



数据中心节能致冷技术与试验^{*}

林湧双, 丘文博

(中国移动通信集团南方基地 广州 510640)

摘要:以传热学的傅里叶定律为出发点,区别对待服务器内部的集中式和分散式两类发热源,首次提出了由“接触式”和“非接触式”两个具有显著热阻差异的通道组成的“双通道”数据中心致冷模式,其中利用“热管水冷模块+冷却塔”的“接触式”致冷通道高效排出服务器内部 CPU 热流。同时开展了试验验证工作,研制了“热管水冷服务器”样机,并通过测试数据得出了“可利用自然冷源对服务器 CPU 进行‘接触式’致冷”的关键结论。

关键词:双通道致冷;热管;水冷;互联网数据中心;45℃;服务器;CPU

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.08.017

Research and Experiment on Energy-Conservation Cooling Technique in IDC

Lin Yongshuang, Qiu Wenbo

(China Mobile Group Southern Base, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Beginning with Fourier Law and dealing with centralized and dispersive heat source in server with their merits, the architecture named parallel double-channels was proposed, which consist of “contact-type” and “non-contact-type” channels with significant difference on thermal resistance, and use the “heat pipe water cooling unit + cooling tower” contact-type-cooling-channel to remove the thermal current from the key-chips in server with high efficient. The verification experiment was organized, “the customized server with double-channels-cooling” was developed, and according to the experiment result, it is feasible to realize contact-type-cooling on the CPU in servers with natural cold source.

Key words: double-channels-cooling, heat pipe, water-cooling, internet data center, 45℃, server, CPU

1 引言

IDC(internet data center, 互联网数据中心)作为互联网的信息处理中枢,是信息社会和大数据时代不可或缺的基础性公众设施。当前,随着移动互联、电子商务、云计算与云存储等互联网业务的广泛兴起,IDC 需求量激增,全球范围内掀起了大规模建设 IDC 的浪潮,并且新建的 IDC 也越来

越趋于大型化。然而,由于传统模式的 IDC 在节能方面考虑不周,其需要消耗巨量的电力,这严峻地考验着各地区的能源供给能力。据估计,到 2015 年,我国的 IDC 年均消耗电量将达到 1 000 亿千瓦时,等同于三峡电站的年发电量^[1]。因此,革新 IDC 设计模式、降低 IDC 能耗和运营成本,已经成为数据中心业界一个相当现实和迫切的课题^[2,3]。

在传统模式的 IDC 中,致冷系统(由冷水机组、精密空

^{*} 广东省科技厅低碳科技重大专项基金资助项目(No.2012A010800032)

调、水泵、风机、冷却塔等组成)(笔者注:此为“致冷”非“制冷”,为表明本文所提新方案中 CPU 散热采用自然冷源而非冷水制备,以示差异)消耗了一半左右的能量^[4],是最耗费能量的辅助系统。为了减少其能耗,业内研究团队一直尝试的突破方向有两种:一种是将供冷的颗粒度不断细化,从传统的“房间级致冷”转换到“行级致冷”乃至“机柜级致冷”^[5],其基本技术思路均在于如何提升供冷精确度、隔离冷热通道、减少冷量泄漏进而减少浪费;另一种是引入自然冷源,机房内外的冷热空气在转轮或热管的作用下隔离传递冷量,甚至将机房外的冷空气清洁后直接对服务器进行致冷。然而,这两种方向均属于“非接触式”单一通道致冷模式,改变不了空气换热能力差、致冷通道热阻高、致冷系统工作温度低的缺陷,前者摆脱不了压缩机,后者适用的区域及时间段少,故而节能效果有限。

本文从传热学的傅里叶定律出发,基于服务器内部的集中式热源和分散式热源(具体定义见第 3.2 节)的不同特性,首次提出了由“接触式”和“非接触式”两个具有显著热阻差异的通道组成的“双通道”数据中心致冷模式。其中,“接触式”致冷通道针对 CPU 建立了“热管水冷模块+冷却塔”的高效直排式致冷通道,全程去除压缩机,可充分利用自然冷源。同时,通过研制“热管水冷服务器”样机并开展系统测试工作,初步验证了“双通道”致冷模式的可行性、可靠性和经济性,同时得出了“可利用自然冷源对服务器 CPU 进行‘接触式’致冷”的关键结论。

2 “非接触式”单一通道致冷模式的不足

对于传统的“非接触式”单一通道致冷模式,其基本原理可以由图 1 表示。

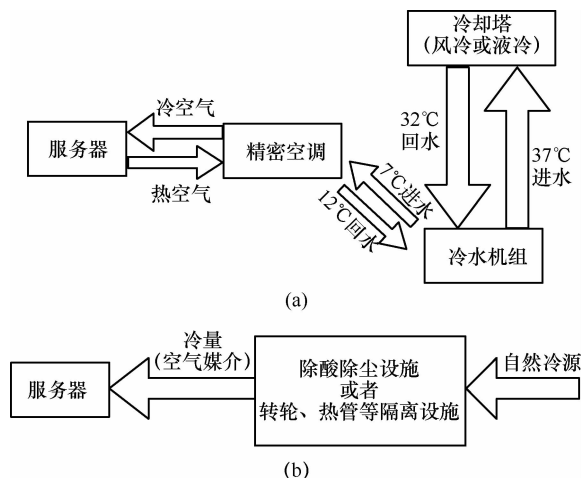


图 1 “非接触式”致冷模式的两种原理

这些类型致冷模式的不足之处如下。

(1) 服务器端散热效率低

由于空气比热容小、换热能力差,所以 IDC 机房内需要使用大量的空气来完成服务器端的散热;在开放式送风的条件下,需要配置大功率风机和风扇来驱动空气快速循环。

(2) 要求较低的环境温度

图 1(a)代表的系统中,由于要求机房内的环境温度保持在 22℃左右(若提高环境温度,则风机和风扇需要消耗更多能量以输出足够风量),需要使用 7℃的中温冷冻水来冷却循环空气,所以 IDC 机房需配置中温冷水机组,其中的压缩机处于深度压缩循环状态,从而需要消耗大量的能量。

(3) 存在“热岛”现象

服务器内部发热不均匀、CPU 发热密度高,造成局部区域供冷不足,在高负载率条件下 CPU 温度甚至可能高至引发系统瘫痪。同时,若长期处于高温工作状态,将降低 CPU 乃至服务器整机的性能和寿命(业内经验认为每提高 10℃的温度将导致服务器寿命减少一半)。

(4) 适用范围窄和附属系统体积庞大

图 1(b)代表的系统中,其正常运行所需要的条件是大气温度为 20℃以下,这决定了其只适用较少的区域和时间段。同时,由于利用空气作为机房内外的传热介质,要求 IDC 配备大体积的管道、转轮、热管系统和除酸、除尘等附属设施,机房面积利用率低。

3 “双通道”数据中心致冷模式

3.1 热流与温差、热阻的关系

数据中心的致冷过程遵循传热学基本原理。由傅里叶定律可知^[6],一维宏观条件下热流与温差、热阻的关系为:

$$Q = \frac{\Delta T}{R} \quad (1)$$

即:若热通道的热阻为 R (单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$),为了排走热流 Q (单位为 W),则热通道两端须加以 ΔT (单位为 $^{\circ}\text{C}$)的温差。在数据中心致冷系统中,要么提高致冷通道温差(一般是降低系统工作温度),要么降低致冷通道热阻,才能高效地排出热流。

不同换热方式的热阻具有数量级的差别。在同样的换热面积条件下,假设“空气—固体”之间的换热热阻为归一量“1”,则“水—固体”之间的换热热阻可低至 0.01,“固体—固体”之间的接触换热热阻可低至 0.001^[7],而“水相变—固体”之间的换热热阻可更进一步低至 0.001~0.000 1。



可见,在数据中心致冷系统设计中,从提高致冷效率的角度考虑,采用传统的空气导热方式进行致冷是不经济的。

需要指出的是,上述热阻 R 与流体(空气、水等)的流速有着密切的关系:流体的流速越高,则流体内部就能够越快地形成均温,越有利于将热端的热流高效地吸收过来,进而宏观表现为热阻越低。然而,由于驱动流体流动需要消耗电机能量,故数据中心也不能无限提高流体的流速。

3.2 服务器内部的两类热源

服务器是数据中心的负载和业务枢纽,同时也是数据中心的主要热量散发源。在服务器内部,可将所有发热源划分为两类。

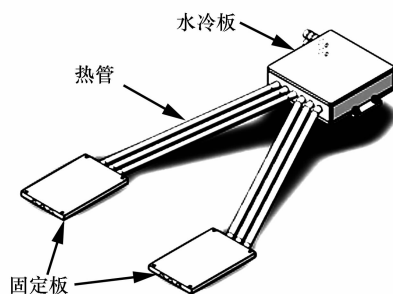
- 集中式热源,指 CPU,其特点是热流密度高,发热量大,占服务器发热量的 65%左右。
- 分布式热源,指除 CPU 以外的服务器组件,其特点是热流密度低,发热量占服务器发热量的 35%左右。

对于这两类热源,传统的“非接触式”单一通道致冷模式未能区别对待,而是统一使用冷空气来将发热量带走,导致了对机房环境温度要求苛刻并且效率低下:对于集中式热源,由于发热量大并且“空气—芯片”换热模式热阻大,空气与芯片之间需要建立巨大的温差(温差为 $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$,一般环境温度为 22°C 左右)以维持服务器的有效散热和正常工作。

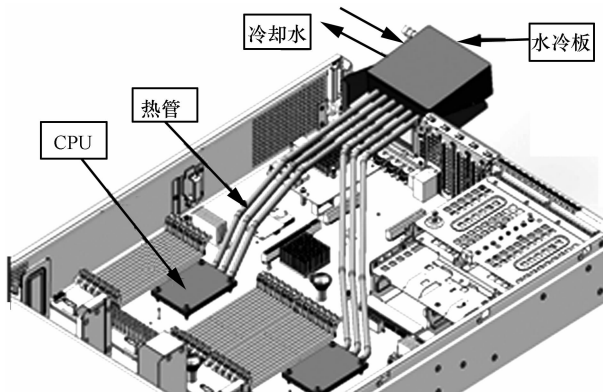
3.3 “接触式”致冷通道

针对集中式热源,建立“接触式”高效致冷通道,采用“热管水冷模块”直接将热量导出至循环水流中,其原理如图 2 所示。

在图 2 中,集中式热源的发热量就在由“芯片→热管水冷模块→水流”组成的“接触式”致冷通道中高效地传输。其中,热管是当前广泛应用于导热、均温等场景的功能部件,其依靠内部液体相变导热,导热能力非常高^[9]。由于“接触式”致冷通道全程弃用空气介质,仅有“水—固体”、



(a)



(b)

图 2 利用“热管水冷模块”带走集中式热源的发热量

“固体—固体”和“水相变—固体”等换热方式,整体热阻比单一“非接触式”致冷通道可低 2 个数量级,故而芯片与循环水流之间只需较小温差即可传导较大的热流量。

3.4 “双通道”致冷模式

从原理上讲,服务器的致冷可以采用单一的“接触式”模式,以实现完全的低热阻、高效致冷通道。但由于服务器的布局限制、元器件的尺寸限制等原因,采用单一的“接触式”致冷模式工艺复杂、成本过高,因此本文提出“双通道”致冷模式。

“双通道”致冷模式区别对待服务器内部的两类发热源,在 IDC 致冷系统的设计中安排了两个对应的致冷通道,其逻辑如图 3 所示。

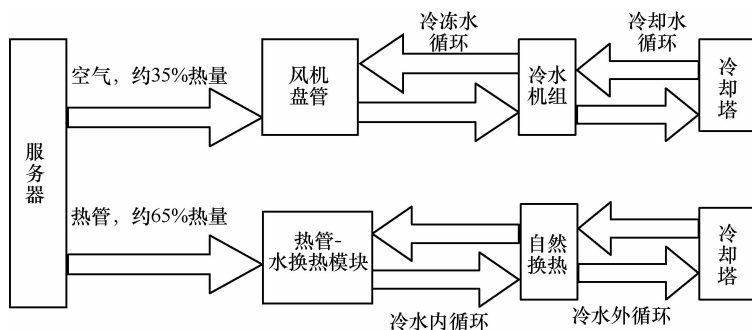


图 3 “双通道”致冷模式逻辑示意

(1)“接触式”致冷通道

利用“热管水冷模块+冷却塔”的方式直接排出集中式热源发热量,全程只有少量水泵和冷却塔等能耗设备。由于集中式热源一般可承受较高的工作温度(CPU 的安全工作温度上限为 80℃),同时“接触式”致冷通道全程热阻低,故而该通道中的循环水可以工作在较高温度,并可采用冷却塔直排的方式进行散热,可去掉压缩机和风机能耗。另外,由于“接触式”致冷通道处理了服务器 65%的发热量,这决定了采用“双通道”模式的致冷系统整体上具有较高的能效比。

(2)“非接触式”致冷通道

利用传统空气冷却的方式排出分散式热源发热量。由于集中式热源的发热量被高效导出,服务器的“CPU 热岛问题”被消除,故而服务器对入风温度的要求大大放宽,进而可以提高机房的环境温度至 30℃左右。在这个条件下,“非接触式”致冷通道可以采用高温冷冻水机组对机房循环空气进行致冷,进而达到更高的能效比(高温冷水机组能效比高达 10)。

3.5 效益分析

“双通道”致冷模式可为数据中心的节能效果、机房利用率和服务性能等方面带来丰富效益。

3.5.1 节能效果

传统方式中,所有的热量均需要使用冷水机组来冷却,并且必须采用能效比为 6 的中温冷水机组,则其功耗为 100%/6;采用“双通道”致冷模式之后,仅有 35%的热量(来自“非接触式”致冷通道)需要使用冷水机组来搬运,且可以采用能效比为 10 的高温冷水机组,则冷水机组能耗降低占传统方式的比例为:

$$\frac{35\%/10}{100\%/6}=21\%$$

至于水泵、风机等设备,也会有能耗上的节省;但由于这部分设备功耗的占比相对较小,计算时可忽略,不在本文呈现。根据研究分析,致冷系统整体能耗可降低至传统方式的 1/5 左右。

3.5.2 机房利用率

由于解决了服务器内部的 CPU 热岛问题,仅剩 35%的热量需要通过“非接触式”致冷通道带走,使得高功率密度机架成为可能,在同等条件下可以将服务器单机架功率密度提升至 10 kW。

3.5.3 服务器性能

由于“接触式”致冷通道热阻低、通道温差小,一般

情况下服务器 CPU 的温度可比传统模式低 10℃~20℃(根据测试结果,新方案与传统方案在 100%负载率的条件下的 CPU 温度差可达 20℃以上,详见表 1)。由于电子元器件的寿命与工作温度负相关^[9],则采用“双通道”致冷模式可使服务器整机性能获得提升,并能降低故障率、提高可靠性、提高寿命。

4 “热管水冷服务器”的研制与验证工作

通过以上分析可知,要验证“双通道”致冷模式的可行性和经济性,其重要前提是在服务器上进行“热管水冷”定制化改造,即研制“热管水冷服务器”。为此,本节介绍中国移动通信集团南方基地(以下简称中国移动南方基地)的相关研发、测试工作进展。

4.1 中国移动南方基地在 IDC 致冷节能方面的研究历程

自 2012 年 10 月起,中国移动南方基地启动了数据中心“双通道”致冷模式的理论论证工作,并联合曙光信息产业股份有限公司(以下简称曙光)、华为技术有限公司(以下简称华为)、广东新创意科技有限公司、华南理工大学等国内知名企业和院所组建研发团队,实施了“热管水冷服务器”的样机研制工作,取得了核心技术突破。

4.2 “热管水冷服务器”的研制进展

2013 年 11 月,中国移动南方基地完成“热管水冷服务器”的样机研制工作,分为以下两类。

- 曙光 x86 服务器:每台服务器双 CPU,每个 CPU 的 TDP(thermal design power,散热设计功耗)为 130 W。
- 华为 x86 服务器:每台服务器双 CPU,每个 CPU 的 TDP 为 135 W。

同时,本项工作建立了完善的配套软件、硬件测试平台系统,可对环境参数、服务器运行参数、循环水系统参数等进行调节,实现全方位的验证性测试。

图 4 为“热管水冷服务器”实物。

需要指出的是,为了确保测量准确性,在本测试平台中,对于温度的测量均采用外接传感器的方式,而不是采用服务器管理口读数的方式。

4.3 系统测试验证关键结论

为了验证“双通道”致冷模式的可行性,本文分别调整测试平台的环境温度、入水温度、水流量等参数,开展了大量的试验。表 1 为环境温度 30℃、CPU 负载率 100%的条件下,各服务器的 CPU 温度的测试值。

从表 1 中可以看出:CPU 与冷却水入水之间的温差为

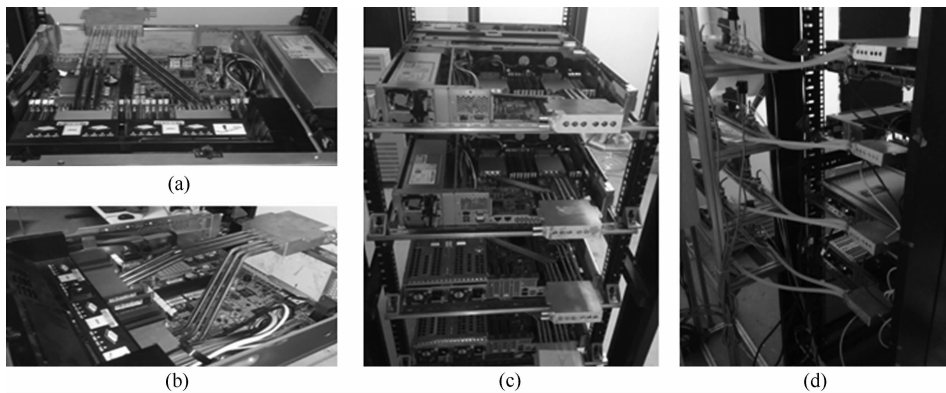


图4 “热管水冷服务器”实物

表1 水流参数变化情况下的CPU温度(环境温度30℃)

服务器类型		曙光定制化服务器		华为定制化服务器	传统服务器
水流量 0.5 L/min(CPU 负载 100%)	入水温度 25℃	CPU1	44℃	44℃	75℃~82℃
		CPU2	42℃	44℃	
	入水温度 30℃	CPU1	49℃	48℃	
		CPU2	46℃	48℃	
	入水温度 45℃	CPU1	60℃	62℃	
		CPU2	57℃	65℃	
水流量 1.5 L/min(CPU 负载 100%)	入水温度 25℃	CPU1	43℃	42℃	
		CPU2	41℃	42℃	
	入水温度 30℃	CPU1	48℃	46℃	
		CPU2	45℃	47℃	
	入水温度 45℃	CPU1	60℃	61℃	
		CPU2	57℃	64℃	

14℃~18℃。并且,从表1中可看到的一个重要结论为:在环境温度30℃、水流量0.5 L/min的条件下,即使采用45℃的水流作为冷却水,仍能保证CPU温度控制在60℃左右的安全温度上。由于在全球绝大多数地区、绝大多数时段均能够轻易获取45℃的水流,故而本方案具有高度普适性。

另外,考虑到实际服务器在绝大多数情况下运行于部分负荷状态,本文组织测试了不同CPU负载率下“热管水冷服务器”的性能表现。实验中,本文使用SPECpower软件,由其中两台服务器为另外两台进行负载加压,CPU负载率设置为5%、33%、50%、75%、100%,每个负载率水平上分别运行30 min,所得测试曲线如图5所示(环境温度30℃、水温45℃、水流量0.5 L/min)。

由图5可见,在部分负载率条件下,“热管水冷服务器”能进一步降低CPU的工作温度。故而,可以根据业务负载率动态地调节各服务器的供水量,实现更高精度的按需供冷,以进一步减少致冷系统能耗。

5 “双通道”致冷模式的发展前景

由于“双通道”致冷模式能够利用自然冷源对服务器CPU进行“接触式”致冷,故而其在全球绝大多数地区、绝大多数时段具有高度普适性,能大幅降低全球IDC的能耗。同时,由于“双通道”致冷模式的工艺实现较简单,再加上“热管水冷模块”具有安全可靠、投资少的优点,可以预见,“双通道”致冷模式未来极有可能成为数据中心致冷系统节能设计的主流技术。

本团队在“双通道”致冷模式的研究上取得了关键的突破,完成了核心系统环节的验证工作。下一步,要推动“双通道”致冷模式的产品化工作,需要解决诸如服务器内部工艺调整、整机柜集成、致冷管路设计等问题,同时需要研究致冷管路泄漏防控、运行变量监控、运维管理模式等后期维护的可管、可控问题;另外,面向大规模应用还需要解决建设、运营的标准问题。故而,“双通道”致冷模式的研

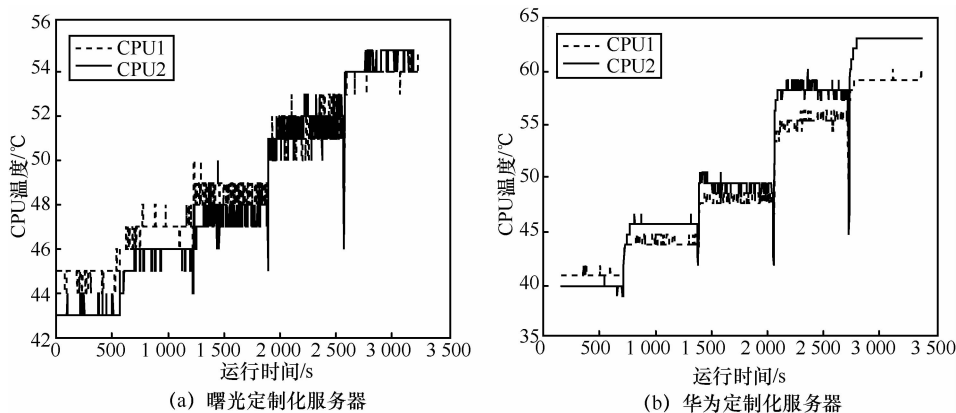


图5 部分负载率条件下曙光、华为定制化服务器的性能表现

究需要产业界共同努力去推动,才能最终成为一个实用化的数据中心节能致冷解决方案。

较. 半导体技术,2006(9)

参考文献

- 1 周伏秋,谷立静,孟辉. 数据中心节能和优化布局研究. 电力需求管理,2011(13)
- 2 赵锋. 数据中心节能减排技术. 电信网技术,2011(1)
- 3 成彬,王涛,武红光等. 中国电信数据中心节能减排的策略及其应用. 节能,2012(1)
- 4 钱晓栋,李震. 数据中心空调系统节能研究. 暖通空调,2012(3)
- 5 Dunlap K, Rasmussen N. 数据中心行级和机柜级致冷架构的优势. 施耐德电气白皮书 第 130 号
- 6 杨世铭,陶文铨. 传热学. 北京:高等教育出版社,2006
- 7 朱德才. 固体界面接触换热系数的实验研究. 大连理工大学硕士学位论文,2007
- 8 Dunn P D, Reay D A. 热管. 周海云译. 北京:国防工业出版社,1982
- 9 刘婧,吕长治,李志国等. 电子元器件加速寿命试验方法的比

[作者简介]



林湧双,男,中国移动通信集团南方基地教授级高级工程师,国务院政府特殊津贴专家,主要研究方向为 IDC 节能、云计算与大数据、通信防雷。



丘文博,男,中国移动通信集团南方基地工程师,主要研究方向为 IDC 节能、新型通信技术。

(收稿日期:2014-06-25)

· 简讯 ·

2014 年 6 月中国 4G 用户数达 1 397 万户

中国联通发布 2014 年 7 月份运营数据。移动业务方面,中国联通用户数累计达 2.96 亿户,本月净增长 88.8 万户,创年内新低。

固网业务方面,固网宽带用户数累计 6 779.8 万户,本月净增长 37.8 万户;本地电话用户累计 8 544 万户,本月净减少 63.1 万户。7 月移动宽带无线上网卡用户净流出 4.5 万户。

在 4G 商用初期,中国移动占据了领先优势。工业和信息化部数据显示,截至 2014 年 6 月底,国内 4G 用户数已达 1 397 万户。而根据中国移动公布的 6 月份用户

数据,中国移动 6 月净增 4G 用户 583.4 万户,目前 4G 用户总数为 1 394.3 万户。如此算来,中国移动 4G 用户占有所有 4G 用户比例为 99.8%。

中国移动最新公布了 7 月运营数据,截至 2014 年 7 月 31 日,中国移动用户总数 7.94 亿户,其中 3G 用户数 2.41 亿户,4G 用户 2 043.7 万户,环比增长 46.6%。

2014 年 6 月 27 日,工业和信息化部宣布向中国电信和中国联通发放 FDD/TDD LTE 混合组网许可,两家企业获得在全国 16 个城市开展 TD-LTE 和 LTE-FDD 混合组网试验的许可。

(来源:中文互联网数据资讯中心)