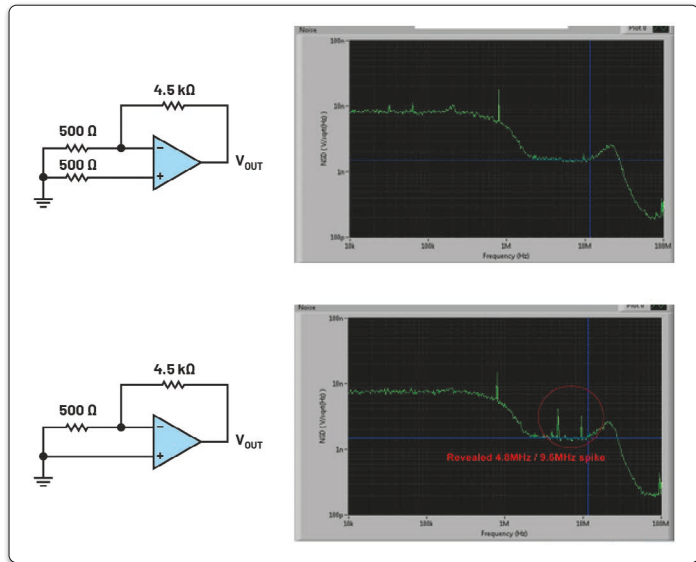


Zero-Drift-Verstärker in Anwendungen mit höherer Bandbreite

Der Beitrag befasst sich mit automatischer Offset-Korrektur in Operationsverstärkern mittels Chopping-Techniken und Auto-Zero-Verfahren und erläutert, wo durch diese Korrekturverfahren Artefakte entstehen.



Im Weiteren werden Konzepte besprochen, mit denen Verstärkerentwickler den Artefakten beikommen. Anschließend wird erläutert, wie sich die Auswirkungen verbleibender AC-Artefakte in einer Präzisions-signalkette minimieren lassen, einschließlich Anpassung der Impedanz der Eingangsquelle, Filterung und Frequenzplanung.

Einführung

Driftfreie Operationsverstärker (Zero-Drift) nutzen Chopping-, Auto-Zeroing- oder eine Kombination aus beiden Techniken, um unerwünschte niederfrequente Fehler wie Offset- und 1/f-Rauschen zu entfernen. Traditionell wurden Zero-Drift-Verstärker nur in Anwendungen mit

geringer Bandbreite eingesetzt, da die erwähnten dynamischen Techniken bei höheren Frequenzen Artefakte erzeugen. Schaltungen mit höherer Bandbreite können jedoch ebenfalls von den ausgezeichneten DC-Eigenschaften moderner Zero-Drift Operationsverstärker profitieren, sofern beim Systemdesign Hochfrequenzfehler wie Restwelligkeit, Glitches und Intermodulationsverzerrungen (IMD) einbezogen werden.

Zero-Drift-Techniken

Die Chopping-Technik wird in [1–7] beschrieben. Diese erste Zero-Drift-Technik nutzt die Modulation, um Offsets und Niederfrequenzrauschen vom Signalinhalt zu trennen, indem die Fehler auf höhere Frequenzen moduliert werden.

Bild 1 zeigt, wie das Chopping das Eingangssignal (blaue Wellenform) zu einer Rechteckwelle moduliert (b), das Signal im Verstärker verarbeitet (c) und es dann am Ausgang wieder in

eine Gleichspannung demoduliert (d). Gleichzeitig werden die niederfrequenten Fehler (rote Wellenform) im Verstärker zu einer Rechteckwelle moduliert (c), am Ausgang durch Demodulation wieder zurückgewonnen und schließlich durch das Tiefpassfilter geleitet (d). Die Offset- und Rauschkomponenten (Bild 2, rotes Signal) des inneren Verstärkers erscheinen unmoduliert an dessen Ausgang (c), werden durch die Ausgangs-Chopping-Schalter auf die Chopping-Frequenz f_{CHOP} moduliert und schließlich durch das Tiefpassfilter ausgefiltert (d). Da eine Modulation mit Rechteckwellen verwendet wird, erfolgt diese Aufprägung um ungerade Vielfache der Modulationsfrequenz.

Entsprechendes geschieht auch im Frequenzbereich. Es wird das Eingangssignal (Bild 2b, blaues Signal) auf die Choppingfrequenz moduliert, von der Verstärkerstufe bei f_{CHOP} verarbeitet (c), am Ausgang durch Demodulation wieder zurückgewonnen und schließlich durch das Tiefpassfilter geleitet (d). Die Offset- und Rauschkomponenten (Bild 2, rotes Signal) des inneren Verstärkers erscheinen unmoduliert an dessen Ausgang (c), werden durch die Ausgangs-Chopping-Schalter auf die Chopping-Frequenz f_{CHOP} moduliert und schließlich durch das Tiefpassfilter ausgefiltert (d). Da eine Modulation mit Rechteckwellen verwendet wird, erfolgt diese Aufprägung um ungerade Vielfache der Modulationsfrequenz.



Autor:
Simon Basilio
Design Engineer
Analog Devices
www.analog.com

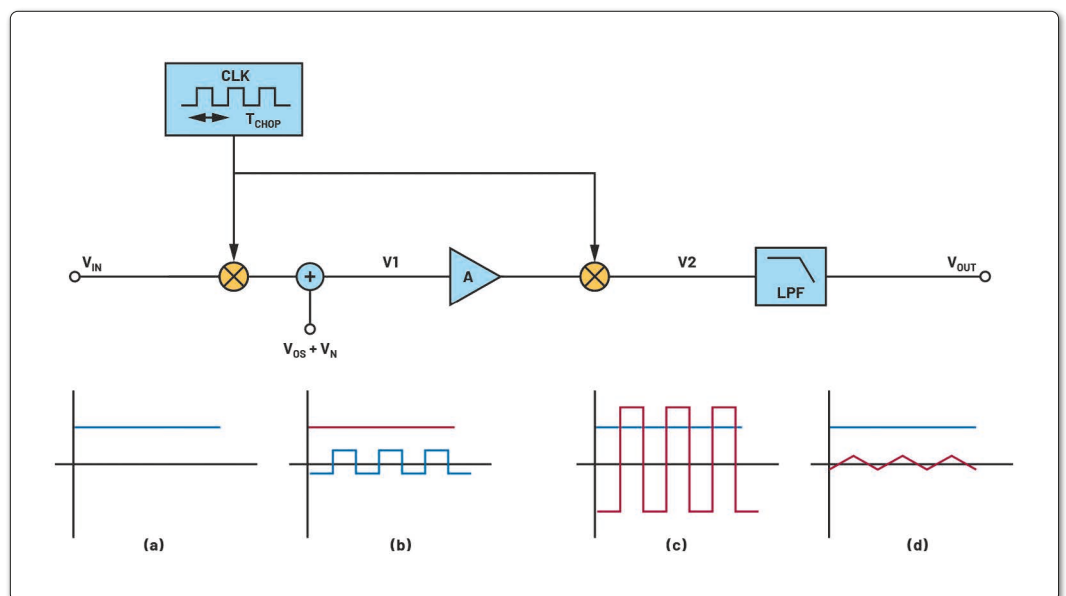


Bild 1: Wellenformen des Signals (blau) und der Fehler (rot) bei (a) Eingang, (b) V_1 , (c) V_2 und (d) V_{OUT} im Zeitbereich

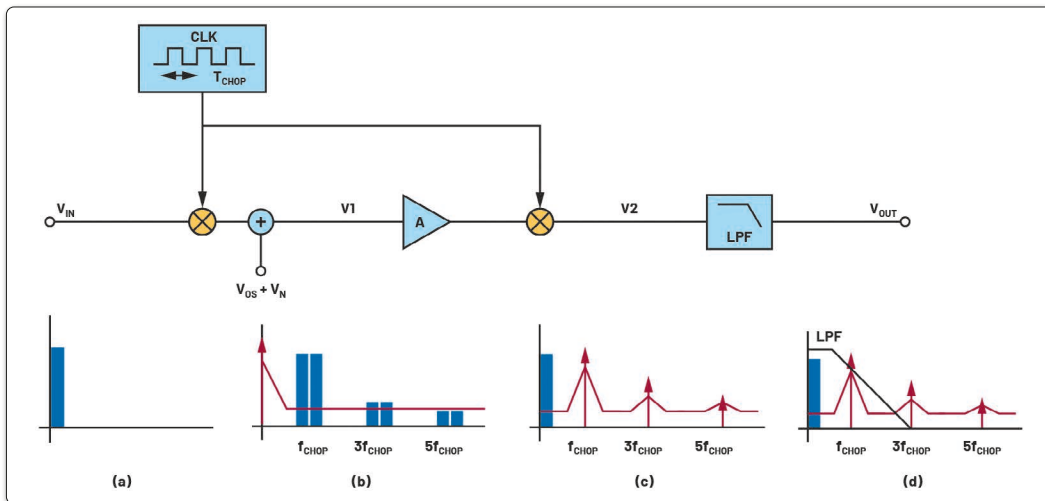


Bild 2: Spektrum des Signals (blau) und der Fehler (rot) bei (a) Eingang, (b) V_1 , (c) V_2 und (d) V_{OUT} im Frequenzbereich

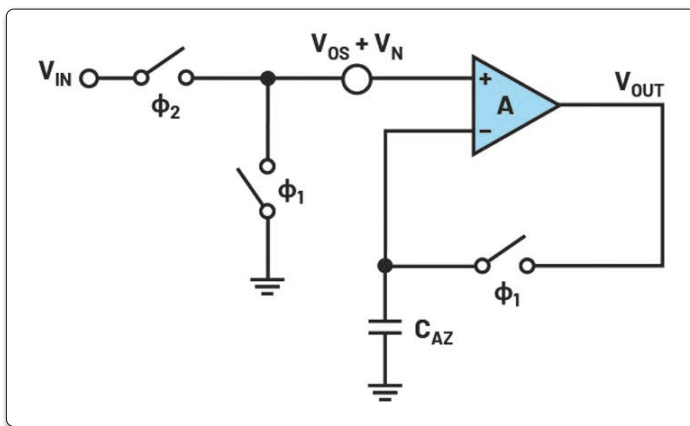


Bild 3: Grundsaltung eines Auto-Zero-Verstärkers

Die Bilder im Frequenz- und Zeitbereich zeigen, dass nach Filterung des modulierten Rauschens und Offsets ein Restfehler bestehen bleibt, da das Tiefpassfilter nicht unendlich steilflankig arbeitet.

Die Auto-Zero-Technik wird in [1–3, 5–7] vorgestellt und ist ebenfalls eine dynamische Korrekturtechnik, bei der in einem Verstärker niederfrequente Fehlerquellen abgetastet und subtra-

hiert werden. Bild 3 zeigt einen einfachen Auto-Zero-Verstärker. Dieser besteht aus einem Verstärker mit Offset und Rauschen, Schaltern zur Rekombination des Ausgangssignales aus dem Eingangssignal und einem Kondensator für die Auto-Zero-Abtastung.

In der Auto-Zero-Phase wird der Eingang der Schaltung mit dem Schalter 1 auf ein gemeinsames Spannungspotential gebracht,

und der Auto-Zero-Kondensator tastet die Eingangsoffsetspannung und das Rauschen ab. Der Verstärker steht in dieser Phase nicht für die Signalverstärkung zur Verfügung. Damit ein Auto-Zero-Verstärker kontinuierlich arbeiten kann, müssen zwei identische Kanäle wechselweise zusammenarbeiten. Dies wird als Ping-Pong-Autozeroing bezeichnet.

In der Verstärkungsphase 2 liegt die Eingangsspannung am Verstärker an, und er kann das Signal verstärken. Das niederfrequente Rauschen, der Offset und die Drift werden durch Auto-Zeroing kompensiert, und der verbleibende Fehler ist die Differenz zwischen dem aktuellen Fehlerwert und dem davor abgetasteten Fehlerwert. Da sich niederfrequente Fehlerquellen von 1 zu 2 nur wenig ändern, funktioniert diese Subtraktion sehr gut. Hochfrequentes Rauschen hingegen wird auf das Basisband gespiegelt (Aliasing) und führt zu einem erhöhten weißen Rauschen (Bild 4).

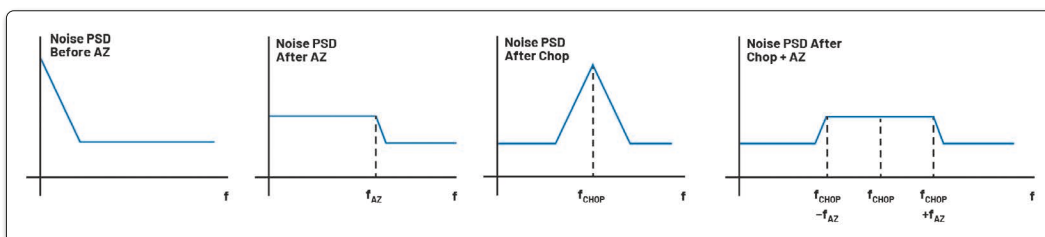


Bild 4: Rauschspektraldichte (Noise PSD) vor dem Chopping oder Auto-Zeroing (AZ), nach Auto-Zeroing (AZ), nach dem Chopping und nach Chopping und Auto-Zeroing

Aufgrund der Rauschfaltung und der Tatsache, dass ein zusätzlicher Kanal für den kontinuierlichen Betrieb erforderlich ist, kann das Chopping gegenüber Auto-Zeroing eine energieeffizientere Zero-Drift-Technik für Standalone-Operationsverstärker darstellen [2].

Artefakte

Chopping-Artefakte beschreiben [1–3, 5–7]. Obwohl sich das Chopping gut eignet, um unerwünschten Offset, Drift und 1/f-Rauschen zu entfernen, erzeugt es unerwünschte AC-Artefakte wie Ausgangswelligkeit und Glitches.

Bei seinen neueren Zero-Drift-Produkten hat Analog Devices Maßnahmen umgesetzt, welche die AC-Artefakte verringern und sie bei höheren Frequenzen ansiedeln. Dies erleichtert die Filterung auf Systemebene.

Ripple-Artefakte: Die Restwelligkeit ist ein grundsätzliches Resultat der Chopping-Modulationstechnik, welche die niederfrequenten Fehler zu den ungeraden Oberwellen der Choppingfrequenz verschiebt. Verstärkerentwickler nutzen mehrere Ansätze, um die Negativeffekte der Restwelligkeit zu verringern:

- Offset-Trimming in der Produktion

Der nominale Offset lässt sich durch einmaliges Anfangs-Trimmen erheblich verringern. Offsetdrift und 1/f-Rauschen bleiben jedoch bestehen.

- Kombination von Chopping und Auto-Zeroing

Beim Verstärker erfolgt zunächst ein Auto-Zeroing mit anschließendem Chopping, um die erhöhte Rauschspektraldichte (NSD) auf eine höhere Frequenz zu modulieren. Bild 4 zeigt das resultierende Rauschspektrum nach dem Chopping und Auto-Zeroing.

- Autokorrektur-Feedback (ACFB)

Eine lokale Rückkopplungsschleife (Auto Correction Feedback) kann verwendet werden,

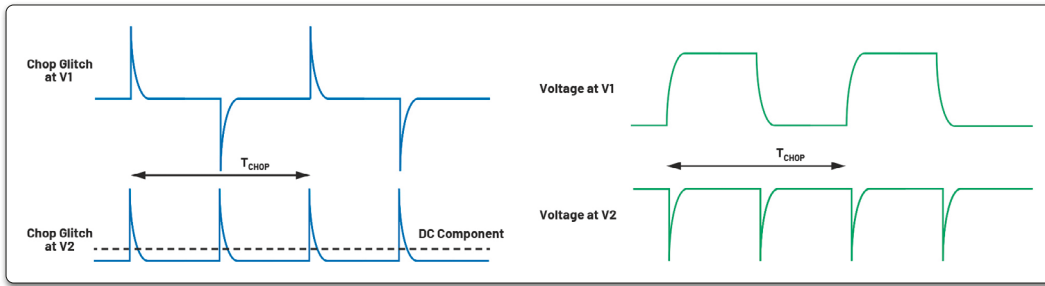


Bild 5: Links Spannungsspitzen durch Ladungsinjektion auf V_1 (innerhalb der Chopping-Strecke) und V_2 (hinter den Chopping-Schaltern) aus Bild 1; rechts durch endliche Verstärkerbandbreite verursachte Spannungsspitzen auf V_1 und V_2 aus Bild 1

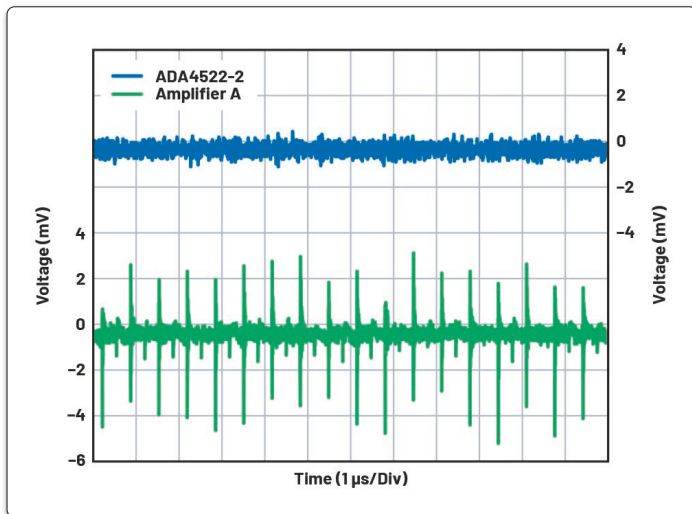


Bild 6: Spannungsspitzen werden im ADA4522 auf das Grundrauschen verringert [8]

um die modulierte Restwelligkeit am Ausgang zu erfassen und die niederfrequenten Fehler an ihrer Quelle zu minimieren.

Glitch-Artefakte kommen hinzu. Glitches sind transiente Spannungsspitzen, die aufgrund einer Ladungsinjektion durch Fehlanpassung der Chopping-Schalter entstehen. Die Höhe der Glitches

hängt von vielen Faktoren ab, unter anderem von der Quellenimpedanz und der Ladungsfehlanspassung [1]. Die Spannungsspitzen verursachen nicht nur Artefakte bei den geraden Oberwellen der Choppingfrequenz, sondern erzeugen auch einen Rest-Gleichspannungs-Offset, welcher proportional zur Choppingfrequenz ist.

Bild 5 (links) zeigt die Spannungsspitzen auf V_1 (innerhalb der Chopping-Strecke) und V_2 (hinter den Ausgangs-Chopping-Schaltern) aus Bild 1. Zusätzliche Glitches bei geradzahligem Oberwellen der Choppingfrequenz werden durch die endliche Bandbreite des Verstärkers verursacht (rechts).

Genau wie gegen die Restwelligkeit verfügen Verstärkerentwickler auch über Verfahren, um die Auswirkungen von Spannungsspitzen in Zero-Drift-Verstärkern zu verringern:

- Ladungsinjektions-Trimmen (Charge Injection Trimming)

Eine trimmbare Kondensatorladung kann in die Eingänge eines Choppingverstärkers injiziert werden, um die Ladungsfehlanspassung zu kompensieren. Dadurch wird der Strom an den Eingängen des Operationsverstärkers verringert.

- mehrkanaliges Chopping

Dadurch werden nicht nur die Glitches in ihrer Energie reduziert, sondern auch auf eine

höhere Frequenz verschoben, was die Filterung erleichtert. Diese Technik führt zu einer größeren Menge an Glitches, aber mit deutlich reduzierter Energie gegenüber einfachem Chopping mit einer höheren Frequenz. Bild 6 vergleicht einen typischen Zero-Drift-Verstärker mit dem ADA4522, der diese Technik nutzt, um die Auswirkungen von Glitches deutlich zu reduzieren. Bild 7 veranschaulicht das Ausgangsspektrum eines Chopper-Verstärkers. Es enthält Restwelligkeit durch aufmodulierten Offset und $1/f$ -Rauschen bei ungeraden Vielfachen der Chopping-Frequenz sowie Glitches aufgrund von Ladungsinjektionsfehlanspassungen der Choppingschalter und endlicher Verstärkerbandbreite bei geraden Vielfachen der Chopping-Frequenz.

Betrachtungen auf Systemebene

Beim Einsatz eines Zero-Drift-Verstärkers in einer Datenerfassungslösung ist es wichtig zu wissen, wo die Frequenzartefakte auftreten, und diese in der Planung entsprechend zu berücksichtigen.

- Chopping-Frequenz im Datenblatt finden

Die Chopping-Frequenz ist in der Regel explizit im Datenblatt angegeben, lässt sich aber auch anhand der Rauschspektren ermitteln. Aus einigen der neuesten Datenblätter von Analog Devices zu Zero-Drift-Verstärkern ist ersichtlich, wo im Spektrum Artefakte auftreten. Etwa im Datenblatt des ADA4528 wird explizit eine Chopping-Frequenz von 200 kHz angegeben. Ferner ist dies auch im Rauschdichtediagramm in Bild 8 deutlich zu erkennen. Im Abschnitt „Funktionsweise des ADA4522“ im Datenblatt wird die Chopping-Frequenz mit 4,8 MHz angegeben, wobei eine Schleife zur Korrektur von Offset und Restwelligkeit mit 800 kHz arbeitet. Bild 9 zeigt die Rauschdichte des ADA4522. Die Rauschspitzen sind deutlich sichtbar. Außerdem zeigt sich bei 6 MHz eine Rauschspitze, wel-

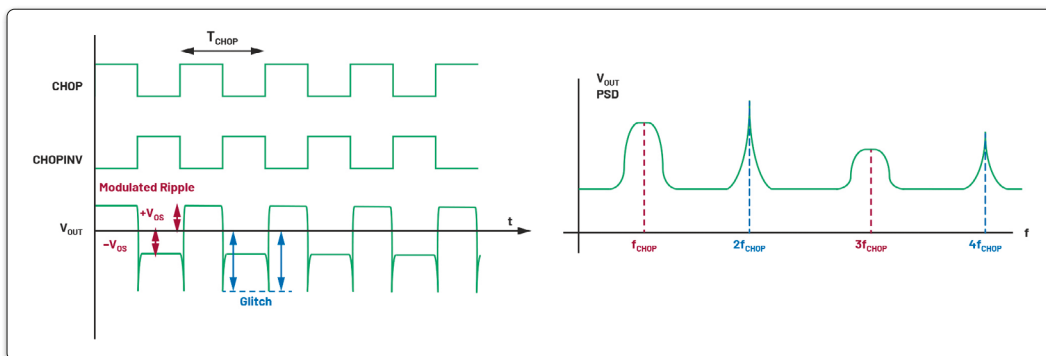


Bild 7: Artefakte bei Chopper-Verstärkern einschließlich einer aufmodulierten Welligkeit und einer Spannungsspitze bei der Ladungsinjektion

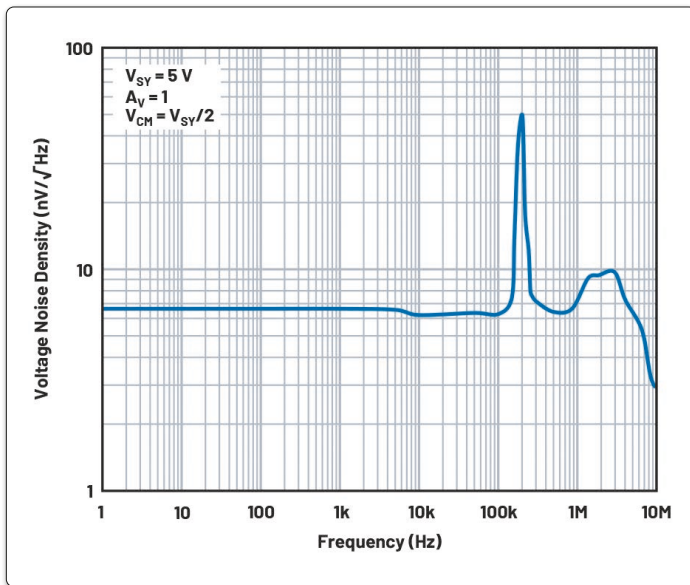


Bild 8: Rauschdichtediagramm des ADA4528

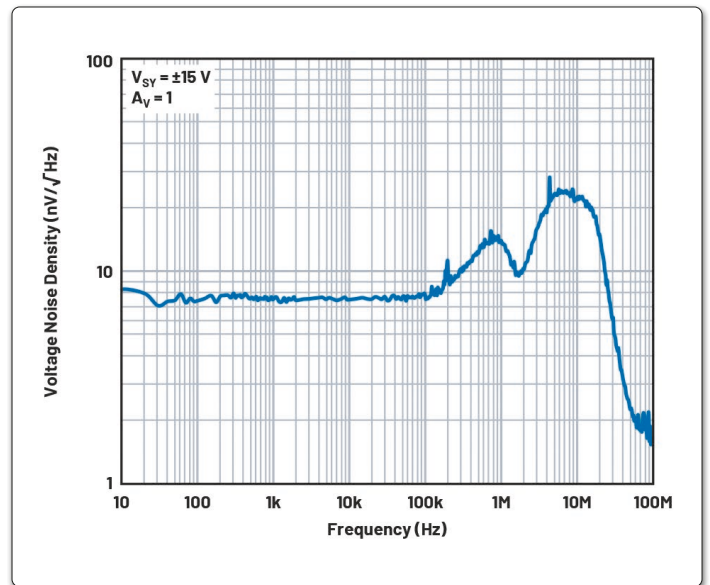


Bild 9: Rauschdichtediagramm des ADA4522

che auf die verringerte Phasenreserve der Schleife bei einem Verstärkungsfaktor 1 zurückzuführen ist. Dieser Effekt ist jedoch nicht auf Zero-Drift-Verstärker beschränkt.

Es ist wichtig zu beachten, dass es sich bei der im Datenblatt angegebenen Frequenz um eine typische Angabe handelt, die von Bauteil zu Bauteil variieren kann. Daher sollte, falls das System zwei gechoppte Verstärker für die differentielle Signalaufbereitung benötigt, ein Doppelverstärker verwendet werden. Denn zwei einzelne Verstärker können leicht unterschiedliche Choppingfrequenzen aufweisen, die sich gegenseitig beeinflussen und eventuell zusätzliche Intermodulationsverzerrungen verursachen.

- Eingangsimpedanz der Quelle anpassen

Transiente Stromspitzen, die mit der Eingangsimpedanz der Quelle interagieren, können differentielle Spannungsfehler verursachen, die bei einem Vielfachen der Choppingfrequenz zusätzliche Artefakte bewirken können. Das Aufmacherbild zeigt Spitzen im Rauschdichtediagramm des ADA4522 mit falsch angepasstem Quellwiderstand (unten). Um diese potenzielle Fehlerquelle zu reduzieren, sollten Systementwickler sicher-

stellen, dass jeder Eingang eines gechoppten Verstärkers die gleiche Impedanz aufweist (oben).

- Intermodulationsverzerrungen (IMD) und Aliasing-Artefakte

Beim Einsatz eines Chopper-Verstärkers kann sich das Eingangssignal mit der Chopping-Frequenz mischen und Intermodulationsverzerrungen bei $f_{IN} \pm f_{CHOP}$, $f_{IN} \pm 2f_{CHOP}$, $2f_{IN} \pm f_{CHOP}$...

erzeugen. Die resultierenden Intermodulationsprodukte können im interessierenden Band auftauchen, insbesondere, wenn sich f_{IN} der Chopping-frequenz nähert.

Dieses Problem lässt sich mit einem Zero-Drift-Verstärker beseitigen, dessen Chopping-Frequenz deutlich größer ist als die Bandbreite des Eingangssignals. Zusätzlich ist sicher-

zustellen, dass Störsignale mit Frequenzen nahe f_{CHOP} vor dieser Verstärkerstufe ausgefiltert werden.

Chopping-Artefakte können auch beim Abtasten eines Verstärkerausgangs mit einem A/D-Wandler auftreten. Bild 10 zeigt ein Beispiel für ein Intermodulationsprodukt, welches sich aus dem Aliasing der Glitchfrequenz ergibt, wenn der A/D-Wandler

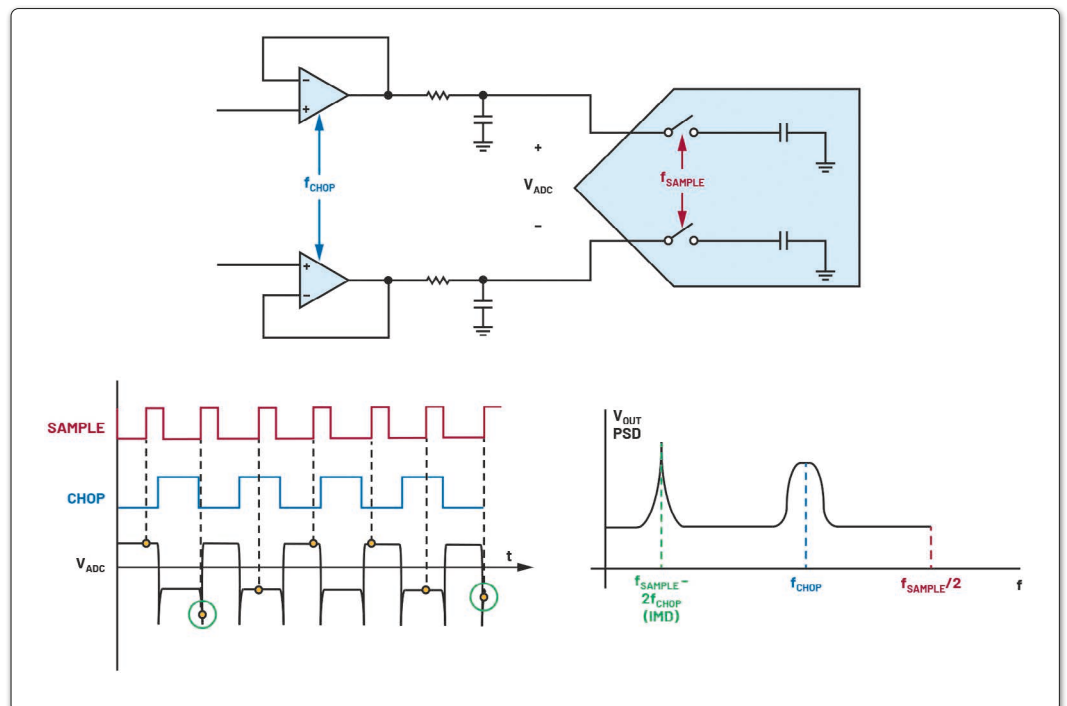


Bild 10: Beispiel für Intermodulationsverzerrung, bei dem der A/D-Wandler eine Spannungsspitze abtastet und einen Alias bei $f_{SAMPLE} - 2f_{CHOP}$ verursacht

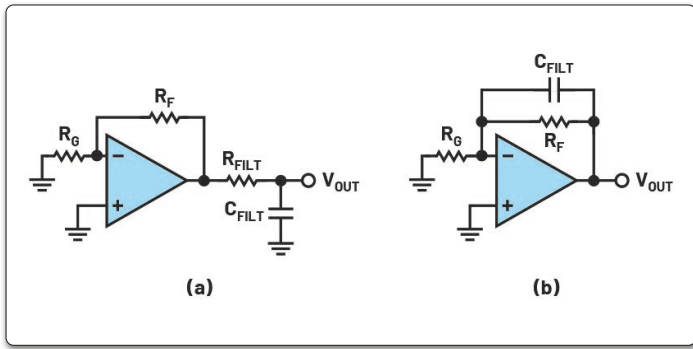


Bild 11: Verstärkerkonfigurationen zum Filtern von Artefakten

eine Abtastung vornimmt. Die Intermodulationsprodukte hängen von der Stärke der Glitches und der Restwelligkeit ab und können von Bauteil zu Bauteil variieren. Bei der Entwicklung einer Signalkette sind daher Antialiasingfilter vor dem A/D-Wandler anzuordnen, um Intermodulationsprodukte gering zu halten.

• Chopping-Artefakte filtern

Auf Systemebene lassen sich diese hochfrequenten Artefakte am effektivsten durch Filterung beseitigen. Ein Tiefpassfilter zwischen Zero-Drift-Verstärker und A/D-Wandler reduziert Chopping-Artefakte und vermeidet Aliasing. Entsprechend verringern Verstärker mit einer höheren Chopping-Frequenz die Anforderungen an das Tiefpassfilter und ermöglichen eine größere Signalbandbreite.

Bild 11 veranschaulicht, wie sich Chopping-Artefakte mit dem ADA4522 abschwächen lassen. Die dazu verwendeten Techniken sind in Bild 12 dargestellt: Erhöhen der Verstärkung des geschlossenen Regelkreises, Nachfiltern und Einsatz eines Kondensators parallel zum Rückkopplungswiderstand [8].

Je nachdem, wie stark die Störungen außerhalb des interessierenden Frequenzbandes im System unterdrückt werden müssen, kann ein aktives Filter höherer Ordnung erforderlich sein. Analog Devices verfügt über zahlreiche Ressourcen, die für die Entwicklung von Filtern hilfreich sind. Darunter das Tutorial zu Filtern mit mehrfacher Rück-

kopplung und das Online-Tool zur Filterentwicklung.

Die Frequenzen zu kennen, bei denen Choppingartefakte auftreten, kann bei der Entwicklung des erforderlichen Filters helfen. Tabelle 1 zeigt, wo AC-Artefakte durch Zero-Drift-Verstärker verursacht werden.

Fazit

Um Zero-Drift-Operationsverstärker in Anwendungen mit größerer Bandbreite optimal einzusetzen, sollten Systementwickler mit dem Thema „Hochfrequenzartefakte in Zero-Drift-Verstärkern“ vertraut sein. Für System-Designs sind folgende Aspekte zu beachten:

- Anpassung der Eingangsimpedanz der Quelle an die Eingänge des Zero-Drift-Verstärkers
- Verwendung eines Zweifachverstärkers zur differentiellen Signalaufbereitung

• Ermittlung der Frequenzen, bei denen Artefakte im Rauschspektrum auftreten, nach Datenblatt

• Entwicklung eines Filters, welches die Auswirkungen von Artefakten im Hochfrequenzbereich verringert, welche durch Techniken zur Verringerung des dynamischen Offsets entstehen

• Verständnis von HF-Artefakten im Frequenzbereich und entsprechende Frequenzplanung

Referenzen

- [1] Yoshinori Kusuda. “Reducing Switching Artifacts in Chopper Amplifiers.” Delft University of Technology, the Netherlands, Mai 2018.
- [2] Christian Enz und Gabor C. Temes. “Circuit Techniques for Reducing the Effects of Op-Amp Imperfections: Autozeroing, Correlated Double Sampling, and Chopper Stabilization.” Proceedings der IEEE, Vol. 84, No. 11, November 1996.
- [3] Boris Murmann. EE315A: VLSI Signal Conditioning Circuits: Kapitel 7, Precision Analog Circuit Techniques. Stanford University, 2014.
- [4] James Bryant. “Multipliers vs. Modulators.” Analog Dialogue, Vol. 47, Juni 2013.
- [5] A. T. K. Tang. “A 3/spl mu/V Offset Operational Amplifier with 20nV//spl radic/Hz Input Noise PSD at DC Employing

Both Chopping and Autozeroing.” IEEE, Februar 2002.

[6] Michiel Pertjjs und Wilko J. Kindt. “A 140 dB-CMRR Current-Feedback Instrumentation Amplifier Employing Ping-Pong Auto-Zeroing and Chopping.” IEEE Journal der Solid-State Circuits, Vol. 45, No. 10, Oktober 2010.

[7] Johan F. Witte, Kofi A. A. Makinwa und Johan H. Huijsing. “A CMOS Chopper Offset-Stabilized Opamp.” IEEE Journal der Solid-State Circuits, Vol. 42, No. 7, Juli 2007.

[8] Yoshinori Kusuda and Vicky Wong. “Zero-Drift Amplifiers: Now Easy to Use in High Precision Circuits.” Analog Dialogue, Vol. 49, Juli 2015.

[9] Kusuda, Yoshinori. “Analysis of Input Current Noise with Even Harmonics Folding Effect in a Chopper Op Amp.” Analog Dialogue, Vol. 53, Mai 2019.

Der Autor

Simon Basilico ist Design Engineer in der Precision Signal Chain Group von Analog Devices in Santa Clara, CA. Schwerpunktmäßig befasst er sich mit Präzisionssignalketten, einschließlich integrierten Mixed-Signal-Designs und System-in-Package-Lösungen. Zu Analog Devices kam Basilico 2015 nach seinem Bachelor- und Masterabschluss in Electrical Engineering an der Stanford University. ◀

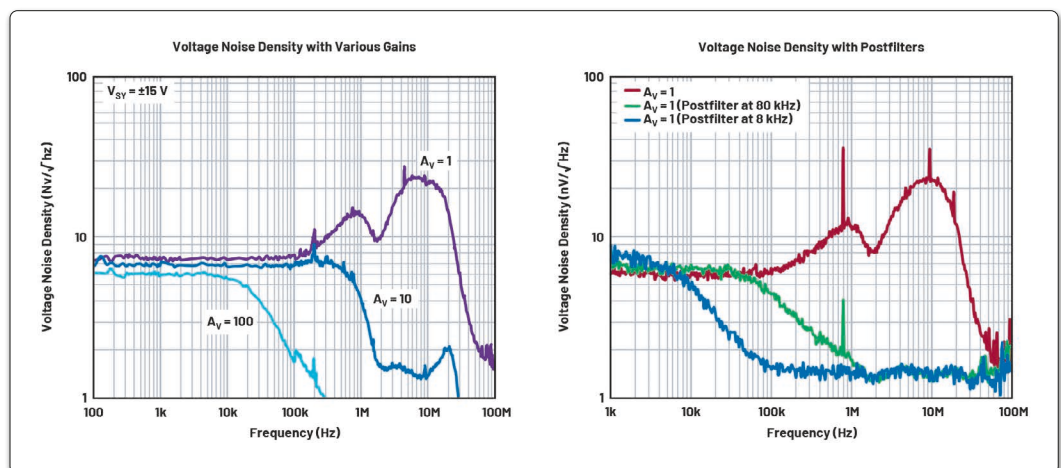


Bild 12: Spannungsrauschdichte für den ADA4522 mit den gezeigten Filtermethoden: Links Erhöhung der Verstärkung verringert die Bandbreite des Verstärkers, wodurch die Rauschspitzen gefiltert werden, rechts mit RC-Filter