

elektroniknet.de

Elektronik

Fachmedium für industrielle Anwender und Entwickler



Windows, Echtzeit und Virtualisierung:

Konsolidierte Automatisierung

>> Seite 26



Philippe Guillemette, CTO von Sierra Wireless

Sierra Wireless
Innovation Summit
2016, Paris: „Eine
entscheidende Rolle
spielen die 3Cs –
Cost, Consumption,
Coverage.“
>> Seite 14

Empfindlicher Messen mit Quanten-
effekten: TMR-Sensoren

>> Seite 20

Weniger Störsignale dank
Spread-Spectrum-Takt

>> Seite 30



Scheme-IT

KOSTENLOS
Online-Schaltplan- und
Blockdiagramm-Tool
für Elektroniker

DIGIKEY.DE/SCHEMEIT

Von MEMS-Oszillatoren und EMV

Oszillatoren sind als hochgenaue Taktgeber in den meisten Elektronikschaltungen unerlässlich. Sie erzeugen als störende Nebeneffekte allerdings elektromagnetische Interferenzen. Diese lassen sich reduzieren, wenn anstelle von Standardware Spread-Spectrum-Oszillatoren zum Zuge kommen. >> 30



LEDs, LED-Treiber

- 38 Interview mit Lorenz Bauer, Seoul Semiconductor Europe: LED-Gehäuse: Nur das Gelbe vom Ei
- 41 LEDs für professionelle Wearable-Anwendungen: Variantenreiche Farb-LED-Serie
- 41 LED-Treiber-ICs: Anzahl der Bauteile reduzieren
- 42 Wasserdichte und robuste Steckverbindung: LED-Module zum Leuchten bringen

Elektronikfertigung

- 44 Fügekonzepte für Module der Leistungselektronik: IC-Module mit Kühlkörpern verbinden

Produkte

- 36 Quarze, Oszillatoren
- 37 Kondensatoren

- 49 pinboard
- 50 Impressum
- 50 Inserentenverzeichnis
- 51 Ausblick

elektroniknet.de



Mercury

Drahtloses 433 MHz-Modul für Wireless M-Bus

Bei Mercury handelt es sich um ein höchst integriertes, extrem energiesparendes und kostengünstiges Wireless-M-Bus-Modul mit kleiner Anschlussfläche. In dem Modul ist ein energiesparender, programmierbarer Mikrocontroller Cortex M0+ integriert, auf dem ein voll funktionsfähiges M-Bus-Protokollstack implementiert ist. Des Weiteren umfasst das Modul ein auf den Transceiver SPIRIT1 abgestimmtes Balun, das eine Verbindung zu externen Antennen ermöglicht.

Wenn Sie weitere Informationen und Support benötigen, wenden Sie sich an Ihren EBV Elektronik-Partner vor Ort, dem führenden Spezialisten für Halbleiterprodukte in EMEA, oder besuchen Sie die Website ebv.com/mercury.

Distribution is today. Tomorrow is EBV.



EBV Chips

EBV Elektronik
An Avnet Company

Spread Spectrum Clocking:

Von MEMS-Oszillatoren und EMV



Oszillatoren sind als hochgenaue Taktgeber in den meisten Elektronikschaltungen unerlässlich. Sie erzeugen als störende Nebeneffekte allerdings elektromagnetische Interferenzen. Diese lassen sich reduzieren, wenn anstelle von Standardware Spread-Spectrum-Oszillatoren zum

Zuge kommen.

Von Axel Gensler

Stelle setzen die Spread-Spectrum-Oszillatoren (SSC-Oszillatoren) an, denn sie bieten eine effiziente und wirtschaftliche Lösung, um das EMI-Problem an der Wurzel zu fassen.

**Spread Spectrum =
Frequenzspreizung**

Jedes elektrische Gerät erzeugt unbeabsichtigte elektromagnetische Strahlung. Im Zuge des technologischen Fortschrittes in der Halbleiter- und Computertechnologie steigen diese Emissionen – bedingt durch

höhere Prozessorgeschwindigkeiten und Datenraten. EMI (Electromagnetic Interference) steht zunehmend im Fokus und stellt eine der größten Herausforderungen dar, um den Bestimmungen der elektromagnetischen Verträglichkeit gerecht zu werden.

Einen großen Anteil an diesen unerwünschten Effekten haben Taktgeber wie Oszillatoren und PLLs. Das Frequenzspektrum des Rechtecktaktes, das ein Oszillator erzeugt, besteht aus der Nominalfrequenz sowie deren Harmonischen. Je steiler das Taktsignal, desto mehr Leistung entfällt auf die harmonischen Frequenzen. An dieser

Frequenzspreizung ist ein geläufiger Begriff in der Nachrichtentechnik. Er beschreibt ein Verfahren, um ein schmalbandiges Signal in ein Signal mit einer größeren Bandbreite umzuwandeln. Die Bandbreite ist dabei größer, als es für die eigentliche Informationsübertragung nötig wäre. Die Sendenergie wird auf einen größeren Frequenzbereich verteilt.

Ein interessanter Einsatzbereich dieses Verfahrens ist die Störminimierung in der Digitaltechnik, bei der es im Speziellen darum geht, die spektrale Dichte von Taktsignalen zu verringern, und zwar mit dem Ziel, Funk- oder Funktionsstörung auf benachbarte Geräte zu verhindern und so die Nor-



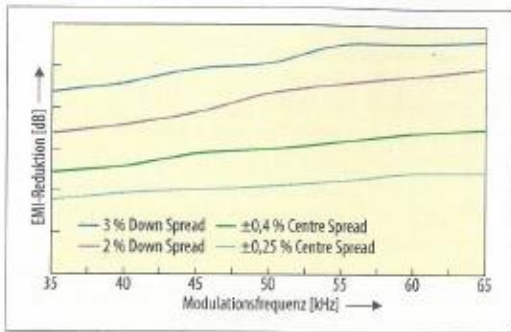


Bild 1. Zusammenhang zwischen EMI-Spitzenwerten und verschiedenen Parametern wie Modulationsindex, Modulationsfrequenz und Spread-Typ.

(alle Bilder: SiTime/Endrich Bauelemente Vertrieb)

men hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit zu erfüllen. Das Verfahren ist unter den Begriffen „Spread Spectrum Clocking (SSC)“, „Spread-Spectrum-Takterzeugung (SSCG, Spread Spectrum Clock Generation)“ sowie „Dithering“ geläufig.

Spread Spectrum Clocking

Die Modulation der Taktfrequenz wurde von Entwicklern bereits eingehend untersucht, bevor man überhaupt für Applikationen mit hohem Systemtakt bezahlbare Lösungen gegen EMI-Probleme suchte. Im Jahre 1994 schließlich stellten Keith Hardin, John Fessler und Donald Bush, Ingenieure von Lexmark International, auf dem IEEE International Symposium on EMC ein Konzept vor, das auf dem sogenannten Chirp-Spread-Spektrum-Verfahren (CSS) basiert. Bei diesem wird ein Rechteck-Taktsignal mit einem niederfrequenten Signal modu-

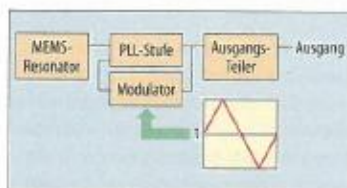


Bild 2. Der Signalausgang der in einem SSC-Oszillator integrierten PLL-Stufe wird hier mit einem Dreieckssignal moduliert.

liert, um unerwünschte Emissionen elektrischer Geräte zu reduzieren. Das periodische Taktsignal hat meist ein sehr schmales Frequenzspektrum, und die ausgestrahlte Energie beschränkt sich auf eine sehr kleine Bandbreite.

Darauf aufbauend begann man, die hohen Peaks eines

reinen Taktsignals (engl. Clock) zu vermeiden, die Taktfrequenz über einen definierten Frequenzbereich fortlaufend leicht zu variieren. Dieses sogenannte Spread Spectrum Clocking versieht das Taktsignal künstlich mit Jitter und vermeidet so einzelne, sehr hohe Leistungsspitzen bei der Nominalfrequenz. Es treten vielmehr vielzählige, mit vergleichsweise geringer Leistung versehene Signale auf. Die abgestrahlte und störende Energiemenge bleibt in Summe gleich, verteilt sich aber auf einen größeren Frequenzbereich.

Durch diese Frequenzspreizung können ohne aufwändige Filterung der Schaltfrequenz die gesetzlichen Vorgaben erfüllt werden, zumal die gültigen Normen in der Regel die maximal zulässige EMI-Strahlung anhand der Spitzen-EMI-Emissionen spezifizieren – und nicht über die gemittelten Werte. Der Ansatz der Spread Spectrum Technology (SST) zielt also darauf ab, die Energie durch langsame Modulation der

Taktfrequenz mit einer Modulationsfrequenz breitbandiger aufzuspreizen – zum Beispiel auf eine Mittenfrequenz $\pm 1\%$.

Die für dieses Verfahren vorgesehenen Oszillatoren nennt man sinnvollerweise Spread-Spectrum-Oszillatoren (SSC, Spread Spectrum Clock Oscillators) und es genügt in vielen Fällen, den bislang verwendeten Oszillator mit einem pinkompatiblen SSC zu ersetzen. Allein diese Maßnahme reicht oft zur Einhaltung einschlägiger EMI/EMV-Vorschriften, da SSC die EMI in der Regel um 10 bis 15 dB reduzieren können.

SSC-Oszillatoren gehören zum Sortiment der meisten Oszillatorhersteller und sind sowohl Quarz- als auch MEMS-basierend verfügbar. Im Bereich der MEMS-Lösungen ist das Unternehmen SiTime Marktführer. Dieser Komponentenhersteller produziert MEMS-Oszillatoren im kostengünstigen QFN-SMD-Gehäuse, das in den Größen $2 \times 1,6 \text{ mm}^2$, $2,5 \times 2 \text{ mm}^2$ und $7 \times 5 \text{ mm}^2$ erhältlich ist.

Wichtige Parameter für SSC-Oszillatoren

Das EMI-Verhalten von SSC-Oszillatoren wird im Wesentlichen von vier technischen Faktoren beeinflusst.

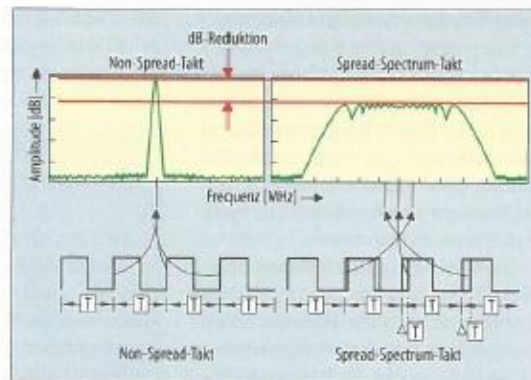


Bild 3. Takt-Spektrum eines Oszillator-Ausgangssignals ohne (linke Bildhälfte) und mit Frequenzspreizung (rechte Bildhälfte). Die Auflösungsbandbreite des Spektrumanalysators beträgt 100 kHz.

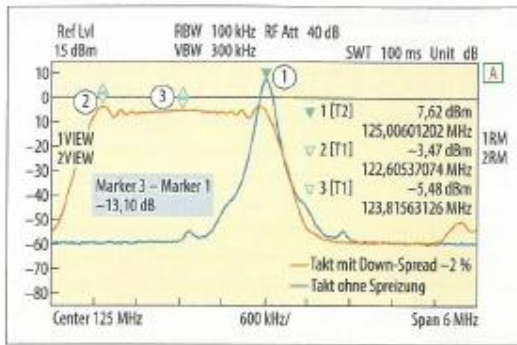


Bild 4. Die Reduktion des Rauschens lässt sich durch Spread-Spectrum-Taktung bewerkstelligen.

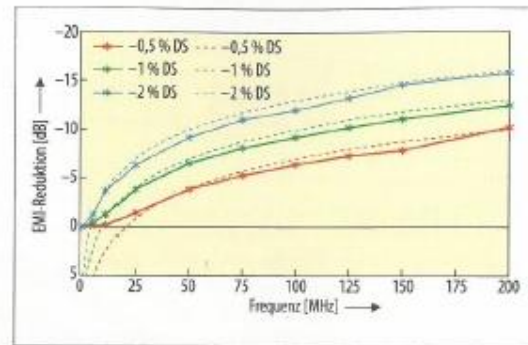


Bild 5. Die mit Gleichung 2 errechneten Messwerte werden hier realen Messungen gegenübergestellt.

Unter dem **Modulationsindex δ** oder **Modulationsgrad** versteht man die Höhe der Frequenzänderung (oder Spread) als relative Prozentzahl der gewünschten Taktfrequenz f_c . Generell gilt hier, dass die EMI umso stärker reduziert werden kann, je höher der Modulationsindex δ ausfällt. Die Ausgangsfrequenz f_c wird im Falle der Dreiecksmodulation zwischen $f_{(min)}$ über f_c (nominal) bis zu $f_{(max)}$ gewobelt.

Der Modulationsgrad, angegeben in Prozent der Nominalfrequenz, bestimmt die Bandbreite der Spreizung. Das bedeutet, dass die Amplitude des kHz-Modulationssignals die Bandbreite verändert, während die Modulations-Trägerfrequenz den Abstand der spektralen Energieverteilung bestimmt.

Übertragen auf ein Beispiel kann man feststellen: Wenn die Frequenz des Taktgebers 100 MHz und die Modulation einen Gesamt-Frequenzhub von 1 MHz betragen soll, ergibt sich für die Bandbreite in Prozent: $1/100 = 1\%$. In der Praxis gilt eine Bandbreite von mehr als 5% bereits als extrem.

Die Modulation auf die Nominalfrequenz des Oszillators gilt im gleichen Umfang auch für die Harmonischen dieses Taktes. Ist die Nominalfrequenz 100 MHz, so beträgt die 3. Harmonische 300 MHz und die 5. Harmonische 500 MHz. Der einprozentige Spread bei den Grundfrequenzen gilt auch für die

3. und 5. Harmonischen. Die Auswirkung der Modulation auf die EMI-Reduktion ist bei den höheren Harmonischen größer als bei der Grundfrequenz. Dies liegt daran, dass die einprozentige Spread bei 100 MHz nun mal 1 MHz beträgt, aber schon 3 MHz bei der 3. Harmonischen.

Die **Modulationsfrequenz f_m** ist die Geschwindigkeit, mit der die Taktfrequenz zwischen f_c und $(1 - \delta) \cdot f_c$ moduliert wird. Üblicherweise liegt die Modulationsträgerfrequenz f_m (Sweep Rate) im kHz-Bereich und ist damit deutlich langsamer als die MHz-Taktfrequenz f_c des Oszillators.

Im Datenblatt eines SSC-Oszillators findet man die Angabe als Modulationsrate in kHz. Sie liegt im Bereich von 30 bis 150 kHz. Es gibt mehrere Bedingungen, welche die maximale und minima-

le f_m diktiert: In der Regel ist sie größer als 30 kHz, um nicht mit dem Audioband zu kollidieren, aber klein genug, um sich nicht auf den normalen Betrieb des Systems selbst auszuwirken – beispielsweise auf die Schleifenbandbreite der nachgeschalteten PLL.

Das **Modulations-Profil** gibt an, wie die Taktfrequenz zwischen f_c und $(1 - \delta) \cdot f_c$ im Zeitbereich moduliert wird. Beispiele für die in Frage kommenden Signalformen sind Hershey Kiss sowie Dreieckssignal.

Bei den SSC-Oszillatoren kommen zwei Verfahren zum Einsatz, die man als **Spread-Typen** bezeichnet: der **Centre Spread** oder der **Down Spread**. Im Falle des letzteren erfolgt die Modulation – bezogen auf die Nennfrequenz – auf einer Seite hin zu niedrigeren Frequenzen. Beim Centre Spread indes

Wann erwachen MEMS-Oszillatoren aus dem „Dornröschen-Schlaf“?

Es fasziniert mich, dass eine Produktgruppe wie die MEMS-basierenden Oszillatoren ihre unbestreitbaren Vorzüge wie minimaler Energiebedarf und hohe Robustheit besitzt, in der Elektronikwelt aber nicht wirklich beachtet wird. Diese Bausteine verwenden anstelle des Schwingquarzes einen MEMS-Resonator aus Polysilizium, und das erste Patent zu diesem Resonator wurde bereits 1971 in den USA angemeldet. In zahlreichen Publikationen und vielen Konferenzen wurden die Vorzüge dieser Bausteine zur Genüge diskutiert und auch bestätigt. Wenn ich mich nun aber mit Markus Lutz, dem Founder and Executive Vice President des Marktführers SiTime unterhalte, so frage ich mich umso mehr, warum es

diese Technik so schwer hat akzeptiert zu werden.

Er gab freimütig zu, dass sein Unternehmen viele Design-Wins für sich verbuchen kann. Die Stückzahlen, die in die Serienfertigung einfließen, seien dagegen noch ausbaufähig. Weltweit läge deren Marktanteil bei vielleicht einem Prozent! Da frage ich mich: Ist es der Preis oder sind es irgendwelche Kenngrößen, die ein Oszillator mit Schwingquarz immer noch für sich verbuchen kann? Oder misstraut die Entwickler-Zunft grundsätzlich allem, was dem Schwingquarzbasierenden Oszillator aus technischer Sicht gefährlich werden könnte?

Schreiben Sie mir Ihre Meinung: AGoldbacher@weka-fachmedien.de



erfolgt sie zu gleichen Teilen – 50 % nach unten und 50 % nach oben. Übertragen auf das Beispiel eines 100-Hz-SSC-Oszillators, der mit der Nennfrequenz von 100 MHz und einem Centre Spread von $\pm 0,5\%$ spezifiziert ist, wird dessen Mittenfrequenz zwischen 99,5 MHz und 100,5 MHz moduliert. Im Falle eines $0,5\%$ Down Spread hingegen bewegt sich der Frequenzbereich zwischen 99,5 MHz und 100 MHz. Der Down Spread, der auch asymmetrische Spreizung genannt wird, kommt dann zum Zuge, wenn das System eine Betriebsfrequenz, die höher als die Nennfrequenz ist, nicht tolerieren kann. Eine etwas geringere Taktrate muss hier allerdings hingenommen werden.

Bild 1 zeigt in diesem Zusammenhang die EMI-Reduktionsmenge in Abhängigkeit von den eben beschriebenen Parametern.

Vereinfachte Abschätzung der EMI-Dämpfung

Die Energie-Unterschiede in Abhängigkeit von der Taktfrequenz werden in dB gemessen. Generell lässt sich sagen, dass die Spitzenenergie-Reduktion umso stärker ausfällt, je breiter man die Streuung wählt. Eine Formel zur Berechnung der Leistungsreduktion in dB gibt Gleichung 1 wieder, wobei hier – ausgehend von einem idealen Takt mit einem Tastverhältnis von 50 % – nur die ungeraden Harmonischen Berücksichtigung finden:

$$(1) \text{ Reduktion [dB]} = 6,5 + 9 \log_{10}(F) + 9 \log_{10}(BW)$$

F steht dabei für die Frequenz in MHz sowie BW für total % Spread ($1,5\% = 0,015$). Ausgehend von einem 100- und einem 500-MHz-Takt mit $1,5\%$ Spread ergibt dies folgende dB-Reduzierungen:

- Reduktion (100 MHz) = $(6,5 + 18 - 16,41) \text{ dB} = 8,08 \text{ dB}$
- Reduktion (500 MHz) = $(6,5 + 24,13 - 16,41) \text{ dB} = 14,37 \text{ dB}$

SSC-Oszillator in der Praxis

Zum besseren Verständnis wird im Folgenden der Ausgang eines Spread-Spectrum-Oszillators der Serien SiT9001/SiT9002/SiT9003 durch Modulation der PLL mit einem in Bild 2 dargestellten 32-kHz-Dreieckssignal konditioniert. Der Schaltungsentwickler kann zudem verschiedene Parameter vorauswählen – so zum Beispiel den Spreizbereich (Spreading Type) und die Spreizbreite (Spread Option (%)) applikationsspezifisch einstellen:

- Optionen bei Centre Spread: $\pm 0,25\%$, $\pm 0,5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 2\%$
- Auswahl bei Down Spread: $-0,5\%$, -1% , -2% , -4%

Im gewählten Schaltbeispiel wird die Dreiecksform als Modulationssignal gewählt, da sie eine akzeptable Leistungsdichte in der Frequenzdomäne aufweist. Bild 3 (linke Hälfte) zeigt die spektrale Darstellung eines Ausgangstaktes ohne Frequenzspreizung; die rechte Bildhälfte indes bildet das Signalverhalten im Fall der Spreiztechnik ab. Man sieht anhand der beiden roten Grenzlinien, dass sich die spektrale Amplitude durch gezieltes Ausbreiten der in einem Taktsignal enthaltenen Energien über einen kleinen Bereich von Frequenzen nennenswert verringern lässt.

Um ein besseres Verständnis für die Vorteile des Spread-Spektrum-Taktes zu bekommen, empfiehlt es sich, am Beispiel eines Oszillators der Serie SiT9001 Messungen mit einem Spektrumanalysator vorzunehmen. Zugrunde gelegt wird eine Taktfrequenz von 125 MHz; außerdem wird für den Test eine Abwärtsspreizung (Down Spread) von 2% vorgewählt. Bild 4 dokumentiert die am Testbaustein vorgenommenen Messungen am Oszillatorausgang, die auf dem Display des Spektrumanalysators festgehalten wurden. Der EMI-Durchschnittswert des Spektrums verringert sich bei eingeschalteter Spreizfunktion um 13 dB

gegenüber dem Signal ohne Spreizung (siehe Marker 3 gegenüber Markierung 1), während die Spitze-Spitze-Reduktion bei ca. 11 dB liegt (siehe Marker 3 gegenüber Markierung 2).

Abschätzung der EMI-Reduzierung

Eine grobe Abschätzung der möglichen EMI-Reduzierung durch den Einsatz der Spread-Spectrum-Technologie kann anhand folgender Gleichung berechnet werden:

$$\text{Reduktion} = 10 \cdot \log_{10} \frac{|S| \cdot f_c}{\text{RBW}} \text{ dB}$$

S steht hierbei für „Peak-to-Peak Spread“, f_c ist die Trägerfrequenz (Carrier Frequency) und RBW ist die Auflösungsbandbreite des Spektrumanalysators.

Aus den Ergebnissen von Gleichung 2 und verglichen mit denen der Messwerte in Bild 4 am Beispiel des SiT9001 bei 125 MHz und einem Down Spread von 2% ergibt sich rechnerisch:

$$\text{Reduktion} = 10 \cdot \log_{10} \frac{|-0,02| \cdot 125 \text{ MHz}}{0,1 \text{ MHz}} \text{ dB} = 14 \text{ dB}$$

Der berechnete Wert liegt in der Nähe des gemessenen Spitze-zu-Mittelwert-Ergebnisses von 13 dB. Er ist ca. 2 dB höher als der Spitze-zu-Spitze-Wert von 11 dB, wohl bedingt durch die Welligkeit (Ripple) im Spektrum. Diese Abweichung sollte der Anwender berücksichtigen, wenn er Gleichung 3 zur Abschätzung der Spitze-zu-Spitze-EMI-Reduzierung heranzieht.

Zur weiteren Verifizierung der erwähnten Gleichungen werden im Folgenden – wieder am Beispiel des SiT9001 – die Messkurven bei drei verschiedenen Down-Spread-Einstellungen erfasst und diese dann mit den Werten der theoretischen Berechnungen verglichen.

Die Ergebnisse dieser Gegenüberstellung zeigt Bild 5. Die gestrichelten Linien repräsentieren die berechneten

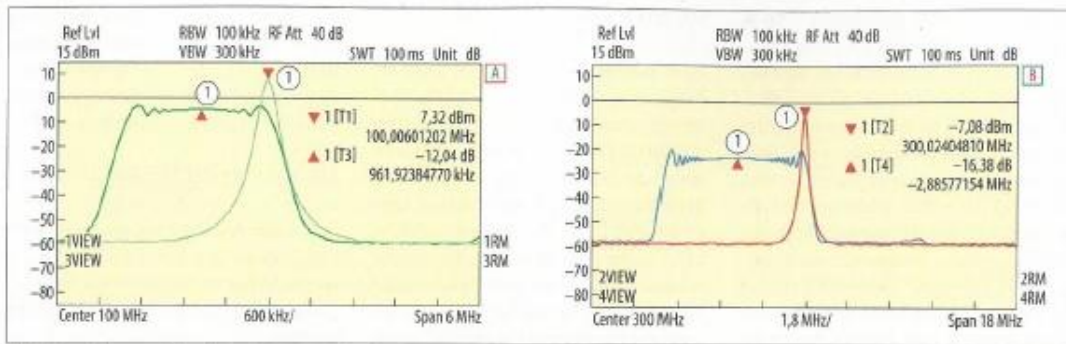


Bild 6. Das Spektrum des Oszillators SIT9001 wird hier bei 100 MHz (links) und bei 300 MHz (rechts) ermittelt.

Werte, während die durchgezogenen Linien die real gemessenen Spitze-zu-Durchschnitt-Werte abbilden. In diesem Fallbeispiel wurde mit einem Rohde- & Schwarz-Spektrumanalysator gemessen. Aus den Messkurven wird ersichtlich, dass die berechneten Werte mit einer Toleranz von ± 1 dB mit den realen Messkurven übereinstimmen.

Spread-Spectrum-Auswirkungen auf die Takt-Oberwellen

Die für Länderzulassungen zwingend notwendige CE- bzw. FCC-Konformität hinsichtlich des EMV-Verhaltens von Elektrogeräten umfasst unter anderem sowohl die Grundfrequenz des Taktsignals als auch die harmonischen Frequenzen (Oberwellen). Aus Gleichung 2 ist in diesem Zusammenhang bekannt, dass der Betrag der EMI-Verringerung proportional mit der Trägerfrequenz steigt oder sinkt. Will man dies überprüfen, so kann man dafür das Spektrum eines Oszillators am Beispiel des SIT9001 messtechnisch erfassen, beispielsweise mit und ohne zweiprozentige Spreizung (Down Spread) seiner Grundfrequenz

von 100 MHz sowie bei der dritten (300 MHz) und der fünften Harmonischen (500 MHz). Die Ergebnisse dieser Messungen sind in den Bildern 6 und 7 dargestellt.

Die EMI-Reduzierung durch die Frequenzspreizung bei der Grundfrequenz (100 MHz) beträgt 12,09 dB und steigt auf 16,38 dB bei der dritten Harmonischen (300 MHz) sowie auf 17,06 dB bei der fünften Harmonischen (500 MHz). Das Spreizspektrum verringert also nennenswert die EMI für alle Frequenzkomponenten im Taktausgangssignal.

EMV-Reduktion durch SoftEdge

Die Dämpfung der EMI lässt sich bei den SiTime-Oszillatoren noch durch eine weitere Option erzielen, welche die Anstiegs- und Abfallzeiten des Taktsignals verlangsamt. Sie nennt sich SoftEdge und kann werksseitig programmiert oder über das Entwicklungs-Kit Time Machine II mit den entsprechend programmierbaren Oszillatoren implementiert werden.

Die Anstiegs-/Abfallzeiten (engl. Rise and Fall Time) sind als Verhältnis der

Taktperiode definiert. Für das Verhältnis von 0,05 ist das Signal sehr nahe an einer Rechteckwelle, für das Verhältnis von 0,45 näherungsweise eine dreieckige Wellenform. Aus Bild 8 wird ersichtlich, dass die 11. Harmonische um 35 dB reduziert werden kann, wenn die Flankensteilheit von 5 % der Periode auf 45 % erhöht wird.

Literatur

- [1] Gensler, A.: Anstiegs- und Abfallzeiten optimieren. *Elektronik Components* 2016, Ausgabe März; S. 15 ff.
- [2] SiTime Corp.: Application Note SiT-AN10005 Rev. 1.1



Axel Gensler

studierte an der Fachhochschule Darmstadt Elektrotechnik und schloss sein Studium als Dipl.-Ing. (FH) erfolgreich ab. 1995 wechselte er dann zur Endrich Bauelemente-Vertriebs

GmbH und ist dort seither als Produktmanager tätig. a.gensler@endrich.com

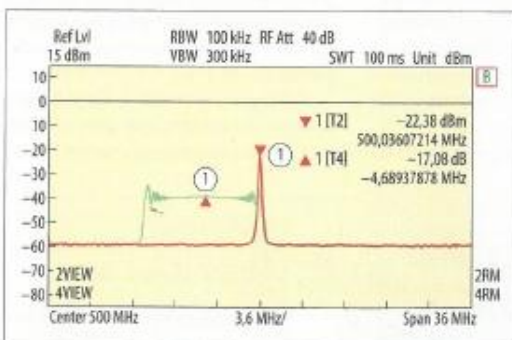


Bild 7. Das Spektrum des Oszillators SIT9001 wird hier bei 500 MHz ermittelt. Gegenüber der Grundfrequenz reduziert sich die EMI um 17,06 dB.

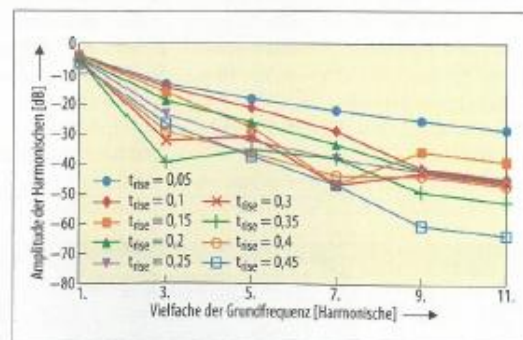


Bild 8. Reduzierung der EMI bei den Harmonischen als Funktion von Anstiegs-/Abfallzeiten. Diese werden mit Hilfe der SoftEdge-Funktion eingestellt.