

面向6G的宽带多波束无线通信原型系统设计

田佳辰, 姚志伟, 郑奕飞, 郑怀瑾, 凌泰炀, 王闻今, 李 潇

东南大学信息科学与工程学院, 江苏 南京
Email: tianjiachen@seu.edu.cn, wangwj@seu.edu.cn

收稿日期: 2021年6月10日; 录用日期: 2021年6月24日; 发布日期: 2021年7月13日

摘 要

面对5G和6G时代巨流量、巨连接的通信业务需求, 宽带动态多波束技术利用高频段的频谱资源并结合动态多波束控制技术, 能够在现有多波束技术的基础上进一步挖掘空间维度资源, 提升服务质量, 已成为下一代移动通信系统的关键技术之一, 将广泛应用在地面宽带通信和卫星通信中。本文设计了一种可融合动态波束成形算法的宽带多波束无线通信原型系统。该系统包括基站侧和用户侧, 其中基站侧由多核X86通用服务器、RFSOC、射频相控阵天线以及高速接口等硬件单元构成, 可实现多波束控制及其他基带信号处理功能, 采用了X86与FPGA融合计算架构实现无线基带算法部署。本系统支持智能动态波束成形, 并具有带宽大、吞吐量高、算法快速部署等优点, 可以应用于面向6G的通信技术开发和智能通信算法的快速集成验证。

关键词

6G, 多波束通信, 原型系统, 卫星通信, 智能通信

A Design of 6G Oriented Broadband Multi-Beam Wireless Communication Prototype System

Jiachen Tian, Zhiwei Yao, Yifei Zheng, Huaijin Zheng, Taiyang Ling, Wenjin Wang, Xiao Li

School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu
Email: tianjiachen@seu.edu.cn, wangwj@seu.edu.cn

Received: Jun. 10th, 2021; accepted: Jun. 24th, 2021; published: Jul. 13th, 2021

Abstract

Facing the challenge of communication business with huge traffic and connection demand in the

文章引用: 田佳辰, 姚志伟, 郑奕飞, 郑怀瑾, 凌泰炀, 王闻今, 李潇. 面向 6G 的宽带多波束无线通信原型系统设计 [J]. 无线通信, 2021, 11(4): 113-122. DOI: 10.12677/hjwc.2021.114013

B5G and 6G era, broadband dynamic multi-beam communication is one of the key candidates to be included in the next generation cellular systems and satellite communication systems, which utilizes the broadband characteristics of high frequency band and further taps spatial dimension resources, so as to improve quality of service (QoS). In this paper a broadband multi-beam wireless communication prototype system combined with dynamic multi-beam control is proposed, in which both base station side and user side are in consideration. On the base station side, hardware architectures including X86 universal servers, RFSocS, RF phased array antennas and high-speed interfaces are implemented, available for dynamic multi-beam control and other baseband signal processing functions. Wireless baseband algorithms are implemented in a fusion computing architecture of X86 servers and FPGA. The unique features of this system are dynamic multi-beam forming, large bandwidth, high throughput and high development flexibility for algorithms. This prototype system will be of great significance to 6G oriented system development, as well as be applied in rapid development and verification of intelligent algorithms.

Keywords

6G, Multi-Beam Communication, Prototype System, Satellite Communication, Intelligent Communication

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

第五代移动通信技术(5G)作为面向 2020 年之后的新一代移动通信技术,其通信网络已在全球范围内大规模部署[1],但是在信息交互的深度和广度上还不足以满足未来社会的需求。当前移动通信技术已开始向 6G 逐步演进,6G 无线通信网络将由陆地无线通信网络为主体,卫星、无人机(UAV)等非陆地网络为补充共同组成,可以满足天基、空基、陆基、海基多种场景用户需求,推动全球互联向立体化、深度化发展,实现多场景的智慧、深度、全息、泛在连接[2] [3] [4]。

在移动通信技术向 6G 演进的过程中,移动数据流量呈爆炸式增长,频谱资源与功率资源日益紧缺,成为制约通信系统发展的瓶颈问题。多波束技术利用大规模天线阵列产生不同指向的多波束,有效挖掘空间维度资源,提升频谱效率和功率效率,已在地面和卫星通信系统中广泛使用。现有多波束技术以固定多波束技术为主,其波束形状、方向固定,不能充分挖掘空间维度潜力[5]。动态多波束技术可以动态调整波束方向、波束宽度及波束能量,实时跟踪用户,准确指向服务用户,相比于固定多波束技术,可进一步降低用户间干扰,抑制波束间重叠,可以深度挖掘空间维度潜力。同时,动态多波束技术与宽带通信技术结合,能够进一步提高系统吞吐能力与频谱效率。

动态多波束通信系统涉及信道信息获取、波束权值计算、以及编码调制、多载波调制解调等基带信号处理[6] [7] [8]。为了研究上述关键技术在实际系统中的有效性,原型通信系统的设计尤为重要,应具备以下特征:

- 基带算法的快速部署
- 支持大带宽和高吞吐能力
- 支持实时可配置波束成形的天线阵列

基于上述需求,本文设计了宽带动态多波束无线通信原型系统,如图 1 所示构建了 X86 通用服务器

与 FPGA 融合的计算架构, 结合 X86 服务器计算能力强、开发效率高的优点与 FPGA 高速并行数据处理能力, 满足动态多波束技术中相关算法海量计算需求, 并实现快速部署、验证先进无线基带算法; 利用 RFSoc 芯片完成系统数字中频功能, 实现宽带模拟数字信号转换; 同时, 本系统通过配置可编程射频相控阵天线, 实现动态波束成形; 最后, 利用高速接口连接上述部分, 保证海量数据传输的可靠性。

本文后续章节安排如下: 章节 2 介绍本原型系统的硬件架构; 章节 3 介绍算法软件实现部分, 章节 4 介绍本原型的实验验证结果, 章节 5 总结全文的主要成果。

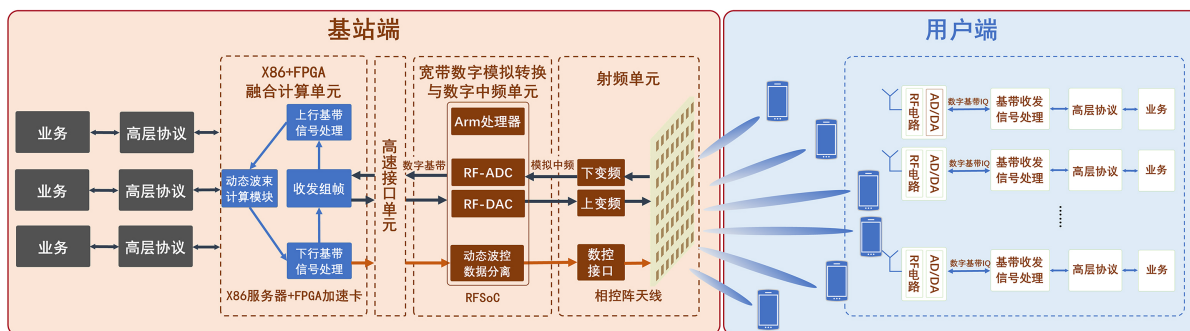


Figure 1. Overall structure of prototype system

图 1. 原型系统整体结构

2. 原型系统硬件架构

本文提出的原型系统, 硬件架构由射频单元、宽带数字模拟转换与数字中频单元、X86 + FPGA 融合计算单元和高速接口单元构成, 可实现上、下行链路中海量基带信号处理、宽带模数/数模转换 (RF-ADC/RF-DAC)、数字上变频(DUC)与数字下变频(DDC)、高速数据传输、多通道射频收发以及动态多波束成形等功能, 可以解决制约宽带毫米波多波束通信系统发展的硬件瓶颈问题[9]。

2.1. 射频单元

射频单元完成射频信号收发、波束成形、射频信号与模拟中频信号转换功能。如图 2 所示, 射频相控阵天线包括 TR 组件、天线子单元以及本振子单元。其中, 每个 TR 组件由一个 1 分 8 变频功分模块、数控接口板和 8 路 TDD 结构移相放大模块组成, 8 个移相放大模块通过行架连接成整体, 功分变频板通过 SMPM 板 - 板射频连接器与 8 个 TDD 结构移相放大器模块相连, 数控接口板负责根据基带侧发来的控制信号及时配置 TR 组件。天线子单元中, 竖状排列的 PCB 板上印制偶极子天线, 均采用垂直极化方式, 4 个偶极子天线合路为一个天线阵列, 可实现垂直面 40 度波束宽度与水平面 120 度扫描角度。本振子单元中采用两次变频方案, 分别变频至 2800 MHz 和 28 GHz, 本振信号分别为 2650 MHz 和 25.2 GHz, 其中 2650 MHz 本振采用 100 MHz 或 10 MHz 基准参考信号通过锁相环直接得到, 25.2 GHz 本振采用 100 MHz 或 10 MHz 基准信号直接锁定 12.6 GHz DRO 产生 12.6 GHz 信号后, 再经过 2 倍频、滤波之后得到, 两类本振信号分别通过 1 分 8 功分器即可得到 8 路对应的本振信号。整体结构为 8 个 TR 组件水平排列, 每个 TR 组件的 8 个移相子通道对应 8 个天线阵列, 可形成独立相扫波束, 实现基带和射频混合相控。

数控接口板接收控制信号, 包括开关切换信号、移相器和数控衰减信号(0.5 dB 步进), 及时配置 TR 组件。由于每个 TR 组件中衰减和移相控制字较多, 可通过 SPI 总线接口形式减少接口引线。且在实际工作中, 基带部分需要提前配置下次衰减和移相控制字, 可实现与射频开关切换相同方式, 即通过高低电平转换即可迅速完成对射频器件的控制, 满足射频单元控制响应时间短(小于 100 ns)的需求。

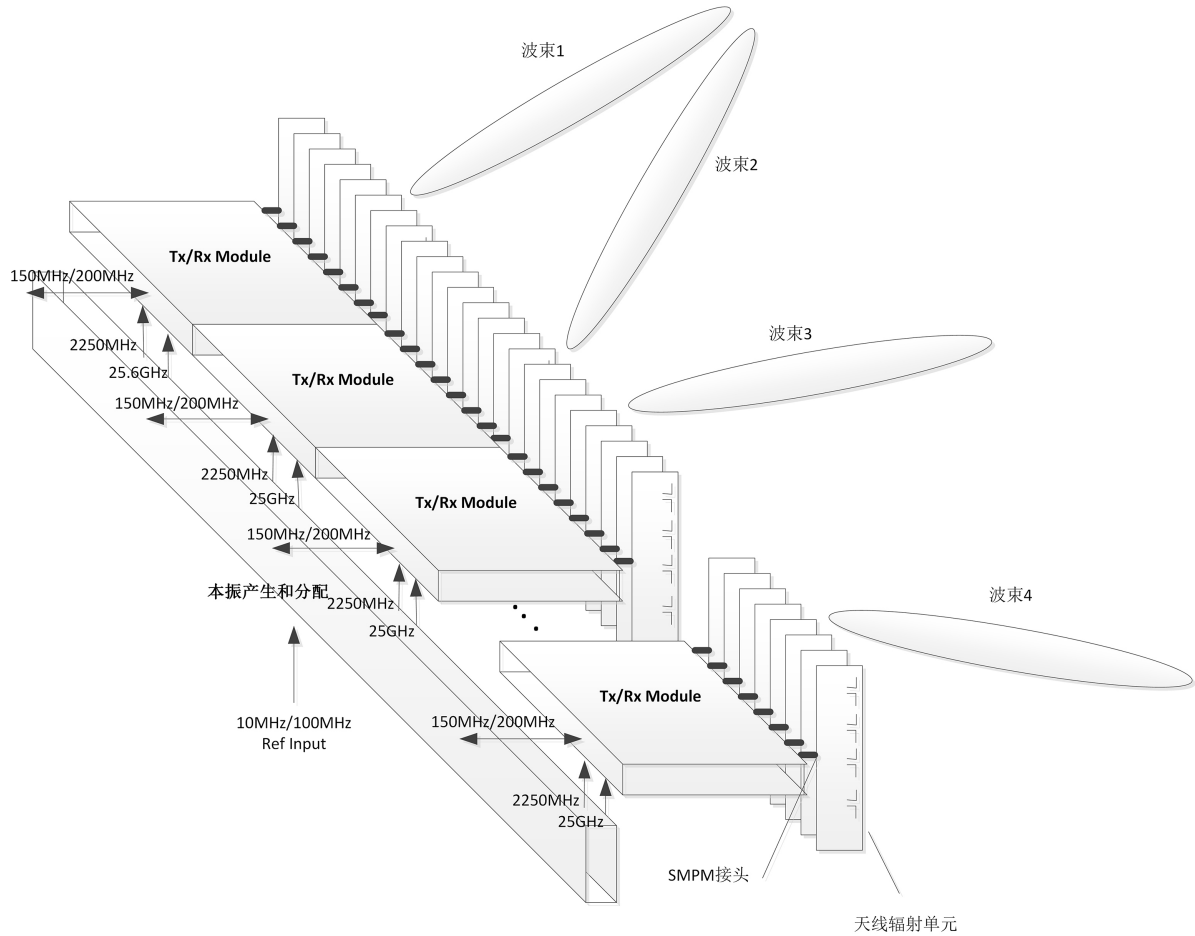


Figure 2. Structure of RF phased array antenna
图 2. 射频相控阵天线结构

2.2. 宽带模拟数字转换与数字中频单元

该部分主要基于 Xilinx 公司的 RFSoc 芯片实现[10]。RFSoc 集成现场可编程门阵列(FPGA)、宽带模拟数字转换器(RF-ADC/RF-DAC)、高度灵活的软判决纠错编码(SD-FEC)模块、以及处理器系统(Processing System, PS)等。其中,模拟数字转换器作为系统数字中频的主要单元,由 8 个 RF-ADC 与 8 个 RF-DAC 组成,通过 SMA 缆线与射频单元直接相连进行信号传输,其内部结构与功能具体介绍如下。

RF-ADC 的原理示意图如图 3 所示,其内部结构还包含阈值检测(Threshold Detection)模块、正交调制校正(Quadrature Modulation Correction, QMC)模块、IQ 混频模块、数控振荡器(NCO)、IQ 分路抽取模块以及可编程 FIFO 模块,如图 4 所示。每个 RF-ADC 为 12 bit 精度,每 2 个 RF-ADC 组成 1 个子单元(tile),并配置锁相环(PLL)和必要的时钟逻辑,通过 AXI4 总线协议与 PS 端进行通信。在本原型系统中,RF-ADC 将模拟中频信号变换为数字基带信号。采样数据首先经过输入门限检测输入模拟信号的功率,经过 QMC 模块对模拟信号进行幅度和相位增益补偿,进入数字下变频(Digital Down Conversion, DDC)模块进行 I/Q 下混频并抽取降低信号数量,最后经过可变数据缓冲器(Gearbox FIFO)进行时钟频率匹配并改变数据位宽,通过高速接口单元传递给系统融合计算单元处理。

RF-DAC 原理示意图如图 5 所示,其内部结构还包含可编程 FIFO 模块、IQ 分路插值模块、IQ 混频模块、数控振荡器(NCO)、QMC 模块和输出滤波器模块,如图 6 所示。每个 RF-DAC 为 14 bit 精度,每

4 个 RF-DAC 组成 1 个子单元(tile), 并配置锁相环(PLL)和必要的时钟逻辑, 同样通过 AXI4 总线协议与 PS 端进行通信。在本原型系统中, RF-DAC 将数字基带信号变换为模拟中频信号。数字信号首先经过数字上变频(Digital Up Conversion, DUC)模块完成内插滤波, 升采样以及数字混频, 然后经过逆 SincFIR 滤波器补偿并产生模拟输出, 以差分形式互补输出两路模拟电流, 电流之和等于 RF-DAC 满量程电流。

通过配置 RF Data Converter IP 核可以改变 RF-ADC 和 RF-DAC 的采样率、带宽、抽取倍数、AXI4 总线时钟、每周期采样数、输入输出信号类型(Real 信号或 I/Q 信号)以及对应的奈奎斯特区等参数, 从而改变系统的参数设置和工作状态。本原型系统中关于 IP 核参数设置如表 1 所示。

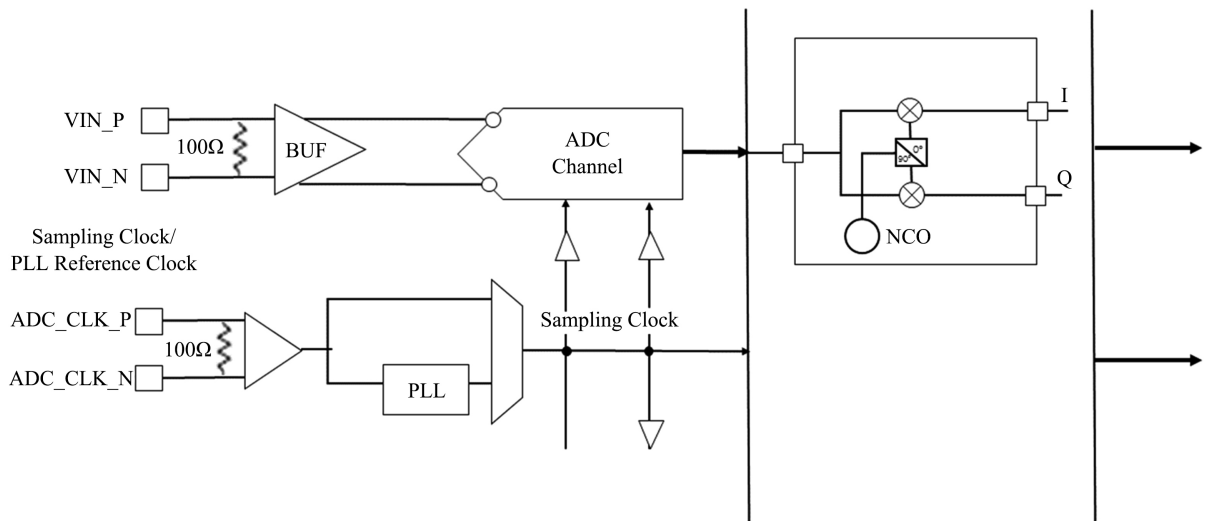


Figure 3. Schematic diagram of RF-ADC

图 3. RF-ADC 原理示意图

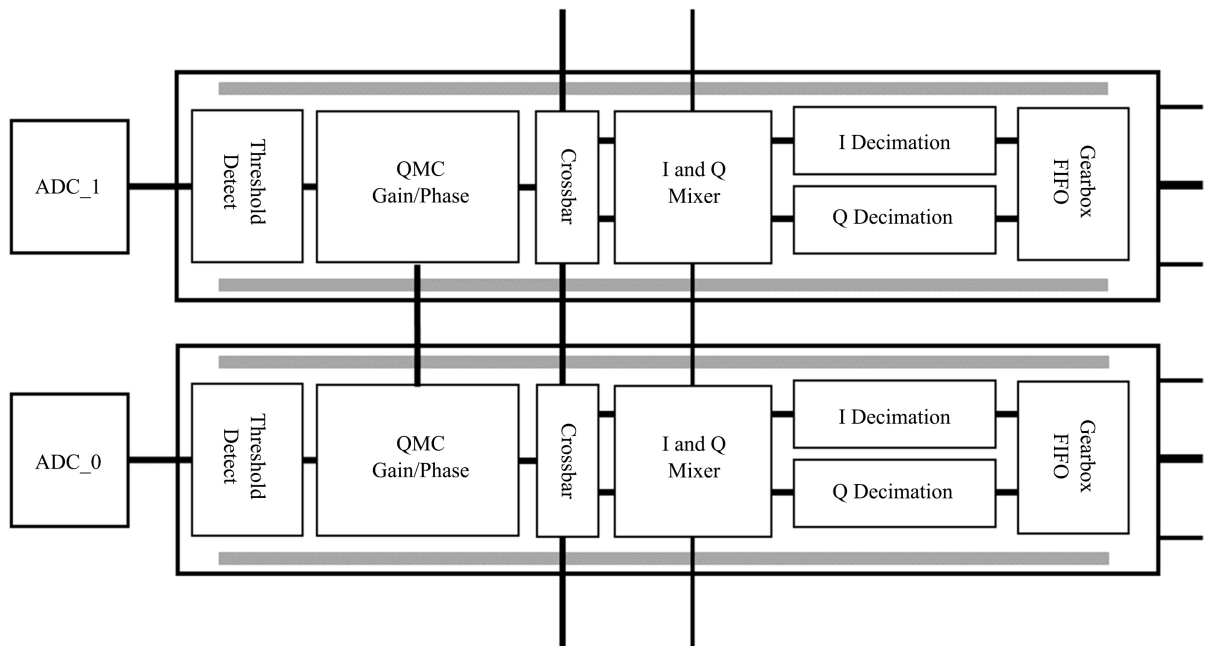


Figure 4. Diagram of RF-ADC internal structure

图 4. RF-ADC 内部结构示意图

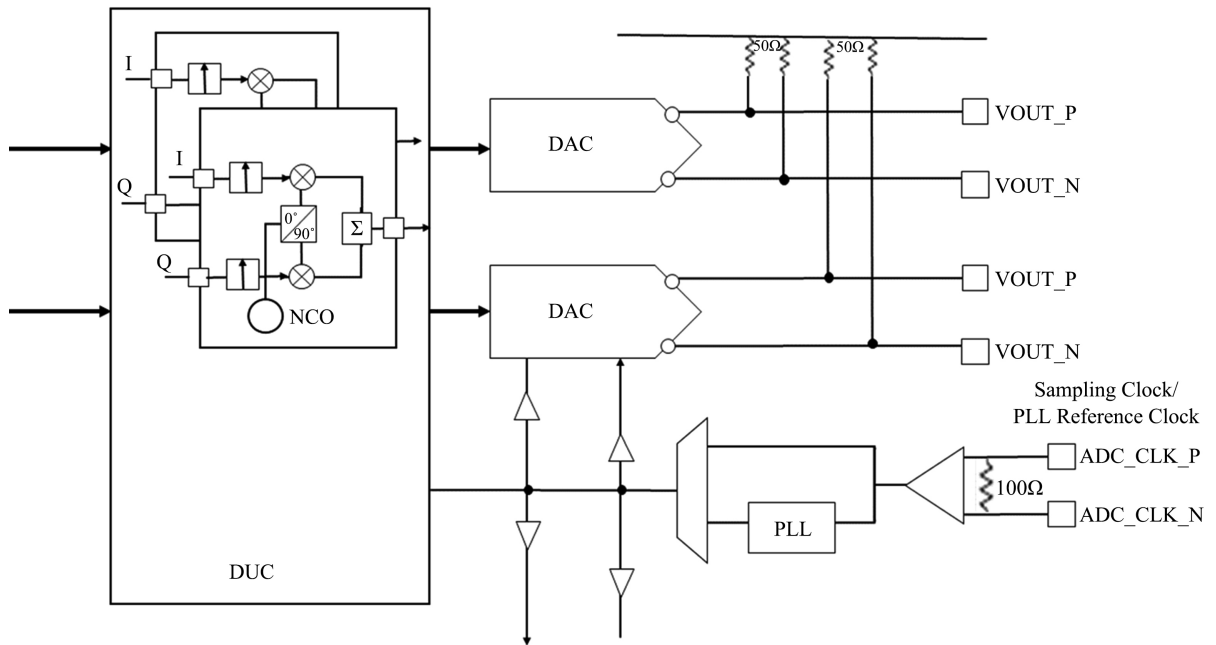


Figure 5. Schematic diagram of RF-DAC
图 5. RF-DAC 原理示意图

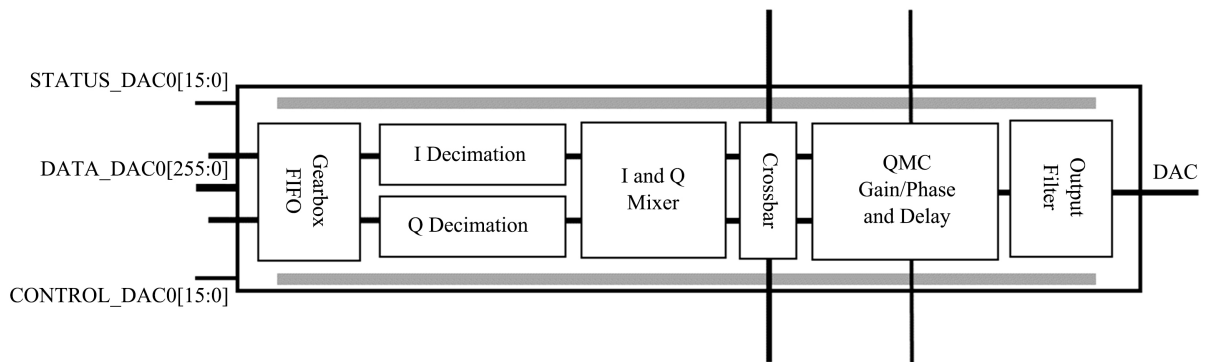


Figure 6. Diagram of RF-DAC internal structure
图 6. RF-DAC 内部结构示意图

Table 1. Parameters settings in RF data converter IP core
表 1. RF 数据转换器相关参数设置

参数名称	RF-ADCs	RF-DACs
采样率	3.93216 GSPS	3.93216 GSPS
带宽	491.52 MHz	491.52 MHz
抽取/内插倍数	8	8
Samples/AXI4-Stream Cycle	4	8
AXI4-Stream 时钟	122.88 MHz	122.88MHz
输入输出模式	Real->I/Q	I/Q->Real
奈奎斯特区域	Zone 1	Zone 2

2.3. X86 + FPGA 融合计算单元

本文提出的原型系统利用配置 Intel Xeon Gold 6154 的通用服务器与 Xilinx UltraScale + FPGA 构成融合计算单元。通常情况下, 各类大规模多波束无线通信原型系统的算法软件架构采用通用服务器或 FPGA 部署[11]。X86 通用服务器计算能力强、开发效率高、调试灵活性大, 但实时数据处理速度有限, 可支持的系统带宽有限[12] [13]; 而 FPGA 虽然可实现实时数据高速并行处理, 但编程周期较长, 调试难度较大, 在处理海量基带信号、实现动态波束成形方面有较大难度, 也不适合用于通信算法快速验证[14] [15]。对于本文提出的融合计算架构, 通过模块化设计(Block Design)对 FPGA 进行编程, 用于部署软件定义无线电(Software Defined Radio, SDR)相关算法; 在多核 X86 通用服务器中采用高级语言以及并行指令集快速实现数据计算, 满足高计算能力的同时获得高开发效率和强调试灵活性, 可以应用于快速部署验证先进无线基带算法。

2.4. 高速接口单元

高速接口单元包含 PCI-Express 总线接口, GTY 高速收发接口, Xilinx Aurora 以及 Alveo U200 数据中心加速卡。其中, 数据中心加速卡与 X86 服务器 PCI-Express 总线接口连接, 可以提升服务器计算能力; Xilinx Aurora 与 RFSoc 侧 GTY 高速接口相连, 具有资源成本低、吞吐量可扩展、数据接口灵活等优点; 数字中频单元(Xilinx Aurora)与融合计算单元(数据中心加速卡)之间通过 QSFP (Quad Small Form-factor Pluggable)接口连接, 每个 QSFP 数据传输速率可达 25 Gbps, 总速率可达 100 Gbps。下行链路传输时, 融合计算单元通过 QSFP 传输数据进入数字中频单元 FIFO 存储器, 收发组帧模块将高速接口传输的基带信号按照定义的帧格式解包, 分离得到用户数据和波束控制数据, 其中用户数据传输至 RF-DAC, 波束控制数据经处理后成为高低电平信号, 用于配置射频单元侧数控接口板, 实现波束成形。上行链路传输时, 数字中频单元中 RF-ADC 输出用户数据通过收发组帧模块按照定义帧格式打包, 进入 FIFO 存储器后经 QSFP 及高速接口传输至融合计算单元。两种过程中, FIFO 存储器均起到数据缓存和异步时钟域转换的作用。

3. 原型系统算法与软件实现

算法与软件架构完成基带信号处理、软件定义数字中频功能。其中基带信号处理包括上行基带信号处理、下行基带信号处理及动态波束计算模块, 其流程如图 7 所示。

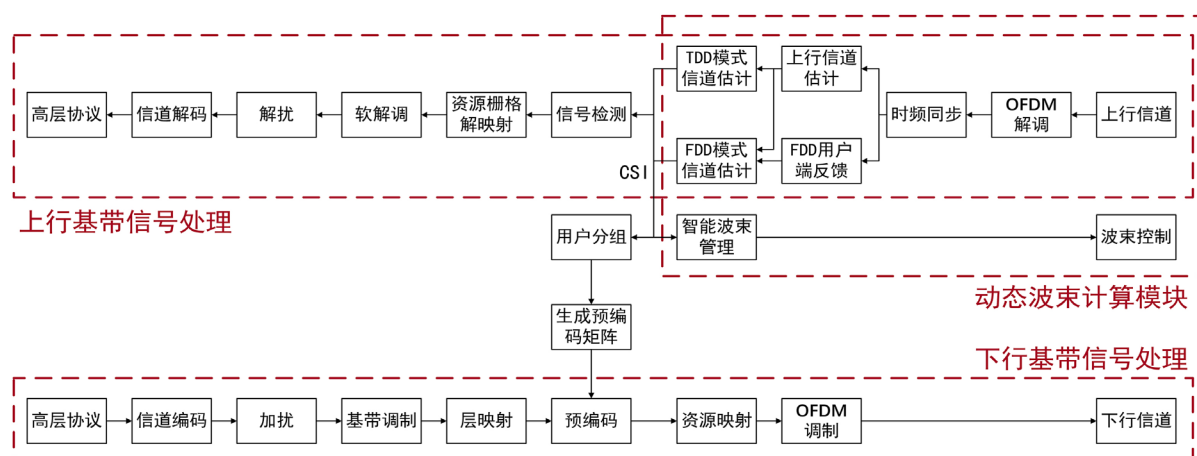


Figure 7. Flow chart of baseband signal processing

图 7. 基带信号处理示意图

下行基带信号处理过程中, 比特流数据从基站 MAC 层下发至物理层, 再经过信道编码、序列加扰、基带调制、层映射、与编码、资源映射、OFDM 调制等功能模块处理, 生成待发数据。具体而言, 信道编码采用 LDPC 编码方案, 将编码比特序列与加扰序列相乘, 形成加扰比特块后转换为复值调制符号块, 本系统可支持包括 BPSK、QPSK、16-QAM、64-QAM 以及 256-QAM 的 5 种调制方案, 并通过层映射分配多个传输层, 经过预编码映射天线端口, 完成资源映射后以 OFDM 符号的形式发送进入无线信道。上行基带信号处理过程中, 通过高速数据接口与数据流转发单元, 接收来自 RFSoc 的数据, 经过 OFDM 解调、时频同步、信道估计、信号检测、资源栅格解映射、解层映射、软解调、解扰、信道译码等功能模块处理, 得到用户数据。动态波束计算模块在实现动态波束计算之前, 需要接收并处理上行链路用户数据, 分析获得基站与用户之间的信道状态信息(CSI)。且相比于瞬时信道状态信息(iCSI), 统计信道状态信息(sCSI)在满足精确度要求的条件下变化缓慢且容易获得。在获取信道状态信息后通过相应的通信算法实现信道信息预测、波束管理及波束成形等, 进而产生调整波束指向、宽度、能量的多波束控制数据。

X86 服务器内部利用到多线程技术, 各线程独立运行、适当交互, 从而实现并行计算, 其软件架构由主控制线程、接收数据线程、发送数据线程、上下行数据处理线程等构成, 如图 8 所示。其中接收数据线程与发送数据线程分别与上下行数据处理线程进行数据交互, 上下行数据处理线程分别由多个子线程构成, 共同完成基带信号处理功能, 同时还可以集成信道估计、波束管理、波束控制等算法。动态波束计算线程主要对用户数据进行分析处理, 产生波控数据从而实现动态多波束控制。同时, X86 通用服务器还利用高级语言单指令多数据流技术(Single Instruction Multiple Data, SIMD)和 Intel 数学核心函数库(Intel Math Kernel Library, MKL)。SIMD 技术可以大幅提高程序执行速度, 高效地利用多核服务器的资源; MKL 库函数提供了包括线性代数、快速傅里叶变换、矢量数学等多种工具包, 大幅提高无线通信基带算法处理的性能, 优化服务器处理速度, 为本系统程序设计与实现提供有力支持。

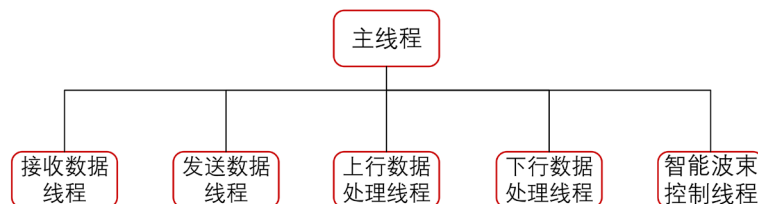


Figure 8. Multithreading software architecture of X86

图 8. X86 多线程软件架构

4. 原型系统实验验证结果

本系统作为 5G 向 6G 演进的宽动态多波束原型验证系统, 设计上与主流波束域标准相一致。本系统设定基站端配置 512 根天线, 共 8 个数字通道, 支持 8 波束动态通信, 可以服务 1~8 个用户终端, 射频模块采样率为 3.93216GSPS, 可支持 400 MHz 有效通信带宽, FFT 大小为 4096, 子载波间隔为 120 KHz, 提供 5 种可选的调制方式, 以及两种长度的循环前缀。本原型验证系统性能指标如表 2 所示。可以看出, 本系统在满足多天线和大带宽的条件下还可以进一步实现动态多波束成形, 在下一代移动通信系统研发中具有很好的实验和验证意义。

为了验证本系统在实际应用中的可靠性与有效性, 本小节呈现了系统在不同信道条件下传输误块率(Block Error Bit, BLER)、误码率(Bit Error Rate, BER)性能曲线以及吞吐量数据。在可靠性测试中, 设置仿真时隙数为 2000, 总传输比特数为 1.63952×10^8 , 传输块数为 2000, 测得系统在不同信道条件下的误块率曲线和误码率曲线如图 9 所示。

Table 2. Performance index of prototype system
表 2. 原型系统性能指标

参数名称	数值
基站天线数	512
移动台(用户)数目	1~8
系统采样率	3.93216GSPS
系统带宽	500 MHz
子载波间隔	120 KHz
FFT 大小	4096
数据子载波	3276
保护子载波	820
每个时隙 OFDM 符号数	14
调制方式	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
循环前缀长度	160(符号 0)/144(符号 1-6)

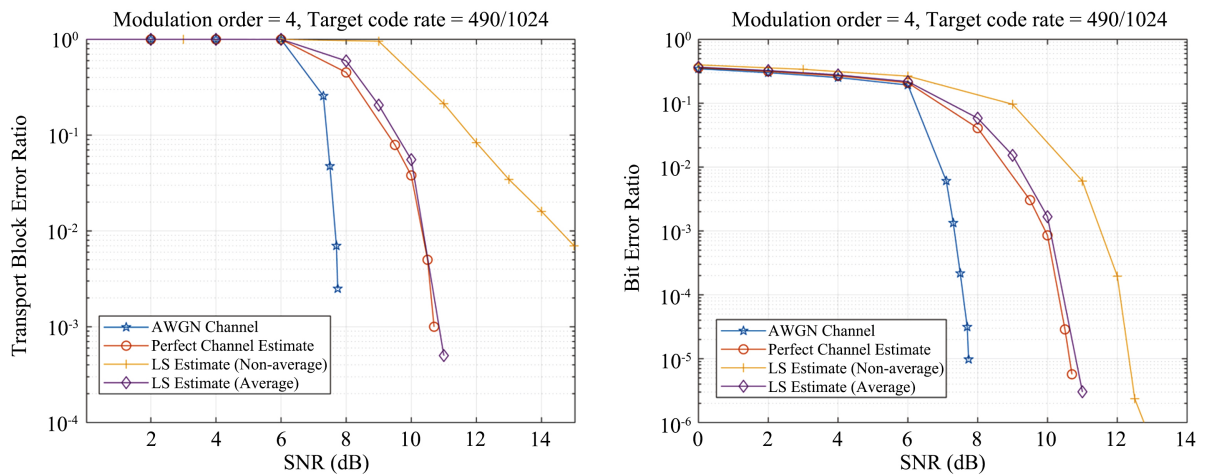


Figure 9. Performance comparison of BLER and BER of 1Tx-1Rx link under different channel conditions
图 9.1 发 1 收链路在不同信道条件下的误块率(BLER)和误码率(BER)性能对比图

Table 3. Throughput performance of 1Tx-1Rx system with 400 MHz effective bandwidth under different MCS
表 3. 400M 有效带宽 1 发 1 收系统在不同 MCS 下的吞吐量性能

Q	R	Spectral efficiency	Bits/frame	SNR (dB)	Tx time (s)	Tx tp (Mb/s)	Rx time (s)	Rx tp (Mb/s)
2	251	0.4902	1,680,000	5	1.5564	107.9405	16.7951	10.0029
2	679	1.3262	4,509,440	10	2.2918	196.7668	16.3946	27.5057
4	490	1.9141	6,558,080	15	3.3713	194.5242	23.0767	28.4186
4	658	2.5703	8,684,160	20	3.8552	225.2599	20.1661	43.0631
6	517	3.0293	10,330,240	25	4.8384	213.5049	27.8199	37.1326
6	910	5.3320	18,038,400	30	6.7017	269.1624	21.8183	82.6754

可以看出, LS 信道估计性能与理想信道估计性能差距较大, 且随着误码率降低, 误块率仍然较高。由于在仿真过程中认为信道沿着子载波方向变化缓慢, 因此可以考虑对相邻几个子载波上的信道系数取平均以改善信道估计性能。由图中可见, 通过在一个 RB 上对估计出的信道系数取平均, 减小了噪声对信道估计准确度的影响, 使得 LS 估计的性能较为接近理想信道估计缺陷。在有效性测试中, 对系统在不同 MCS 方案和不同调制阶数的条件下, 分别测得链路发送、接收时间以及吞吐量, 结果如表 3 所示。

5. 结束语

移动通信技术发展已进入 5G 和 6G 时代, 面对未来全球广域的多场景用户宽带接入需求, 动态多波束通信已成为构建空地海一体化互联网络的关键使能技术之一。面对动态多波束技术中关键环节和先进算法的验证需求, 本文设计了宽带动态多波束无线通信原型系统用于实验。本系统利用 X86 通用服务器与 FPGA 融合计算架构部署无线基带算法, 利用 RFSoc 完成多通道宽带模数/数模转换和数字中频, 可以支持智能动态波束成形, 并具有带宽大、吞吐量高、算法快速部署等优点, 涵盖了无线通信系统上、下行链路基站侧与用户侧的各个环节。同时, 本文还给出系统可靠性和有效性测试。在面向未来 6G 通信系统和卫星通信系统的开发中可以用于关键技术验证和先进通信算法快速部署, 具有重要的实用意义。

参考文献

- [1] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551-563.
- [2] You, X.H., Wang, C.-X., Huang, J., et al. (2021) Towards 6G Wireless Communication Networks: Vision, Enabling Technologies, and New Paradigm Shifts. *Science China (Information Sciences)*, **64**, 5-78
- [3] 李贺武, 吴茜, 徐恪, 等. 天地一体化网络研究进展与趋势[J]. 科技导报, 2016, 34(14): 95-106.
- [4] Chen, S., Liang, Y.-C., Sun, S., et al. (2020) Vision, Requirements, and Technology Trend of 6G: How to Tackle the Challenges of System Coverage, Capacity, User Data-Rate and Movement Speed. *IEEE Wireless Communications*, **27**, 218-228. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900333>
- [5] 张中山, 王兴, 张成勇, 等. 大规模 MIMO 关键技术及应用[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(9): 1095-1110.
- [6] Nishimori, K., Hiraguri, T., Seki, T. and Yamada, H. (2015) Multi-Beam Massive MIMO Using Analog Beamforming and DBF Based Blind Algorithm. 2015 *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, **2015**, 1-3.
- [7] Ding, Y. and Fusco, V. (2015) Orthogonal Vector Approach for Synthesis of Multi-Beam Directional Modulation Transmitters. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **14**, 1330-1333. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2404818>
- [8] Guidolin, F. and Nekovee, M. (2015) Investigating Spectrum Sharing between 5G Millimeter Wave Networks and Fixed Satellite Systems. 2015 *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, San Diego, 6-10 December 2015, 1-7. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2015.7414196>
- [9] 洪伟, 余超, 陈继新, 等. 5G 及其演进中的毫米波技术[J]. 微波学报, 2020, 36(1): 12-16.
- [10] Xilinx (2021) PG269 Zynq UltraScale+ RFSOC RF Data Converter Gen1/2/3. https://china.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/usp_rf_data_converter/v2_5/pg269-rf-data-converter.pdf
- [11] 阳析. 毫米波大规模 MIMO 无线传输关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [12] Kaltenberger, F., et al. (2015) Open Air Interface: Open-Source Software Radio Solution for 5G. European Conference on Networks and Communications, Paris, France.
- [13] Yang, Q., Li, X., Yao, H., et al. (2013) BigStation: Enabling Scalable Real-Time Signal Processing in Large Mu-Mimo Systems. *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 Conference on SIGCOMM*, ACM, New York, August 2013, 399-410. <https://doi.org/10.1145/2486001.2486016>
- [14] Vieira, J., et al. (2014) A flexible 100-Antenna Testbed for Massive MIMO. 2014 *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Austin, USA, 8-12 December 2014, 287-293. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2014.7063446>
- [15] Clayton Shepard, Hang Yu, Narendra Anand, et al. (2012) Argos: Practical Many-Antenna Base Stations. *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom'12)*, New York, August 2012, 53-64.