



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

集成电路设计丛书

大规模MIMO检测算法VLSI架构

——专用电路及动态重构实现

刘雷波 彭贵强 魏少军◎著



科学出版社
龙门书局



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

集成电路设计丛书

大规模 MIMO 检测算法 VLSI 架构

——专用电路及动态重构实现

刘雷波 彭贵强 魏少军 著

科学出版社
龙 门 书 局

北 京

内 容 简 介

本书首先分别介绍线性和非线性大规模 MIMO 检测算法,及对应的专用电路的设计,然后提出并设计大规模 MIMO 检测可重构处理器,并介绍相应的数据通路和配置通路的设计方法,该方法解决了大规模 MIMO 检测芯片缺乏高灵活性和高扩展性这一难题,最后对大规模 MIMO 检测 VLSI 架构在服务器端、移动端和边缘计算端的应用进行展望。

本书适合电子科学与技术、通信工程、计算机科学与技术等专业的科研人员、研究生,以及工程师阅读学习。

图书在版编目(CIP)数据

大规模 MIMO 检测算法 VLSI 架构:专用电路及动态重构实现 / 刘雷波, 彭贵强, 魏少军著. —北京: 龙门书局, 2019.5

(集成电路设计丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 国家出版基金项目

ISBN 978-7-5088-5546-2

I. ①大… II. ①刘… ②彭… ③魏… III. ①集成电路—电路设计—研究 ②移动通信—通信系统—算法—研究 IV. ①TN402 ②TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 063938 号

责任编辑: 赵艳春 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社
龙 门 书 局 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 5 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2019 年 5 月第一次印刷 印张: 18 1/2 彩插: 8 页

字数: 360 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《集成电路设计丛书》编委会

主 编：郝 跃

副 主 编：黄 如 刘 明 魏少军 杨银堂

常务副主编：朱樟明

编 委：（按姓氏拼音排序）

胡向东	廖怀林	林福江	龙世兵	马凯学
毛志刚	时龙兴	孙宏滨	孙玲玲	王志华
尹首一	虞小鹏	曾晓洋	张 波	赵元富
邹雪城				

序

集成电路无疑是近 60 年来世界高新技术的最典型代表，它的产生、进步和发展无疑高度凝聚了人类的智慧结晶。集成电路产业是信息技术产业的核心，是支撑经济社会发展和保障国家安全的战略性、基础性和先导性产业，也是我国的战略性必争产业。当前和今后一段时期，我国的集成电路产业面临重要的发展机遇期，也是技术攻坚期。总体上讲，集成电路包括设计、制造、封装测试、材料等四大产业集群，其中集成电路设计是集成电路产业知识密集的体现，也是直接面向市场的核心和制高点。

“关键核心技术是要不来、买不来、讨不来的”，这是习近平总书记在 2018 年全国两院院士大会上的重要论述，这一论述对我国的集成电路技术和产业尤为重要。正是由于集成电路是电子信息产业的基石和现代工业的粮食，对国家安全和工业安全具有决定性的作用，我们必须、也只能立足于自主创新。

为落实国家集成电路产业发展推进纲要，加快推进我国集成电路设计技术和产业发展，多位院士和专家学者共同策划了这套《集成电路设计丛书》。这套丛书针对集成电路设计领域的关键和核心技术，在总结近年来我国集成电路设计领域主要成果的基础上，重点论述该领域的基础理论和关键技术，给出集成电路设计领域进一步的发展趋势。

值得指出的是，这套丛书是我国中青年学者近年来学术成就和技术攻关成果的总结，体现集成电路设计技术和应用研究的结合，感谢他们为大家介绍总结国内外集成电路设计领域的最新进展，每本书内容丰富，信息量很大。丛书内容包含了先进的微处理器、系统芯片与可重构计算、半导体存储器、混合信号集成电路、射频集成电路、集成电路设计自动化、功率集成电路、毫米波及太赫兹集成电路、硅基光电片上网络等方面的研究工作和研究进展。通过对丛书的研读能够进一步了解该领域的研究成果和经验，吸引和引导更多的年轻学者和科研工作者积极投入到集成电路设计这项既具有挑战又有吸引力的事业中来，为我国集成电路设计产业发展做出贡献。

感谢丛书撰写的各领域专家学者。愿这套丛书能成为广大读者，尤其是科研工作者、青年学者和研究生十分有用的前沿和教学参考书，使大家能够进一步明确发展方向和目标，为开展集成电路的创新研究和工程应用奠定重要基础。同时，这套丛书也能为我国集成电路设计领域的专家学者提供一个展示研究成果的交流平台，进一步促进和推动我国集成电路设计领域的教学、科研和产业的深入发展。

2018 年 6 月 8 日

前 言

大规模 MIMO 技术作为未来移动通信的核心技术之一，能够有效地提升网络容量、增强鲁棒性、降低通信延时。但是随着天线数量增加，基带处理复杂度会急剧增长，因此，高性能大规模 MIMO 基带处理芯片设计已成为制约大规模 MIMO 技术在通信系统中广泛应用的技术瓶颈，特别是低复杂度、高并行性的大规模 MIMO 检测芯片的设计。

本书首先介绍作者团队在高效大规模 MIMO 检测算法和电路架构方面的研究历程：在分析已有的大规模 MIMO 检测算法的基础上，从计算复杂度和并行性等维度对这类算法进行优化，通过数学理论分析，证明团队提出的大规模 MIMO 检测优化算法具有低复杂度和高并行性的优点，并能够充分满足检测精度的需求；随后以 ASIC 作为载体，验证基于团队提出的大规模 MIMO 检测算法芯片具有高能量效率、高面积效率和低检测误差等特性。

在设计大规模 MIMO 检测芯片的过程中，我们认识到基于 ASIC 载体的大规模 MIMO 检测芯片仅适合于处理速度要求极高的应用场景，但还有一些应用场景需要大规模 MIMO 检测芯片具有一定的灵活性和可扩展性，从而能够支持不同标准、算法和天线规模，并能够适应标准和算法的演进。经过分析，我们认为可重构计算架构是一种非常有前景的解决方案。在对大量已有大规模 MIMO 检测算法分析以及共性特征提取的基础上，团队设计了适用于大规模 MIMO 检测算法的数据通路和配置通路，包括处理单元、互连、存储机制、配置信息格式、配置方法等，完成了一款大规模 MIMO 检测可重构处理器设计。

该大规模 MIMO 检测可重构处理器将同样适用于 beyond 5G 等未来无线通信系统，主要有三个原因：第一，目前无线通信算法的发展都是在反复迭代和优化过程中进行的，在解决商用算法局限性的过程中，无论优化已有算法还是设计出新的算法，算法的更新都具有很强的逻辑承接关系，为可重构处理器架构的设计提供了内在逻辑基础。第二，在开展大规模 MIMO 检测可重构处理器的处理单元以及处理单元阵列设计时，充分考虑了灵活性和可扩展性需求，以使其能够满足目前各类算法的硬件需求和未来可预见的需要。第三，因为大规模 MIMO 检测可重构处理器的设计方法学是共通的，所以可以满足未来算法的硬件实现需求。因此，在进行相应算法分析以后，根据设计方法学，对可重构处理器架构进行的优化和设计将是一个通用的过程。

全书共分 7 章：第 1 章介绍无线通信技术的发展趋势，包括大规模 MIMO 技术和 MIMO 检测技术的发展与研究现状，分析基于专用集成电路和指令级架构处理器

的 MIMO 检测芯片在性能、功耗和灵活性等方面的优缺点,提出 MIMO 检测动态重构芯片技术,并分析其实现的可行性。第 2 章和第 3 章分别介绍线性大规模 MIMO 检测算法及对应的电路架构,并从算法收敛性、计算复杂度和检测性能等方面分析本团队所提出的线性检测优化算法的优势,实验结果显示基于本团队所提出的算法设计的电路具有更好的能量效率和面积效率,从而验证本团队所提出的优化算法更适合于硬件实现。第 4 章和第 5 章分别介绍高检测精度的非线性大规模 MIMO 检测算法及对应的电路架构,并在算法收敛性、计算复杂度、检测性能和实验结果等方面将本团队所提出的非线性大规模 MIMO 检测算法与其他算法进行对比,结果显示本团队提出的算法在实现高检测精度的同时,复杂度也在能够接受的范围内。第 6 章详细介绍大规模 MIMO 检测动态重构芯片,首先,以可重构计算架构为目标硬件平台,对目前主流的大规模 MIMO 检测算法进行分析,包括算法的共性逻辑提取、数据类型的特征提取、算法的并行性分析;其次,从数据通路和配置通路两个方面详细分析大规模 MIMO 检测动态重构芯片的硬件架构设计,介绍针对大规模 MIMO 检测算法的硬件架构设计方法。第 7 章对大规模 MIMO 检测 VLSI 架构在服务器端、移动端和边缘计算端进行应用展望。

本书凝聚了清华大学微电子学研究所无线通信基带处理器团队近 6 年的集体智慧。感谢彭贵强、王君君、张朋、魏秋实、谭颖然、杨海昌、王攀、吴一波、朱益宏、薛阳、李兆石、杨骁、丁子瑜和王汉宁等同学及同事的参与,感谢王垚、应亦劼、孔佳、陈英杰、王广斌、王磊、李政东、罗森品、金宇等工程师的参与,感谢魏少军教授对本书撰写工作的大力支持与指导,感谢英特尔移动网络与计算协同研究院(Intel Collaborative Research Institutes on Mobile Networking and Computing, ICRI-MNC)对本工作的支持。最后,还要感谢我的爱人和孩子们对我工作的理解和宽容,没有你们的支持,难以想象我可以完成这些工作,你们是我今后继续努力和前进的重要动力!

刘雷波

2018 年 8 月于清华园

目 录

序

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	应用需求	1
1.1.1	未来典型应用	2
1.1.2	通信系统需求	5
1.2	移动通信与 MIMO 检测	7
1.2.1	通信技术发展	7
1.2.2	5G 关键技术	9
1.2.3	MIMO 基带处理	13
1.2.4	大规模 MIMO 检测难点	18
1.3	MIMO 检测芯片研究现状	19
1.3.1	基于 ISAP 的 MIMO 检测芯片	19
1.3.2	基于 ASIC 的 MIMO 检测芯片	24
1.3.3	传统 MIMO 检测芯片的局限性	40
1.4	MIMO 检测动态重构芯片技术	40
1.4.1	可重构计算概述	40
1.4.2	MIMO 检测动态重构芯片研究现状	48
	参考文献	57
第 2 章	线性大规模 MIMO 检测算法	65
2.1	线性算法概述	65
2.2	纽曼级数近似算法	68
2.2.1	算法设计	68
2.2.2	误差分析	69
2.2.3	复杂度与误块率	72
2.3	切比雪夫迭代算法	75
2.3.1	算法设计	75
2.3.2	收敛性	79
2.3.3	复杂度与并行性	83
2.3.4	误比特率	85

2.3.5	信道模型影响分析	87
2.4	雅可比迭代算法	89
2.4.1	加权雅可比迭代及收敛性	89
2.4.2	复杂度及误帧率	93
2.4.3	信道模型影响分析	96
2.5	共轭梯度算法	97
2.5.1	算法设计	97
2.5.2	收敛性	99
2.5.3	迭代初值及搜索	100
2.5.4	复杂度与并行性	104
2.5.5	误符号率	105
	参考文献	107
第 3 章	线性大规模 MIMO 检测架构	110
3.1	纽曼级数近似硬件架构	110
3.1.1	VLSI 顶层结构	110
3.1.2	近似求逆及匹配滤波模块	111
3.1.3	均衡和 SINR 模块	112
3.1.4	IFFT 及 LLR 模块	113
3.1.5	基于 Cholesky 分解求逆模块	113
3.2	切比雪夫迭代硬件架构	115
3.2.1	VLSI 顶层结构	115
3.2.2	初始模块	115
3.2.3	迭代模块	117
3.2.4	LLR 模块	118
3.2.5	实验结果与比较	118
3.3	加权雅可比迭代硬件架构	121
3.3.1	VLSI 顶层架构	121
3.3.2	对角脉动阵列	122
3.3.3	WeJi 模块	124
3.3.4	LLR 模块	126
3.3.5	实验结果与比较	127
3.4	共轭梯度法硬件架构	133
3.4.1	VLSI 顶层结构	133
3.4.2	输入输出模块	133
3.4.3	乘法模块	134

3.4.4 迭代模块	135
3.4.5 实验结果及比较	136
参考文献	138
第 4 章 非线性大规模 MIMO 信号检测算法	141
4.1 传统非线性 MIMO 信号检测算法	142
4.1.1 ML 信号检测算法	142
4.1.2 SD 信号检测算法和 K -best 信号检测算法	144
4.2 CHOSLAR 算法	147
4.2.1 系统模型	147
4.2.2 QR 分解	147
4.2.3 格基规约	149
4.2.4 Cholesky 预处理	150
4.2.5 改进 K -best 检测器及其性能仿真	156
4.2.6 总结和分析	161
4.3 TASER 算法	163
4.3.1 系统模型	163
4.3.2 半定松弛	165
4.3.3 算法分析	165
4.3.4 性能分析	168
4.3.5 计算复杂度	169
参考文献	170
第 5 章 非线性大规模 MIMO 检测硬件架构	175
5.1 CHOSLAR 硬件架构	175
5.1.1 VLSI 结构	175
5.1.2 实现结果和比较	182
5.2 TASER 硬件架构	185
5.2.1 架构综述	185
5.2.2 基本处理单元	187
5.2.3 实现细节	188
5.2.4 FPGA 实现结果	189
5.2.5 ASIC 实现结果	191
参考文献	193
第 6 章 大规模 MIMO 检测动态重构芯片	196
6.1 算法分析	196

6.1.1	算法分析方法	197
6.1.2	算法共性	198
6.1.3	计算模型	198
6.2	数据通路	200
6.2.1	可重构运算单元阵列结构	201
6.2.2	运算单元结构	203
6.2.3	共享存储器	207
6.2.4	互连	209
6.3	配置通路	240
6.3.1	控制设计	241
6.3.2	主控接口	241
6.3.3	配置控制器	243
6.3.4	配置包设计	244
6.3.5	映射方法	248
	参考文献	253
第 7 章	大规模 MIMO 检测 VLSI 架构展望	257
7.1	服务器端应用展望	258
7.1.1	5G 通信特点概要	258
7.1.2	服务器端特点概要	260
7.1.3	服务器端应用	261
7.2	移动终端应用展望	267
7.2.1	基于 ASIC 的检测芯片应用	268
7.2.2	基于可重构的检测芯片应用	272
7.3	边缘计算应用展望	275
7.3.1	边缘计算的概念	276
7.3.2	检测芯片在边缘计算应用	278
	参考文献	281

彩图

第 1 章 绪 论

随着人们日常生活对移动通信需求的急剧发展,复杂的数据通信和处理将成为未来移动通信的一个重要挑战。作为移动通信发展的关键技术,大规模多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术能够提升网络容量、增强网络鲁棒性、降低通信延时等。但是,随着天线数量增加,基带处理复杂度也会急剧增长。大规模天线检测算法以超大规模集成电路(very large scale integration, VLSI)芯片实现作为载体。大规模 MIMO 基带处理芯片设计将成为该技术真正应用的瓶颈之一,特别是有着高复杂度和低并行性的大规模 MIMO 检测芯片设计。

为了满足未来无线通信数据传输需求并且兼顾功耗问题,大规模 MIMO 检测芯片需要实现高数据吞吐率、高能量效率以及低延时;为了支持不同标准、不同算法、不同天线规模等,大规模 MIMO 检测芯片需要有一定的灵活性;为了适应未来标准和算法的演进,大规模 MIMO 检测芯片需要有一定的可扩展性。包括指令集结构处理器(instruction set architecture processor, ISAP)和专用集成电路(application specific integrated circuit, ASIC)在内的传统 MIMO 检测处理器都无法合理地兼顾能量效率、灵活性和可扩展性这三个需求指标。ASIC 能够满足大规模 MIMO 检测芯片急剧增长的运算能力需求,实现高数据吞吐率、高能量效率以及低延时。但是,随着通信技术的发展,为了实现个性化、定制化的服务,往往在标准、传输性能需求、MIMO 规模以及算法等方面都会存在差异。支持多标准、多协议将成为硬件电路设计重点考虑之一。此外,硬件电路设计还需要可扩展性来应对基带处理算法的快速发展,并保证算法演进的可靠无缝连接。因此,ASIC 的应用将会明显受到限制。另外,虽然 ISAP 能满足灵活性和可扩展性的需求,但由于 ISAP 不能达到未来移动通信处理速率和功耗的要求,这类处理器的应用也将受到明显限制。作为一种新型的实现方法,可重构处理器在 MIMO 检测方面不仅能够实现高数据吞吐率、低能量消耗和低延时,同时在灵活性和可扩展性方面有得天独厚的优势。受益于硬件可重构性,这种架构有可能在系统运行时执行系统更新和错误修复操作。此功能将延长产品的使用寿命,并确保产品在上市时间方面的优势。总之, MIMO 检测可重构处理器能够合理地权衡应用在能量效率、灵活性及可扩展性的需求,是未来亟待发展的一个重要且充满希望的方向。

1.1 应用需求

数字技术使不同行业的持续创新成为可能。信息通信技术、媒体、金融和保险

等行业在当前的数字化转型过程中居于领导地位^[1-4]。同时，零售、汽车、石油、天然气、化工、医疗、采矿和农业等领域的数字化也在加速进行^[5-8]。支持数字化的关键技术包括软件定义设备、大数据^[9,10]、云计算^[11,12]、区块链^[13,14]、网络安全^[15,16]、虚拟现实(virtual reality, VR)^[17,18]和增强现实(augmented reality, AR)^[19,20]。随着生活质量的提高，各种各样更为先进和复杂的应用即将或者已经出现在了人们的日常生活中。对于未来生活的构想将更智能化、更方便、更有效。云虚拟和增强现实、自动驾驶、智能制造、无线电子医疗等层出不穷的应用驱动着通信技术的发展。通信网络是一切连接的关键。

1.1.1 未来典型应用

1. 云虚拟与增强现实

VR/AR 的有效工作，对带宽的要求非常高，因为大多数 VR/AR 应用程序的数据密集程度非常高^[17]。虽然现有第四代移动通信(4G)网络平均数据吞吐率可达到100Mbit/s，但一些高级 VR/AR 应用将需要更高的速度和更低的延时(图 1.1.1)。例如，在消费行业，VR 和 AR 是革命性的技术创新。VR/AR 要求大量的数据传输、存储和计算。因此，这些数据和计算密集型任务将转移到云端，从而提供丰富的数据存储和必要的高速计算能力^[21]。

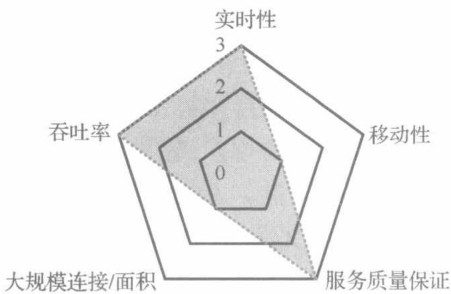


图 1.1.1 云虚拟与增强现实的系统要求

2. 自动驾驶等移动革命

推动移动革命的关键技术——自动驾驶要求安全、可靠、低延时和高带宽连接^[22]，这些属性对于在高速移动和高度密集的城市环境中是必不可少的。在自动驾驶时代，全面的无线连接将允许附加服务嵌入车辆中。直接人为干预的减少需要车辆控制系统与基于云的后端系统之间进行频繁的信息交换。对于远程驾驶，车辆是由远处某个地方的人驾驶的，而不是车辆里的人。车辆仍然由人掌控，而不是自动的。这项技术有可能被用来提供优质的礼宾服务，例如，使某人能够在旅途中工作、帮助没

有驾驶执照的人驾驶，或当驾驶员生病、饮酒或不适合开车时完成驾驶。自动驾驶和远程驾驶的系统要求如图 1.1.2 所示，这两项技术都需要高可靠性的无线传输，并且整个往返延时低于 10ms。只有强大的无线通信技术才能满足所有这些严格的连接性要求。5G 及 beyond 5G 通信系统有可能成为统一的连接技术，以满足未来连接、共享、远程操作等需求^[23]。

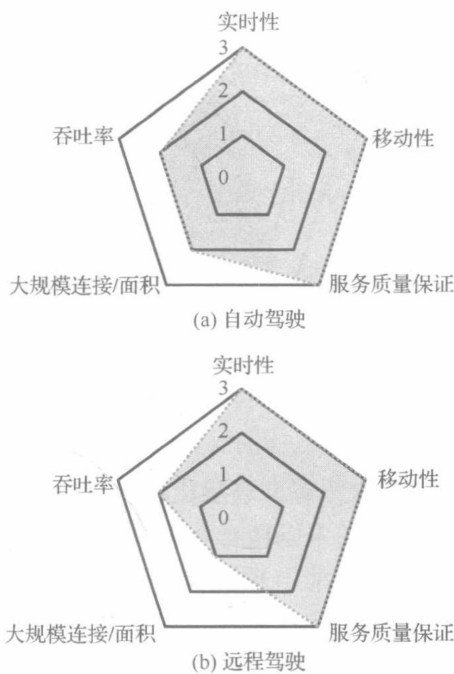


图 1.1.2 自动驾驶和远程驾驶的系统要求

3. 智能制造

实施智能制造的基本业务理念是通过更加灵活和高效的生产系统，将更高质量的产品推向市场^[24]。创新是制造业的核心，主要发展方向包括高精尖生产、数字化、更加灵活的工作流程及生产^[25]。智能制造的主要优点包括以下几方面。

- (1) 通过协作机器人和 AR 智能眼镜提高生产力，以帮助整个装配流程中的员工提高生产效率。协作机器人交换分析以完成同步和协调自动化过程，AR 智能眼镜使员工能够更快、更准确地完成工作。
- (2) 通过基于状态的监测、机器学习、基于物理的数字仿真等可以准确预测未来的性能，优化维护计划并自动订购更换零件，从而减少停机时间和维护成本。
- (3) 通过优化供应商内部和外部数据的可访问性和透明度，降低库存和物流成本。

在无线通信技术发展之前，制造商依靠有线技术来连接应用程序。随着 Wi-Fi (wireless fidelity)、蓝牙和无线可寻址远程传感器高速通道 (highway addressable remote transducer, HART) 等无线解决方案的发展，目前越来越多的智能化、无线化设备已经出现在制造工作场所。但这些无线解决方案在安全性和可靠带宽方面都受到限制。尖端连接应用需要灵活、移动、高带宽、高可靠、低延时的通信作为基础(图 1.1.3)。

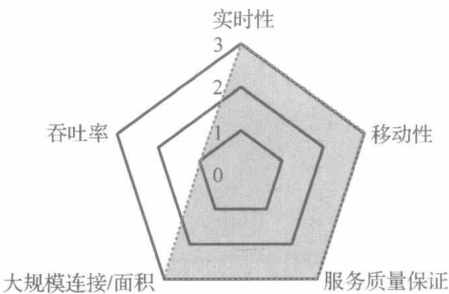


图 1.1.3 智能制造的系统要求

4. 无线电子医疗

无论西方国家还是亚洲国家，人口老龄化速度都在加剧。2012~2017 年，无线网络在医疗器械中的应用越来越多。医疗保健专业人士已经开始整合解决方案，如远程音频和视频诊断、远程手术、资源数据库等，并利用可穿戴设备和便携式设备进行远程健康监测。医疗保健行业有可能推出一种完全个性化的医疗咨询服务，并通过 5G 网络连接实现辅助医生的人工智能 (artificial intelligence, AI) 医疗系统。这些智能医疗系统可以嵌入大型医院、家庭医生顾问、当地医生的诊所，甚至外出旅行诊所站等缺乏现场医务人员的医疗场所。无线电子医疗的任务包括以下几方面。

(1) 实现实时健康管理并跟踪患者的医疗记录，推荐治疗流程和适当的药物，并预约后续的就诊时间。

(2) 通过 AI 模型对患者进行前瞻性监测，以便对治疗方案提出建议。

其他高级应用场景包括医疗机器人以及医学认知等。这些高端应用都需要不间断地进行数据连接，如生物遥测技术、基于 VR 的医疗培训、救护飞机、生物信息学和生物实时数据传输等。

电信运营商可以与医疗行业合作，成为医疗系统集成商。它们可以为社会创造一个良好的生态系统并提供连接、通信和相关服务，如分析医疗数据和云服务，同时支持各种技术的部署。远程医疗诊断过程特别依赖于 5G 网络提供的低延时和高质量的数据服务(图 1.1.4)^[26]。

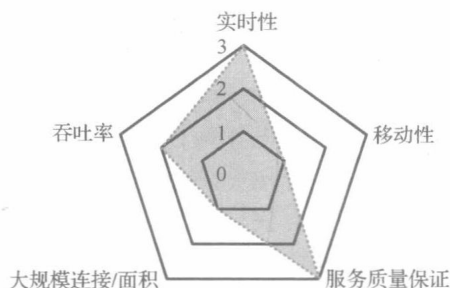


图 1.1.4 无线电子医疗的系统要求

1.1.2 通信系统需求

在人们日常生活应用不断快速更新和发展的时代^[27, 28], 根据不同应用的需求, 通信系统及电路将有以下几点需要着重考虑。

1. 数据吞吐率

人们对更快通信网络的追求一直是通信技术发展的驱动力, 也是下一代移动通信技术发展的主要推动力。业界普遍认为, 下一代无线通信技术需要达到的峰值数据传输速率在几十吉比特每秒(gigabit per second, Gbit/s)量级, 相当于 4G 网络数据传输速率的 1000 倍左右。同时, 移动通信技术对网络延时提出了更高的要求。4G 网络时代的数据传输延时(包括收发两条路径)大约为 15ms, 尽管大多数当前的业务能够容忍这个延时, 但一些新的应用, 如 VR 和 AR, 对延时有较高的要求。预计下一代移动通信技术需要实现大约 1ms 的延时。人们对数据传输速率和网络延时的需求是通信技术发展的主要挑战之一。未来的通信网络需要能够支持巨大数量的通信设备以及巨大规模的数据信息的通信需求^[2-4]。由于物联网(internet of things, IoT)技术^[29, 30]和机器到机器(machine to machine, M2M)技术^[31, 32]的出现与发展, 通信系统除了个人移动通信设备, 还会有数量巨大的其他类型的通信设备接入网络。根据预测, 这些设备的数量可能达到数百亿甚至上千亿的量级, 这会使得某些区域的设备密度增加非常显著^[33, 34]。对于某些需要高数据传输速率的应用场景, 如实时数据传输和视频共享等, 增加的设备密度会给系统性能带来不利影响。除了超大数量的通信设备, 未来通信系统将要处理更多的通信数据, 按照目前的估计, 移动设备的网络使用率在未来几年将会经历一个巨大增长的过程。不断增加的终端数量和数据流量的需求对目前的通信系统提出了挑战^[31, 33]。硬件电路设计层面需要更快的处理速率以及更短的延时; 同时, 对于移动端应用来说需要有更低的功耗和面积开销。所以, 芯片设计也将是一个重要的挑战。

2. 功耗、面积、能量效率

近些年来, 随着对环境保护的重视, 人们越来越多地追求低碳的生活方式, 这

也对通信系统提出了功耗的要求。除此之外,从物流、成本和电池技术的角度来看,不断增加电力消耗也是不能容忍的^[35,36]。在通信系统及基带处理电路中,用焦耳每比特或比特每焦耳来衡量通信系统的能量效率。因此,功耗提高与数据传输速率提高的数量级相同,或功耗提高比数据传输速率的数量级提高得少,才能保持能量效率不变或者提高。能量效率的提高对 IoT 的应用至关重要,因为大多数的 IoT 通信设备是由电池供电的,并且需要在没有人为干预的情况下工作很长时间。这种情况下电池的使用周期一般要达到 10 年甚至更长。对于 IoT 和 M2M 通信系统来说,除了提高能量效率,还需要一系列的能量管理技术来节约能量。除此之外,还可以利用可再生能源为设备供电,如太阳能电池等。如何提高通信系统和电路的能量效率以及设备电池的使用周期是下一代通信技术亟待解决的问题。与此同时,通信基带电路设计中,面积的降低将会在一定程度上带来功耗和成本的降低。如何降低芯片面积也将是一个亟待解决的问题。

3. 灵活性和可扩展性

灵活性和可扩展性也是下一代通信系统关注的问题^[37,38]。IoT 的灵活性指的是通信系统能满足不同应用、不同需求。在未来应用中,将会出现各类独特的需求,如何满足不同应用需求将是一个亟待解决的问题^[27,28]。对于同样的应用,不同的场景、不同的算法甚至不同的性能标准都会影响通信技术的选择。通信系统将尽可能地满足各式各样需求。电路设计为了满足不同情况下的数据处理需求,同样需要满足一定的灵活性。可扩展性指的是在根据用户需求引进新的、异构的设备、应用及功能的同时,保证现有的服务质量等不受影响。应用的扩展包括应用的自我更新、迭代以及完善。技术的扩展包括技术的演进、算法的演进等。通信电路及系统将支持不同方向的扩展。可扩展性问题的提出是基于未来的高密度通信电路及设备分布的设想,同时,管理大量连接设备的状态信息也是一个需要考虑的问题。

4. 覆盖率

足够高的网络覆盖率是提供稳定可靠通信服务的基本要求^[4,7]。对于很多面向消费者的 IoT 应用来说,IoT 设备都需要与移动用户进行信息的传输,因此确保用户在任何地方都能连接到网络并且在移动时也能提供服务,是 IoT 应用的重要前提。对于其他一些 IoT 应用场景,如被装置在低网络覆盖率的地下室的智能电表、电梯等室内应用,扩展的覆盖率是下一代通信系统一个主要的设计方向,这类 IoT 网络部署的最终目标是提供更高的室内覆盖率以产生一个和信号穿越墙与地板等价的效果,以此增加室内覆盖率以支持 IoT 应用的大规模部署。在增加覆盖率的同时不显著增加总的部署成本才是最大的挑战。