreibt. Bei näherer Betrachtung können Sie sehen, dass die einzelnen Messungen zeitlich vertauscht sind, aber nicht räumlich, zwischen Vorwärts- und Rückwärtslinien. Durch diese Umordnung wird sichergestellt, dass jede Messung für eine bestimmte Frequenz, einen bestimmten AUT-Zustand oder einen bestimmten Kanal auf einem regelmäßigen (nicht zickzack-förmigen) Raster bleibt; die f_1 -, f_2 - und f_3 -Messungen auf aufeinander folgenden Zeilen sind vertikal ausgerichtet. Diese Neuordnung reduziert die Komplexität und die Restfehler, die bei der Interpolation aller Messungen zurück zu den vorgeschriebenen Datenpositionen (Feldpositionen) ergeben, wie durch die Plus-Markierungen angezeigt. Sie sehen auch, dass zwischen den drei Messungen etwas Platz ist, was der Zeit entspricht, die benötigt wird, um die Testbedingungen für jede Messung einzurichten. Die Einrichtungszeit ist eine Funktion der elektronischen Ausrüstung, während die Setup-Distanz das Produkt aus Einrichtungszeit und Bewegungsgeschwindig-

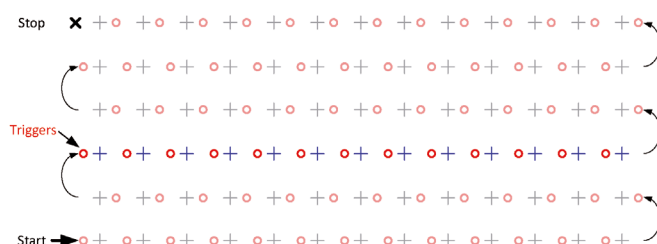


Bild 5: Da die Bewegungsrichtung umgekehrt ist, unterscheiden sich die Triggerpositionen zwischen Vorwärts- und Rückwärtslinien

keit ist. Die horizontale Größe der Messrauten steht sowohl für die Messzeit (s. oben) als auch die Messstrecke (Entfernung). Die Sonde befindet sich in ständiger Bewegung, so dass eine Verringerung der Rüstzeit und der Messzeiten sie sich schneller bewegen lässt, was die Zeit für das Scannen des gewünschten Bereichs verkürzt. Das ultimative „Geschwindigkeitslimit“ hängt von der Dichte der angeforderten Datenpositionen und der Summe aller Einrichtungs- und Messzeiten für den Datensatz ab. Es muss genügend Platz (und Zeit) vorhanden sein, um alle angeforderten Einstellungen und Messungen zwischen den Auslösern unterzubringen.

Synchronisierung

Das Beispiel zeigt eines von vielen möglichen Bewegungsprofilen, mit denen die Elektronik eines Feldmesssystems interagieren muss. Die Anforderungen an Geschwindigkeit und Genauigkeit verlangen, dass selbst die komplexesten Prüfpläne wiederholbar und deterministisch sind. Dies wiederum erfordert eine enge Integration zwischen dem Empfänger, den Quellen, den Schaltern und der AUT-Hardware. Der VFA enthält einen FPGA-basierten Messcontroller, der Positionsauslöser von einem Positionierungssystem akzeptiert und alle Befehle und Ereignisse generiert, die für die Steuerung der Entfernungs- und AUT-Ausrüstung mit einer Präzision von 10 ns erforderlich sind. Diese Timing-Engine ist vollständig in den Empfänger integriert, um eine möglichst genaue und effiziente Datenerfassung zu gewährleisten.

Die Synchronisierung von externen Geräten wie Quellen, Schaltern und AUT-Steuerungen kann mit präzisen elektronischen Triggern erfolgen, die je nach Zielgerät als TTL-Impulse oder parallele Wörter verfügbar sind. Eine vollständige Palette digitaler E/A-Anschlüsse gewährleistet, dass praktisch jedes Gerät oder Instrument mit dem Datenerfassungsprozess des VFA synchronisiert werden kann. Der VFA verfügt auch über NSIMI's Triggerbus-Anschlüsse, die eine schnelle Verbindung mit diesen Positioniersteuerungen, Quellen und anderen Geräten ermöglichen.

Aufzeichnung

Die Integration des Messcontrollers in den Empfänger bietet einen weiteren entscheidenden Vorteil für EM-Feldmessungen. Die meisten Antennen- oder Sondenpositionierungssysteme haben mehrere voneinander abhängige Bewegungsachsen. Für eine präzise Standortbestimmung ist es oft erforderlich, dass die Positionen mehrerer Achsen während der Datenerfassung gemessen und aufgezeichnet (und nicht nur befohlen) werden. Die Analyse-Software wird dann nach der Erfassung zur Korrektur von Positionierungsfehlern eingesetzt. Der Messcontroller des VFA ist derselbe „Motor“, der den Prüfplan, die externen Geräte und den Empfänger steuert. So ist es ein leichtes, Auslöser an das Subsystem des Positionierers zurückzusenden, um die Achsenpositionen genau zum Zeitpunkt der Erfassung aufzuzeichnen und so möglichst genaue Feldmessungen zu gewährleisten. ◀