

DOI: 10.19729/j.cnki.1009-6868.2018.05.008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20181022.0936.001.html>

绿色通信:如何“笑”到最后

Green Communications: How to "SMILE" (Send More Information Bits with Less Energy)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0040-03

摘要: 绿色通信的研究应从能量的“节流”和“开源”2个方向同时展开,其中节流最有效的手段来自网络覆盖层,即通过引入超蜂窝的网络架构实现控制覆盖与业务覆盖的解耦,使得业务基站有更多的休眠机会,从而大幅度提高网络的能量效率。开源的最有效手段是大量引入可再生能源,通过高效地利用可再生的能量降低电网的能耗,从而提高网络整体的能量效率。无论采用哪种手段,其核心技术挑战将是如何实现信息流与能量流的智能匹配,这既是未来绿色通信能够“笑”(SMILE: Send More Information bits with Less Energy)到最后的的关键,也催生出了一个全新的交叉学科领域,即能量信息学。

关键词: 绿色通信;可再生能源;能量信息学

Abstract: The researches on green communications can be divided into two major approaches: one is by saving energy and the other is by exploiting renewable energy. For the energy-saving approaches, the most effective way comes from the network coverage layer by decoupling the traffic serving coverage from the control signaling coverage so that the traffic base stations have more opportunities to sleep (and therefore bring a great amount of energy savings) with the coverage guarantee by control base stations. This is so-called hyper-cellular architecture. For the renewable-energy exploiting approaches, the key is to adaptively match the information flows to the energy flows and vice versa, which is extremely hard because both the information flows and energy flows are highly dynamic. These are not only the core parts of the SMILE (Send More Information bits with Less Energy) for green communications, but also open up a new research fields called energy informatics.

Key words: green communications; renewable energy; energy informatics

牛志升/NIU Zhisheng

(清华大学,北京 100084)
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

限(尽管毫米波、太赫兹等高频段可以提供更大的带宽,但其巨大的传输损耗以及由此引发的频繁越区切换将很大程度上抵消掉大带宽所带来的好处),上述问题则转换为:如何能够使用更少的能量来传输更多的信息,即我们如何才能“笑”(SMILE: Send More Information bits with Less Energy)到最后?

如果我们继续从移动通信的基础理论,即香农公式出发,看上去是不可能的,因为香农公式告诉我们:要想提高传输容量,要么需要更大的带宽或是更大的空间自由度,要么需要大幅度提高信噪比,即提高发射功率。由此可见:要想笑到最后,首先必须要跳出物理层的范畴,从网络层或是系统层寻找解决方案。其中一个解决方案是改造目前的蜂窝网络架构,通过控制覆盖和业务覆盖的逻辑分离与解耦,构建一个由永远在线的控制覆盖和按需部署的业务覆盖构成的超蜂窝网络新架构^[1],在保证蜂窝网络无缝覆盖和频谱效率的同时,引入业务基站的动态休眠和资源调度,从而大幅度降低整体能耗。该解决方案的核心是能量的“节流”,即通过减少蜂窝网络中的能量浪费来

各种信息技术,特别是遍布于地球各个角落的通信与网络基础设施,在经历了几十年高速发展之后都逐渐遇到了能耗的瓶颈,其快速增长的自身能耗也已演变为全球气候变暖的元凶之一。以移动通信网络为例,通过从1G到4G的技术进步已经使得网络容量增长了100万倍以

上,各种丰富多彩的移动业务也已经大幅度地改变了人类的生活方式。但各种预测均显示:随着全息媒体和万物互联时代的到来,未来5~10年人们对移动网络容量的需求仍将呈现指数增长的态势,相应地,其自身的能耗瓶颈也会越来越凸显。由此引出了一个非常基础性的科学问题:在频谱与能量资源双双受限的情况下,如何进一步大幅度提高网络容量?由于频谱资源只能是越来越受

收稿日期: 2018-08-15
网络出版日期: 2018-10-22

提高能量效率,解决了传统蜂窝架构的绿色可持续发展问题。这是蜂窝网络架构在过去40多年来的第一次重大转变,并有望成为5G及其后续演进的关键技术。

另外一个解决方案则是源于能量“开源”的思路,通过引入能量收割技术,从而大幅度降低实际电网的能耗。能量收集技术是一种新兴的绿色能源技术,它可直接把环境中的可再生能源,例如:风能、太阳能、机械能、电磁场辐射等直接转化为电能,某种意义上讲是一种“取之不尽、用之不竭”的新能源。同时,随着智能电网技术和电池储能技术的飞速发展,可再生能源的存储和利用效率大大提高,能量收集技术已步入实用阶段,并逐步应用到了各种信息系统中,例如:传感器网、蜂窝通信网等。可以预见:未来信息系统的供电模式将日趋多样化,甚至会出现完全依赖于可再生能源的自供电信息系统,这不仅可大幅降低信息系统对传统电网的依赖,而且可以减少布线需求和运维成本。特别是针对基站超密集部署的超密集组网(UDN)和分布式多输入多输出(MIMO)移动通信系统,其广泛部署的小基站或是天线前端很有可能无法或是难以直接连接到电网,需要完全依赖于可再生能源供电。

为了更好地用好可再生能源,必须要解决好能量供给随机性的问题。在传统电网供电的移动通信中,能量供给是稳定的,研究人员主要面对的是业务需求的随机性和传输信道的随机性问题;而在可再生能源供电的移动通信系统中,除了上述两种随机性之外,需要同时面对能量供给的随机性。为此,我们需要扩展传统绿色通信的内涵,即仅仅关注能量效率是远远不够的,需要同时关注能量持续性指标。该指标包含能量中断和能量溢出2个层面,前者意指虽有信息服务的需求但却没有足够能量供给所导致的服务中断现象,后者则

指由于能量缓存容量的限制,虽有充足的能量供给但却没有相应的信息服务需求,从而导致的能量溢出现象。很显然,这2种现象都是需要尽量避免的,即应该尽量做好能量流与信息流的实时匹配,从而在保证信息服务稳定性的前提下尽量提高可再生能源的利用率,这实际上是能量信息学的核心,也是可再生能源供给信息系统的核心挑战所在。为此,我们需要回归原点,从根本上思考一下能量与信息之间的理论关系。

众所周知,宇宙是由物质、能量和信息3个基本要素组成的,其中物质是本源的存在,没有物质,什么也不存在;能量是运动的存在,没有能量,什么也不会发生;信息则是联系的存在,没有信息,任何事物都没意义。经典牛顿力学的理论告诉我们:在封闭的物理世界中物质总量是守恒的,能量也是守恒的;爱因斯坦进一步揭示了物质与能量之间的理论关系,即物质与能量之间是可以相互转换的,且总量守恒,即著名的物质能量守恒公式 $E=mc^2$ 。但能量和信息之间是否也可以相互转换、且遵循某种守恒定律呢?这个问题迄今为止没有任何明确的结论。

为了回答上述问题,我们需要重新思考一下信息与物质和能量的不同。根据维纳和香农的定义,信息是对事物运动状态或存在方式不确定性的描述,它与物质和能量有着本质的区别,即它可以在不损失任何信息的前提下被无限地复制,也就是说信息本身并不守恒。同时,最近已有实验展示:信息与能量之间的确可以互相转换,但应该不守恒,因为使用同样的能量可以传递更多的信息比特(如使用多播或是广播机制);相反,在没有传输任何信息比特的情况下也有可能消耗能量(如空转的服务器)。可见,由于信息本身的不守恒特性导致了信息与能量转换之间的非守恒特性,这实际上为进一步提高网络的能量效率提供了理论依据,即

我们的确可以使用更少的能量传输更多的信息比特,即SMILE是完全可行的。

那么究竟该如何笑(SMILE)到最后呢?基本上这是一个信息流如何与能量流更好地匹配的问题。一方面,我们可以让能量流更好地去适配信息流,即在需要传输更多信息时分配更多的能量,反之则分配更少的能量。这在传统电网供电的信息系统中是比较容易实现的,但在可再生能源供电的信息系统中将面临巨大的挑战。虽然可以通过调控能量缓存器的充放电来解决,但如何做到时间尺度的实时匹配以及空间维度的动态调度是问题的难点。另一方面,我们也可以让信息流更好地去适配能量流,即能量供给比较充足时可以传输更多的信息,比如引入缓存与推送机制,通过对用户需求的预测计算出用户的潜在需求,在能量充足时进行推送或缓存。这可以形象地比喻为“将明天的工作放到今天来做:do tomorrow's job today”;反之,在能量供给不足时则可以减少信息的传递,比如只提供最基本的信息服务,而推迟提供增强服务,直至能量变得更加充足,或是将任务卸载到一些能量充足的基站。这可以形象地比喻为“将今天的任务留给明天:do today's jobs tomorrow”^[2]。

总之,绿色通信的研究应从能量的节流和开源2个方向同时展开,其中节流最有效的手段来自网络覆盖层,通过引入超蜂窝的网络架构实现控制覆盖与业务覆盖的解耦,使得业务基站有更多的休眠机会,从而大幅度提高网络的能量效率。而开源的最有效手段是大量引入可再生能源,通过高效地利用可再生的能量降低电网的能耗,从而提高网络整体的能量效率。但无论采用上述哪种手段,其核心技术挑战将是如何实现信息流与能量流的智能匹配,这既是未来绿色通信能够笑(SMILE)到最后的关键,也催生出了一个全新的交叉学

科领域,即能量信息学:Energy Informatics for Smart Interaction of Energy and Information (Einstein)。通过对能量与信息之间相互作用机理的深入研究,希望能够建立起类似于爱因斯坦物质与能量转换关系的理论,其核心可以概述为2个不等式,即 $Energy + Information < Energy$ 和 $Information - Energy > Information$,其中前者意指现有的能量系统(如交通、建筑、制造业等任何需要消耗能量的系统)如何通过引入更多的环境信息来使其更加节能;后者则意指现有的信息系统(如互联网、移动通信

等)如何以更少的能量传递更多的信息?这是本期专刊的目的所在,也是支撑我们能够笑(SMILE)到最后的理论基础。

参考文献

- [1] 牛志升,郑福春,杨晨阳,等. 基于超蜂窝架构的绿色通信专刊编者按[J]. 中国科学:信息科学, 2017,47(5):527-528
- [2] ZHOU S, GONG J, ZHOU Z Y, et al. GreenDelivery: Proactive Content Caching and Push with Energy-Harvesting-Based Small Cells [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 142-149. DOI: 10.1109/mcom.2015.7081087

作者简介



牛志升,1985年毕业于北方交通大学,1989年和1992年分别获日本丰桥技术科学大学硕士和博士学位,1992—1994年就职于日本富士通研究所,1994年回清华大学电子工程系任教至今,担任电子信息通信学会(IEICE) Fellow 和国际电气电子学会(IEEE)

Fellow,并为国家重点基础研究发展(“973”)计划项目“能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统基础研究”(2012—2016年)首席科学家;主要研究方向包括通信话务理论、排队论、通信网络的流量控制与性能分析、无线网络的资源分配及跨层优化、通信与广播融合网络、绿色通信与网络等;曾获得IEEE通信学会亚太区2013年度“最佳论文奖”。

专题预告

《中兴通讯技术》2019年专题计划

期次	专题名称	策划人
1	5G商用支撑理论及关键技术	中兴通讯股份有限公司 CTO 王喜瑜
2	云网一体化技术	中国联通网络技术研究院首席专家 唐雄燕
3	边缘计算技术及其应用	清华大学教授 郑纬民 佐治亚州立大学教授 潘毅
4	5G通信安全技术	清华大学教授 李军
5	新型光互连与光接入技术	北京大学教授 李红滨
6	5G通信系统示范应用	中国信息通信研究院科技委主任 蒋林涛