

Der mikrocomputerkompensierte Quarzoszillator ist endlich weltraumtauglich

Die neuesten Fortschritte bei strahlungsbeständigen digitalen Komponenten haben die Entwicklung von MCXOs ermöglicht, die erstmals größere, viel Strom verbrauchende OCXOs in Anwendungen in der erdnahen Umlaufbahn (LEO) ersetzen können.

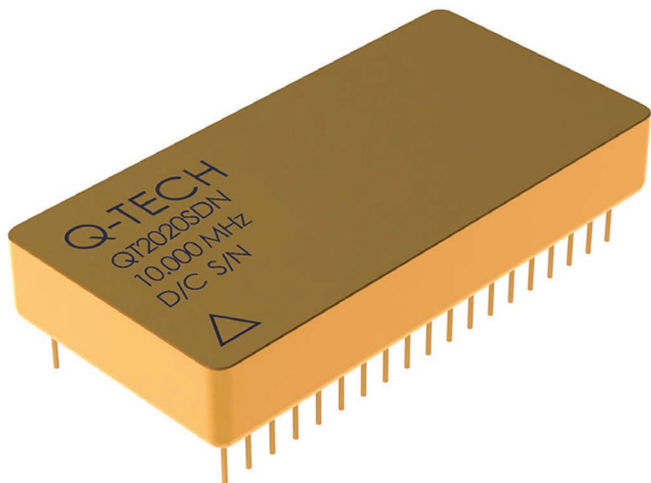


Bild 1: Der kleine und leichte MCXO QT2020 punktet auch mit geringem Stromverbrauch

Seit den neunziger Jahren wird der mikrocomputerkompensierte Quarzoszillator (MCXO) in zahlreichen Anwendungen eingesetzt, darunter in der militärischen und kommerziellen Avionik, in der bodengestützten Elektronik und in der Unterwasser-Ölförderung. Diese kleineren, leichteren und stromsparenderen Geräte können häufig sperrige und stromfressende ofengesteuerte Quarzoszillatoren (OCXOs) ersetzen und bieten gleichzeitig eine vergleichbare Stabilität über einen breiten Betriebstemperaturbereich.



Autor:
Ron Stephens
Q-Tech Corporation
<https://q-tech.com>

Der heilige Gral der MCXO-Anwendungen jedoch ist der Einsatz im Weltraum. Fast jeder Satellit verwendet mindestens einen OCXO für präzises Timing, trotz der großen Nachteile von hohem Stromverbrauch und großen Abmessungen. Hinderlich für den MCXO ist, dass er mehrere digitale Bauteile verwendet, die nur schwer als weltraumtaugliche, strahlungsbeständige Komponenten zu beschaffen sind. Bis jetzt.

Dieser Artikel vergleicht Quarzoszillatortypen und stellt den ersten MCXO vor, der ein ausgeklügeltes technisches Design mit strahlungsbeständigen digitalen Komponenten kombiniert, um sich für New Space-Anwendungen zu qualifizieren.

Quarzoszillatoren

Quarze und die zugehörigen Schaltkreise werden in der Regel sorgfältig entworfen und hergestellt, damit der Quarzkristall nur in der gewünschten Resonanzfrequenz schwingt. Ein eigenständiger Quarzoszillator kann eine Frequenzstabilität von weniger als ± 50 ppm über den weiten militärischen Temperaturbereich von -55 bis $+125$ °C halten, was für die meisten elektronischen Anwendungen gut genug ist.

Ist eine stärker kontrollierte Stabilität über die Temperatur erforderlich, fügt ein temperaturkompensierter Quarzoszillator (TCXO) einen Kompensationsschaltkreis hinzu, um die Temperaturschwankungen der Quarzfrequenz zu korrigieren und kann so etwa ± 1 ppm erreichen.

Für noch mehr Stabilität verwendet ein ofengesteuerter Quarzoszillator die Technik, den Quarz in einen sehr präzisen, proportional gesteuerten Ofen einzubringen, wodurch eine um etwa drei Größenordnungen bessere Frequenzstabilität über die Temperatur erreicht werden kann; der OCXO geht jedoch auf Kosten von viel mehr Größe, Gewicht und Stromverbrauch: Ein typischer OCXO verbraucht mindestens ein paar Watt, während die Leistungsaufnahme von XO's (einfachen Quarzoszillatoren) und TCXOs in Milliwatt gemessen wird. Außerdem haben OCXOs in

der Regel eine bessere Performance bei anderen wichtigen Oszillatorparametern wie Phasenrauschen, Jitter und Langzeitstabilität (Alterung).

Die Vorteile des MCXOs

Mit dem MCXO soll die Performance des OCXOs erreicht werden, jedoch mit einem viel geringeren Stromverbrauch und einer viel schnelleren Aufwärmphase (die Zeit, die ein Oszillator benötigt, um nach dem Einschalten seine erforderliche Stabilität zu erreichen). Die täuschend einfache Methode, mit der der MCXO dies erreicht, besteht darin, den Quarzkristallresonator gleichzeitig auf zwei verschiedenen Frequenzen zu betreiben.

Auf diese Weise und durch Manipulation der so erzeugten Daten wird der MCXO-Quarz zu einem sich selbst abtastenden Thermometer, d.h., der Quarz sagt uns im Wesentlichen genau, welche Temperatur er zu einem bestimmten Zeitpunkt hat, und zwar mit einer sehr hohen Genauigkeit, so dass die Frequenz genauer kompensiert werden kann als bei einem TCXO. Außerdem verbraucht er viel weniger Strom als ein OCXO.

Einer der Hauptgründe für die Überlegenheit der Temperaturkompensation des MCXOs ist, dass die Selbstthermometrie des Quarzkristallresonators die Notwendigkeit eines separaten Temperatursensors überflüssig macht.

Jeder TCXO und OCXO benötigt einen separaten Temperatursensor zur genauen Überwachung der Temperatur des Quarzkristallresonators. Im Falle des OCXOs muss man die Quarztemperatur kennen, um diese kontinuierlich auf die

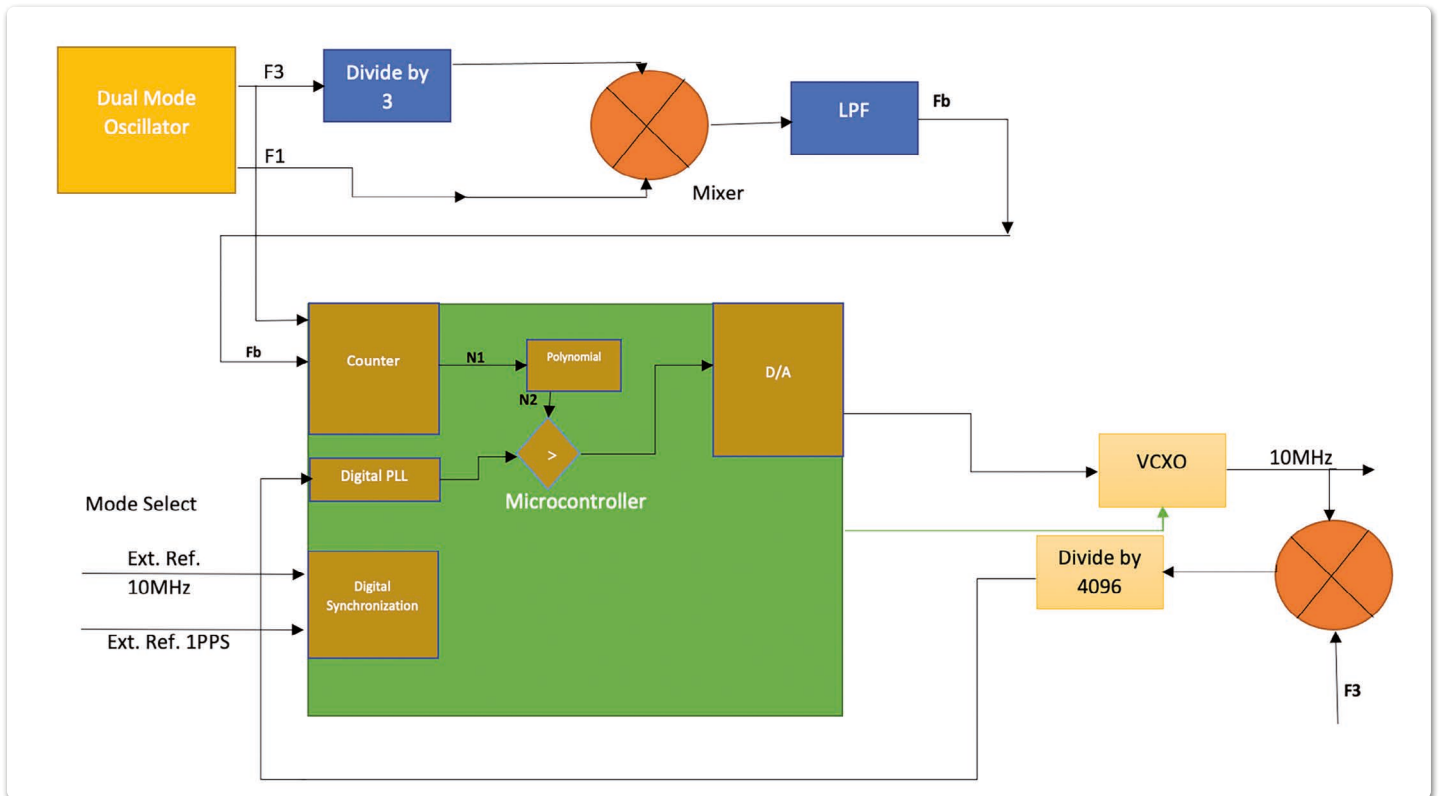


Bild 2: Vereinfachtes Blockdiagramm des MCXOs QT2020

gewünschte Ofentemperatur zu korrigieren. Im Falle des TCXOs ermöglicht die Kenntnis der Temperatur des Quarzes dem Kompensationsschaltkreis, die genaue Korrektur zu berechnen, die aufgrund von Frequenz-Temperatur-Schwankungen erforderlich ist. Die Schwierigkeit besteht darin, dass der Temperatursensor wegen der Massenbelastung und der Verunreinigungseffekte nicht auf dem eigentlichen Quarzresonator angebracht werden kann, sondern an der Außenseite des hermetisch verschlossenen Gehäuses des Kristalls montiert werden muss, und wegen der thermischen Zeitverzögerung wird das Thermometer nie genau die Temperatur des Kristallresonators erreichen.

Der MCXO beseitigt dieses Problem, da der Quarz seine eigene tatsächliche Temperatur in Echtzeit meldet. Wie macht der Quarz das? Indem man den MCXO-Kristall gleichzeitig mit zwei verschiedenen Frequenzen schwingen lässt. Jeder piezoelektrische Kristall kann

in vielen verschiedenen Modi schwingen, jeder mit seiner eigenen Frequenz.

Ein wichtiger Punkt beim Design eines Quarzes ist, dass er bevorzugt in einer bestimmten Mode schwingt. Beim MCXO ist der Quarz jedoch so konstruiert, dass er in zwei Modi gleichzeitig schwingt, wobei einer davon der Grundmode eines Quarzes mit SC-Schnitt entspricht – ein spezieller, doppelt gedrehter Schnitt in Bezug auf die hexagonalen Quarzkristallachsen, der den Kristallen eine hervorragende Temperaturstabilität verleiht. Die zweite Schwingungsmodus ist die des dritten Obertons des Quarzes. Die in Präzisionsoszillatoren verwendeten Quarze können auf einer Grundmode schwingen, wobei die Frequenz proportional zur Dicke des Quarzrohrlings ist, oder auf einem beliebigen ungeraden Oberton.

In diesem Fall wird der dritte harmonische Oberton verwendet, aber die Frequenz des dritten Obertons ist nicht genau dreimal so hoch wie die der Grund-

schwingung, sondern liegt sehr nahe bei 2,999. Dieses Verhältnis schwankt tatsächlich minimal mit der Temperatur, und dieses Verhältnis zwischen der Grundschwingungsfrequenz und der Frequenz des dritten Obertons ist ein äußerst präziser Indikator für die genaue Temperatur des Kristalls zu jedem Zeitpunkt. All dies wird sehr sorgfältig charakterisiert und für jeden MCXO-Quarz gespeichert und dann in Echtzeit verwendet, um die genaue Temperatur auf der Grundlage des Verhältnisses der beiden Frequenzen zu jedem Zeitpunkt zu berechnen.

Das Ergebnis ist, dass der MCXO annähernd die gleiche Performance wie ein guter OCXO erbringen kann, jedoch mit einer Leistung von weniger als 100 Milliwatt im Vergleich zu den drei bis fünf Watt eines OCXO. Die typische Aufwärmzeit eines OCXO beträgt mehr als 10 min gegenüber weniger als einer Minute beim MCXO.

Mit anderen Worten: Der MCXO hat einen um mehr als eine Größenordnung niedrigeren

Stromverbrauch und eine kürzere Aufwärmzeit als ein OCXO. Für einige Anwendungen ist dies revolutionär.

Entwicklung weltraumtauglicher MCXOs

Bei der Entwicklung von MCXOs in den frühen 2000er Jahren waren die benötigten digitalen, strahlungsbeständigen Komponenten für die Raumfahrt sehr teuer, was bedeutete, dass ein solches MCXO-Produkt für hunderttausende von Dollar (pro Stück!) verkauft wurde.

Zu Beginn der Ära der Mega-Satellitenkonstellationen, die auch als LEO- (erdnahe Umlaufbahn) oder New-Space-Anwendungen bekannt sind, wurde es möglich, Mikrocontroller und andere digitale Komponenten am Markt zu finden, die strahlungstolerant sind und up-gescreent werden können. Diese digitalen Komponenten wurden im QT2020 (Bild 1) eingesetzt, der 2021 auf den Markt kam und nun vollständig für den Einsatz in LEO-New-Space-Anwendungen qualifiziert ist.

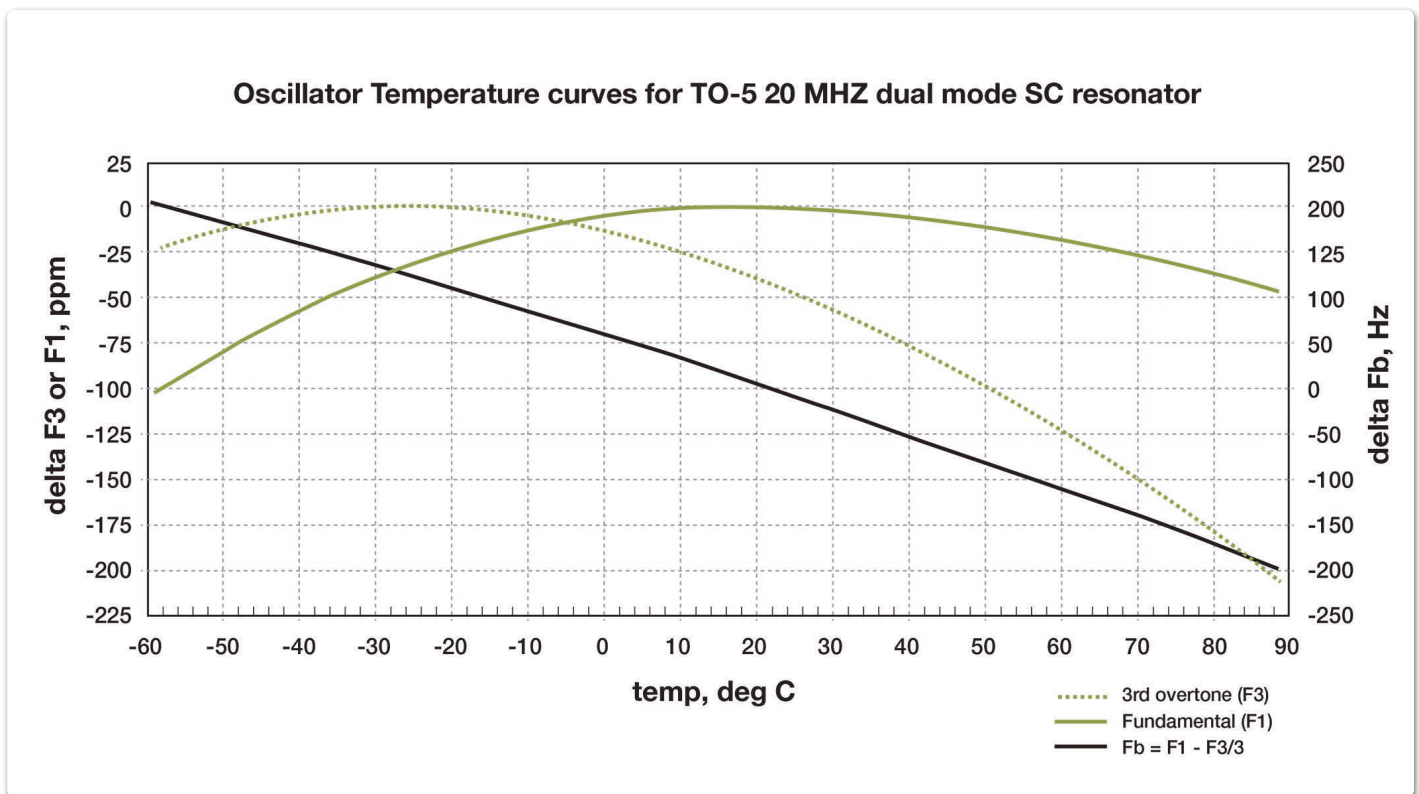


Bild 3: Die Leistungsmerkmale des QT2020

Der QT2020 verwendet ausschließlich strahlungsbeständige Komponenten. Die Produktserie ist mit Frequenzen bei 10, 20, 30, 40, 50, 60 oder 80 MHz erhältlich mit einer Stabilität von nur ± 10 ppb und mit einem $2 \times 1 \times 0,33$ Zoll großen Gehäuse. Und sie bietet die hohe Performance eines OCXOs, aber mit weniger als 90 mW Leistungsaufnahme.

Der QT2020 ist nun ein Standardprodukt, das problemlos und kostengünstig beschafft werden kann. Die Preise variieren je nach Stabilität und anderen Optionen. Zum Beispiel kann eine vollständige RAD-Hard-Version entwickelt werden, wenn die Anwendung einen höheren Preis rechtfertigt.

Der QT2020 wurde für eine TID bis zu 50 krad(Si) getestet,

ohne dass Probleme auftraten, und der Stromverbrauch blieb mit Anstieg der Strahlungs-dosis völlig konstant – was optimistisch stimmt, dass die SEE Ergebnisse ebenfalls gut sein werden. Der SEE-Einzelereignistest wird derzeit vorbereitet.

Bild 2 zeigt ein vereinfachtes Blockdiagramm. Die Signale des Dualmode-Oszillators werden zur Erzeugung der Schwebungsfrequenz abgemischt, nachdem sie durch einen Frequenzteiler normiert wurden. Die Schwebungsfrequenz ist eine Differenz zwischen zwei Oszillatormodi und stellt die Quarztemperatur dar. Er speist den Zähler des Mikrocontrollers, um den digitalen Temperaturwert N1 zu erzeugen. Die Daten für N1 werden erfasst und im Speicher des Mikrocontrollers gespeichert. Für jedes N1 liefert eine Poly-

nomberechnung den Korrekturkoeffizienten N2. Ein 10-MHz-VCXO liefert das Signal an einen der Mikrocontroller-Zähler, das mit dem F_0 -Signal verglichen wird. Hier wird die N2-Korrektur angewendet. Ein DAC legt eine Steuerspannung an den VCXO an, um ihn auf der Zielfrequenz zu halten.

Das Diagramm in Bild 3 zeigt, wie der Dualmode-SC-Schnitt-Quarz als selbsterkennendes Thermometer funktioniert. Die gestrichelte gekrümmte Linie ist die Frequenz-Temperatur-Kurve für den Grundton des Kristalls, und die durchgezogene gekrümmte Linie ist die Frequenz-Temperatur-Kurve für den dritten Oberton des Kristalls. Wenn der Oszillator bei einer bestimmten Temperatur gemessen wird, wird der Messwert für den dritten Oberton (geteilt durch 10) durch den Messwert für den Grundton geteilt, und das sich daraus ergebende Verhältnis wird als Beat Frequenz bezeichnet und fällt auf die Gerade. Dies zeigt genau, bei welcher Temperatur sich der Quarz zu diesem Zeitpunkt befindet, da der

betreffende Quarz genau dafür charakterisiert wurde, wie seine Schwebungsfrequenz linear mit der Temperatur variiert.

Die wichtigsten Leistungsmerkmale des QT2020 zeigen, dass er in Bezug auf Größe, Gewicht, Stromverbrauch und Aufwärmzeit deutlich besser ist als jeder OCXO und in Bezug auf die Frequenzstabilität deutlich besser ist als jeder TCXO.

Fazit

Der QT2020 füllt eine Nische mit viel besserer Stabilität als der beste TCXO und bietet die gleiche Stabilität und das gleiche Rauschen wie typische OCXOs. Er zeichnet sich außerdem durch einen extrem niedrigen Stromverbrauch, eine geringe Größe und eine schnelle Aufwärmzeit aus und ist vollständig zertifiziert und für einen TID-Wert von bis zu 50 krad(Si) ausgelegt. Die Zeit wird es zeigen, aber dieser strahlungsgehärtete MCXO verspricht eine revolutionäre Technologie zu werden. ◀

Zum Autor:

Ron Stephens ist der ehemalige Präsident der Q-Tech Corporation. Er hat Abschlüsse in Physik, Mathematik und Operations Research und verfügt über 47 Jahre Erfahrung in der Quarz-oszillatorbranche.