

MEMS- vs. Quarz-Oszillatoren für GPS-Systeme



Ein Quarz-TCXO wurde mit einem SiTime MEMS Super-TCXO unter kontrollierten Luftstrom- und Temperaturanstiegs-Bedingungen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, wie sich die Frequenzsteigung direkt auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von GNSS auswirkt und warum MEMS-Oszillatoren eine einzigartig leistungsstarke Lösung für diese Herausforderungen sind.

TCXOs für stabile Zeitreferenzen

GPS-Empfänger sind bekanntlich auf stabile Zeitreferenzen angewiesen, um die Satellitenverbindung aufrechtzuerhalten und genaue Positionsdaten zu liefern. Diese Anforderung wird letztlich vom temperaturkompensierten Quarzoszillator (TCXO) erfüllt, der die Referenzfrequenz erzeugt, die die Phasenverriegelung mit GPS-Signalen ermöglicht. Während Ingenieure viel Wert auf die Frequenzgenauigkeit, Langzeitstabilität und Jitter-Leistung des Oszillators legen, ist ein ebenso wichtiger, aber weniger beachteter Parameter die Frequenzsteigung in Abhängigkeit von der Temperatur (dF/dT). Diese Kennzahl definiert die Verschiebung der Ausgangsfrequenz des Oszillators, wenn das Gerät einer Temperaturänderung von 1 K ausgesetzt ist.

In statischen Umgebungen in denen sich die Temperatur nur langsam ändert, können herkömmliche TCXOs auf Quarzbasis eine ausreichende Leistung aufrechterhalten, da Korrekturalgorithmen in GPS-Empfängern allmähliche Abweichungen ausgleichen können. In der Praxis sind jedoch stabile Temperaturverhältnisse selten.

Fahrzeuginnenräume erwärmen sich unter direkter Sonneneinstrahlung schnell oder kühlen sofort ab, wenn die Belüftungssysteme eingeschaltet werden. Unbemannte Luftfahrzeuge (UAVs) sind abrupten Temperaturgradienten ausgesetzt, wenn sie ihre Höhe ändern oder bei böigen Bedingungen fliegen. Industrieanlagen und Verteidigungssysteme sind ständig Luftströmungen, Erwärmungs- und Abkühlungszyklen ausgesetzt. In jedem dieser Fälle muss der Oszillator auf schnelle und unvorhersehbare Temperaturänderungen reagieren.

Quarz-TCXOs sind für diese Umgebungen schlecht geeignet, da ihre Frequenz-Temperatur-Steigung eine höhere Amplitude aufweist und Nichtlinearitäten zeigen kann. Bei Luftströmung oder schneller Erwärmung zeigen Quarzgeräte schnelle, große Frequenzsprünge, die die Korrekturfähigkeit von GNSS-Empfängern übersteigen. Diese Frequenzsprünge beeinträchtigen die Positionsgenauigkeit, verursachen übermäßige Abweichungen und können in schweren Fällen zum vollständigen Verlust der Satellitenverbindung führen. Während vorübergehender Ereignisse können sich Fehler von einer Basislinie von wenigen Zentimetern (RTK-Verriegelung) auf Meter ausweiten und auf hunderte von Metern ansteigen, wodurch das System für die Navigation oder Zeitsynchronisation unzuverlässig wird.

Eine neue Klasse von Oszillatoren

Um diese Einschränkung zu überwinden, hat SiTime eine neue Klasse von Oszillatoren entwickelt, die die Technologie mikroelektromechanischer Systeme (MEMS) nutzen. Im Gegensatz zu Quarz verwenden MEMS-Oszillatoren vollständig siliziumbasierte Prozesse und innovative Temperaturkompensationstechniken, die eine hervorragende thermische Nachführung, Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung und einen lineareren Frequenzgang über Temperaturschwankungen hinweg bieten. Bei der Implementierung als MEMS-basierte TCXOs können diese auch bei plötzlichen Umweltveränderungen einen stabilen Betrieb aufrechterhalten, sodass GNSS weiter optimal arbeiten kann.

Die Bedeutung der dynamischen Frequenzstabilität wird deutlich, wenn man die Auswirkungen auf Systemebene betrachtet. Ingenieure entwickeln GNSS-Korrekturschleifen, um die Drift des Oszillators zu verfolgen, aber ihre Bandbreite ist begrenzt. Sobald die Oszillatorverschiebung diese Korrekturgrenze überschreitet, kommt es

entweder zu Positionsfehlern, oder der Empfänger verliert die Synchronisation mit den Satelliten vollständig. Für sicherheitskritische Anwendungen, wie die Navigation in Kraftfahrzeugen, den Flug von Drohnen und die Kommunikation im Verteidigungsbereich, sind die Kosten einer solchen Instabilität inakzeptabel.

Temperaturkompensations-Mechanismen

In Quarz-TCXOs erreichen Systeme eine Kompensation, indem sie die Temperatur des Kristalls messen und Korrekturspannungen anlegen, um die zu erwartende Drift auszugleichen. Diese Methode ist bei allmählichen Temperaturänderungen wirksam, reagiert jedoch weniger schnell bei schnellen Übergängen. Quarzkristalle weisen bei starken Temperaturgradienten nichtlineare Frequenzverschiebungen auf, was bedeutet, dass das Korrektursystem hinter der Realität zurückbleibt.

MEMS-Oszillatoren verfolgen einen anderen Ansatz. Die Reaktion des Siliziumresonators auf Temperatur ist von Natur aus linearer, und seine geringe thermische Masse ermöglicht ein schnelleres Gleichgewicht. In Kombination mit integrierten Temperatursensoren und fortschrittlichen Kompensationsalgorithmen erreichen MEMS-TCXOs sowohl eine hohe Genauigkeit als auch eine schnelle Korrektur, selbst unter dynamischen Umgebungsänderungen.

Bedeutung von dF/dT

Es ist üblich, die Frequenzgenauigkeit oder die Langzeitalterung zu bewerten. Diese Parameter sind zwar wertvoll, erfassen jedoch nicht die Frequenzneigung in Bezug auf die Temperatur. Ein Oszillator mit ausgezeichneter statischer Genauigkeit, aber schlechtem dF/dT kann einen GNSS-Empfänger destabilisieren, wenn sich seine Frequenz durch Luftströmungen oder Thermoschocks abrupt verschiebt. Im Gegensatz dazu sorgt ein Oszillator mit vorhersagbarem und linearem dF/dT dafür, dass die Korrekturschleifen des Empfängers innerhalb des Bereichs bleiben, wodurch die Positionsgenauigkeit und die Satellitenverriegelung erhalten bleiben.

Wenn man diese Grundlagen versteht, wird klar, warum MEMS-basierte TCXOs einen bedeutenden Fortschritt für die GNSS-Zeitmessung darstellen. Sie beheben die Schwächen von Quarzgeräten und sind gleichzeitig mit etablierten Empfängerarchitekturen kompatibel.

Quelle:
„MEMS Oscillators vs. Quartz in Rapid Temperature Transients for GPS Systems“
SiTime
www.sitime.com
übersetzt und gekürzt von FS

Testaufbau und Methodik

Um die Leistung von Oszillatoren in dynamischen Umgebungen zu bewerten, hat SiTime ein kontrolliertes Experiment entwickelt, bei dem ein Quarz-TCXO und ein SiTime-MEMS-Super-TCXO unter identischen Bedingungen getestet werden. Ziel war es, den Einfluss von dF/dT auf die Genauigkeit von GNSS-Empfängern bei schnellen Temperaturschwankungen zu isolieren. Die Testplatine integriert zwei identische GNSS-Empfänger, die jeweils für eine horizontale Genauigkeit von 2,5 m ausgelegt sind. Ein Empfänger wurde mit einem Quarz-TCXO und der andere mit einem SiTime-MEMS Super-TCXO mit einer Stabilität von 0,5 ppm getaktet. Ein Widerstandstemperatur-Detektor (RTD) auf der Platine sorgte für eine kontinuierliche Temperaturüberwachung. Das System wurde bei lokalem Luftstrom (Ventilator) und einer kontrollierten Temperaturrampe für schnelles Erhitzen der Oszillatoren untersucht.

Während beider Tests wurden die folgenden Daten erfasst:

- GNSS-Positionsdiagramme, die die Echtzeit-Drift des Empfängers vom ursprünglichen Fixpunkt zeigen
- Satellitenverriegelungs-Status und Anzahl der aktiven Satelliten, um zu verfolgen, ob der Empfänger die Phasensynchronisation aufrechterhalten hat
- Temperatur-Frequenz-Diagramme zum direkten Vergleich der thermischen Reaktionen

Luftströmung und Temperaturanstiege sind zwei der häufigsten und unvermeidbaren Stressfaktoren für Oszillatoren, die in Automobil-, Industrie- und Luftfahrtsystemen eingesetzt werden. Die Vergleichstests zeigen deutlich die Grenzen von Quarz-TCXOs bei schnellen thermischen Störungen und die Widerstandsfähigkeit von SiTime-MEMS-Super-TCXOs.

Analyse der Empfänger-Korrekturgrenzen

GNSS-Empfänger verwenden frequenz- und phasenverriegelte Schleifen (PLLs), die von Korrekturalgorithmen gesteuert werden, um die Oszillatorabweichung zu verfolgen. Diese Systeme haben jedoch eine begrenzte Bandbreite, die durch das empfangene Signal/Rausch-Verhältnis begrenzt ist. Die Luftstrom- und Rampentests zeigen, dass Quarzgeräte regelmäßig Frequenzsprünge erzeugen, die diese Bandbreite überschreiten, wodurch der Empfänger entweder eine verminderte Genauigkeit oder einen Verlust der Verriegelung erleidet. MEMS-Oszillatoren bewirken mit ihrem lineareren dF/dT -Verhalten, dass Frequenzschwankungen innerhalb des Korrekturfensters des Empfängers bleiben. Dieser Unterschied ist entscheidend für die Aufrechterhaltung der Genauigkeit in realen Umgebungen. MEMS-basierte Zeitmesslösungen bieten eine stabile Positionierung, wo Quarzgeräte versagen, sodass Systeme unter Bedingungen, die für Anwendungsfälle in der Automobil-, Industrie- und Luftfahrtbranche repräsentativ sind, innerhalb der Spezifikationen bleiben.

Das unterschiedliche Verhalten von Quarz- und MEMS-Oszillatoren unter dynamischen thermischen Bedingungen ist auf grundlegende Unterschiede in den Materialeigenschaften, der strukturellen Auslegung und der Kompensationsarchitektur zurückzuführen. Das Verständnis dieser Unterschiede verdeutlicht, warum Quarzoszillatoren in Luftstrom- und Temperaturrampentests versagen, während MEMS-basierte TCXOs ihre Stabilität beibehalten.

Technische Analyse:

Physik von Quarz vs. MEMS

Obwohl Quarz unter stationären Bedingungen effektiv ist, reagiert er sehr empfindlich auf schnelle Temperaturänderungen.

1. Thermische Gradienten und Nicht-linearität: Wenn Quarz-TCXOs schnellen thermischen Transienten ausgesetzt sind, wird ihre Leistung in erster Linie durch die Bandbreite der Feed-Forward-Kompensationsschleife begrenzt, die typischerweise unter 10 Hz liegt. Diese schmale Bandbreite verhindert, dass die Korrekturschaltung mit schnellen Frequenzverschiebungen bei plötzlichen Temperaturänderungen Schritt halten kann. Ein weiterer Faktor ist die räumliche Trennung zwischen dem Temperatursensor und dem Quarzresonator. Da der Sensor die Temperatur des Resonators nicht direkt misst, kommt es zu einer thermischen Verzögerung, und die angewendete Korrektur hinkt der tatsächlichen Frequenzantwort des Kristalls hinterher.

2. Pops und Mikro-Sprünge. Quarzbauteile weisen bei zufälligen Temperaturen plötzliche und große Frequenzsprünge auf. Dies wird durch mechanische Unvollkommenheiten im Quarzgitter verursacht und kann selbst bei Bauteilen, die im Werk vollständig geprüft wurden, zufällig auftreten.

3. Alterung und Verpackungstress: Unter dynamischen Bedingungen manifestieren sich Spannungen als Hysterese (Frequenzverschiebungen, die von der aktuellen Temperatur und der thermischen Vorgeschichte abhängen). Dies verstärkt die Unvorhersehbarkeit von Quarzoszillatoren in Feldanwendungen.

4. Fehlanpassung des Korrekturalgorithmus: GNSS-Empfänger gehen davon aus, dass die Oszillatordrift relativ gleichmäßig ist und mit phasenverriegelten Schleifen verfolgt werden kann. Quarzoszillatoren unter schnellen Temperaturschwankungen verstoßen gegen diese Annahme.

Vorteile von MEMS-Oszillatoren

MEMS-Oszillatoren nutzen siliziumbasierte Resonatoren, die mit Halbleiterprozessen hergestellt werden. Diese Architektur bietet mehrere inhärente Vorteile in dynamischen Umgebungen:

- **hervorragende thermische Nachführung**
Die thermischen Ausdehnungseigenschaften von Silizium und das strukturelle Design von MEMS sorgen für eine gleichmäßigere Temperaturreaktion. Bei schneller Erwärmung oder Abkühlung behalten MEMS-Geräte einen linearen dF/dT -Wert bei, wodurch Frequenzverschiebungen vorhersehbar bleiben.
- **unempfindlich gegenüber Mikro-Sprünge**
Die MEMS-Siliziumkonstruktion weist keine Unvollkommenheiten auf, die bei Quarzgeräten zu Mikro-Sprünge führen.
- **mechanische Robustheit**
MEMS-Resonatoren sind deutlich kleiner und weniger anfällig für Verbiegen oder Verziehen als Quarzkristalle. Ihre reduzierte Masse und kompakte Geometrie minimieren die Ansammlung mechanischer Spannungen und eliminieren viele der bei Quarz auftretenden Hystereseffekte.
- **integrierte Kompensation**
MEMS-TCXOs verwenden ein duales MEMS-Schema, bei dem der MEMS-Temperatursensor dasselbe Substrat wie der MEMS-Resonator nutzt und die Frequenzreferenz für die PLL erzeugt, wodurch die thermische Verzögerung auf nahezu 0 reduziert wird.

Anwendungsrelevanz

- Automobilnavigation
- unbemannte Luftfahrzeuge (UAVs)
- industrielle und IoT-Anwendungen
- Verteidigung und Luft- und Raumfahrt

Fazit

Durch die einzigartige Kombination aus Oszillatorstabilität und Zuverlässigkeit auf Systemebene setzen MEMS-TCXOs einen neuen Standard für die GNSS-Zeitmessleistung und ebnen den Weg für Positionierungstechnologien der nächsten Generation. ◀