

Grundlagen des Software Defined Radios

In der heutigen sich rasant entwickelnden Technologielandschaft hat sich das Konzept des Software Defined Radio (SDR) als transformative Kraft erwiesen und die Art und Weise revolutioniert, wie wir Funkkommunikationssysteme wahrnehmen und mit ihnen interagieren.



Von Radarsystemen bis hin zur GPS-Navigation, von drahtlosen Verbindungen bis hin zur Spektrumüberwachung – SDRs werden in einer Vielzahl von Anwendungen immer allgegenwärtiger. Wir werfen darum hier einen Blick auf die Feinheiten der SDR-Technologie und untersuchen ihre Grundprinzipien, vielfältigen Anwendungen und ihre Funktionsweise. Dabei sei das Konzept der Abtastung des ZF-Signals bemüht, das im Empfangsfall eine Zwischenstufe auf dem Weg zur heute bereits oft realisierten Direktabtastung des Antennensignals hin darstellt.

Was vermag ein SDR?

Im Wesentlichen stellt ein SDR einen Paradigmenwechsel von traditioneller Funk-Hardware zu software-basierten Lösungen dar und ermöglicht dynamische Rekonfiguration und Anpassungsfähigkeit. Im Gegensatz zu herkömmlichen Funkgeräten mit fester Hardware-Architektur nutzen SDRs Software-Algorithmen, die auf universellen Computerplattformen laufen, um Funksignalverarbeitung, Modulation und Demodulation durchzuführen.

Diese inhärente Flexibilität ermöglicht es Anwendern, die Funkfunktionalität im laufenden Betrieb zu modifizieren und zu optimieren und so an verschiedene Anwendungen und sich entwickelnde Kommunikationsstandards anzupassen.

Das Wesentliche an einem SDR ist die Fähigkeit, nahtlos zwischen verschiedenen Kommunikationsprotokollen, Frequenzen und Modulationsschemata zu wechseln, ohne dass Hardware-Modifikationen erforderlich sind. Durch die Entkopplung der Funkfunktionalität von spezifischen Hardware-Komponenten bieten SDRs beispiellose Vielseitigkeit und Skalierbarkeit für eine Vielzahl von Anwendungen. Ob in Radarsystemen, drahtlosen Netzwerken oder Frequenzüberwachungsstationen – SDRs bieten eine einheitliche Plattform für die Implementierung, das Testen und den Einsatz modernster Funktechnologien mit minimalen Hardware-Einschränkungen.

Die Einführung der SDR-Technologie hat den Zugang zu fortschrittlichen Funkkommunikationsmöglichkeiten demokratisiert und Forschern, Ingenieuren und Enthusiasten ermöglicht, wie nie zuvor mit Funksystemen zu experimentieren und Innovationen zu entwickeln. Von Hobbyprojekten bis hin zu unternehmenskritischen Anwendungen ermöglichen SDRs Innovationen und ermöglichen es Einzelpersonen und Organisationen, neue Wege in der drahtlosen Kommunikation zu erkunden.

Da sich das SDR-Feld dank Fortschritten bei Software-Algorithmen, digitaler Signalverarbeitung und Hardware-Integration ständig weiterentwickelt, bleibt das Potenzial, die Art und Weise, wie wir kommunizieren und mit der Welt um uns herum interagieren, grenzenlos. Das Aufmacherbild zeigt ein hochleistungsfähiges Software Defined Radio (Cyan von Per Vices).

Wofür werden SDRs verwendet?

Die Vielseitigkeit von SDRs ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungen in verschiedenen Bereichen:

• Radar

SDRs werden in Radarsystemen aufgrund ihrer Anpassungsfähigkeit und Fähigkeit zur Verarbeitung komplexer Signale eingesetzt und erleichtern so Aufgaben wie Zielerkennung, -verfolgung und -bildgebung.

• GPS/GNSS

Im Bereich globaler Navigationssatellitensysteme (GNSS) spielen SDRs eine zentrale Rolle bei der Decodierung von Satellitensignalen und der Bestimmung präziser Positionsinformationen, wodurch die Standortgenauigkeit und -zuverlässigkeit verbessert wird.

• Test- und Messtechnik

SDRs sind unschätzbare Werkzeuge in Test- und Messanwendungen. Sie bieten Echtzeit-Signalanalyse, Modulations-/Demodulationsmöglichkeiten und eine anpassbare Signalerzeugung zum Testen und Validieren von Kommunikationssystemen.

• Drahtlose Verbindungen

SDRs bilden das Rückgrat moderner drahtloser Kommunikationsnetze und ermöglichen die Implementierung verschiedener Mobilfunkstandards (z.B. WLAN, LTE, 5G) sowie die nahtlose Interoperabilität zwischen verschiedenen Protokollen.

• Spektrumüberwachung und -aufzeichnung

SDRs ermöglichen die Spektrumüberwachung durch Breitbandabdeckung, hochauflösende Spektrumanalyse und die Aufzeichnung und Analyse von Funksignalen zur Einhaltung gesetzlicher Vorschriften, für Sicherheits- und Forschungszwecke.

• Elektronische Kriegsführung

SDRs sind in der elektronischen Kriegsführung unverzichtbar. Sie werden dort für Signalaufklärung, elektronische Gegenmaßnahmen und die Frequenzdominanz eingesetzt, indem sie sich schnell an dynamische Bedrohungsumgebungen anpassen.

Quelle:

„Exploring the World of Software Defined Radio (SDR)“

Brandon Malatest
Per Vices Corporation
www.pervices.com/

übersetzt von FS

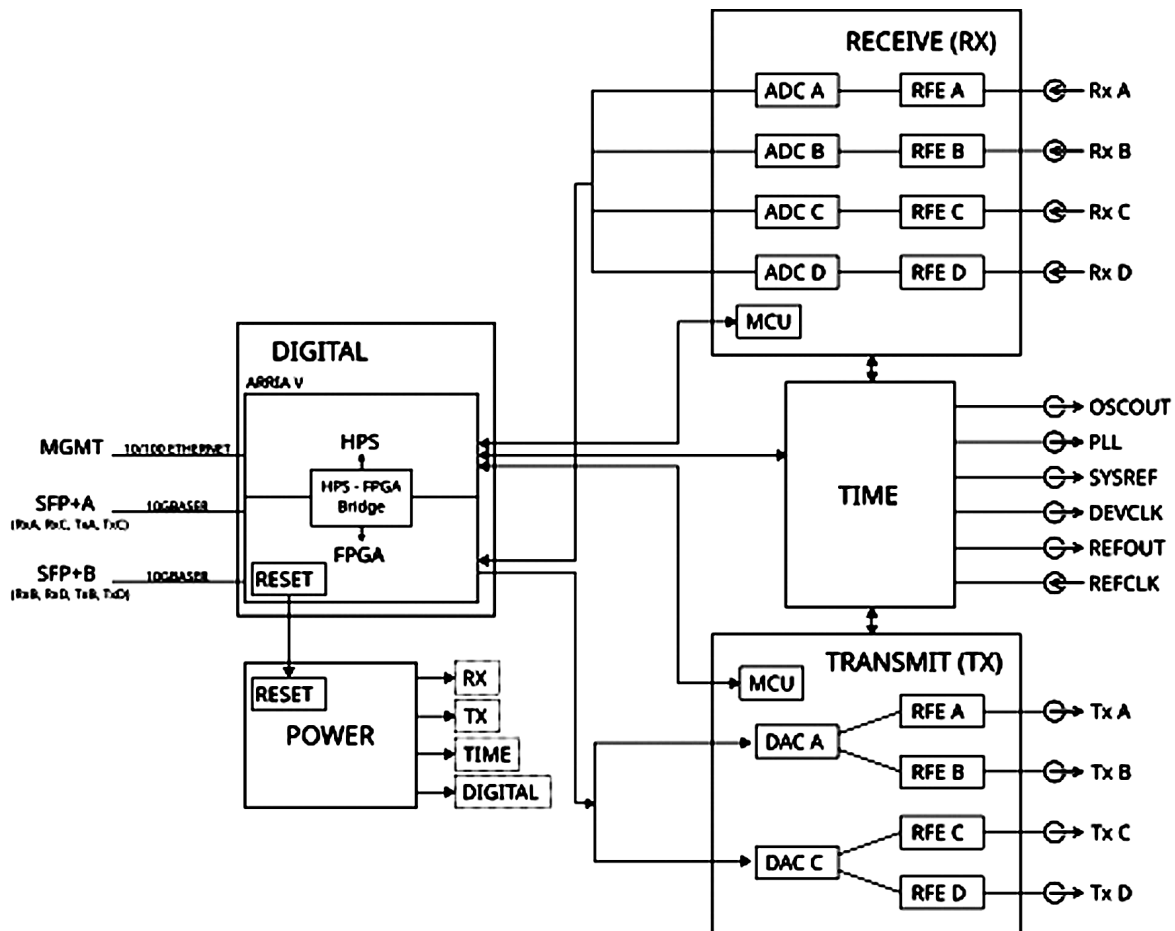


Bild 1: Beispielhafte Architekturübersicht eines SDRs

Wie funktionieren SDRs?

Um die Funktionsweise eines SDRs zu verstehen, analysieren wir seine grundlegenden Funktionen und Komponenten. Alle SDR-Transceiver bestehen aus vier kritischen Elementen: Empfangsfunktion, Sendefunktion, Timing und der digitalen Komponente, wie in Bild 1 dargestellt.

Die Empfangskette

Eine der Hauptkomponenten eines SDRs ist die Empfangskette, eine komplexe Anordnung von Komponenten, die sorgfältig aufeinander abgestimmt sind, um eingehende Funksignale zu erfassen, zu verarbeiten und in digitale Form umzuwandeln. Lassen Sie uns die wichtigsten Komponenten genauer betrachten:

• Low-Noise Amplifiers (LNAs)

LNAs sind an vorderster Front der Empfangskette positioniert und spielen eine entscheidende Rolle bei der Verstärkung schwacher Funksignale bei minimalem Rauschen. Ihre hohe Verstärkung und ihr niedriges Rauschmaß gewährleisten optimalen Signalempfang, insbesondere in Umgebungen mit niedrigem Signal/Rausch-Verhältnis.

• Mischer

Mischer dienen als zentrale Komponenten der Signalfrequenzumsetzung innerhalb der Empfangskette. Durch die Kombination eingehender Signale mit Lokaloszillatorfrequenzen (LO) erzeugen Mischer Zwischenfrequenzsignale (ZF), die sich leichter verarbeiten und digitalisieren lassen. Wählbare Mischverhältnisse ermöglichen eine flexible Frequenzabstimmung für ein breites Spektrum an Signalbandbreiten und -frequenzen.

• Filter

Nach der Mischung werden die Signale gefiltert, um gewünschte Frequenzbänder zu isolieren und unerwünschte Störungen und Rauschen zu dämpfen. Bandpassfilter, häufig mit akustischen Oberflächenwellen (SAW) oder Keramikresonatoren implementiert, gewährleisten Signalreinheit und -selektivität, die für die Aufrechterhaltung der Kommunikationsintegrität in überlasteten oder signalstarken Funkumgebungen entscheidend sind.

• Analog/Digital-Wandler (ADCs)

Die letzte Stufe der Empfangskette umfasst ADCs, die analoge ZF-Signale in ein digitales Format umwandeln, das vom digitalen

Subsystem des SDRs weiterverarbeitet werden kann. Hochauflösende ADCs mit unterschiedlichen Abstraten begrenzen die maximal erfassbare Signalbandbreite und gewährleisten eine präzise Darstellung analoger Signale im digitalen Bereich unter Wahrung der Signaltreue und -integrität.

Der Senderzug

Im Sendebereich verarbeiten SDRs digitale Signale, um modulierte Funksignale für die Übertragung zu erzeugen. Sehen wir uns die Komponenten dieser Funkübertragungskette genauer an:

• Digital-Analog-Wandler (DACs)

DACs bilden die Brücke zwischen digitaler Signalverarbeitung und analoger Funkübertragung. Sie wandeln digitale Basisbandsignale, die mit den gewünschten Modulationsschemata und Daten moduliert sind, in analoge Wellenformen um, die für die drahtlose Übertragung geeignet sind. Hochauflösende DACs mit geringen Verzerrungen gewährleisten eine originalgetreue Wiedergabe digitaler Signale im analogen Bereich.

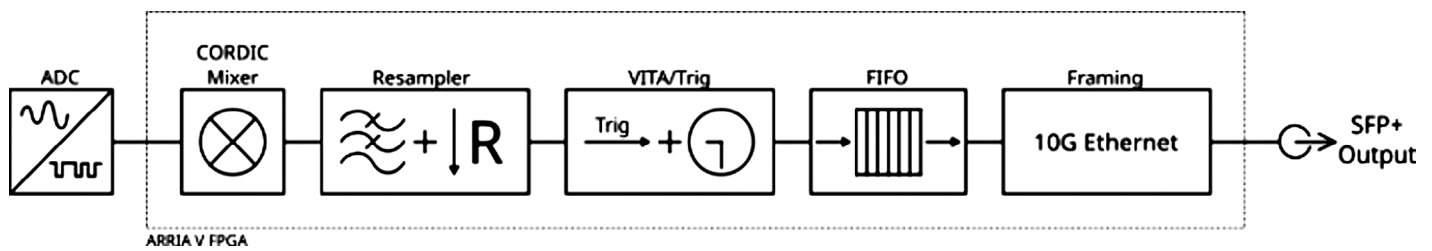


Bild 2: Beispiel einer Empfangs-DSP-Architektur

• Verstärker

Sendeverstärker verstärken die modulierten analogen Signale auf die gewünschte Sendeleistung. Leistungsverstärker (PAs) erhöhen die Signalstärke bei gleichzeitiger Wahrung von Linearität und spektraler Reinheit, gewährleisten die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften und minimieren Signalverzerrungen.

• Mischer und Filter

Ähnlich wie in der Empfangskette können auch im Sendepfad Mischer und Filter zur Frequenzumsetzung und spektralen Formung eingesetzt werden. Mischer kombinieren modulierte Signale mit Trägerfrequenzen, während Filter Außenbandemissionen und Oberwellen eliminieren und so die spektrale Konformität und Signalreinheit gewährleisten.

• Timing und Synchronisation

Im Bereich der SDRs sind präzises Timing und Synchronisation für einen kohärenten Betrieb von entscheidender Bedeutung, insbesondere in Mehrkanal- oder Mehrantennenkonfigurationen. Zu den wichtigsten Timing-Komponenten gehören:

• Oszillatoren

Stabile, hochpräzise Oszillatoren dienen als Timing-Referenzen für verschiedene SDR-Subsysteme und gewährleisten eine präzise Signalabtastung, -mischung und -modulation. Temperaturkompensierte Quarzoszillatoren (TCXOs) oder ofengesteuerte Quarzoszillatoren (OCXOs) liefern stabile Frequenzreferenzen mit minimaler Drift über Zeit und Temperaturschwankungen.

• Phasenregelkreise (PLLs)

PLLs spielen eine wichtige Rolle bei der Frequenzsynthese und -synchronisation, indem sie die Frequenzen der lokalen Oszillatoren mit hoher Genauigkeit und Stabilität an Referenzsignale koppeln. Durch die Anpassung von Phase und Frequenz ermöglichen PLLs einen kohärenten Betrieb mehrerer SDR-Einheiten oder -Kanäle, was für Anwendungen wie Beamforming und MIMO-Kommunikation unerlässlich ist.

Digitale Verarbeitung

Das digitale Rückgrat eines SDRs umfasst eine Vielzahl von Komponenten, die die Signalverarbeitung, Modulation/Demodulation und Protokollverarbeitung ermöglichen:

• Chips für die digitale Signalverarbeitung (DSP)

Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) oder FPGA-System-on-Chips (SoCs) dienen als Rechenzentren von SDRs und führen komplexe Signalverarbeitungsalgorithmen mit beispielloser Flexibilität und Geschwindigkeit aus. Ihre Rekonfigurierbarkeit ermöglicht schnelles Prototyping und die Optimierung von Signalverarbeitungs-Pipelines, die auf spezifische Anwendungsanforderungen zugeschnitten sind. Auf diesen Chips werden viele Funktionen, wie digitales Mischen, Resampling, Paketverarbeitung, Triggerung, Pufferung und Framing, ausgeführt. Durch das Laden verschiedener IP-Cores oder die Entwicklung kundenspezifischer DSPs können diese und weitere Funktionen innerhalb des FPGAs verwaltet werden. Beispielsweise benötigen SDRs mit Hochgeschwindigkeits-ADCs und -DACs, die mit extrem hohen Abtastraten und in kohärenter Weise arbeiten können, eine anspruchsvolle Schnittstelle. In vielen Fällen nutzt diese Schnittstelle JESD204, einen seriellen Hochgeschwindigkeits-Schnittstellenstandard, der hauptsächlich in Datenkonvertern und digitalen Signalverarbeitungsanwendungen verwendet wird. JESD204 steht für „JEDEC Standard Nr. 204“ und wird von der JEDEC Solid State Technology Association, einer globalen Halbleiter-Standardisierungsorganisation, entwickelt und gepflegt. Einer der Hauptvorteile von JESD204 ist die Fähigkeit, hohe Datenraten zu unterstützen und gleichzeitig die Anzahl der Verbindungen zu reduzieren und das Platinen-Layout im Vergleich zu herkömmlichen parallelen Schnittstellen zu vereinfachen. Durch die serielle Datenübertragung über schnelle serielle Verbindungen ermöglicht JESD204 eine effiziente Nutzung der verfügbaren Bandbreite und reduziert Signalversatz und Timing-

Unsicherheiten. Bild 2 bringt ein Beispiel für eine Empfangs-DSP-Architektur.

• Onboard-RAM

Eingebettete RAM-Module bieten temporäre Speicherung und Pufferung für digitale Signalabtastwerte und ermöglichen so die Echtzeitverarbeitung und -manipulation eingehender und ausgehender Datenströme. Der schnelle RAM-Zugriff gewährleistet einen reibungslosen Datendurchsatz und latenzempfindliche Vorgänge, die für die SDR-Leistung entscheidend sind.

• Digitale Schnittstellen

SDRs verfügen über eine Vielzahl digitaler Schnittstellen für Steuerung, Datenaustausch und Synchronisierung mit externen Geräten und Netzwerken. Schnittstellen wie Ethernet, USB, PCIe und JTAG ermöglichen eine nahtlose Integration mit Hostsystemen und ermöglichen Fernkonfiguration, Datenstreaming und Synchronisierung in verteilten SDR-Implementierungen.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Software Defined Radio einen entscheidenden Meilenstein in der Entwicklung der Funktechnologie darstellt und eine neue Ära der Flexibilität, Anpassungsfähigkeit und Innovation einläutete. Im Kern verkörpert SDR die Konvergenz von Software-Algorithmen, digitaler Signalverarbeitung und digitalen Hochgeschwindigkeits-Schnittstellen und ermöglicht so die nahtlose Integration und Interoperabilität unterschiedlicher Komponenten und Systeme. Die Vielseitigkeit von SDRs geht über die traditionelle Funkkommunikation hinaus und durchdringt Bereiche wie Test und Messung, elektronische Kriegsführung und wissenschaftliche Forschung. Mit jedem Technologiesprung ebnen SDRs den Weg für beispiellose Fortschritte in Konnektivität, Automatisierung und mehr und prägen die Zukunft der drahtlosen Kommunikation für kommende Generationen. ◀