

是德科技

5G 候选波形的设计和评测解决方案

应用指南

利用仿真技术深入分析 5G 通信系统及其波形

概述

虽然第四代 (4G) 蜂窝系统——LTE 和 LTE-Advanced——还处在部署进程中，第五代 (5G) 系统的研发已经开始，5G 技术愿景是“随时随地万物接入”。5G 相比 4G 的一个显著优势是，5G 能够提供超快（接近 10 Gbps）、连贯和优质的连通性，时延很低（不超过几毫秒），可以支持新的用例和构成物联网 (IoT) 的数十亿个传感器。同样重要的是，5G 网络预计将会明显提高频谱效率和改善覆盖率。

这些能力预示着如今的社会愈加地依赖智能手机、平板电脑等无线设备中需要使用大量数据的应用。分析师预测，到 2020 年无线设备的数量将会达到 200 亿到 500 亿；从每天仅传输少量数据的机器对机器 (M2M) 设备到播放多个频道高清视频的应用无所不在。这些设备投入使用后，影响将是不容忽视的——无线数据需求将会呈现爆发式增长。整个行业都把目光聚焦在 5G 上，希望 5G 能为客户提供每周 7 天、每天 24 小时随时随地无缝接入，始终连接的能力，从而满足客户对数据的需要。

问题

虽然 5G 的早期研究工作已经持续了几年，但是把 5G 从理论变为实践以便及时应对 2020 年的数据爆发仍将是一大挑战。第一步是落实 5G 标准化。尽管业内人士对 5G 愿景有一致的定义，但是标准化工作尚未展开。因此，研究人员面临的主要挑战是在标准尚未确立的条件下开发 5G 技术。3GPP 在 2015 年 9 月召开了首届 5G 研讨会，会议确定了 5G 愿景到 2016 年中期才会真正实现。5G 商业部署预计在 2020 年左右开始。与此同时，5G 研究的下一步是进入开发和部署阶段。

未来的 5G 无线通信系统将能够处理各种各样的流量类型，例如移动宽带和机器类型通信。我们正在研发新的多址接入方案、新的波形和调制格式，以处理各种不同的用例。在 5G 中，选择正确的波形是其中一个非常重要的决策。评测新的波形类型时有许多因素要考虑，包括频谱效率、时延、计算复杂性、能量效率、相邻信道共存性能和实施成本。由于 5G 很大程度上仍处于研究阶段，它提出的波形要求随时可能变化，导致在选择正确的波形时需要考虑得非常周密。对 5G 候选波形进行设计与评测是启动 5G 研究的重要环节，这会推动 5G 生态系统向前发展，帮助客户加快 5G 移动无线网络的最终部署。

解决方案

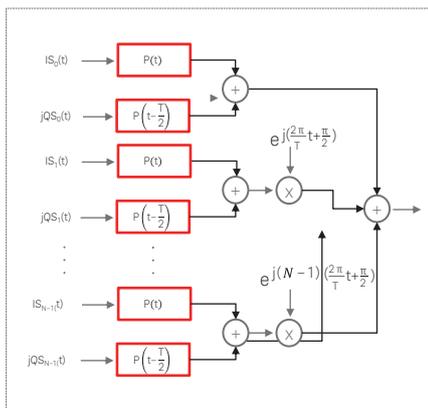
物理层波形尚未有明确规定，因为业内对潜在波形没有达成共识，所以目前有多个候选波形正在使用：滤波器组多载波 (FBMC)、广义频分复用 (GFDM)、通用滤波多载波 (UFMC)、过滤正交频分复用 (F-OFDM)，等等。F-OFDM 和 FBMC 已得到了多位研究人员的认可。

为了更好地理解这两种技术之间的区别，请参见图 1 中的结构图。对于 F-OFDM 信号，子载波数据符号 (SK) 是由符号时间间隔为 T 的原型滤波器 (P) 过滤，再增加到每个子载波。所用的原型滤波器有着矩形冲激响应 h(t)，它会产生不合需要的幅度响应，这是由频域中的大旁瓣导致的。为了尽量减小这种影响，矩形脉冲可被新的脉冲替代，使用常用的窗函数，在符号的起始处有柔过渡。这样会使旁瓣减小，但会导致主瓣增加。目前正在进行的研究工作为的是找到一种使用更好的窗函数的设计 (例如基于 Chebyshev 的设计)，可以消除这个问题。

与 F-OFDM 类似，FBMC 是一种众所周知的多载波技术，数据符号同时也在多个子载波频率上传输。这两种技术的主要区别是符号时间和原型滤波器的选择。例如在 FBMC 系统中 (如图 1 所示)，数据符号在使用时延的间隔是 T/2。当 (k+n) 是偶数时，相移是 0°。当 (k+n) 是奇数时，相移是 90°。FBMC 能够最大限度地降低接收机的复杂程度，并能处理短脉冲传输和多路输入多路输出 (MIMO) 信道。这就是 5G 研究人员对 FBMC 倍加关注的原因。

如前所述，F-OFDM 和 FBMC 并不是唯一的 5G 候选波形。5G 还采用了其他类型的波形技术和新的技术，技术调查目前正在进行之中，如图 2 所示。升余弦响应是最好的例子，此前用于传统的 OFDM 系统。它满足奈奎斯特判据，这意味着它没有符号间干扰，它的脉冲 h(t) 在应用中始终与移位 nT 正交。现在，一种新的数据传输方法再次引起了业界注意——超奈奎斯特 (FTN) 信令。

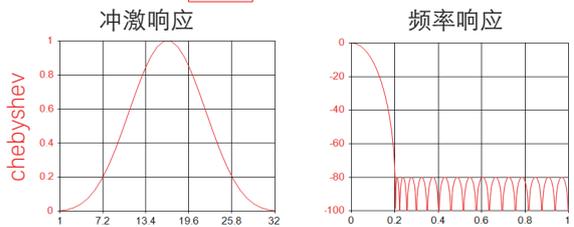
OQAM/FBMC 的结构图



过滤 OFDM 的发射信号方程

$$X(t) = \sum_n \sum_k S_k(n) P(t-nT) e^{j2\pi k(t-nT)/T}$$

$$P(t) = \Pi\left(\frac{t-T/2}{T}\right) * h(t)$$



FBMC 的发射信号方程

$$X(t) = \sum_n \sum_k S_k(n) P_k(t-nT/2)$$

$$P_k(t) = p(t) e^{j(k+n)\pi/2} e^{j\pi kt/T}$$

图 1. 这里显示了 F-OFDM 和 FBMC 波形的基本结构图，以及每项技术对应的发射信号方程。

使用 FTN 方法， $h(t)$ 不再与符号时间正交，脉冲出现的速度加快，系数指定为 α 。图 2 右上角的时频网格显示了在每个 TF 单位面积中有一个符号满足奈奎斯特判据。使用 FTN 方法，每个 TF 面积内的符号密度会增加——在相同的比特能量和频谱上使用常见的调制方法，此时可以传输多达两倍的比特数。这是一项创新。这样减少了所需的带宽，不过载波间的正交性会有一定损失。

FBMC 波形引入了一种新的脉冲形状自适应方法和一种动态子载波间隔技术，可用于调整能量扩展度，尽可能地减少能量损耗。基本上，每个子载波上的脉冲整形应当忽视波形的带外 (OOB) 发射。这些优势使得 FBMC 成为一项非常强大的技术，适用于多用户异步分散频谱场景，例如 Web 接入或机器对机器 (M2M) 通信。

对这些候选 5G 波形进行甄别是很重要的，不过同样重要的是，要能够全面地分析这些候选波形。因为 5G 正在不断演进，这项

任务所用的解决方案必须足够灵活，能够快速适应变化中的标准。解决方案必须能够支持在正交和非正交多载波通信系统中使用的各种 5G 候选波形，包括先进 MIMO 和波束赋形信号处理。此外，为了帮助工程师启动他们的 5G 研究，解决方案应当很好地提供发射机和参考接收机建模实例，轻松地重新设计这些实例，以实现高于其他候选解决方案的出众性能。

此类解决方案的典型例子是是德科技电子系统级 (ESL) 设计软件、5G 基带探测程序库和 N7608B Signal Studio 定制调制软件。该解决方案能够提供所需要的灵活性和高级功能，从而快速、有效地生成和评测 5G 移动通信波形。SystemVue 是一个系统级通信设计环境，可生成 5G 候选波形 (图 3)。它把物理层 (PHY) 基带算法建模、精确射频建模、基于标准的参考知识产权 (IP) 和测试设备的直接交互结合在一起。SystemVue 在研发周期的早期使用，它把射频和基带设计路径转入实施，提供持续的交叉验证。

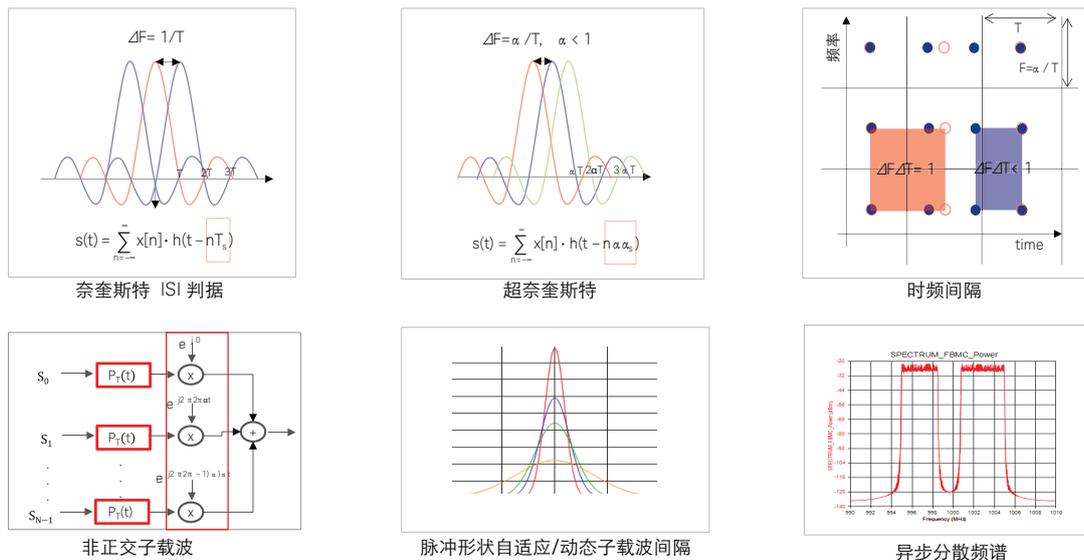


图 2. 本图深入地分析了一些新 5G 波形技术。

5G 基带探测程序库可添加至 SystemVue 套装产品中，提供可立即使用的 5G 候选波形技术先进数字信号处理模块、端到端物理层发射和接收仿真模型，以及 MIMO 信道信令方案（图 4）。它还可以生成参考波形以验证射频电路设计。SystemVue 及其 5G 程序库为设计团队启动 5G 技术研究提供了经济、高效的方法。使用此类解决方案，设计团队在开始进行最新 PHY 开发时能够更轻松的实施探索、验证和集成，使研发成本大幅减少，并降低进度和技术风险。

SystemVue 可用于 5G 信号生成和更多的系统级任务，而 Signal Studio 定制调制软件可以快速轻松地生成定制 FBMC、OFDM 和 IQ 信号，以满足 5G 应用中的元器件、发射机和接收机测试需要（图 5）。易于使用的参数化图形用户界面能够加速每个阶段的定制信号生成。

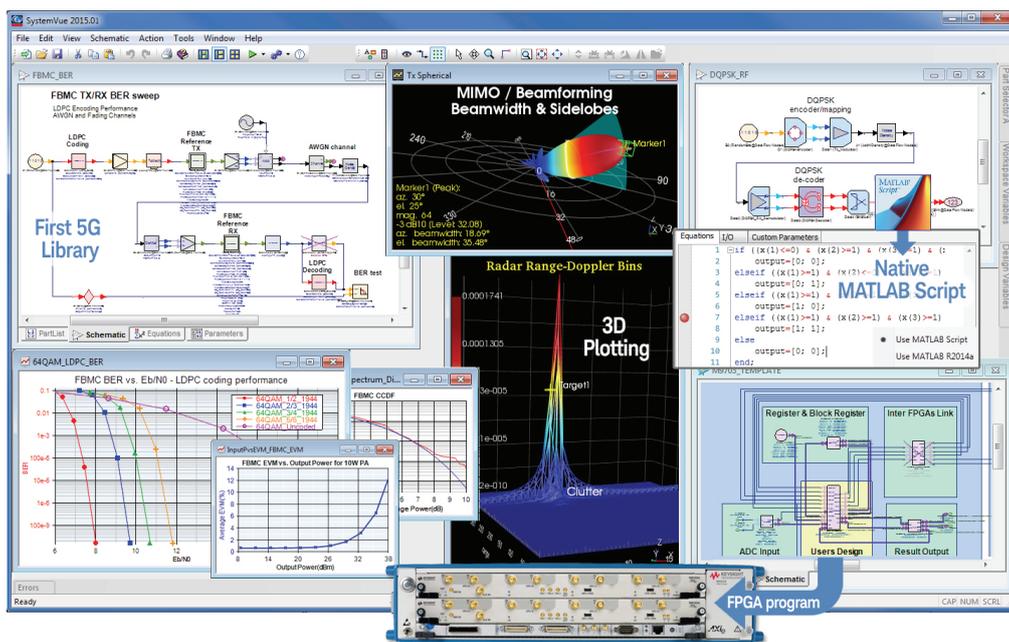


图 3. SystemVue 作为 ESL 设计和信号处理的专用平台，可替代通用的数字、模拟和数学环境。它支持系统架构师和算法开发人员构建创新的无线 PHY 和航空航天 / 国防通信系统，并为射频、DSP 和 FPGA/ASIC 实施提供卓越价值。

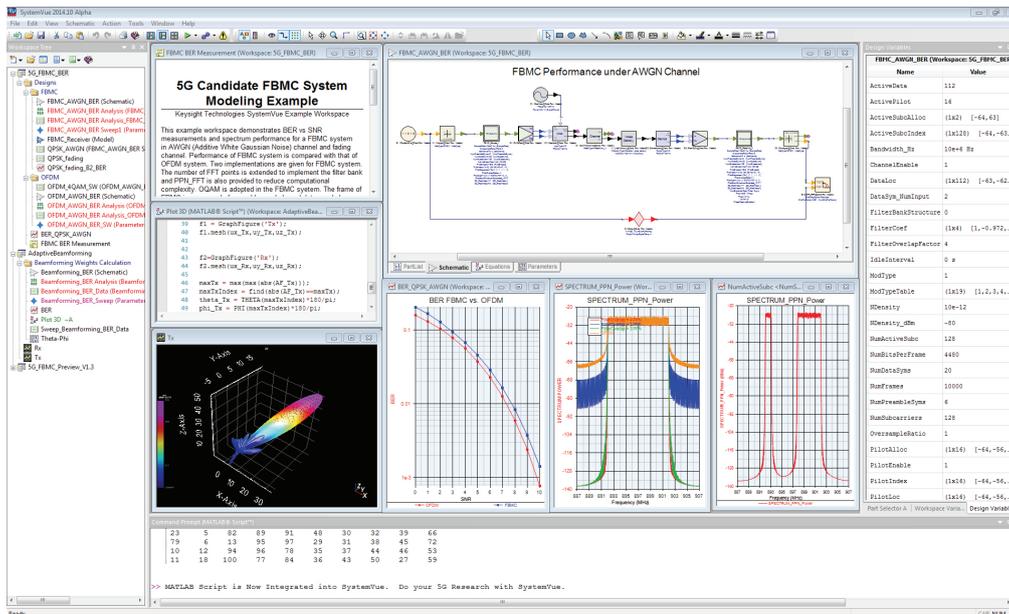


图 4. SystemVue 的 5G 基带探测程序库为 5G 技术研究提供可靠的、可立即使用的信号处理源代码。

在生成 5G 测试信号后，使用 SystemVue 或 Signal Studio 并结合两款硬件——精密型 AWG 和矢量信号发生器（配有宽带 I/Q 输入）——可以生成调制带宽高达 2 GHz、频率高达 44 GHz（使用上变频器则频率更高）的宽带测试信号，对 5G 候选波形进行极限和超出极限的测试。

多载波波形质量

系统在使用多载波波形（例如 FBMC 和 F-OFDM）时可能会遇到一些问题，使它们的波形质量受到影响，例如峰均功率比（PAPR）和由射频链路的非线性引起的射频减损。PAPR 的定义是最大瞬态功率与平均功率之比。在多载波系统中，固有的高 PAPR 会严重影响通信系统的频谱性能。

图 6 显示了由 SystemVue 生成的互补累积分布函数（CCDF）曲线，包括 OFDM（红色）和 FBMC（蓝色）波形在波形 PAPR 降低 / 没有降低时的曲线。限幅更明显的话，甚至能够把 PAPR 降得更低；但也会增加 OOB 频谱再生和原始信号中的失真。因此，确保总体误差矢量幅度（EVM）不超出规定限制非常关键。

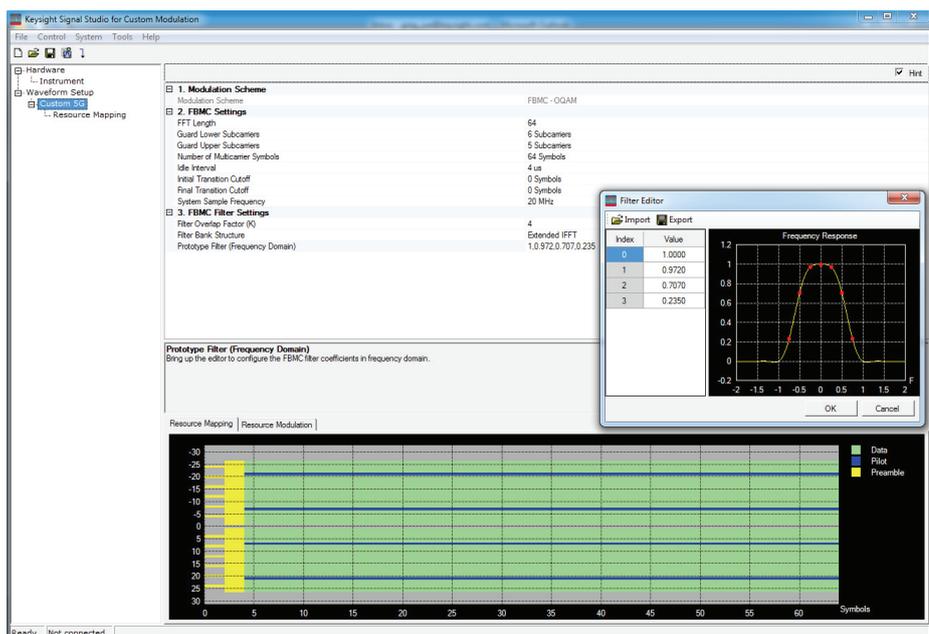


图 5. Keysight N7608B 用于定制调制的 Signal Studio 软件可以更轻松地地为 5G 应用生成和修改定制的波形，加快分析速度。

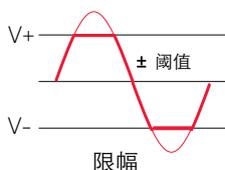
$$PAPR(x[n]) = \frac{\text{最大值 } |x[n]|^2}{E[|x[n]|^2]}, 0 \leq n \leq N-1$$

OFDM
N: 子载波的数量

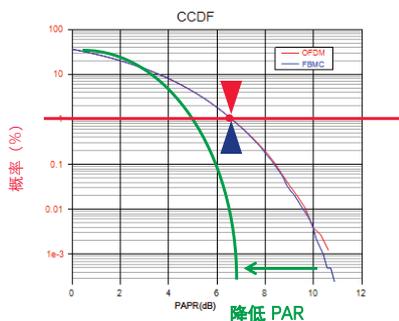
$$PAPR(x[n]) = \frac{\max |x[n]|^2}{E[|x[n]|^2]}, 0 \leq n \leq (M-1)N/2 + KN$$

FBMC
M: 重叠符号的数量, K: 滤波重叠系数

$$EVM = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N-1} |E_k|^2}{(S_{ref})^2}}$$



CCDF: 互补累积分布函数



$$CCDF[PAPR(x[n])] = \Pr(PAPR(x[n]) > k)$$

图 6. 影响多载波波形质量的两个因素是 PAPR 和射频链路的非线性。

射频链路的非线性是另一个显著影响波形质量的因素。为了更深入地了解这一点，可以参考图 7 中的非线性放大器模型。此处，输入信号的功率从 -20 dBm 扫描到 10 dBm，增益为 28.5 dB。因为这个放大器模型展示了发射机和接收机链路间的多种类型的非线性特性，把测量设置在 1-dB 压缩模式，FBMC EVM 测量块连接在放大器的输出端。所生成的“my EVM vs swept input power” SystemVue 图显示，当输出功率达到压缩点时，EVM 会迅速增加。LO 信号源和调制器也可用于仿真相位噪声、IQ 失衡和其他射频减损对测量的影响。

SystemVue 工作区包括这项设计以及本应用指南中讨论的其他设计，可通过 <http://www.keysight.com/find/eesof-how-to-5g-waveforms> 下载。工作区还包括一个交互式测试台，帮助工程师更好地理解如何利用单个仿真工具解决基带和射频问题。

评测 5G 系统性能

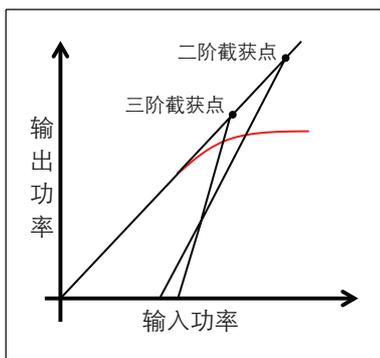
当设计 5G 候选波形时，对具有实际射频减损的波形的性能进行评测是十分关键的。这可以通过使用 SystemVue 对射频特性建模，再执行端到端链路级仿真才实现。

为了有效地建模一个波形的射频特性，首先要对它的基本概念有所了解。当具有高 PAPR 的多载波信号经过非线性器件时，信号可能会出现较大的失真。业内通常用 1 dB 压缩点来指定发射机的非线性。接收机非线性的标准射频指标与发射机的不同，因为它们要解决的问题是不一样的。接收机的非线性指标称为截获点。输入和输出电压间的非线性关系可通过图 7 中的方程式来估算。直流偏置和高阶项在顶层仿真中可以忽略。

如图 7 所示，IQ 调制器使用射频载频 ω 的余弦和正弦表示。IQ 调制器中的线性失真是由混频器的不对称造成的；在模拟环境中始终存在。混频器的不对称可产生增益失衡 a 和正交误差 θ 。正交误差是指两个本地振荡器信号之间的相位差，与固有的 90° 相位差无关。它会产生相位噪声和 / 或频偏。

非线性特性

$$v_o(v_i) = v_{DCO} + av_i - bv_i^2 - cv_i^3 - \text{高阶项}$$



IQ 调制器

$$v_{rf}(t) = a(1 + \frac{\epsilon}{2}) \cos(\omega t + \frac{\Delta\phi}{2} + \theta) - aQ(1 - \frac{\epsilon}{2}) \sin(\omega t - \frac{\Delta\phi}{2} + \theta)$$

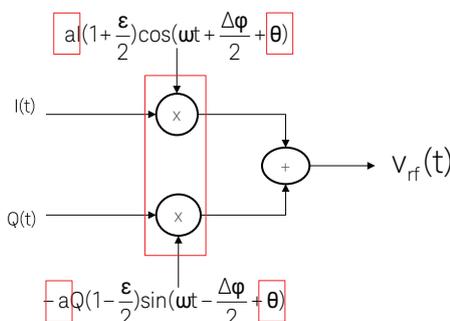
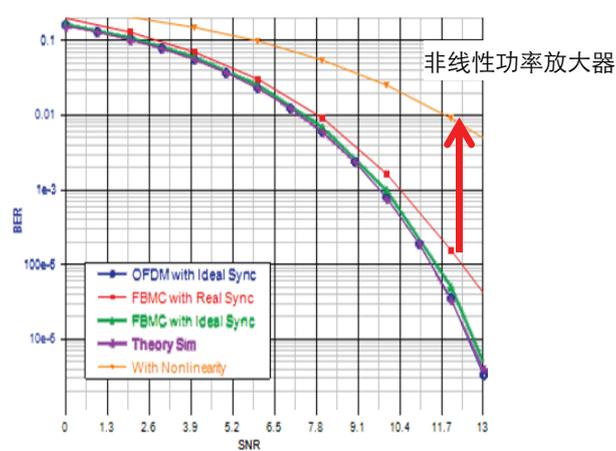


图 7. 正确评测 5G 系统的性能需要考虑射频减损（非线性特性和 IQ 调制器），因为它会使波形的质量失真。

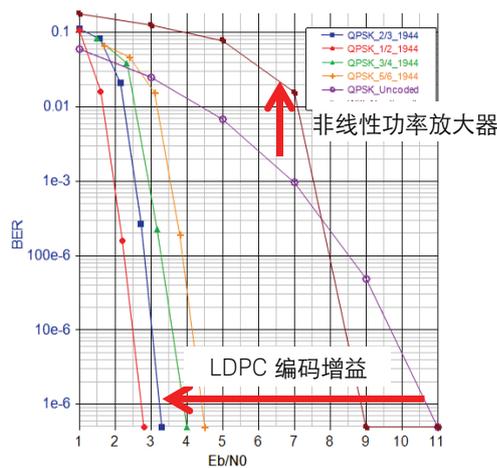
图 2 显示了一组 FBMC 发射机建模实例。它们可用于一个带宽为 20-MHz 的 FBMC 信号，它分配了 128 个子载波。此处，QPSK 数据符号被映射到配有滤波网络合成滤波器组的 FBMC 发射机，再上变频到 2 GHz 频段。

在波形的射频特性被建模之后，下一步是评测波形的链路级性能。以 FBMC 系统的发射机配置为例，如图 1 所示，第一步是选择接收机模型的理想时间同步。下一步，使用发射机和接收机放大器模式，把一些非线性特征放在射频信道模型里。发射比特和接收比特随后通过逻辑方式连接到了原理图中的比特误码率 (BER) 仿真模型的输入端。最后，在一千个传输数据帧上运行仿真。这个仿真生成了两幅图，参见图 8。



未编码 BER 曲线，显示了 AWGN 信道的 OFDM 和 FBMC

图 8 中，最左侧是加性高斯白噪声 (AWGN) 信道上的未编码 BER 曲线，可以看到 FBMC 与 OFDM 的链路级性能是相似的。但是，发射机和接收机链路间的非线性会造成 BER 值增加。最右侧图是衰落信道上的编码 BER 曲线，它显示了低密度奇偶校验 (LDPC) 算法的编码增益性能。注意：当存在非线性且没有降低 PAPR 时，LDPC 的误差校正仍旧非常严格，与未编码用例非常相近。



LDPC 编码 BER 曲线，显示了衰落信道在不同编码率下的 FBMC

图 8. 上图显示了 FBMC 系统的端到端链路级仿真结果，参见图 1。

结果汇总

虽然 5G 已经准备好应对预计在 2020 年出现的数据爆发，但这一过程会是漫长和艰辛的。技术在不断演进，在早期研究和开发阶段中会有很大的变化。推动这一进程需要工程师设计正确的 5G 波形，并且能够全面地评测这些波形。系统级 SystemVue 软件及其 5G 基带探测程序库为此提供了理想的解决方案。当需要这些波形来执行 5G 应用中的元器件、发射机和接收机测试时，Signal Studio 定制调制软件是正确的波形生成选择。借助这些解决方案，设计团队现在可以使用他们所需要的工具，在标准持续演进的同时，快速推进他们的 5G 研究。最终，他们将会加快未来 5G 系统的部署。

加速无线设计与测试的强大功能

是德科技是无线测试行业的领导企业，致力于通过以应用为中心、针对现有和新兴标准特别优化的测试测量平台，提供卓越性能的无线器件和网络设计和测试。除了卓越的研发和现场支持之外，是德科技还帮助工程师在不断演进的无线行业中更好地分析各种复杂问题，加快产品的开发速度。

如欲了解有关是德科技测试与测量产品的更多信息，请访问：www.keysight.com/find/powerofwireless

相关应用

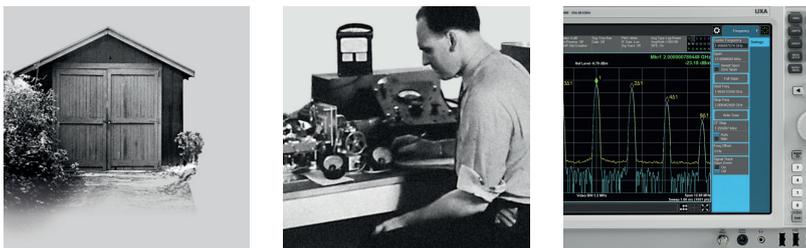
- 5G 无线 www.keysight.com/find/5G
- IoT/M2M www.keysight.com/find/IoT

相关是德科技产品

- EDA W1903BEL 5G 基带探测程序库
- 5G 信道探测，参考解决方案
- 5G 波形生成与分析测试台，参考解决方案
- 用于天线测试的 N5264A PNA-X 测量接收机
- N9030A PXA 信号分析仪，3 Hz 至 50 GHz
- N5183B MXG X 系列微波模拟信号发生器，9 kHz 至 40 GHz
- M9703A AXIe 12 位高速数字化仪 / 宽带数字接收机

从惠普到安捷伦再到是德科技

传承 75 年创新史，我们始终帮助您开启测试测量新视野。我们独有的硬件、软件和技术人员资源组合能够帮助您实现下一次突破。1939 年成立的惠普公司起源于电子测量，是德科技将这一业务传承至今，并将继续发扬光大。



1939年

未来

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

个性化视图为您提供最适合自己的信息！



3 年保修

www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty

是德科技卓越的产品可靠性和广泛的 3 年保修服务完美结合，从另一途径帮助您实现业务目标：增强测量信心、降低拥有成本、增强操作方便性。



Keysight Assurance Plans

www.keysight.com/find/AssurancePlans

10 年的周密保护以及持续的巨大预算投入，可确保您的仪器符合规范要求，精确的测量让您可以继续高枕无忧。

www.keysight.com/go/quality

是德科技公司

DEKRA 认证 ISO 9001:2008

质量管理体系



Keysight Infoline

www.keysight.com/find/service

Keysight Infoline

是德科技的洞察力帮助您实现最卓越的信息管理。免费访问您的是德科技设备公司报告和电子图书馆。

是德科技渠道合作伙伴

www.keysight.com/find/channelpartners

黄金搭档：是德科技的专业测量技术和丰富产品与渠道合作伙伴的便捷供货渠道完美结合。

www.keysight.com/find/PowerofWireless

如欲获得是德科技的产品、应用和服务信息，请与是德科技联系。如欲获得完整的产品列表，请访问：www.keysight.com/find/contactus

是德科技客户服务热线

热线电话: 800-810-0189、400-810-0189

热线传真: 800-820-2816、400-820-3863

电子邮件: tm_asia@keysight.com

是德科技(中国)有限公司

北京市朝阳区望京北路 3 号是德科技大厦

电话: 86 010 64396888

传真: 86 010 64390156

邮编: 100102

是德科技(成都)有限公司

成都市高新区南部园区天府四街 116 号

电话: 86 28 83108888

传真: 86 28 85330931

邮编: 610041

是德科技香港有限公司

香港北角电器道 169 号康宏汇 25 楼

电话: 852 31977777

传真: 852 25069233

上海分公司

上海市虹口区四川北路 1350 号

利通广场 19 楼

电话: 86 21 26102888

传真: 86 21 26102688

邮编: 200080

深圳分公司

深圳市福田区福华一路 6 号

免税商务大厦裙楼东 3 层 3B-8 单元

电话: 86 755 83079588

传真: 86 755 82763181

邮编: 518048

广州分公司

广州市天河区黄埔大道西 76 号

富力盈隆广场 1307 室

电话: 86 20 38390680

传真: 86 20 38390712

邮编: 510623

西安办事处

西安市碑林区南关正街 88 号

长安国际大厦 D 座 501

电话: 86 29 88861357

传真: 86 29 88861355

邮编: 710068

南京办事处

南京市鼓楼区汉中路 2 号

金陵饭店亚太商务楼 8 层

电话: 86 25 66102588

传真: 86 25 66102641

邮编: 210005

苏州办事处

苏州市工业园区苏华路一号

世纪金融大厦 1611 室

电话: 86 512 62532023

传真: 86 512 62887307

邮编: 215021

武汉办事处

武汉市武昌区中南路 99 号

武汉保利广场 18 楼 A 座

电话: 86 27 87119188

传真: 86 27 87119177

邮编: 430071

上海MSD办事处

上海市虹口区欧阳路 196 号

26 号楼一楼 J+H 单元

电话: 86 21 26102888

传真: 86 21 26102688

邮编: 200083



关注是德科技
了解更多测试资讯



本文中的产品指标和说明可不经通知而更改
© Keysight Technologies, 2015
Published in USA, October 26, 2015
出版号: 5992-1162CHCN
www.keysight.com