



未来移动通信论坛
FUTURE MOBILE COMMUNICATION FORUM

5G 关键技术系列丛书

5G 波形设计

5G Waveform

◆ 曾威 [韩] Seyong Park [埃] Muhammad Abdelghaffar [美] Joseph Soriaga [美] 李庭方 曹一卿 李伊 编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

5G 关键技术系列丛书

5G 波形设计

5G Waveform

◆ 曾威 [韩] Seyong Park [埃] Muhammad Abdelghaffar [美] Joseph Soriaga [美] 季庭方 曹一卿 李伊 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

5G波形设计 / 曾威等编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2017.6

(5G关键技术系列)

ISBN 978-7-115-46052-3

I. ①5… II. ①曾… III. ①无线电通信—波传播
IV. ①TN928

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第166388号

内 容 提 要

本书从 5G 系统对波形设计的需求出发, 分别分析了增强移动宽带业务 (eMBB)、低时延高可靠 (URLLC) 和海量物联网 (mMTC) 3 个场景的系统需求以及设计目标。本书最大的特点是既考虑了理论分析, 又从实际系统设计、实现的因素考虑, 引入实际系统的设计目标和评估方法, 结合射频器件的非理想特性, 相应地评估了各种波形的性能。在本书的最后, 根据分析结果针对这 3 种场景的上下行链路分别给出了波形的设计建议。

本书适合移动通信专业技术人员, 也可作为高等院校通信、信号处理等专业硕士、博士研究生的参考书。

◆ 编 著 曾 威 [韩]Seyong Park

[埃及]Muhammad Abdelghaffar

[美]Joseph Soriaga [美]季庭方

曹一脚 李 俨

责任编辑 代晓丽

执行编辑 刘 琳

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市潮河印业有限公司印刷

◆ 开本: 880×1230 1/32

印张: 3.875

2017 年 6 月第 1 版

字数: 104 千字

2017 年 6 月河北第 1 次印刷

定价: 59.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前 言

即将到来的第五代（The Fifth Generation, 5G）无线通信标准为波形设计与优化提供了机会，用来满足新业务需求。这包括提高移动宽带的吞吐量和时延体验，同时还引入了低时延高可靠业务（Ultra Reliable and Low Latency Communication, URLLC）的应用及海量物联网业务（massive Machine Type Communication, mMTC），它们均可缩放到更大数量的机器类型通信和人机交互服务。本书采用了多种评判标准——从最底层实现复杂度到用户和信号复用及其在网络层面的整体影响，全面评估了 5G 的候选波形设计。

3GPP 在 2016 年正式开始 5G 新空口（New Radio, NR）的设计。始于 3GPP 最初有关 5G 新空口的几次会议，新型波形技术已被广泛地研究和评估。业界专家一致认为 5G 蜂窝系统应当具备更好的业务复用灵活性以及比目前 4G LTE 系统更高的频谱利用率。具体地说，可以预见，NR 将采用不同参数的多种波形进行有效的带内复用以满足不同业务要求。例如，对于 URLLC 超低时延业务需要使用更短符号来减小信号传输时间，而对于 mMTC 这种时间同步要求较低的场景则更适合使用更长的循环前缀（Cyclic Prefix, CP）。采用不同参数的传统 OFDM 波形会丧失正交特性并有可能受到载波间干扰（Inter-Carrier Interference, ICI）的影响，因此研究者希望能够找到具有更好频率约束特性的波形。本书分析了为实现更好频率约束性的多种波形技术。同时，我们也认识到：最终信号的 ICI 不仅由位于基带的波形设计决

定，也受到整个射频（Radio Frequency, RF）前端——特别是功率放大器（Power Amplifier, PA）非线性特征的严重影响。因此，位于基带的波形设计应同时考虑所有这些因素的影响以及实现复杂性。特别是从用户设备（User Equipment, UE）实现的视角来看，这个原则至关重要。

波形研究过程中另一被广泛讨论的话题是低峰均功率比（Peak-to-Average Power Ratio, PAPR）性能，它可使功率放大器工作在效率更高的工作点上。同时，更高的功率放大器效率可直接转化为更大的小区覆盖，或更低的 UE 功耗。由于 6 GHz 以下频率资源分配殆尽，可以预见未来大量的新分配给 5G NR 使用的频谱将来自于毫米波频段的非成对频谱，而这种场景下小区覆盖（或链路预算）通常更具挑战性。此外，出于重耕现有 3G/4G 频谱用于 5G NR 服务的考虑，人们非常希望 NR 至少能够达到现有 3G/4G 蜂窝系统的小区覆盖，从而使运营商可不重新规划蜂窝网络即可复用现有的基站。这些设计目标都强烈地预示着 NR 系统将采用低 PAPR 的波形。例如，5G NR 上行链路将采用 DFT-s-OFDM（Discrete Fourier Transform-spread-OFDM，离散傅里叶变换扩展 OFDM）波形，特别是采用单流传输与低阶调制的小区边缘用户。

在本书完成之际，3GPP RAN1 对 5G NR 波形的研究已经得到初步结论：在 eMBB 和 URLLC 场景下，下行波形将继续使用 CP-OFDM，上行波形将同时采用 CP-OFDM 与 DFT-OFDM。具体的系统设计仍在研究之中。本书试图客观地总结来自 3GPP 中各家公司的最新观察和讨论。本书的重要结论之一是对将被用于 5G 系统的波形从技术角度提供建议¹。文中的分析和结论部分都需要读者对 5G 的背景知识有所了解。因此，本书在第 1 章介绍了 5G 系统设计的背景知识，并在结尾提供了针对各种业务的解释（例如增强移动宽带的下行链路、上行链路、Mesh 链路、海量物联网的上行

¹ 由于 5G 标准尚在制定中，这些推荐只代表笔者观点，不能反映 3GPP 标准规范的最终结果。

链路和下行链路)，之后相应地针对各类业务需求分别提出最为适合的波形。本书最后一章写成于标准制定之初，笔者惊喜地发现 3GPP 的初步结论与本书的建议完全一致，这个结论也给予本书的作者很大鼓励。

作者

2017年3月于北京

目 录

第 1 章 5G 的 ABC	1
1.1 5G 的定义和需求	2
1.2 5G 标准的制定	5
1.3 推动 5G 的中国力量	8
1.4 本书结构	9
第 2 章 波形设计指标	11
2.1 多径处理和频谱效率	12
2.2 带内和带外发射	13
2.3 传输块处理时延	14
2.4 发射机能效	14
2.5 接收机能效	16
参考文献	16
第 3 章 功率放大器建模	19
3.1 限波功率放大器模型	21
3.2 实际功率放大器模型	22
3.2.1 修改的 Rapp 模型	22
3.2.2 多项式功率放大器模型	23
参考文献	25
第 4 章 单载波波形和低 PAPR 技术	27

4.1	恒定包络波形	28
4.2	单载波 QAM	32
4.3	单载波频域均衡	36
4.4	单载波 DFT-s-OFDM	37
4.5	零拖尾 DFT-s-OFDM	41
4.6	GI-DFT-s-OFDM	44
4.7	采用低 PAPR 频谱整形的单载波波形	46
4.7.1	滤波 $\frac{\pi}{2}$ -BPSK	46
4.7.2	滤波偏置-QPSK	49
4.8	DFT-s-OFDM 与采用基于实现的低 PAPR 技术的 OFDM 波形的比较	49
4.8.1	采用压缩扩展的 OFDM	50
4.8.2	采用限波滤波的 OFDM	53
	参考文献	55
第 5 章 基于 OFDM 的多载波波形和频率约束特性		57
5.1	CP-OFDM	59
5.2	采用 WOLA 的 CP-OFDM	62
5.3	UFMC	65
5.4	F-OFDM	70
5.5	FBMC	72
5.5.1	与时域加窗操作的等价性	73
5.5.2	Offset-QAM 和正交性	75
5.5.3	FBMC 频谱特性和现实应用	78
5.6	GFDM	80
5.7	加窗和滤波技术对比	85
5.7.1	处理时延	85
5.7.2	上下行切换开销	86
5.7.3	发送和接收复杂度	87

5.7.4 采用实际 PA 模型下的频域约束特性	88
5.8 波形成形实现总结	94
参考文献	95
第 6 章 总体 5G 波形建议	97
6.1 5G 关键应用	98
6.2 增强移动宽带波形	100
6.2.1 eMBB 蜂窝下行	101
6.2.2 eMBB 蜂窝上行	102
6.2.3 蜂窝终端到终端和接入/回传一体化	104
6.2.4 eMBB 毫米波	105
6.3 海量物联网	106
6.4 低时延高可靠业务	107
6.5 波形技术对比总结	107
6.6 设备需求综述	109
6.6.1 用户设备	109
6.6.2 网络设备	109
参考文献	110
中英文对照	111
名词索引	113



第1章

5G 的 ABC

- 1.1 5G 的定义和需求
- 1.2 5G 标准的制定
- 1.3 推动 5G 的中国力量
- 1.4 本书结构

1.1 5G 的定义和需求

从 20 世纪 90 年代开始，工业界每 10 年会重新讨论新一代移动通信标准。新一代的标准将在上一代的标准基础之上，从系统设计和商业模式上借鉴过去一代的得失。在技术上新标准还将吸收最新的研究成果。例如，3G 标准采纳了 Turbo 编码、链路自适应、功率控制、软切换等技术，4G 标准采纳了 MIMO（Multiple-Input Multiple-Output，多输入多输出）、OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，正交频分复用）、时频二维资源分配等技术。回顾过去的 10 年，技术方面的进步让研究者非常振奋，MIMO、低密度奇偶校验（Low Density Parity Check，LDPC）码、新波形、多址技术理论研究和应用这些技术的产品都取得巨大进展。同时，移动通信开启了在毫米波段的应用，也为 5G 系统设计奠定了一个更高的技术起点。从商业模式看，3G 系统开启了移动互联网应用，帮助用户从 WAP 时代顺利过渡到 WWW 时代，而 4G 解锁了包括微信、滴滴、淘宝、手机导航在内的更多互联网应用。同时，4G LTE 在垂直行业的应用也取得巨大成功，在 Release-13 和 Release-14 相继将物联网和车联网纳入到移动通信系统的应用场景当中。

回顾 4G LTE 的设计，会发现两条明显的主线：首先 LTE 是 3G 系统的演进，将移动宽带（Mobile Broad Band，MBB）业务作为首要优先场景，对于系统吞吐量和时延的优化都做了大幅改进；同时，LTE 系统从早期版本就考虑了对物联网设备的支持，从核心网的过载控制、空口侧的小分组数据优化、节电优化、物联网设备成本优化、覆盖增强一直到 Release-13 的 NB-IoT（Narrow Band IoT，窄带物联网）和 eMTC（enhanced Machine Type Communication，增强机器类通信）终于初步实现了对不同速率等级的物联网应用场景全面支持，更具有里程碑意义的是在 Release-14 引入 V2X 支持车联网应用。

5G 系统可以看做是 MBB 和物联网这两条主线的延伸和增强，

其最大的特点就是在系统设计之初就确定了两个物联网应用场景——低时延高可靠业务（Ultra Reliable and Low Latency Communication, URLLC）和海量物联网场景（massive MTC, mMTC）。这样可以使 5G 系统原生地支持增强移动宽带（enhanced Mobile Broad Band, eMBB）、URLLC 和 mMTC 业务。

在 5G 的两个物联网场景中，URLLC 场景主要是针对工业控制、车联网等对时延、可靠性要求较高的业务。mMTC 是针对海量低功耗、低成本物联网设备连接这种场景而提出的。在国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）的 5G 愿景[ITU M2083]中，这 3 种场景共同组成了 5G 系统的设计目标，为了便于设计通信系统，ITU 进一步将 3 个应用场景量化为多个关键指标（Key Performance Indicator, KPI）。5G 系统的应用场景如图 1-1 所示。



图 1-1 5G 系统的应用场景

在 ITU 定义的关键指标中，除了传统的峰值速率和频谱效率外，eMBB 场景还增加了用户体验速率、流量密度两个指标用来衡量用户实际可获得的数据服务。针对海量物联网场景，ITU 定义了连接密度用来衡量可支持的物联网终端数量。针对 URLLC 业务，ITU 定义了时延指标，同时还定义了与时延对应的可靠度（由于可靠度是相对时延定义的，并没有体现在图 1-1 中）。

图 1-2 中比较了 4G 和 5G 的 KPI，可以看到，除了 5G 全面超

越 4G 指标外, 5G 对于通信系统能力要求更加均衡。熟悉系统设计的研究人员不难发现, 这些指标不仅对系统设计要求很高, 甚至其中的一部分是互相“矛盾”的。例如峰值速率和连接密度: 前者通常是描述小区的极限吞吐量, 在实际测试中通常是将所有资源分配给一个用户, 以节省系统开销, 在系统设计中也要系统开销尽量小以增加有用负载的传输能力; 而后者是描述系统最大可支持的用户数, 这通常需要大量的控制信息来区分不同的用户。这些极致、甚至相互“矛盾”的 KPI 对系统设计提出了前所未有的挑战。

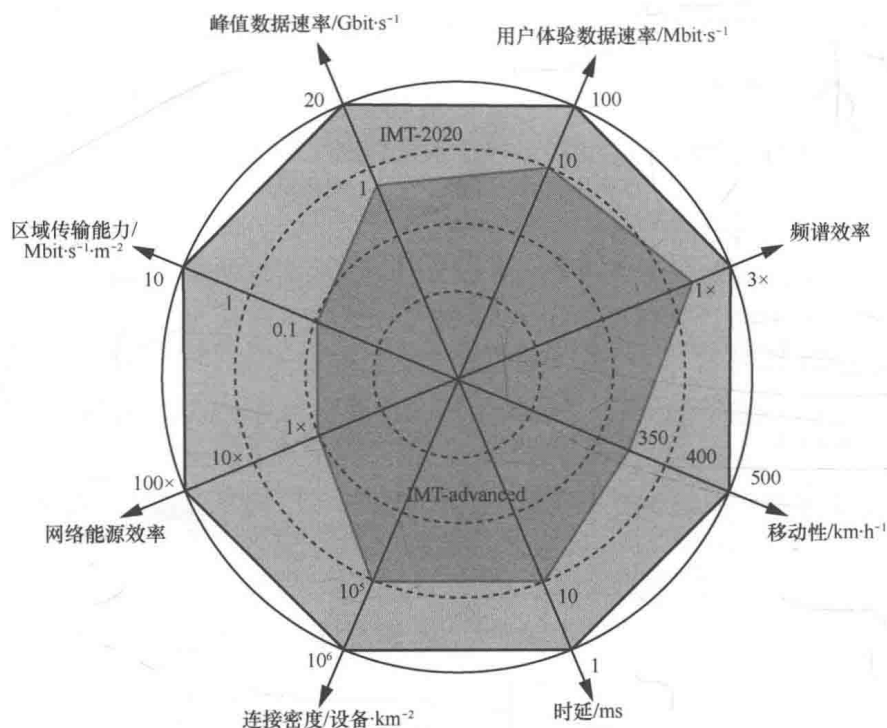


图 1-2 ITU 定义的 5G KPI [ITU M.2083]

除了这 8 个被量化的 KPI 之外, ITU 还定义了一些 5G 系统设计目标, 包括安全和隐私保护、频率使用的灵活性、低功耗物联网终端的工作周期。由于这些目标不容易简单量化, 它们被保留到制定标准阶段再具体定义。

本书将从 5G 系统设计的角度着重分析波形设计。

1.2 5G 标准的制定

虽然 5G 标准正在制定当中，但是有各种新闻都提到 5G 系统的各种突破。本章将简要分析 5G 标准的制定流程和相关标准组织。

制定 5G 标准，首先要解决的问题是：为什么需要 5G 标准，或者，是否出现了 4G 解决不了的问题，需要制定 5G 标准来解决？

因此，标准制定的第一个阶段是寻找新的问题，而这些问题通常是现有标准很难解决的。

4G 的 LTE-Advanced 系统可以很好地提供单小区（峰值速率）大约 1 Gbit/s 的移动宽带接入服务，用户在网络质量好的情况下可以享受到大于 1 Mbit/s 的用户体验速率，目前的视频、微信等各种 APP 都能正常运行。那么，是不是就没有问题了呢？不是的，因为出现了 VR、AR 等新的业务模式。面对这类新的业务模式，用户需要更高的体验速率。ITU_M.2083 提出了 5G 系统需要提供高达 100 Mbit/s 的用户体验速率，这个以目前 LTE-A Pro 的设计能力上限（32 载波聚合+MIMO+256 QAM）是很难实现的。而且由于 LTE 的单载波被限定在了 20 MHz，聚合的载波数越多，系统的控制开销也就越大。

同时，物联网（Internet of Things, IoT）场景也在快速演进，这给移动通信系统带来很多挑战。物联网根据应用的不同，被分为两类：mMTC 和 URLLC。

mMTC 包括智能穿戴设备、智慧城市等场景，目标是提供极大的系统容量，为百万计的低功耗 IoT 终端提供服务。目前广受关注的 NB-IoT 就是针对这种场景设计的，未来 NB-IoT 在 5G 的演进版本将会满足这个场景对应的百万终端连接能力、低功耗、大覆盖等设计指标。

URLLC（也称为关键业务控制，Mission Critical）包括车联网、

工业控制、无人机控制等场景，目标是在保证超低时延的同时提供超高的传输可靠性。在移动通信系统设计中高可靠传输通常是牺牲时延通过多次重传（HARQ/ARQ）达到的，而低时延传输通常又是放松可靠性要求满足的，可以说二者是一对矛盾的设计指标。在工业控制场景中控制信号要求 1 ms 的传输时延达到 10^{-5} 的错误率。这个指标非常苛刻，即便采用了 Release-14/15 优化后的 LTE 帧结构（Shorten TTI）也很难达到。同时，URLLC 还定义了新的系统设计指标——可用性（Availability），即终端在绝大多数时间（如 95%）都可以享受服务，同时中断服务的时间上限应小于某个门限（如 10 ms）。

在问题发现和抽象阶段，来自世界各地的 5G 工作组和论坛起到了巨大作用。这其中包括中国的 IMT-2020 推进组、中国的未来移动通信论坛、欧洲的 5GPPP、韩国的 5G Forum、日本的 5GMF、美国的 5G Americas 和运营商论坛 NGMN。各个工作组、论坛分别搜集、整理来自本国、本地区 and 成员单位的需求，并抽象成对应的场景。这些场景大部分都以白皮书的形式发布，作为 5G 系统设计的重要参考。

为了制定全球统一的 5G 标准，这些场景需要有一个国际性的权威组织统一整理后，制定一个正式的 5G 需求并发布。这个 5G 通信标准认定、发布的唯一机构就是 ITU。ITU 是通信界的联合国，是由各国政府组成的。在我国，ITU 代表团是由多个政府部门组成的，其中移动通信的代表是由工业和信息化部选定并领导的。需要注意的是：ITU 只负责发布 5G 标准的场景和设计目标，并最后评估、认定 5G 标准；ITU 并不具体制定 5G 标准，这些具体技术工作是由 3GPP 和 IEEE 等行业标准化组织完成的。ITU 在收到以上各个组织的输入后，经过会议讨论，发布了 5G 的场景和需求报告——ITU Recommendation M.2083——IMT for 2020 and beyond，用以指导 5G 标准的制定。

正如 1.1 节分析的，ITU 总结出 3 个场景，并进一步量化出 8 个 KPI，为 5G 系统设计提供了目标。

下一阶段为标准制定阶段。

在行业里有句话叫“标准组织搭台、企业唱戏”。针对这些场

景和 KPI，各个公司的研发团队会分别选择关键技术并设计自己的解决方案。这些企业来自通信行业的各个协作角色：提供基站的华为、爱立信、诺基亚和中兴；销售芯片的高通、英特尔和展讯等；运营网络的中国移动、中国联通和中国电信等；制造手机的三星、联想、酷派、OPPO、VIVO、苹果等。值得注意的是，一些互联网巨头（阿里巴巴、Google、Facebook）和汽车行业的 GM（通用汽车）也加入了 3GPP，参与到 5G 标准制定的行列。

在各个技术方案提交到标准组织（3GPP）讨论之前，大多数公司会通过各个场合互相交流，并试图通过充分的讨论完善整个技术方案。这个时期的交流既包括各种 5G 峰会，也有行业内的公司之间的交流，为的是统一思想，保证 5G 设计不出现方向性的分歧。

经过长时间的酝酿和准备，3GPP 在 2015 年 9 月召开了一次 5G 技术研讨会，与会各家公司都描绘了心目中的 5G 关键技术。这些技术被总结、归纳之后，3GPP 在 2015 年 12 月正式启动了 5G 的标准制定。简单地说，标准制定分为研究阶段和标准制定阶段，前者是确定技术方向（如信道编码采用 Turbo 码、LDPC 码还是 Polar 码），后者是确定具体设计（如 LDPC 码的编码矩阵设计）。

在标准制定阶段，各个公司通过参会代表将方案分别提交给对应的标准组织和其中的工作组，并在标准会场进行技术讨论。通过充分的技术讨论，标准组织在每个技术点（编码、调制、多址、接入、波形等）分别选择出最优秀的技术方案，并根据这些方案设计出完整的通信系统。

标准通常并不记载全部的系统设计细节，而只规定必要的网络实体（如基站、终端、各种核心网逻辑设备）和不同网络实体之间的接口和通信方法。例如，基站与手机之间的信令会影响来自不同制造商的基站和手机之间通信，需要标准化；而基站调度小区内多个手机的方法是基站的实现方法，并不需要手机知晓，就不需要标准化。

标准完成后会正式发布，供所有行业内的公司执行。目前 3GPP 是按照版本（Release）发布的，版本之间间隔为 1~2 年，一个版本内所有的新技术特征会统一发布。按照目前的计划，3GPP

把 5G 标准分为两个阶段：第一阶段（Release-15）会在 2018 年的 6 月完成并在 9 月最终发布，这个版本可能不能满足所有的 KPI，因此不是严格意义上的 5G 标准；第二阶段（Release-16）将在 2019 年底发布，这个版本将是真正的 5G 标准。5G 标准制定的两个阶段如图 1-3 所示。

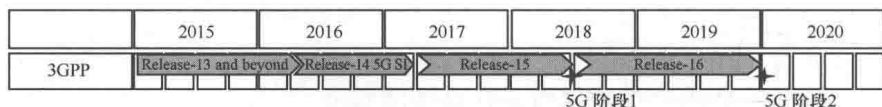


图 1-3 5G 标准制定的两个阶段

标准制定中难免有疏漏和错误。各个厂家会将执行中发现的标准错漏写成技术文稿提交到标准组织，讨论通过后标准会被相应地修订。修订后的标准也会被升级到新的版本。

1.3 推动 5G 的中国力量

我国的移动通信标准界在中国信息通信研究院的领导下，在 2013 年初成立了 IMT-2020 推进组，并同时成立了 3 个工作小组：5G 需求小组、5G 无线技术小组和 5G 网络技术小组。

2014 年 5G 需求小组完成了 IMT-2020 推进组的《5G 愿景和需求》白皮书，并提交给 ITU 的需求讨论中。这份白皮书将 5G 归纳为 4 个场景：广域连续覆盖、热点高容量小区、低时延高可靠和低功率海量物联网。在 ITU 中，前两个场景被归纳为 eMBB 业务，而后两个场景被直接采纳。同时，白皮书中 5G 的 9 个 KPI 有 8 个被 ITU 采纳。由此可见，我国 5G 的研究从需求阶段就被业界广泛认可。

推进组中 5G 无线技术和 5G 网络技术组于 2015 年分别发布无线技术和网络技术白皮书。其中推荐的几个主要技术超密集组网、大规模 MIMO（Massive MIMO）、新型波形与多址、新编码、NFV（Network Function Virtualization，网络功能虚拟化）、SDN（Software Defined Network，软件定义网络）和网络切片也都成为标准化的热点。