

Genau, genauer, OCXO:

Weshalb Quarzoszillatoren mit geringem Phasenrauschen immer wichtiger werden

Nach einem kurzen Überblick über die wichtigsten Begriffe und Zusammenhänge soll in diesem Artikel ausführlich auf die Anwendungsfelder von hochpräzisen Quarzoszillatoren eingegangen werden. Hierzu werden Fallbeispiele betrachtet.

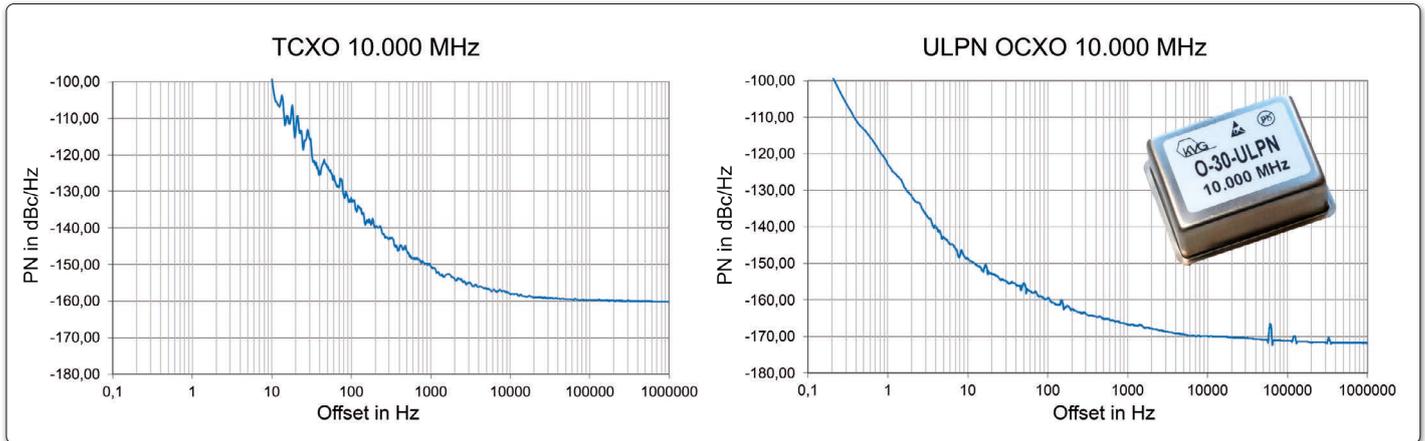


Bild 1.2: Vergleich der Phasenrauschdiagramme eines TCXOs und eines Ultra-Lowphase-Noise-OCXOs

Die meisten Bereiche des täglichen Lebens, der weltweiten Datenerhebung und -verarbeitung sowie große Teile der kritischen Infrastruktur wurden in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten digitalisiert. Allen gemein ist der Bedarf nach hochgenauen Referenzuhren, die bei

der Übertragung und Verarbeitung von Daten den Arbeitstakt vorgeben.

Häufig werden als frequenzgebende Bauteile Quarzoszillatoren in unterschiedlichen Formen eingesetzt: von einfachen, unregulierten Quarzoszillatoren

(XO/VCXO), über temperaturkompensierte Oszillatoren (TCXO) bis hin zu geheizten Quarzöfen (OCXO). Eines der wichtigsten Qualitätskriterien ist im Highend-Bereich die kurzzeitige Frequenzstabilität der Quarzoszillatoren. Beschrieben werden kann die Frequenzstabi-

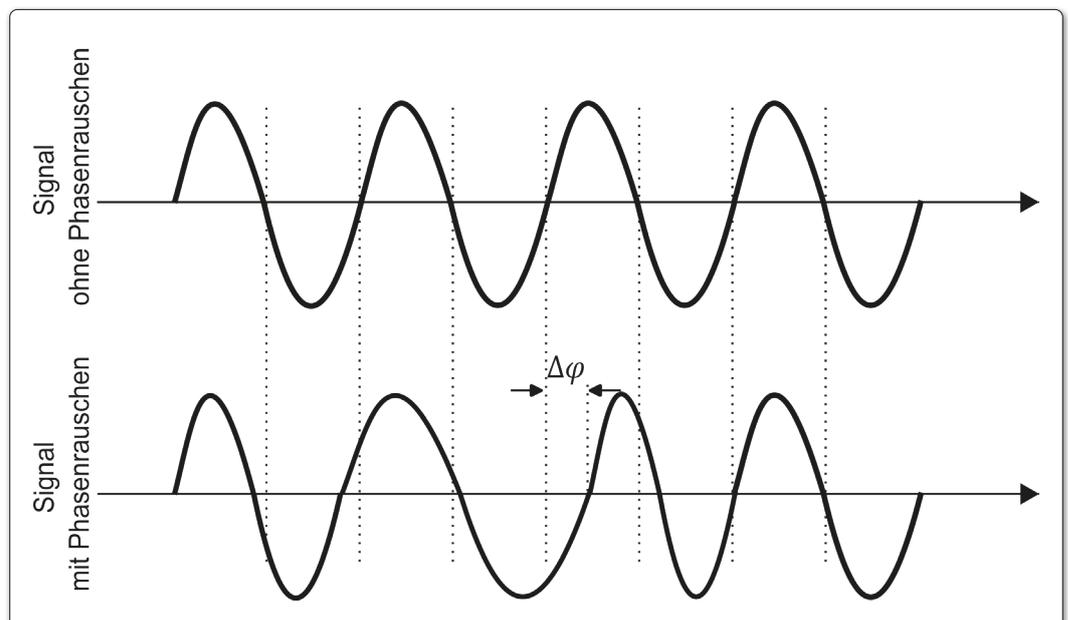


Bild 1.1: Auftreten einer zufälligen, zeitabhängigen Phase im Sinussignal

Hinweis:
Bild 2.1, 3.1 und 5.1
überarbeitet mit freundlicher
Genehmigung der Rohde &
Schwarz GmbH & Co. KG

Autoren:
Dr. rer. nat. Julian Emmerich/
und
Dipl.-Ing. Harald Rudolph,
Produktmanagement,
KVG Quartz Crystal
Technology GmbH,
www.kvg-gmbh.de

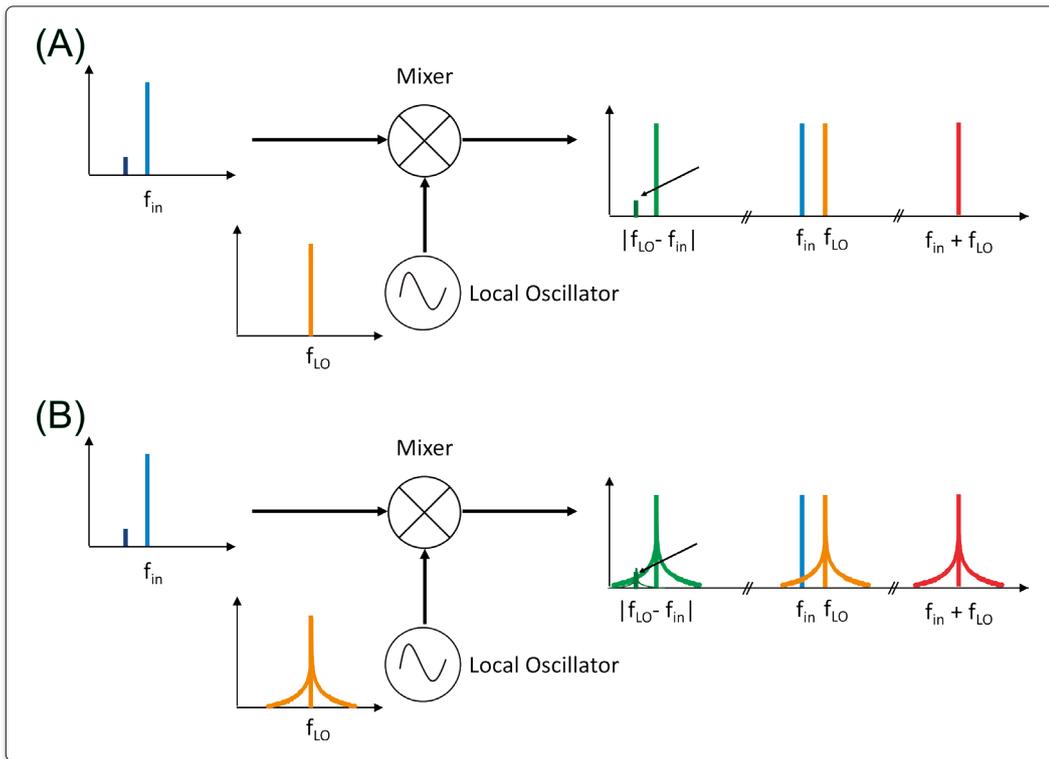


Bild 2.1: (A) Prinzip der Signalmischung in einem Netzwerkanalysator, (B) Signalmischung mit einem rauschbehafteten Signal des LOs führt zur Linienverbreiterung im Ausgangssignal

lität auf kurzen Zeitskalen über die drei Größen Phasenrauschen, Jitter und Kurzzeitstabilität. Eine übersichtliche Zusammenstellung dieser drei Messgrößen und ihrer Zusammenhänge wurde bereits in der Ausgabe 10/22 der hf-praxis veröffentlicht.

Hintergründe zum Phasenrauschen

Rauscheffekte in elektrischen Schaltungen sind ein allgegenwärtiges Phänomen, welches auf verschiedene physikalische Ursachen zurückzuführen ist. Durch die thermische Bewegung von Atomen und Molekülen in den verbauten Schaltungselementen, wie Widerständen oder Halbleiterbauelementen, wird ein unüberwindlicher Rauschteppich (noise floor) erzeugt, der speziell das trägerferne Rauschen bestimmt. Das trägernahe Rauschen wird maßgeblich durch die Güte des Schwingquarzes bestimmt, der in der Oszillatorschaltung als schmalbandiges Filter im Bereich der Resonanzfrequenz wirkt.

Ideale Oszillatoren erzeugen eine zeitabhängige, sinusförmige Ausgangsspannung der Form $u(t) = A_0 \cdot \sin(2\pi f_0 t)$

mit der Amplitude A_0 und der Frequenz f_0 . Diese Sinuswelle hat eine perfekte Periode und die Fourier-Transformierte von $u(t)$ ist eine spektral reine Deltafunktion:

$$\delta(f - f_0)$$

Ein nichtideales, rauschendes Signal $u'(t)$ kann allgemein durch Einführen eines Rauschtermes für das Amplitudenrauschen $\epsilon(t)$ und eines Terms für das Rauschen der Phasenlage des Signals $\Delta\varphi(t)$ im Zeitbereich beschrieben werden durch:

$$u'(t) = (A_0 + \epsilon(t)) \cdot \sin(2\pi f_0 t + \Delta\varphi(t))$$

Hierbei ist A_0 die Amplitude des reinen Sinussignals und f_0 dessen nominale Grundfrequenz, welche als statistischer Mittelwert interpretiert werden kann. Das Frequenzspektrum ist in diesem Fall nicht mehr spektral rein, sondern eine Funktion der Frequenz.

In Bild 1.1 sind die kurzzeitig auftretenden Frequenzinstabilitäten, welche durch den Phasenrauschterm verursacht werden, dargestellt. Sie zeigen sich in der Zeitdomäne als Abweichung der Nulldurchgänge (Phasenlage) des tatsächlichen Signalverlaufs im Vergleich zur idealen Sinuskurve. Eine Modulation der Amplitude ist in dieser Abbildung nicht dargestellt.

Die wichtigsten Beschreibungsformen der Phasenschwankungen sind:

Phasenrauschen $\mathcal{L}(f)$

Jitter $\Delta T(\Delta f)$ und

$$\text{Kurzzeitstabilität } \sqrt{\sigma_y^2(\tau)}$$

In Bild 1.2 sind die Phasenrauschdiagramme eines guten TCXOs und eines sehr guten Ultralow-Phasenoise- (ULPN) OCXOs der Firma KVG Quartz Crystal Technology GmbH dargestellt. Gute 10-MHz-TCXOs kommen bei einem Trägerabstand von 10 Hz lediglich auf -100 dBc/Hz und erreichen einen noise floor von -160dBc/

Hz bei 100 kHz Trägerabstand. Gute ULPN-10-MHz-OCXOs sind heute mit einem Phasenrauschen von -123 dBc/Hz bereits bei 1 Hz und -149 dBc/Hz bei 10 Hz Trägerabstand verfügbar und zeigen ein trägerfernes Phasenrauschen von besser als -170 dBc/Hz. Auch die Kurzzeitstabilität – meist in Form der sog. Allan Variance oder Allan Deviation (ADEV) ausgedrückt – ist für gute OCXOs weitaus besser als für TCXOs. Gute 10-MHz-TCXOs liegen bei einem tau von 1 s im Bereich 2×10^{-10} bis 2×10^{-11} . Gute 10-MHz-OCXOs liegen bei 2×10^{-12} bis 2×10^{-13} , sind also etwa zwei Dekaden besser.

Anwendungsfeld Messtechnik

Speziell im Hochfrequenzbereich lebt die Messtechnik davon, dass ein zu messendes Signal durch Mischung in einen anderen, meist niederfrequenten Frequenzbereich überführt wird. Dies hat den Grund, dass niederfrequente Signale im Allgemeinen problemloser zu analysieren sind, und dass hierdurch im Messgerät Filter und Verstärker einer festen Frequenz benutzt werden können: das zu messende Signal muss lediglich mithilfe eines geräte-internen Oszillators in den benötigten Frequenzbereich heruntergemischt werden.

In Bild 2.1 ist das Grundprinzip der Signalmischung vereinfacht dargestellt. Im Mischerglied wird das Eingangssignal f_{in} mit dem Signal eines lokalen Oszillators f_{LO} gemischt, wodurch eine Überlagerung aus dem Differenzsignal $|f_{LO} - f_{in}|$ und dem Summensignal $f_{in} + f_{LO}$ gebildet wird.

Besitzt der lokale Oszillator ein nicht zu vernachlässigendes Phasenrauschen, so wird diese Rauschcharakteristik auch auf die gemischten Signale aufgeprägt. Wie in Abbildung 2.1. (B) exemplarisch dargestellt, sollen zwei nahe beieinander liegende Signale (blau) analysiert werden. Durch Mischen mit einem stark rauschenden Signal des lokalen Oszillators verschwindet das kleinere Signal nach dem Mischen fast vollständig

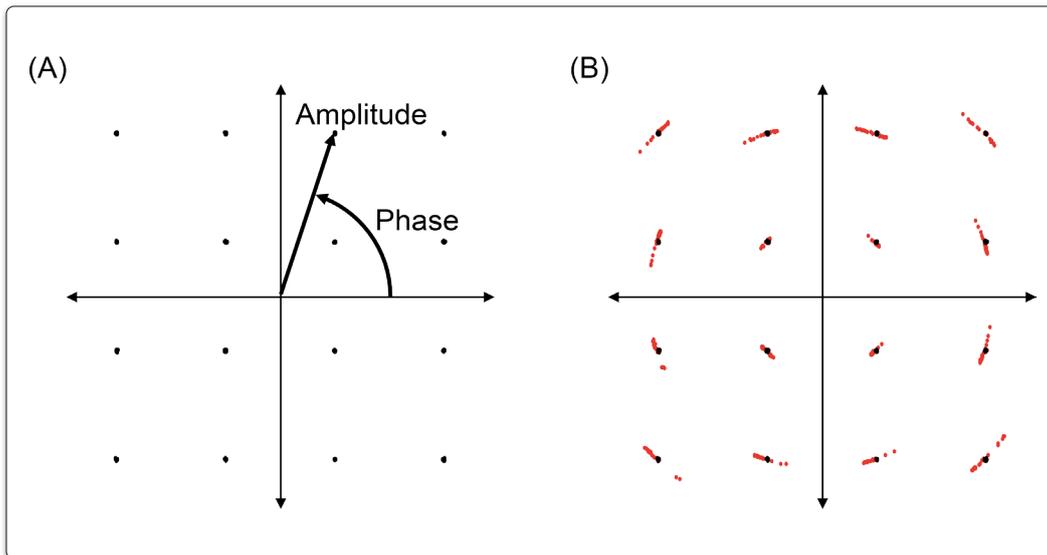


Bild 3.1: (A) Konstellationsdiagramm einer QAM mit 16 Zuständen, (B) Phasenrauschen bewirkt, dass Zustände nicht genau bestimmt werden können

im Rauschen des spektral stark verbreiterten stärkeren Signals.

Hochwertige Messgeräte werden auch genutzt, um das Phasenrauschen einer externen Signalquelle zu bestimmen. Die einfachste Messmethode hierfür ist die Nutzung eines Spectrum-Analyzers. Solange dessen interner Oszillator ein deutlich geringeres Phasenrauschen als das zu messende Signal aufweist, ist

eine Messung relativ problemlos. Andernfalls führen die oben beschriebenen Auswirkungen der Signalmischung dazu, dass die Messergebnisse durch das Phasenrauschen des internen Oszillators limitiert sind und somit verfälscht werden. Deshalb ist es notwendig, dass in Messgeräten der Spitzenklasse auch nur interne Referenzoszillatoren mit extrem geringem Phasenrauschen zu Einsatz kommen.

Anwendungsfeld Datenübertragung

In der analogen drahtlosen Datenübertragung wurden in der Regel Modulationsverfahren wie die Amplitudenmodulation oder die Frequenz-/Phasenmodulation eingesetzt. Die heutige digitale Datenübertragung erfordert weitaus ausgereifere und anspruchsvollere Modulationsverfahren, um über eine verfügbare Bandbreite möglichst viele Daten fehlerfrei parallel übertragen zu können. Diese Modulationsverfahren für die Übertragung von digitalen, zeitdiskreten Signalen nutzen eine Kombination aus Amplituden- und Phasenmodulation, wodurch sich die Datenübertragungsrate durch die Nutzung von hierbei zwei Freiheitsgraden erhöhen lässt. Beispiele hierfür wären die APSK (Amplituden- und Phasenmodulation) oder die QAM (Quadratur-Amplituden-Modulation).

Am Beispiel von Bild 3.1 lässt sich in einem sog. Konstellationsdiagramm die Modulation von 16 verschiedenen Zuständen veranschaulichen, die jeweils durch ein eindeutiges Wertepaar aus Amplitude und einem Phasenwinkel relativ zum Koordinatenursprung beschrieben werden können. Hier verursacht Phasenrauschen eine Rotation

des gesamten Konstellationsdiagramms, wobei höhere Werte des Phasenrauschens eine größere Rotation der Punkte verursachen. Dies ist in Bild 3.1 (B) durch ein Verwischen der exakten Zustände (rote Punkte) erkennbar. Wenn diese Drehung stark genug ist, kann ein Symbol mit einem anderen verwechselt werden, was zu Bitfehlern und somit einer höheren Bitfehlerrate führt. In gewissem Maße kann die rauschbedingte Fehleranfälligkeit durch ein besseres Design des Konstellationsdiagramms verringert werden. Ein anschauliches Beispiel wäre hierbei, dass die Zustände nicht auf einem orthogonalen Raster wie in Bild 3.1 aufgebaut sind, sondern auf konzentrischen Ringen liegen. Hierdurch wird eine maximale „Entfernung“ der Zustände untereinander erreicht.

In allen Fällen kann aber die Bitfehlerrate durch den Einsatz von phasenstabilen Quarzoszillatoren bestmöglich reduziert werden, weshalb speziell in den Kernbereichen von digitalen Kommunikationsnetzen auf höchster Hierarchieebene Rubidium- oder Cäsium-Normale oder GNSS-gelockte OCXOs und in der zweiten Hierarchieebene OCXOs mit extrem geringem Phasenrauschen eingesetzt werden.

Anwendungsfeld Navigation

Zur Positionsbestimmung auf der Erde und in der Luft werden eine Vielzahl globaler Satellitennavigationssysteme verwendet. Die Positionsbestimmung beruht auf der Technik, dass die Signallaufzeit eines hochfrequenten Signals von den Satelliten zum entsprechenden Empfänger gemessen wird. In der Regel wird dabei das Signal von mindestens drei Satelliten verglichen, woraus über die Laufzeitdifferenzen die genaue horizontale Position berechnet werden kann. Geschwindigkeitsdaten werden aus der Frequenzverschiebung, welche durch den Doppler-Effekt des bewegten Satelliten relativ zum Empfänger verursacht wird, berechnet.

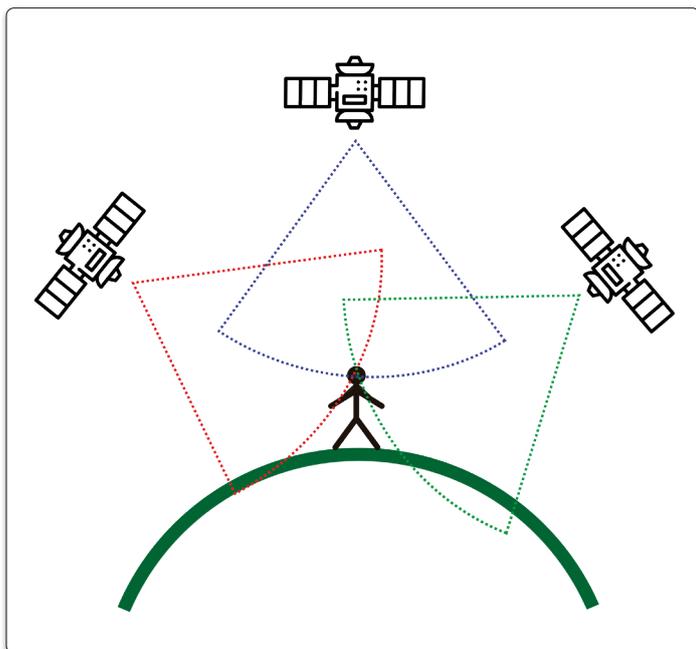


Bild 4.1: Durch Vergleich der Frequenz und Phasenlage von mindestens drei Satellitensignalen eines GNSS-Systems kann die Position auf der Erdoberfläche bestimmt werden

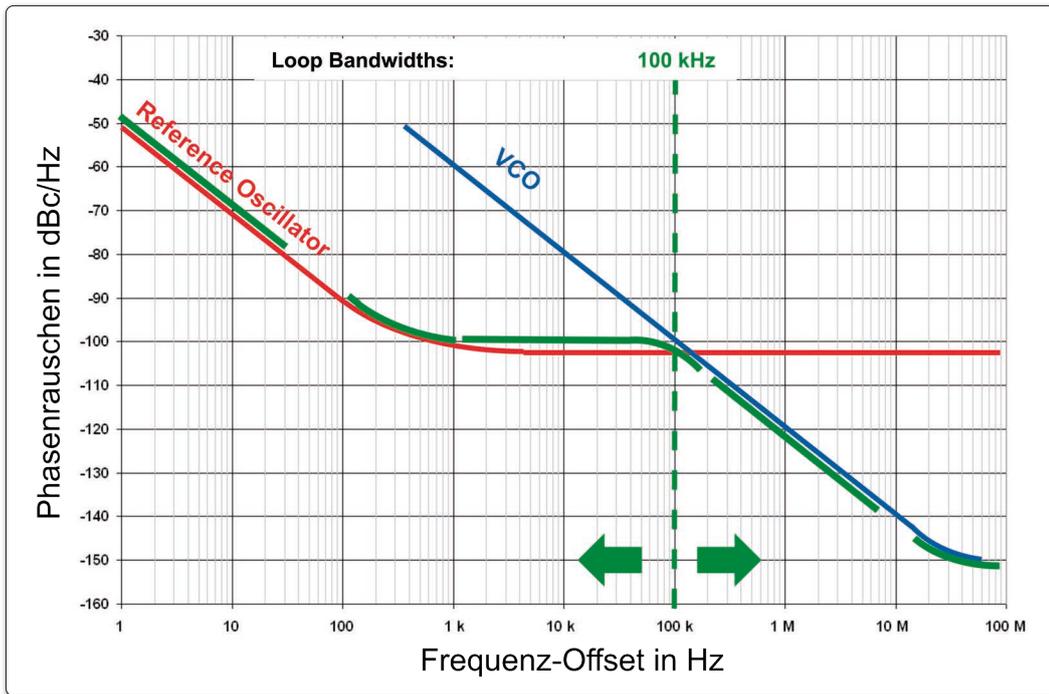


Bild 5.1: Bei der Erzeugung der hochfrequenten elektromagnetischen Felder werden hochstabile OCXOs benutzt, um über eine phasenstarre Schleife (PLL) das trägernahe Phasenrauschen des HF-Oszillators zu reduzieren

Zur exakten Zeit-/Frequenzmessung sind sowohl in den Satelliten als auch in den GNSS-Empfängern extrem genaue Uhren erforderlich. In den Satelliten wird dies über Caesium/Rubidium-Atomuhren (GPS) oder über Wasserstoff-Maser-Uhren (Galileo) realisiert, welche regelmäßig über weltweit verteilte Bodenstationen kalibriert werden.

In tragbaren GNSS-Empfängern müssen ebenso extrem genaue Uhren mit bester Kurzzeitstabilität/Phasenrauschen verbaut sein. Würde die Uhr des Empfängers exakt mit den Referenzuhren der Satelliten übereinstimmen, wären im Idealfall zur Positionsbestimmung nur drei Satellitensignale notwendig (Bild 4.1). In der Praxis werden die Daten von mindestens vier Satelliten ausgewertet, um den Zeitversatz durch die schlechte Langzeitstabilität der Empfänger-Uhren auszugleichen.

Die Auflösungsgenauigkeit eines GNSS-Empfängers hängt somit direkt mit dem Rauschverhalten seiner internen Zeitreferenz zusammen. Tragbare Empfänger für den Massenmarkt enthalten meist nur einfache XO

oder TCXOs für die Erzeugung der Referenzfrequenz, was Auflösungsgenauigkeiten im Bereich von mehreren 10 m bedeuten kann. Professionelle GNSS-Empfänger arbeiten deshalb mit hochstabilen OCXOs, die durch ihre hohe Kurzzeitstabilität den Fehler in der Positionsbestimmung auf wenige Zentimeter verringern.

Anwendungsfeld Radartechnik

In der Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung mittels Radartechnik werden je nach Einsatzgebiet Signale mit einer Frequenz bis zu 300 GHz benötigt. Die für die Signalerzeugung benötigte Hochfrequenz wird bei modernen Systemen über einen spannungsgesteuerten HF-Oszillator (VCO) erzeugt, welcher in der Regel eine schlechte Frequenzstabilität aufweist. Zur Stabilisierung der Hochfrequenz ist der VCO über eine phasenstarre Schleife (PLL) an einen extrem stabilen Referenzoszillator angebunden. Die Gesamt-Performance des Systems – speziell aber das Phasenrauschen – wird maßgeblich durch die Auswahl des Referenzoszillators bestimmt,

welcher deshalb vorzugsweise als Ultralow-Phasennoise-OCXO ausgeführt ist. Als Referenzfrequenz kommen meist 100-MHz-Oszillatoren zum Einsatz.

Der Einsatz einer PLL sorgt dafür, dass das trägernahe Phasenrauschen durch das Rauschen des Referenzoszillators bestimmt wird. Ab einem gewissen Frequenzoffset, welcher durch

die Loop-Bandbreite der PLL bestimmt wird, dominiert das Phasenrauschen des Hochfrequenz-Oszillators. Dieser Effekt ist anschaulich in Bild 5.1 dargestellt, bei der bis zu einer Offsetfrequenz von 100 kHz das Phasenrauschen durch den Einsatz des Referenzoszillators, im Vergleich zum freilaufenden VCO, deutlich reduziert wird.

Dient Radartechnik beispielsweise der Geschwindigkeitsbestimmung, wird die Frequenzverschiebung durch den Dopplereffekt ausgenutzt. Hierbei wird ein Signal fester Frequenz in Richtung des zu messenden Objektes ausgesendet. Die Elektromagnetische Welle wird am Messobjekt reflektiert und läuft zurück zum Empfänger der Radareinheit. Abhängig davon, ob sich das Messobjekt vom Empfänger weg oder auf in zu bewegt, ändert sich die Frequenz des empfangenen Signals. Aus der Frequenzdifferenz kann die Geschwindigkeit bestimmt werden.

Wie in Bild 5.2 dargestellt, kann dieser Frequenzunterschied, der relativ zur Trägerfrequenz bestimmt werden muss, bei kleinen Geschwindigkeiten so gering sein, dass er im Rauschen des Trägersignals untergeht und es somit eine untere Grenze der

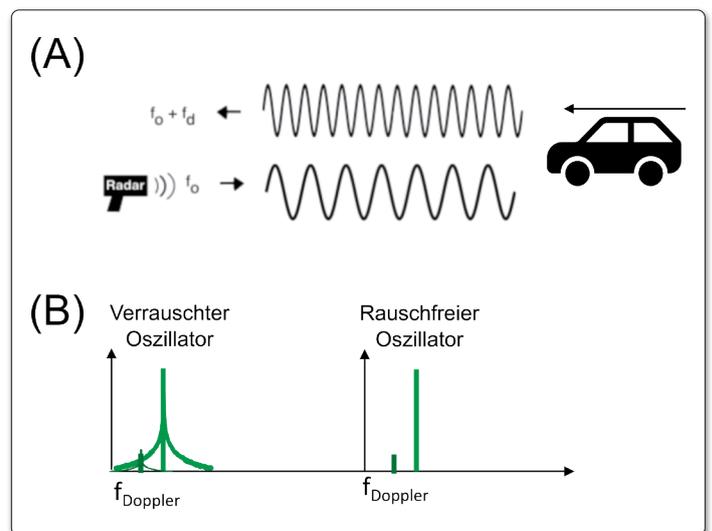


Bild 5.2: (A) Durch den Dopplereffekt ändert das Radarsignal seine Frequenz, wenn es auf bewegte Objekte trifft. (B) Das reflektierte Signal kann im Frequenzspektrum nur dann relativ zur Trägerfrequenz genau lokalisiert werden, wenn der Träger ein möglichst geringen Phasenrauschen aufweist

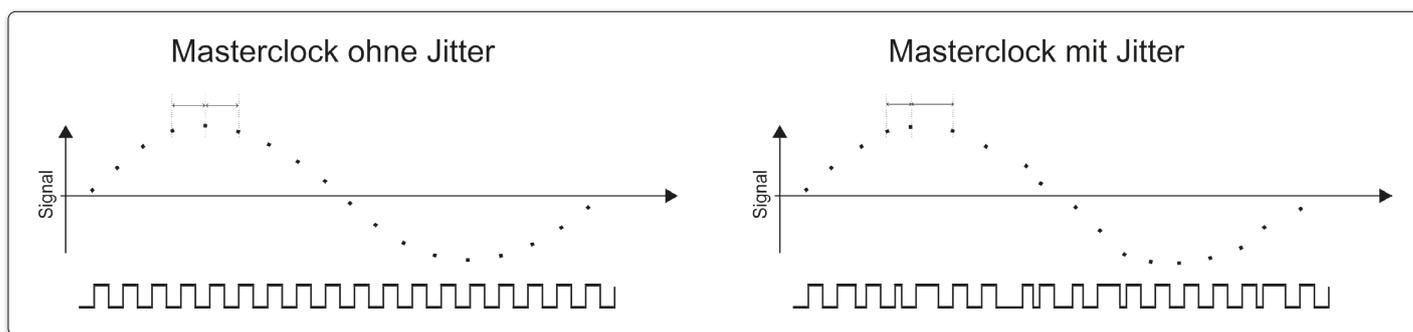


Bild 6.1: Eine Masterclock mit hohem Jitter führt zu einer unregelmäßigen Abtastung des Audiosignals, was zu einer Verschlechterung der Klangqualität führt

Geschwindigkeitsbestimmung gibt. Je geringer das Phasenrauschen der Frequenzquelle ist, desto besser kann eine Frequenzauflösung, und somit eine Geschwindigkeitsbestimmung, durchgeführt werden. Bei einer Radarquelle mit einer Trägerfrequenz von 1 GHz ergibt sich beispielsweise eine Dopplerverschiebung von etwa 1,9 Hz bei einer Geschwindigkeit des sich bewegendes Objekts von 1 km/h.

Anwendungsfeld Audioverarbeitung

Die Verarbeitung und Wiedergabe von Audiosignalen sind allgegenwärtig im täglichen Leben. Allgemein ist ein Geräusch ein zeitabhängiges, analoges Gemisch aus Tönen verschiedener Frequenz. Die analoge Verarbeitung von Audiosignalen geht immer mit einer Verschlechterung des Signals durch Rauscheinflüsse (z.B. in Kabeln oder analogen Verstärkern) einher. Eine digitale Verarbeitung von Audiosignalen kann diese Probleme überwinden. Hierzu muss zunächst das analoge Signale in einem ADC

umgewandelt werden, bevor es digital verarbeitet und vor seiner Ausgabe z.B. über einen Lautsprecher in einem DAC wieder zurückgewandelt wird.

Die Umwandlung hin zum digitalen Audiosignal im ADC erfolgt mit einer gewissen digitalen Taktrate, der sog. Sample-Frequenz f_s , welche üblicherweise 44,1 oder 48 kHz beträgt. Diese Frequenzen sind gemäß dem Nyquist-Theorem geeignet, um analoge Signale bis zu 22,05 bzw. 24 kHz zu digitalisieren. Die Sample-Frequenz wird in der Regel durch einen internen Oszillator, der Masterclock, zur Verfügung gestellt, welcher üblicherweise mit einem Vielfachen der Sample-Frequenz schwingt. In der Tabelle sind übliche Frequenzen für die Masterclock aufgeführt.

Die große Herausforderung bei der Digitalisierung und vor allem bei der Wiedergabe von Audiosignalen ist eine möglichst exakte Masterclock, die ein möglichst geringen Phasenrauschen besitzt. In diesem Fall ist die Betrachtung des Phasenrauschens als Jitter nützlich, da diese

Darstellungsform die Position der Signalfanken eines Taktsignals beschreibt.

In Bild 6.1 wird das Problem einer verrauschten Masterclock dargestellt: Bei der Digitalisierung sorgt diese für eine exakt äquidistante Abtastung des analogen Signals im ADC. Bei der Wiedergabe wird die ausgegebene Wellenform dadurch verzerrt, dass das Taktsignal einen hohen Jitter besitzt und dadurch eine unregelmäßige Rückkonvertierung im DAC stattfindet. Hierdurch wird das wiedergegebene Audiosignal verzerrt und die Klangqualität beeinträchtigt.

Besonders in Consumer-Produkten werden häufig günstige Oszillatoren als Masterclock eingesetzt, welche einen großen Jitter aufweisen. In professionellen Wiedergabegeräten für digital aufgezeichnete Musik, sog. Audio-Streamern, werden deshalb Quarzoszillatoren mit extrem geringen Phasenrauschen eingesetzt, um das Klangerlebnis in Verbindung mit hochwertigen Verstärkern und Lautsprechersystemen zu perfektionieren.

Zusammenfassung

Die Notwendigkeit von Quarzoszillatoren mit extrem geringem Rauschen ist für die moderne Technik unbestritten. Ob Messtechnik, Datenübertragung, Navigation oder Audioanwendungen – in vielen Bereichen gibt es Anwendungen mit höchsten Ansprüchen an die Referenzquellen. In der Telekommunikation spielt der maximale Jitter die Hauptrolle, da hieraus abgeleitet werden kann, wie hoch die Bitfehlerrate bei der Übertragung von diskreten Informationen ist. In der Messtechnik hingegen erfolgt oft eine Charakterisierung des Oszillators über eine Phasenrauschkurve, wobei die Phasenrauschwerte bei unterschiedlichen Abständen zum Trägersignal spezifiziert werden, je nachdem, ob trägernahes oder trägerfernes Phasenrauschen für die spezifische Anwendung relevant ist. Ein schlechtes Phasenrauschen kann hierbei ein schlechtes spektrales Auflösungsvermögen oder einen absoluten Messfehler verursachen. Navigationsanwendungen profitieren auf der Endgeräteseite stark von extrem stabilen Referenzuhren. Gibt es am GNSS-Empfänger unkontrollierte Abweichungen in der Zeitreferenz, so nimmt die Genauigkeit der Positionsbestimmung stark ab, welche sich hierdurch Faktor 10...100 verschlechtern kann.

Diese Beispiele zeigen, wie stark eine moderne Welt in den verschiedensten Bereichen auf die Qualität von hochstabilen Oszillatoren angewiesen ist. ◀

Sample-Frequenz	f_s	44.1 kHz	48 kHz
Frequenz der Masterclock	$f_s \times 256$	11.2896 MHz	12.288 MHz
	$f_s \times 512$	22.5792 MHz	24.576 MHz
	$f_s \times 1024$	45.1584 MHz	49.152 MHz
	$f_s \times 2048$	90.3168 MHz	98.304 MHz

Übersicht über gebräuchliche Sample-Frequenzen und der dazugehörigen Frequenzen der Masterclock