

Anwendungen und Techniken der Breitbandfrequenzmodulation

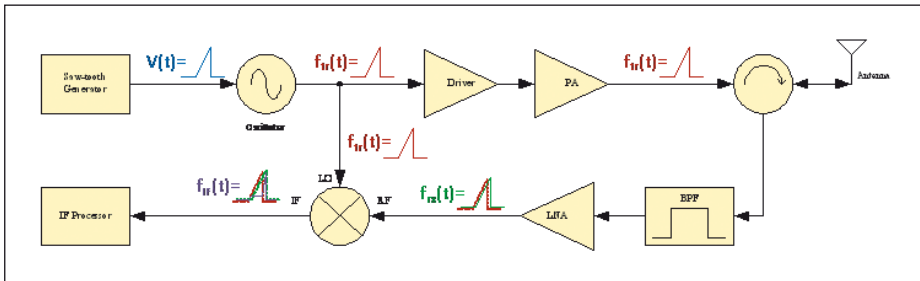


Bild 1: FMCW-Radar-Blockschaltbild

Frequenzmodulation (FM) wird oft in Audiokommunikation und Datenübertragung verwendet. Wenn es um Spektraleffizienz geht, wird Schmalband-FM (NBFM) eingesetzt, wenn aber eine bessere Signalqualität erforderlich ist, wird Breitband-FM (WBFM) zu Lasten eines größeren Spektrums genutzt. Der Begriff WBFM wird für Anwendungen verwendet, bei denen der Modulationsindex gleich oder höher 1 ist. In diesem Artikel jedoch behandeln wir Anwendungen und Techniken für WBFM mit weitaus höheren Modulationsindizes, bis 100 und darüber. In solchen Anwendungen ist Spektraleffizienz weniger wichtig und nur gelegentlich ist eine größere Spektralbreite tatsächlich erwünscht. Ziel dieses Artikels ist es, einige Hauptanwendungen auf kommerziellen und wehrtechnischen Märkten vorzustellen. In diesem Rahmen werden die für WBFM-Generierung üblichen Techniken vorgestellt.

Anwendungsbeispiel – FMCW-Radare

FMCW-Radare erzeugen ein CW-Signal, das normalerweise durch eine Sägezahnwellenform moduliert wird; ein solches Signal wird als Chirp bezeichnet. Dieses Signal wird dann verstärkt und gesendet. Das empfangene Signal wird verstärkt, gefiltert und in Zero-IF durch Mischen mit dem gesendeten Signal umgewandelt. Das grundlegende Blockschaltbild des FMCW-Senders zeigt Bild 1. Das empfangene Signal wird durch die Zeit verzögert, die das Signal benötigt, zum Ziel und zurück zu gelangen. Auch wird die Frequenz des empfangenen Signals durch den Doppler-Effekt wegen der

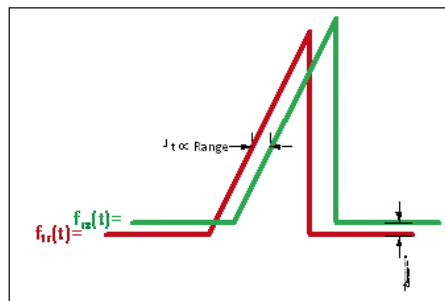


Bild 2: FMCW, gesendete (rot) und empfangene (grün) Signale

Relativgeschwindigkeit des Ziels verschoben. Insgesamt können durch Vergleichen (oder Mischen) der gesendeten und empfangenen Signale sowohl der Bereich als auch die Geschwindigkeit des Ziels erfasst werden. Dieses Prinzip zeigt Bild 2.

Der Vorteil des FMCW-Radars ist das ausgezeichnete Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und, bei ständiger Übertragung, die Einfachheit der Informationserfassung sowie die Fähigkeit, Nahbereichsziele zu ermitteln.

Pulsradare können beispielsweise kein Signal während des Sendens empfangen. Das Ergebnis ist eine „Schattenzeit“, die

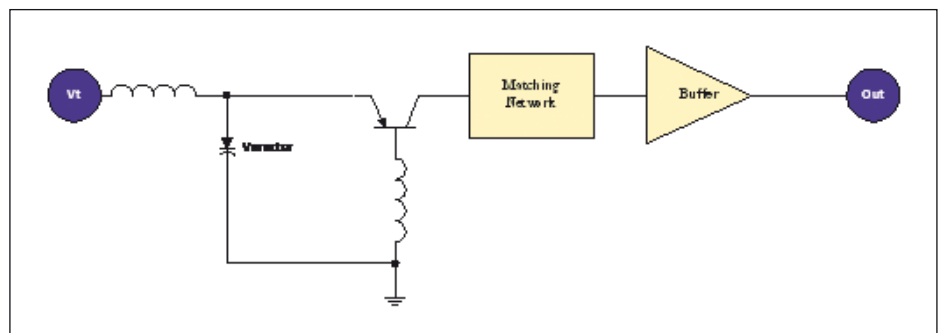


Bild 3: VCO – vereinfachtes Schaltbild

verhindert, dass das Pulsradar Nahbereichsziele erfasst.

Beim FMCW-Radar erübrigt sich dieses Problem und es kann Nahbereichsziele unterstützen. Um eine genaue Zielerfassung zu erhalten, muss die Frequenzänderungsrate sehr hoch sein, sodass es einen erkennbaren Frequenzunterschied zwischen den gesendeten und empfangenen Signalen gibt. Deshalb verwenden FMCW-Radare eine genaue Breitband-FM-Modulationstechnik.

Techniken

Es gibt viele Techniken für die Generierung eines WBFM-Signals: analoge, digitale und Hybrid-Techniken. Dieser Artikel gibt einen Überblick über die allgemein üblichen Lösungen und Hardware.

Freischwinger, spannungsgesteuerter Oszillator

Ein freischwinger VCO ist ein Oszillator, der auf einer instabilen Transistorschaltung basiert. Die Oszillationsfrequenz hängt von der Resonanzfrequenz ab, die durch ihre äquivalente Kapazität und Induktivität festgelegt wird. Durch Anlegen einer variablen Vorspannung an eine Kapazitätsdiode werden die Kapazität und folglich die Oszillationsfrequenz entsprechend geändert. Ein vereinfachtes Schaltbild zeigt Bild 3.

Der VCO ist ein sehr kostengünstiges Verfahren, WBFM-Signale, wie Chirpsignale, zu generieren. Der VCO hat einige wichtige Eigenschaften, die auf alle Frequenzquellen zutreffen. Die Definitionen dieser Eigenschaften werden im Folgenden beschrieben und verwendet:

Frequenzbereich

Dieser Parameter ist definiert als die durch den VCO generierten niedrigsten und höch-

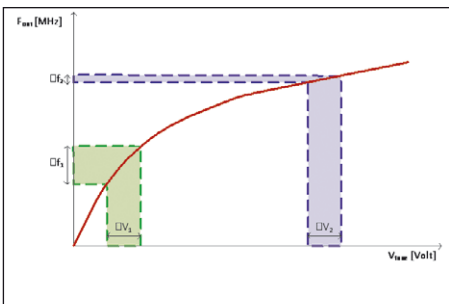


Bild 4: MSR-Effekt auf Frequenzspanne

sten Frequenzen. Ein VCO kann ein ganzes Oktavband abdecken.

Einschwingzeit

Dieser Parameter ist definiert als die Zeit, die der VCO benötigt, um die Endfrequenz innerhalb eines Zeitfensters zu erreichen. Typische Werte sind 50 ns bis ±10 MHz und 1 µs bis ±4 MHz bei einem Sprung von 12 auf 18 GHz.

Abdriften nach Abstimmung

Nachdem ein VCO offenbar seine Endfrequenz erreicht hat, kann er langsam bis zum Erreichen des tatsächlich finalen Wertes abdriften. Dieses Abdriften nach Abstimmung kann zu weiteren wenigen MHz Abweichung nach ein paar Mikrosekunden führen.

Sensitivität und maximales Sensitivitätsverhältnis (MSR)

Der Sensitivitätsparameter ist als „Spannung zu Frequenz“-Übertragungsfunktion des VCO definiert und wird in MHz/Volt gemessen. Ein perfekter VCO hat eine konstante Sensitivität im gesamten Betriebsbereich. Leider gibt es keine idealen VCOs, weshalb die Sensitivität über den VCO-Frequenzbereich hinaus variiert. Maximale Sensitivität geteilt durch minimale Sensitivität ist als MSR definiert. Die Verwendung eines VCO mit geringer MSR (>>1) erzeugt viele Probleme. Einige Beispiele:

- Anlegen einer perfekten Sägezahnwellenform, da die Abstimmungsspannung keinen perfekten Chirp generieren wird. Bereichsmessungen bei Höhenmessern beispielsweise werden folglich ungenau.
- Dieselbe modulierende Wellenform für verschiedene Mittenfrequenzen führt zu unterschiedlichen Frequenzspannen. Dies zeigt Bild 4.
- Verschiedene modulierende Wellenamplituden für eine konstante Offset-Spannung führen zu unterschiedlichen Mittenfrequenzen, wie Bild 5 verdeutlicht.

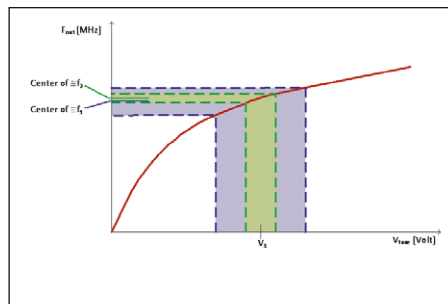


Bild 5: MSR-Effekt auf Mittenfrequenz

Frequenzgesamtgauigkeit

Dieser Parameter ist definiert als Maximalfrequenzfehler, der nach Erstellen einer „Spannung zu Frequenz“-Kalibriertabelle gemessen wird. Der Frequenzfehler wird überwiegend durch Temperatur und Alterung erzielt. Dies ist der größte Nachteil des VCO als Frequenzquelle. Ein System, das einen einfachen VCO als WBFM-Generator verwendet, kann zu einem Signal führen, bei dem es zu Abweichungen in der Mittenfrequenz und auch in seiner Spanne kommt. Zum Beispiel kann ein EW-System das falsche Frequenzband stören und dadurch seine Effektivität und Koexistenzeigenschaften verringern.

Frequenzmodulationsspanne

Dieser Parameter ist definiert als Maximalfrequenzspanne, die der VCO durch ein modulierendes Signal abdecken kann. Bei VCOs gibt es keine tatsächliche Grenze für die Spanne und ein VCO kann WBFM unterstützen, indem er bei seiner niedrigsten Frequenz beginnt und bei seiner höchsten Frequenz endet. Zum Beispiel unterstützt ein VCO mit 4 bis 8 GHz die Modulation mit einer Spanne bis zu 4 GHz. Wie nachstehend dargestellt wird, trifft dies nicht auf andere Geräte zu.

Modulationsfrequenzbandbreite

Dieser Parameter ist definiert als maximale Modulationsfrequenz oder Modulationsrate, die für die Modulationseinstellung gilt, bevor die Spanne um mehr als 3 dB abweicht. Zum Beispiel wird ein VCO durch eine sich sehr langsam ändernde Regelspannung moduliert, um eine 1-GHz-Spanne zu erzeugen. Die Regelspannung wird dann auf eine schnelle Sinuskurve geändert. Die Frequenz dieser Regelspannung erhöht sich, bis die Spanne weniger als 1 GHz beträgt. Die Frequenz, die eine Spanne von 707 MHz verursacht, ist die 3-dB-Modulationsbandbreite. Ein typischer Wert für einen VCO wäre 250 MHz.

Digital eingestellter Oszillator

Da der VCO den Benutzer zur Erstellung einer Referenztabelle auffordert, um zu erfahren, welche Spannung anzulegen ist, um die gewünschte Ausgangsfrequenz zu erhalten, wäre es benutzerfreundlicher, wenn diese Referenztabelle innerhalb des Moduls gespeichert ist. So kann der Benutzer einen digitalen Befehl eingeben. Die vorkalibrierten Informationen werden zur Generierung der richtigen Frequenz verwendet. Da die Übertragungsfunktion eines VCO stark von der Temperatur abhängt, wird mit einem an den VCO angeschlossenes Heizgerät eine konstante VCO-Temperatur erreicht. Um Frequenzbereiche von mehr als einer Oktave zu unterstützen, können mehrere VCOs innerhalb desselben DTO installiert werden. Das grundlegende Blockschaltbild eines Multi-Oktaven-DTOs zeigt Bild 6.

Die größten Vorteile des DTO sind sein Multi-Oktaven-Frequenzbereich und sein relativ niedriger Preis. Der größte Nachteil des DTO ist die Erfordernis eines detaillierten Kalibrierverfahrens. Bei der Modulation des DTO durch das externe Modulationssignal, wird nur einer seiner internen VCOs moduliert, weshalb die Modulations-

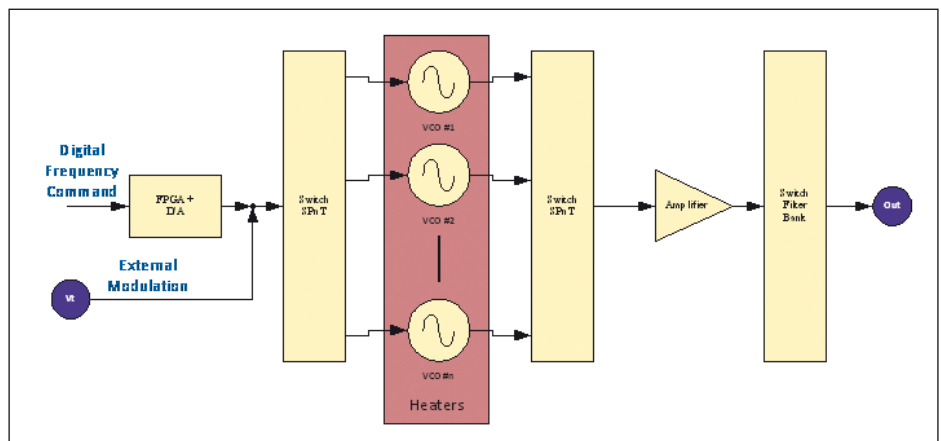


Bild 6: Multi-Oktaven-DTO – konzeptionelles Blockschaltbild

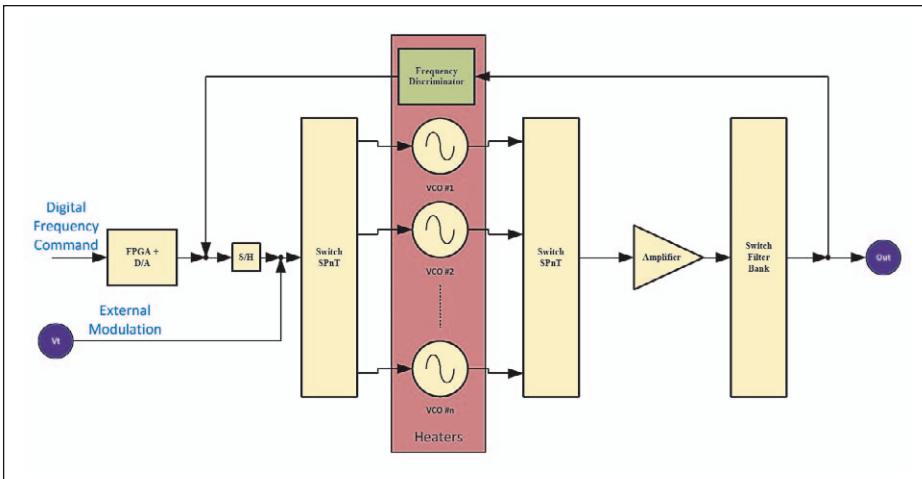


Bild 7: Multi-Oktaven-FLO – konzeptionelles Blockschaltbild

spanne limitiert ist. Dieselben Probleme beim Ändern der Modulationsspanne und Verschieben der Mittenfrequenzen mit unterschiedlichen Modulationsspannungen existieren auch bei einem DTO.

Frequenzverriegelungsoszillator (FLO)

Zur Verbesserung der Frequenzgenauigkeit eines DTO wird eine Korrekturschaltung verwendet. Das Ausgangssignal wird abgetastet und seine Frequenz durch einen genauen Frequenzdiskriminator gemessen. Die Ausgabe des Diskriminators wird als Feedback für die Abstimmspannung des VCOs verwendet. Der VCO gilt als frequenzgesperrt und seine Genauigkeit entspricht der Fähigkeit des Diskriminators zur Frequenzmessung. Soll zu einer neuen Frequenz gesprungen werden, legt die FLO-Steuerschaltung eine Abstimmspannung an den VCO gemäß der internen Referenztabelle an. Dies wird als „DTO-Modus“ bezeichnet. Wenn sich der VCO der Endfrequenz nähert, wird die Diskriminatoranzeige mit einem geschlossenen Kreis mit der

Abstimmspannung verbunden, um eine größere Genauigkeit zu erzielen. Dies wird als „FLO-Modus“ bezeichnet. Wie beim DTO kann das FLO-Ausgangssignal moduliert werden. Bei NBFM kann das Modul noch im „FLO-Modus“ während der Modulation sein, womit die Mittenfrequenzgenauigkeit gewährleistet ist. Bei WBFM muss jedoch die Frequenzverriegelungsschaltung geöffnet werden (wegen der limitierten BW des Diskriminators). D und das Modul arbeitet in einem „DTO-Modus“ mit verminderter Genauigkeit. Normalerweise ist der FLO für denselben Frequenzbetriebsbereich größer und teurer als ein DTO. Das grundlegende Blockschaltbild eines FLO zeigt Bild 7.

Schneller indirekter Synthesizer

Eine kostengünstige Lösung für die Generierung von Breitbandsignalen ist der indirekte Synthesizer. Mit dem indirekten Synthesizer ist der VCO an einen Referenzoszillator phasengespiert. Deshalb ist der indirekte Synthesizer auch als PLL-basierter Signalgenerator bekannt. Die Frequenzgenauig-

keit des Ausgangssignals entspricht der für das Referenzsignal, das zum Sperren des Synthesizers verwendet wird, und ist um einiges besser als alle vorher beschriebenen Lösungen. Das grundlegende Blockschaltbild eines indirekten Synthesizers zeigt Bild 8.

Der indirekte Synthesizer findet auf dem Markt seit vielen Jahren eine breite Verwendung und unterstützt erfolgreich viele nicht-modulierte Frequenzanwendungen. Es gibt mehrere Möglichkeiten, den indirekten Synthesizer mit Modulationsfähigkeit auszurüsten.

NBFM-Techniken

Zwei wichtige Techniken werden üblicherweise verwendet: Die erste Technik besteht darin, die Modulationsspannung direkt an die Abstimmspannung des VCO anzulegen. Diese Methode ist effektiv, solange das Modulationssignal eine relativ höhere Frequenz als die Schalt-BW hat (auch als Wechselstrom-(AC)-Kopplung bekannt). Andernfalls kann die Schaltung diese Modulation ermitteln und entfernen. Bei der zweiten Technik wird das Referenzsignal an der PLL moduliert. Diese Methode ist effektiv, solange das Modulationssignal innerhalb der Schalt-BW liegt, sodass die Schaltung den VCO veranlasst, der Änderungsfrequenz der modulierten Referenz zu folgen. Andere Methoden werden auch verwendet, z. B. Hybridmethoden (Zwei- oder Dreipunktmodulation), die aber hier nicht erwähnt werden sollen.

WBFM-Techniken

Zwei wichtige Techniken werden üblicherweise eingesetzt: Die erste Technik besteht in der Verwendung einer PLL, um auf die Mittenfrequenz zu springen, anschließend die Abstimmspannung am VCO auf einen konstanten Wert (z. B. durch S/H) zu halten

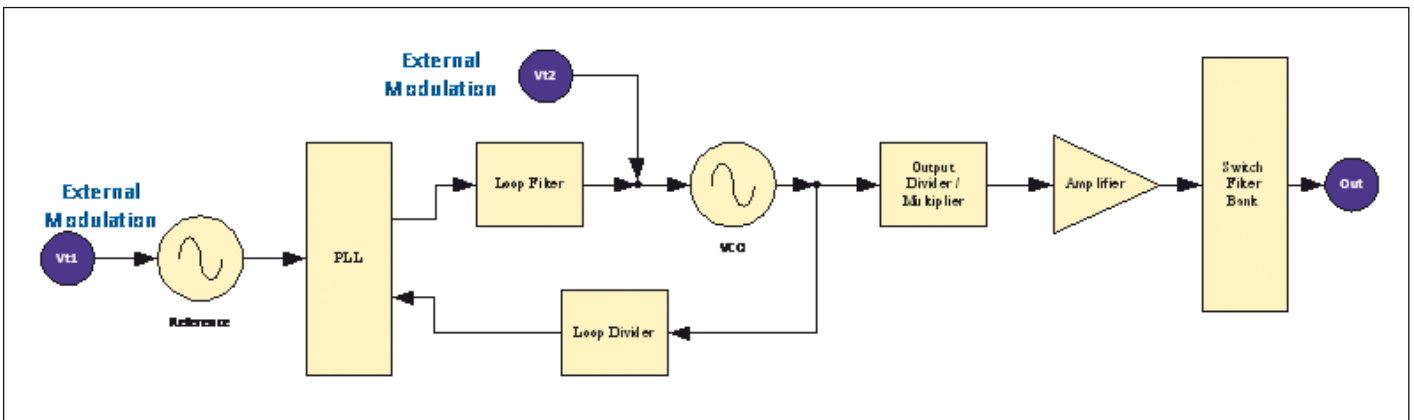


Bild 8: Indirekter Synthesizer – konzeptionelles Blockschaltbild

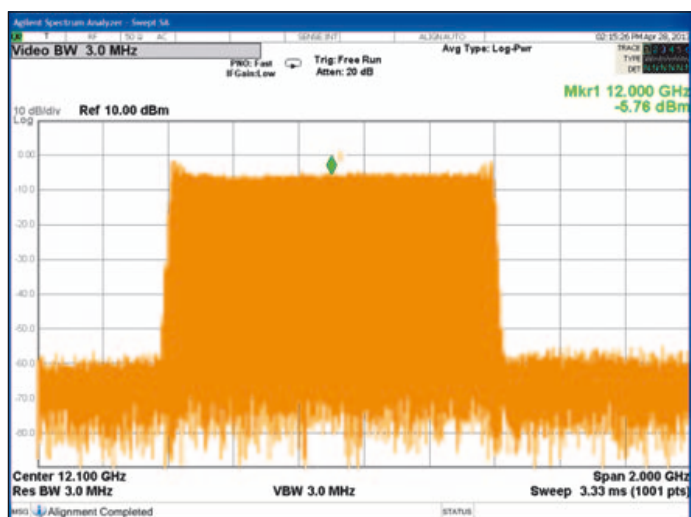


Bild 9: Modell SM6220 Spektrum

und die Modulationsspannung direkt an die Abstimmspannung anzulegen. Diese Technik wird als „DTO-Modus“ bezeichnet, da der Schaltkreis während der Modulation offen ist und der VCO tatsächlich freischwingt. Diese Technik bringt alle Nachteile, die oben für den „DTO-Modus“ in DTOs und FLOs dargelegt wurden, mit sich.

Die zweite Technik ist die Verwendung eines „Sperrmodus“ (PLM). Mit PLM wird das Referenzsignal an der PLL moduliert und der Synthesizer ist immer gesperrt, ähnlich wie bei NBFM. Diese Technik stellt aufgrund der Tatsache, dass die Schaltelemente der PLL extrem hohe Spannungsänderungsraten (sowohl Spannung als auch Frequenz) unterstützen müssen, eine große Herausforderung dar. Die Vorteile des PLM aber sind recht eindeutig: ausgezeichnete Mittenfrequenz und bekannte Modulationsspannen ohne erforderliche Werks- oder Kundenkalibrierung. PLM unterstützt Modulationswellenformen von Gleichstrom (DC) bis zu hohen Werten (DC-Kopplung).

Produktbeispiel

Wie oben beschrieben gibt es viele Vorteile für die Verwendung einer indirekten Synthesizer-Technologie, um WBFM, besonders beim Einsatz in PLM, zu generieren. Das

Modell SM6220, von General Microwave Israel (GMI) ist ein 2- bis 20-GHz-Synthesizer mit einer sehr schnellen Einschwingzeit von weniger als 1 Mikrosekunde. Diese Einschwingzeit ist für jeden Sprung zwischen zwei beliebigen Frequenzen, einschließlich Endfrequenz, gewährleistet. Das SM6220 hat auch WBFM in PLM mit bis zu 1 GHz Spanne. Die 1-GHz-Spanne kann sich überall innerhalb des 2- bis 20-GHz-Bereichs (keine „Subbänder“) befinden, was somit kontinuierliche Abdeckung ermöglicht. Die 3-dB-Modulationsbandbreite ist 10 MHz. Ein Spektrum einer 1-GHz-WBFM-Spanne zeigt Bild 9. Dieses hochmoderne Produkt wird in Tabelle 1 mit anderen Modellen verglichen.

Danksagung und Informationen zum Autor

Alle Abbildungen und Messungen in diesem Artikel werden verwendet mit freundlicher Genehmigung von General Microwave Israel (GMI), Teil der KRATOS-Gruppe.

Globes Elektronik, www.globes.de

Ronen Holtzman ist VP Engineering bei GMI Ltd. Er verfügt über mehr als 25 Jahre Erfahrung und ist Experte für HF, Mikrowellen-Komponenten und -Subsysteme.

Modell	V6120A	D6218	FL6218	SM6220
Technologie	VCO	DTO	FLO	Synthesizer
Frequenzbereich	12 bis 18 GHz	2 bis 18 GHz	2 bis 18 GHz	2 bis 20 GHz
Einschwingzeit	1 µs	1 µs	1 µs	1 µs
Modulationsspanne	6 GHz	500 MHz	1 GHz	1 GHz
Modulation-BW	250 MHz	10 MHz	10 MHz	10 MHz
WBFM-Modus	Freischwingend	DTO-Modus	DTO-Modus	PLM
Eingeschwungene Genauigkeit	±4 MHz	±2 MHz	±1 MHz	±200 KHz

Tabelle 1: Verschiedene Modelle zur Unterstützung von WBFM – Vergleichstabelle