

# 灵活的5G波形及超宽带信号生成和分析测试系统

Greg Jue Sangkyo Shin  
是德科技公司

**摘要:** 目前5G技术研究遇到的一大挑战是:需要对太多的波形、频率和带宽加以分析。除了6 GHz以下频率的波形之外,还包括微波和毫米波频率的波形。有的波形可能还涉及到太带宽。所有这些因素对5G信号的生成和分析提出了新的测试挑战,因此灵活性是当今5G研究的关键要求。本文将讨论部分候选波形,并介绍一款创新和灵活的、适用于5G波形生成和分析的测试台。该测试系统将软件解决方案和测试设备完美结合起来,通过仿真前沿的5G波形应用场景来执行“假设-分析”研究。文中还将分析候选5G波形与4G波形共存的场景,并将讨论微波和毫米波频段、调制带宽高达2 GHz的宽带信号生成和分析案例。

## 1 引言

在第四代蜂窝系统——LTE和LTE-Advanced——刚刚开始部署之际,对第五代(5G)系统的研究已经展开。5G移动网络的愿景是实现“随时随地万物接入”。

关键特性包括一个高密度和高度集成的网络,组成该网络的小微基站能够支持10 Gbps级的数据速率和1 ms或更短的往返时延。大部分研究都假设使用多个工作在微波和毫米波波段的空中接口。使用MIMO等高级空间复用技术,可以进一步扩充容量。

这个综合性的网络将能够支持从简单的机对机(M2M)通信到虚拟现实数据流等所有应用。它将能够监控数十亿的传感器和多种同时传输数据流

的业务,并支持物联网(IoT)的海量数据收集和分配需求。在这种环境中,预计到2030年无线数据流量将增加5 000倍。

为了让这个惊人预测成为现实,首先应创建、生成和分析信号原型。由于5G研究启动之时标准化工作尚未开始。业界尚未对物理层信号给出定义,而且对使用何种波形也有争议,所以正在考察多种候选波形:滤波器组多载波(FBMC)、广义频分复用(GFDM)、通用滤波多载波(UFMC)、滤波正交频分复用(F-OFDM)等。

灵活性至关重要的一个原因是:它支持工程师执行“假设”分析法评测早期的概念和可能使用的5G波形,包括可能会使用多种调制

方法,在多种不同频率和调制带宽条件下进行分析。对于开发人员来说,如果路线选择错误会带来极大的风险,因此需要更高的灵活性,尤其是灵活的信号生成和分析工具。当5G演进中出现更好的候选信号时,这些工具使开发人员能够迅速转变研究方向。

本文详细说明了一款灵活的5G测试系统,该测试系统由经过验证的现成的软件和硬件组成。在信号开发阶段有2个关键软件:一个是SystemVue软件,用于实施仿真、假设分析和算法开发;另一个是Signal Studio软件,用于在研发测试初期生成测试信号。生成测试信号的硬件使用M8190A任意波形发生器(AWG),它

可以生成信号来驱动E8267D PSG矢量信号发生器的宽带I/Q调制输入。使用89600 VSA软件、X系列信号分析仪和宽带Infiniium示波器执行信号解调和分析任务。

## 2 设计与测试面临的挑战

5G给研发工作带来多方面的新挑战,可以划归为6大技术特性:

- 1)每个地区的移动数据流量增加1 000倍;
- 2)连接的设备数量增加10~100倍;

- 3)典型的用户数据速率提高10~100倍;
- 4)能耗降低10倍;
- 5)端到端时延< 1 ms;
- 6)5G接入无所不在,覆盖低密度区域。

以前的移动技术通常是经过逐步的改进而提升性能的。现在很难想象一种新技术能够同时满足上面列出的所有6个特性。研究人员更有可能会采用不同的技术来实现以上6大技术特性的部分特性,如图1所示。

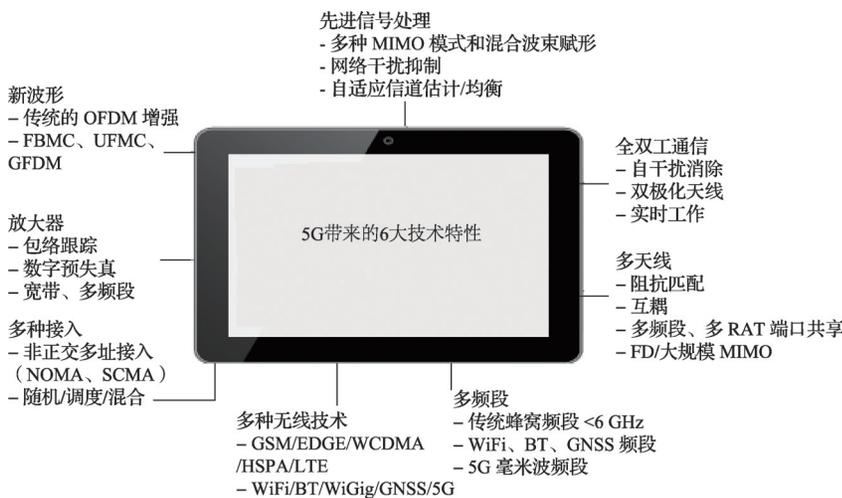


图1 研究人员需要采用多种不同的支持技术、设备和方法来实现目前预想的6种5G技术特性

如图1所示,新波形可能能够支持更高密度的用户群、更高的数据吞吐量以及对所分配频谱更高效的利用。这些波形可能需要先进的信号处理能力、自适应信道评测和均衡,以加强稳定性和抗扰性。

可能使用全双工通信以改善频谱效率。最大限度减少干扰将会提高接收机的灵敏度。

可能需要应用MIMO等多天线技术以支持高数据吞吐量,还要研究大规模MIMO和自适应波束赋形等先进技术。MIMO和自适应波束赋形等技术可能还需要非常复杂的算法。

它必须支持传统和全新无线接入技术(RAT)的多个频段,包括用于高数据吞吐量应用的5G毫米波频段扩展。需要支持多种接入模式,包括非正交多址接入(NOMA)模式,以及随机、定期和混合模式。

最后,新的波形、多频段、宽带宽和更高阶调制可能对功率放大器(PA)设计提出全新挑战,并可能需要应用新的PA数字预失真(DPD)技术。

如果能够在研发初期灵活地转变设计验证和测试方式,将有助于研发人员更好地应对这些挑战。

## 3 探索候选波形

无线标准在演进过程中对更高数据速率的追求永不停顿。在5G标准中,追求的目标变成使用多载波波形、微波频率、毫米波频率和更宽调制带宽。

如图2所示总结了目前正在考虑实施的波形。

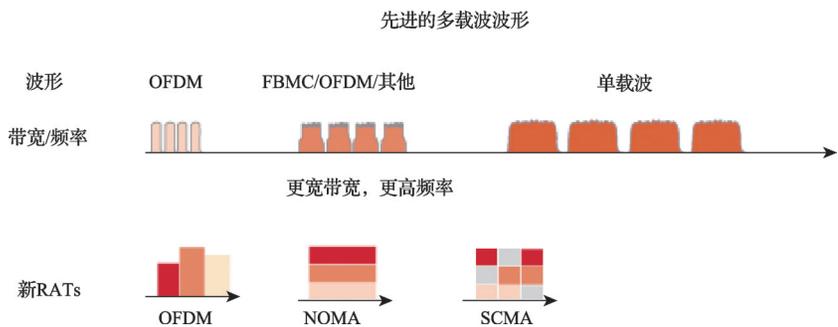


图2 5G 候选波形覆盖多种可能实施的方法

### 3.1 候选波形:OFDM(正交频分多路复用)

正交频分多路复用OFDM正在4G中使用,再加上其他一些原因,所以5G也在考虑使用滤波OFDM(F-OFDM)。F-OFDM提供良好的频谱效率和多径干扰抑制能力。其子载波空值对应邻近子载波的峰值,从而确保载波间干扰为零。

### 3.2 候选波形:FBMC(滤波器组多载波)

为提供更出色的带外频谱特性,

FBMC对每个子载波实施滤波。图3显示了使用多相网络(polyphase)或扩展IFFT灵活执行基带滤波的方法。

滤波可以使用不同的重叠系数(即K系数)提供各种水平的带外抑制。图4中,红色、蓝色和绿色轨迹分别显示了K系数为4、3、2时的FBMC频谱。随着K系数减小,带外特性具有与OFDM类似的频谱抑制特征。

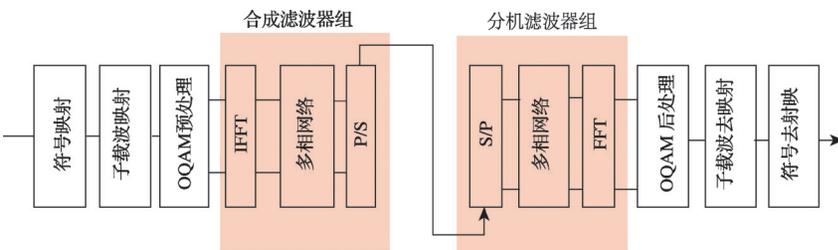


图3 FBMC中的滤波器组可以对每个子载波进行滤波

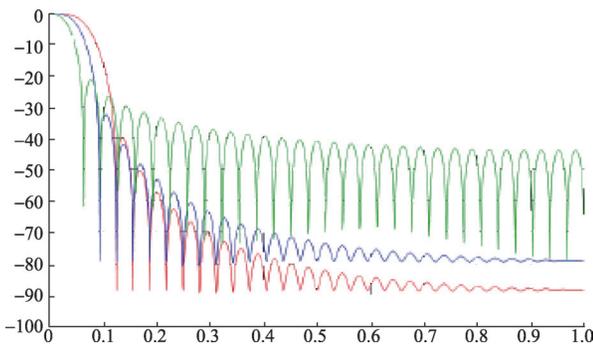


图4 改变重叠系数(K)就会改变FBMC的带外抑制特征

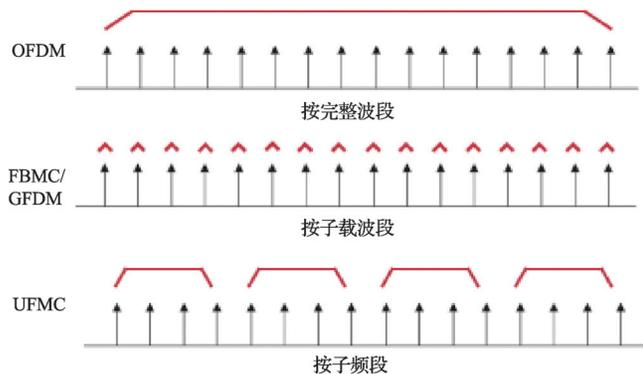


图5 OFDM、FBMC和UFMC使用的滤波方法差别很大

### 3.3 候选波形:UFMC(通用滤波多载波)

此方案对每个子频段实施滤波(如图5所示),UFMC的一大优点是可以降低基带算法的复杂性。如图6所示为使用SystemVue仿真的UFMC频谱实例。

### 3.4 候选波形:GFDM(广义频分复用)

这是另一种多载波系统,它通过数字方式实施典型的滤波频段方法。GFDM信号基于来自特定星座图映射的KM总数据符号( $dk, m$ )的数据块结构。M符号插入一个循环前缀(CP)以提高频谱效率并减少接收机端的复杂均衡。

### 3.5 OFDM和FBMC的对比

OFDM有2个明显缺点:1)插入循环前缀降低了频谱效率,2)存在极大的带外发射。相比之下,FBMC的优势在于能够高效利用所分配的频谱,以及能够为频谱感知应用生成或占用频谱“空洞”。

使用SystemVue及其5G基带探测程序库可以证明这一点。图7显示了OFDM(橙色轨迹)和FBMC(蓝色、绿色和黑色)频谱的仿真结果。FBMC频谱有从2(蓝色)到4(黑色)不同的重叠系数,与OFDM(橙色)相比,FBMC在带外频谱功率方面有所改善。

## 4 组装推荐的测试系统

当开发人员使用这些波形和其他波形进行试验时,极其灵活的测试系统可以提供高性能的原型算法和硬件,以更好地测试推荐的波形。在假设分析的场景下,还可以在原型算

法及原型硬件的仿真和实际测试中更加容易、快速地过渡。

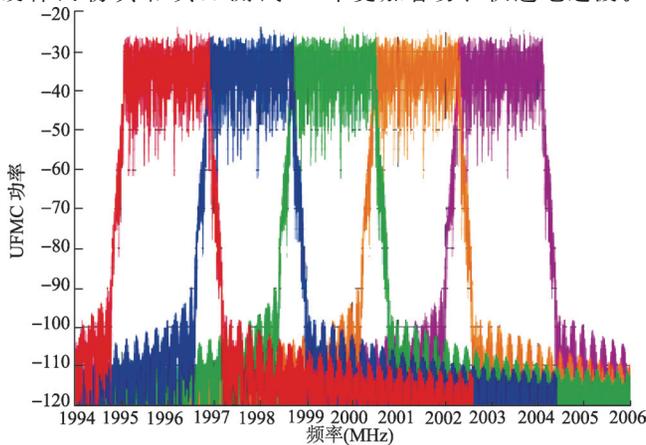


图6 UFMC波形(由SystemVue生成)仿真显示了5个复用频段

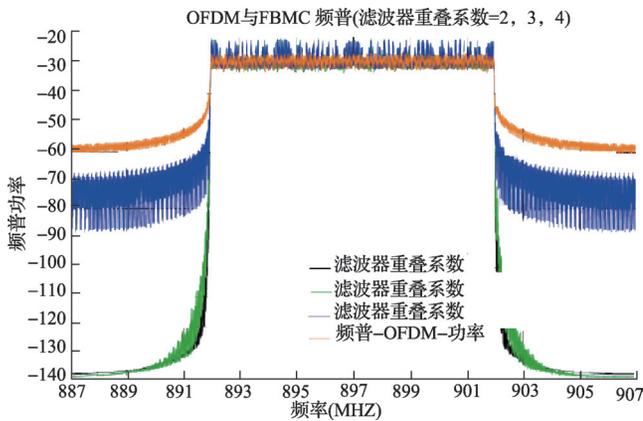


图7 与OFDM相比, FBMC的重叠更多, 因此带外功率得到改善

具体而言, 5G研究和早期测试的3个重要领域都需要出色的灵活性:

- 1) 生成和分析新波形;
- 2) 支持从几MHz到几GHz的广泛调制带宽;
- 3) 支持从射频到微波再到毫米波的广泛的频率范围。

推荐的测试台通过其软件和硬件元素提供这种灵活性。软件用于创建和分析5G波形及定制波形。该信号生成软件与两个硬件——精密型AWG和具有宽带I/Q输入的矢量信号发生器——相结合, 能够生成调制带宽高

达2 GHz、频率高达44 GHz(使用上变频器可以达到更高)的宽带测试信号。另外, VSA软件也能够驻留在仿真软件中使用, 或在信号分析仪、示波器以及负责控制各种仪器或数字转换器的PC上运行, 以实施信号解调和分析。

### 5 应用: 3个案例研究

测试系统的通用性使它适用于各种可能的射频、微波和毫米波频率应用场景。

#### 5.1 射频案例研究: 探索LTE和FBMC (< 6 GHz) 的共存

LTE和FBMC信号的生成可以通过SystemVue原理实现, 这两个信号经过重采样后结合到一个复合波形中, 该复合波形而后下载到M8190A AWG中。使用PXIA信号分析仪和89600 VSA软件分析AWG的输出。

如图8所示为PXIA测得的测试信号结果。请注意FBMC频谱与LTE频谱相比, 带外频谱的急剧降低。这是由施加到FBMC信号的子载波滤波导致的。

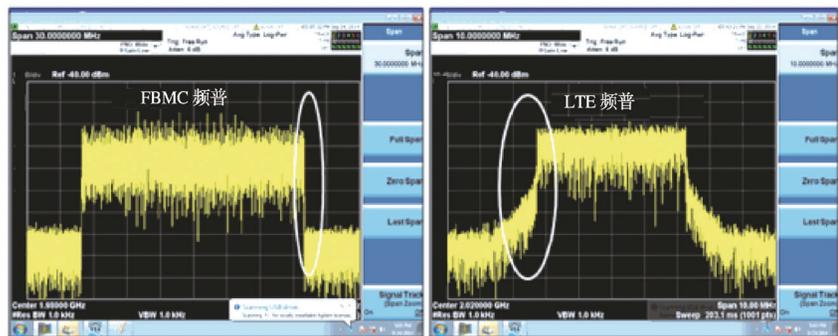


图8 与LTE相比, FBMC具有很明显的带外优势

为了评测LTE与FBMC的共存, 在SystemVue中修改了测试场景, 使FBMC信号中存在部分有效

子载波陷波。而后设置LTE中心频率以匹配陷波的中心频率(如图9所示)。

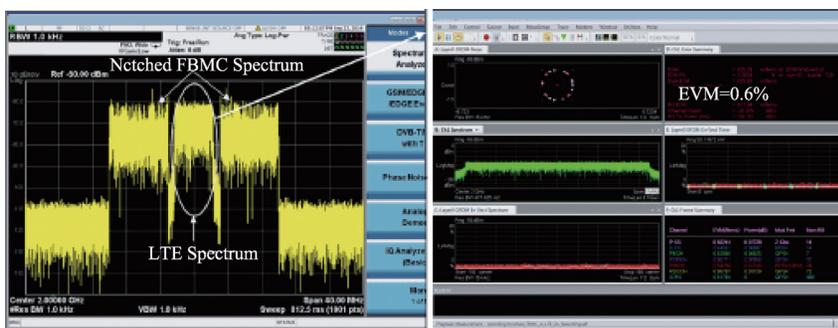


图9 LTE信号位于凹陷的FBMC频谱的中心

图9中的右上方轨迹使用89600 VSA软件生成。它解调LTE信号并计算出EVM为0.6%，这表明FBMC带外特性对包含此陷波的LTE信号影响极小。

陷波宽度很容易修改，LTE

EVM可以通过宽度(由子载波数量决定，宽度单位为MHz)得出。图10显示了一组与FBMC陷波宽度有关的LTE EVM结果。这个假设分析场景实例可以用测试台轻松测试。

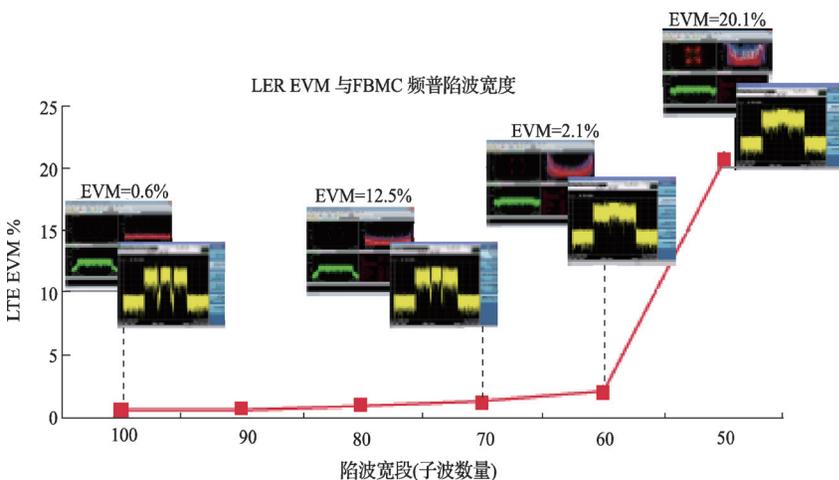


图10 随着陷波宽度的减小，LTE EVM 变差

### 5.2 微波案例研究：宽带信号生成和分析 (28 GHz)

如前所述，测试台在微波频率范围内具有高达2 GHz的调制带宽，可以用来生成和分析宽带波形。在此案例中，可以使用M8190A AWG和E8267D PSG矢量信号发生器(具有宽带I/Q输入)的组合来生成最高44 GHz的宽带微波测试信号。

1 GHz调制带宽的28 GHz宽带FBMC信号用Signal Studio定制调制软件生成。帧数、采样率和过采样率等参数通过该软件参数化图形用户界面(GUI)设置。FBMC-OQAM波形参数，例如FFT长度、上下保护子载波、多载波符号数量和空闲间隔等，也可以设置。基本的FBMC滤波器设置——K系数和滤波器组结构——可以由用户输入。

图11显示了测试信号结果，频率中心频率为28 GHz，测量扫宽为1.2 GHz。

同样，Signal Studio定制调制软件可以用于创建具有1 GHz调制带宽、频率为28 GHz的OFDM波形。使用GUI可以设置基本的参数(例如帧数等)。而且可以针对前导码、导频和数据子载波设置资源映射参数，包括每个资源块的位置和功率提升(boosting)。针对导频和数据的前导码、调制以及净荷设置I/Q值。

测试信号结果在图11中的6条轨迹屏幕上显示：



图11 89600 VSA软件屏幕快照显示了解调OFDM信号的多个视图

- 1)左上:星座图;
- 2)中上: EVM 与载波;
- 3)右上: 搜索时间;
- 4)左下: 28 GHz中心频率处的1 GHz宽频谱;
- 5)中下: 误码摘要;
- 6)右下: OFDM均衡信道频率响应。

### 5.3 毫米波案例研究: 宽带单载波调制 (60 GHz)

本例使用SystemVue以2 GHz符号率、4倍过采样和8 GSa/s采样率生成宽带波形。波形随后下载到M8190A AWG, M8190A的输出连接至PSG矢量信号发生器的宽带I/Q输入端。PSG产生一个5 GHz信号, 再通过Keysight N5152A 60 GHz上变频器转换为60 GHz。MXG模拟信号发生器为上变频器提供本振信号。

对于带宽高达2 GHz的5G应用, 最重要的是应考虑到幅度和相位可能发生的变化, 这些变化对信号质量有不利影响。在这种情况下, 使用Infiniium示波器来直接测量60 GHz测试信号, 并使用已安装的89600 VSA软件解调和该信号。能够不依赖外部下变频器完成这些操作的优势, 可以对减少因系统未正确校准

而产生的幅度和相位误差提供很大帮助。

信号链内部(M8190A、PSG、电缆、上变频器、电缆和互连)有可能在这些频率上产生幅度和相位线性误差。使用89600 VSA软件中的自适应均衡器加以必要的矢量校正, 可以减少这些误差。均衡器会产生复数值的频率响应, 用它们可以最大限度地减少幅度和相位误差。具体做法是, 将

频率响应读数输入SystemVue软件, 使用它校正波形响应。

图12显示了经矢量校正的60.48 GHz信号的解调分析结果。注意, 不使用自适应均衡, 通常很难解调2 GHz宽带信号, 因为硬件在宽带宽上会导致信号减损。不过在本例中没有使用自适应均衡, 幅度和相位线性误差在仿真过程中得到校正, 从而生成经校正而具有低EVM的波形。

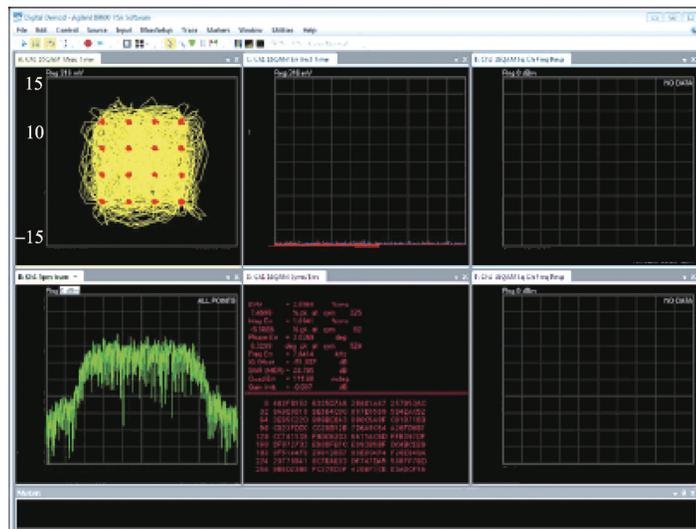


图12 解调结果显示了误差补偿所带来的改善

## 6 展望

5G的愿景设定了一系列雄心勃勃但实施难度极大的特性目标。为帮助开发人员解决这些固有的挑战并针对研究方向的变化快速做出反应, 是德科技推荐的测试台集软件

和硬件于一身, 以灵活地探索各种波形、算法和技术的应用。由于测试系统是利用现成的仪器和软件构成, 所以能够在设计的假设仿真和原型设备的实际测量中提供精确和可复验的结果。