

远程射频前端及其向4G网络的发展

Christian F. Lanzani^{*}, Georgios Kardaras[†], Deepak Boppana[‡]

摘要

在全面发展的4G网络中实施新基站时，移动运营商采用支持远程射频前端(RRH)功能的分布式基站后，能够大幅度解决成本、性能和效率问题。符合GSM、HSPA、LTE和WiMAX标准的多模射频设备以及高级可配置软件是实现灵活、高效射频网络的关键。本白皮书介绍RRH的主要市场和技术需求，以及Radiocomps最先进的WiMAX/LTE、RRH和知识产权(IP)内核解决方案结合Altera最新的FPGA技术，怎样为移动网络设计紧凑、环保的全功能应用方案。

关键词：LTE，WiMAX，远程射频前端，OBSAI，CPRI，CFR，DPD，DSP，SRC，Radiocomp ApS，Altera，StratixIV GX，ArriaII GX，DTU，FPGA。

引言

在建设能够有效处理高速数据流量迅速增长的网络时，无线和移动网络运营商面临不断出现的新挑战。终端用户的移动性以及越来越多的多媒体内容要求端到端网络具有较强的适应性，支持新业务，满足对提高带宽和统一互联网接入的需求。此外，网络运营商还需要考虑以成本最低的方式向4G网络发展。无线和移动技术标准的不断发展满足了越来越高的带宽要求，提高了峰值速率和蜂窝吞吐量。支持这些进展的最新标准包括HSPA+、WiMAX和LTE等。

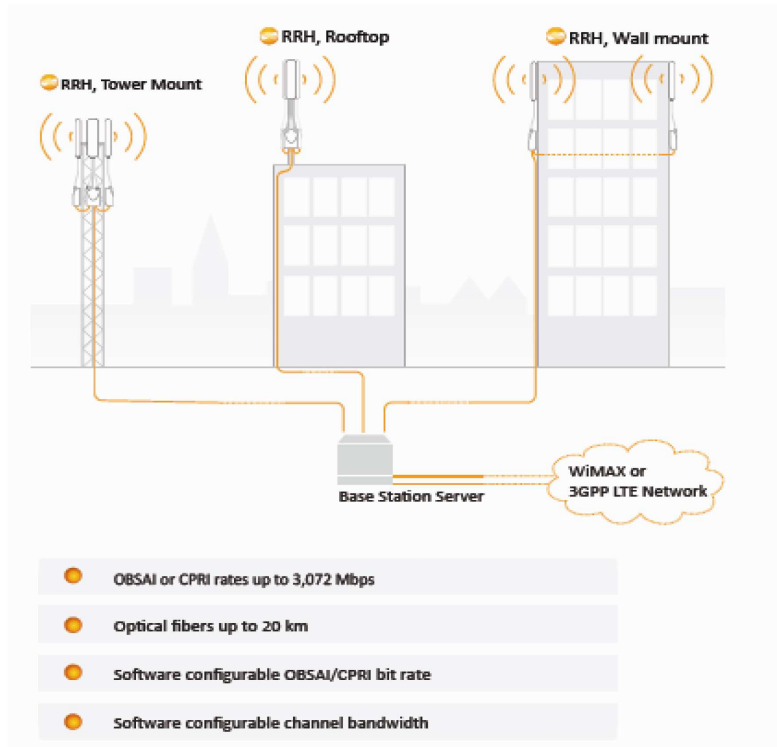
基于这些标准进行网络更新时，需要综合考虑有限的新频谱资源，利用现有的频谱，确保能够支持所有需要的标准。在通常会持续多年的过渡阶段，所有这些必须同时进行。随着标准的发展，同时出现了分布式开放基站体系结构这一概念(图1)，它可以为射频接入管理提供灵活、低成本和可更新的模块化环境。例如，开放基站体系结构计划(OBSAI)和公共射频接口(CPRI)标准引入了标准化接口，将基站服务器和基站远程射频前端(RRH)分离，通过光纤把它们连接起来。

^{*}电子邮件：cla@radiocomp.com，www.radiocomp.com

[†]电子邮件：gka@radiocomp.com，www.radiocomp.com

[‡]电子邮件：dboppana@altera.com，www.altera.com

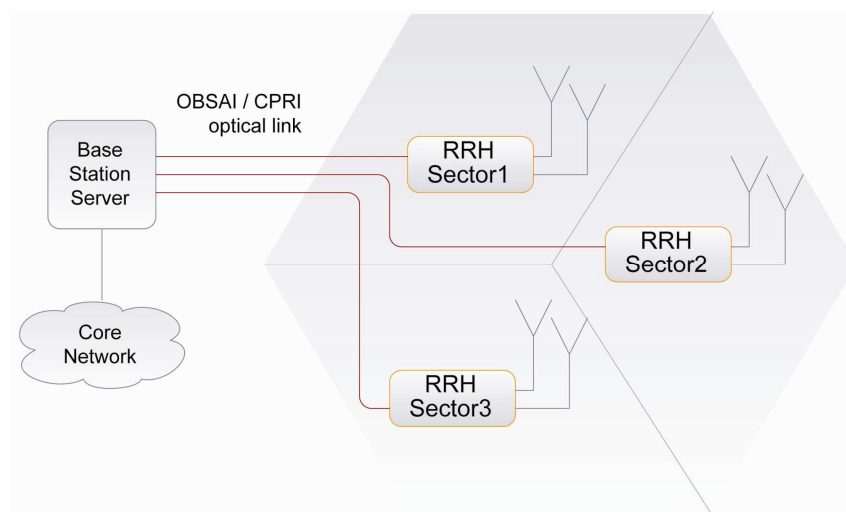
图1：分布式无线基站系统



II - RRH系统要求

RRH概念构成了基站最新体系结构的基本部分。不断降低CAPEX和OPEX的需求促进了RRH系统的实施，它可以实现高能效环保基站。图2所示的体系结构中，2G/3G/4G基站通过光纤连接至RRH。可以采用CPRI或者OBSAI来承载RF数据，传递给RRH，覆盖三个小区单元。RRH采用了大量的数字接口和处理功能，如图3所示。它还包括高性能、高效的频率捷变模拟功能，所有这些功能都在体积很小的轻型(9.7Kg)设备中实现。表1列出了使用Radiocomps等RRH的关键优势。

图2：使用RRH的三区无线呼叫



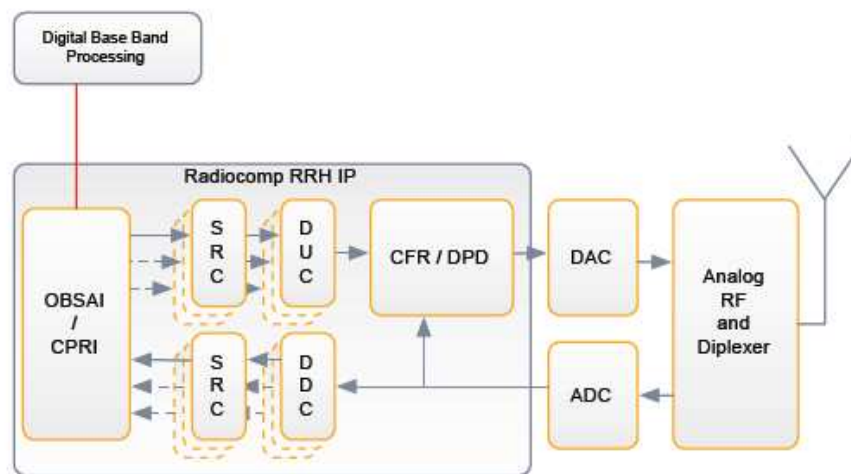
- 体积更小。更容易安装，减小了风载，降低了场地租费，优化了覆盖率。
- 灵活的软件。远程更新和频率捷变工作，更容易扩大容量。
- 性能更好。功效更高，满足了频谱辐射要求，高灵敏度，大容量。
- 多模工作。同时支持多标准工作，降低了设备要求。
- 灵活的多载波功能。频率捷变，更容易扩大容量。

基于OFDMA标准的WiMAX和LTE包括时分复用(TDD)和频分复用(FDD)工作模式20MHz宽带射频通道。多输入/多输出(MIMO)天线技术进一步提高了吞吐量。2x2和4x4MIMO系统都是能够满足射频模块小型化要求的可行方案。高效射频模块结合先进的内部小尺寸电缆可以实现这些方案。

III – 面向RRH的多速率DSP应用

业界迫切需要在同一射频平台上使用纯软件重新配置功能，使每个通道能够支持多频段射频，例如，WiMAX 5、7、8.75、10和20MHz。而且，还需要以多载波系统方式来同时支持多个通道。为此，设计人员必须在每一速率使用不同的时钟域以及通过灵活的软件使用单时钟域之间做出选择。单时钟域方法更可行，它采用了高级数字信号处理(DSP)技术将每一速率转换为统一的系统速率。这些方法通称为采样率转换(SRC)，结合多通道数字上变频(DUC)和数字下变频(DDC)技术，可以在同一应用中，在数模转换器(DAC)或者模数转换器(ADC)相同的时钟域中处理多种采样率。该方法同时支持单时钟和多时钟，因此，非常灵活。例如，LTE和WiMAX标准定义了瞬时带宽高达20MHz的多个通道。在支持OFDMA/WCDMA调制方案的多模射频设备中，灵活的SRC非常有利于实现软件无线电。Radiocomps SRC知识产权(IP)测试结果表明，对于11.2 MHz至122.88MHz采样率的WiMAX信号，所增加的采样噪声低于74dB，从而提高了系统性能以及软件的灵活性。

图3：RRH系统体系结构



IV - CFR峰值因子抑制

OFDM信号具有较大的峰值平均值包络功率比，导致信号通过功率放大器(PA)等非线性器件时会出现明显的失真。峰值因子抑制(CFR)方法的目的是降低OFDM信号的峰值，使其降到合适的电平，功率放大器能够工作在最佳状态。由于信号动态范围减小，因此，结合数字预失真(DPD)后，可以工作在较高的平均功率下，更接近功率放大器的饱和点。大家熟悉的高效CFR技术是峰值窗口法，通过滤波钳位超过阈值的功率峰值，并进行平滑。滤波可以降低由普通钳位尖峰信号边沿导致的带外频率分量。峰值窗口方法可以提高几个dB，互补累积分布函数(CCDF)有3到7dB的提高。需要考虑的主要因素是窗口和滤波器的选择，以及输出功率钳位阈值等。但是，要注意，钳位会不可避免的导致信号失真。因此，需要综合考虑可承受的误差向量幅度(EVM)电平和通过CFR提高的线性增益。WiMAX的EVM要求只有2.8%，而LTE对于64QAM调制的要求是8%。峰值窗口工作在时域，使用的逻辑资源比频域分析方法要少。频域分析方法通过成本较高的快速傅立叶变换(FFT)和快速傅立叶反变换IFFT

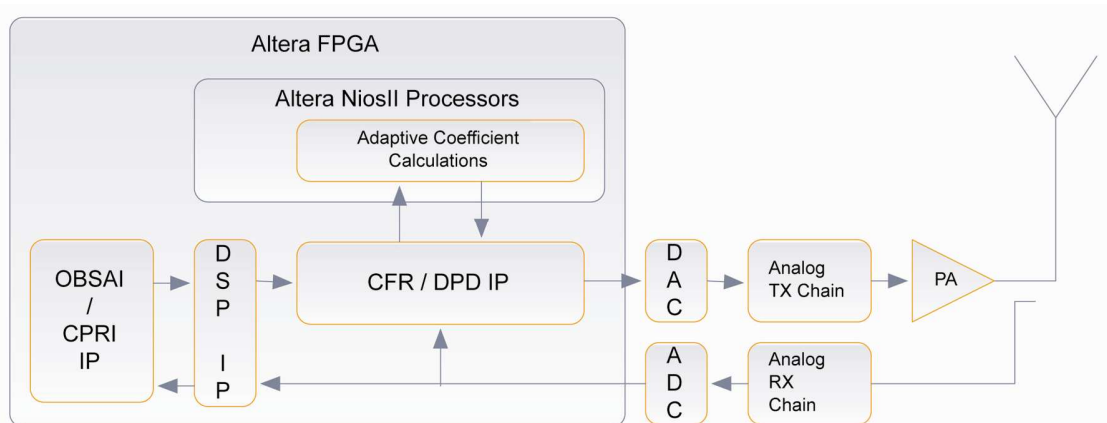
(IFFT)函数直接在频域进行处理。与频域分析相比，峰值窗口方法使用的硬件信号处理资源只是其十分之一。CFR方法通常结合DPD模块提高RF功率放大器的性能。CFR模块首先限制峰值，防止较大的峰值信号驱动功率放大器进入RF功率放大器的非线性工作区。而DPD模块扩展了线性工作区(下一节进行详细分析)，RF功率放大器靠近饱和电平工作。

V - DPD数字预失真

校准发射器功率放大器等非线性器件是非常困难的工作。采用DPD，功率放大器工作在效率最高的区域，从而提高了传输功率电平。针对基带和RF/模拟域之间不同的传输链路开发了各种预失真技术，它们都有一定的优缺点。最有效、最常用的方法是DPD，主要是因为其灵活性，较少的硬件设计以及软件可配置能力。高效的DPD补偿了发射器功率放大器的非线性，而且还考虑了晶体管存储效应和系统温度的变化。常用的DPD方法可以分成前馈和反馈两种。在前馈方法中，计算静态查找表(LUT)，并存储在FPGA存储器中。在系统工作的任何阶段它都不会更新。由于缺少反馈通路，该方法虽然简单，但是不够灵活。有了反馈通路之后，可以更新LUT，自适应算法监视并调整查找表输入。

如图4所示，RF预失真方法需要改动硬件，增加RF组件，与之相比，反馈方法比较适合开发体积较小的模块。而且，由于大部分SDR中都有反馈通路RF-ADC FPGA，因此，该方法更适合以前开发的系统。最后，这些模块最大的优点是其适应能力以及可以远程进行配置和更新。对于反馈DPD，典型的选择是使用表格，多项式方法，以及混合方法。DPD校正了功率放大器的非线性，非线性会导致互调失真，出现新的频率分量。DPD利用通常禁止使用的大功率非线性区，扩展了线性区，提高了功率放大器晶体管的工作效率。建议采用混合方法，它同时使用了多项式和LUT。在实际中，由于存储器效应，多项式近似非常适合处理宽带功率放大器。多项式方法的工作效率受其阶次限制。提高多项式阶次会导致占用更多的硬件资源，设计更复杂。为提高分辨率，LUT规模会增大，自适应时间随之缩短。LUT方法一般用于非线性较小的窄带存储器解决方案中。但是，可以利用LUT的限制范围，特别是在要求线性度非常好的大功率输出区。对于非线性传输函数的某些分量，可以采用高阶多项式。所有方法的优点在于结合了LUT，由于没有阶次的限制，多项式线性度达到其上限。因此，以最少的存储器和乘法器硬件资源实现了很高的线性度。这些方法用于校正基带输入IQ采样的振幅和相位。Radiocomps DPD解决方案利用多项式和LUT方法，提高了反馈效率，结果如图5所示，结合Radiocomps CFR IP，优化了逻辑资源利用率。

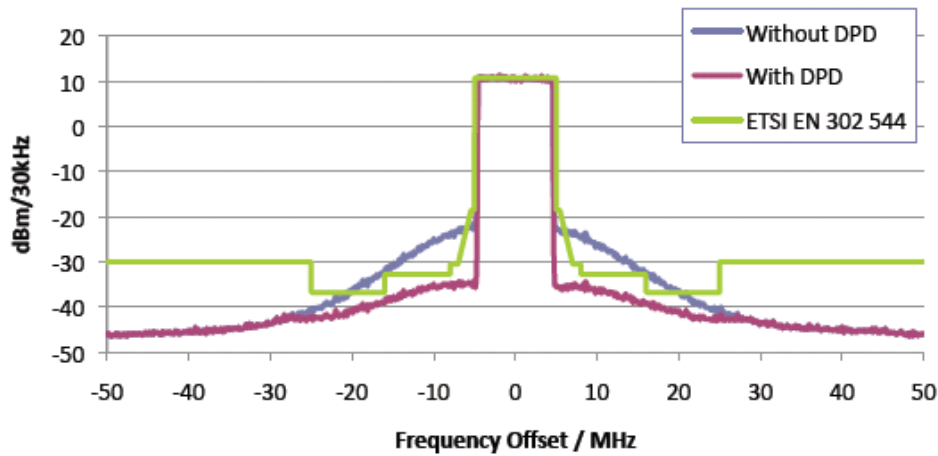
图4：基于FPGA的组合CFR/DPD体系结构



VI - 高速ADC/DAC

当通道带宽提高到20MHz时，需要较高的采样率。此外，还需要五阶谐波来处理DPD。采样率提高之后，加大了实现ADC和DAC以及逻辑器件之间的高速数字线安全连接的难度。不好的布板会导致数字开关噪声反馈到转换级，系统总性能出现劣化。JEDEC204标准等最新ADC和DAC方案定义了ADC和FPGA或者处理器之间的高速单对链路，使用了比特编码、同步和校准技术来提高性能。在多通道射频卡设计中，使用这类JEDEC器件减少了并行数字通路的数量，从而简化了PCB布板，提高了可靠性，更迅速地将产品推向市场。

图5：Radiocomp的DPD测量结果，采用了WiMAX 10MHz OFDMA信号。

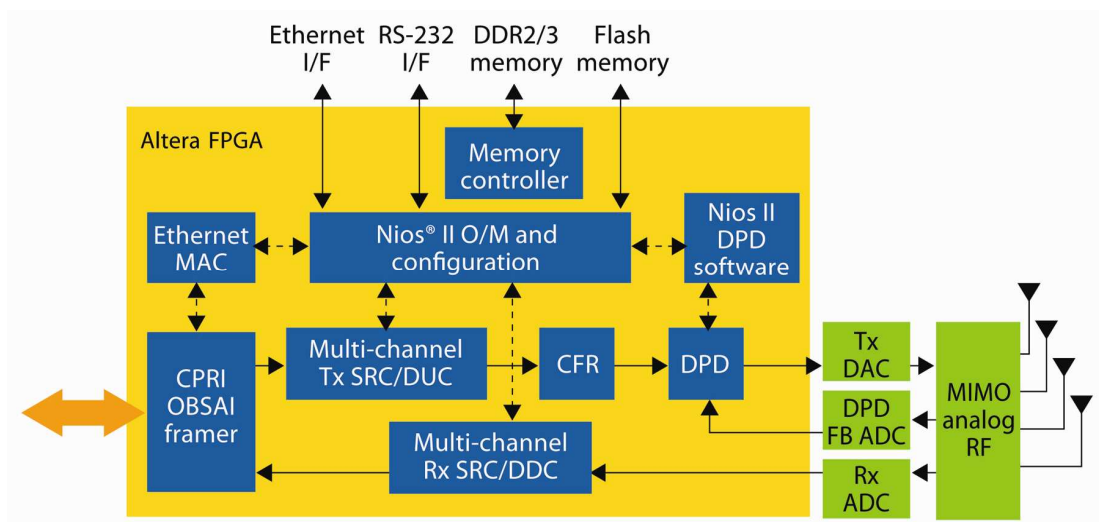


VII – 基于FPGA的RF/RRH SoC

Alteras的全系列40nm收发器FPGA和ASIC结合使用方便的软件工具和IP，为RRH应用提供了多种芯片系统(SoC)选择。借助带宽高达20MHz的通道、MIMO天线配置以及多模支持，在RRH中实现信号处理功能可以采用高度集成、灵活高效的硬件平台。图6介绍了RRH所有数字功能是怎样集成到一片Altera 40nm FPGA中的，它实现了低成本、低功耗紧凑RRH解决方案。Arria II GX FPGA 具有200K逻辑单元(LE)、700个18x18乘法器以及10Mbits嵌入式存储器，为需要3.75Gbps收发器支持的RRH提供了低成本、低功耗SoC选择。例如，可以在单片Arria II GX FPGA中实现单区、2x2 MIMO 配置，具有CPRI/OBSAI、DUC/DDC、CFR和DPD等功能。

对于支持4x4 MIMO方案或者需要速率大于3.75Gbps收发器支持的系统，Altera Stratix IV FPGA提供了高性能SoC实现平台。Stratix IV FPGA具有530K LE, 1200多个18x18乘法器和20Mbits 嵌入式RAM，性能达到了前所未有的水平。Stratix IV FPGA的收发器速率高达8.5Gbps，提供了不会过时的平台，可支持6.144Gbps以上的CPRI/OBSAI速率。

图6：采用Alteras 40-nm Arria II GX和Stratix IV GX FPGA实现的RF SoC



RRH设计有非常严格的体积和重量限制，如果没有强制空气散热会导致很难满足功耗设计要求。借助可选内核电压以及可编程功耗技术等独特的低功耗特性，Stratix IV GXFPGA解决了功耗设计难题。高密度Stratix IV GX FPGA的集成度是前所未有的，它支持单片解决方案实现多路天线系统，通过无风险移植到HardCopy IV GX ASIC，进一步降低了成本、体积和功耗。

Altera还为LTE、WiMAX、WCDMA、TDSCDMA等多种标准提供各种IP和参考设计。CPRI和OBSAI等接口IP结合DUC/DDC和CFR优化设计，提高了效能，加速了产品及时面市。Altera的OFDM参考设计CFR是高性能解决方案，将峰值平均值功率比(PAPR)降低了5dB，同时满足了WiMAX/LTE的EVM限制要求。Altera高级模块库进一步增强了DSPBuilder软件工具，提供了独特的综合技术，在流水线寄存器传送级(RTL)优化了高级未寄存网表，适合目标器件使用，满足了所需的时钟速率要求。高级模块库设计方法的优点包括：

- Simulink 的自动时序驱动FPGA实现方案
- 按键式流程，开发多通道、多路天线DUC/DDC设计。
- 系统级约束驱动设计方法，提高了效能。
- 快速多通道设计实现
- 时分复用(TDM)数据通路自动控制平面
- 高效的流水线多通道数据通路

Altera Nios II嵌入式处理器可以用于实现DPD自适应算法，不需要采用外部DSP模块，从而减少了材料(BOM)和电路板面积。通过在Nios II处理器指令集中加入定制指令，加速对时间要求较高的软件算法。Nios II处理器还可以通过以太网或者RS-232接口处理所有的初始化、配置、状态监视、操作和维护功能。

VIII – 结论

本白皮书介绍了分布式无线基站系统的体系结构及其优点，以及采用了DSP技术的高级RRH内部体系结构。体系结构利用了最新的Radiocomp和Altera IP内核，结合Altera最新一代40-nm FPGA，这一高效组合显著提高了RRH解决方案和应用的灵活性，减小了产品体积，其性能和效率远远高于其他解决方案。

作者简介

Christian Lanzani 是Radiocomp ApS的创始人之一，也是资深产品经理。Christian以前曾在射频系统A/S公司从事UMTS远程射频前端开发。Christian参加了丹麦技术大学(DTU)光子和网络系的工业PhD项目。他的专业是4G网络软件无线电系统以及OBSAI/CPRI标准数字接口技术和高级射频系统体系结构。他获得了意大利帕维亚大学的电子工程学士学位，以及丹麦技术大学的计算机系统工程科学硕士学位。

*Georgios Kardaras*是Radiocomp ApS公司的首席软件工程师。Georgios参加了丹麦技术大学(DTU)光子和网络系的工业PhD项目。他的专业是数字信号处理设计，特别是远程射频前端产品CFR/DPD模块。他获得了希腊克利特技术大学的电子工程学士学位，以及丹麦技术大学的电信科学硕士学位。

Deepak Boppana 是Altera公司的战略营销经理，负责无线基础设施市场。Deepak于2003年6月加入Altera，在无线通信系统设计和实现方面有着丰富的经验。他在研究类刊物、国际会议以及技术杂志上发表了多篇论文。Deepak获得了奥斯马尼亚大学工程学院的电子工程学士学位，以及维拉诺瓦大学的电子工程硕士学位。

RADIOCOMP简介

丹麦的Radiocomp公司是LTE和WiMAX移动网络远程射频前端、光接口以及高级信号处理子系统的业界领先供应商。请访问www.radiocomp.com，了解更详细的信息。

ALTERA简介

Altera的可编程解决方案帮助系统和半导体公司快速高效地实现创新，突出产品优势，赢得市场竞争。请访问www.altera.com或www.altera.com.cn，了解更详细的信息。