

C-RAN

无线接入网绿色演进

白皮书

版本号 3.0 (2013 年 12 月)



中国移动通信
CHINA MOBILE

中国移动通信研究院

目录

C-RAN	i
无线接入网绿色演进	i
摘要	1
1 概要	5
1.1 背景	5
1.2 C-RAN 愿景	5
1.3 白皮书目标	6
1.4 白皮书状态	6
2 无线接入网面临的挑战	7
2.1 大量基站导致高额能耗	7
2.2 网络的 CAPEX/OPEX 逐年增高	7
2.3 LTE 网络中的干扰问题	9
2.3 低成本高容量的无线接入网需求	12
2.4 潮汐效应导致基站利用率低下	12
2.5 不断增长的互联网业务对移动核心网压力巨大	13
3 C-RAN 网络架构	15
3.1 C-RAN 的基本概念	15
3.2 C-RAN 构架的优势	17
3.3 C-RAN 面临的技术挑战	18
4 C-RAN 的主要部署场景	20
4.1 TD-SCDMA 网络建设中的 C-RAN 场景	20
4.1.1 场景 1: 补盲补热拉远微 RRU 提升网络容量和覆盖质量	20
4.1.2 场景 2: 潮汐效应区域	21
4.1.3 场景 3: 快速或大量越区切换现象区域	21
4.2 TD-LTE 网络建设中的 C-RAN 场景	22
4.2.1 场景 1: HetNet 场景下的 C-RAN 基带集中处理部署	22
4.2.2 场景 2: 结合综合业务接入区建设的 C-RAN 部署	23
4.2.3 HetNet 场景与综合业务接入区的结合	23
5 技术趋势和可行性分析	25
5.1 基带无线信号传输	25
5.1.1 CPRI/Ir/OBRI 链路的 I/Q 数据压缩技术	26
5.1.2 CPRI/Ir/OBRI 链路的传输时延及抖动	27
5.1.3 光传输技术的进步和成本的降低	27

5.1.4 BBU-RRH 光纤环网保护	28
5.1.5 当前可行的部署方案	28
5.1.6 技术挑战	30
5.1.7 最新技术进展	30
5.2 动态无线资源分配和协作式无线处理	31
5.3 集中式基带池及大规模基带互联	33
5.4 基于开放平台和软件无线电的基站虚拟化	34
5.5 分布式服务网络	37
6 最新进展	38
6.1 C-RAN 外场试验	38
6.1.1 TD-SCDMA 和 GSM 的现网部署测试	38
6.1.2 TD-LTE 的现网部署试验	43
6.2 C-RAN 架构下的协作化处理	44
6.3 C-RAN 基带池设备与原型机开发	47
6.3.1 大规模基带池设备研发	47
6.3.2 基于通用 IT 平台的纯软基带原型机	48
6.3.3 基于硬件加速器的基带池原型机	51
6.4 C-RAN 虚拟化技术研究	54
6.5 C-RAN 与业务的结合	58
6.5.1 基于通用处理平台基带池的边缘业务架构	58
6.5.2 目前的工作进展	59
7 演进路线	62
8 C-RAN 国际化动向	64
9 总结	65
致谢	66
英文缩写和定义	67
参考文献	70

摘要

面对移动互联网业务的冲击，传统移动通信网络正处于进退两难的尴尬境地：一方面，为了应对爆发式增长的数据流量，需要加大网络基础设施的建设，这耗费了大量的投资成本；另一方面，网络的扩容，数据流量的增长并没有给运营商带来成比例的收入回报，实际收入增长缓慢。为了保持持续盈利和长期增长，移动运营商必须寻找低成本为用户提供无线业务的方法。

LTE 网络在实际部署时，若采用传统的网络架构与部署方式，将会遇到极大的困难与挑战。这是因为：首先，由于工作频段高，LTE 网络将需要更多的站址资源，这并不容易。其次，LTE 网络相较于 GSM、TD-SCDMA 网络，干扰问题更突出，更严重；尽管业界有不少有效的干扰抵消的解决方案，但由于算法复杂度高，数据带宽要求大，在传统的接入网架构下很难实现；此外，传统的基站都是按“最大处理能力”部署，并没有考虑网络业务的动态变化特性，即潮汐效应，导致设备利用率低下，并且造成电力资源的大量浪费。

云接入网 C-RAN 是中国移动研究院在 2009 年提出的未来无线接入网形态，旨在通过设计低成本、高容量、高运营效率的无线接入网架构，帮助运营商应对移动互联网带来的种种挑战。C-RAN 的基本思想是将所有、或部分的基带处理资源进行集中，形成一个基带资源池并对其进行统一管理 with 动态分配，在提升资源利用率、降低能耗的同时，还通过对协作化技术的有效支持提升网络性能。

与传统无线网络架构相比，C-RAN 网络具有如下几个特征：

- **BBU 的集中化。**传统网络中，每一个（或几个）基站均需要有独立机房。在 C-RAN 中，一定数量（几十、上百甚至上千）的 BBU 被集中放置在一个大的中心机房，这对降低站址选取难度、减少机房数量、共享配套设备（如空调）等具有显而易见的优势。
- **基带池内的 BBU 协作化。**通过引入实时高速的内部互联架构，基带池内的不同 BBU 之间可实现快速高效地交换调度信息、信道信息和用户数据，能够更好地实现上行和下行的多点协作传输技术，从而减小了系统干扰并提高系统容量。
- **无线处理资源的“云”化。**在 C-RAN 里，基带计算资源不再单独属于某个 BBU，而是属于整个资源池。相应地，资源分配也不再像传统网络那样是在单独的基站内部进行，而是在“池”的层次上进行。
- **基站的软化。**利用基于统一、开放平台的软件无线电实现基带处理功能，使得 BBU 可以同时支持多标准空口协议、更方便地升级无线信号处理算法、更容易地提升硬件处理能力从而扩充系统容量，另外，通过动态、灵活的分配基带处理资源，基站的处理能力灵活变化，从而实现基站的“软”化。

C-RAN 网络架构的主要优势包括：

- **降低能耗。**集中化的部署方式大量节约机房资源，并且减少了配套设备特别是空调的能耗；其次，处理资源的云化大大提高了资源利用率，相应地，能耗也随之减少。
- **TCO 节约。**机房资源、配套设备的减少，大大降低了 CAPEX；而 OPEX 的节省主要体现在能耗的降低上。
- **降低干扰，提高频谱效率，提高网络容量。**通过内部高速低时延的互联网络，提高基带处理节点的通信能力，有利于复杂干扰抵消算法的实现，从而降低干扰，提高用户速率和系统容量。

- 提高资源利用率。这主要是基带池虚拟化带来的直接好处。
- 有利于实现业务边缘化的部署。在 C-RAN 的集中基带池的边缘部署业务，发挥边缘计算和存储能力，这将对缓解网络拥塞和降低时延，为电信运营商提供优于其他 OTT(Over The Top)的差异化服务发挥极大作用。


C-RAN 网络的演进是一个长期的过程，为了实现终极的 C-RAN 愿景，需要攻克三大关键技术挑战，包括：

- 低成本、高容量的前端传输技术。有效承载 CPRI 速率的同时，要求能大幅减少 TD-LTE C-RAN 集中化所带来的对光纤资源的消耗。
- 灵活可扩展的 BBU 基带池架构。应可有效支持几十乃至上千载波，且需要充分考虑对关键技术如 CoMP，虚拟机迁移等的支持。
- 通用平台以及虚拟化技术的引入、优化及应用。C-RAN 在某种意义上和数据中心有一定相似性，而虚拟化技术是数据中心实现云计算的核心技术之一，是实现资源池云化的有效手段。C-RAN 网络里应用虚拟化技术的关键是要解决由无线信号实时性处理需求而带来的挑战。

在过去几年里，中国移动对 C-RAN 的探索取得了长足的进展。我们不仅在 GSM 和 TD-SCDMA 网络里较大规模地测试了 C-RAN 集中化部署方式，验证了 C-RAN 在网络建设里对降低成本，降低选址难度，加速网络建设等方面的优势，同时在 TD-LTE C-RAN 网络中对 CPRI 压缩和单芯双向技术进行了充分测试。结果表明：这两项技术已经成熟，它们的应用可节约高达 3 倍的光纤资源。在此基础上，我们也正在积极的推动和验证基于 WDM 的 C-RAN 前端传输技术。目前该技术已经足够成熟，但成本还较高，不过我们相信，其应用将可进一步更大幅度的节省 C-RAN 对光纤资源的消耗，是非常有效的前端传输解决方案；另一方面，从长期角度看，如果 WDM-PON 技术能有效、快速发展，它也将成为一个有效的候选方案。

在大规模基带池的研发方面，我们首先联合厂家共同开发了可支持上千载波的 TD-SCDMA C-RAN 系统，同时开发了一套基于通用处理平台的三模原型机。该 3 模原型机采用纯软件方式实现并验证了 GSM、TD-SCDMA 和 TD-LTE 基带处理，充分证明了采用通用平台进行无线信号处理的可行性。于此同时，测试表明，基于通用平台的 C-RAN 纯软实现具有较低的性能功耗比，支持一个 TD-LTE 载波需要消耗较多的 CPU 核。基于此，我们认为：采用硬件加速器不可避免。在这一思路指导下，我们进一步研发了两套 C-RAN 的原型机。一套采用商用协议栈，在确保无线性能的基础上，证明了引入物理层加速器后通用处理平台的每载波功耗可接近专用平台。另一套原型机则展示了边缘计算能力对运营商在网络运营模式创新、新型业务引入、更好的网络管理与控制等方面的优势。我们还将未来进一步验证载波实时迁移能力，提高系统的整体可靠性。

C-RAN 的最终目标是实现基带处理资源池的动态共享与分配，即：云化。为此，一种有效的实现途径是采用虚拟化技术。在此白皮书中，我们提出了一个实现 C-RAN 虚拟化的系统框架模型，分析表明：虚拟机的颗粒度设计，Hypervisor 的选择与优化，I/O 虚拟化等是实现 C-RAN 云化的主要难题。



C-RAN 的实现依然面临众多挑战。因此，我们诚挚地邀请所有移动运营商、电信设备厂商、传统 IT 系统厂商、以及关注未来 RAN 演进的产业界和学术研究机构积极参与到 C-RAN 关键技术的研究中，共同推动 C-RAN 愿景早日成为现实。



1 概要

1.1 背景

如今，移动运营商正面临着激烈的竞争环境，单用户的 ARPU 值增长缓慢，甚至在慢慢减少，严重地削弱了移动运营商的盈利能力。与此同时，移动互联网业务的流量迅速上升，用于建设、运营、升级无线接入网的支出不断增加，而收入却增加缓慢。为了保持持续盈利和长期增长，移动运营商必须寻找低成本地为用户提供无线业务的方法。

无线接入网(RAN)是移动运营商赖以生存的重要资产，可以向用户提供 7x24 小时不间断、高质量的数据服务。传统的无线接入网具有以下特点：第一，每个基站连接若干固定数量的扇区天线，并覆盖小片区域，每个基站只能处理本小区收发信号；第二，系统的容量是干扰受限，各个基站独立工作已经很难增加频谱效率；第三，基站通常都是基于专有平台开发的“垂直解决方案”。这些特点带来了以下挑战：数量巨大的基站意味着高额的建设投资、站址配套、站址租赁以及维护费用，建设更多的基站意味着更多的资本开支和运营开支。此外，现有基站的实际利用率仍然很低，网络的平均负载一般来说远远低于忙时负载，而不同的基站之间不能共享处理能力，也很难提高频谱效率。最后，专有的平台意味着移动运营商需要维护多个不兼容的平台，在扩容或者升级的时候也需要更高的成本。为了满足这些不断增长的移动数据业务需求，移动运营商需要不断升级网络，同时运营多标准的网络，包括：GSM, TD-SCDMA 或 WCDMA，以及 LTE 等，而专有平台使得运营商难以在网络升级上具有最大的灵活性。

总而言之，传统的无线接入网高额的资本支出与运维开支使得移动运营商在移动互联网市场上逐渐失去竞争力。因此，无线接入网必须重新考虑新的网络构架以适应新的环境，移动运营商所面临的问题是：找到一条可以建立适合移动互联网的高性能低成本的绿色无线接入网方法。在下面的章节，我们将探讨这个问题的解决方案。


1.2 C-RAN 愿景

未来的无线接入网必须能够为用户提供廉价的无线宽带因特网接入。它应该满足以下要求：

- 降低能源消耗，减少资本开支和运营开支
- 提高频谱效率，增加用户带宽
- 开放平台，支持多标准和平滑升级
- 对终端用户更友好的因特网服务

我们相信，基于集中式基带处理池、由远端无线射频单元和天线组成的协作式无线网络和基于开放平台的实时云型基础设施的无线接入网（C-RAN）是达到上述目标的答案。集中式基带处理可以大大减少覆盖同样区域的基站的数量；面向协作的无线远端模块和天线可以提高系统频谱效率；基于开放平台的实时云型基础设施和基站虚拟化技术可以降低成本，共享处理资源，减少能源消耗，提高基础设施利用率。这些特点能够很好的解决移动运营商所面临的上述挑战，并满足营收和未来移动互联网业务同步发展要求。

C-RAN 的目标不是取代现有的 3G/4G 标准，它是一个从长期角度出发，为运营商提供一个低成本高性能的绿色网络构架，在未来可以让用户以很低的价格就可以享受丰富的无线宽带业务。



实际环境千差万别，部署的无线网络存在各种形态，比如当前网络中广泛应用的宏蜂窝基站、微蜂窝基站、微微蜂窝基站、室内分布系统、直放站，以及新出现的中继站等。不同的基站类型有各自的优点和缺点，适应不同的部署条件。**C-RAN** 的目标是适应主流无线网络的部署需求，包括宏蜂窝基站、微蜂窝基站、微微蜂窝基站以及室内分布系统。同时，其它一些有益的基站类型也可作为 **C-RAN** 部署的补充。

1.3 白皮书目标

本白皮书展示了中国移动对于 **C-RAN** 的愿景，并提出了 **C-RAN** 构架的主要技术挑战和研究框架。我们诚邀工业界和学术界的研究机构积极参与 **C-RAN** 关键技术的研究，共同推动 **C-RAN** 的标准化及产业化进程。

1.4 白皮书状态

本白皮书版本 3.0 是基于 2011 年 10 月发布的 **C-RAN** 白皮书 2.5 修订后的版本。虽然还不够全面，并可能存在某些不一致的地方，希望这一版本的发布有益于业界。随着时间推移，新的研究内容可能会被加入到更新的版本中。欢迎提出修改意见和建议。

2 无线接入网面临的挑战

2.1 大量基站导致高额能耗

为了满足不断增长的无线宽带业务需求，移动运营商不断增加空中接口带宽和增加基站数量，随之而来的无线接入网络的能源消耗问题也变得日益严重。以中国移动为例，在 2007-2011 年的 5 年期间，为了提供更好的网络覆盖和更大的网络容量，中国移动的基站数量几乎增加了一倍。同时，中国移动的总耗电也增长了接近一倍。而在 2012 年，中国移动的基站总数高达 107 万个，整个移动网络的能耗接近 150 亿千瓦时。高能耗意味着高运维成本以及巨大的环境冲击，而这些因素在现有的社会形势下变得越来越难以接受，节能减排已经迫在眉睫。图 2-1 给出了中国移动的全部能耗构成，其中主要能耗的自于无线接入网的基站站点。而基站站点中的耗电只有一半来自于主设备，其它来自配套设备，主要是空调耗电。显然，运营商节能减排的直接途径是减少基站数量，但简单的减少基站数量必将导致网络的覆盖变差、网络容量减少等问题。因此，运营商需要谋求在不减少网络覆盖和容量的条件下来降低能耗。目前，有一些补充型的技术可以减少基站的能耗。比如：软件节电方案，通过载频智能关断技术，动态控制电源，根据忙闲和话务量高低关闭闲置载频；采用绿色能源，利用当地自然条件，采用太阳能、风能等可再生能源为基站供电；采用节能空调技术，充分结合当地气候和环境特点，降低空调设备的能耗。但是，这些方法都是降低基站能耗的辅助手段，而并没有解决基站数量增加带来的能耗增加的根本问题。长期来看，运营商需要从网络架构设计就开始考虑低能耗准则，通过提高主设备利用率以及降低配套设备或机房导致的能耗，以从根本上满足无线接入网的低能耗要求。

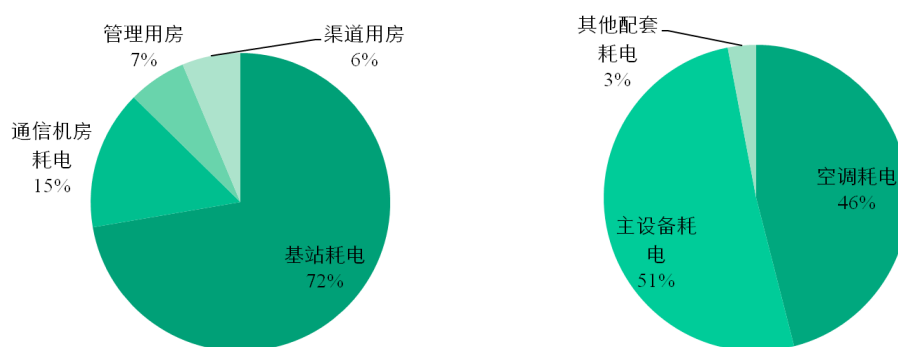


图 2-1: 基站能耗分析

2.2 网络的 CAPEX/OPEX 逐年增高

近年来，随着移动用户智能终端以及数据卡被普遍使用，世界各地的移动运营商必须不断地对网络扩容，以满足终端用户的移动宽带需求。然而，随着电信市场竞争日趋激烈，市场逐渐走向饱和，导致语音业务“每用户平均收入”（ARPU）的增长缓慢甚至逐年下降，加上技术发展日新月异加快了网络升级，进一步削弱了运营商的盈利能力。这些因素使得运营商需要比以往更加关注网络的整体拥有成本（TCO）以保证持续的竞争力。

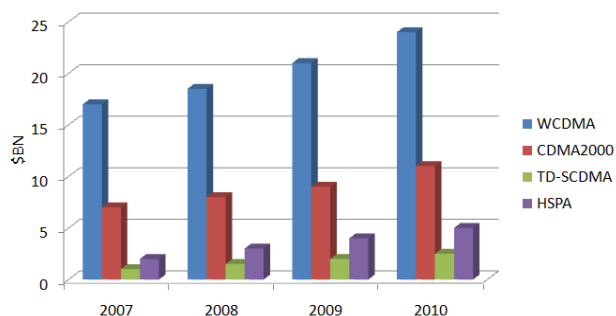


图 2-2: 3G 网络部署和演进带来的 CAPEX 增加

● TCO 分析

运营商网络的整体拥有成本主要包括资本支出(CAPEX)以及运维支出(OPEX)，其中 CAPEX 主要产生于网络建设阶段，而 OPEX 主要产生于网络运营维护阶段。一般而言，移动运营商网络的 CAPEX 中 80%用于无线接入网的建设，而无线接入网建设费用主要用于无线蜂窝站点的建设。如图 2-2 所示，2007 年至 2012 年，全球各类 3G 网络的 CAPEX 支出逐年增加。在许多国家，由于 3G/4G 的部署频点（2GHz）高于已有的 GSM 网络（900MHz），而高频无线信号的衰减更快，这意味着为了保持与 2G 网络同样的覆盖范围运营商需要建造多倍数的 3G/4G 蜂窝站点。

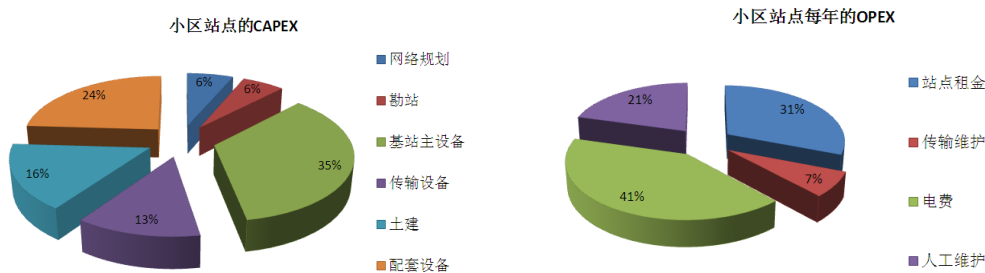


图 2-3: 基站 CAPEX 和 OPEX 分析

因小区建站而引起的 CAPEX 主要包括设备购买以及站址建设相关的工程费用，其中设备购买包括基站主设备以及外围配套设备（电源、空调等），而站址建设相关的工程费用包括网络规划、勘站、土建、传输等。如图 2-3 所示，购买基站主设备只占据 CAPEX 的 35%，而勘站、土建以及配套设备所导致的资本支出接近 50%。这意味着超过一半的 CAPEX 没有被用于产生直接效益的基站主设备单元。因此，对于运营商而言，降低接入网的 CAPEX 不仅局限于基站主设备，更多需要关注在如何有效地降低基站配套设备以及站点安装、部署的成本上面。

在网络整体拥有成本（TCO）中，网络运维阶段的 OPEX 同样占据了重要比例。OPEX 主要包括站点租金、传输带宽租金、人工维护以及电力消耗等。假设基站主设备的折旧期通常为 7 年，如图 2-4 所示，OPEX 占到 TCO 的 60%以上。因而，运营商已经意识到 OPEX 的成本控制更加重要。直观而言，降低 TCO 最简单的途径就是减少站点的数量，这不仅可以减少主设备的建设成本也可以降低设备安装以及租金等各类费用。更少的站点将极大的降低运营商 CAPEX 和 OPEX，但同时也会导致网络覆盖能力的下降以及较差的用户体验。因此，我们需要首先保证网络能够提供高质量的服务，在此前提下去关注如何降低网络中没有产生直接效益的资本支出，这就需要将现有的基站站点的成本构成细分，保留诸如天面等重要资源，尽量削减机房及配套设备，从而减少不必要的成本支出。

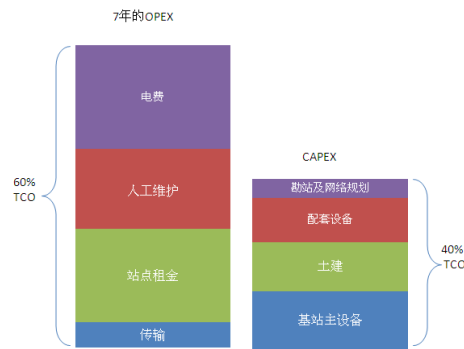


图 2-4: 基站TCO 分析

● 多标准运营

考虑到大量传统终端的持续存在，2G、3G 以及 4G 网络需长期共存以满足客户的兼容性需求。如表 2-1 所示，全球大多数主流运营商都同时拥有 2 到 3 个不同的通信标准[1]。在全球新的经济形势下，运营商需要寻找合适的方式来控制 CAPEX 和 OPEX 以应对多网络的运营以及数据业务的增长，而多模基站被认为是减轻网络建设以及维护成本的一种成本有效的方式，而如何更好地提高多模基站内的硬件资源共享是降低成本的关键途径。

表 2-1. 主要移动服务供应商的多网络运营情况

蜂窝技术	沃达丰	中国移动	法国电信	T-Mobile	Verizon	SK 电信	澳洲电讯	中国联通
TD-SCDMA		✓						
WCDMA	✓		✓	✓		✓	✓	✓
CDMA One & 2000 & EVDO					✓	✓		
GSM GPRS EDGE	✓	✓	✓	✓			✓	✓
LTE	✓	✓			✓	✓		

2.3 LTE 网络中的干扰问题

与传统 2G、3G 网络采用异频组网方式不同，LTE 采用同频组网，大幅提高了频谱利用效率。LTE 采用下行 OFDM/上行 SC-FDMA 作为基本传输技术，小区内的不同用户采用正交的子载波传输业务，基本避免了小区内用户之间的干扰，但是相邻小区都采用同一频点部署，来自邻区相同传输资源上的信号会干扰本小区内的用户，造成信道条件恶化，用户速率下降。如何避免和消除小区间的干扰，成为 LTE 研究的重要课题。

在外场的同频干扰测试中，对不同比例下行业务加载条件的下行 SINR 变化情况和单用户下行吞吐率变化情况进行了对比测试，测试结果分别如图 2-5 和图 2-6 所示，50%加载时用户下行平均 SINR 相对于空扰条件下降达到 5.33dB，平均吞吐率下降 40%；而 100%加载时，用户下行平均 SINR 下降达到 8.28dB，用户平均吞吐率下降 55%。

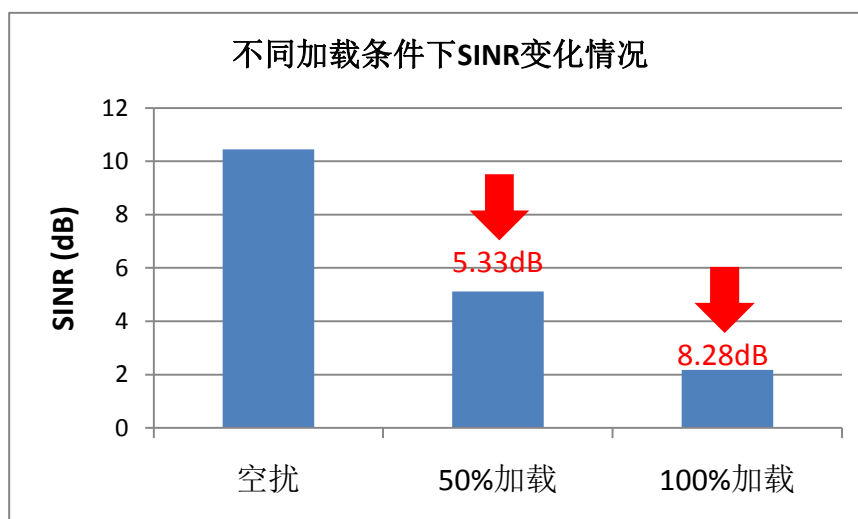


图 2-5: 不同下行加载条件下 SINR 的变化情况

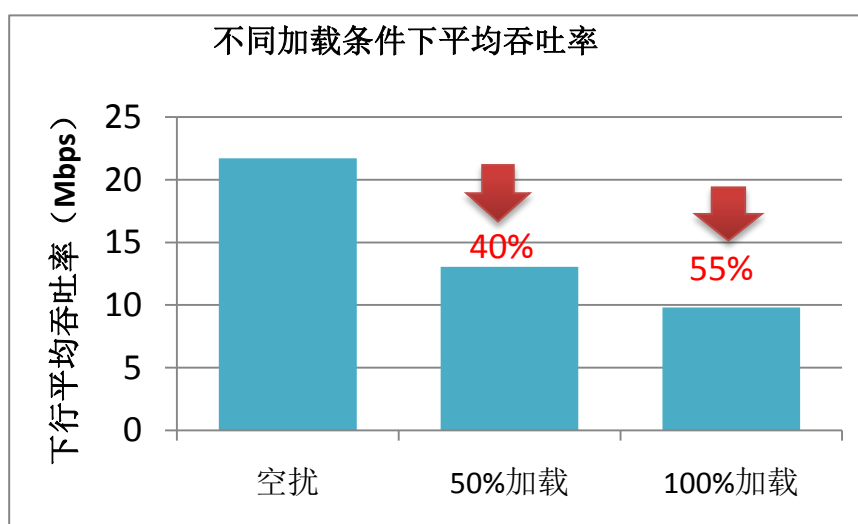


图 2-6: 不同下行加载条件下平均吞吐率的变化情况

导致同频干扰的组网形式主要包括两种方式：3 个及以上邻区重叠覆盖和 PCI 模 3 冲突。

对于 PCI 模 3 冲突导致邻区干扰的方式，其对切换影响不大，切换成功率最低下降 2 个百分点，成功率下降的原因是终端收到切换命令后，目标小区的 SINR 太低而导致随机过程失败；但对切换时延无明显影响。但是，PCI 模 3 冲突时对业务性能有一定的影响。空扰的场景下，边缘用户吞吐量有 4%~18% 的下降；并且对 CRS SINR 的影响大于对吞吐量的影响。加扰的场景下，CRS SINR 受 PCI 模 3 冲突的影响不大（0.5~2dB），对边缘用户的吞吐量影响也不大（10% 以内）。

对于 3 个及以上邻区重叠覆盖导致邻区干扰的方式，其对边缘用户吞吐量影响很大。电平差在 6dB 内的 3 个邻区减少为 2 个时，用户吞吐量有显著提升，平均提升约 30%。当同站邻区与主小区重叠覆盖时（法线夹角远小于 120 度），同站邻区干扰贡献较大，关闭同站邻区后吞吐量提升较多（平均 58%），关闭非同站邻区后吞吐量提升小（平均 4%），另外，减少邻区个数，降低邻区功率总可以提升业务性能。

在实际的大规模网络中，邻区重叠覆盖情况比较严重。测试中，把 RSRP（参考信号接收功率）低于主小区 10dB 以内作为确定重叠邻区的判决门限，测试统计结果如图 2-7 所示。在站间距为 300 米至 500 米的密集城区覆盖区域里，终端有 71.8% 的概率会检测到 1 个或多个邻区，甚至可以检测到 6 个邻区。

对于同站 3 个小区，通常采取扇区化技术将不同小区设置成不同的朝向，但是在扇区的边缘，为了保证覆盖，不可避免地存在重叠覆盖区域。根据图 2-8 所示的统计数据，终端存在 30.1% 的概率可以检测到来自同站邻区的信号。同时还可以看到，只有 1.4% 的概率可以同时检测到同站 3 个小区的信号，这是由于三个小区分别打朝向不同的方向，几乎不可能有同站三个小区的重叠覆盖区域，之所以出现这种情况可能其中某个小区的信号是通过建筑物反射过来的。

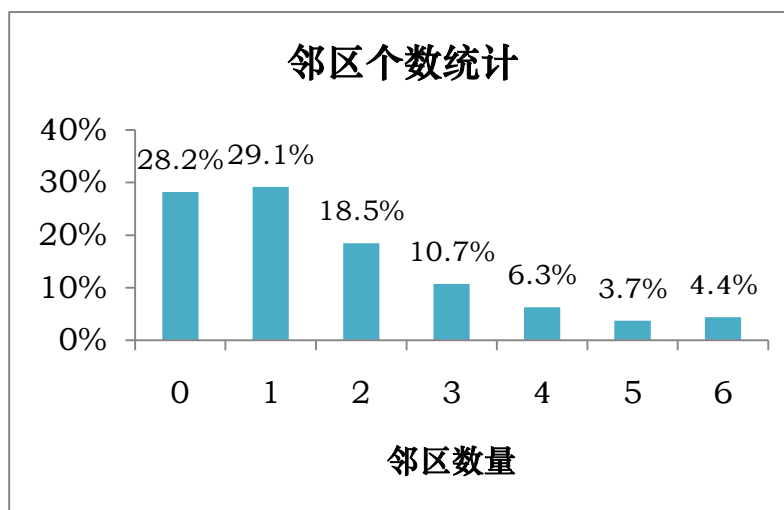


图 2-7: 规模试验中终端检测到邻区数量统计(邻区 RSRP 低于主小区 10dB 以内)

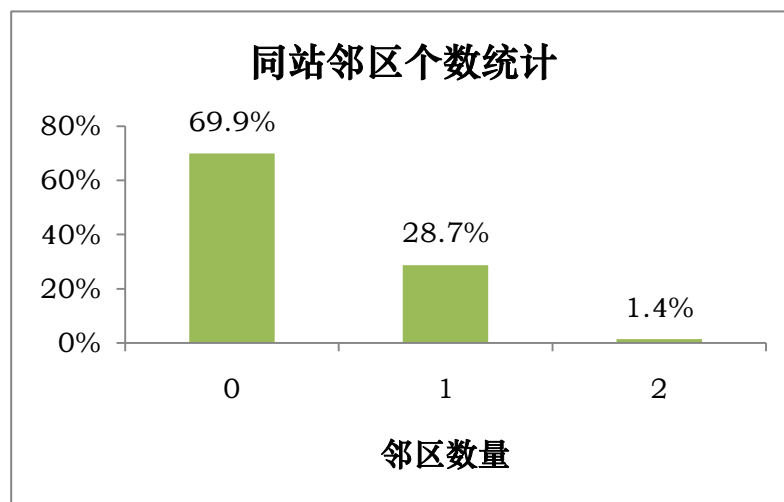


图 2-8: 规模试验中终端检测到同站邻区数量统计(邻区 RSRP 低于主小区 10dB 以内)

经过对比测试，降低多小区间的同频干扰是 LTE 大规模组网的重大问题。目前 LTE 有 ICIC、CoMP 等多小区干扰协调技术，但是分布式的基站架构降低了干扰协调技术的增益，集中式的 C-RAN 架构可以很好的发挥这些干扰协调技术的性能，提升整体网络的性能。

2.3 低成本高容量的无线接入网需求

随着 3G/B3G 技术的空中接口标准逐渐引入，移动宽带的峰值速率也快速提升，引发了终端用户的数据流量迅速增加。未来几年内，随着 LTE 以及 LTE-A 网络的部署，移动宽带用户数量将增加 2 倍。无线带宽的增长，将促使移动用户开始尝试各种高带宽的多媒体服务，例如基于视频的应用。新型移动多媒体应用的普及将对无线接入网提出严峻的挑战。

如图 2-9 所示，预计从 2008 年到 2013 年全球的移动数据流量将增加 66 倍，每年的复合增长率为 131% [2]，中国移动现网中也呈现同样的流量增长趋势。与此同时，空口的峰值速率从 UMTS 到 LTE-A 只以每年 55% 的复合增长率提高。这意味着空口速率的增长速度难以满足数据流量增长的需求。为了满足容量的需求，站点建设将越来越密集，也随即带动了各类成本支出的增加。为了解决站点的过度建设，需要提出新的网络架构以及空口技术以进一步增强 LTE /LTE-A 的性能。

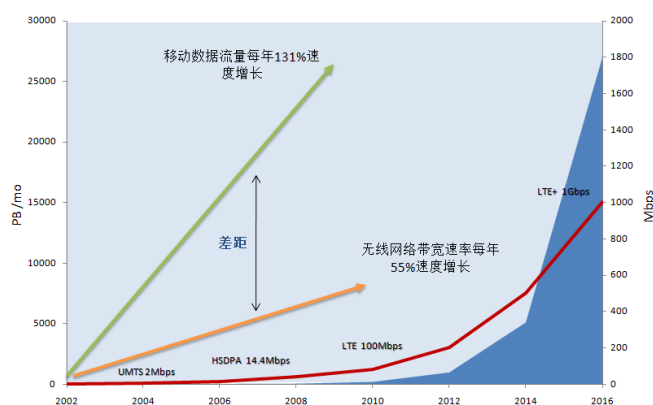


图 2-9: 移动带宽数据率/负载增长趋势

另一方面，运营商的收益并没有随着网络容量的提升而增加。已有运营数据表明，运营商的语音话务量稳步增加，同时数据流量增长迅速，但是收益并没有随之快速增加，甚至在很多情形下，ARPU 值还在逐年下降。为了应对投入与产出的严重失衡，运营商需要不断地降低每比特的数据成本，并同时提供高容量的网络以保持盈利能力的持续增长。

2.4 潮汐效应导致基站利用率低下

移动网络的一个固有特性就是其用户处于运动状态，在通信过程中经常会从一个地点移动到另一个地点。通过对实际运营网络的观察发现，用户的移动呈现出很强的时间规律性。例如在上班时间段，大量的用户从居住地移动到办公区；而当工作时间结束后，大量用户又从办公区返回到居住地。随着这些用户的移动，移动网络的负载也呈现出随着时间而在网络中迁徙的现象，即所谓的“潮汐效应”。图 2-10 中，实际网络中不同地点在不同时间段的负载情况就验证了这一点：工作时段，办公区域的移动网络负载最高；而非工作时段，居住区的移动网络负载最高。

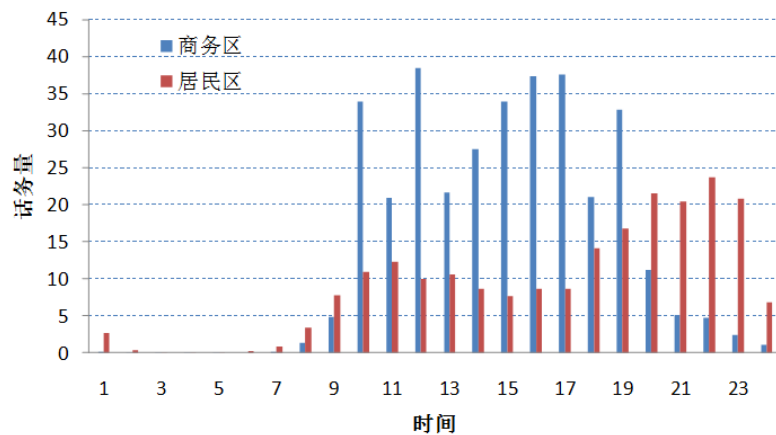


图 2-10: 全天移动网络负载举例

在传统的无线接入网中，每个基站的处理能力只能被其服务的小区内的用户使用。当小区内的用户离开后，基站的处理能力无法转移，只能处于浪费状态。由于运营商要每时每刻保持着网络的覆盖，使得这些空载或者零星负载的基站必须和那些高负载的基站消耗一样的功率。更严重的是，当负载较高时，基站往往满负荷运转，其需要的处理能力远高于平均水平。这样一来，一方面形成了处理能力的浪费，另一方面是处理能力的不足。

传统无线接入网的架构面对上述问题显得束手无策。如果能够将多个基站的资源整合起来在不同区域动态地按需分配，问题就迎刃而解了。可见，改变传统无线接入网络架构，将基站资源在不同小区之间共享对高效利用处理资源是大有裨益的。

2.5 不断增长的互联网业务对移动核心网压力巨大

随着智能终端和支持3G数据卡的笔记本电脑的迅速猛烈的发展，移动互联网业务在过去的几年内呈指数型增长。在未来的5-6年，移动互联网业务流量将是现阶段的10倍。从运营商角度来看，为了支持这些业务流量增长而带来的开销以及这些业务增长带来的收入之间的缺口，移动运营商需要花费数十亿美元在传输网和核心网上，才可能跟上业务增长的步伐，这给所有移动运营商带来了空前的挑战。

高速发展的移动宽带数据业务为移动运营商现有的核心网带来了前所未有的冲击。例如，大量的因特网数据业务为核心网网元，例如3G网络的SGSN和GGSN，4G网络的S-GW和P-GW带来了巨大的压力。现有的固定费率的商业模式也使得核心网在不断承受增长的数据业务量的同时，无法带来更多的收益。通过部署新的核心网网元或对既有网元扩容来满足业务的增长趋势，结果是投入大量的CAPEX/OPEX,只能获得非常有限的收入增长。因此，将互联网业务对核心网带来的压力向无线接入网络边缘，也就是基站转移，是降低移动互联网成本的有效手段。3GPP在最新的标准R12中，已经定义了Local GW网元功能。L-GW将部署在接近eNodeB的位置，可更好地以低成本分流internet数据流量。

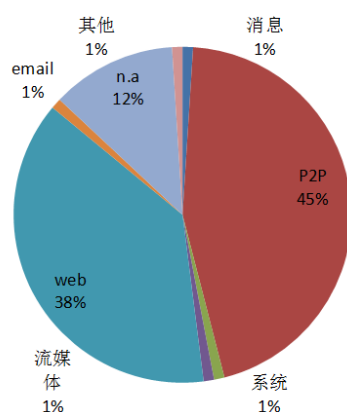


图 2-11: 3G 中各种业务比例示意

此外，理解用户使用移动互联网的模式也是很有意义的。最近发布的研究报告[3]给出了当前移动互联网最流行的应用。通过这份报告可以发现，人们在移动互联网上的行为已经越来越接近在固定宽带网络上的行为了。**web** 业务和 **P2P** 业务等内容服务已经成为最主要的网络业务。图 2-11 给出的一个 3G 运营商网络中无线业务的分布情况，也印证了上述趋势。通过对移动互联网用户行为的观察，我们是否一定要坚持花费数十亿美元在传输网和核心网的升级呢？

3 C-RAN 网络架构

3.1 C-RAN 的基本概念

云接入网 C-RAN 是中国移动研究院在 2009 年提出的未来无线接入网形态，其基本定义是：基于分布式拉远基站，云接入网 C-RAN 将所有、或部分的基带处理资源进行集中、形成一个基带资源池并对其进行统一管理，在提升资源利用率、降低能耗的同时，通过对协作化技术的有效支持而提升网络性能。

与传统无线网络相比，C-RAN 网络具有如下几个特征：

- BBU 的集中化。传统网络中，每一个（或几个）基站均需要有独立机房。在 C-RAN 中，一定数量（几十、上百甚至上千）的 BBU 被集中放置在一个大的中心机房；这对降低站址选取难度、减少机房数量、共享配套设备（如空调）等具有显而易见的优势；
- 基带池内的 BBU 协作化。通过引入实时高速的内部互联架构（如 Infiniband, 高速以太网等），基带池内的不同 BBU 之间可实现快速高效地交换调度信息、信道信息和用户数据，能够更好地实现上行和下行的多点协作传输技术，从而减小了系统干扰并提高系统容量。
- 无线处理资源的云化在 C-RAN 里，基带计算资源不再单独属于某个 BBU，而是属于整个资源池。相应地，资源分配也不再像传统网络那样是在单独的基站内部进行；相反的，资源分配是在“池”的层次上进行，这种思想和数据中心的虚拟化思想类似，可以带来最大限度地获得处理资源复用共享，降低整系统的成本。因此，在 C-RAN 网络里，基带处理单元 BBU 的概念变得模糊，系统可以根据实际业务负载、用户分布等实际情况动态调整 BBU，使得 BBU 所分配的处理资源根据实际情况适当变化。
- 基站的软化。利用基于统一、开放平台的软件无线电实现基带处理功能，使得 BBU 可以同时支持多标准空口协议、更方便地升级无线信号处理算法、更容易地提升硬件处理能力从而扩充系统容量，另外，通过动态、灵活的分配基带处理资源，基站的处理能力灵活变化，从而实现基站的“软”化。

C-RAN 的网络架构基于分布式基站类型，分布式基站由 BBU 与 RRH 组成，BBU 即放在机房中的机架和处理板等设备，RRH 即放于室外或者拉远放置于楼顶天面的设备。在这一基础上，有两种集中化部署的定义：

其一，集中化所有基站的数字信号处理单元，包括物理层基带处理、高层协议处理、主控及时钟等，通过高速光纤接口连接分布式的远端射频单元。RRH 仅负责数字-模拟变换后的射频收发功能。如图 3-1 所示。这一构架的技术特点是“大集中”，即集中了所有的数字基带处理功能在 BBU 中。其优点是：升级与扩容方便，可更好地支持多标准，最大程度的资源共享，更方便支持多个基站间的协作化信号处理。其主要缺点是：二者之间需要传输高速的 I/Q 信号，带宽要求高，TD-LTE 8 天线 20MHz 单载波要求 10Gbps 的带宽。

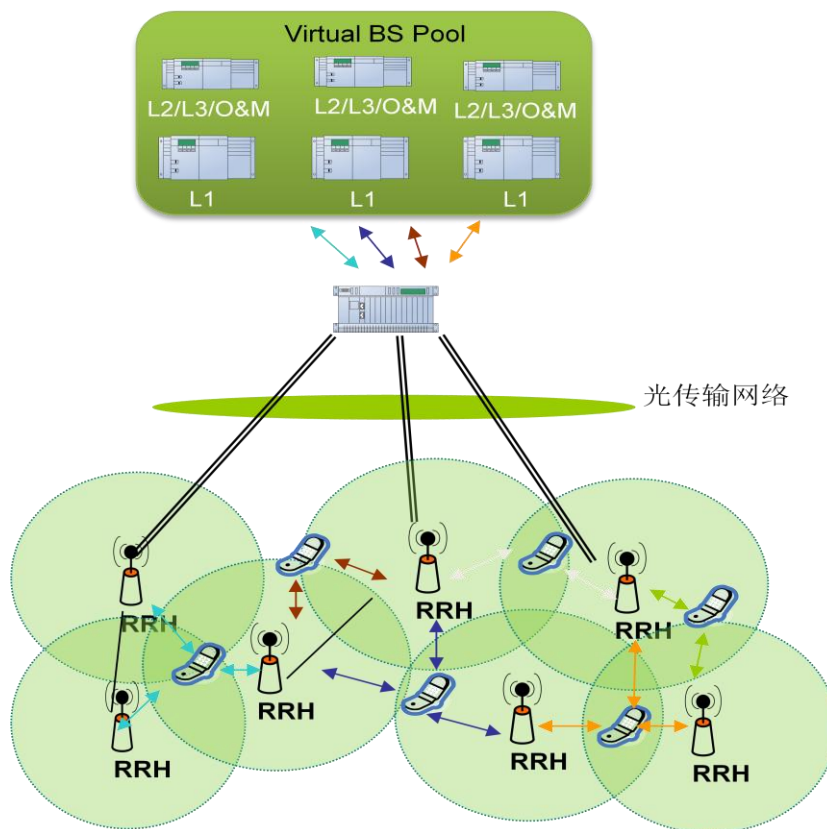


图 3-1：分布式 RRH + 集中化 L1/L2/L3/O&M

采用集中式的 C-RAN 架构，运营商均可以迅速地部署或者升级网络。只需要部署一些新的 RRH 并连接到集中式的 BBU，就可以轻易地实现网络覆盖的扩展或网络容量的增加。如果网络负载增加，运营商只需要在 BBU 增加处理能力即可。另外，若采用“大集中”方式的基带处理集中于一处，引入开放的平台和通用处理器将使软件无线电更易于实现，进而网络可以通过软件升级实现空中接口标准的更新，使得无线接入网的升级和多标准共存变得更加容易。

与传统的分布式基站不同，“大集中”C-RAN 架构打破了 BBU-RRH 之间的固定连接关系。例如在构架一下，每个 RRH 不属于任何一个 BBU 实体。每个 RRH 上发送或接收的信号的处理都可以在 BBU 基带池内一个虚拟的基带处理单元内完成的，而这个虚拟基带的处理能力是由实时虚拟技术分配基带池中的部分处理能力构成的。这样的系统将具有最大的灵活性。

其二，集中部分 BBU 处理功能在同一集中处理单元内，包括：协作化处理功能、高层协议栈的集中管理、无线资源统一分配功能等，通过光纤直连或 PTN 连接与远端的部分 BBU 通信。如图 3-2 所示，这一架构的技术特点是“小集中”，其含义是原有分布式 BBU 设备的部分功能上移到一个集中点，远端站址依然保留部分 BBU 的处理。其优点是：集中处理点可统一协调各小区的无线资源分配，甚至可实现物理层的联合接收联合发送，可方便引入协作化功能提升小区边缘用户的频谱效率。而且中心与远端间的交换数据所要求的带宽小，可最小化改动已有传输网络的结构，对于网络建设和管理的影响最小。其主要缺点是：远端 BBU 依然需要额外的机房，不能节省机房，若使用远端 BBU 与 RRU 的一体化基站，则未来 BBU 功能的升级和管理存在困难。另外，由于集中点 BBU 与远端 BBU 的放置距离远，信息交互时延将会对系统性能的提升造成瓶颈和限制。

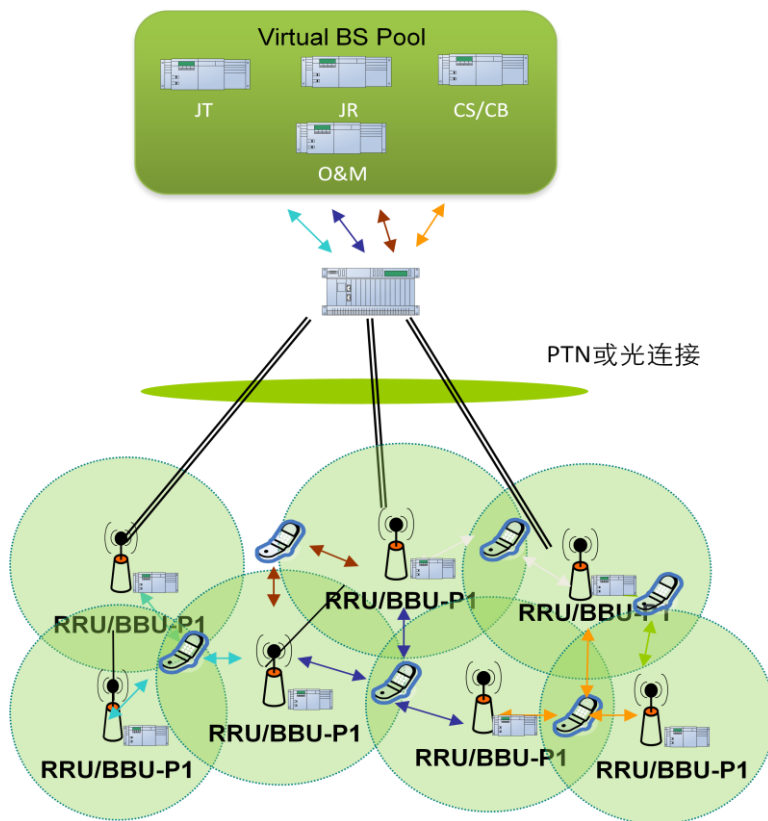


图 3-2：分布式 RRH&BBU + 集中化协作处理

3.2 C-RAN 构架的优势

C-RAN 的主要优势体现在：

- 降低能耗

C-RAN 是一个绿色网络。首先，通过集中化的方式可以极大减少基站机房数量，减少配套设备特别是空调的能耗；其次，远端无线射频单元到用户的距离由于高密度的射频单元配置而缩小，从而在不影响网络整体覆盖的前提下可以降低网络侧和用户侧的发射功率。低的发射功率意味着无线接入网络功耗的降低和用户终端电池寿命的延长。最后，通过所有虚拟基站共享一个基带池，基带池中的处理资源可以动态调度以处理不同的 RRH 的基带信号，更适应移动通信系统中的潮汐效应，使得基带处理资源得到了最优利用，能耗自然降低。当深夜移动通信系统负载较轻时，通过关闭基带池中的部分处理单元来实现节电，而不影响系统的覆盖和服务质量。

- 节约 CAPEX 和 OPEX 成本

在 C-RAN 架构中，基带处理单元的站址可以减少一个到两个数量级。集中式的基带池和相关辅助设备可以集中放置在一些骨干中心机房内进行管理，简化运营管理。远端无线射频单元的数量在 C-RAN 中并没有减少，但是由于这些器件功能较少，体积和功耗都很小，使得这些器件可以容易地部署在有限的空间内，并不需要频繁的维护，只需要提供天线的供电系统。这样一来可以加快运营商网络建设的速度，使其在网络建设中先人一步，拔得头筹。通过部署 C-RAN 网络，运营商可以节约大量的租借或购买站址机房资源的成本，并降低运营和维护的开销。

- 提高网络容量

在 C-RAN 中，虚拟基站可以在基带池中共享所有通信用户的接收和发送信息、业务数据和信道质量等信息。这使得联合处理和调度得以实现，小区间的干扰也变废为宝，从而可以显著提高频谱使用效率。例如，目前 LTE-A 中提出的协作式多点传输技术，就可以在 C-RAN 网络架构下轻松实现。

- 基于负载的自适应资源分配

C-RAN 的一个显著特点在于基站处理资源的灵活调配，这使得网络可以根据各个区域或时段的不均衡负载来调配处理资源。用户在物理小区间移动的同时，其占用的基站处理资源也是随之移动的。由于基带池所服务的物理区域要远大于传统彼此独立的基站，这种区域上负载的不均衡将不会对基带池中资源的利用率造成影响。

- 互联网业务的智能减负

通过采用 C-RAN 的智能减负技术，智能终端和其它移动通信设备产生的大量互联网业务被转移出核心网，从而传输网与核心网的业务负载和相应的成本开销将会降低，而且由于这些业务的路由距离绕过了核心网，从而也为用户带来了更好的服务体验。

3.3 C-RAN 面临的技术挑战

C-RAN 构架在系统费用、容量和灵活性等方面都显示出传统无线接入网所没有的优势。但是，它同时也带来一些技术上的挑战。在运营商能够实际部署之前，这些技术挑战需要得以解决：

- 基于低成本光网络的无线信号传输

连接基带处理模块和远端无线模块的光纤必须能够承载大量的实时基带采样信号。由于 LTE/LTE-A 系统的带宽比较宽，加上多天线技术的普遍应用，传输多个远端天线模块的无线信号所需的光传输连接带宽可达到 10Gbps，并且有严格的传输时延和时延抖动要求。

- 先进的协作发射/接收技术


协作处理技术是达到更高频谱效率的关键。为了抑制蜂窝系统中的小区间干扰，协作式多点处理技术必须使用空间信道信息来实现多个不同物理位置上的天线之间的协作。无线资源的联合调度对于减少干扰和增加容量是必要的。这一技术仍然有待开发。

为了支持上述的协作式多点处理技术，用户数据和上行/下行信道信息都需要在多个（虚拟）基站之间共享。虚拟基站之间的接口必须能够支持高带宽、低延迟的传输以保证实时的协作处理。在这一接口上传输的信息包括以下的一种或者几种：终端用户数据包，终端信道反馈信息，虚拟基站的调度信息，等等。因此，虚拟基站之间的这一接口必须在考虑传输延时和开销的情况下，满足实时协作处理的需求。

- 基带池互联技术

在集中式基带池的构架下，多个基带处理单元集中于一个物理站点内部署，而远端无线模块通过光纤连接到集中式基带池。为了实现容错容灾，以及灵活的处理资源调度，在基带池中的多个基带处理单元之间必须有高带宽、低延迟、灵活拓扑、低成本的交叉连接，从而实现任何一个远端无线模块的基带信号，可被基带池中任意一个基带处理单元接收和处理。

- 基站虚拟化技术



当基带处理单元被集中在基带池以后，如何设计虚拟化技术以支持分配或者组合这些处理资源给虚拟基站就成为关键。这些虚拟基站是真正处理各个活动用户的无线信号的逻辑实体。

基站虚拟化技术的主要挑战包括：实时信号处理算法如何在基带处理池中实现；如何动态地管理处理单元以适应动态的网络负载等。

- 服务面向边缘化

和集中在数据中心的服务提供模式不同，服务可以在无线接入网的边缘提供，这将带来一些独特的机遇与挑战。在后续的研究框架中，我们把这些技术挑战分为三类：服务如何和无线接入网集成；分布式服务网的智能处理；分布式服务的部署和管理问题。

4 C-RAN 的主要部署场景

C-RAN 的集中部署模式，随着 2G/3G/4G 网络不同建设阶段有所差异。对于 2G 网络，目前 GSM 网络处于建设成熟的阶段，因此以保持稳定为主要策略。对于 TD-SCDMA 网络，全国主要城市的覆盖已经基本完成，近期内在部分城市和农村还有着广泛的扩容需求，因此建设基调以补盲、补热的扩容为主。而对于 4G 网络，全国范围内刚刚开始建设，几年内都会有较大的新建压力。基于两张网络的阶段性不同，本章将分别描述其 C-RAN 应用场景。

4.1 TD-SCDMA 网络建设中的 C-RAN 场景

3G 网络现网的部署多为单站 3 扇区，每扇区 3 个载波。且主流设备支持最多 3 级 RRU 级联。因此 TD-SCDMA 网络中许多区域存在明显的潮汐效应，导致载波利用率较低；同时，TD-SCDMA 网络面临大量的弱覆盖问题需要补盲，且随着用户数量的增加，热点区域存在吸收话务量的需求，这造成站址选取压力较大；此外，在一些特殊场景，如：沿高速公路、铁路、街道、河道的覆盖场景下，存在快速大量越区切换，容易导致切换成功率低。C-RAN 集中化部署方式能有效应对潮汐效应，提高载波利用率，降低选址难度和切换成功率。

4.1.1 场景 1：补盲补热拉远微 RRU 提升网络容量和覆盖质量

已有 TD-SCDMA 部署的城市或区域进行补盲或补热。增加的 BBU 集中安装于已有宏站机房，通过光纤拉远方式部署微 RRU。

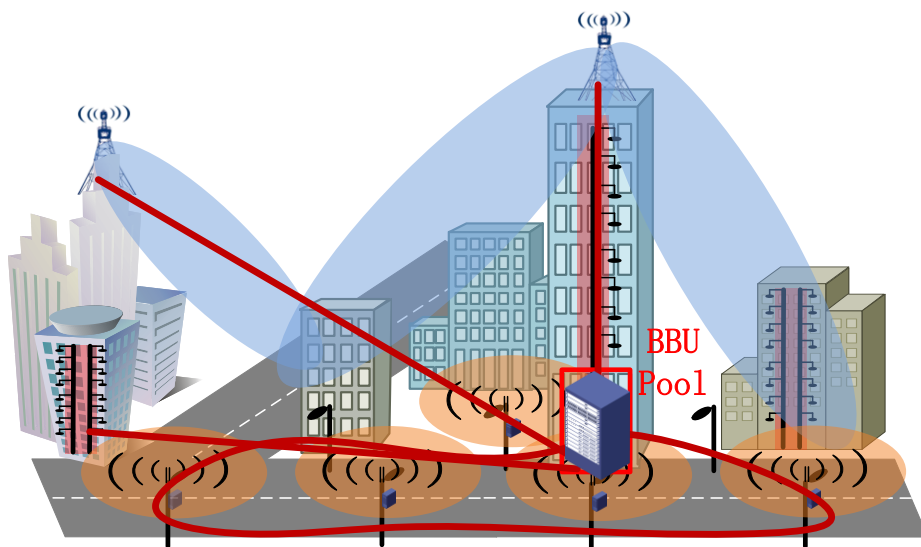


图 4-1: 已有机房的基带池拉远连接街道站 RRU

由于新增站址的获取难度增大，且已有机房的逼迁压力增加。密集城市区域站址难造成的信号覆盖薄弱成为越来越大的难题。采用以原有机房为中心拉远建设街道站的建设方式，将会越来越多地出现。集中机房的选择以自有机房为主，避免未来搬迁而带来的较大影响。同时，于适当的场景下引入多 RRU 共小区技术可有效提升网络的覆盖质量。一般可分三层覆盖：宏站提供基本覆盖，室外微 RRU 提供容量和补盲能力，室内站吸收室内话务量。形成立体覆盖模式。

此场景，多以宏站为中心、2 天线小功率 RRU 拉远相结合为主出现，临近新建宏站也可采用拉远 RRU 的

建设方式。集中处理的载波规模与话务量及区域盲区特点直接相关，街道站、灯杆站、室分覆盖的 BBU 均可集中到已有机房。在部分场景下，存在多个小功率 RRU 连片部署组网的情况。

另外，对于传输和配套建设，拉远 RRU 的光纤多以末端接入管道铺设或架设飞线为主。

4.1.2 场景 2：潮汐效应区域

单区域内存在明显的话务量迁移效应，例如：大学城、厂房/宿舍区、商业区/居民区等。

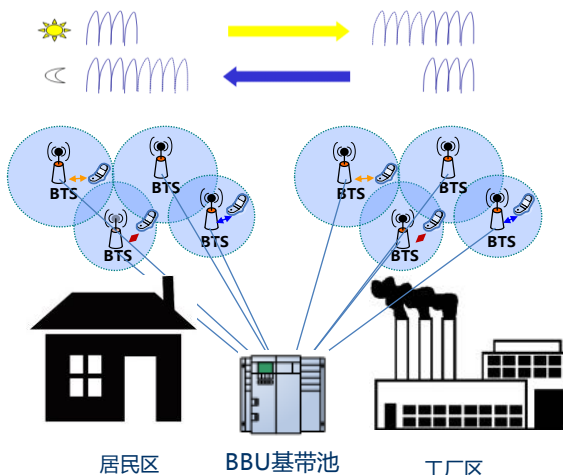


图 4-2: 居民区与工业区的昼夜潮汐效应

借助新建区域或成片区域改造的建设，可在连片区域内集中规划建设相关传输资源，白光直驱拉远建设 RRU 和天线，并采用集中式部署的 BBU 基带池应对潮汐效应。开启动态载波迁移功能后，可节省载波的整体使用数量、并利用动态分配基带池处理资源，提升系统整体性能功耗比。

4.1.3 场景 3：快速或大量越区切换现象区域

典型场景如：沿高速公路、铁路、街道、河道的覆盖。此类区域一般呈线性衔接覆盖，用户快速通过此区域时，易由测量延迟或切换过快而造成掉话。因此，针对此场景可使用集中机房内部署 BBU 拉远连接线性 RRU 的形式部署覆盖，可在基带池内引入优化小区间快速切换的技术或多载波聚合共小区技术等，以对抗快速切换而造成的易掉话问题。

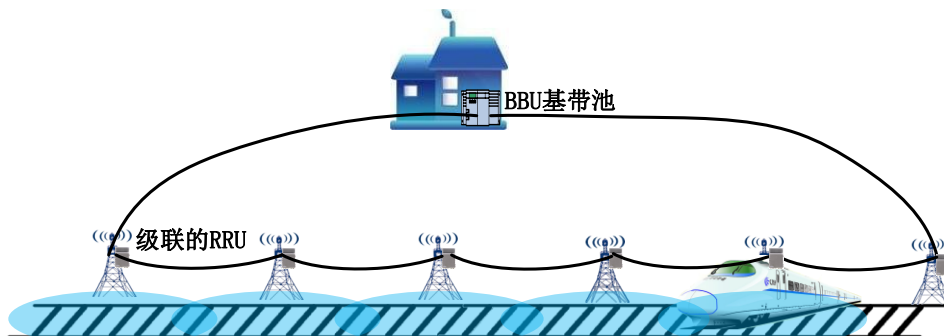


图 4-3: 连续越区切换的铁路覆盖

建设规模与光纤管道的资源密切相关，拉远 RRU 可与灯杆等共建，灵活采用直流远供或就地灯杆引电的

方式供电。而 BBU 基带池可采用美化隐藏的方式建设于室外电源柜中，或简易机房中。

4.2 TD-LTE 网络建设中的 C-RAN 场景

TD-LTE 网络建设是目前中国移动网络建设的重点，而通过前期的组网试验，解决了很多部署中的问题，但依然有很多问题亟待解决。一方面，目前在 LTE 规模外场测试中，由于 TD-LTE 系统与 2G/3G 的共站址部署，导致 LTE 天线部署过高或过低、站间距过近，多小区重叠区域干扰大，性能下降明显。另一方面，LTE 对干扰更敏感，导致部分 3G 站点无法共用，需要新增站点（例如：D 频段需新增站点 30% 左右，F 频段需新增站点 5%~10%），这又带来了站址选取的困难。此外，还面临成本增加过快、配套设施建设进度不能满足需求等问题，而已有的应对方案都有其固有的不足。C-RAN 的集中化部署方式将降低干扰、降低选址难度、节约成本、加速施工进度有机地结合在一起，是一种较为有效的解决手段。

4.2.1 场景 1：HetNet 场景下的 C-RAN 基带集中处理部署

与 3G 网络的部署场景类似，TD-LTE 网络依然存在补盲、补热的需求。而这类场景在 TD-LTE 网络中，将会更多。这主要有三个原因造成这一现象：

1. D 频段相比 F 频段的墙体穿透力更低。因此，密集城区内由于建筑物的遮挡造成的弱覆盖区将更多。
2. TD-LTE 未来将作为主要的数据网络部署。数据速率将会是衡量用户感知的重要参考指标，若以用户通信速率的下限定义小区边缘，为提高边缘用户的感知，则单小区覆盖面积将会比 2G/3G 网更小。
3. 密集城区的重点区域内，热点用户过于集中，将会在局部形成大容量数据网络的需求，因此这一区域的热点覆盖将会更多使用连片的微站覆盖，依靠微小区分裂吸收更多的话务量。

以已有站址资源为中心，拉远微 RRU 进行补盲补热的部署形式与 3G 网络相同。考虑中国移动频谱资源的相对丰富，初期建设微蜂窝覆盖网络宜采用与宏站异频的组网方式，且可在引用多载波聚合的基础上，实现宏微间的控制面和数据面分离，从而提升网络的整体数据吞吐能力。随着容量需求的进一步提升，而后才需考虑宏微站间的同频组网。无论异频或同频组网，在 HetNet 网络结构下，引入 C-RAN 集中池可更易引入宏微间的协同技术。

另外，一方面，由于人们对于自身生活环境的关注，无线基站的射频功率辐射造成了站址选址的巨大阻力。目前在北京等大城市已经出现了大量 2G/3G 基站不能复用建设 4G 网络的问题，甚至有站址出现了 4G 施工建设过程中被投诉，反而被搬迁的情况。另一方面，原有 2G/3G 建设时，天面资源并未针对 4G 网络建设预留足够的空间，新增天面设备需要对原有天面进行改动，施工难度反而增加，甚至于部分站址无法施工。总之，在可以预见的未来，密集城区的部分区域将会出现大面积的宏站覆盖盲区。针对此类区域覆盖，将需要微站成片连续组网，这将对无线设备提出新的需求：

1. RRU 设备的低功耗、小型化需求及天线形态的小尺寸趋势。小型 RRU 和小尺寸天线不易引起业主或用户的注意，低功耗的 RRU 更可以满足免除环境测评的要求，其部署难度将大幅降低。当前室外型微 RRU 设备单通道功率多为 5W，但根据链路预算，若微站站间距典型值为 100 米，则所需发射功率将会更小。
2. BBU 成池后的协作化功能。成片连续覆盖的拉远微 RRU 可采用多 RRU 共小区和空分等技术对抗微站间干扰，并提升网络的整体容量。

在这种思路下，甚至于会出现宏蜂窝与微蜂窝连片组网的双层网部署。初步估算，未来宏微 RRU 的比例

约为 1: 3 至 1: 6 之间。

4.2.2 场景 2：结合综合业务接入区建设的 C-RAN 部署

综合业务接入区规划和建设，是目前中国移动针对家庭宽带有线用户、集团客户有线用户以及基站接入需求的一种传输资源的综合规划和建设方式。它将城市划分为多个 3~5 平方公里不等的区域，区域内综合规划各业务类型所需传输资源。具体到实际区域划分原则，成片的园区，如：大学校园、高科技园区、居民小区、展览园区、工厂区等，因业主单一多被划分为独立的综合业务接入区。

以目前规划场景建议，单综合业务接入区内，一般拥有 1~2 个传输接入环（部分大城市接入环数量可能会更多）。每接入环连接不多于 6 个（3G 网络场景下为 8~10 个）无线宏基站机房，最大 12 个无线机房。基于宏站目前采用 3 扇区覆盖，每扇区一个 TD-LTE 的 20M 载波，因此单接入环的总载波数在 24~36 之间，考虑未来升级单扇区双载波后，载波总数在 50~70 左右。

针对 TD-LTE 新建的城市或区域，结合综合业务接入区成片集中化部署是目前 C-RAN 在 TD-LTE 部署中的一个主要场景。可利用传输网络重新规划后的相对丰富的光纤、管道及传输资源，将区内 BBU 集中至综合业务接入区的汇聚机房（可能是以前的传输汇聚机房），远端宏站点只部署 RRU。在已完成的 C-RAN 组网部署试验中，目前较成熟的方式是白光直驱传输方案。引入单芯双向和 CPRI 接口压缩技术后，1 芯光纤可承载 1 个 8 通道 TD-LTE 载波，根据集中规模需要预留相应的光纤资源，一般预留 48 芯光纤。当区域拥有足够的接入光纤资源时，可使用此方案将接入环的 RRU 连接入 BBU 基带池。未来引入 WDM 设备后，将大幅降低光纤的使用量，部署可行的场景将会更多。

引入综合业务接入区级别的集中化部署后，基带池内部可进一步引入小区实时协作化技术（JT/JR）提升连片区域内的小区间干扰。

具体按无线设备演进的不同特点可区分不同组合的场景，并据此使用不同的建设方式：

A. 场景 a：新建的 TD-LTE 不能与已有 2G/3G 站共站址，新建 BBU 设备集中至综合业务接入区的汇聚机房，新站址仅建设天面并为远端 RRU 提供室外备电。

B. 场景 b：新建的 TD-LTE 可与已有 2G/3G 站共站址，新建 BBU 设备集中至综合业务接入区的汇聚机房，原有站址机房为室外 RRU 提供电源和备电。

C. 场景 c：同厂家 TD-S 可直接升级至 TD-LTE，不一定集中部署 BBU，如果高低站、远近站导致重叠覆盖和干扰问题严重，则会在综合业务接入区的汇聚机房集中部署 BBU，为引入降低干扰效果更好的协作算法创造条件。

4.2.3 HetNet 场景与综合业务接入区的结合

上面两种场景并没有本质上的冲突，可同时存在。尤其在密集城区覆盖场景下，综合业务接入区为单位的规划区域中，依然有补盲补热的需求。因此，考虑 HetNet 场景需要结合综合业务接入区建设后的综合部署，可扩展为如下所示的建设方式：



图 4-4: WDM 与 HetNet 场景结合后的网络结构

综合业务接入区机房集中了区域内所有载波的 BBU 设备，由于光纤资源的限制，可引入 WDM 设备，将已有的传统无线机房连接成环。当 WDM 设备可部署于室外时，该 WDM 设备可作为汇聚点连接相邻较近的几个站点。原有机房宏小区与下沉式微小区由于共用同一个基带池，可采用复杂的快速协作化算法提升宏微结合后的无线性能。此部署场景下，引入了 WDM 设备降低了集中化对光纤管道等传输资源的要求。对于传输距离，WDM 传输环的典型场景需求均小于 20KM。

5 技术趋势和可行性分析

为了解决 C-RAN 这一创新构架所面临的诸多技术挑战，基于当前的技术条件和未来的技术发展趋势，我们建议在如下一些方面进行进一步的研究，以解决基于光网络的低成本高带宽的无线信号传输问题，动态无线资源分配和协作式无线处理问题，集中式基带池及大规模基带互联问题，基于开放平台的虚拟化基站问题，以及分布式服务网络的问题。以下就这些方面的技术挑战和研究方向做详细分析和探讨。

5.1 基带无线信号传输

由分布式 RRH 和集中式 BBU 组成的 C-RAN 构架，意味着需要在 RRH 和 BBU 之间传输未经处理的基带无线信号。由于物理处理的要求，基带无线信号对传输的带宽和时延有着苛刻的要求。同时，C-RAN 构架对此 BBU-RRH 链路提出了一些新的挑战。

BBU-RRH 带宽需求

基于 C-RAN 的大集中模式，由于空中接口的技术进步，多天线技术（每扇区 2~8 天线）大带宽（每载波 10MHz~20MHz）LTE/LTE-A 的演进，需求的 CPRI/Ir/OBRI（Open BBU-RRH Interface）链路带宽比 2G，3G 时代大幅提高。一般地，影响 BBU-RRH 链路带宽需求的主要因素包括：系统带宽、MIMO 天线配置以及 RRH 级联级数等。例如，200kHz 带宽的 GSM 系统在 2 发 2 收天线配置，四倍速采样下的基带数字信号速率大约为 25.6Mbps；1.6MHz 带宽的 TD-SCDMA 系统在 8 发 8 收天线配置下，四倍速采样下的基带数字信号速率大约为 330Mbps。这样速率的多路无线信号在光纤链路上传输技术很成熟，成本也很低。然而，20MHz LTE 系统在 8 发 8 收天线配置下的基带数字信号速率可达 9.8304Gbps，而随着 LTE 向 LTE-Advanced 的演进，多跳连接的网络拓扑以及支持 8 发 8 收天线配置的高阶 MIMO，BBU-RRH 之间无线信号传输的速率将提高到数十 Gbps。因此，探索解决 BBU-RRH 无线信号传输问题的不同方案对 C-RAN 的实现意义重大。

传输延时、抖动及测量的要求

C-RAN 对 CPRI/Ir/OBRI 链路在传输延时、抖动及测量方面的要求也非常严格。在 CPRI/Ir/OBRI 传输延迟方面，同样由于 LTE/LTE-A 对物理层整体处理延迟的苛刻要求，也间接提高了对基带无线信号传输的延迟和抖动的要求。不包括传输介质上的往返时间（即不计光缆长度导致的延迟），CPRI/Ir/OBRI 链路上用户平面数据（IQ 数据）在链路的其它部分总的往返时延不能超过 5μs。另外，CPRI/Ir/OBRI 接口需要周期性地测量每条链路或者多跳连接的光缆长度。在时延校准方面，每条链路或多跳连接的往返时延测量精度应满足±16.276ns 的需求[4]。

系统可靠性

在系统的可靠性方面，由于传统的光传输网络（SDH/PTN）在接入网链路上提供了可靠的环路保护、自动倒换以及光纤链路管理功能，C-RAN 构架在接入网络上也必须提供与之相当的可靠性和管理功能。在传统 RAN 构架下，接入环上的每个 BBU 通常通过 SDH/PTN 接入到中心传输机房的相应传输设备上。当此环路上任意一点出现光纤故障时，通过 SDH/PTN 的环形路由和保护功能，系统可以迅速切换到没有发生故障的路由方向上，确保业务不中断。在 C-RAN 构架下，集中式 BBU 需支持 10~1000 个以上的基站站点，因而连接分布式 RRH 和集中式 BBU 之间的光纤较长，如果每个分布式 RRH 和集中式 BBU 之间仅有点对点光纤传输，则任意一点的光纤故障将导致相应的 RRH 退服。为确保在任意光纤单点故障条件下整个系统 RRH 仍然可以正常工作，连接 BBU-RRH 之间的 CPRI/Ir/OBRI 链路应采用光纤环网保护技术，通过不同管道的主、备光纤，实现 CPRI/Ir/OBRI 链路的实时备份。

管理能力

同时，在传统 RAN 构架下，SDH/PTN 所构成的传输网也提供了对接入环的统一的光纤网络管理能力。这包括对接入环光纤链路的全网统一管理，对接入环光纤故障的监控等。在 C-RAN 构架下，BBU-RRH 的无线信号直接接入环上传输，其 CPRI/Ir/OBRI 接口也应当提供类似的管理能力，并纳入统一的光纤网络管理。

成本要求

最后，在成本方面，CPRI/Ir/OBRI 光接口所必需的高速光模块将是影响 C-RAN 构架经济性的重要因素。与传统 RAN 构架相比，C-RAN 在接入网上需要传输的无线信号数据速率比经过解调的承载业务数据速率要高 100 倍~200 倍。对于拥有自有接入网光纤网络的运营商来说，虽然采用 CPRI/Ir/OBRI 进行高速无线信号传输所占用的光纤的成本不必增加，但是高速的光模块或光传输设备的成本必须和传统的 SDH/PTN 传输设备接近，才能使 C-RAN 构架能够在 CAPEX 和 OPEX 上具有吸引力。因此，如何实现低成本、高带宽、低延迟的无线信号光纤传输将成为 C-RAN 应用于未来 LTE 和 LTE-Advanced 网络部署的一个关键挑战。

下面对以上问题以及相应的技术发展趋势，进行逐一分析，为解决这些问题提出思路。

5.1.1 CPRI/Ir/OBRI 链路的 IQ 数据压缩技术

针对上述 LTE/LTE-A 的 BBU-RRH 无线信号传输带宽问题，各种降低 CPRI/Ir/OBRI 接口传输负载的数据压缩技术相继出现，包括时域压缩方案（如降采样率、非线性量化、IQ 数据压缩等）和频域压缩方案（如子载波压缩等）。下面探讨几种 CPRI/Ir/OBRI 链路数据压缩的方案。

对于 LTE 20MHz 系统带宽，BBU 使用的 FFT/IFFT 点数为 2048 点，而有效子载波个数仅为 1200 个，因此如果将 FFT/IFFT 放到 RRH 实现，在 BBU 与 RRH 之间的 Ir 接口仅传输有效子载波的数据，这样接口速率的需求可以降低大约 40% 左右，可以大大降低 Ir 接口速率压力。但是频域压缩导致 IQ 映射复杂，增加接口逻辑设计和处理复杂度。同时，由于 RRH 要处理部分 RACH，不能做到 RRH 对各种 RACH 配置透明，需要根据 RACH 配置决定 RACH 的处理时序，RACH 有几百种配比，不同的配置下 RRH 的时序控制都不同，导致整个系统设计复杂度大大增加。因此，综合考虑实现复杂度和成本，目前频域压缩不具备可实现性。

基于 DAGC 技术的时域压缩是目前多数厂家采用的 IQ 压缩技术，DAGC 基本原理是根据基带最佳解调范围，选择参考平均功率，将每个符号进行功率归一化，降低信号的动态范围。DAGC 压缩将对系统性能产生负面影响，上行链路将减少接收机的动态范围并使接收信噪比恶化，下行链路将使 EVM 指标恶化，随着压缩比例的提高，系统性能恶化更为严重。目前，仍需研究不同场景下压缩带来的性能损失及优化的压缩算法。

表 5-1 中列出了各种方案的优缺点。可见，目前还没有非常理想的 OBRI 链路数据压缩方案。这一领域仍需要更多的研究。

表 5-1. 各种数据压缩技术的优缺点比较

带宽压缩方案	优点	缺点
降采样率	低复杂度； 可压缩到原始数据的 66.7%； 对协议的影响较小。	性能损失比较严重。
IQ 数据压缩	可取得较高的压缩效率； 仅需要添加额外的压缩和解压缩模块。	压缩/解压缩模块的实现比较困难； 存在实时性和压缩失真问题； 目前没有成熟的算法可用。

子载波压缩	高压缩效率，可达 40% ~58%； 在下行链路比较容易实现。	提高系统复杂度； 较高的设备成本；设备难以维护； 上行的 RACH 处理难以实现
-------	------------------------------------	--

5.1.2 CPRI/Ir/OBRI 链路的传输时延及抖动

如前所述，CPRI/Ir/OBRI 链路在传输延时、抖动及测量方面的需求也非常严格。但是，由于 CPRI/Ir/OBRI 链路上用户平面数据（IQ 数据）在链路的往返时延要求（5us）并不包括传输介质上的往返时间（即光缆传输导致的延迟），这一要求在现有技术条件下是可以满足的。同时，由于 CPRI/Ir/OBRI 光纤路由一般不会随时间变化，传输所引起的时延抖动比较小，容易满足相应的要求。

另一方面，由于 LTE/LTE-A 对物理层处理延迟的苛刻要求，导致 CPRI/Ir/OBRI 链路的总传输延时是不能超出一定范围的。在 LTE/LTE-A 标准中，物理层的 HARQ 过程是处理延时要求最高的部分。HARQ 是提高物理层性能的重要技术，其本质是在接收端物理层检测一个子帧的传输正确或错误后，迅速反馈 ACK/NACK 给发射端物理层，以让发射端物理层决定是否重发。如果重发，接收端在物理层对多次发射的信号进行合并处理，解调成功后再反馈给上层协议。按照 LTE/LTE-A 标准，上下行的 HARQ 的 ACK/NACK 过程最短要求在收到发送信号后 3ms 内完成。由此带来的要求是，一个子帧的物理层处理延时一般应该小于 1ms。由于物理层处理本身要占用 800us-900us，那么 CPRI/Ir/OBRI 光传输的延迟最大为 100us-200us。按照光纤中光速为 20 万公里每秒估算，C-RAN 构架下的 CPRI/Ir/OBRI 接口的最大传输距离就被限制在 20 公里到 40 公里。具体数值和物理层处理本身的时延余量有关。

5.1.3 光传输技术的进步和成本的降低

如上所述，支持 LTE 和 LTE-Advanced 的 BBU-RRH 无线信号连接对光传输网速率和成本都提出了新的挑战。光传输技术的快速发展也为解决这一问题提供了更多、更经济的解决方案。目前商用 WDM 系统单根光纤的容量可达 3.2T 以上。10Gpbs 的光传输技术是普遍应用的基础，40G 系统已经成熟并逐步商用，100G 技术近年来已成熟，开始显现优势。10GE 的标准化和产业化将大大提高相关光传输模块的市场容量，从而将有助于降低 10Gbps 光模块的成本。40GE 的技术也已成熟。另一方面，接入网层面，1.25G EPON、2.5G GPON 已广泛用于解决 FTTX 接入，10G PON 技术将于 1~2 年内商用，未来 PON 技术发展有 WDM-PON、Hybrid PON 和 40G PON 等几个方向。以上这些光传输技术的快速发展，都为 BBU-RRH 高速无线信号的光网络传输提供了技术基础。

如同半导体工业内的摩尔定律，光通信领域也有类似的趋势：每年，光纤传输的速率都在提高，而同样速率的光模块价格则不断下降。直接支持 WDM 多波长收发的光模块已经出现。

图 5-1 中给出了 2.5G SFP 和 10G SFP/XFP/XENPAK 商用光模块的最低价格走势图。从图中可看出，商用光模块的最低价格在近 3 年内的降幅达到 66%~77%，而且这种显著的价格下降趋势在未来几年内仍将持续，进一步降低了光传输网络的成本。如果这一降价趋势得以继续，则有助于降低 C-RAN 构架网络的成本。

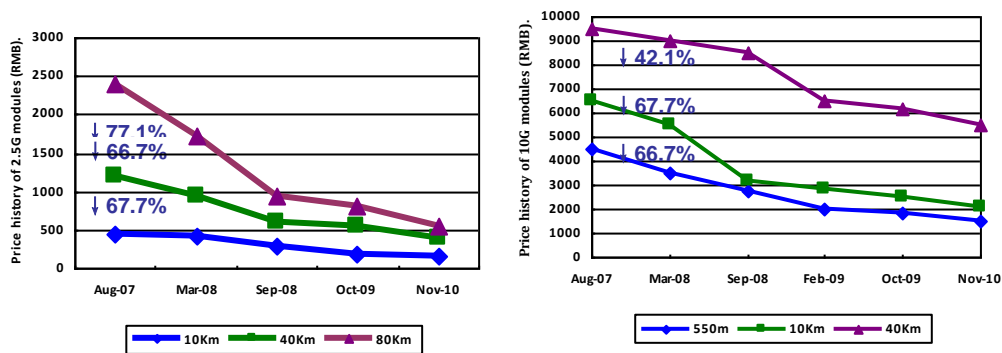


图 5-1: 2.5G/10G 商用光模块的价格走势

5.1.4 BBU-RRH 光纤环网保护

虽然 C-RAN 构架下 BBU-RRH 直接的传输没有传统的 SDH/PTN 所提供的环网保护功能，但是 CPRI/Ir/OBRI 标准提供了类似的环网保护功能，并得到厂家的支持。同时，为了避免为每个 RRH 都占用两个物理路由上的两条光纤，在 CPRI/Ir/OBRI 接口速率容许的情况下，RRH 之间可以以级联方式连接，然后通过两条不同路由的主干光缆共同构成环形并连接到同一个 BBU，如图 5-2 所示。只要 CPRI/Ir/OBRI 接口的速率足够高，BBU-RRH 环网保护技术可以较大节省光纤的使用同时保证较低的倒换时延。以 TD-SCDMA 系统为例，6.144Gpbs 的 CPRI/Ir/OBRI 链路可以支持 15 个 8 天线 RRH 的 TD-SCDMA 载波，最大可以支持一个 3 扇区 5/5/5 配置的典型 TD-SCDMA 宏站。这 3 个扇区的 RRH 的 IQ 数据通过两个不同物理路由的主干光缆连接至同一台 BBU。当某个主干光缆出现故障时，3 个 RRH 将通过另一个主干光缆连接到 BBU，保护倒换时间小于 50ms，能够保证所有业务不中断。对于速率较低 GSM 系统，可以更容易地将 6 个甚至更多的 RRH 通过这样的 CPRI/Ir/OBRI 环形链路连接起来，实现同样的功能。而对于无线信号传输速率更高的 LTE/LTE-A 的系统，则需要引进 WDM 技术或其它技术来实现类似的环路保护功能。

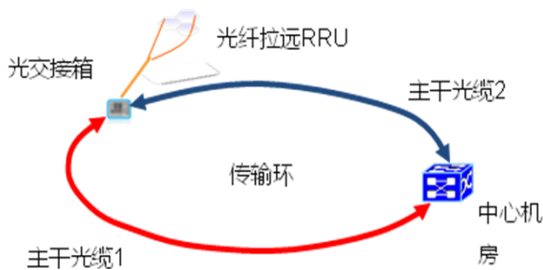


图 5-2. RRH 环网保护拓扑

5.1.5 当前可行的部署方案

为了满足 RRH 与 BBU 之间的高带宽数据传递，运营商需依据现网传输资源的情况可以采用不同的策略。中国移动已有基站回传城域传送网已形成包括核心传送层、汇聚传送层（含郊区骨干层）和接入传送层等三层清晰的网络结构。各级网络结构基本都采用环型结构，且下层与上层网络间基本上采用双节点归属，从线路和节点设备两方面保障了城域传送网网络的安全可靠性。各级网络所具有光缆芯数普遍为：核心层 144/288/576 芯，城区汇聚层大部分 96-144 芯，城区接入层主要采用 24-48 芯。基带池如果位于传输网汇聚机房，则该机房所配置的到局光纤芯数决定了该基带池可以覆盖的范围。

依据城域传送网光纤资源丰富程度，特别接入环的光纤资源的状况，可以实现以下几种 C-RAN 集中化基带池 CPRI/Ir/OBRI 链路的传输方案：1、光纤直驱模式；2、波分复用（Wavelength Division Multiplexing, WDM）传输模式；3、基于 UniPon 的传输模式；4、彩光直驱模式。四类模式分别适用不同场景并拥有各自的优缺点。从已经做过的外场实际部署试验来看，10 个站左右的汇聚机房推荐采用光纤直驱的传输方案。波分复用（WDM）由于引入了更多的传输设备，存在成本与多套传输设备维护复杂的问题。其它两种模式还需要进一步地做实际部署试验进行验证。

第一种光纤直驱模式：如果光纤资源丰富，可以采用光纤直驱的方式连接 RRH 与 BBU。首先，从光纤资源的建设和使用上看，该模式的优点是宜快速组网，充分利用现网光纤资源，短期内无需建设配套的传输设备，因此成本较低；缺点主要是难以满足网络可持续发展要求，消耗较多光纤资源；其次，接入环光纤采用直驱方式后，必须在 BBU-RRH 链路上实现光纤故障情况下的保护倒换机制；最后，原有的网络管理系统难以对其进行统一的管理。这些缺点有相应的解决方案。对于光纤资源消耗过大的问题，如果原本存在管道资源或杆路资源，则新增、升级小芯数的光缆到大芯数的光缆是比较容易的，成本也较低。对于 BBU-RRH 光纤直驱连接的保护机制，现有的符合 CPRI/Ir/OBRI 接口标准的产品都已经支持 1+1 保护或者级联保护，配合光纤环形接入网路由，可有效提供类似于 SDH/PTN 的保护功能。对于光纤直驱后的接入网光纤网络管理功能，可考虑在 CPRI/Ir/OBRI 标准中新增光网络管理的模块，满足传输网统一网络管理的要求。

第二种 WDM 模式，适用于光纤资源较为紧张的宏蜂窝基站系统，尤其是接入环光纤资源紧张，而且新建或增加接入环光纤困难或者成本太高的情况。这一方案采用 WDM 技术升级现有接入环光传输网络来满足 BBU-RRH 链路上传输 CPRI/Ir/OBRI 接口的高带宽需求。通过在一根光纤上传输多达 40 路甚至 80 路 10Gbps 不同波长的光信号，可以在一对光纤上同时接入大量级联的 RRH。该技术可以降低对光纤资源的需求，不过将现有的接入环升级成 WDM 传输网将意味着较高的成本。另一方面，将 WDM 设备应用到接入环，由于接入环的距离短，可以放松对传统 WDM 设备硬件的指标要求（所需发送功率低，无需对抗色散，无需处理非线性，波长数量不多），这将使得 WDM 设备价格大大降低。在 WDM 的基础上，另一类模式基于 OTN（Optical Transport Network）技术。OTN 具有标准化程度高、互通性好、可扩展性好、具有丰富的管理维护功能等特点。但相应的成本比较高。

第三种模式，在室内场景下，由于需要同时部署数据接入和无线接入网，更适合采用基于 CWDM 技术的 UniPON 方案[5]。UniPON 可以同时为 PON 业务以及 CPRI/Ir/OBRI 链路提供传输支持，也被看作是整合无线接入网、固定接入网资源的解决方案之一。在该系统中，一根光纤上可以支持多达 14 个不同波长光信号的传输，标准 PON 的上行信道和下行信道可以在其中两个波长上传输，而其它空闲波长可用于 BBU 和 RRH 之间的 CPRI/Ir/OBRI 数据传输。由于与 PON 业务共享光纤资源，使得该方案可降低总成本，更适合楼宇室内分布式系统的 C-RAN 集中化基带池部署。

第四种模式，彩光直驱模式，和第二种模式近似，同样适用于光纤资源较为紧张的宏蜂窝基站系统。彩光方案采用的是无源器件进行站点光分叉复用。目前的设备支持 6 波的彩光复用，即一根光纤内传输 6 波的数据，每波的容量可以达到 6Gbps，采用彩光直驱方案相当于将白光直驱方案中的单光纤传输能力拓展为 6 光纤能力。具有节省光纤资源，适于快速部署等特点。相对于 WDM 模式，彩光直驱模式又具有建设成本低等优势。而彩光直驱模式也有缺点，由于没有传输设备，无源光分叉复用器件的故障定位较为困难，且采用无源分光器件时，会产生额外的分光损耗，进而造成了单接入环部署的距离限制。同时，彩光方案需要针对多波中每路不同波长的信号分别配置不同的无源分光器件，对于现网运维的备料提出了更高的要求。

5.1.6 技术挑战

通过上述分析可知，C-RAN 构架迫切需要解决 BBU-RRH 之间高速无线信号的高带宽，低延迟，高可靠性，低成本的传输解决方案，现有的技术和技术进步的趋势已经有希望在不远的将来提供可行的解决方案。但是，另一方面，现有的技术还存在一些不足。例如：目前的各种数据压缩方案尚不能满意地解决 LTE-A 阶段 OBRI 接口的传输问题；高速光模块的快速发展和成本的降低有助于在未来 LTE-A 部署时解决 CPRI/Ir/OBRI 所需的传输要求，但是有待于光传输器件的突破；BBU-RRH 环网保护技术已经具备技术基础，可以提供类似于 SDH/PTN 的环网保护功能，但是与传统光纤网络管理统一构架还需要时间；有源或无源的 CWDM/DWDM/UniPON 技术则可以在光纤资源紧张的情况下提供大容量的传输能力，是 C-RAN 构架的 CPRI/Ir/OBRI 链路较佳的解决方案之一，但是其必须具有经济上的竞争力。此外，将传输设备应用于 CRAN 结构，还需要考虑传输设备如何应对室外极端恶劣环境条件的问题。光模块等器件的选择上也应进行与环境因素相应的考虑。总之，C-RAN 构架所需的高速光纤传输有了各种解决方向，但是仍需要探讨新的技术或者现有技术的组合方法以便更经济、更有效地解决这一问题。

综合考虑技术挑战和一些地区现网环境的约束条件，在 C-RAN 传输网的建设上是不可能一蹴而就，需要按照分步走的方式逐步建设汇聚的网络结构：当前阶段，C-RAN 的传输组网适合小规模替换或者新建组网，单环大致由 6~10（TD-LTE 场景时不多于 6 个，3G 场景下为 8~10 个）个物理站组成与现有接入环的物理站点数接近，且网络规划时单接入环最大可规划 40 公里。

5.1.7 最新技术进展

在本节及后续章节里，我们将 C-RAN 下 BBU-RRU 间的传输称为 C-RAN 前端传输（相对于 BBU 往核心网方向的回传传输）。另外，由于 CPRI 目前被大多数运营商所采用，因此本节中主要针对 CPRI 进行讨论。

C-RAN 的前端传输技术对 C-RAN 大规模部署具有决定性意义。随着近几年各大运营商对 C-RAN 的逐步重视，越来越多的厂家投入更多的资源在 C-RAN 前端传输技术的探索和研究中，并取得了许多突破性的进展。本节中作简要介绍。

- 随着压缩技术的逐渐成熟，目前许多厂家已经能够实现 2:1 的 CPRI 无损压缩并且已经应用到商用 LTE 设备中，能节约 1 倍光纤消耗量；此外，单芯双向技术通过在一根纤芯里同时传输上下行数据，可进一步节省 1 倍光纤用量。因此，当同时采用 2:1 CPRI 压缩以及单芯双向时，光纤节约程度可达 3 倍。中国移动已经在 TD-LTE C-RAN 外场试验中成功验证了这两项技术。更多信息可参考第 6 章“最新进展”。
- 基于 WDM 的 C-RAN 前端传输技术发展最为迅速。充分利用 WDM 技术的成熟度，多家厂家可以在较短的时期内开发完成 WDM 传输设备。目前已有少数运营商采用了此方案并在其 C-RAN 网络中大规模商用。从能力看，这些设备可以在一对光纤上支持高达 60 路 2.5G CPRI 链路，大大节约了光纤资源。并且支持 1+1 或者 1:1 的环路保护，同时支持多路复用功能，甚至可以提供多业务的支持。只是目前此类设备的成本还比较高，较难大规模推广。
- 另一类基于 WDM 的传输技术是 OTN 方案。相较于上一种方案，OTN 方案提供了更加强大的 O&M 能力，支持更远的传输距离以及灵活的路由功能。此外，其开放的接口与协议标准有利于降低成本和

开发难度。目前已有厂家提出了一种创新性方案，该方案可将 OTN 功能直接集成进光模块里，由此一来，引入此方案时不再需要增加有源设备，大大简化了网络部署与维护的难度。

- 毫米微波传输 CPRI/Ir/ORI 信号。有些站点由于特定原因，直接部署光纤到站的成本非常高昂，甚至是不可能。在这种场景下，采用毫米微波传输作为最后一百米传输解决方案能够在一定程度上代替光纤。目前，60GHz 是较为常见的毫米波频段，并且在多个国家可以在简单的管制条件下应用。60GHz 上的频带很宽，可以很容易地划分为 250MHz 甚至以上的信道。采用简单的调制就可以在 100 米~400 米的距离上达到 1Gbps 以上的数据速率。对于 2 天线的 20MHz 带宽的 LTE RRU，基带数字信号经过 2:1 压缩后就可以小于 1Gbps，可以较容易地应用毫米波技术传输。而 5Gbps 的毫米波传输产品也已经出现，可以传输经过 2:1 压缩的 8 天线 20MHz 带宽的 LTE 数字基带信号。
- CPRI 重定义。CPRI 重定义的基本思路是重新划分 BBU 和 RRU 的功能处理模块以降低二者之间的带宽需求。具体的，通过在 RRH 和基带处理单元之间增加接口重定义模块，终结传统的 CPRI 接口，实现无线通信协议栈中部分物理层的功能，处理有效的 IQ 路数据。以有效 IQ 路数据为净荷，增加源地址和目的地址，实现动态灵活的分组交换，降低 IQ 路数据传输带宽。但此类方案需要对已有无线协议标准作较大改动，难度较大。
- WDM-PON 技术。基于 WDM-PON 的 C-RAN 前端传输方案目前在标准化组织 FSAN/ITU-T Q2 工作组里有不少讨论和研究。其基本思路是利用 FTTx 建设带来的丰富光纤资源，采用低成本（面向家庭客户）的 PON 技术，结合波分技术以提高传输容量，从而达到进行 CPRI 数据承载的目的。传统波分模块应用于 FTTx 时无法解决彩光模块面临的安装、维护、仓储等问题，而 WDM-PON 技术定位于使用无色光模块，这有利于降低成本，同时具有节省光纤，拓扑简单等优势。尽管相关研究刚刚起步，但如能快速、有效的发展，从长远来看，基于 WDM-PON 的前端传输技术将会是解决 C-RAN 大规模集中化的重要手段之一。

5.2 动态无线资源分配和协作式无线处理

C-RAN 系统的一个主要目标是显著提高系统频谱效率，并提高小区边缘用户吞吐量。然而，众所周知，在采用 OFDM 技术的蜂窝小区中，边缘的用户经历比较严重的信道间干扰(ICI)，因而使得系统性能明显降低。因为系统的容量是干扰受限的，因而不能通过不断增加发射功率来解决该问题。同时，鉴于前述分析，单小区的无线资源使用效率较低。C-RAN 将采用有效的多小区联合资源分配和协作式的多点传输技术可以有效提高系统频谱效率。

多小区协作式无线资源管理

多小区无线资源管理问题已经在学术界和众多科研机构得到了较为广泛的研究，可以通过最优理论和算法的研究使得无线资源调度和功率控制最大化系统各小区吞吐量。为了进一步降低 C-RAN 网络构架和调度过程的复杂度，协作式处理和调度机制应该限制在几个小区组成的“小区簇（cell cluster）”内进行。在小区簇或者基站簇之间的调度复杂度是由移动终端的移动速度以及终端和 RRH 的数量所决定的。因此，如何选择最优的小区簇将将会在系统增益、回传链路的容量需求和调度复杂度之间进行折中考虑。

如图 5-3，用户终端可以被一个小区簇的多个小区服务。基于用户终端的测量报告和信道信息反馈，网络侧可以以静态或者半静态的方式进行小区簇的选取和组成。小区簇内的各小区以协作传输的方式对位于簇内的用户终端提供业务服务。为了进一步降低网络复杂度，可以在调度时限制进行协作服务的终端数量，也可以在

实际传输时指定参与协作的小区集合，这些小区称为活跃小区簇（Active cell cluster）。这些小区也可以从终端角度基于信号强度来进行定义和选取（一般情况下选择具有较强信号强度的小区）。小区簇内小区的激活/去激活过程可以由一个主控基站进行控制，并且可以根据 UE 的反馈灵活配置。

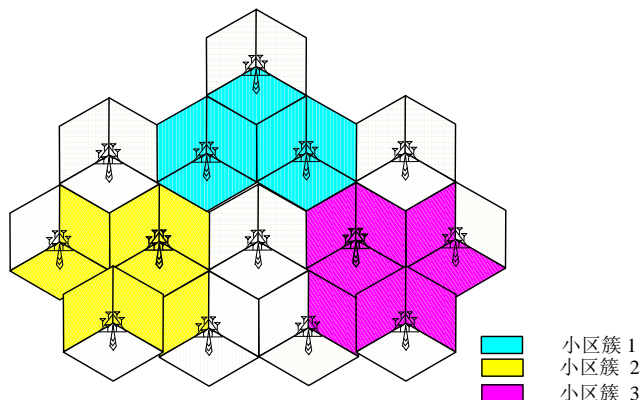


图 5-3: UE 协作网络控制的小区簇

协作式无线信号处理

信号的协作式发送/接收(CT/CR)是可以有效提升系统频谱利用率和小区边缘用户吞吐量的关键技术之一。虽然会引入系统复杂度，但是考虑到对系统性能的提升和贡献，协作式发送/接收仍是很有应用前景的技术。如图 5-4 所示，协作式发送/接收主要分为以下两种方式：

- 联合接收/联合发送 (Joint Processing, JP)
 - JP 模式需要较大的系统开销：对 UE 的数据需要在多个协作基站间共享；联合调度用户的信道信息反馈 (CSI)
- 协作式调度/协作式波束赋型 (Coordinated Beam-Forming, CBF)
 - 通过协作式波束赋型，可以以“较小”的开销提高小区边缘用户的吞吐量：多个传输点不必共享 UE 的服务数据；每个传输点只需要获取本身与参与的 UE 的信道信息（不必获取其它传输点与 UE 的信道信息）

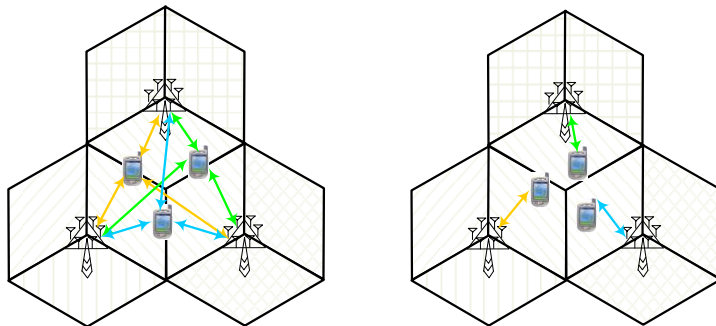


图 5-4: JP 和 CBF

技术挑战

协作式无线信号处理在降低系统干扰，提高频谱效率方面具有很大潜力。但是，这一技术还有许多问题需要进一步研究，才能达到在实际网络中应用的标准。需要解决的技术挑战主要包括：

- 高效的联合处理机制
- 下行链路信道状态信息的反馈机制
- 多小区的用户配对和联合调度算法
- 多小区协作式无线资源和功率分配算法

5.3 集中式基带池及大规模基带互联

集中式基带池

目前，市场上已经有很多基于 RRH 和 BBU 构架的分布式基站。一些厂家的设备实现了 BBU 内载波处理资源的动态调度以适应潮汐效应。这样构架实现了初步的集中式基带池的思想，但是一般来说，单个 BBU 所支持的处理能力有限，一般只能支持 10 个左右宏站的载波处理；另外，不能实现跨 BBU 间的载波处理资源调度，很难根本解决更大覆盖区域内的潮汐效应。当前的 RRH 加 BBU 的分布式基站的一个特点是，RRH 是固定连接在某个 BBU 的处理板的。RRH 只能将基带信号数据和 O&M 信令数据传输到其唯一归属的 BBU 中。这就使得任意一个 BBU 难以获取其它 BBU 所属 RRH 的上行基带信号数据；同样，任意一个 BBU 也难以向其它 BBU 所属的 RRH 发送下行基带信号数据。由于每个 BBU 所连接的 RRH 基带信号数据源受到限制，不同 BBU 之间的基带处理资源也难以彼此补充、互相利用：即闲置的 BBU 处理能力并不能用来处理其它负载重的 BBU 上的基带信号数据。

因此，集中化基带池需要解决的问题是：提供一个高容量、低延迟的交换矩阵以及相关协议支持多个 BBU 之间的高速、低延迟、低成本的互联互通。对于一个密集城区内中等规模(25km²)的集中式基带池部署，在平均站间距为 500 米情况下，需要支持大约 100 个宏站。对于典型 TD-SCDMA 宏基站每个宏站 3 扇区，3/3/3 载扇配置，意味着该集中式基带池交换矩阵需要支持 900 个 TD-SCDMA 载波。对于典型 TD-LTE 宏基站，每个宏站 1/1/1 载扇配置，该集中式交换矩阵需要支持 300 个 TD-LTE 载波。如果集中化基带池的覆盖范围进一步提高（比如，15kmx15km），集中式基带池可能需要支持多达 1000 个基站的载波处理能力。受限于电信号高速差分传输的速度和距离限制，传统的 BBU 构架无法简单地通过扩大背板尺寸来提供这样大的交换容量。

Infinite Band 技术可以提供极大的交换带宽（20Gbps-40Gbps/port）和极低的交换延迟，并广泛应用于超级计算机。然而，其成本高达 2 万元每端口，难以满足 C-RAN 低成本的要求。借鉴数据中心网络的分布式交叉互联的思想，可以考虑采用分布式的光纤网络连接多个 BBU，将它们构成一个集中式的基带池。分布式 RRH 的载波基带信号可以通过这个分布式的光纤网络交换到集中式基带池中任意一个 BBU 来进行信号处理。由此，集中式基带池可以有效地实现载波负载均衡，避免部分 BBU 过载以及部分 BBU 较空闲的现象发生。这可以实现更大范围的载波负载均衡，提高设备利用率，降低能耗，并可以更方便地部署协作式 MIMO 以及干扰消除等信号处理算法，从而增加无线系统的性能增益。

动态载波调度

基带资源池共享的动态载波调度可以增强 BBU 处理资源的冗余度并提升基带池整体的运行可靠性。当涉及某个 RRH 小区的基带板卡或载波处理资源发生故障时，可及时调度到其它空闲的基带载波资源进行处理，

保证小区正常工作。另一方面，对于具备“潮汐效应”的业务量分布场景，可仅配置较少的基带处理资源就可实现资源池在峰值业务时间段不同的多区域内的共享使用，节省投资。例如采用同一 BBU 连接多个 RRH 同时覆盖居民区和办公区时，可分别给两个话务区域固定配置较少静态资源保证基本覆盖，剩余基带资源可形成动态载波池，在不同业务时段根据各小区业务负荷的需求灵活调度，提升载波处理资源的利用率。

大规模基带互联

大规模基带互联需要支持 10-1000 个基站规模的 BBU 互联，并满足以下要求：

- BBU 间互联链路须满足物理层信号传输的低延迟、高速率、高可靠性的要求。满足类似 CPRI/Ir/OBRI 接口要求：支持 2.5/6.144/10Gbps 传输速率的实时传输。
- BBU 间载波动态调度，通过载波的灵活调度实现系统内负载有效均衡，实现无业务中断的载波调度。
- 对多点协作（CoMP）技术的支持，系统设计需考虑因协作式无线电所导致的 BBU 之间交互流量的需求。
- 容错容灾性，系统设计必须能够支持光纤链路 1+1 备份，BBU 机框、基带信号处理板 N+1 备份，通过设备间互为备份实现系统的高鲁棒性。
- 实时扩展的系统容量，在不中断现有业务的情况下，实现系统载波容量的动态扩展。

5.4 基于开放平台和软件无线电的基站虚拟化

现有多标准解决方案

目前，世界上大多数的主要移动运营商需要在同一覆盖区域同时支持多种网络运营。因此，多模基站成为运营商实现低成本运营的必然选择。基于软件无线电的共平台、多标准方案今天已经成为主流设备厂商的基站产品。

以下是现有的多模式基站的两种类型：

- 统一的 BBU 系统平台通过适配不同的处理板，分别支持多种模式。支持不同空口标准的处理板（比如 GSM, TD-SCDMA, TD-LTE）具有统一的接口，可以安装在统一的 BBU 系统平台中。运营商可以使用一套 BBU 系统平台支持多个移动网络。在这种情况下，BBU 系统的一些模块如控制模块、定时模块以及 RRH 的 I/O 模块可以在支持不同标准的 BBU 处理板之间共享。但是，这一结构无法在不同的处理板之间共享处理资源，并且在升级和扩容时也需要更新或增加处理板硬件设备。
- 统一的 BBU 系统平台和统一的处理板硬件平台上，通过软件配置的不同来支持不同模式。基站的各个部分，如物理层处理、MAC 层处理或网络接口等，都可以通过软件配置或者升级以支持不同标准（如 TD-SCDMA 或 LTE）。在一些最新的产品中，如果不同标准被分配在同一频谱区域，则 RRH 可以通过配置 SDR 以支持多模。这一模式使得整个基站可在不改变硬件配置的情况下升级为不同的标准模式。但是，目前产品通常要求整个 BBU 重新启动，或者处理板重新启动以下载 DSP/FPGA 软件等。这实际上也限制了不同模式之间共享硬件处理资源的可能，只能“静态”配置，而不能在不中断业务的条件下“动态”根据业务量变化而分配处理能力。

现有的以软件无线电为基础的基站系统部分地解决了运营商同时运营多种标准的需求，但是在多标准直接共享处理资源、动态业务均衡负载方面，尚没有完全满足运营商未来灵活运营的需求。

软件无线电的演进

随着半导体工业在摩尔定律的驱动下不断发展，数字信号处理器（DSP）、通用处理器（GPP）近年来在构架、性能、功耗上都取得了很大进步，为基于软件无线电的基站 BBU 提供了更多的选择。在传统 DSP 方面，多核技术得到广泛应用，3 核~6 核的处理器已经商用。同时，DSP 浮点运算的能力也不断提高。SoC 构架 DSP 系统的出现，将传统 DSP 内核与专用通信处理加速器结合在一起，提高了基站 BBU 的处理密度并有效地降低了功耗。同时，可在 DSP 上运行的实时操作系统也层出不穷，为 DSP 处理资源的管理和虚拟化开辟了道路。另外，不同厂家甚至同一厂家的 DSP 在后向兼容性上不一致，并且实时操作系统也不尽相同，缺少统一的平台和标准。基于 DSP 平台开发的基站 BBU 一般都是非开放的专有平台。在平滑升级换代和虚拟化方面，仍然需要业界的努力。

另一方面，近年来随着通用处理器技术的快速发展，通用处理器也逐渐可以满足面向数字信号等特殊数据负荷的有效处理，为软件无线电提供了更多的选择。这些通用处理器新技术主要包括：多核，支持浮点运算的单指令流多数据流（SIMD），大容量的片内缓存，低延迟的片外存储。借助于这些新技术，通用处理器可以完成通常由 DSP 完成的数字信号处理，特别是基站设备内的基带处理功能。传统通用处理器通常在性能功耗比上比数字信号处理器差，近年来通用处理器在这方面有了很多提高。图 5-5 显示了通用处理器近 6-7 年来在处理能力以及功耗方面的技术进展，不难发现每瓦特的浮点处理能力得到飞快地提升。这些数据表明通用处理器架构的演进使得其逐渐可以在基站设备中承担更多样化的数据处理任务。

通用处理器的优势是：通用处理器具有长期的后向兼容性历史，保证了软件不经修改就可以在更高性能的新型处理器上运行，有利于基站 BBU 平台的平滑升级。在操作系统方面，通用处理器上具有多种统一、开放的平台，经过扩展有望支持实时信号处理，为基站基带信号处理的虚拟化提供了可能。

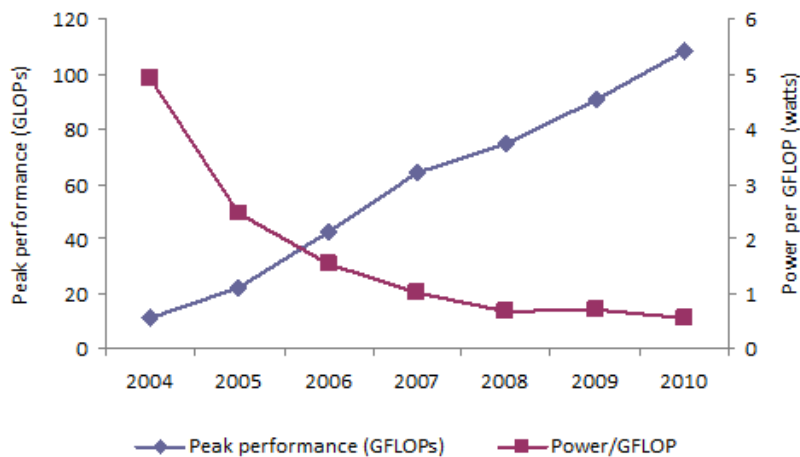


图 5-5 通用处理器计算性能/功耗的演进

数字信号处理器和通用处理器的技术进步，处理芯片提供了更强数字信号处理能力的同时具有更低的功耗。这些技术进步使得基于软件无线电的基站基带处理方案更具吸引力。传统 DSP 构架已经成为主流电信厂商多模基站平台的成熟产品，并将继续发展。而通用处理器上进行无线信号处理的前瞻性研究工作，提供了基站基带处理平台的新实现方式，有望成为未来统一、开放的多模基带处理平台解决方案之一。

基站虚拟化

一旦大规模集中式基带池能够实现高速、低延迟的互联，再加上基于信号处理器或者通用处理器的统一、开放的软件无线电平台，就为基站未来的虚拟化打下了基础。

虚拟化是指将计算资源抽象化。对用户隐藏了计算平台的物理属性，仅显示另一个抽象的计算平台。如果在基站系统中运用这一概念，可以根据虚拟基站的网络负载，实现动态调度集中式基带池中的处理资源给不同的虚拟基站或不同制式的空中接口。这将使得运营商可以更好地支持多种标准，更好地应对网络中不同地区、不同业务的潮汐效应。同时，统一的硬件平台将能够为系统的管理、维护、扩容、升级带来很多便利。因此，相信在未来的移动网络中，将出现基于实时任务虚拟化技术的云构架集中式基带池，如图 5-6 所示。在一个云构架集中式基带池内，所有的物理处理器所提供的处理资源可被统一的实时虚拟操作系统管理和分配。通过灵活的资源组合可以很容易地构造一个虚拟基站实体。实时虚拟操作系统根据各个虚拟基站的业务负载情况调配集中式资源池的处理资源以满足各个虚拟基站需求。

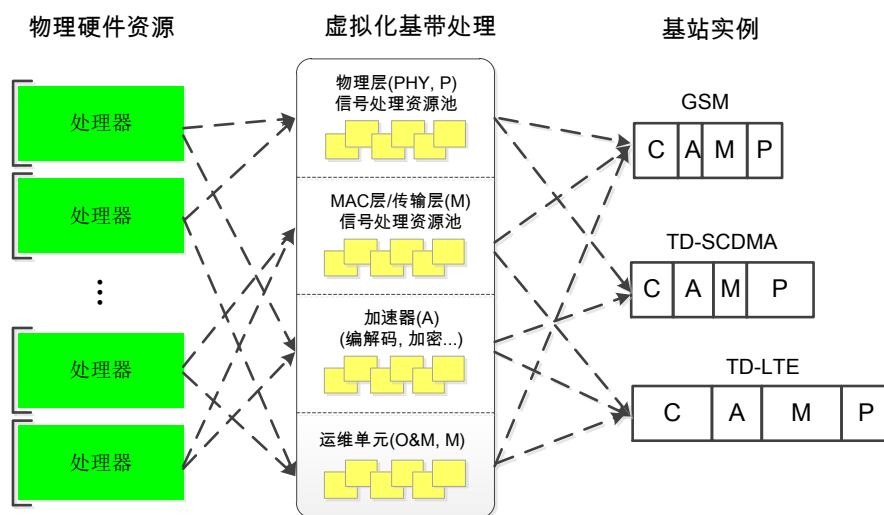


图 5-6: 基站虚拟化

在此机制下，很容易通过系统软件重新分配处理资源以构造支持不同标准的和不同负载的基站；协作式无线电也可以动态获得所需的大量处理资源；同时，由于处理资源可在全局范围内进行分配，从而显著提高整个集中式基带池内处理资源的利用率。

技术挑战

由于基站有实时处理、高性能的设计需求，传统服务器和虚拟化技术难以解决无线通信信号实时处理的问题。为了在集中式基带池上实现虚拟化基站，还需应对以下技术挑战：

- 需要高性能、低能耗的信号处理器、通用处理器以及先进的快速处理算法以实现实时信号的处理；
- 高吞吐量、低延迟、低成本的 BBU 交换构架，以实现基带池的物理处理资源间的互联拓扑，这包括：处理板芯片间的互联、处理板的板间互联、及多个基带处理单元之间的互联。
- 适用于实时信号处理的操作系统与 Hypervisor，优化并可控的系统处理时延和抖动，最优的虚拟化系统开销。
- 虚拟化系统功能的实时化，包括支持实时信号处理的虚拟机在线迁移和虚拟机处理资源的动态调度（如资源复用、虚拟机资源热插拔）等。

- 满足实时虚拟机要求的 I/O 虚拟化支持，以及 I/O 虚拟化与虚拟机在线迁移的兼容性。

5.5 分布式服务网络

DSN 采用 P2P 技术构建弹性大容量语音交换系统。依靠软件的容灾和自动恢复技术保证整个系统的高可靠性。在设备扩容、故障和负载过高等情况下，采用自组织和自适应技术，减少人工干预和维护，降低 OPEX。

除可搭建在如 ATCA 的专用电信级平台外，DSN 还可采用通用服务器。同时，DSN 引入虚拟化技术，采用虚拟机封装 DSN 网元，利用虚拟机的动态迁移，在业务量降低时，将多个 DSN 网元聚合到少量物理服务器，将其余服务器关闭，实现节能减排。

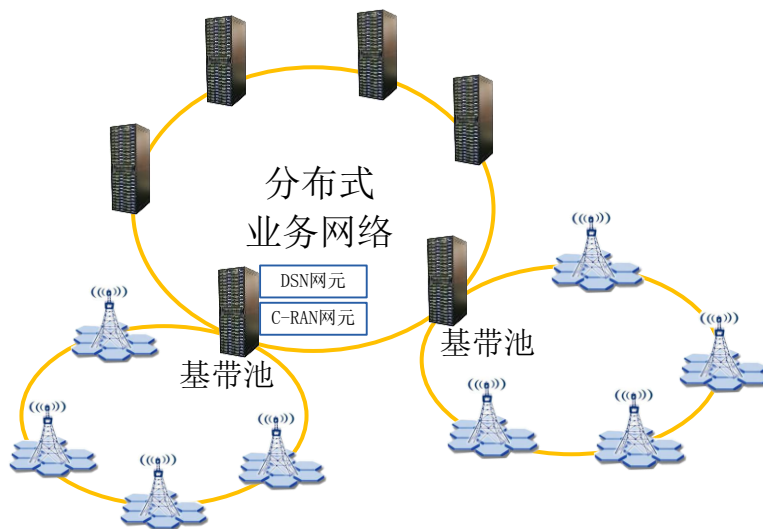


图 5-7: DSN 与 C-RAN 结合

在平台层面，DSN 和 C-RAN 均采用通用服务器及虚拟化技术实现网元的封装，因此，具备在统一虚拟化平台上同时运行 DSN 与 C-RAN 网元的技术可行性。而如何实现在统一平台上 DSN 与 C-RAN 对资源的互补利用（包括从时间维度或者物理资源维度的互补）是 DSN 与 C-RAN 平台融合的关键问题。

。

。

6 最新进展

为了推动 C-RAN 的发展和成熟，中国移动与合作伙伴一起，在现网的部署验证、大规模基带池的实现、基于通用 IT 平台的基带原型机，乃至虚拟化，C-RAN 与业务结合等方面进行了积极的探索，取得了较大进展。本章首先从现网的部署试验情况分析 C-RAN 部署中的优点和缺点，以及现网环境的约束限制条件。而后从设备研发的角度，描述以现有设备为基础针对大规模集中而设计的千载波基带池设备，基于 IT 通用平台的多模原型机以及基带池的研究。进一步的，我们还讨论了虚拟化技术的研发进展。最后一部分，展示了 C-RAN 与业务结合方面的最新研发成果。

6.1 C-RAN 外场试验

6.1.1 TD-SCDMA 和 GSM 的现网部署测试

2010 年，中国移动与合作伙伴一起，利用现有 TD-SCDMA 设备，在广东省珠海市的商用网中进行了 C-RAN 集中化部署的试验，完成了 C-RAN 的第一步落地实现。而后，2011 年上半年，基于 GSM 的 C-RAN 部署试验又相继在多个城市展开，包括长沙、保定、吉林、东莞、昭通等。进一步研究分析了 C-RAN 组网模式对不同环境条件下的适应能力。为了分析方便，选取了广东珠海 TD-SCDMA 和湖南长沙 GSM 的组网部署作为典型进行说明。

C-RAN 部署验证的总体情况：

广东珠海的初步部署仅用短短 3 个月时间就完成了在大约 30 平方公里的试验区域内 18 个 TD-SCDMA 站点的论证、规划、部署和测试工作，投入了商业运行。初步的试验验证了 C-RAN 集中化部署及相关技术的可行性。通过实际网络的建设和运营，充分体现了 C-RAN 集中化部署方式比传统基站部署方式在成本、灵活性、节能降耗多方面的优势。但同时在光纤资源、传输建设等方面也遇到了一定的困难和挑战。

湖南长沙的 C-RAN 部署主要是对 GSM 制式的组网验证，与珠海的情况不同，GSM 的部署主要以原有物理站点改造为主，共涉及 11 个站，其中新建站仅有 2 个，总计 15 平方公里。对比 TD-SCDMA 设备，GSM 设备具有不同的特点，例如：引入了多 RRH 共小区等技术，而且 GSM 设备的级联级数为 18 级以上，远大于 TD-SCDMA 设备的级联级数，因此大大节省了白光直驱所用的光纤数量，一定程度上减少了对光纤资源的需求。

本小节首先分析现网已有的传输和无线部署情况，而后描述 C-RAN 的解决方案和关键技术的验证效果，最后给出分析结论以及遇到的问题描述。

部署区域特点分析

广东珠海验证覆盖区域主要包括：一个国家级高新技术开发区，一个生活社区，以及多所大学的校区。该区域数据业务需求量大，目标客户质量高，客户新业务接受能力强。部分区域存在着潮汐现象，在一段时间周期内，话务随时间、地点或者事件的驱动有规律的迁徙。比如，高新企业区白天是人们工作的场所，到了晚上就回到附近的社区；而多所院校的校区白天上课，使用通信工具相对较少，但是晚上却是话务高峰期。这类潮汐区的规划一方面要考虑在业务繁忙的时候，需要承担比空闲时大几倍甚至数十倍的话务量；另一方面也需要考虑资源在空闲时的大量闲置，导致投资的浪费。这两者在一定程度上很难两全，给网络的规划、建设和优化带来难度。而这样的区域可以利用话务特点选择合适基站实施动态基带池共享技术。部署区域中，与 GSM 共站址的有 9 个站点，可以利用已有光缆资源。另外 9 个站需要重新铺设光缆资源，总体规划区域面积在

30km²左右，这意味着新光纤铺设量还是比较大的。

湖南长沙的试点区域选择长沙岳麓山附近高校区内，话务量较大，适合验证 C-RAN 解决密集城区话务场景的能力。试点区域内学生宿舍、居民住宅较多且无线覆盖环境复杂，覆盖整体指标仍有提升空间。同时，此区域内的教学区与学生公寓区形成了明显的潮汐效应。另外，不同于广东珠海，长沙试验部署多为旧有基站改造，且光纤资源充足，新光纤铺设的工程量相对较少。

整体解决方案描述

第一，BBU 集中式基带处理单元的容量规划方法。广东珠海按照 S444 站型进行规划，这意味着每个小区 3 个扇区，每个扇区 4 个载波，若采用传统方式规划，18 个站点预计需要 216 个载波。采用集中式基带池组网，需要按照规划区域的话务总量进行载波容量的配置。

TD-SCDMA 系统有两类载波，R4 载波承载语音业务，HSDPA 载波主要承载数据业务。中国移动网络规划要求单站的无线资源利用率不可超过 75%，据此估算每个 R4 载波可以支持的语音用户为 203 个。每个 HSDPA 载波可以支持的用户数为 93 个。测试区域有 1.7 万个用户，当使用基带池时，160 载波即可支持 2 万用户，可以满足规划区用户容量的要求。从上面的分析可知，相比于传统规划方式，C-RAN 可以节省载波配置总数量的 25%左右。

类似地，湖南的部署测试也同样是根据 GSM 的覆盖区域的话务量来确定最终的 BBU 资源配置数量。

第二，动态基带资源分配技术。在 TD-SCDMA 系统中，每个 RRH/扇区可以支持最大 6 个 R4 载波和 HSDPA 载波。当小区处于空闲状态时，RRH/扇区上仅分配一个 R4 载波和一个 HSDPA 载波，增加 R4 载波配置或增加 HSDPA 载波配置有不同的判决准则。对于 R4 语音业务载波，已存在的 R4 载波上若码道利用率持续一定时间超过某一设定的占用比例，则启动载波新增流程。对于 HSDPA 载波，原理相同类似，只是增加载波的条件是根据 HS 载波的吞吐量来判定。相反，若 R4/HSDPA 载波上的负载很低且持续一定的时间，则载波所在扇区也可以动态减少载波分配。

GSM 系统的动态分配算法类似，也是根据码道的占用率来判断增加或减少载波的配置。

第三，RRH 级联技术和光纤保护技术。这一技术来源于分布式 BBU-RRH 部署方案中的点对点光纤直驱连接技术。当 BBU-RRH 长距离拉远时，不得不考虑节省光纤资源的同时，需要针对外界因素影响造成的光纤故障做相关保护。TD-SCDMA 系统中，由于最新的 Ir 接口速率能够支持 6.144Gbps 的光口速率，容量可达到 15 个 8 通道载波，3 个 RRH 级联，最大能够支持一个三扇区宏小区内部的三 RRH 的 5/5/5 配置级联，因此一个 TD-SCDMA 宏站只需要一对光纤即可满足一个站的传输需求。在珠海测试中，一个接入环有 9 个站点，占用光缆中的 9 对光纤接入 BBU 基带池。

GSM 的 C-RAN 组网部署中，RRH 的级联能力是不同的。由于 GSM 的 Ir 接口带宽需求较小，其 RRH 级联能力更强。白光直驱可做到 18~21 级 RRH 级联，考虑环路保护时需耗用 2 芯光纤，白光直驱级联总传输距离最大为 40km，每环则可接入 4~5 个逻辑站点，耗用 2 芯光纤。结合实际部署中分析每个接入环的光纤使用量，现有传输网每接入环一般有 8~12 个物理站点，若每个物理站点均为 900MHz 及 1800MHz 双频网共站，则每接入环约有 16~24 个 GSM 逻辑站点，则需要在每接入环上构造约 4~5 个逻辑环，耗用约 8~10 芯光纤。随着接入环上逻辑站点数的变化，所耗用的光纤数也会发生变化。

第四，外场试验同时验证了室外部署的关键技术，包括远端供电解决方案等。广东珠海新建的 9 个 RRH 远端站没有机房，所以供电不能采用机房直流供电的形式，而采用了室外电源柜的方式。目前的室外电源柜，

基本满足了实际建设的需求。已有的室外电源柜具有很强的环境适应能力： $-40^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$ 温度范围，单相电压 $80\text{V}\sim300\text{V}$ 、频率 $45\text{Hz}\sim65\text{Hz}$ 交流电输入的情况下均可无故障工作；另外其具有一定的防雷能力，标准配置 C 级防雷。此外，电源柜还采用了防盗技术，确保无人看管情况下的设备安全性。无论是 GSM 还是 TD-SCDMA 方案均可以使用相同的室外配电技术。

技术性能验证结果分析

根据动态载波技术的原理，空闲时刻小区下的载波处理资源应动态分配给同一时刻下处于业务繁忙状态的其它小区。通常情况下，纯 R4 小区或纯 R5 小区只需要配置一个静态载波；R4/R5 混频小区只需要配置两个静态载波。在小区没有接入任何 UE 或很少用户的情况下，基带资源只需要满足静态载波的分配，这样大大节省了基带资源。下图是珠海测试中挑选的某个站点的全天动态载波分配过程的实测结果，蓝色部分表示小区载波容量配置变化过程，紫色部分表示实际业务量的变化过程，体现了基带载波池动态调整每个小区的载波配置数量对抗潮汐效应的能力。

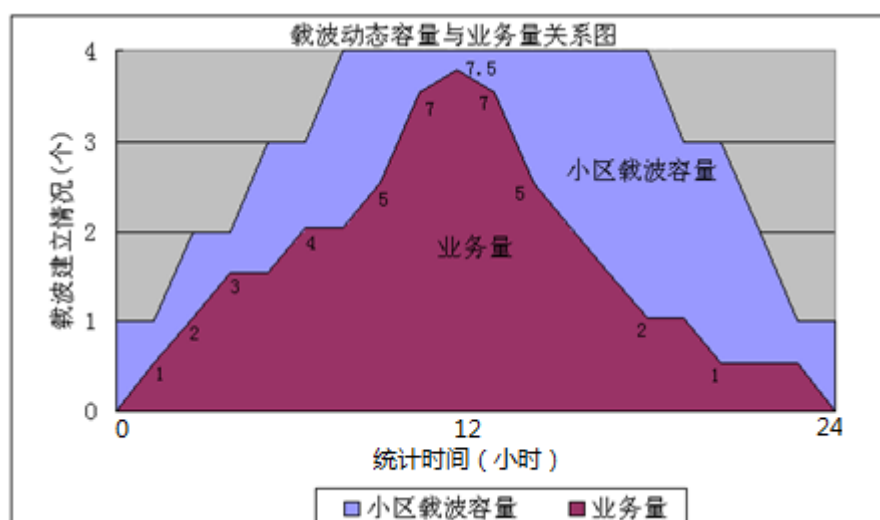


图 6-1: 载波动态分配

珠海测试中，为了验证载波动态调整的基带池共享技术引入后对于系统性能的影响，在打开和关闭载波动态调整功能前后对测试小区进行每小时的话务量和关键 KPI 指标采集。从 KPI 的指标看，动态载波调整技术对无线网性能没有明显的影响。

不同于珠海，由于引入了多 RRH 共小区技术，湖南长沙的 GSM 组网测试体现了集中化基带池的无线性能优势，提升了用户感知度。其结果表明，多项 KPI 指标明显上升，其中上行接收质量平均值提升了 $2\%\sim3\%$ 左右，部分网络改造前有通话掉话现象的区域，在改造后掉话率因上行信道质量的提升而减小至 0。再有，在共用同一 BBU 的 C-RAN 站内切换，切换时延也可以看到明显减小。另外，对保护倒换功能进行了进一步的量化测试。在湖南长沙的 C-RAN 测试中，保护倒换引起的业务中断仅相当于一次跨 BSC 或者跨 MSC 切换的业务中断。所以保护倒换引入的业务中断的影响是非常有限的。

总之，从性能指标的角度，C-RAN 并没有引起无线性能的恶化，相反基于集中部署的特点引入的某些技术可以使无线性能略有提升。传输上，光纤保护技术相对可靠，RRH 级联技术也可以达到降低光纤使用数量的目的，室外电源方案也较可靠地满足了室外 RRH 的供电需求。但已验证的传输方案仅限于白光直驱方案，对光纤资源的依赖性较强，后续还将进一步验证其它的传输方案。

经济性分析

广东珠海部署验证的结果显示，与传统基站部署模式相比，在与 GSM 不共站址的情况下，C-RAN 集中化的部署方式可以显著地降低新建 TD-SCDMA 网络的建设成本（CAPEX）和运营成本（OPEX），其中 OPEX 节省较为明显，可以降低 53%，同时 CAPEX 也获得 30% 的成本降低。

9 个新建站的 CAPEX 和 OPEX 的成本占用比例图表如下所示：

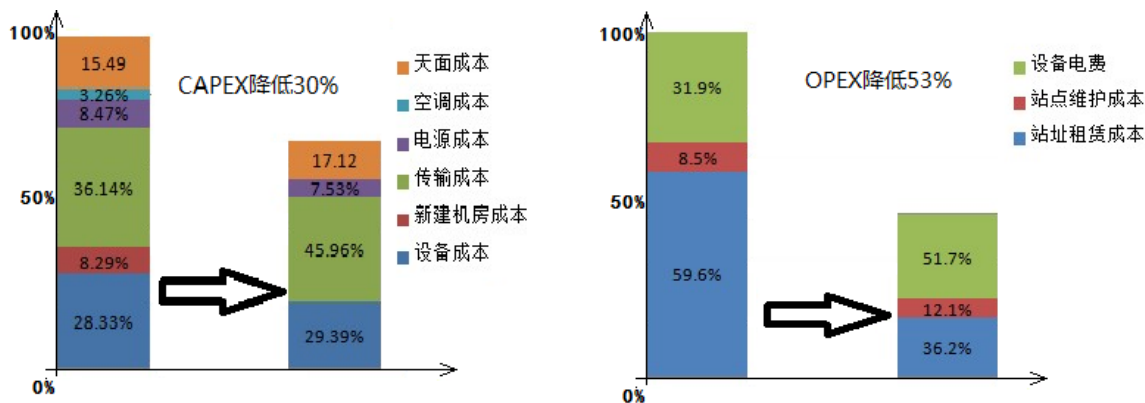


图 6-2：集中化部署经济性分析

在 OPEX 方面，节省的开支包括：空调电费、机房房租、常规巡检支持、故障/升级导致的人工需求。其中，由于远端仅有 RRH，所以仅需室外天面的租赁费用，而不需要租赁房屋，因此大大节省了运营费用，珠海地区的站址租赁成本是运维总成本的主要组成部分。

在 CAPEX 方面，节省的开支包括：新建机房成本、部分主设备的成本节省、配套设备投入（电源、空调、传输设备、监控设备等）。由于 BBU 主设备的汇聚有效地对抗了潮汐效应，从而降低了所需载波处理资源的总数，主设备的成本也因此降低。另外，房屋的新建装修成本和空调的费用等，也占很大的比重。C-RAN 部署节省了此类开支。

在 GSM 部署试验中，也有类似的 CAPEX 和 OPEX 的分析结果。但由于各地的具体情况不尽相同，有些是 GSM 与 TD-SCDMA 共站址建设，因此仅仅集中化部署单一的制式并不能节省站址的租金和空调等费用。另外，有些地方的站址租赁费用主要体现在天面的租用上，节省的房屋租金占整体成本比例不高，又因为考虑到具体的光纤扩容或新建铺设等不同的成本比重，CAPEX 和 OPEX 在不同地区会有略有差异。

总之，对于 C-RAN 的经济性分析，体现出了不同地区的多样化特性，总体来看是可以节省无线网络的运维和建设成本的，但在对光纤传输资源要求较高，传输投资可能增加，某些特定场景还需要独立的分析，并不可一概而论。除了降低 CAPEX 和 OPEX 外，由于 C-RAN 集中化部署方式在远端站点仅有小型室外电源柜、RRH 和天线单元，一方面使得远端站点不容易引起当地居民反感，选址更加容易，也减少了逼迁、退站的风险；另一方面远端站点的搬迁更灵活，大大降低了搬迁成本，减少了搬迁和退站带来的损失。

建设工期分析

由于 C-RAN 集中化部署方式大大简化了远端站点的选址和建设要求，大大减少了新建基站所需的时间，从而实现快速网络部署。以下是中国移动在广东省珠海市商用 TD-SCDMA 网络试验中总结的 C-RAN 集中化基带池部署方式和传统的基站建设模式的建设流程上的差异对比，作为工期缩短的原因列入表 6-1。

表 6-1. C-RAN 集中化基带池建网方案对工期影响

流程	传统建设模式	C-RAN 集中化基带池建设模式
选站址谈判	站址要求高，选址周期长	站址要求低，选择余地大
机房建设	需要租赁或建设机房	远端站点无需机房
外电	相同	
室内配套	需要结合配套设备到货情况分批安装	无需室内安装
传输	需安装传输设备，系统调试	无需传输设备，需进行路由调测
主设备安装	天馈及 BBU 安装	天馈安装及集中化 BBU 安装
调测	BBU 局址多，调测量较大	BBU 局址数量少，便于集中调测

图 6-3 所示是各个流程上所花时间的详细对比，C-RAN 集中化部署方式大大减少了新建站点所需的工期，其时间主要节省在选址、机房建设以及传输设备的调试等方面。

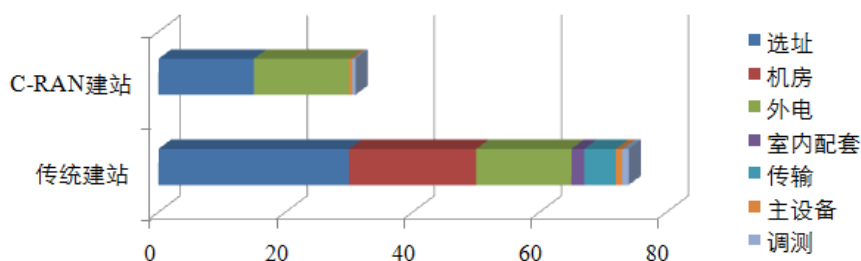


图 6-3: 建设周期比较

总结分析

在无线接入网络的建设方面体现了如下优点：降低选址难度，提高了前期选址谈判的速度；减少了基站建设的配套设备，加快了建网速度；减少了单站配套，新建单站建设成本降低约 1/3。在无线接入网络运维方面，C-RAN 集中化部署也带来很多优点：远端无线模块耗电少，运营成本低；无机房，无房租开支，减少了搬迁、退站的风险和退站搬迁的损失；远端无线模块设备少，简化了远端站的维护；集中化的 BBU 使得集中化的管理、升级方便。同时，C-RAN 的集中化部署并未影响现网的无线性能，甚至在新技术的引入后还提升了无线性能和覆盖率。

与优势并存，C-RAN 的部署也遇到了不少困难，传输采用白光直驱方案，即使引入了 RRH 级联技术，使用光纤的总数还是有可能超出网已有光纤资源的承受能力，旧有站点改造时需要考虑光纤资源是否充裕，如果不够充裕则需要重新铺设光纤，而铺设光纤对整个工程的影响无论从成本还是工时还是比较大的，在后续的试验中还需要进一步考虑其它的传输方式。另外，实际部署中，有些地区的地理特殊性造成必须考虑基带池汇聚节点的容灾备份性，而目前组网方案尚未包括大规模基带池的备份建设，这也是后续需要进一步研究和探讨的。

基于上面的优点和缺点的分析，建议 C-RAN 部署主要针对成片新建区域或替换区域，且需要部署区域内管道资源成熟，光纤资源较为丰富。C-RAN 部署由于无需机房及配套建设而适合覆盖区补盲快速建站。此外，在部署区域存在明显的话务潮汐现象的情况下，也推荐 C-RAN 部署，可发挥其资源集中调度、节约载波资源

的优势。

6.1.2 TD-LTE 的现网部署试验

在上一节 GSM/TD-SCDMA 的 C-RAN 现网部署测试中，C-RAN 集中化部署带来的种种好处，包括节约站址，缩短施工周期等已得到充分验证。然而，在部署过程中，我们也发现了 C-RAN 对光纤资源消耗高这一不足。这一问题在 TD-LTE 网络中尤其明显。以 TD-LTE 8 通道 RRU 为例，单 TD-LTE 载波所要求的 CPRI 带宽高达 9.8Gbps，传统设备往往采用 2 个 6G 的光模块来共同传输 10G 的数据量，换句话说，需要 2 对（4 根）光纤。不难看出，当汇聚规模增加的时候，TD-LTE C-RAN 网络对光纤资源的消耗急剧上升。因此，必须探索有效的能降低光纤压力的传输技术。

自 2011 年下半年开始，联合省市公司，中国移动研究院在成都、广州和福州三个地方开展 TD-LTE C-RAN 外场试验。此次测试的主要目的是验证 CPRI 压缩及单芯双向技术，如下图所示。

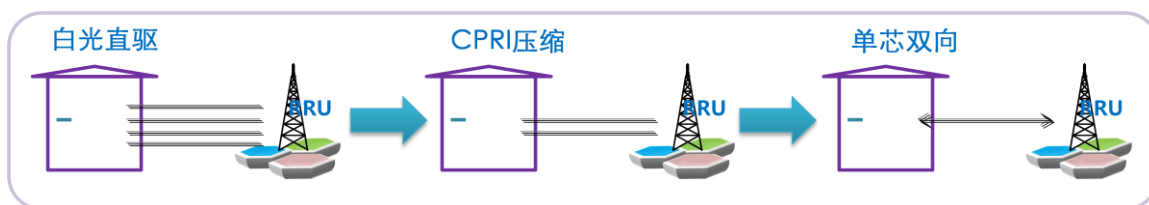


图 6-4: CPRI 压缩和单芯双向示意图

- 目前成熟的 CPRI 压缩算法已经能实现压缩比为 2:1 的无损压缩，因此，所需光纤数量可减少一半；
- 单芯双向技术通过利用不同的波长承载上、下行数据，在同一根物理光纤内传输，因此，可进一步降低所需光纤数量。

综合使用 CPRI 及单芯双向技术，使得 TD-LTE C-RAN 网络对光纤的消耗降低 3/4。

此次测试在成都、广州和福州三地同时进行，集中规模为 6~12 个站点，即 18~36 个 TD-LTE 载波。下图是福州试点的示意图，共集中了 6 个站，18 个载波。

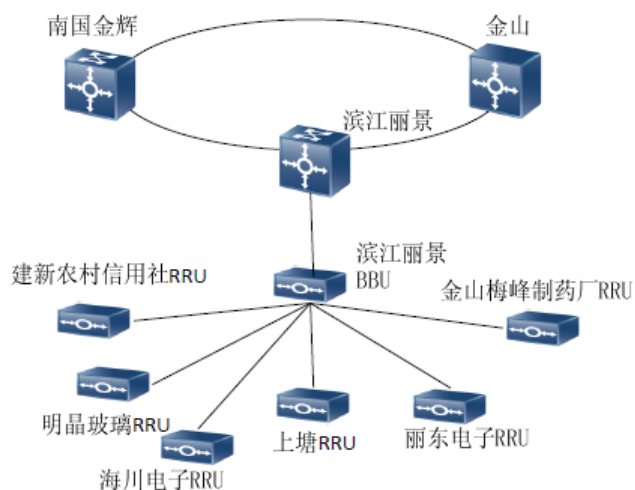


图 6-5: 福州 C-RAN 试点

此次测试中国移动 TD-LTE 扩大规模试验的一部分，采用 C-RAN 组网方式进行网络建设，主要针对在采用 CPRI 压缩以及单芯双向技术下的 C-RAN 网络性能，包括了全网吞吐量、网络时延、保护切换等进行测试。测试结果表明：目前 CPRI 压缩及单芯双向技术已近成熟，采用此两项技术的 C-RAN 网络 and 传统网络相比，性能基本没有差别。

尽管 CPRI 压缩和单芯双向的应用可节约光纤用量达 3/4，使得一个 8 通道的 TD-LTE 载波只需要 1 个光纤传输，但考虑到日后 TD-LTE 的大规模使用，我们认为，单纯应用这两项技术还远远不够。目前，中国移动研究院正在此基础上，积极探索更有效的其他前端传输技术，如 WDM 方案等。

6.2 C-RAN 架构下的协作化处理

C-RAN 架构可以提供强大的协作化能力，包括多小区协作式无线资源管理：通过多小区联合无线资源调度及功率控制等手段最大化系统内多个小区的总吞吐量，而不是单独考虑某一个小区的吞吐量；协作式无线信号处理可以有效抑制蜂窝系统的小区间干扰，提高系统的频谱效率。

本节以支持 CoMP 的 JP 协作化技术为例，给出了 TD-LTE 系统中联合处理（JP）在非协作和 C-RAN 架构下协作的性能比较，通过该仿真结果可以看到，协作化平台 C-RAN 打破了传统 BBU 板卡基站的模式，通过把协议栈中该集中的模块做了合适的集中设计，把协议栈中该分布式的模块做了合适的分布式设计，提供了协议栈的灵活架构，适应了 TD-LTE 把 L1/L2/L3 无线协议栈全部下移到 eNB 后的多小区协作的需求，为 TD-LTE 的大发展提供了平台支撑，必然极大地推动 TD-LTE 的发展。

仿真参数如表 x 所示，采用 TD-LTE 基站 8 天线、终端 2 天线的配置，在协作状态下，根据信道条件动态选择 2 个小区进行联合发送（JT），基站侧可以通过 TDD 信道互易性获取下行链路的信道信息。图 6-6 给出了非协作和协作时的下行频谱效率仿真结果，其中非协作时采用 MU-MIMO 传输，同站 3 小区协作和 3 站 9 小区协作都采用 MU-MIMO 传输。

表 6-2： 系统仿真参数

仿真参数	
双工方式	TDD （DL:UL=2:2）
天线配置	BS 8Tx, UE 2Rx.
CoMP 方式	动态 2 小区联合发送（JT）
信道估计方法	基于 SRS 非理想信道估计
信道模型	ITU UMi 信道

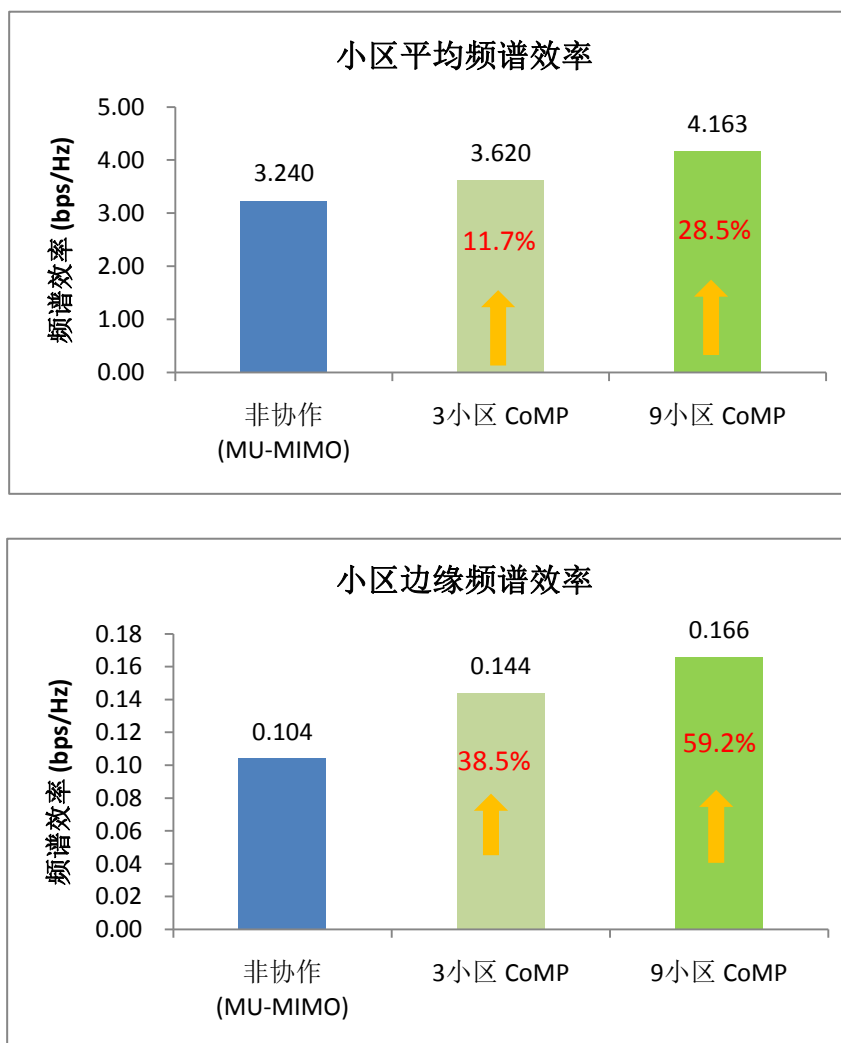


图 6-6: 协作与非协作下行频谱效率仿真结果

通过上述仿真结果可以看到，与非协作式传输机制（即 LTE-A 的 MU-BF）相比较，8 根发送天线模式时，在 ITU UMi 场景（站间距 200m）下，同站 3 小区和 3 站 9 小区联合处理能够分别获得 11.7% 和 28.5% 的小区平均频谱效率增益；在小区边缘用户的频谱利用率方面，上述两种协作场景可以分别获得 38.5% 和 59.2% 的性能增益。

为了得到更大协作簇下的 CoMP 增益，可根据理想六边形小区模型进行粗略估计。以同站 3 小区协作簇、3 站 9 小区协作簇和 7 站 21 小区协作簇为例，可将小区边缘区域分为同站协作区域、异站协作区域和干扰区域，如图 6-7 所示。可见，随着协作簇的增大，可以使更多比例的边缘区域获得 CoMP 增益，从而提升网络整体性能。同时，考虑到同站协作和异站协作的差异，两者需要区分统计。

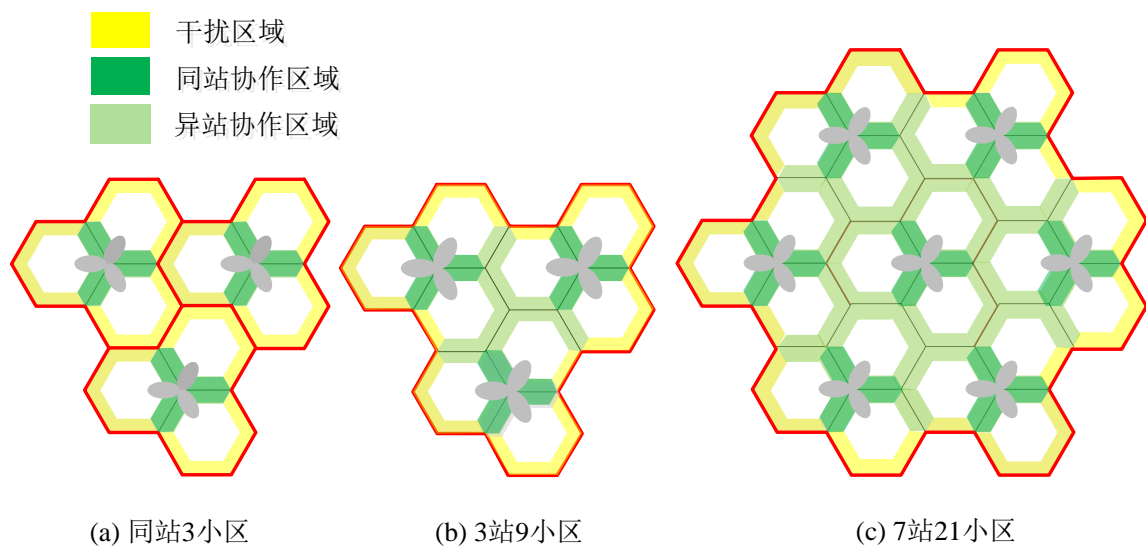
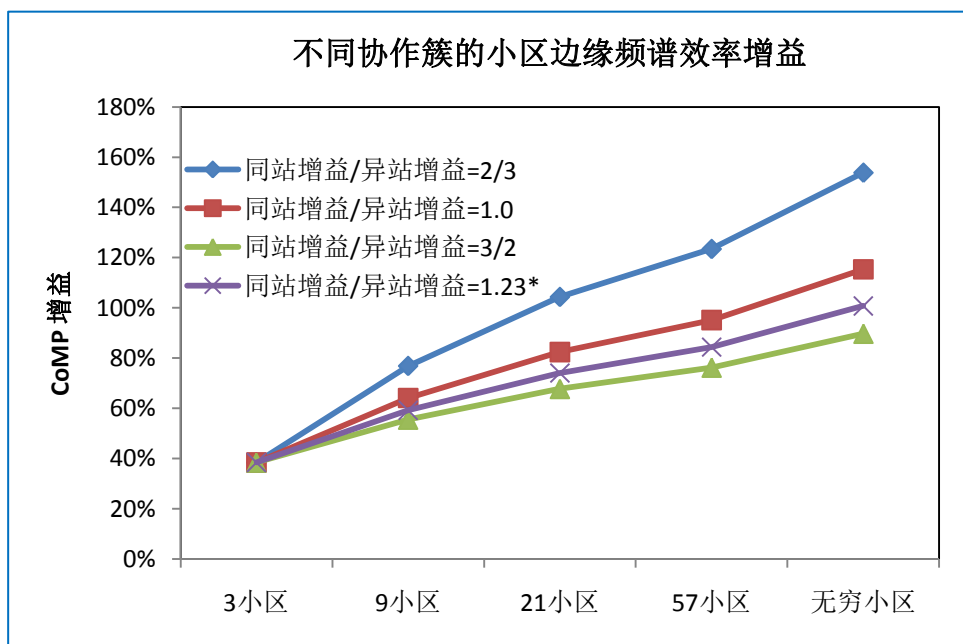


图 6-7：不同协作簇的协作区域示意图

根据上述模型，可以推算估计不同协作簇大小下的平均 CoMP 增益。考虑不同站间距下，同站增益和异站增益的比值不同。通常来说，站间距越小，异站 CoMP 增益越明显，因此同站增益/异站增益越小。图 6-8 中给出了不同协作簇下的不同同站/异站增益比例的 CoMP 增益曲线。从图中可以看到，随着协作簇的增大，CoMP 增益越来越高。随着站间距的减小，CoMP 增益随协作簇增大而提升的效果越明显。



* 同站增益/异站增益=1.23 是根据上述系统级仿真结果获得参数。

图 6-8：不同协作簇下的 CoMP 增益

6.3 C-RAN 基带池设备与原型机开发

6.3.1 大规模基带池设备研发

2011 年上半年，中国移动研究院联合合作伙伴，在现有的设备基础上，结合中移动研究院提出的 IQ 数据路由交换的方法，开发了支持上千载波的大规模基带池。几个合作伙伴的设备均取得了突破性进展实现了上千载波的大规模基带池。此大规模基带池基于分布多级的交换结构，具有高可维护性、易扩容等特点。本小节首先描述大规模基带池研发的核心关键技术——IQ 路数据交换，并针对其在通信设备中应用所作的适应性改进进行了描述。最后，简要描述了设备中的几个主要技术特点。

IQ 路数据交换结构

IQ 路数据交换单元是大规模基带池方案的核心部分，其作用是将任意 RRH 传输过来的数据交换到任意基带处理单元进行数据处理。这一数据交换结构来源于 DCN 技术中的 Fat-Tree（胖树）结构。此结构的好处是：

- 容灾容错性
- 更大交换能力
- 每个交换节点的能力要求低

Fat-Tree 网络拓扑是以计算机数字通信网的无阻塞连接为目的提出的。若计算机网络采用单根节点二叉树交换结构，任意两个分属不同下属分支的计算机间通信都会通过同一个根节点进行数据交换，此根节点的交换能力则成为了瓶颈。而 Fat-Tree 的拓扑结构引入了具有平衡负载能力的多根节点的交换结构。两层或者多层交换结构带来的好处是，任意一个高层节点与底层多节点均保持连接，那么多个高层节点互为备份，它们具有相同的连接和交换能力。这种结构下，每个交换节点的交换端口数相同，所要求的传输带宽也相同，所以相应地对每个交换节点的交换能力的要求降低了。底层任意一个处理节点与其它任何一个处理节点间均存在 1 条以上的通信连接。若其中一条连接中断或者异常，冗余的连接完全可以起到备份的作用，这就使得网络得到了高容错能力。如下图所示：

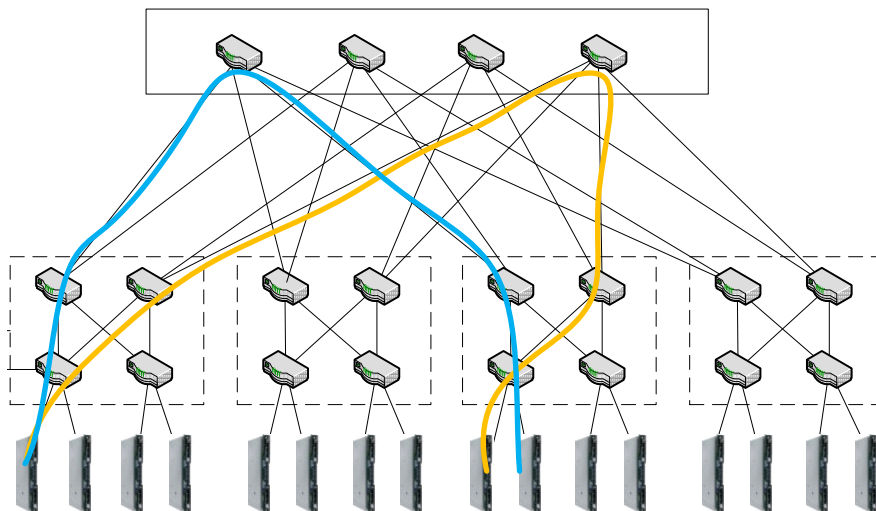


图 6-9：多级交换结构

反观目前已有的商用 BBU 设备通过堆叠基带处理单元，使用具有全交换能力的背板等，将 RRH 的基带 IQ 路数据交换给指定处理单元进行基带处理，从而形成一定的基带池的处理能力。这种方法的最大制约性在于多个机框设备之间进行互联导致的新增流量不能超过单台设备的背板容量，这就使得现有设备只能支持 2 个机框设备的级联。若考虑提升单机框的容量，增加更多的基带处理单元，同样对背板的交换能力提出更高的要求。因此，结合目前的设备现状与已存在的 Fat-Tree 网络结构，中移动研究院首次提出将 Fat-Tree 结构引入无线通信的 BBU 设备中。在不对现有设备做大的变动的前提下，增加一组高层交换单元形成 Fat-Tree 的拓扑结构将得到更强的交换能力和更高的基带池容量。与计算机网络工作原理类似，这种网络结构下，每个基带处理板可通过高层网络无阻塞地转交本属于自己处理的载波数据给任意一个相对空闲的基带处理板进行后续处理。进而，若在 BBU 基带池中配置多个冗余的基带处理板，则起到了冗余备份的作用，达到了实时保护的目的，从而提升了设备的可靠性。

不同于计算机网络，IQ 路数据的传输有一定的特殊性。

首先，IQ 路数据的时延要求高。基带处理信号是一种实时信号，受 GSM/TD-SCDMA/TD-LTE 等制式的空口帧结构的约束，每帧空口数据的处理都有严格的时序要求。因此 IQ 路数据的交换不能将属于同一个载波的数据包分不同连接发送至接收端，否则将导致接收端需要对所有的接收包进行重组排列而产生额外的时延。端到端的路由也不宜发生多次变更造成接收端快速时延抖动。基于此，中移动研究院提出了路由预分配技术解决这一问题。其原理为，连接建立前发起资源预分配流程，使得各个交换节点预留出足够的资源并将下一跳的路由端口固定化。

其次，IQ 路数据传输所需带宽较大，在路径选择时需考虑传输路径的负载均衡，否则过多依赖于某一路径易产生阻塞。因此中移动研究院提出了负载均衡技术，其原理为：对于一个交换/路由节点接收到一个数据流，该数据流的源地址标识为 Src，目的地址标识为 Dst，流（每个数据流传送的是 1 个或多个载波数据）的编号标识为 Num，交换/路由节点依据 Dst 查找路由表，如果该路由表存在多个下一跳满足要求，路由节点将根据（Src, Dst, Num）作为入参生成一个随机数，通过这个随机数来确定下一跳的地址，这就造成了路径选择的随机化。路径选择随机化的引入使得即使是相同的 Src 和 Dst，因为载波编号（Num）的不同而选择了不同的路径，从而达到了负载均衡的效果。

分布式架构

除了考虑 IQ 路数据的交换以外，还需要考虑大规模基带池汇聚后的资源管理和信令处理等功能的实现，因此引入了分布式架构。以中兴设备为例，单个 BBU 的基带处理机框模块完成 Iub 接口的信令和业务处理，按照单框最大容量 108 载波处理能力设计。通过分布式的架构可以解决大容量处理的问题，保留每个机框的业务处理单元，同时通过一个独立的以太网交换机完成资源管理信息的交互。每个机框都有独立的 Iub 接口，在逻辑上体现为独立的 NodeB 网元。除此之外，额外增加一个对整个机架资源进行管理的主控网元，用于控制各个物理资源的再分配。此方法扩容简便易行，增加一个机框，即新增一个独立的 NodeB 网元，并不会对其它网元的业务造成影响。另外，当发生基带处理单元设备故障时，发生故障的处理单元可在主控网元的资源再分配机制下，通过以太网交换机将原属于本机框处理的信令控制信息转发到再分配的机框。

6.3.2 基于通用 IT 平台的纯软基带原型机

中国移动携同合作伙伴 IBM、中兴、华为、Intel、大唐、法电北京研究中心等企业，以及北京邮电大学、中国科学院计算所等科研院校，联合开发了基于通用 IT 平台、同时支持多标准的集中式 C-RAN 原型机。目前此套原型机系统，在 GSM、TD-SCDMA 标准上已经完成了与商用终端通信的目标，TD-LTE 标准的原型机也

与模拟终端完成了测试工作。这一原型机证明了在通用 IT 平台上实现 GSM/TD-SCDMA/TD-LTE 物理层信号实时处理的可能性，为进一步实现更加灵活的软件和系统升级打下了基础。下面从硬件结构、软件架构、以及 CPU 处理能力等几方面介绍基于通用 IT 平台的基带原型机设备。

首先，设备的硬件系统拓扑结构如下图所示，在通用服务器上，Express PCI 接口可外插 CPRI/Ir 接口转换单板，GSM/TD-SCDMA/TD-LTE 三种制式的商用 RRH 通过此接口转换板，将 IQ 路信号引入服务器中并在此服务器中实现多种标准的并行、实时的上下行物理层、协议层处理。

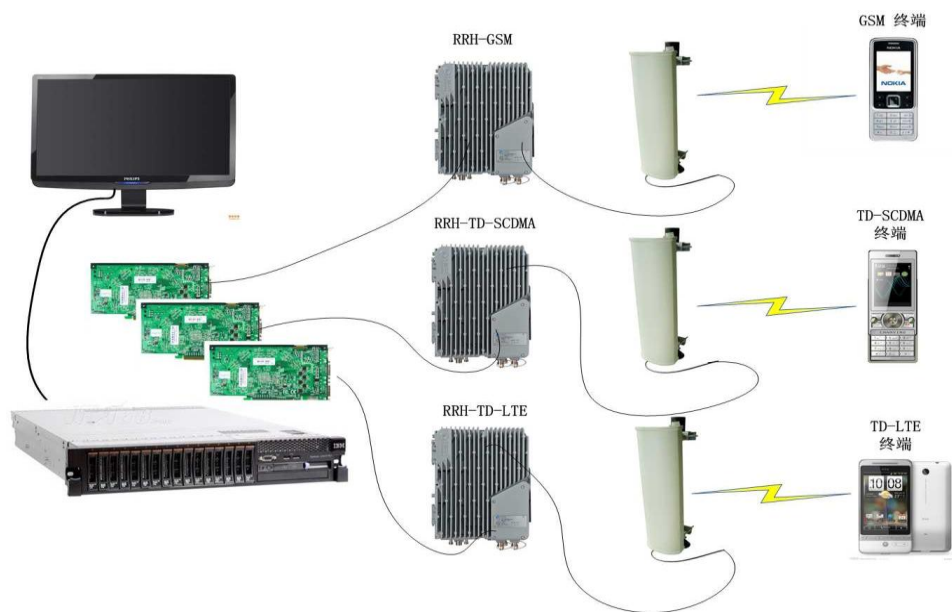


图 6-10: IT 平台拓扑图

其次，基带处理软件是在 Linux 系统下开发，考虑到设备开发的主要目的是验证 IT 平台对物理层数据的处理能力，因此本系统的软件功能并未涉及核心网的开发。截至 2011 年 10 月，这一原型系统已经在 TD-SCDMA/GSM 系统上实现了三层的协议栈，TD-LTE 系统则实现了物理层验证功能，将在未来实现 MAC 层调度等功能。LTE 验证系统的软件结构包括几个部分，如图 6-11 所示：Driver，OS，PHY，IP Tunnel 等，Driver 是直接和 RRH 通信驱动接口，OS 是实时操作系统（在 Linux 基础上改进而来），PHY 层为物理层处理模块，而之上为 IP Tunnel。IP Tunnel 的主要功能是将 IP 应用层的数据直接打包为物理层可以发送的数据包，而不经 MAC 等处理，因而此系统目前仅支持一个 UE 的调度能力。虽然并未按照商用能力进行软件设计，但验证 CPU 处理物理层信号的能力已经足够。由于后续考虑验证 CoMP 等 MAC 层算法的性能，TD-LTE 还将逐步完善，最终支持完整的底层三层协议，与商用终端直接通信。

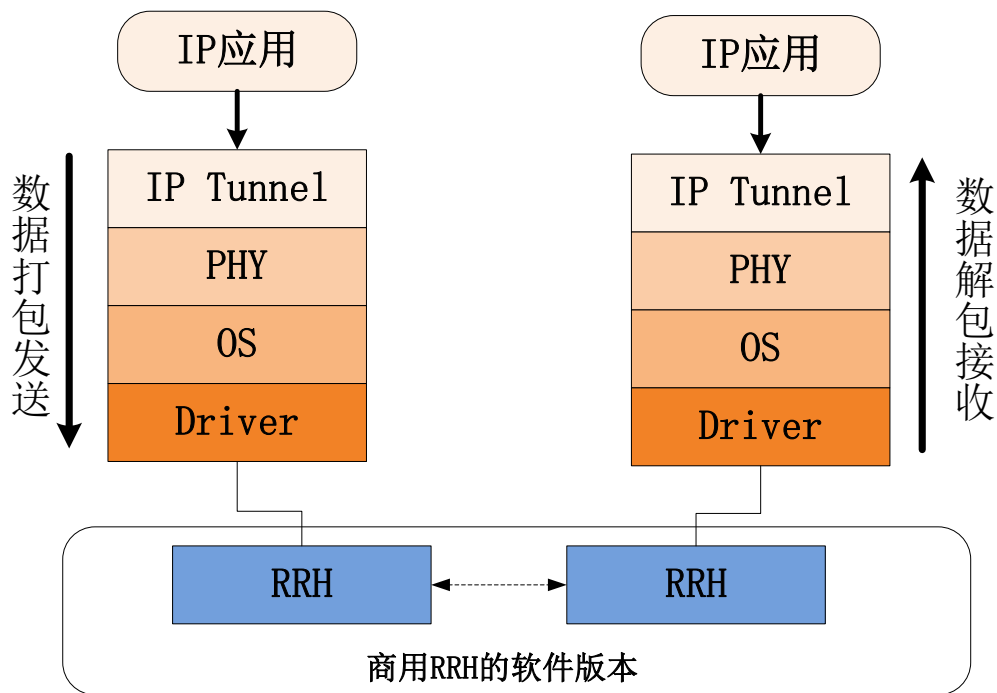


图 6-11: IT 平台的 LTE 软件框架

在通用 IT 平台上进行 GSM/TD-S/TD-LTE 无线信号和协议的实时处理，最大的挑战就是系统能否保证所有的信号都能在协议严格规定的时间能实时处理。对于 GSM，实时处理意味着每个长度为 40ms 的物理帧信号在 40ms 内处理完就可以；而对于 TD-SCDMA，实时处理的要求是 5ms 的物理帧信号在 5ms 内处理完；对于 TD-LTE，则处理延迟最为苛刻，其物理层 HARQ 的反馈时序要求实际上要求每一个 1ms 的子帧信号在 1ms 的时间内必须处理完毕。

传统的 IT 平台虽然处理能力很强，但是常见的操作系统并非为严格实时任务所设计，子任务的调度延迟，资源分配都不能保证在 1ms 这样的级别上。另外，IT 平台一般也缺少严格的时间定时能力，这些都是基站所必需的。最后，传统的信号处理算法设计都是为 ASIC, FPGA, DSP 之类的硬件构架设计的，对于如何最大限度地利用 IT 平台的处理优势，同时避免 IT 平台的劣势（比如 bit 级处理）没有很好的优化，因此，在传统观念上，IT 平台不可能高效率地完成像 LTE 这样复杂度的实时无线信号处理。

然而，这些技术挑战已经被证明是可以通过借鉴现有技术，并通过技术创新解决的。首先，在既有的通用操作系统上进行实时功能扩展，已经能够保证子任务调度的及时性和准确性，满足了最苛刻的 1ms 延迟要求。其次，通过在 CPRI/Ir 接口板上引入硬件定时和同步功能，很好地将需要“硬定时”的 RRH 及 CPRI/Ir 功能和更适合“软定时”的 IT 平台信号处理部分分隔开来。

最后，通过对通用服务器的 CPU 核处理架构进行深入研究，对相关的无线信号算法，实现代码都针对 CPU 的特点进行了优化，使得代码结构更适合 CPU 的处理，从而大幅提升了 CPU 的处理效率。全软件实现已经满足了 3GPP Release 8 标准的 TD-LTE 物理层收发的实时信号处理要求。TD-LTE 的性能参数为：20MHz 带宽，下行 2x2 MIMO，上行 1x2 SIMO，64QAM/16QAM/QPSK 调制，自适应提前终止的 Turbo 译码。上行接受和下行发射分别在最大峰值吞吐量配置下，双核协作处理下每子帧所需处理时间少于 1ms，完全满足 TD-LTE 标准中最苛刻的 HARQ 处理时延要求。处理 GSM 和 TD-SCDMA 信号更不在话下。

总结已有的设备测试结果可以看出，利用 CPU 处理基带物理层信号是可行的，单业务的实时性处理要求也

是可以满足的。由各模块的效率测试结果可以看出，子模块：Turbo 译码、卷积码译码、FFT 运算等在总处理流程中所占处理时间比例是很高的。未来若为 CPU 引入外部的协处理单元，则整体效率预计可以提高 5 倍以上。已经实现了 C-RAN 三模原型机与 DSN 大容量语音交换系统的对接，以 DSN 为新型的核心网，实现了 GSM、TD-SCDMA 和 TD-LTE 终端的语音互通。在可以预计的不久的将来，基于 IT 平台的基带处理技术，与大规模基带池技术结合、与 DSN 技术融合后，将会实现面向未来开放平台的大规模动态基带池，进而为未来向虚拟化、云计算化的 C-RAN 解决方案的演进做出重要贡献。

6.3.3 基于硬件加速器的基带池原型机

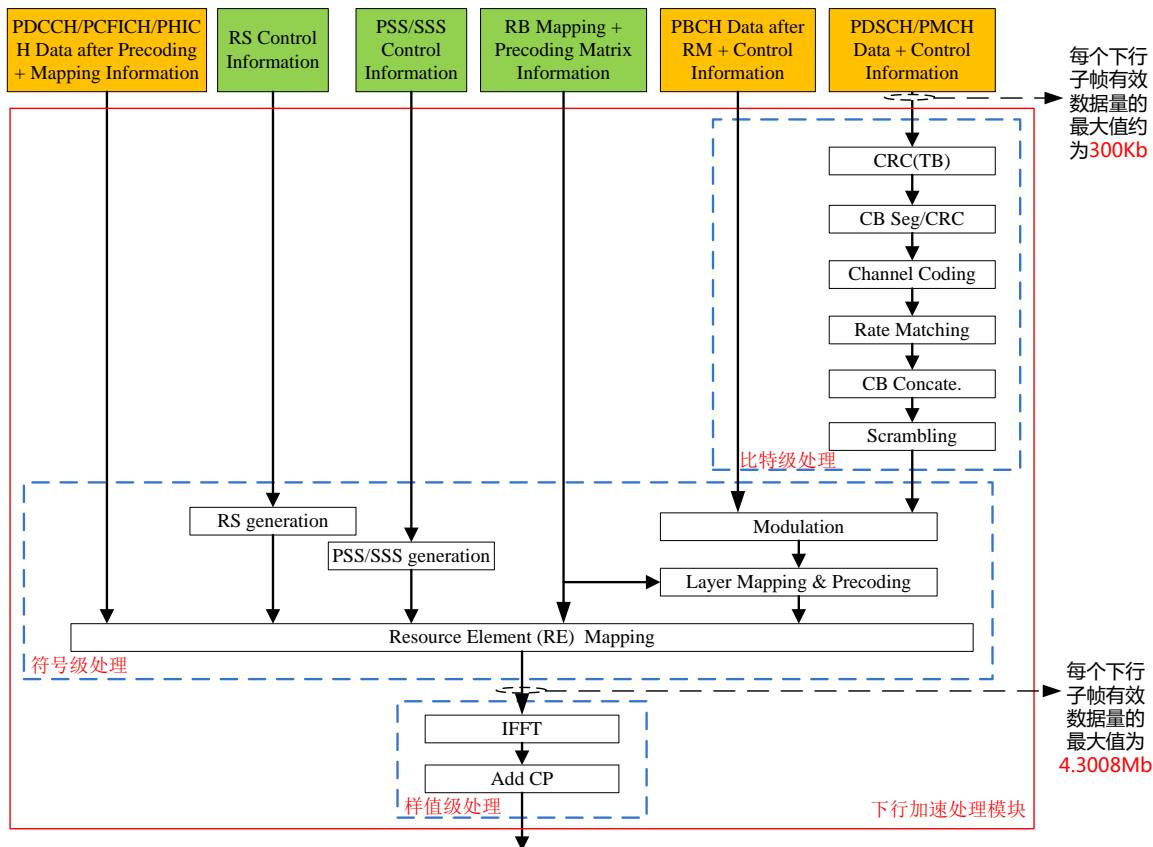
在基于通用平台的纯软件实现的基带原型机实现过程中，我们已经验证了利用 CPU 进行基带信号处理的可行性。然而，对各模块的效率测试结果表明，子模块如 Turbo 译码、卷积码译码、FFT 运算等在总处理流程中所占处理时间比例很高，分析结果进一步表明，处理一个 8 天线的 TD-LTE 载波物理层需要近 10 个 CPU 核，相应的性能功率比很低。由此可见，通用处理平台在对实时性要求很高，并且具有高复杂度的功能模块进行处理尽管可行，但效率很低，因此，我们提出：采用专用的硬件处理器，即加速器来对此类功能模块进行专门处理，从而让 CPU 更专注于层 2 层 3 的处理，提升全系统的性能功率比。

基于此思路，我们正在进行相关的原型机设计与开发。除了硬件加速器的思路之外，该原型机还将同时验证规模基带池功能。本小节将简略介绍该基带池原型机的硬件平台架构。

硬件平台功能架构

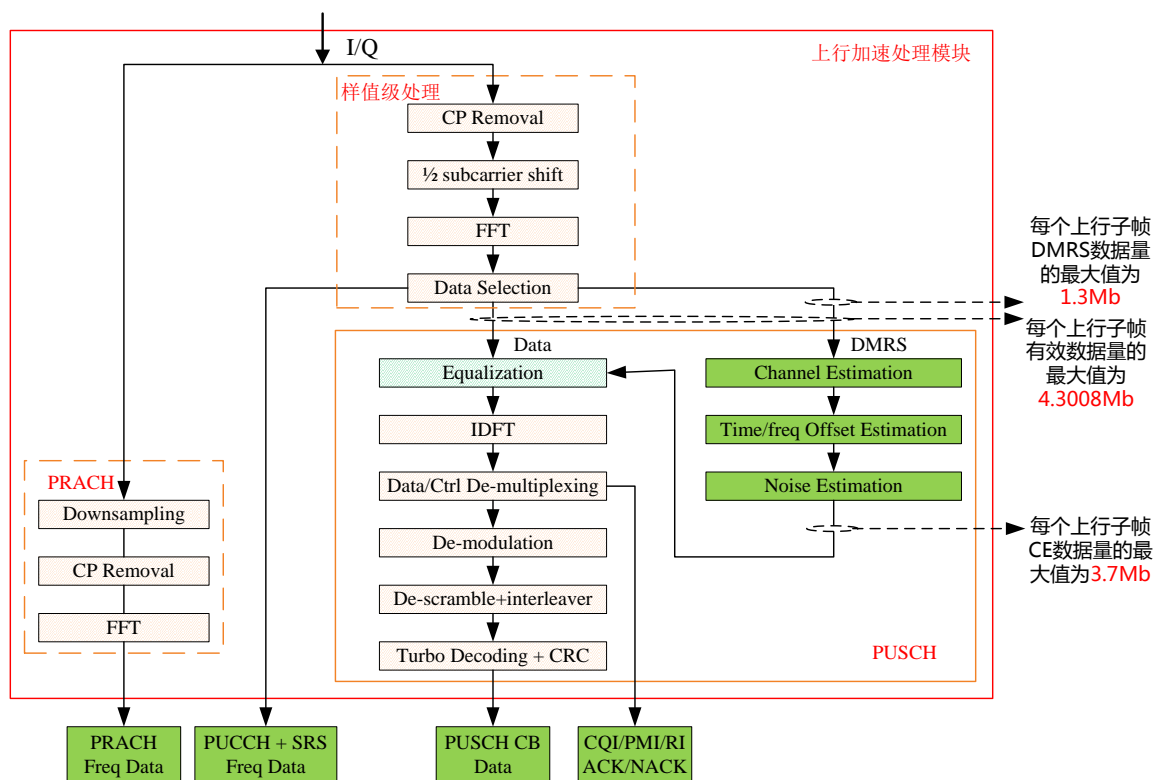
参考前期原型机性能和通用处理平台预研协议栈性能的评估，在下行发射处理链路中，计算负载较高的分别是 FFT、8 天线预编码和 Turbo 编码部分。位于两者中间的主要是部分比特级处理和符号级处理，包括比特加扰、星座图调制、层映射、空时处理等部分。这些中间处理部分的计算负载都不高，从计算能力和处理时延的角度分析，可以由通用处理器平台进行处理；但从接口上的数据交互次数和交互流量的角度分析，在硬件平台上处理更合理。

基于上述思路，我们提出了下行物理层功能划分建议，如下图所示，图中黄色方框表示物理层下行处理功能模块所需的输入数据，既包括信道的物理层参数，也包括信道承载的数据。如 PDSCH：对于每个用户来说，PDSCH 的处理既需要该用户来自 MAC 层的待发数据块，也需要对应于该用户的物理层配置参数信息，硬件平台上的物理层下行处理模块将根据配置的物理层参数对 PDSCH 上承载的 MAC 数据进行处理。另一方面，PDCCH 的比特级处理和符号级频域信号处理的算法复杂度低，可由 CPU 完成，与物理层下行处理功能模块调用处理接口，还需要增加这些频域信号的子载波映射位置信息。绿色方框表示，对应物理层处理模块仅需物理层配置参数输入即可，如 PSS/SSS 以及各种参考信号。这些参考信号的产生过程都遵循相同的算法原理，同时这些序列都可以通过有限的几个物理层参数经由确定的生成算法而产生唯一的序列。因此对它们来说，在接口上传递少数几个物理层参数要比在接口上传递产生的期望频域序列更为合适，可以降低接口上的数据传输带宽。



图** 下行物理层处理功能模块框图

同样，参考前期原型机性能和通用处理平台预研协议栈性能的评估，在上行发射处理链路中，计算负载较高的分别是 IFFT、PUSCH 的信道估计、均衡和 UE 数据处理中的 Turbo 译码部分。然而信道估计是上行接收处理中非常灵活的部分，在硬件平台上实现难以满足不同厂商的需求。PUSCH 的处理中位于均衡和 Turbo 译码中间的处理部分计算负载都不高，从计算能力和处理时延的角度分析，可以由通用处理器平台进行处理；但从接口上的数据交互次数和交互流量的角度分析，在硬件平台上处理更合理。上行加速处理模块功能框图如下所示。图中绿色方框表示该处理是由 CPU 完成，阴影方框表示该处理是由硬件平台完成。上行 CPRI 终结后的 IQ 数据直接在硬件平台上进行 FFT 变换要比将数据送回 CPU 再进行 FFT 调用更合适，可大幅地降低接口数据传输需求。但是在进行 FFT 前需要考虑 PRACH，因为 PRACH 与 PUCCH、PUSCH 以时分的形式存在同一个或多个子帧内。对于 PRACH 的时域信号，由于采样速率为 30.72Mhz，而 PRACH 占用带宽为 6 个 RB，实际上是处于过采样的状态（特别是格式 0~格式 3）。在接收机中，通常会采用数字降采样的方法来减少 RACH 时域信号的样点数，把天线口输入的过采样的 PRACH 时域信号降采样得到低采样率数字信号，通过滤波后，由 FFT 实现时频变换后，进行信号检测和峰值位置估算等算法处理。硬件加速器对经过 FFT 的频域信号进行 PUSCH 的 UE 数据分离、PUCCH 和 SRS 数据分离。最后将 PUSCH 的 DMRS 数据、PUCCH 数据和 SRS 数据分别上报给 CPU。由通用处理器完成 PUCCH 接收处理、SRS 信号接收处理以及 PUSCH 的信道估计、时间和频率偏差估计、噪声功率估计等。最终上述 PUSCH 的信道估计结果输出给硬件平台完成 PUSCH 后续均衡、解调及比特级处理。需要特别指出的是，均衡处理模块应该具有一定的可编程能力，可以满足不同厂商均衡方案的实现要求。同时，其支持的矩阵运算的最大规模为 8×8 ，并且需要支持同时处理多个小于最大规模（如 2×2 ）的矩阵运算。



图** 上行物理层处理功能模块框图

截至 2013 年 9 月，中国移动携同合作伙伴阿尔卡特朗讯、英特尔联合研发了基于简单加速器的可灵活扩展的基带池原型机。原型机实现了完整的 LTE/GSM 商用协议栈，并演示了与商用终端通信的能力。原型机系统架构如下图所示，其中，加速器仅实现了 Turbo 编译码、FFT/iFFT 功能。演示系统共配置 18 个 GSM 小区（支持 108 个 TRX）、9 个 2 天线 10MHz 的 FDD LTE 小区和 93 个 2 天线 20MHz 的 TD-LTE 小区。

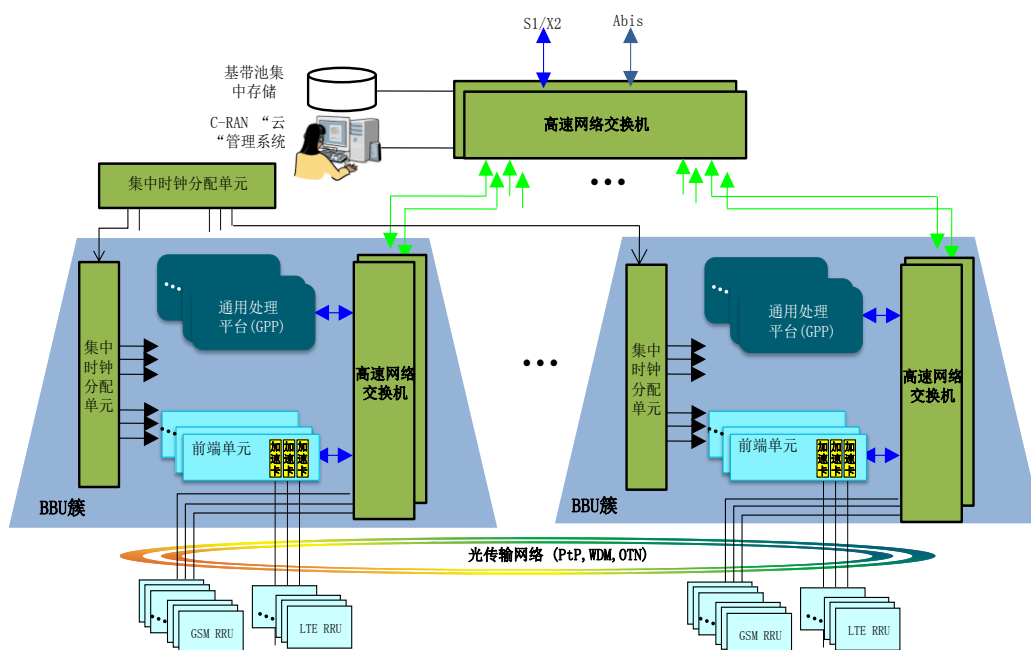


图 6-14: 基于简单加速器的基带池原型机系统架构图

经评估, 上述原型机处理一个 8 天线的 TD-LTE 载波需要近 4 个 CPU 核, 与纯软基带原型机相比, 性能功率比大幅提高。基于上述硬件平台功能架构增强加速器功能, 并兼顾 CPU 未来演进, 预计每个 TD-LTE 载波的处理资源可降至 1~2 个 CPU 核, 每载波功耗约为 15~20w。

为更多地获得基带池增益, 实现载波动态迁移等功能, 中国移动将与多家厂商合作进一步对系统结构进行改进, 探讨硬件平台的功能和接口定义。初步考虑, 硬件平台在逻辑上可以分为数字前端和加速器两个部分。

经过进一步评估, 基于上述加速器的基带处理系统支持一个 8 天线的 TD-LTE 载波物理层仅需 1.6 个 CPU 核, 相应的性能功率比大幅提升。目前, 中国移动研究院正在积极与多家厂商合作, 共同推进硬件平台产业发展, 探讨硬件平台与通用处理器平台之间的接口定义。

硬件平台在逻辑上可以分为数字前端和加速器两个部分, 并且在未来演进中数字前端和加速器可以各自成为基带池中的一个功能单元。

数字前端

数字前端实现 CPRI/Ir/OBRI 接口转换和样值级处理功能, 通过 PCI Express 接口直插在通用处理器平台上, 或者通过万兆以太网、InfiniBand 等二层分组交换接口, 连接基带池的交换网络, 与基带池内任意的通用处理器平台进行 IQ 数据交换。不同制式的网络如 GSM、TD-SCDMA、TD-LTE 等均可通过此数字前端, 将有效的 IQ 路信号引入通用处理器平台, 从而实现多种标准的支持。对于 LTE 而言, 数字前端功能主要包括: CPRI 处理, 下行资源映射、IFFT 和 CP 添加, 上行 CP 去除、FFT、UE 数据分离和 PRACH 处理。CPRI 处理主要用于匹配不同厂商的 RRH, 封装和提取 CPRI 中的 IQ 数据; 资源映射和 UE 数据分离, 即 RB 的插入和选择, 实现交换接口带宽与用户数据速率成正比; PRACH 处理降低载波动态调度的数据交换带宽。从而, 数字前端在 RRH 和大规模基带池的通用处理器平台之间形成了一种新的接口形式。

加速器

硬件加速器上集成部分物理层处理和 2 层加解密处理功能, 以硬件加速器的方式对通用处理器平台的物理层协议栈处理进行有效的支撑。对于 LTE 而言, 硬件加速器功能主要包括: 下行 PDSCH/PMCH 比特级和符号级处理、PBCH 符号级处理、RS/PSS/SSS 生成和所有信道的 RE 映射, 上行 PUSCH 均衡、符号级和比特级处理, 2 层加解密算法处理。硬件加速器不仅可以有效地提高系统的功耗性能比, 而且还可以降低硬件平台和通用处理器平台间的接口带宽需求。

6.4 C-RAN 虚拟化技术研究

云计算化是 C-RAN 的重要特征之一, 而虚拟化是云计算的关键基础技术。通过引入服务器虚拟化技术, C-RAN 系统可以在一个物理服务器上运行多个相互隔离的独立的虚拟 BBU 实例, 有效的进行服务器整合, 节省硬件资源, 降低系统建设成本。另外, 运行在虚拟机上的 BBU 可以根据忙、闲时业务量的变化以及潮汐效应, 动态的调配处理资源; 同时, 低业务量的 BBU 可以通过虚拟机在线迁移集中到少量物理服务器上, 并将空闲的物理服务器关电, 降低系统整体能耗。中国移动研究院联合业界各合作伙伴, 共同对 C-RAN 基于云计算虚拟化的实现方案进行了深入研究, 取得了诸多研究成果。

C-RAN 虚拟化系统架构

C-RAN 引入虚拟化后的系统架构可以表示为图 6-14。

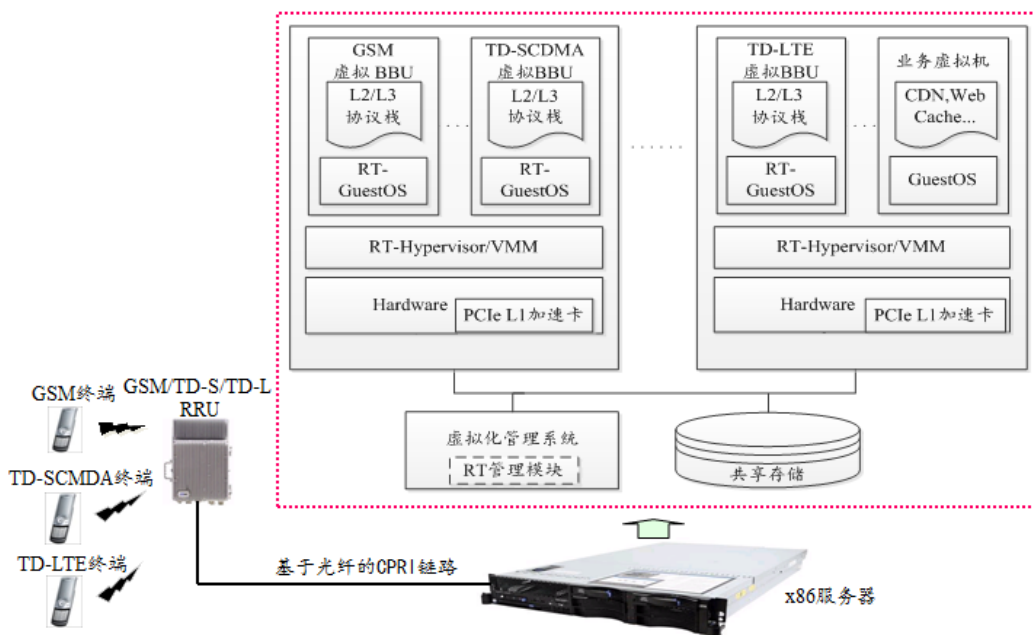


图 6-14: C-RAN 虚拟化系统架构

位于天面的射频拉远单元（RRU）通过基于光纤的 CPRI 链路连接到集中于数据中心的基带资源池，基带资源池构建在基于虚拟化部署的 x86 服务器集群之上，每台物理服务器上运行若干虚拟机，每台虚拟机根据网络运营的需求规划，分别运行支持不同无线标准（GSM/TD-SCDMA/TD-LTE）的基带单元（BBU）。也可以根据业务需要，将虚拟机服务于业务边缘化，运行 CDN 或 Web Cache 等内容。

C-RAN 将传统基站迁移到通用服务器并实施虚拟化，如何确定虚拟机与传统 BBU 的对应关系，即虚拟化的粒度问题，是值得研究与分析的。上图示意性的将一个虚拟机分配处理一个原有的 BBU，但是在实际部署时，也可以让一个虚拟机只处理 BBU 内的一个载波，甚至更小的单元。从另一个层面，也可以按照分层的方式划分，即一个虚拟机只处理一个 BBU 的 L2 层或 L3 层，或者处理一层中的某个部分。

根据虚拟机处理的通信协议的不同，如 GSM、TD-SCDMA、TD-LTE 的一个 BBU 对处理资源的计算能力、实时性等要求都不同，在实际应用中可以采取不同的虚拟化粒度划分方式。以对处理资源要求最高的 TD-LTE 为例，可以采用如图 6-15 的虚拟化粒度。

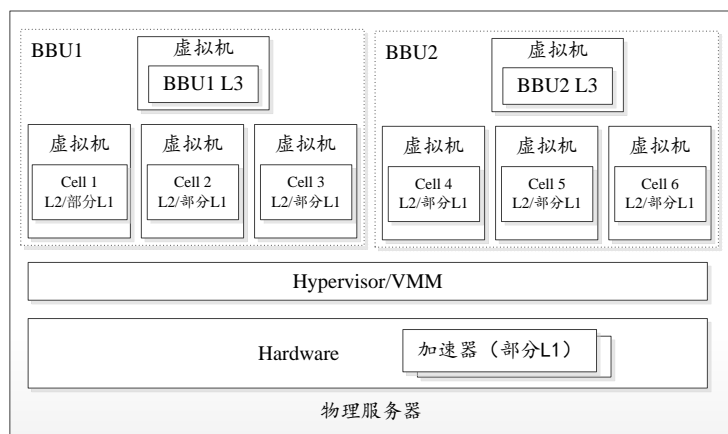


图 6-15: TD-LTE 系统的虚拟化粒度

实时性解决方案

C-RAN 将传统通信设备迁移到通用 IT 平台并实施虚拟化，面临的挑战是移动通信系统中无线信号处理的实时性问题。而对无线信号处理的实时性要求最高的是 L1 物理层，通过引入物理层硬件加速器的方法，可以将对实时性要求高的全部或部分 L1 信号处理放在加速器上，使用专用的 DSP、FPGA（商用后可固化为 ASIC）、SoC、GPU 等芯片进行物理层加速。

相对于 L1，L2/L3 的实时性要求低一些，可以放在服务器的虚拟机上，由 CPU 进行处理。但是，服务器虚拟层和其之上的虚拟机 Guest OS，需要采取一定的技术手段保证信号处理的实时性，也就是所说的实时云计算和实时虚拟化。采用实时操作系统是实现实时虚拟化的基础。考虑到开放性、通用性以及系统的总体成本，C-RAN 的当前研究主要采用 Linux 作为操作系统。从已有的研究情况看，Linux 内核集成实时补丁是比较适合 C-RAN 虚拟化的有效手段。通过引入 Linux 实时抢占补丁（PREEMPT_RT），并进行一系列参数配置优化，支持抢占和硬中断，改善锁机制和中断线程化，当内核收到信号处理的中断请求时，立刻响应并进行相应的处理，从而保证系统的实时性。

对于虚拟层 Hypervisor，也需要采用类似的实时解决方案。通过在 Hypervisor 或其所属的 Host OS 中集成实时补丁和参数调整，解决实时性问题。另外，还需要对 Hypervisor 进行优化，将虚拟化带来的额外开销降至最低，以保证其上虚拟机的实时性能不受影响。

对于 Hypervisor 技术类型的选择，除了要符合 C-RAN 要求的开放性和通用性以外，是否能够提供满足要求的实时性解决方案，也是虚拟化技术选型的基本要求。目前，中国移动研究院与合作伙伴一起，已经推出了基于 KVM 和 ESX 的实时虚拟化解决方案，并正在进行持续的性能优化研究。图 6-16 是一个经过优化的 KVM 系统的中断时延，其最大的中断时延可以控制在 14μs 之内[12]，基本已经可以满足无线通信的需要。

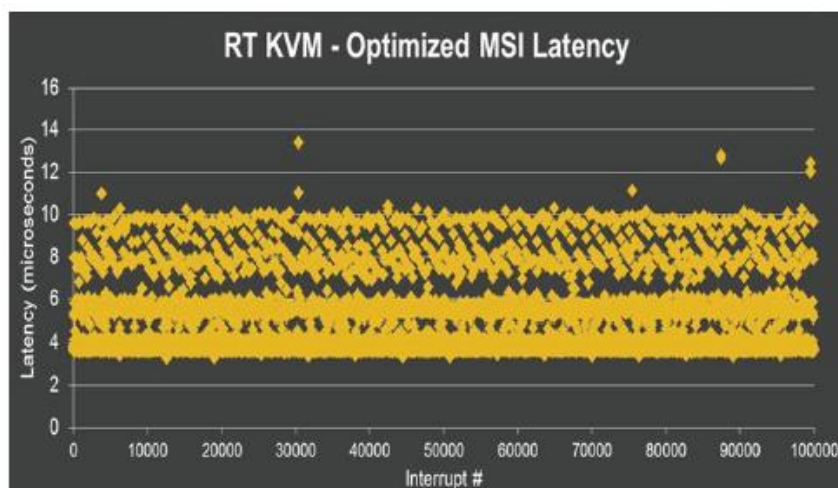


图 6-16: 一个经过优化的实时 KVM 系统的中断时延[REF]

对于虚拟化的管理功能，也必须满足 C-RAN 的实时性要求。以虚拟机在线迁移为例，传统的在线迁移的业务中断时间是不满足无线网络的实时性要求的，在实际应用中可能会出现虚拟机不能正常完成迁移过程的情况，必须采取一定的技术手段加以解决。中国移动研究院正在与合作伙伴一起研究相应的技术方案。

I/O 虚拟化

如前所述，C-RAN 需要使用 L1 加速器解决部分实时性问题，而 L1 与 L2/L3 之间的数据交互，对虚拟机和加速器之间的 I/O 性能提出了较高的要求。在传统的虚拟化环境中，由于 hypervisor 的引入，虚拟机与底层硬件的数据通信需要 hypervisor 干预调度，带来了额外的系统开销，造成 I/O 性能的恶化。因此，必须采用 I/O 虚拟化提高系统的 I/O 性能。由于物理加速器主要通过 PCI-E 接口连接服务器（无论直接采用 PCI-E 接口还是通过以太网卡间接使用 PCI-E 接口），采用基于 PCI-E 标准的 I/O 虚拟化技术成为 C-RAN 系统的必然选择。

对于一个加速器只服务于一个虚拟机的情况，可以采用 PCI Passthrough 技术。而对于一个加速器服务于多个虚拟机的情况，可以采用 SR-IOV。单根 I/O 虚拟化 SR-IOV（Single Root - I/O Virtualization）是单个物理服务器上的 I/O 虚拟化技术，是当前基于 PCI-E 标准的比较成熟的 I/O 虚拟化技术。通过将 PCI-E 接口的物理 I/O 通道分成多个虚拟 I/O 通道，在系统创建虚拟机时就为其指定专有的一个或多个虚拟通道，各虚拟机的虚拟通道都是独立的互不影响，加速器与各虚拟机之间的数据交互通过各自独立的虚拟通道完成，不再需要 Hypervisor 的干预与协调，能够极大的提高系统 I/O 性能。应用 SR-IOV 的服务器虚拟化架构如图 6-17。

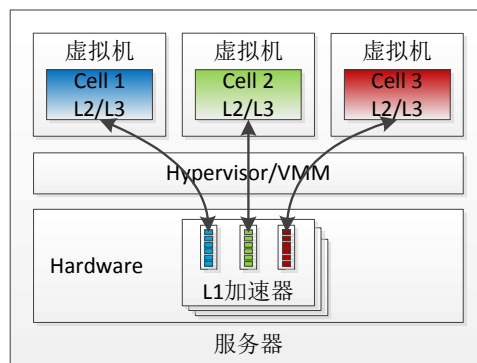


图 6-17: 采用 SR-IOV 的 C-RAN 虚拟化架构

SR-IOV 的应用也存在局限性，只能支持一台物理服务器上的 I/O 虚拟化。C-RAN 实施虚拟化的一个目的，是通过在线迁移，将相对空闲的虚拟机集中到少数物理机上，将空闲的物理机关电以降低能耗。然而位于物理机上的加速器需要与远端的 RRU 相连，不能关闭。物理机关电就必须为加速器单独供电，需要对服务器的特殊定制。另外，物理机与加速器的物理绑定，也造成系统维护的不灵活。

多根 I/O 虚拟化技术 MR-IOV (Multi Root - I/O Virtualization) 是在 SR-IOV 基础上发展而来的，支持多个物理服务器 I/O 资源的共享与虚拟化。通过将 PCI-E 设备从物理机分离并组成资源池，在资源池内统一进行 I/O 虚拟化。利用 MR-IOV，加速器与物理机可以解除物理绑定关系，由系统进行统一且灵活的资源分配与调度。目前 MR-IOV 技术还处于发展阶段，中国移动研究院希望与业界合作伙伴一起，推动 MR-IOV 产业与市场的成熟，其在 C-RAN 中的应用可以期待。

6.5 C-RAN 与业务的结合

随着 LTE 网络的商用和逐步普及，大量高带宽、低延时的移动数据应用将呈爆发式增长。对运营商而言，高利润空间的传统业务（比如语音和短信）持续下滑，运营商投入了大量网络建设和维护成本，最终沦为了 OTT (Over The Top) 互联网公司的“廉价管道”；运营商自营的数据业务也与 OTT 的数据业务竞争趋于同质化，白热化。现有的移动网络商业模式在不久的将来很难持续。对于运营商而言，在降低网络扩容成本的同时，更要提供优于 OTT 互联网公司的业务体验，提高用户的粘性。

另一方面，作为运营商的重要资产和与其他 OTT 互联网公司的重要区别，大量的无线基站一直未被充分利用。C-RAN 和业务的结合正是想挖掘运营商这一独特优势，在无线网络边缘，尤其是 C-RAN 的集中基带池的边缘部署业务，发挥边缘计算和存储的能力，这将对缓解网络拥塞和降低时延，为电信运营商提供优于其他 OTT 的差异化服务发挥极大作用。

6.5.1 基于通用处理平台基带池的边缘业务架构

基于通用处理平台的 C-RAN 基带池的边缘业务网络架构参见图 6-18，边缘业务和基带池软件共同部署在同样的通用硬件平台上，彼此之间用虚拟机进行安全隔离，保证可靠性。这种架构不仅可以扁平化海量流量，

节省网络负载，降低时延，提升用户体验，同时，利用通用处理平台和虚拟化技术也可提供低成本和快速的应用部署。该架构主要具有如下特点：

1) 分布式计算和存储：充分利用无线网络边缘的计算和存储能力，用户面可以实现本地缓存和处理。同时 C-RAN 基带池可服务 5000~10000 用户，保证了一定的集中度，使得缓存内容的命中率得到很好的保证，提高了系统利用效率，降低部署成本。

2) 无线 API：无线基带池侧开放无线相关的参数，提供实时、精细的网络环境信息，比如无线网络的位置信息，基于用户和小区级别的实时负载和无线链路状态信息等。可以为边缘业务提供实时的无线网络信息，为应用提供优化的空间，从而提升网络利用率和优化用户 QoE。

3) 通用平台和 IT 技术：具有完善的开发管理工具，能实现低成本开发、发布和管理。另外通用平台的开放性提供了快速迭代开发的能力，一旦出现了新的需求，在对主设备软件没有影响的前提下，很容易进行应用的实时更新和升级。

4) 与数据中心协作：分布式的运算和存储环境和集中式的数据中心能进行协作和互补，充分发挥运营商管道的能力，打造优于 OTT 的特色业务。

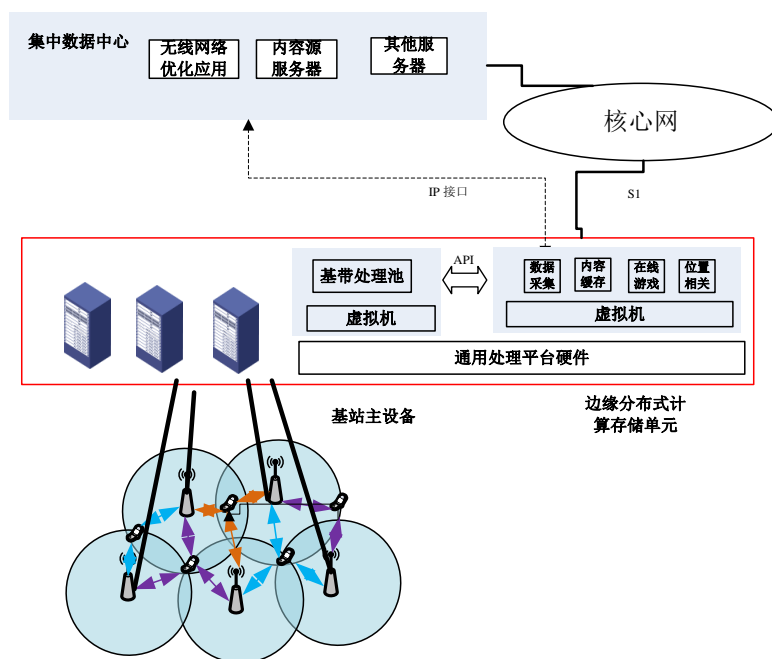


图 6-18: 基于通用平台的边缘业务网络架构

6.5.2 目前的工作进展

目前我们和 C-RAN 的基站侧主设备厂家和高层应用的公司进行密切协作，正在进行包括技术方案的研究、API 接口规范制定在内的多项合作。

我们首先估算了 LTE 网络商用后在未来 5 年的用户数、业务模型和流量，并对 CDN/Cache 业务的部署

位置、内容命中率等方面进行了分析。分析表明：C-RAN 的组网架构非常适合 CDN/Cache 的边缘化部署，在保证较低部署成本的同时，可实现较好的内容命中率，并对 LTE 的流量卸载的效果明显。举例来说：假设未来 LTE 用户数渗透率为 30%，总用户数约为 2 亿，用户发展较好的省公司超过 1000 万用户。以视频为例，假设约 10% 的用户每天 5 分钟视频，码流为 1Mbps。则所需的视频流量约为 200Gbps，单个省公司所需的流量约为 8Gbps。这些流量的需求对于城域网和骨干网都是不小的压力。为了应对以上挑战，将 CDN/Cache 分布化，下沉到无线侧，与 C-RAN 平台进行集成。假设 C-RAN 平台集中了 50+ 基站，用户量约在万左右，分析研究表明：内容命中率可达 30% 左右，实现了较好的分流效果。

此外我们制定了无线侧 API 的接口规范，目前已确定了用户、小区、eNB 等级别的几十种 API 接口参数，主要包括实时负载、实时 QoS、移动性、信号强弱、发射功率等信息。比如业务可根据实时的无线信息动态调整上下行的音视频编码率、图片和文本的压缩率等。业务还可定制无线状态信息上报的周期，并可根据用户/小区 ID 进行订阅特定的状态信息。基于规范要求，C-RAN 的基站侧主设备厂家正在进行相关 API 接口的开发。

另外，我们也在积极推进原型系统的开发和验证。图 6-19 是正在开发的原型系统架构。在 LTE 基带池之上部署数据路由的模块，可以实现用户面数据的按需分流。另外，无线 API 平台，可根据边缘应用的需求从 BBU 基带池获取基于用户、小区、eNB、基带池等不同级别的无线实时状态信息。我们目前主要聚焦两大类应用。第一类是内容缓存，在 C-RAN 基带池共平台部署 Web/视频类的缓存业务，根据用户的需求，实时缓存访问量较多的内容，并能根据实时的无线网络拥塞信息，实现视频码流的实时优化。第二类是 LTE 无线网络优化，在基于通用处理基带池平台上部署无线数据采集、处理和分发的软件模块，与基带池软件在本地进行交互，对无线网络优化数据进行“软采集”。数据采集模块只采集无线网络优化关心的数据，而不需要采集全量数据进行回传处理，可大大节省回传带宽和协议处理的能力要求。此外，通过采集逐用户、小区、eNB 的实时无线信息，形成无线信号的实时地图，可进一步用于覆盖、干扰和频率优化，流量监控、信号追溯分析和报警等典型的无线网络优化应用。

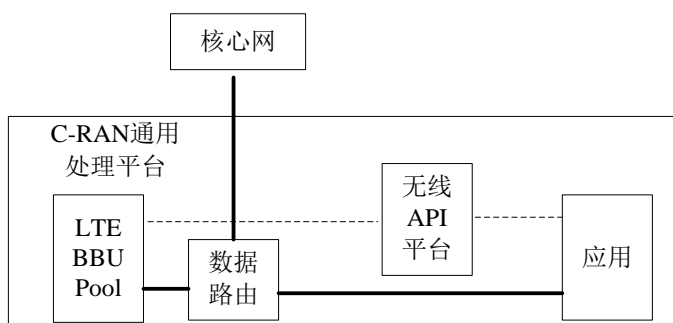



图 6-19: 边缘业务原型系统架构

我们在近期完成了第一台具备展示边缘计算能力的 TD-LTE 原型机系统。协议栈采用开源的 OAI 代码，实现了与商用终端的通信，并集成了三类不同的功能体现 C-RAN 与业务结合的巨大优势：

1) 集成语音解析功能。在终端侧安装语音收集软件，当终端上报语音信息给基站后，部署在基站侧的语音解析软件可将其转化为文字，并通过 TD-LTE 网络将解析结果下发给手机终端。由于边缘计算贴近用户，这一功能体现了边缘基站实时响应终端需求的能力。未来可进一步扩展为实时图像、视频的分析能力。

2) 集成了信号质量分析软件功能。当基带软件发现当前服务的小区用户掉话率高或干扰测量异常时，可



同步启动信号质量分析软件，将对应小区的 IQ 数据导入此处理软件中，实时分析当前空口发生的干扰及故障等异常情况，为快速定位网络问题提供手段。未来这一功能可演化为云测量功能，为运营商更好地控制和管理无线网络提供手段。

3) 开放 API 接口后的覆盖质量地图功能。这一功能提供给运营商监控各个基站测量参数的能力，可视化地得到全网运行的实时状况。

我们和产业界一起合作来推动边缘智能业务的研究、标准化、开发和试点商用。一方面是接口规范和主设备功能扩展。其中无线 API 的标准化是实现多主设备厂家和应用提供商互联互通必不可少的一步。另外由于用户面数据路由策略目前只支持相对静态的配置（比如 APN，网关位置信息等），对于边缘业务的应用有较大的局限性，所以实现灵活的用户面数据的路由也很重要，比如可根据业务类型等来进行路由等。除此之外，我们也希望能和业务提供商一起来挖掘边缘业务应用的更多场景，充分发挥边缘分布式计算和存储的能力。

7 演进路线

C-RAN 是一种网络建设构架，更是在这种构架下引入的一系列创新技术的结合体，因此 C-RAN 的部署一定是逐步演进循序渐进的过程。由于不同地区的原有建设背景不同，不同的制式也处于不同的建设阶段，因此 C-RAN 落地于不同地区面向不同制式也会有不同的具体形态。对于中国移动而言，2G/3G 网络并非未来建设的重点，且已按照传统建设方式成规模建设，未来相当长一段时间内，除机房的搬迁外，网络以稳定维护和扩容为主。而 TD-LTE 网络建设将成为重点，同是也是 C-RAN 部署场景的研究重点。结合 TD-LTE 建设进展和对未来的预测，C-RAN 的部署总体策略可分三个阶段，各阶段具体时间和在不同地区会存在差异性。

第一个阶段：TD-LTE 建设初期

全国主要城市以基本宏小区的覆盖建设为主，确保密集城区的无线宽带上网的覆盖需求。在这一背景下，宏站间、宏站内同频组网造成的小区间干扰问题将会是面临的主要无线性能问题。由于使用 D 频点组网而造成的站址密度增加，加剧了新建站址难选、原有站址升级建设困难等问题。

针对面临的部署难点，C-RAN 建设的主要场景将会是结合综合业务接入区建设的部署，将 3~5 平方公里范围内的小区集中于传输汇聚机房。同时，在部分站址选择过于困难的区域，采用微 RRU 拉远补盲、补热的方式，提升网络覆盖率，并提升覆盖区域内的频谱利用率。

针对无线主设备，BBU 需要形成基带池系统，引入协作化算法 CS/CB 或 JT/JR 等功能，对抗宏站间的干扰问题。同时，由于 TD-LTE 的同频组网要求和物理层关键技术特点，造成 TD-LTE 系统对于小区干扰更加敏感，对网络的优化和规划，有着更高的要求。因此，此阶段的无线主设备需要向开放平台逐步演进，在基于通用处理平台的 BBU 基带池上，部署第三方网络优化和网络干扰监听和侦测的高层应用软件，快速高效地实时分析网络存在的问题。为网络的优化和调整，提供有效的依据，大幅提升网络的质量。考虑到设备向通用处理平台需要有演进过程，可采用传统 BBU 与通用服务器共同部署的形式，渐进引入通用处理平台。

对于传输设备，除白光直驱外，引入 WDM 设备。可在光纤资源有限的场景下，大幅降低光纤资源的使用量解决传输问题。在完全不具备光纤资源条件或者成本过高的地区，可以考虑在“最后一百米”采用毫米波传输 CPRI/Ir/ORI 的解决方案。

第二个阶段：TD-LTE 建设中期

这一阶段下，网络的基本覆盖建设已完成。热点区域的容量要求和网络覆盖质量的提升要求将会是网络需要解决的主要问题。

针对容量需求。一方面，宏站将扩容更多的载波，并引入多载波聚合等技术，进一步提升了频率的复用率。另一方面，开通更多的微 RRU 拉远站，将大幅提升网络的容量，以满足空口流量需求的大幅上升。拉远微 RRU 与宏站 RRU 组成宏微结合的部署场景，将成为网络建设的重要场景。考虑频谱资源的限制，有多种可能的技术解决方案：宏微同频组网、载波聚合、用户面与数据面分离、宏微共小区等。

基于此，由于宏微不同 RRU 间的密切联系，宏微间共基带池设计将是必选的。对于无线主设备形成的基带池系统需要支持的特性包括：宏微结合的同频组网下的协作化算法、结合多载波聚合的 C/U 方案等功能。且同时为减轻整网的回传压力，利用基带池的通用处理平台特性，可部署 CDN/Cache 等高层 APP，将用户数据部分缓存于基带池内。无线主设备应是以通用处理平台形成的基带池、配以硬件物理层加速板卡为主。共平台特性将大幅降低无线主设备与 CDN 设备共存的总体运维成本。由高层业务引入带来的网络管理优势将进一步显现。



第三个阶段：TD-LTE 网络的大幅扩容

随着用户对于无线带宽需求量的增大。在远期的未来，TD-LTE 网络的建设朝高容量高带宽发展。容量的需求上升与频谱资源的限制将会是主要矛盾。因此部署更多的微 RRU 小站覆盖将会成为首要选择。由于网络的持续扩容，微站与微站间将会出现重叠覆盖。且由于微站部署数量的上升使得基带池的规模逐步扩大，BBU 基带池的汇聚效应将更加明显。

由于 BBU 设备采用开放平台并逐步演进策略，一方面原有的 2G/3G 设备可通过逐步软化替换部署于同一基带池的硬件资源上，真正实现多模网络的共平台，并共享处理资源。另一方面，越来越多的高层应用将会部署于 BBU 基带池内，这将有利于运营商更好地控制无线网络的行为，更有利于快速部署新型业务服务。这将避免传统运营商的逐步管道化，也提升传统通信运营商在面向互联网企业竞争时的整体竞争力。

8 C-RAN 国际标准化动向

自从 2009 年中国移动在业界首次推出 C-RAN 概念以来，出于网络建设过程中面临的实际问题，例如站址选取、成本增加等，越来越多的厂商和运营商逐渐认同集中化部署这一演进趋势。其中，已有不少运营商在其 LTE 网络中，大规模的采用了 C-RAN 集中化部署方式进行网络建设。与此同时，许多标准化组织里也有专门针对 C-RAN 的研究。

运营商的 C-RAN 部署

在光纤资源极其丰富的韩国，两大运营商 SKT 和 KT，不约而同的采取了 C-RAN 方式建设 LTE 网络。且具有较高的集中规模。以首都圈为例，据称，整个首都圈设有 10 来个集中机房，每个机房集中几百，甚至上千的 LTE 载波。在光纤资源同样丰富的日本，软银已率先在东京采用 C-RAN 方式部署 LTE，而 DoCoMo 也在今年 2 月官方宣布，将在 2016 年采用 C-RAN 方式部署 LTE-A 网络。

C-RAN 在各标准化组织里的研究

2009 年，国际运营商联盟下一代无线网络 NGMN (next-generation mobile networks) [13]成立了针对 C-RAN 的项目组，该项目 C-RAN 项目旨在通过 NGMN 国际运营商平台大力推广 C-RAN 概念，吸引运营商的关注，共同制定 C-RAN 需求，同时推动厂家进行关键技术的研究与开发，构建成熟完善的 C-RAN 产业链。该项目由中国移动牵头，得到了众多国际主要运营商，如 KT, SKT, 法电，及设备商，如 Intel, 中兴，华为，阿尔卡特-朗讯等的大力支持。该项目在 2012 年底正式结束，共输出标准化文稿 4 篇，不仅帮助运营商理解了 C-RAN 在成本节约、站点建设等方面具有的独特优势，同时还共同制定了 C-RAN 整体系统框架及相关需求，而且还推动厂家对 C-RAN 关键技术作了初步探讨，输出了系统解决方案并分析了 C-RAN 对标准化带来的影响。

作为项目的延续，2013 年 NGMN 里对 C-RAN 的研究纳入在未来无线网络演进项目之下，作为一个单独的工作组。该工作组在 2012 年 P-CRAN 项目的基础上，主要对未来 C-RAN 演进的关键技术，如基带池互联、基站虚拟化等进行深入研究，同时制定 C-RAN 前端传输网需求，该需求的制定将对 C-RAN 集中化部署具有重要意义。

另外一个不得不提的重要组织是 ETSI 下的 Network Functions Virtualisation (网络功能虚拟化, NFV) [14]工作组。成立于 2012 年 11 月，该工作组致力于实现网络虚拟化的需求定义和系统架构制定。其工作思路是借鉴 IT 业的开放与通用特性，更确切的，是“将 IT 领域内得到广泛并成功应用的虚拟化技术引入传统电信领域，通过采用标准 IT 服务器、交换机和存储设备达到实现传统电信网络功能（如路由，交换、基站等）的目的”。该工作组由 AT&T, BT, Deutsche Telekom, Orange, Telecom Italia, Telefonica, Verizon 几大运营商发起，目前已有超过 150 家公司参与，涵盖几乎所有 IT 和电信领域的顶级运营商、设备商和 IT 厂商等。

在欧洲的第 7 个科技框架计划项目 (Seventh Framework Programme, PF7) [15]下也有一些关于 C-RAN 的研究课题。例如 iJOIN [16]项目研究如何将无线接入功能进行云化，作为云服务提供给用户，并进一步研究在此平台下的接入与回传设计与优化等。另一个项目 MCN [17]主要研究以云服务形式提供移动通信服务的移动网络架构，包括“云”无线接入网。

9 总结

随着移动互联网时代的到来，当前的 RAN 架构和网络建设方式正面临着越来越多的挑战。众多问题亟待移动运营商来解决：智能终端的普及所导致的移动数据流量迅速增长，提升频谱效率的困难越来越大，多标准同时运营，潮汐效应下网络负载不平衡，和网络建设和运维成本不断增长等。

C-RAN 是一个能够解决上述挑战的整体解决方案。通过利用新近出现的技术趋势，可以改变网络建设和部署的方式，可以从根本上改变移动运营商的成本结构，并为用户提供更灵活更高效的服务。通过利用集中式 BBU 基带池和分布式 RRH 结合的部署方式，并结合采用开放、统一的平台，可以以经济而有效的方式降低无线接入网的建设和维护成本，实现先进的多点传输/接收技术、更灵活的多标准支持、更有效地应对潮汐效应、已及更好的 RAN 边缘业务支持等。最终 C-RAN 可以为移动运营商提供具有竞争力的基础架构，以保持激烈竞争的市场环境下的业务和利润同步增长。

在过去几年里，中国移动对 C-RAN 的探索取得了长足的进展。我们不仅在 GSM 和 TD-SCDMA 网络里较大规模地测试了 C-RAN 集中化部署方式，验证了 C-RAN 在网络建设里对降低成本，降低选址难度，加速网络建设等方面的优势，同时结合 TD-LTE 规模外场试验，验证了 C-RAN 在引入 CPRI 压缩和单芯双向技术后的性能和功能测试。结果表明：这两项技术已经成熟，它们的应用可节约高达 3 倍的光纤资源，且不影响系统性能。此外，目前我们也正在积极的推动和验证基于 WDM 的 C-RAN 前端传输技术，以求彻底解决 FrontHaul 问题。

在大规模基带池的研发方面，我们首先联合厂家共同开发了可支持上千载波的 TD-SCDMA C-RAN 系统，同时也在前期的基于通用处理平台的三模原型机的基础上，进一步研发了两套 C-RAN 的原型机。一套采用商用协议栈，在确保无线性能的基础上，证明了引入物理层加速器后通用处理平台的载波功耗比可接近专用平台。另一套，展示边缘计算能力对运营商创新网络运营模式、引入新型业务、更好地控制和管理网络等方面的优势。我们还将未来进一步验证载波实时迁移能力，提高系统的整体可靠性。

C-RAN 的最终目标是实现基带处理资源池的动态共享与分配，即：云化。为此，一种可能的实现途径是采用虚拟化技术。在此白皮书中，我们提出了一个实现 C-RAN 虚拟化的系统框架模型，研究表明：虚拟机的颗粒度设计，Hypervisor 的选择与优化，I/O 虚拟化等是实现 C-RAN 云化的主要难题。

尽管如此，C-RAN 的实现依然面临众多挑战。因此，我们诚挚地邀请所有移动运营商、电信设备厂商、传统 IT 系统厂商、以及关注未来 RAN 演进的产业界和学术研究机构积极参与到 C-RAN 关键技术的研究中，共同推动 C-RAN 愿景早日成为现实。



致谢

特别感谢中国移动研究院 C-RAN 项目团队，各位领导同事以及各合作伙伴对本白皮书做出的宝贵贡献。

英文缩写和定义

以下提供了本白皮书引用到的专业术语和定义。

3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
AIS	Alarm Indication Signal	报警指示信号
ASIC	Application Specific Integrated Circuit	专用集成电路
ARPU	Average Revenue Per User	每用户平均收入
BBU	Base Band Unit	基带单元
BS	Base Station	基站
CAGR	Compound Annual Growth Rate	年均复合增长率
CAPEX	Capital Expenditure	资本支出
CBF	Coordinated Beam-Forming	协作式波束赋形
CDN	Content Distribution Network	内容配送网络
CoMP	Cooperative Multi-point Processing	协作多点传输
C-RAN	Centralized, Cooperative, Cloud RAN	集中式/协作式/云计算无线接入网
CSI	Channel State Information	信道状态信息
CT/CR	Cooperative Transmission/Reception	协作发送/接收
DPI	Deep Packet Inspection	深度包检测
DSP	Digital Signal Processing	数字信号处理
DSN	Distributed Service Network	分布式服务网络
eNB	evolved Node B	演进型节点
FEC	Forward Error Correction	前向纠错
FTTX	Fiber To The X	光纤到边
FPGA	Field Programmable Gate Array	现场可编程门阵列
GGSN	Gateway GPRS Support Node	GPRS网关支持节点
GPP	General Purpose Processors	通用处理器
GSM	Global System for Mobile Communications	全球移动通讯系统
HW/SW	Hardware/Software	硬件/软件
ICI	Inter-cell Interference	小区间干扰
IQ	In-phase/Quadrature-phase	同相/正交相位
I/O	Input/Output	输入/输出
JP	Joint Processing/transmission	联合处理/传输
LTE	Long Term Evolution	长期演进
LTE-A	Long Term Evolution - Advanced	先进长期演进
MAC	Media Access Control	媒体接入控制

MIMO	Multiple Input Multiple Output	多输入多输出
MNC	Mobile Network Controller	移动网络控制器
OBRI	Open BBU RRH Interface	开放式BBU、RRH接口
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
OPEX	Operating Expenditure	运营支出
OTN	Optical Transmission Net	光传送网络
O&M	Operations and Maintenance	运行和维护
P2P	Peer to Peer	端到端
PA	Power Amplifier	功率放大器
PHY	Physical Layer	物理层
Pon	Passive Optical Network	无源光网络
QoS	Quality of Service	服务质量控制
RAN	Radio Access Network	无线接入网
RF	Radio Frequency	射频
RNC	Radio Network Controller	无线网络控制器
RRH	Remote Radio Head	远端无线射频单元
RRM	Radio Resource Management	无线资源管理
SDR	Software defined Radio	软件定义无线电
SFP	Small Form-factor Pluggable	小封装热插拔收发器
SGSN	Serving GPRS Supporting Node	GPRS服务支持节点
TCO	Total Cost of Ownership	总体拥有成本
TDD	Time Division Dual	时分双工
TD-SCDMA	Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access	时分同步码分多址接入
TEM	Telecom Equipment Manufacturer	电信设备制造商
TP	Transmission Point	传输点
UE	User Equipment	用户设备
UL/DL	Uplink/Downlink	上行/下行
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	全球移动通信系统
UniPon	Unified Passive Optical Network	联合无源光网络
VNI	Visual Networking Index	视觉网络指数
VoIP	Voice over IP	IP语音
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access	宽带码分多址接入
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波分复用
XENPAK	10 Gigabit Ethernet Transceiver PackAge	万兆以太网接口收发器集合封装
XFP	10-Gigabit Small Form-factor Pluggable	万兆小封装可插拔收发器



参考文献

- [1] Co-Platform Multi-Mode BTS (C-P MMBTS): Leading the Trend of Multi-Mode Network Convergence, white paper from In-Stat, 2009. Multi standard
- [2] Cisco Visual Networking Index, URL: www.cisco.com/web/go/vni
- [3] Geza Szabo, Daniel Orincsay, Balazs, Peter Gero, Sandor Gyori, Tamas Borsos, "Traffic Analysis of Mobile Broadband Networks", Third Annual International Wireless Internet Conference October 22-24, 2007, Austin, Texas, USA
- [4] CPRI Specification V4.1, Common Public Radio Interface (CPRI); Interface Specification. 2009-02-18
- [5] F.-Joachim Westphal. Trends and evolution of transport networks. SL SI, IBU Telco, SSC ENPS
- [6] 3GPP, R1-093273, SRS feedback mechanism based CoMP schemes in TD-LTE-Advanced
- [7] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst and M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 52, pp. 461 – 471, Feb. 2004.
- [8] L. U. Choi and R. D. Murch, "A transmit preprocessing technique for multiuser mimo systems using a decomposition approach," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 3, no. 1, pp. 20–24, Jan. 2004.
- [9] Jun Zhang, Runhua Chen, J. G. Andrews and R. W. Heath, "Coordinated multi-cell MIMO systems with cellular block diagonalization," Proc. 41st Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ACSSC' 07), pp. 1669 – 1673, Nov. 2007.
- [10] Rajesh Gadiyar, John Mangan, "Using Intel Architecture for implementing SDR in Wireless Basesations", SDRForum, SDR09'.
- [11] 分布式业务网络（DSN）技术白皮书, 中国移动通信研究院
- [12] John DiGiglio and Davide Ricci, "High performance, open standard virtualization with NFV and SDN", Intel and Wind River, 2014.
- [13] www.ngmn.org
- [14] <http://portal.etsi.org/portal/server.pt/community/NFV/367>
- [15] [Ec.europa.eu/research/fp7](http://ec.europa.eu/research/fp7)
- [16] www.ict-ijoin.eu
- [17] <https://www.mobile-cloud-networking.eu>



联系人： 黄金日
电子邮件： huangjinri@chinamobile.com

段然
duanran@chinamobile.com