



Hochintegrierte Millimeterwellen-Frontends für Beamsteering-Anwendungen in 5G-Repeater-Systemen

Katharina Kolb



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Hochintegrierte Millimeterwellen-Frontends
für Beamsteering-Anwendungen
in 5G-Repeater-Systemen





Hochintegrierte Millimeterwellen-Frontends für Beamsteering-Anwendungen in 5G-Repeater-Systemen

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von

Katharina Kolb

aus Nürnberg



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über

<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2023

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2023

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2023

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2023

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7874-4

eISBN 978-3-7369-6874-5





Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Juli 2023

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel
Prof. Dr. techn. Linus Maurer



Kurzfassung

Der digitale Mobilfunk hat seit seiner Einführung im Jahr 1992 bis hin zum aktuellen Mobilfunkstandard 5G eine imposante Entwicklung hingelegt. Um den zunehmenden Bedarf datenintensiver Anwendungen im Mobilkommunikationsbereich erfüllen zu können, nutzt 5G erstmalig Bänder im Millimeterwellenfrequenzbereich, welche hohe Bandbreiten und damit hohe Datenraten ermöglichen. Dies legt den Grundstein für eine Reihe neuartiger Anwendungsmöglichkeiten wie intelligente Verkehrssysteme, vernetzte Medizinprodukte, Virtual Reality sowie das Internet der Dinge. Die höheren Ausbreitungsverluste im Millimeterwellenfrequenzbereich erfordern jedoch neue Konzepte und Technologien.

In der vorliegenden Arbeit wird ein monolithisch integriertes Beamsteering-Frontend als Kernkomponente eines modularen 5G-Repeater entworfen, implementiert und charakterisiert. Der analoge Repeater setzt dabei eine 39 GHz-Fronthauling-Verbindung zur Basisstation auf eine gerichtete 28 GHz-Beamsteering-Verbindung zu mehreren stationären Nutzern um. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein hochperformantes 2×2 -Transceiver-Frontend mit Beamsteering-Funktionalität und integrierter digitaler Signalverarbeitung in BiCMOS-Technologie implementiert. Für horizontale und vertikale Polarisation enthält das 28 GHz-Frontend insgesamt acht Transceiver-Kanäle sowie einen 1:4/4:1-Leistungsteiler/-kombinierer pro Polarisation und eine digitale Schnittstelle. Die Kernkomponenten bilden präzise Phasenschieber sowie rauscharme Vorverstärker. Das Frontend wird als Teil eines 2×2 -Demonstrators mit Patch-Antennen messtechnisch vollständig charakterisiert. So erreicht dieses für modulierte 5G-Signale mit einer Signalbandbreite von 400 MHz eine Dynamik von mindestens 22 dB im Up- und Downlink. Damit eignet sich das Beamsteering-Transceiver-Frontend bestens für den Einsatz in Millimeterwellen-Kommunikationssystemen. Um die Performanz des integrierten Beamsteering-Systems weiter zu erhöhen, wird eine Schnittstelle zur Extraktion von Phasen- und Amplitudeninformation in den einzelnen Transceiver-Kanälen implementiert.





Abstract

Since its launch in 1992, digital mobile communications has undergone an impressive development up to the current mobile communications standard 5G. To meet the increasing demand for data-intensive applications in the mobile communications sector, 5G for the first time uses millimeter-wave bands, which enable high bandwidths and thus high data rates. This provides the basis for a range of new applications such as intelligent traffic systems, networked medical devices, virtual reality and the internet of things. However, the higher propagation losses in the millimeter-wave frequency range require new concepts and technologies.

In this work, a monolithically integrated beamsteering front-end is designed, implemented, and characterized as the core component of a modular 5G repeater. In this context, the analog repeater converts a 39 GHz fronthauling link to the base station into a directional 28 GHz beamsteering link to multiple stationary users. In this dissertation, a high-performance 2×2 transceiver front-end with beamsteering functionality and integrated digital signal processing is implemented in BiCMOS technology. For horizontal and vertical polarization, the 28 GHz front-end contains a total of eight transceiver channels as well as one power divider/combiner per polarization and a digital interface. Precise phase shifters as well as low-noise amplifiers form the core components. The front-end is fully characterized by measurement as part of a 2×2 demonstrator with patch antennas. Thus, for modulated 5G signals with a signal bandwidth of 400 MHz, this achieves a dynamic range of at least 22 dB in the uplink and downlink. This makes the beamsteering transceiver front-end ideal for use in millimeter-wave communication systems. To further increase the performance of the integrated beamsteering system, an interface is implemented to extract phase and amplitude information in the transceiver channels.





Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik	3
1.2.1 Beamsteering-Frontends für 5G	3
1.2.2 Fixed Wireless Access für 5G	4
1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen von 5G-Transceivern	7
2.1 Anforderungen und Systemziele	7
2.2 Frequenzbereich und Standardisierung	8
2.3 Prinzip und Architekturen für Beamsteering	10
2.4 Systemanforderungen	14
2.5 Technologie	18
3 Gesamtsystem des analogen Beamsteering-Repeater	23
3.1 Repeaterarchitektur	23
3.2 Systemspezifikation	26
4 Implementierung der Einzelkomponenten	31
4.1 Rauscharmer Verstärker	31
4.1.1 Vorbetrachtung	31
4.1.2 Implementierung	32
4.1.3 Messergebnisse	37
4.2 Phasenschieber	39
4.2.1 Vorbetrachtung	39
4.2.2 Implementierung	41
4.2.3 Messergebnisse	46
4.2.4 Ausblick	50



4.3	Einstellbarer Verstärker	53
4.3.1	Vorbetrachtung	54
4.3.2	Implementierung	54
4.3.3	Messergebnisse	56
4.4	Leistungsverstärker	59
4.4.1	Vorbetrachtung	59
4.4.2	Implementierung	60
4.4.3	Messergebnisse	61
4.5	HF-Schalter	61
4.5.1	Vorbetrachtung	62
4.5.2	Implementierung	62
4.5.3	Messergebnisse	63
4.6	Leistungsteiler/Leistungskombinierer	66
4.6.1	Vorbetrachtung	66
4.6.2	Implementierung	67
4.6.3	Simulationsergebnisse	69
4.7	Digitale Schnittstelle	71
4.7.1	Vorbetrachtung	71
4.7.2	Implementierung	72
5	Charakterisierung des Beamsteering-Frontends	75
5.1	Transceiver-Frontend	75
5.2	Beamsteering-Transceiver-Frontend	80
5.2.1	Beamsteering-Einheitszelle mit HF-Konnektoren	81
5.2.2	Beamsteering-Einheitszelle mit Patch-Antennen	87
5.2.3	Zusammenfassung der Messergebnisse	91
6	Erweiterung durch Schnittstelle für Phasen- und Amplituden- information	93
6.1	Vorbetrachtung	93
6.2	Implementierung	94
6.3	Messergebnisse	95
7	Fazit	99
7.1	Zusammenfassung	99
7.2	Ausblick	100
	Literaturverzeichnis	103
	Abbildungsverzeichnis	121
	Tabellenverzeichnis	125



Danksagung	127
Eigene Veröffentlichungen	129

