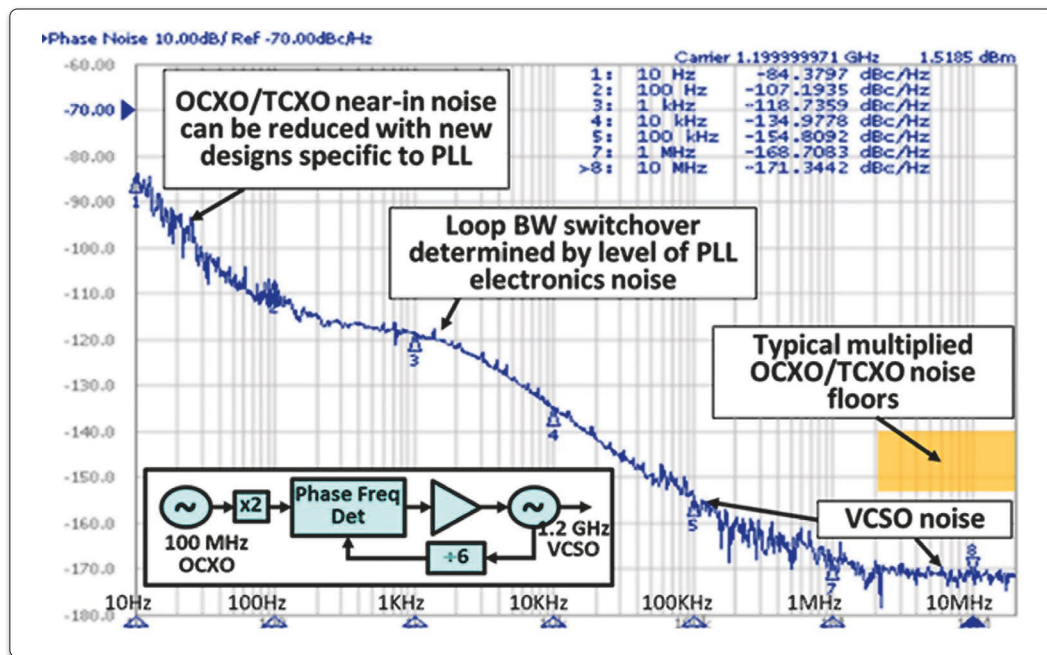


Weltraumtaugliche Quarzoszillatoren – Anforderungen und Lösungen

Dieser Beitrag vermittelt ein fundiertes Verständnis derjenigen Faktoren, die bei der Oszillatorauswahl eine Rolle spielen.



Q-Tech-Oszillatoren, -Taktgeber und -Module, die für verschiedene Rauschanforderungen verwendet werden

Alles begann Mitte der 1950er Jahre mit dem russischen Sputnik. Menschen auf der ganzen Welt beobachteten dieses helle Objekt auf seinem Weg über den nächtlichen Himmel zog. Und so begann das „Weltraumrennen“, bei dem die Überlegenheit im Weltraum zu einer politischen Angelegenheit wurde. AT&T's Telstar wurde 1962 gestartet, der erste zivile Kommunikations-

satellit. Doch anfangs waren fast alle Raumfahrtaktivitäten der USA Weltraumforschungs- und Militärprogramme der Regierung. Der Commercial Space Launch Act von 1984 anerkannte den privaten Sektor für Trägerraketen, Orbital-Satelliten und private Startdienste. Die ersten kommerziellen Satelliten wurden in die geosynchrone Umlaufbahn gebracht. Ein

frühes Beispiel für einen kommerziellen GEO-Satelliten war Syncom 3, der die Übertragung der Olympischen Sommerspiele in Japan 1964 über den gesamten Pazifik ermöglichte. Satelliten in der mittleren Erdumlaufbahn (MEO, 2000 bis 36.000 km hoch) sind nur zwei bis acht Stunden sichtbar.

LEOs auf dem Vormarsch

Das größte Wachstum in der überfüllten Atmosphäre wird sich durch LEO-Satelliten (Low Earth Orbit) in einer Umlaufbahn zwischen 160 und 2000 km über der Erdoberfläche ergeben. Hier ergibt sich eine geringere Ausleuchtzone, im Durchschnitt 1000 Quadratkilometer. Solche Satelliten umkreisen die Erde in etwa 90 Minuten. LEO-Satelliten sind vergleichsweise wesentlich kostengünstiger (pro Satellit) zu starten, verbrauchen viel weniger Energie, müssen jedoch ein System aus vielen Satelliten (Cluster) bilden, um eine kontinuierliche Kommunikation mit festen Antennen zu ermöglichen. OneWeb ist dafür ein frühes Beispiel.

Mittlerweile wird es langsam eng. Gegenwärtig umkreisen ungefähr 3000 betriebsbereite Satelliten unseren Planeten,

Umlaufbahn	Anwendungen
LEO	Kommunikation, Erdbeobachtung, Forschung, Bildgebung, bemannte Raumfahrt (ISS), Militär, Weltraumbeobachtung, Reparatur von Raumfahrzeugen, Versorgungstransport (ISS) und Wetter
MEO	Kommunikation, Navigation
GEO	Kommunikation, Erdbeobachtung, Militär, Forschung, Weltraumerkundung, Weltraumbeobachtung, Wetter
Weltraum	Exploratory Rover, geplante bemannte Raumfahrt, Planetenerkundung, Weltraumerkundung
Trägerraketen	verschiedene Programme

Tabelle 1: Typische Anwendungen für Satelliten in der Erdumlaufbahn

Quelle:
 „New Space Applications Add to Mix of Space-Qualified Crystal Oscillators“
 Scott Sentz,
 Joshua Navarrete
 Q-Tech Corporation
 www.q-tech.com
 übersetzt und gekürzt von FS

Orbit	Industriestandard	Q-Tech-Lösungen
Deep Space	100 kRad	bis zu 300 kRad+
GEO	100 kRad	100 kRad+
MEO	100 kRad	bis zu 100 kRad
LEO	30 kRad	bis zu 50 kRad

Tabella 2: TID, typische Bereiche

aber das verblasst im Vergleich zu den erwarteten 50.000 oder mehr, die in den nächsten zehn Jahren erwartet werden. Dieses explosive Wachstum wird angetrieben durch die exponentiell wachsende Nachfrage nach Satellitennavigation, Internet und Telekommunikation in „Megakonstellationen“. Starlink von SpaceX oder Kuiper von Amazon sind u.a. die Unternehmen, die diese enorme Expansion vorantreiben.

Der Bereich der Satelliten im erdnahen Orbit hat eine völlig neue Klasse von Bauelementen hervorgebracht, die Innovationen bei Quarzoszillatoren erfordern, um entsprechende Leistungs- und Preisvorgaben zu erfüllen. So haben Hersteller von weltraumtauglichen Quarzoszillatoren XOs, TCXOs, VCXOs und andere Oszillatoren entwickelt, um für jede Orbitalanwendung ein optimales Preis/Leistungsverhältnis bieten zu können. Unabhängig vom Orbit haben alle diese Anwendungen eines gemeinsam: die Forderung nach elektronischen Komponenten von höchster Zuverlässigkeit.

Quarzoszillatoren werden vielfach gegenüber alternativen Baugruppen für Zeit- und Frequenzanwendungen bevorzugt. Die Palette der Anwendungen für Satelliten in der Erdumlaufbahn ist recht umfangreich. Tabelle 1 bietet einen allgemeinen Überblick.

Was bestimmt die Performance-Anforderungen?

Alle Satelliten, unabhängig von der Umlaufbahn, benötigen weltraumtaugliche elektronische Komponenten. Zuverlässigkeit bleibt eine wesentliche Anforderung. Hardware ist teuer in der

Herstellung und in der Inbetriebnahme, daher sind in den Entwurf eingebaute Redundanzen sinnvoll. Diese Teile müssen Mindestkriterien für Leistung und Zuverlässigkeit erfüllen, je nach Orbitalposition und erwarteter Lebensdauer.

Quarzoszillator-Gehäuse sind hybride Konstruktionen, die den Quarz und die Schaltung enthalten. Man kennt mehrere Kategorien, wie:

XO - Quarzoszillator

TCXO - Temperaturkompensierter Quarzoszillator

VCXO - Spannungsgesteuerter Quarzoszillator

MCXO - Mikrocomputerkompensierter Quarzoszillator

OCXO - Ofengesteuerter Quarzoszillator

SO - Akustischer Oberflächenwellen-Oszillator (SAW)

VCSO - Spannungsgesteuerter SAW-Oszillator

Welche Betriebsmerkmale und Leistungsfaktoren spielen bei der Auswahl von Quarzoszillatoren je nach Anwendung und Orbitalposition eine Rolle? Es sind:

- Radiation Hardness (Strahlungshärte)
- Frequenzstabilität
- Phasenrauschen und Jitter
- Größe, Gewicht und Leistung (SWaP)

Radiation Hardness: TID und SEE

TID steht für Total Ionizing Dose (Ionisierende Gesamtdosis). Die ionisierende Sonnenstrahlung steigt mit der Höhe des Orbits infolge der nachlassenden Fähigkeit der Atmosphäre, diese zu absorbieren/reflektieren. Ionisierende Strahlung hat keine

Oszillatortyp	Frequenzstabilität
MCXO, OCXO	für „High-End“-Stabilität (im ppb/Teile-pro-Milliarde-Bereich)
TCXO	für ausgezeichnete Stabilität (± 1 bis ± 4 ppm)
Full Space XO, New Space	im Durchschnitt ± 50 bis ± 100 ppm
SO/VCXO	-200 bis +50 ppm Standard bis zu 1,3 GHz

Tabelle 3: Typische Frequenzstabilität nach Oszillatortyp (ohne Aging)

nennenswerte Wirkung auf einen Quarzkristall, aber wie bereits erwähnt sind Quarzoszillatoren Hybridkomponenten. Halbleiterbauelemente sind anfällig für ionisierende Effekte der energiereichen Teilchen der Sonne, die typischerweise durch Sonneneinstrahlung verursacht werden. Die Widerstandsfähigkeit eines Bauelements dagegen wird durch die TID in kRad gekennzeichnet. Je tiefer das Teil im Weltraum, desto höher ist die TID-Anforderung. Typische Bereiche für die TID sind in Tabelle 2 dargestellt.

SEE steht für Single Event Effects (Einzelereignis-Effekte). Zusätzlich erfordern einige Anwendungen, dass die Geräte auf ihre Leistung bei Störereignissen getestet werden, wie kosmische Strahlung oder hochenergetische Protonen, die ein Geräte-Latch-up oder andere Funktionsunterbrechungen auslösen können. SEE-Tests können zeitaufwändig und teuer sein, sind aber für viele hochzuverlässige Anwendungen notwendig.

Frequenzstabilität

Sie wird von zwei wesentlichen Faktoren bestimmt: der intrinsischen (von innen her, aus eigenem Antrieb) Stabilität der Schaltung und der Auswirkung der Temperatur auf den Betrieb. Die Frequenzstabilität ist von großer Bedeutung für Anwendungen, wo der Oszillator in der Navigation, der Kommunikation und anderen präzisen Zeitmessfunktionen eingesetzt wird. Der erforderliche Grad der Stabilität hängt sowohl von der zeitlichen Präzision als auch von der erwarteten Lebensdauer des Systems ab. Im Allgemeinen stellt sich

die intrinsische Frequenzstabilität von Quarzoszillatoren wie in Tabelle 3 beschrieben dar.

Weiter ist die Alterung ist die Alterung wichtig für eine lange Lebensdauer, und hier gilt folgende Reihenfolge, beginnend mit der besten Performance:

- OCXOs, MCXOs $\pm 1,5$ ppm max. über 15+ Jahre
- TCXOs ± 4 ppm max. über 15+ Jahre
- XOs ± 5 ppm max. erstes Jahr; ± 2 ppm pro Jahr danach

Die Schwankungen der Betriebstemperatur werden mit zunehmender Entfernung kritischer LEO-Satelliten erfahren einen breiten Temperaturbereich (-170 bis +123 °C), während sie die Erde umkreisen und dabei zwischen voller Sonneneinstrahlung und völliger Dunkelheit pendeln. MEO- und GEO-Satelliten können sogar Temperaturen von -250 bis +300 °C ausgesetzt sein. Daher verfügen alle Satelliten über ein Wärme-Management, das die Betriebstemperatur intern zwischen -55 bis +85 °C zu halten hat.

Phase Noise und Jitter

Wie bei der Stabilität variieren auch Phasenrauschen und Jitter je nach Gerätetopologie. Im Allgemeinen sieht die Leistungshierarchie wie folgt aus:

- MCXOs - das Beste in der Industrie
- OCXOs - ausgezeichnet
- TCXOs - sehr gut
- XOs - gut, aber übertroffen von:
- SAWs - sehr gutes Grundrauschen

Size, Weight and Power (SWaP)

Bis vor kurzem konnte man sagen, dass eine abnehmende SWaP-Fähigkeit für Satelliten in weiter entfernten Umlaufbahnen und mit längerer Lebensdauer typisch war. Doch mit dem Aufkommen neuer LEO-Konstellationen aus hunderten und möglicherweise tausenden von kleineren Satelliten (s. Tabelle 4) ist die Optimierung von SWaP fast zu einem universellen Ziel geworden.

Zu Größe und Gewicht: Kleinere und leichtere Geräte sind oft erforderlich, da die Entwickler mehr Funktionen in schrumpfende Nutzlasten packen müssen. Aber die Größe des Gehäuses hängt auch von anderen Faktoren ab, wie Stabilität und Temperatur. Gehäusegrößen fallen typischerweise in die folgenden Bereiche, je nach Oszillatortyp. Und das Gewicht steht in direktem Zusammenhang mit der Größe:

- MCXO: 2“ x 1“ x 0,33“ hoch
- OCXOs: bei Weitem die größten (~2“ x 2,5“ x 1,5“ hoch)
- TCXOs: größer als Standard-XO-Hybride (1“ x 1“ x 0,2“ hoch)
- Space XOs: Keramikgehäuse mit Abmessungen von nur 5 x 7 mm; Flatpacks so klein wie 0,374“ x 0,5“
- SAWs: 0,625“ x 0,625“ Flachgehäuse
- Ultra-Miniatur-XO (für neue Zwecke): keramische SMD-Gehäuse mit 3,2 x 5 mm
- MCXO: < 100 mW

- OCXO: 2,7 W bei Raumtemperatur, 4,8 W bei -40 °C
- höhere Leistung bei niedrigeren Umgebungstemperaturen durch Ofenheizung zur Steuerung der internen Temperatur des Oszillators
- TCXOs: 55...80 mA
- traditioneller Space-XO: 10...50 mA
- neuer Space-XO: 2,5 bis ~ 40 mA

Wie zu erwarten, benötigen Oszillatoren mit Temperaturkompensation oder Ofensteuerung mehr Strom als ein einfacher XO.

Warum Q-Tech-Oszillatoren?

Q-Tech kann die strengsten Raumfahrtanforderungen erfüllen, wie 1300+ kRad TID für bestimmte Oszillatortypen, darunter solche für Deep-Space-Missionen, 1 ppb Stabilität in einem MCXO mit bis zu 50 kRad TID bei deutlich geringerer Größe, Gewicht und Leistung im Vergleich zu einem OCXO mit ähnlicher Leistung. Oder Phasenverriegelung eines TCXO/OCXO mit einem SAW in einem Modul zur Erzielung einer optimalen Rauschbodenleistung sowohl bei niedrigen Frequenzen (near-in) als auch bei hohen (far-out). Oder Erzeugung eines LVDS-Taktes mit mehreren Ausgängen in einem einzigen Gehäuse mit bis zu zwölf gepaarten Differenzausgängen, um mehrere FPGAs zu treiben. Oder Bereitstellung eines TCXO-Ultraminiaturtakts für New Space zur Erfüllung strengerer Frequenzanforderungen. Viele weitere Beispiele finden sich in der Originalquelle. ◀

Klasse	typisches Gewicht
Kleinsatelliten	100...500 kg
Mikrosatelliten	10...100 kg
Nanosatelliten	1...10 kg
Pikosatelliten	0,1...1 kg

Tabelle 4: Kleinere Satelliten, die in neuen LEO-Konstellationen verwendet werden