

# 支持物联网设计的射频/微波EDA

## RF/Microwave EDA Supporting IoT Design

*随着物联网（IoT）成为日渐兴起的设计与开发趋势，我们邀请了部分业界领先的软件 EDA 公司，让他们分享如何运用工具实现 IoT 设计的实例。这些例子涵盖了可穿戴设备、5G、医疗到工业等各种应用。*

### 支持 IoT 设计链

ANSYS 公司
美国宾夕法尼亚州

IoT 将以如此大的工程规模在众多行业（医疗、交通运输、工业等）中蓬勃发展，从而推动电子行业转型，掀起射频 / 微波组件供应链革命，并催生对于设计工具、工作流程和技能组合的新需求。据估计，智能设备的数量到 2020 年将达到 2，000 亿部，设备与人的比例达到 26：1。IoT 生态系统能够在得到云基础设施支持的多种平台上（可穿戴设备、联网家庭、汽车、城市、医疗、工业等）实现大规模数据采集（感应）、连接功能 M2M（机器对机器）和 H2M（人对机器）。

此外，功耗、数据安全和通信标准合规性对于联网应用而言是关键的设计要求。实现电源效率、天线集成、性能、安全和成本之间的理想平衡，是开发 IoT 设备和基础设施的工程师面临的重大设计挑战。因此设计工具必须帮助工程师开发稳健可靠、高保真通信、省电型混合信号处理和成本优化的电子产品。这些功能一直是 ANSYS 软件开发和战略收购的重点。

因此，ANSYS 的产品组合和路线图与复杂设计链完美匹配，可用于开发 IoT 发展所需的完整系列集成电路（IC）、传感器、天线和嵌入式软件等。

自行业发展伊始，市场领导者就已经依赖仿真驱动的产品研发技术，快速、低成本地推出自己的设备，并对产品能按预期工作充满信心。在今后的发展中，工程团队需要比以往任何时候都更快的速度采用新技术。面向 IoT 的技术将借助软件工具进行开发与集成。这些软件工具能够精确地应对现实世界的物理设计需求，提供的求解器技术在速度和功能上足以仿真工作环境中的智能设备，同时能够利用工作流程改善工程生产力。

对于在低功率下工作的更小型便携式设备，孤立地设计组件不再是有效途径。工程师不能再基于每个组件抽象的原理图进行设计工作，他们必须考虑实际设备的几何结构，把所有物理影响包含在内。这意味着能够实现整个物理设计的可视化，插入合适的组件（比如表面贴装元器件、连接器和 IC），运行所有电磁频域和时域的仿真，并可包含热 / 机械效应。ANSYS 的多物理场仿真软件能够根据工程师定义的几何结构和材料，通过仿真组件的电气、热（配合采用 ANSYS Icepak）和机械特性，从而构建虚拟原型。仿真结构可从微型化嵌入

式天线阵列延伸到复杂PCB上电子封装中的堆叠芯片。

从芯片到封装和开发板、直至移动/基站天线和无线（从基带到射频），ANSYS能够充分满足各类电子设计的需求。IoT电子产品要求将芯片封装系统工作流程与多物理场结合，以开展热应力和机械应力分析（参见图1）。ANSYS CPS工作流程中包含了芯片电源模型（CPM），这是一种具有SPICE精度的芯片电源模型。CPM模型提供了开关电流变化行为，以及片上的非线性无源网络阻抗信息，用于封装和PCB的系统级联合仿真。该工作流程采用先进的网格剖分和多CPU求解器技术，能严格求解麦克斯韦方程组，生成精确的封装和PCB生成宽带模型。借助这一方法，工程师得以识别和解决信号完整性及电源完整性问题的根源，在节电所需的低工作电压和避免设备故障所需的一致性和可靠性之间获得平衡。

## 设计实例

利用仿真实现极低功耗、紧凑尺寸和综合连接功能的例子请参考Atmel的IEEE 802.11 b/g/nIoT网络控制器SoC和ARM Cortex-M0 MCU系列。设计团队利用ANSYS HFSS、ANSYS RedHawk和ANSYS Totem设计并验证了上述复杂SoC和平台，以满足多个IoT应用领域的需求。这些仿真解决方案让企业能够满足严格的功耗/性能要求，确保较宽频率范围内可靠的运行，在严苛的上市时间要求下交付产品。

ANSYS的软件开发主要体现在几大突出创新。这些创新能让工程师充分利用组件级IP，将其集成到仿真模型中，并与复杂系统层级化结合，提前为设计验证保证精确度。在设计过程早期实现这一水准的仿真保真度能节省大量时间与成本但也会要求更强大的计算能力。高性能计算（HPC）能够利用计算集群或云环境的更多节点提供HFSS仿真所需的计算能力，通过设计参数、频率和多核/多域电磁求解器的综合分配，加快设计工作的速度。借助分布式直接矩阵和域分解求解器等几种突出特性，HPC正在HFSS用户中得到广泛应用。

多个工程学科领域之间（电气和机械）和跨组织机构（如厂商和OEM）的设计信息交换也是IoT面临的一项重大挑战。除了仿真运行时间，设计输入（模型设置）和工具间的工作流程在决定工程生产力和缩小设计探索范围方面也发挥着重要作用。2015年，HFSS通过新推出的ANSYS电子设计桌面实现与ANSYS电路与系统仿真工具的完全集成。ANSYS电子设计桌面是一种单窗口、高集成度界面，为最大限度提高生产力提供了无缝工作环境，确保用户遵循仿真最佳实践。此外ANSYS电子桌面还具有3D EM（电磁场）组件库。

工程师和CAD支持团队都可以使用的3D EM库可与IP（知识产权）保护加密功能结合，在设计团队之间和跨高频供应链共享HFSS组件，以促进通信系统集成，从而有助于形成广阔的IoT生态系统。用户可创建3D组件并将其与更大型的电子装配体集成。无需用户设置激励、边界条件和材料属性，存储在库文件中的仿真就绪型3D组件就可以用于更大型系统的设计。

3D EM组件对IoT设计链的潜在影响在天线设计与布局上可能体现得最充分。可穿戴设备中的嵌入式天线往往全向辐射，相当大的能量会被人体吸收。Vortis Technology公司的工程师利用HFSS和Optimetrics，在开发微阵列天线时能够探索更多设计情景，使用干涉法重塑射频能量场的形状，降低对用户的有害射频信号强度，同时增强对接收端的发射。通过参数化建模和优化，设计探索能自动完成设计过程，同时伴随求导功能可以通过一次仿真获得多个参数的设计灵敏度。Vortis的设计人员确定理想的布局是让两个天线相位差180°，以建立朝向人体的无能量区，同时在所需方向上的信号能彼此强化。最终结果是朝向人体的能量下降10倍，辐射远场得到同等程度的增强，从而提升效率，延长电池使用寿命。经过加密的天线随后能够以组件库的形式提供给IoT移动设备制造商，供进一步设计或集成到他们各自的平台上。

IoT模型（机械设计）可能有多个来源。为加快模型的开发速度，ANSYS仿真工具可导入不同来源的电子CAD（ECAD）和机械CAD（MCAD）数据，Altium、Cadence、Mentor Graphics及Zuken等EDA布局工具提供的设计数据可以非常流畅地转换导入，机械CAD（MCAD）3D封装模型可以通过通用文件格式，如IGES、STEP、ACIS和Parasolid等导入等。使用ANSYS SpaceClaim Direct Modeler，

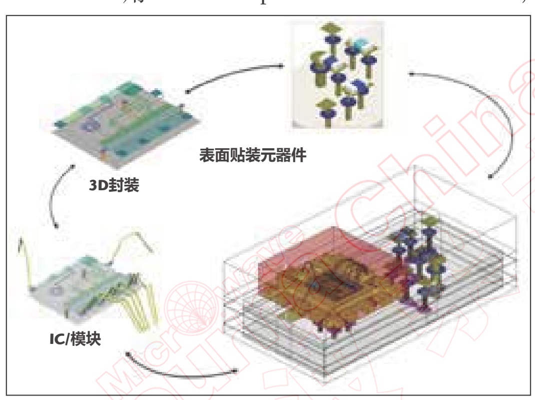


图1. 面向完整设计周期的系统工作流程。

设计人员可通过清理和简化几何结构、添加参数和一系列仿真前模型准备操作，迅速让来自这些 CAD 系统的几何结构做好仿真准备。导入的 CAD 模型具有完全的动态性，设计人员移动鼠标就能够完成移动、拉伸、添加和删除动作。所有对 CAD 模型的修改都实时地体现在屏幕上，供立即反馈，随时可导出到 HFSS，让高劳动强度的模型准备时间从数星期缩短到数小时。

## 用于可穿戴物 IoT 设备之天线的计算机模拟

CST 公司
德国

所谓“物联网 (IoT)”就是把实体的“物”，用网络连接起来，使之能够在“物”与“物”之间，与其操作者及厂商之间交换数据 . 这样就提高了设备本身的价值和服务的质量。为了能够监测和影响周围环境，带有的感应器，控制器和伺服器的“物”们，需要连接在一起。

由于智能设备的数量庞大，采用线缆进行互连较为困难，这就意味着大部分物联网设备需要设计为无线工作。电磁模拟可以把连接这些设备的天线置于几近真实的环境下建模，分析安装后的性能，其目的是为了提高 IoT 的可靠性和效率。

新的天线技术要求在一个小的实体上放置工作在不同频段上的多个天线（有时带有 MIMO 天线分集）。如何放置天线相当程度决定了天线性能，并可能导致潜在的系统间的共址干扰。

用于体域网 (Body-area network) 的可穿戴天线，在这方面有特别的挑战。当今，可穿戴技术最常见的商业应用是在快速增长的智能手表和健身追踪器市场。然而，这种天线在提高医疗诊断技术和即时监控救援及其他高危环境的工作人员方面，同样有相当大的潜力。

这些天线要求非常苛刻 : 在外形上有严格限制 ( 简约、轻便、植入服装或饰物 )，安装到靠近人体这一高损耗介质的挑战性环境，且要求能够达到所需的性能指标。除此之外，电磁场对人体照射的规范要求也需要考虑。

IoT 设备常常需要体积小，价钱便宜，集成印制天线比成品设计更具优势。使用 Antenna Magus 和 CST STUDIO SUITE，我们可以在元件稠密的 PCB 版上实现印制天线的快速设计和优化。

### 设计实例

模拟放置在人体上的设备，远比简单地研究隔离环境中的天线性能提供更精确的真实情况。设备中的其他元件和人体都会吸收或反射功率（见图 2），而天线本身的改变也会影响它的效率和方向性。这一点对于可植入服装的柔性天线，包括最先进的纺织天线特别重要。天线的弯曲，扭曲和拉伸会改变它的特性，而对应用来说，可靠性是极其重要的，对于所有的花样翻新的设计，都必须满足性能的要求。采用仿真设计手段，我们可以计算天线的性能，进行优化以消除天线失调的影响。

另外还要考虑比吸收率（SAR），这个指标对获得标准认证至关重要。它是人体组织吸收能量的多少的量度，做活体测量非常困难。人体不是均匀介质，由不同组织构成，而组织的材料属性常常很不相同 —比如肌肉和骨骼的电参数和温度参数就相当不同。模拟计算 SAR — 并发现最差

图 2. 佩戴的柔性隙缝天线周围的电场。

的假设情况 — 可以让工程师得到天线的安全输入功率，并可以减小可能在昂贵的物理样机阶段不能获得标准认证的风险。

真实的 SAR 计算要求详细的非均匀人体模型 — 例如，体素模型（Voxel 模型）或专门制作的 CAD 模型—它包含体内所有相关结构。CST STUDIO SUITE 软件本身带有 SAR 计算工具箱，可以用于计算体内点吸收功率密度和组织的体积平均吸收功率密度，支持现行标准 IEEE C95.3 和即将发行的新标准 IEEE/IEC 62704-1。 CST 参与了 SAR 标准制定。

为了提高复杂环境中的连通性，便携设备中不断增加了 MIMO 系统和波束控制的使用。MIMO 的一个好处是可以提高在复杂的多路径环境的性能 — 比如，在房屋林立的地区。多路径传输可能引起破坏性的信号覆盖，导致局部陷入瑞利衰落效应。使用多个天线（天线分集）可以减小这一衰落。

CST STUDIO SUITE 提供专门的后处理选项，用以计算 MIMO 的性能，它可以计算包络相关系数（包括了空间功率加权函数），分集增益，复用效率。图 3 显示的可穿戴设备上的 MIMO 天线 — 用 4 个天线覆盖人体的

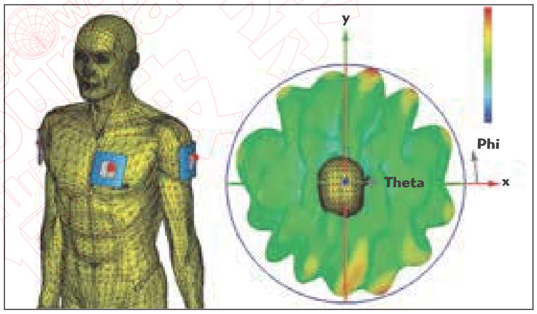


图 3. 4 个柔性天线合成 MIMO 体佩天线系统（a），同时激励所有天线在 2.4GHz 的实际增益（b）。

阴影部分，每一天线于人体局部共形。因为天线弯曲情况各不相同，天线下面的人体又有损耗，天线性能也就各不相同（位于上臂的天线形变最大，其频率比形变最小的偏移 50MHz）。尽管如此，使用 MIMO 获得了良好的性能，具有好的方向图和空间分集，低的相关系数和好的复用效率。

模拟计算是实现物联网设备的设计流程中的基本的工具。 工作在不同频率的不同天线可以集成在单一的紧凑设备上，并在真实的环境中分析它们的性能。 人体可以放入计算模型中，计算一些重要的生物参量比如比吸收率 (SAR)。 如果考虑到现代通信的 MIMO 原理，集成于大系统的天线性能也可以计算。 总之，上面上所述软件的功能，使得在一个单一的集成环境下，在设计的任意阶段使用计算模拟。

## 5G 和物联网发展的灵活性

FEKO(Altair) 公司
南非

伴随移动通信技术的进步，手机终端硬件近年来也取得巨大发展，手机从以前的“砖块”模式转变为如今的“精巧”模式。这种演变也给手机天线带来显著变化，天线设计已经从简单的单极子天线和印刷倒 F 型天线进化到复杂的电小尺寸天线。

FEKO 的矩量法（MoM）及其扩展功能可以解决电介质问题，非常适合手机天线的设计和优化。FEKO 还支持由矩量法延伸出的平面格林函数法、表面等效原理（SEP）和体等效原理（VEP），为设计师提供解决应用范围广泛的不同移动天线拓扑结构的仿真方法。

FEKO 软件实现对有限元法（FEM）和 MoM 的完全混合，为用户提供了融合多种算法优势针对复杂电介质天线进行仿真的方法。FEM-MoM 混合算法还为用户提供了新设备在靠近人体时的 SAR 评估（见图 4），可以很容易地计算出局部峰值 SAR（1 和 10 克立方）和人体全身平均 SAR 水平。当仿真手机天线需要考虑人体全身或其他电大尺寸物体时，采用多层快速多极子方法（MLFMM）可以对上述算法实现加速。

FEKO 还提供一种叫做特征模式分析（CMA）的技术，帮助设计师摆脱强力方法，通过分析本征值频谱和特征向量分布，遵循系统化和智能化的方法完成设计。CMA 被用于设计 LTE 1.8GHz 频段的移动天线（见图 5）。假设有一个预定义的表面区域将做蚀刻天线，在这个例子中，在 PCB 板的外侧边缘有一个弯曲的金属片。CMA 被用于计算主模在 1.8 GHz 的表面模式电流。这种方法的优势在于，它比标准的优化算法更加直观，可以通过更少的迭代满足优化设计需求。

CMA 也被用于寻找电池接头相对于天线以及电池与 PCB 板间距的最优位置。相比原来仅有天线和 PCB 板，其综合性能包括显示帧（或框）和电池，并可实现辐射效率提升 5%，耦合提升 5dB 和达到 1dB 的平均有效增益 (MEG) 提升。

图 4. 手机靠近头部通话时的局部峰值 SAR。

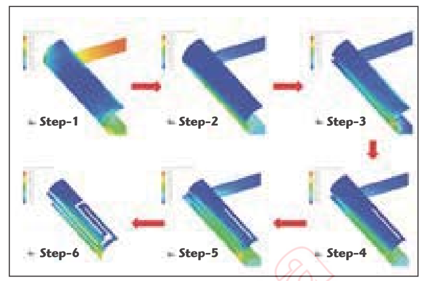


图 5. 基于模式电流分布来系统性修正金属片，实现 LTE 天线设计。

这项研究中 CMA 的主要优势是双重的：首先 CMA 仿真速度很快（大约数分钟），并且能通过模式电流分析带来对天线有价值的理解，有助于在整合过程中改善天线设计。

### 设计实例

实例显示 FEKO 先进的仿真技术可用于 4G/LTE 应用，然而它们也能有效地应用于 5G 基站和移动设备的天线设计。

物联网的要素之一，是其关键部件要实现设备和目标体之间的通信。目标体通过自动识别技术进行增强，通常是一个无线射频识别（RFID）标签，以便每个目标体可被唯一识别。同时，RFID 标签允许目

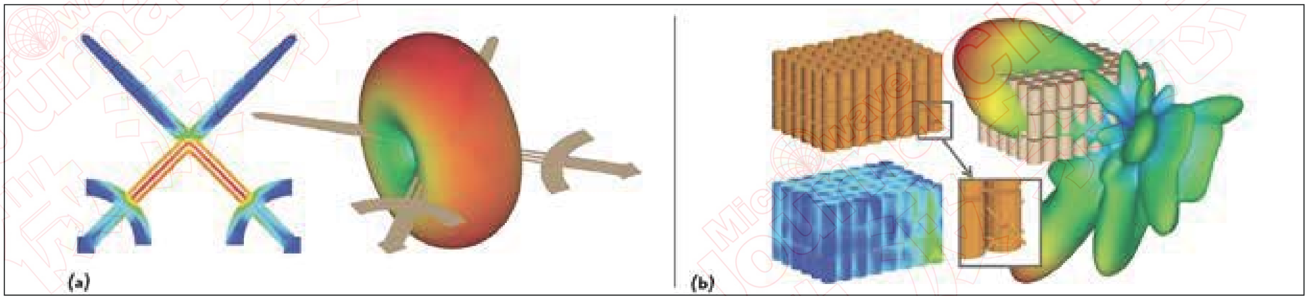


图 6. 神剑（Excalibur）标签天线的电流分布和辐射方向图（a），标签天线在一捆金属容器上的表面电流分布和辐射方向图（b）。

标体以无线通信方式传递某种信息，这导致另一个需求产生—监测数据的能力。真正意义上的智能目标体将被嵌入 RFID 标签和传感器以实现测量数据，该传感器可以捕捉到周围的温度变化、数量变化或者其他类型的信息。FEKO 可被有效地用于仿真 RFID 标签性能、优化其布局以及对读写器与标签之间通信的操作环境（见图 6）。

FEKO 不仅提供 MoM、MLFMM（多层快速多极子算法）、FEM、FDTD（时域有限差分算法）等数值方法，还支持高频近似算法和基于射线的方法，例如一致性绕射理论或射线几何光学（弹跳射线法），适用于长距离室内传播这类巨大电尺寸 RFID 问题（见图 7）。另一方面，对于电小尺寸的复杂介质问题，例如标签读写器相对人体的交互作用，可以使用有限元法（FEM）或时域有限差分法（FDTD）。FEM 可以单独使用或者和 MoM 混合使用（例如，读写器使用 MoM，而人体使用 FEM，充分结合两种算法的优势）。FEKO 凭借其先进和全面的求解技术，在 5G 系统和物联网应用中发挥着主要作用。

## 支持 5G 和物联网发展

Keysight EEsof EDA
美国加州

未来 5 年中，5G 和物联网设计将面对同样的趋势：日益提升的设计规模、集成度和复杂性，从单一集成电路（IC）到多芯片模块的转变，多技术集成（例如 GaAs、GaN、SiGe/Si/SOI 和 CMOS）以及日趋严苛的标准规范。设计团队小型化和压缩预算的趋势更加清晰，提升设计流程效率的需求同样迫切。

尽管新的趋势将带来诸多收益，而 5G 和物联网设计也将迎来更多挑战，包括很多过去 10 年中行业始终面临的问题。挑战主要包括电源效率最大化、电热效应管理以及复杂设计引发的电路仿真问题和紧凑设计导致的电磁耦合现象，其他挑战包括集成、评测和选择“恰当的”技术组合以及更宽频谱范围的行业标准规范一致性验证。

要引领发展趋势并克服挑战，设计工程师需要灵活且功能强大的设计解决方案，以便适应新兴的趋势和标准。是德科技电子设计自动化部门专注通信系统设计挑战，特别是集成电路和印刷电路板设计与仿真领域，涵盖 5G 和 802.11xx 无线网络以及低功耗蓝牙（BLE）和物联网 ZigBee 与 Wi – SUN 等广泛的应用领域。可信赖的电子设计自动化软件能够帮助是德科技客户交付行业领先的 5G 和物联网产品。

## 设计实例

### 瑞萨电子：低功耗蓝牙智能无线物联网应用解决方案

许多物联网应用都需要小尺寸的电池供电器件，以便通过纽扣电源实

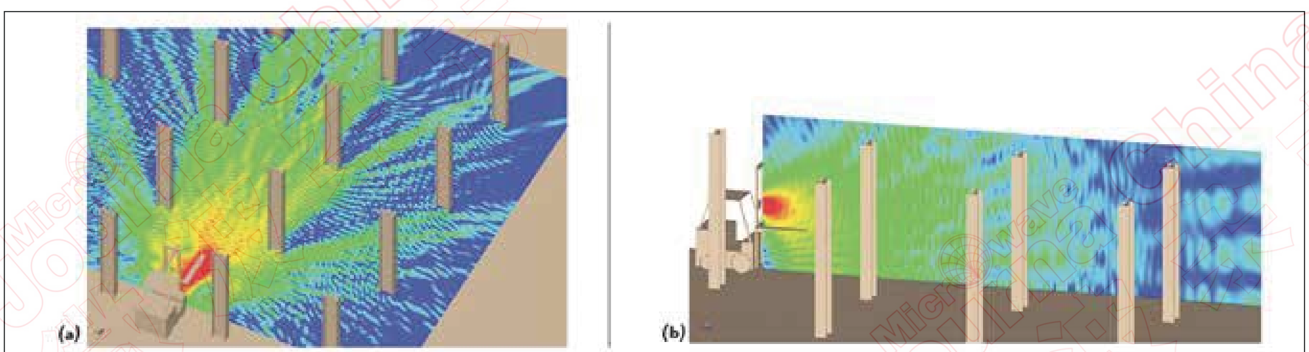


图 7. 安装在叉车上的 RFID 读写器在仓库环境中的近场方向图（20dB 可视化范围）（a），RFID 读写器前方垂直截面近场分布云图（30dB 可视化范围）（b）。

现数月甚至数年的长时间运行。因此，最大限度地降低功耗是最重要的物联网应用设计挑战。

瑞萨电子最近发布了一项新技术和一组微控制器。微控制器整合了低功耗蓝牙射频收发信机，能够使用 CR2032 纽扣电池工作两年甚至更久。设计使用了集成发射 / 接收开关、直流 / 直流转换器和匹配网络 / 滤波器复用，能够大幅缩减芯片尺寸并降低功耗。高效的直流 / 直流转换器通常需要极高的切换速率和紧凑的硅螺线，会产生射频频率分量和多余的电磁效应。

应用是德科技 Golden Gate 硅集成电路和 Momentum 仿真软件，瑞萨电子设计团队经理和是德科技认证专家 Hisayasu Sato 成功地完成了收发信机设计。此收发信机拥有业内最低的电流消耗，能够为穿戴产品和其他物联网应用短距离无线通信提供核心技术，将支持瑞萨电子加速嵌入式器件在物联网中的应用，并带来了近期新型 RL78/G1D 微控制器的发布（参见图 8）。

## Plextek RF Integration：28 GHz、4 通道、5G 调相功率放大器

展望 5G 无线，用户十分期待近乎无限的容量以及“随时、随地、始终互联”的愿景。要实现这一愿景，器件需要显著提高的数据速率和足够的毫米波频率运行带宽。然而，毫米波频率的信号传输难度远高于典型移动无线频率。

为了应对挑战，Plextek 首席执行官和是德科技认证专家 Stuart Glynn 与 Liam Devlin 应用是德科技先进设计系统（ADS）软件开发了创新的 4 通道 28 GHz 5G 调相功率放大器集成电路设计，以用于 5G 无线系统前端（参见图 9）。设计采用商用现货 0.15 μm GaAs PHEMT 工艺和适合大规模生产的低成本 SMT 封装，主要面向 5G 移动器件或基站应用。

Plextek 设计的独特之处在于每个通道都配备具有完整 4 位数控移相器的功率放大器，能够提供简洁的波束控制。此类创新元件是实现毫米波运行频率和充足带宽硬件设计的关键。

随着 5G 无线通信系统和物联网的持续演进，电子设计自动化工具在推动相关生态系统发展和实现行业愿景方面将发挥至关重要的作用。瑞萨电子和 Plextek 仅是前沿企业成功应用是德科技 EDA 解决方案开发 5G 和物联网产品的两个代表。除了为客户提供支持之外，是德科技积极与行业联盟、合作伙伴公司以及学术界展开密切合作，是德科技的开发和应用工程师作为各自领域的专家也在发挥重要作用，推动设计软件、工作台仪器和制造解决方案的开发，以及 5G、物联网与其他新兴标准的应用。出众的领导力、丰厚的应用专家知识以及业内领先的设计工具，是德科技可以帮助客户解决最棘手的测试挑战。

# IIoT（工业物联网）正在翘首以盼 5G 的到来?

NI 公司

苹果 iPhone 和安卓手机等高度功能化的智能设备以及各种 app 的推出点燃了全球对无线数据的需求，而且这一快速增长的需求并没有任何放缓的迹象。 移动宽带数据对我们生活的影响是不容置疑的，但更快速的数据仅仅是这一大局的一部分。 可靠的无线服务应用于交通运输、建筑、制造、医药和卫生保健、能源和智能电网等行业将能够刺激前所未有的经济增长。 例如，2014 年出售的十亿台嵌入式设备中有 85%未连接到网络。 但是，如果这些设备连接到网络上将是什么样的情景呢? 分析师预测，到 2020 年全球网络必须容纳超过 500 亿台嵌入式设备。连接到互联网的低功率传感器构成了物联网的基础。 其中许多设备将是由电池或小型太阳能电池板供电的自主嵌入式设备。 在定义 5G 网络的过程中我们获得了许多令人激动的发现，但其中大部分的焦点都集中在如何提高数据速率上。 然而，5G 并不仅限于此。 除了更快速的数据，5G 将需要容纳远超过当前数量的用户和设备（100 倍甚至更多），并着重解决网络延迟带来的挑战。 解决这些挑战的关键在于释放物联网的巨大潜力。

IoT 设备所需的数据速率可能不需要像智能电话或平板电脑那么高，但是许多 IoT 应用需要更快、更确定的响应时间来扩展物联网的范围—从变革传统的本地化应用延伸到使用联网的 app 来创建新的应用。 延迟或网络响应时间对于 3GPP 或 802.11 等标准制定机构来说并不是优先考虑的参数，因为他们的主要关注点在于提高数据速率。因此，目前的网络延迟是不可预测，而且是非确定的，范围可以从数毫秒到数秒。 这种不可预知性对于寻求各种方法来利用网络进行远程访问和控制的许多商业实体来说是一个问题。

在早期的蜂窝网络中，语音是主要的（或者说是唯一）的应

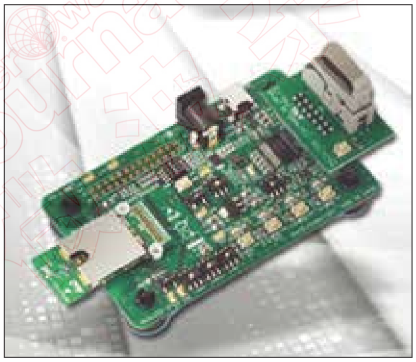

图 8. Renesas 公司蓝牙智能无线解决方案将帮助设计工程师更轻松地开发 IoT 的智能应用。

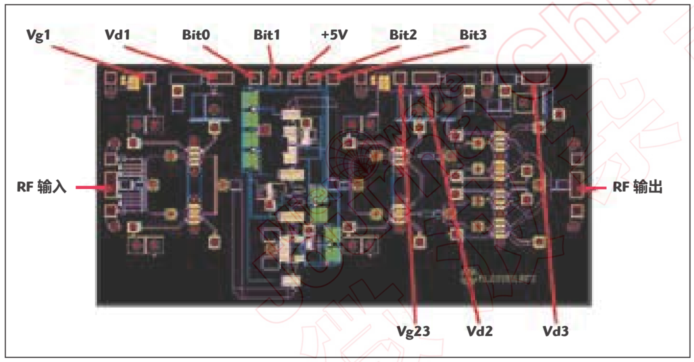


图 9. 使用 ADS 建模的 Plextek 发射机集成电路上其中一个通道的布局。

用，其延迟只要能够在听众可接受的范围内即可。 人耳能够分辨大约 100ms 的声音延迟。眼睛比耳朵更灵敏，能够感知大于 10ms 的视觉不连续，这对于多媒体应用是一个有用的指标。 实现触觉式互联网或触摸功能需要非常低的延迟（小于 1ms），因为人的触觉比眼睛或耳朵更灵敏。

## 设计实例

这些例子阐述了网络响应速度和人类视觉、听觉或触觉感知相关的用例。 比如涉及机器间通信的应用需要增加额外的功能 ：监测和控制。

物联网的两类“监测”用例包括：

1. 人眼 / 视觉

2. 传感器记录 - 存储视频或传感器数据，以便日后检索和查看

人眼 / 视觉 IoT 监测 / 监控应用所需的延迟必须在人类视觉无法感知的范围内 - 大约几十 ms（即传递机制是相同的，而且需求必须随应用的变化进行调整）。 实际上，传感器记录的延迟要求根据应用和所部署的传感器功能不同会有显著的差异。 为了理解这个观点，我们可以想一下温度测量这个简单任务。 温度传感器广泛用于各种应用中。 如果传感器测量的是环境温度，由于气候条件会以更大的时间常数变化，测量延迟可以是在温度随气候条件变化后几秒、几小时甚至几天。 我们看到目前此类应用具有非常丰富的功能。 相反，测量化学粉末或混合过程温度的传感器可能需要在温度上升到高于某个阈值时触发特定动作，以避免损坏最终产品或确保安全。 此类监测和经济效益直接与网络容量密切相关，并有可能本地专有实现。 本案例介绍了一个包含上下行链路双向响应时间的控制概念。

这类控制应用无法使用当前的网络实现，因为服务运营商不能提供最低延迟保证（而且大部分情况下，延迟会超出他们的控制范围）。 5G 网络的延迟目标是为工业提供可预测或确定的延迟响应，理想的值在亚毫秒范围内。 如果服务运营商能够提供可预测的网络响应，甚至能够预测某个指定地理区域的网络响应，那么企业就能够开发切实可行的业务。

“控制”蜂窝网络这一概念是变革性的。 将控制与云计算和存储能力相结合，能够改善我们的日常生活，并拉动经济增长。需要明确的是，这里所说的“远程控制”指的是在云端运行、监测传感器数据或视频以及控制部署在远程位置的进程的软件—可能是位于云端的控制软件。比如工厂自动化 / 智能工厂、交通控制 / 智能城市、智能电网 / 节能、医疗保健监测和药品支出。 总的来说，这些想法构成了工业物联网 (IIoT)。IIoT 应用改变了控制模式 ; 与全球不同地方独立地对某个特定控制过程复制数百万次不同，5G 网络可提供一个统一的控制体验来降低成本、提高质量、提高性能以及催生新产业，进而实现了 IIoT。

NI 目前正与研究人员展开合作来开发能够覆盖更广泛的物联网基础设施的 5G 网络。 目前在研究的几个 5G 技术项目非常有可能成功。 其中一个最有前景的 5G 候选技术是毫米波。 尽管世界各地的政府都在努力重新分配频谱，但是低于 6GHz 的自由频谱仍然非常稀少。 然而，毫米波频率的频谱是非常丰富的。 简单来说，更多的频谱意味着每个设备具有更大的容量和更高的带宽。 NI 一直与诺基亚网络公司的研究人员密切合作，致力于开发 73 GHz 移动接入网络的原型。 通过该合作，诺基亚和 NI 在去年 4 月的布鲁克林 5G 峰会上公开展示了全球第一个 10 Gbps 移动接入链路。 布鲁克林 5G 峰会的展示及其他突破意味着能够提供稳健 IoT 基础设施的 5G 网络可能并不那么遥远。■