Vereinfachte Antennenkalibrierung in Massive-MIMO- und Phased-Array-Systemen

In diesem Artikel wird die Phasensynchronisation der Hochfrequenz-PLL in den SDRs von Analog Devices behandelt.

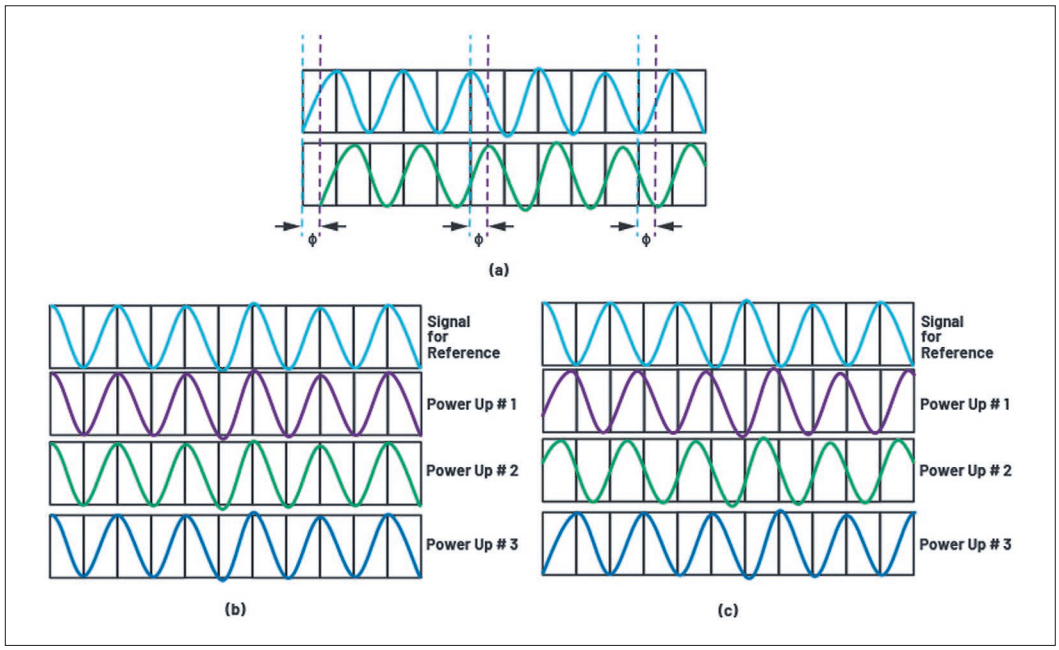

Bild 1: Beispiele von kohärenten und inkohärenten Phasenbeziehungen über der Zeit

Autor:
Danish Aziz
Analog Devices Inc.
www.analog.com

Mit dieser Funktion reduziert sich die Komplexität bei der Antennenkalibrierung, insbesondere in Systemen, in denen große Antennengruppen zum Einsatz kommen. Die Einstellung und Konfiguration der Synchronisation wird im Benutzerhandbuch beschrieben [1]. In diesem Artikel werden die Anwendung und die Vorteile dieser Funktion betrachtet.

Phasenkohärente Signale

Kohärenz bezeichnet elektromagnetische Wellen, die in Bezug auf ihre räumliche und zeitliche Ausbreitung eine feste Phasenbeziehung zueinander aufweisen. In der Elektronik befassen sich physikalische Systeme mit der Phase, der Frequenz und der Amplitude von kontinuierlichen Wellen- und Taktsignalen. Allgemein ausgedrückt, sind zwei Signale phasenkohärent, wenn die Differenz zwischen ihren Phasen konstant und zeitlich stabil bleibt. Bild 1a zeigt die Phase von zwei Signalen im Zeitverlauf. Beide Signale weisen eine kohärente Phasenbeziehung auf, da die Phase zwischen ihnen konstant bleibt. In Bild 1b wird die Anfangsphase eines Referenzsignals in einem System bei verschiedenen Einschaltzyklen verglichen. Auch hier lässt sich die kohärente Phasenbeziehung bei jedem Einschalten beobachten. Bild 1c zeigt dagegen ein Beispiel, bei dem die Phase nicht kohärent ist, da das Signal bei jedem Einschalten in einer zufälligen Phase beginnt.

Phasenstörungen und ihre Vermeidung in Mehrkanal- und Mehrantennensystemen

Phased-Array- und Massive-MIMO-Systeme nutzen mehrere Antennen und mehrere HF-Kanäle. Vom digitalen Backend bis zur Antennengruppe sind Phasenkohärenz und Zeitsynchronisation über mehrere Ebenen die Hauptanforderungen in solchen Systemen. So ist z.B. eine Rahmensynchronisation auf der Medien-Zugriffsebene erforderlich, eine Kohärenz auf der digitalen Schnittstelle (z.B. eine deterministische Latenz), eine Synchronisation bei der Abtastung mit mehreren Wandlern oder bei den ICs für mehrere Kanäle. Phasenkohärenz ist ebenfalls erforderlich zwischen mehreren Überlagerungs- bzw. Lokaloszillatoren (LO) bei der Erzeugung von Funkfrequenzen und einer deterministischen Phasenbeziehung zwischen den Elementen der Antennen.

Die Aufrechterhaltung der kohärenten Beziehung der verschiedenen Phasen ist also entscheidend und fundamental. Alle genannten Kriterien sind schwierig zu erfüllen, allein schon wegen der folgenden Einflüsse wie Bauteilevariation, Leiterbahnführung, Nichtlinearitäten in den Komponenten, Kopplungseffekte, Frequenzteilerverhältnisse, Hardwarealterung, Taktdrift, Temperaturdrift und Drift in den Lokaloszillatoren usw.

Verwendet man mehrere HF-LOs in einem System, ist die LO-Phasendrift ein zusätzlicher Faktor, der über mehrere Kanäle und über die Zeit variiert. Für die Erzeugung kohärenter HF-LO-Signale stehen dafür verschiedene Architekturoptionen zur Verfügung:

RF-LO-Verteilung:

Das LO-Signal wird von einem gemeinsamen LO erzeugt, und dann im System verteilt. Aufgrund der Höhe der Funkfrequenzen ist dies keine leichte Aufgabe. HF-Verluste und HF-Kopplung erschweren dies.

Verteilung des Referenztakts:

Um HF-Verluste zu vermeiden, werden die LO-Signale lokal

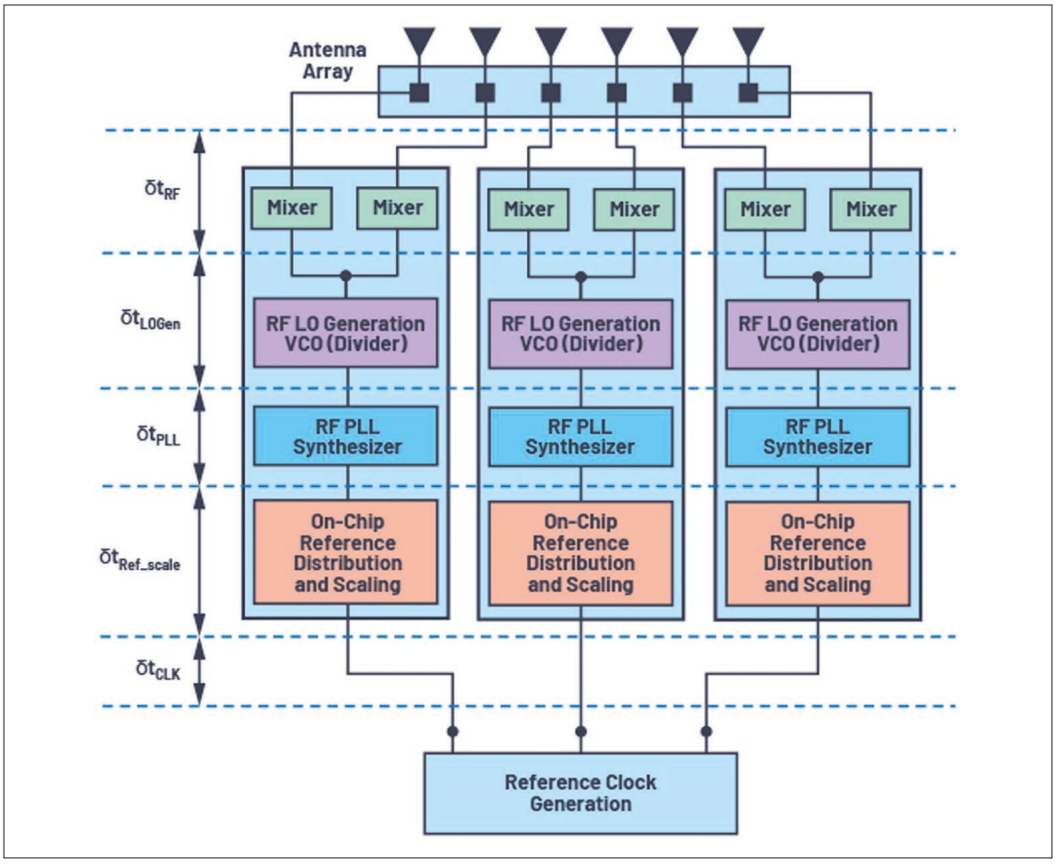

Bild 2. Quellen von Phasenfehlern in einem Mehrkanal- und Mehrantennensystem

erzeugt. Aufgrund von Schwankungen in den PLLs oder spannungsgesteuerten Oszillatoren (VCOs) sind jedoch zusätzliche Maßnehmen erforderlich, um die individuell erzeugten LO-Signale zu synchronisieren.

Quellen von Phasenfehlern

Bild 2 zeigt ein Beispiel für eine Mehrkanal- und Mehrantennen-HF-Subsystemarchitektur, die auf integrierten Transceiver-ICs basiert. Es gibt einen Onchip-Frequenzsynthesizer – eine PLL – und einen VCO für die HF-LO-Erzeugung. Der Referenztakt wird außerhalb der Transceiver-ICs erzeugt und an die jeweiligen Takteingänge der einzelnen ICs verteilt. Die weitere Skalierung und Verteilung des Referenztaktes erfolgt dann in dem Transceiver-IC. Bild 2 zeigt die Aufsplittung des Ausbreitungspfads vom Systemreferenztakt zu den Antennen. Der Pfad kann in verschiedene Segmente aufgeteilt werden, wobei jedes Segment eine Ausbreitungsverzögerung verursacht. Die Abweichung in der Ausbreitungsverzögerung verursacht die Abweichung in der Phasendifferenz und stört die Phasenkohärenz im System.

Kalibrierungstechniken

Kalibrierungstechniken werden eingesetzt, um Abweichungen von Sollwerten zu korrigieren. Mit Hilfe einer Kalibrierungsmethode werden die unbekannten Faktoren bestimmt und dann entsprechend berichtigt. Aufgrund der Phasendifferenzen unterscheidet sich der Frequenzgang HF-Kanal in Phased-Array- und Massive-MIMO-Systemen von Kanal zu Kanal. Außerdem ist dieser zeitabhängiger Natur. Statische Faktoren im System können gemessen und durch Werkskalibrierungen kompensiert werden. Einsatzabhängige Faktoren werden durch Anfangskalibrierungen gemildert, die auch bei jedem Systemstart durchgeführt werden können. Um dynamische und zeitabhängige Faktoren zu kompensieren, sind regelmäßige Antennenkalibrierungen erforderlich.

Neben der Temperaturdrift ist die LO-Phasendrift ein solcher dynamische Faktor, der über mehrere Kanäle und über die Zeit variiert. Wenn diese Kalibrierungen während des Betriebs durchgeführt werden, verbrauchen sie wertvolle Systemressourcen aufgrund ihrer Zeitdauer und Häufigkeit. Daraus ergibt sich ein Optimierungsproblem, das die Systemleistung bei minimalem Ressourceneinsatz für die Kalibrierung maximiert.

Vereinfachung der Kalibrierungen mit der HF PLL-Phasensynchronisation

Der ADRV9009 ist ein hochintegrierter Zweikanal-SDR aus dem RadioVerse-Portfolio von ADI. Er bietet zwei Sende- und zwei Empfangskanäle, um digitale IQ-Bits in HF zu wandeln bzw. HF in digitale IQ-Bits. Er basiert auf einer Null-ZF-Architektur, die den Stromverbrauch des Systems minimiert und eine außergewöhnlich hohe HF-Performance von Sender und Empfänger bietet. Das SDR unterstützt die komplette Frequenzerzeugung mit Onchip-Funktionen, ohne dass externe Komponenten benötigt werden.

Es gibt drei Onchip-Frequenzsynthesizer, einer davon ist der HF-LO-Synthesizer. Für jeden Synthesizer gibt es einen integrierten VCO samt Schleifenfilter. Dieses hohe Maß an Integration mit überragender Leistung bietet eine hohe Flexibilität bei der Frequenzerzeugung über den gesamten unterstützten Frequenzbereich.

Im Digitalteil verwendet der ADRV9009 das JESD204B-Protokoll für eine serielle Schnittstelle zur digitalen Datenübertragung [2]. Er bietet integrierte Unterstützung für die Multichip-Synchronisation mittels des JESD-SYSREF-Signals. Daher ist er optimal geeignet für die Erstellung von Phased-Array- und Massive-MIMO-Systemen in großem Maßstab.

Die HF-PLL-Synchronisationsfunktion

Neben der Multichip-Synchronisation bietet der ADRV9009 auch eine HF-PLL-Synchronisationsfunktion, die es ermöglicht, die intern erzeugten LO-Signale phasenkohärent und auf den angelegten Referenztakt auszurichten. Auf der Grundlage dieser Funktion können die folgenden Funktionen in großen Systemen leicht erreicht werden:

- Phasenkohärenz beim Einschalten: konstanter, deterministischer und stabiler Phasenwert bei jedem Einschaltvorgang
- Phasenkohärenz während des Betriebs: Tracking der Phase nach dem Einschalten
- Phasenkohärenz zwischen mehreren Geräten: weitere Unterstützung für Multichip-Synchronisation

Kalibrierungsalgorithmen erfordern Berechnungs- und Speicherressourcen in der digitalen Hardware. Diese Algorithmen werden sonst üblicherweise in der Basisbandverarbeitungskette implementiert und nutzen FPGA/DSP Ressourcen. Indirekt wird

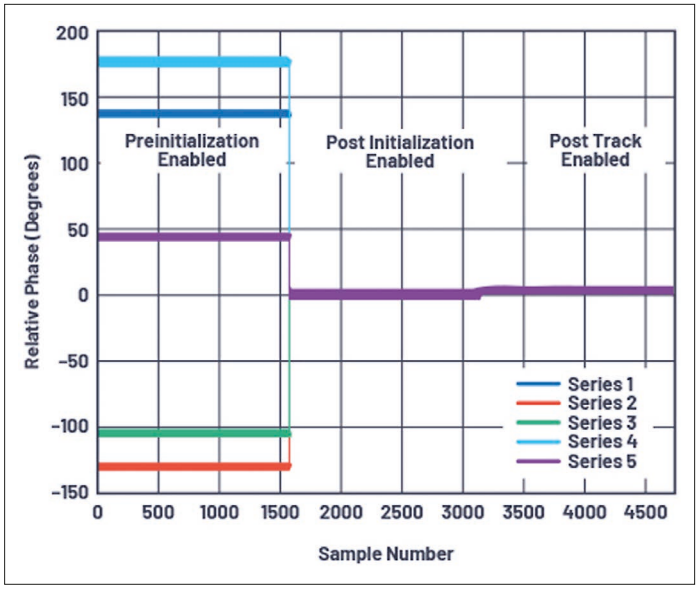

Bild 3. Vergleich der Ausgangsphase des Senders mittels Phasensynchronisationszyklus der HF-PLL1 (HF-Abstimmfrequenz = 1800 MHz)

somit der also auch der Stromverbrauch und der Ressourcenaufwand für die Systemkalibrierungen reduziert. Durch die Aktivierung dieser Funktion werden daher die Gesamtleistung und die Effizienz des Systems optimiert. Aufgrund komplexer Kalibrierungsalgorithmen wird mehr Zeit für die Initialisierung und das Erreichen eines stabilen Systemzustands benötigt. Diese Zeit kann durch Aktivierung der RF PLL-Synchronisationsfunktion bei der Initialisierung verkürzt werden. Kalibrierungsroutinen werden in regelmäßigen Abständen ausgeführt, um die Drifts in der LO-Phase, insbesondere aufgrund der Temperatur, nachzuführen. Andernfalls würden diese Drifts das Strahlformungsmuster von Mehrantennensystemen beeinträchtigen. Mithilfe der HF PLL-Synchronisationsnachführung kann die Kalibrierungshäufigkeit minimiert werden, ohne dass das erforderliche Strahlformungsverhalten beeinträchtigt werden. Es gibt vier Betriebsarten zur Steuerung der Phasensynchronisationsfunktion:

- Modus 1: Deaktivieren der Onchip-HF-PLL-Synchronisation
- Modus 2: HF-PLL-Synchronisation nur zur Initialisierung aktivieren
- Modus 3: HF-PLL-Synchronisation bei der Initialisierung durchführen und nur einmal nachführen
- Modus 4: kontinuierliche HF-PLL-Phasennachführung

Bild 3 zeigt die Ergebnisse der gemessenen Phasendifferenz über mehrere Einschaltzyklen in einer Mehrchip- und Mehrkanalumgebung. Der Messaufbau besteht aus vier HF-Kanälen, die auf zwei identischen Evaluierungsboards realisiert wurden, von denen eines das ADRV9009-W/PCBZ ist. Mit Hilfe eines Vektornetzwerkanalysators wurde die Änderung der Phasendifferenz zwischen den Senderausgangssignalen bei jedem Einschaltzyklus gemessen. Weitere Einzelheiten können dem Benutzerhandbuch entnommen werden.

Die Messungen wurden über fünf Einschaltzyklen durchgeführt und zwischen den verschiedenen Betriebsarten verglichen. Das System wurde dabei ohne Aktivierung der HF-PLL-Synchronisationsfunktion gestartet. Es ist zu erkennen, dass bei jedem Einschaltzyklus eine zufällige Phasenbeziehung besteht. Nach Aktivierung der RF-PLL-Synchronisation konvergieren alle fünf relativen Phasenwerte auf einen wiederholbaren Wert innerhalb einer Toleranz von ±2°. Wenn die kontinuierliche Nachführung aktiviert ist, wird die relative Phase mit einer gewissen Verzögerung beibehalten. Diese Verzögerung führt zu einem Anstieg der relativen Phase um 1° bis 2°. Daher ist im Bild 3 eine kleine Verschiebung zu erkennen. Mit dieser Funktion kann eine stabile Phase innerhalb einer deterministischen Toleranz erreicht werden. Dies verringert die Auswirkungen dynamischer Faktoren und vereinfacht die Gesamtsynchronisierung und -kalibrierung des Systems.

Schlussbemerkung

Die HF-PLL-Synchronisationsfunktion ist in den aktuellen Generationen von hochintegrierten SDRs von ADI verfügbar, einschließlich des ADRV9009 Zweikanal-Transceivers. Die Antennenkalibrierung in großen Antennenarray-Systemen, die mit diesem Baustein aufgebaut sind, kann durch den Einsatz der HF PLL-Synchronisationsfunktionalität vereinfacht werden. Es stehen verschiedene Betriebsarten zur Verfügung, die je nach den Anforderungen der Applikation ausgewählt werden können. Die Steuerung und Konfiguration erfolgt auf einfache Weise über die Software-API-Funktionen. Das ADRV9009-Benutzerhandbuch enthält weitere Einzelheiten über die Funktionen und deren Anwendung.

Danksagung: Der Autor bedankt sich bei Vinod Gopalakirshnan von Analog Devices für seine sorgfältigen Beiträge zu diesem Artikel.

Referenzen

[1] UG-1295 Hardware Reference Manual for the ADRV9008-1, ADRV9008-2, and ADRV9009

[2] JESD204B Serial Interface and JEDEC Standard Data Converters. Analog Devices, Inc. ◄

Über den Autor

Danish Aziz ist Feld Applikationsingenieur und Experte für HF-Produkte und -Systeme bei Analog Devices. Als Mitglied des technischen Vertriebsteams beschleunigt er das Wachstum und bietet den Kunden in der EMEA-Region technischen Support. Er konzentriert sich auf drahtlose Verbindungen in den Bereichen Automobil, Industrie, Verteidigung und Mobilfunk. Er vertritt ADI in der 5G Automotive Association (5GAA).

Bevor er 2017 zu ADI kam, arbeitete er als Forschungs- und Entwicklungsingenieur bei Bell Labs in Deutschland. Er trug zur Standardisierung von 3G-, 4G- und 5G-Systemen bei. Er vertrat Bell Labs in mehreren europäisch und deutsch finanzierten Vorzeige-Forschungsprojekten. Er ist Autor und Co-Autor von mehr als 25 wissenschaftlichen Artikeln, die in internationalen, von Experten begutachteten IEEE-Plattformen zur drahtlosen Kommunikation veröffentlicht wurden. Er hält mehr als 20 aktive geschützte und veröffentlichte internationale Patente.

Danish hat einen Dr.-Ing. (Ph.D.) und M.Sc. in Elektrotechnik von der Universität Stuttgart und einen B.E. in Elektrotechnik von der N.E.D. University, Karachi, Pakistan. Sie können ihn unter danish.aziz@analog.com.erreichen.