

对绿色无线移动通信技术的研究和思考

尤肖虎¹,王京²,张平³,李少谦⁴,朱近康⁵

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096; 2. 清华大学信息科学与技术国家实验室, 北京 100084;
3. 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876; 4. 电子科技大学通信抗干扰国家重点实验室, 四川成都 610054;
5. 中国科学技术大学个人通信与扩频实验室, 安徽合肥 230027)

摘要:论述了协作通信分布式天线系统,能有效降低系统的发射功率,是一种可靠的绿色移动网络的解决方案;提出了绿色无线通信的系统设计考虑,特别提出对业务内容的软实时业务传输的新设计,能明显降低成本节省资源和功耗;论述了利用基于认知技术的可重配置无线网络能明显降低能源开销;论述了未来无线通信由追求更高、更快的传输能力向追求更省、更好的能源效率的转变;提出小区网络设计的环保效率函数,用来评价和设计环保下的小区网络. 这些论述反映了对绿色无线通信技术研究的成果和思考.

关键词:绿色无线网络;无线移动通信;分布式协作通信;软实时传输;环保的小区设计

中图分类号:TN92 **文献标识码:**A

特
约
评
述

Study and ideas for green wireless mobile communications

YOU Xiao-hu¹, WANG Jing², ZHANG Ping³, LI Shao-qian⁴, ZHU Jin-kang⁵

(1. *National Mobile Communications Research Lab, Southeast University, Nanjing 210096, China;*
2. *Tsinghua National Lab for Information Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
3. *Key Lab of Universal Wireless Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Ministry of Education, Beijing 100876, China;*
4. *National Key Lab of Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;*
5. *Personal Communication Network & Spread Spectrum Lab, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

Abstract: To promote research on wireless and mobile communications, 2009 Huangshan Symposium on “Green Wireless Technology and System” was held during 12~13 June, 2009 in Huangshan, Anhui. At the symposium, five major speeches by professors from famous universities analyzed the cooperative distributed MIMO system to efficiently reduce transmitting power as a novel scheme of green networks, proposed an idea of green wireless network, especially content aware soft real time (CASoRT) transmission design, for reducing cost and saving energy, expounded on BS reconfiguration based on the cognitive technique for remarkably saving power, discussed the change from achieving highest transmitting data rate to seeking best power efficiency for future wireless and mobile communications, and advanced an environmentally friendly efficiency function for assessing cellular network design for green

收稿日期:2009-09-15; **修回日期:**2009-09-28

基金项目:国家自然科学基金重大项目(60496310),中国高技术研究发展(863)计划重大项目(2003AA123310),国家科技重大专项(2008ZX03003-004),中国高技术研究发展(863)计划(2009AA011501),国家重点基础研究发展(973)计划(2007CB310608, 2009CB302400)和国家自然科学基金重点项目(90204001)资助.

作者简介:尤肖虎,男,1962年生,博士/教授,东南大学信息科学与工程学院院长,教育部长江学者奖励计划特聘教授,国家863信息领域专家委员会成员,国家重大专项“新一代宽带无线移动通信网”专家组副总师,中国通信学会青年工作委员会副主任委员等.研究方向:无线移动通信. E-mail: xhyu@seu.edu.cn

通讯作者:朱近康,教授. E-mail: jkzhu@ustc.edu.cn

communications. These discussions reflect the research and development results and ideas for green wireless and mobile communications.

Key words: green wireless networks; wireless and mobile communications; distributed cooperative communications; content aware soft real time; cellular design for saving environment

0 引言

随着移动通信的广泛普及和深入应用,节约能源、节约资源、保护环境将会是继新一代无线通信之后又一重要发展方向,已成为亟需研究的重大前沿课题,需要从理论、方法、技术和应用多方面进行系统研究。

为研讨未来无线移动通信发展的绿色要求和可能开展的重大课题,2009年6月12日在黄山召开了“绿色革命的无线移动通信”学术会议。在这次大会上,特邀五位教授作讲演。东南大学尤肖虎教授做了“移动通信中的协作分布式天线系统”报告,论述了协作通信分布式天线,在相同频谱效率下,能有效地降低系统的发射功率,是一种可靠的绿色移动网络的解决方案。清华大学王京教授做了“新一代无线通信系统的‘绿色’思考”的报告,从无线传输、组网、业务模式的三个层面考虑绿色无线通信的系统设计,特别提出对业务内容的软实时业务传输的新设计,能明显降低成本节省资源和功耗。北京邮电大学张平教授做了“认知无线网络和绿色通信”的报告,论述了认知技术对无线资源和信号能量利用的有效性,可重构的网络架构能减少重复建设和降低能源开销。电子科技大学的李少谦教授做了“对无线通信绿色革命的几点认识”的报告,指出未来无线通信由追求更高、更快的数据传输能力,向追求更省、更好的资源和能源效率的转变,由追求技术能力,向追求应用能力的转变趋势。中国科学技术大学朱近康教授做了“环保下的无线小区网络设计”的报告,在分析环保下小区网络综合设计参数后,提出小区网络设计的环保效率函数,并用于评价和设计环保下的

小区网络。这些报告反映了对绿色无线通信技术研究的成果和思考,本文则根据这些特邀报告核心内容依报告顺序整理成文,作为本专辑的特约评述发表,以饗读者。

1 基于分布式协同技术的高效节能系统

绿色无线通信是一个跨学科、综合性的研究方向。移动通信的分布式天线系统较传统蜂窝系统能有效地增强频谱效率和功率效率,比集中式分布系统有更高的容量,对创建环保型网络来说是一个很有前途的解决方案^[1]。

传统蜂窝移动通信系统的一个最显著的问题是小区边缘问题,在小区的边缘频谱效率和功率效率都很低。下行链路频谱效率随着基站与终端位置距离的增加呈指数下降趋势,其重要原因就是终端接收功率本身随距离增加的指数下降;上行链路手机需要的发射功率随距离增加线性增加。另外,分析自由空间以及 Okumura 传播模型可知,电波衰减与频率有关。频率越高,电波传播功率衰减越大,功率效率越低,边缘问题变得越严重,如图 1 所示。因此,解决小区边缘问题既是提高频率效率,也是提高功率效率问题,刻不容缓。

协作分布式天线系统能有效解决这个问题。对于协作分布式天线系统,基站具有多个分布式天线收发点和集中的基站处理器。基站通过多个天线无线收发点与某一终端通信,光纤将各个无线收发点的远端处理单元 RAU 信号集中到基站处理单元 BPU 进行联合信号处理,如图 2 所示。系统将天线

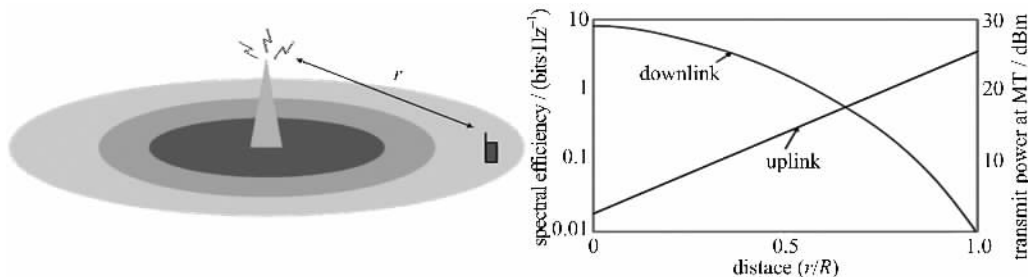


图 1 小区边缘问题、频谱效率和功率效率关系图

Fig. 1 Cell boundary problem, and spectral efficiency & power efficiency at a cell

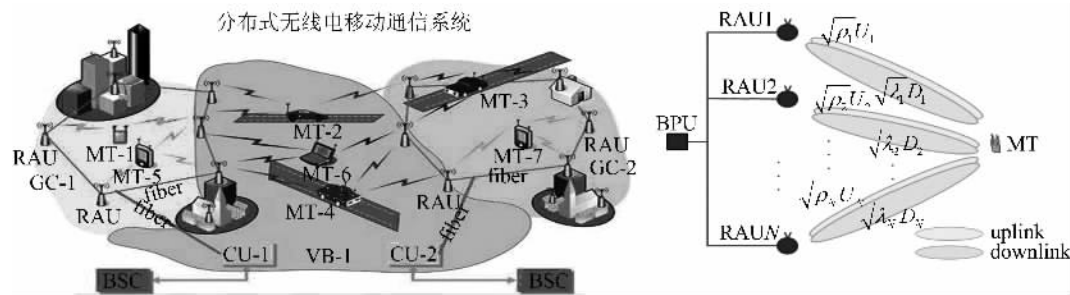


图 2 协作分布式天线移动通信系统和传播模型

Fig. 2 Cooperative mobile system and its model based on distributed MIMO

分散在整个小区,使得分散的电波对小区均匀覆盖,用户就近接入基站,通过各个分散的天线的协同工作,提高了频谱效率,同时减少了发送功率,从而提高了功率效率^[2]。

尽管分布式天线系统的模型复杂,我们的研究发现,分布式系统容量在高信噪比下逼近正态分布,低信噪比下逼近对数正态分布^[3]。分析信道模型可知,各子信道之间更小的相关性和分布式天线孔径与距离的可比拟性使得分布式 MIMO 系统较集中式 MIMO 系统能够获得更好的分集度和自由度。另外,由于分布式天线的物理位置分散性,多用户干扰问题显著减小,更加有利于多用户 MIMO 的应用。仿真结果表明,在典型场景下,达到相同的频谱效率,协作分布式天线系统的手机发射功率可降低 10 dB。在相同的小区覆盖范围和相同数目的天线情况下,分布式天线系统将基站的发射功率均匀地分散在小区内,提高了平均小区容量,降低了需要的发送功率,从而有效提高了频谱效率和功率效率。因此,协作分布式天线系统中,终端总是能够找到最近分布的远端天线,找到最近天线系统进行通信,非常便捷高效,是一个极有前景的技术,能够大量节省网络需要的发射能量,从而达到绿色网络的目的。

2 提高能量效率的软实时传输研究

国家“十一五”科技发展规划纲要^[4,5]对绿色环保,提出了两个总体要求:单位国内生产总值能耗降低 20%左右,主要污染物排放总量减少 10%,节能减排也成为无线通信需要解决的重大问题。无线移动通信的节能减排,可从三个层面考虑面向“绿色”的无线通信系统设计:

(I) 无线传输技术,探讨如何提高点到点比特传输的有效性。高阶调制需要更高的能量,为了降低能量需求,需要在频谱效率和功率效率之间折衷,如

更多采用低阶调制技术、进行算法的低复杂度设计、用空间换取传输速率、用带宽换取传输速率、使用高频段(>6 GHz)以解决频谱问题等,如图 3 所示。

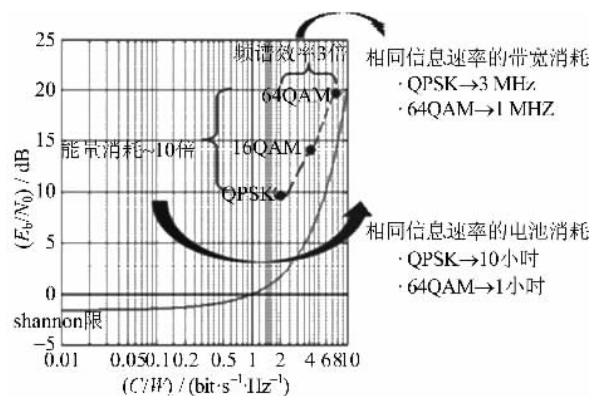


图 3 调制速率与能量开销

Fig. 3 Modulation rate vs energy spent

(II) 组网技术,探讨多点到多点比特传输的有效性。传统的蜂窝结构是一种大区制网络,能量消耗很大,为了降低功率消耗,需要设计新的网络结构,分布式无线通信系统(DWCS)^[6,7]以“设备硬件”换取“能量效率”,实现网络信号的“均匀”覆盖,是一个有效的网络结构,如图 4 所示。

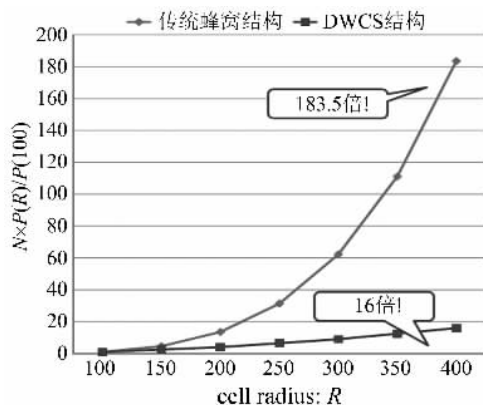


图 4 传统小区与分布小区的能量效率

Fig. 4 Energy efficiency of cellular and DWCS

(Ⅲ) 业务服务模式,探讨业务内容传输的有效性. 数据业务是 3G/4G 网络的源动力,在网民广泛使用的数据业务中,非实时业务占主导地位,但是用户期望的体验是实时的,所以非实时业务的传输占用了实时业务的大量通道. 在目前主要的优化中,主要集中于基于比特的传输优化和基于媒体形式的传输优化,而基于内容传输优化的研究较少,因为利用内容感知的软实时信息传输(content aware soft real time (CASoRT) transmission)^[8]会达到较好的优化效果. 所以,我们提出软实时传输以实现绿色新设计,基本出发点包括:有效利用无线信道资源,减少非实时信息的实时传输;将广播与点播结合,实现成本与个性化的折衷;将智能终端与智能搜索引擎结合,实现内容感知的存储与回放.

利用软实时传输可以得到以下好处:以内容为基准的容量衡量标准,能量和频谱效率都提高了;利用广播信道可极大地提高无线传输效率;利用用户行为预测与终端智能信息管理技术,CASoRT 可为用户提供个性化服务,给用户实时业务的感受;分优先级的业务分发,使用户选择可接受的业务成本,可划分为高优先级服务(即点即放),中优先级服务(如 4 小时内播放),普通服务(如 8 小时内播放). 软实时业务传输实际上是以时间换取能量,在一定时间内存储了一定的信息,然后一起广播出去,从信息内容上来看是一样的. 通过对实际网络中用户访问信息的行为进行分析,可以发现这一行为具有趋同性,即在一定的统计时间内,大多数用户访问了相同的信息内容,例如我们对新浪网、天涯网论坛的内容及访问情况进行了抽样统计,发现在 30 分钟的统计时间内,网页中的信息总数为 512 条,被访问的信息数量为 425 条(83.0%);在被访问的信息中:总访问次数为 13 043 次,最大访问次数为 1 285 次、平均访问次数为 30.7 次、访问量在均值以上的信息数量为 74 条(17.4%);即大量的用户访问集中于少量的相同信息内容上,如图 5 所示. 因此,如果部分信息内容通过软实时方式传输,随着广播率的提高,带宽需求会下降,如图 6 所示. 但从另外一个角度出发,如果有的信息没有用户感兴趣,广播实际上是一种浪费,如图 7 所示的视频点播的例子,在有一定的点播率的情况下,带宽才能得以有效利用.

3 认知无线网络与绿色无线通信

在无线移动通信网络的发展过程中,从早期的

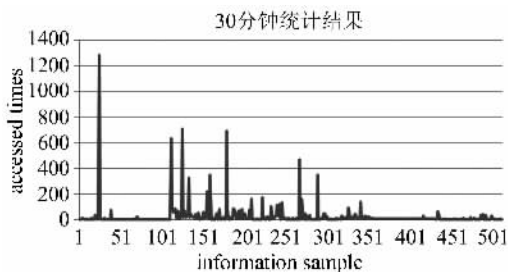


图 5 各信息内容的访问次数

Fig. 5 The access times of each information item

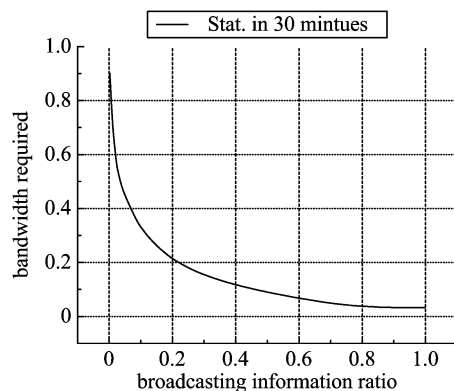


图 6 实时广播方式的带宽需求

Fig. 6 Bandwidth of real time broadcast

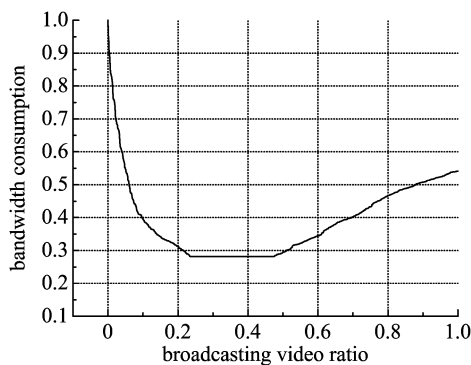


图 7 视频点播方式的带宽消耗

Fig. 7 Bandwidth on the order of broadcast

单一系统和单一制式,发展到现在为了支持不同的业务应用,而构建的了多种很多体制不同、彼此独立的无线系统和网络平台^[9,10]. 虽然在一定程度上满足了某些需求,但客观上造成了多种异构无线接入技术并存的通信网络格局,产生众多的“网络孤岛”. 这带来两个难题:用户无法随着无线环境和业务需求的动态变化获得无缝而满意的服务^[11];无线网络建设、运营和管理也面临着极大的困难. 这种“烟囱”林立的异构网络格局不仅严重制约了宽带无线移动通信的持续性发展,还造成了电力、能源和资源的极大消耗,非常不利于节能和环保,不得不进行重大的

变革. 因此, 我们迫切需要采用认知与重配置的方法和技术, 来智能地适应业务和网络的动态变化, 组织网络架构, 更有效的利用资源和能量, 解决无线网络异构性异构融合问题, 形成统一的新一代无线网络体系框架, 如图 8 所示.

认知无线电的理念由 Joseph Mitola^[12,13] 于 1999 年首次提出, 被定义为基于对其工作环境的交互改变发射机参数的无线电. 要解决网络异构性问题, 构建新一代无线网络体系, 迫切需要研究认知无线网络技术. 认知无线网络通过认知无线资源、网络、业务等多域环境信息, 进行自适应管理、资源优化及重配置, 进而形成新网络. 为此, 我们在这里提出认知无线网络的概念^[14]: 基于与多域环境交互而改变网元属性的无线网络. 我们定义的认知无线网络具有以下特征: 认知智能特性, 端到端的全局优化, 主动多域认知, 网元可重配置.

认知无线网络和绿色通信的关系包括两点: 一是基于认知无线网络, 网元可通过认知信息流获取重配置因素^[9]; 二是通过重配置可以统一的规划和改变终端的软件^[10]来省掉重复建设. 在认知无线电里需要联合资源管理^[11], 包括在多域中的无线资源管理^[15], 调度的方式, 以及以资源利用率和能量利用率为目标的全局优化^[15]. 动态的频谱管理可以在认知无线环境的基础上, 自适应选择信道衰落相对较小的频谱和相应的发射方式进行发射, 使得发送功率最小, 降低干扰^[15], 提高吞吐量. 设计高效协议^[16], 降低信令等开销的同时, 也降低了多余的功耗, 达到节能的环保目的.

4 从追求宽带高速到追求效率和环保

无线移动通信技术的发展, 多年来一直在追求宽带化、高速化, 以适应越来越高、越来越快的无线移动通信业务需求. 移动通信经过几十年的发展, 技术走向宽带高速化, 多媒体业务被普遍应用之后, 能源的开销、环境的保护成为越来越关注的新课题, 此

时, 提出无线通信绿色化的研究是一个很好的时机, 这也是信息时代的必然产物. 移动通信绿色化使我们面临着一个很大的挑战. 我们未来移动通信的发展目标, “绿色”的确是一个战略性问题, 而不仅仅局限于提高数据传输速率.

“绿色”是一个涉及多领域的广泛的概念, 对无线移动通信, 其“绿色”的含义就是节约资源, 保护环境. 无线移动通信中最重要的资源是频谱资源, 这是其有别于有线通信和其他工业产业的一个主要资源特征. 另外, 还有能量资源和站点资源、设备材料资源等. 目前在节能减排方面, 我们的努力主要集中在如何减少工业污染, 这是一个近期的、短期可见成效的目标. 实际上, 研究无线通信绿色化, 就是要根据无线通信的特征和目标, 有效利用频谱资源、站点资源, 减少功率, 降低排放, 节省能源, 避免电磁污染和信息污染.

无线移动通信绿色化的核心问题是: 实现由追求更高、更快的数据传输能力向追求效率的转变, 在有限的频谱资源条件下进行有效的传输; 实现由追求技术能力向追求应用能力的转变, 以合理、有效的应用需求为我们追求的目标. 在过去几十年中, 我们不遗余力地追求更高的信息传输能力、更高的频谱资源利用率和新的频谱资源, 并且已经取得了很大的进展. 对未来无线移动通信, 要努力建立更有效的信息传输体系, 开发更有效的应用频谱的技术, 和更有效的信息应用方法.

如何理解无线移动通信中有效性? 通信是一个全系统、全网络相关联的领域, 因此, 有效性是一个全面性的概念. 以前, 提高频谱利用率往往仅从传输的角度来考虑, 但是, 真正有效频谱利用率不仅仅是传输的问题, 而与应用、网络和系统架构有紧密的联系, 与能量的利用和开销有紧密的关联. 因此, 有效性在无线通信中是一个全系统的概念, 从系统级考虑频谱的利用率和能量的利用率, 是一个全新的思路和角度. 绿色无线通信给我们提出了新的理念、新

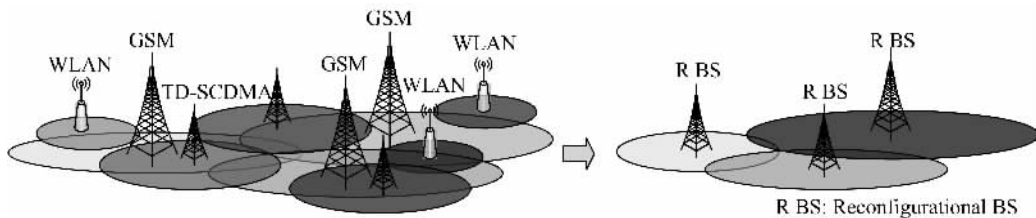


图 8 从繁杂异构网络到同一网络体系

Fig. 8 From heterogeneous wireless networks to unified planning

的理论、新的技术、新的应用和新的目标,对我们的研究将起到指导性作用。

5 环保下的无线小区网络设计

无线移动通信的无缝覆盖,至今建立在蜂窝小区结构和信息传输理论的基础上,实现在小区边缘达到最低可接收信噪比下的最大用户接入能力和最大信息传输速率。至于小区半径、传播距离、需要的发送功率,没有任何限制。因此,这是一个不考虑功率效率、能源开销和基站成本的设计和应用。随着无线移动通信的极大普及和越来越广泛的应用,随着环境保护和节约能源的社会要求也越来越高,无线移动通信,特别是基站系统,不仅仅追求频谱效率和传输速率,其能源消耗和发送功率效率也是无线移动通信值得十分关注和研究的重大课题^[17,18]。

研究节能和环保下的无线移动通信小区网络结构,建立环保下的小区设计参数和评价体系是很重要的工作之一。为此,我们提出环保下的小区网络综合设计参数:终端最低的接收质量,基站必需的接入能力,基站最大的发送功率,单位面积的网络联接开销。

终端最低的接收质量是终端在小区边缘的可信最低信噪比: E_b/N_0 。如果 N_0 一定,则决定于 E_b ,它仅与基站发送功率有关(如果传播距离和特性给定),有 $E_b \propto P_b/r^{3\sim 4}$,式中 P_b 是满足小区边缘用户的基站发送功率, r 是小区半径(小区边缘用户到基站的距离)。基站必需的接入能力 M ,要满足该小区的同时用户接入数(m)和越区切换支持数(h_m),因此,有 $M \geq m + 9m/r = m(1 + 9/r)$,其中 $9m/r$ 是越区切换最小支持数。基站最大的发送功率 P_b ,是满足小区边缘用户最低信号强度要求的发送功率。单位面积的网络联接开销 K ,是单位服务面积内各小区基站组成网络的联接开销,有 $K = 7 * N$, N 是单位服务面积内的小区基站数,7 是一个基站邻近和对上组网联接的最少对外联接数。显然,环保下的小区设计与小区基站的能源耗费和资源开销有关,与服务面积内的基站数有关。那么,实现可靠通信质量保证下的基站能耗总开销的重要约束条件是:在给定的服务面积、给定的用户通信业务总量的前提下,所需基站总数的总能量开销^[19,20]。

基于上述分析,我们提出和定义了无线蜂窝小区结构设计的环保效率函数,主要与射频发送开销,信号处理开销和网络接口开销,即

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

其中, Q_1 是射频功率环保效率函数,有 $Q_1 = 1/(\sigma_b NP_b/\sigma_0 N_0 P_{b0})$, P_{b0} 和 N_0 是现有小区作为参考的基站最大发送功率和相应的基站数; Q_2 是信号处理环保效率函数,假定 H_M 是小区设计的基站必要接入能力的信号处理开销, H_m 是基站支持有效用户业务的信号处理开销, $Q_2 = 1/(NH_M/NH_m)$; Q_3 是网络联接环保效率函数, $Q_3 = 1/(U_k/U_1)$,式中 U_k 是给定服务面积内的小区基站对外联接的处理开销, U_1 是一个小区基站对外联接的信号处理开销。

假定 $r_0 = 1 \text{ km}$, $r = 1 \text{ m} \sim 1 \text{ km}$, 给定服务面积为 3.1415 km^2 , 单位服务面积内同时支持用户基本业务数为 4 000, 用户移动步行速率为 3.5 m/s , 分析结果表明,在 $r = 100 \text{ m}$ 左右,环保效率较高,如图 9 所示。

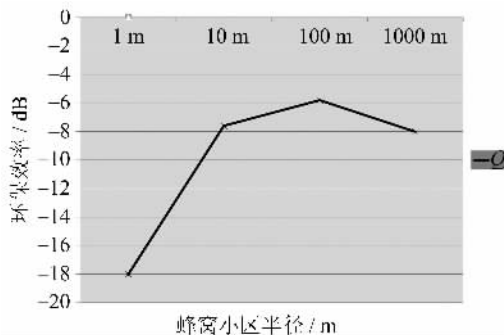


图 9 蜂窝小区半径与环保效率关系

Fig. 9 Cellular radius vs saving environment

由此可见,无线移动通信的小区网络设计,与节能环保的要求密切结合,其设计结果同现有的结论是不一定相同的。小区太大,不利于节能。小区太小,也并不一定节能。当然,这方面的工作才刚刚开始,有待进一步深入研究^[21]。

6 结语

2009 黄山学术会议“绿色革命的无线移动通信”,十分成功,与会者都认为绿色无线移动通信,不是简单的单项技术和工程处理,而是从理论、方法、技术和应用等多方面进行研究探讨的重大课题。应该指出,鉴于“绿色无线移动通信”的重要性、新颖性和前瞻性,这次会议还仅仅是一个探讨交流的开头,还有好些问题需要深入研讨。

参考文献(References)

- [1] You X H, Gao X Q. Development of beyond 3G

- techniques and experiment system: An introduction to the future project [M]// ICT Shaping the World : A Scientific View. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [2] Hu H, Zhang Y, Luo J. Distributed Antenna Systems; Open Architecture for Future Wireless Communications [M]. Boca Raton, FL: Auerbach Publications, 2007.
- [3] Wang D M, You X H, Wang J, et al. Spectral efficiency of distributed MIMO cellular systems in a composite fading channel [C]// Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Communications. NY;IEEE,2008;1 259-1 264.
- [4] 中华人民共和国第十届全国人民代表大会第四次会议. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要[EB/OL]. (2006-03-16). <http://politics.people.com.cn/GB/1026/4208451.html>
- [5] 中华人民共和国信息产业部. 信息产业科技发展“十一五”规划和 2020 年中长期规划纲要[EB/OL]. (2006-8-29). http://www.gov.cn/gzdt/2006-09/04/content_377131.htm.
- [6] Zhou Shi-dong, Zhao Ming, Xu Xi-bin, et al. Distributed wireless communication system: A new architecture for future public wireless access[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(3):108-113.
- [7] Zhou Shi-dong, Li Yun-zhou, Zhao Ming, et al. Novel techniques to improve downlink multiple access capacity for beyond 3G [J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(1): 61-69.
- [8] Zhong Xiao-feng, Zhao Ming, Zhou Shi-dong, et al. Content aware soft real time media broadcast (CASoRT) [C]// Proceedings of Third International Conference on Communications and Networking in China. NY:IEEE, 2008: 338-342.
- [9] Alonistioti N, Patouni E, Gazis V. Generic architecture and mechanisms for protocol reconfiguration[J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(6): 917-934.
- [10] Berlemann L, Pabst R, Walke B. Efficient multimode protocol architecture for complementary radio interfaces in relay-based 4G networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2006, 13(3): 15 - 23.
- [11] Chen Jie, Zhao Zhenzhen , Qu Di, et al. A policy-based approach for reconfiguration management and enforcement in autonomic communication systems[J]. Wireless Personal Communications, 2008, 45(2): 145-161.
- [12] Mitola J. The software radio architecture [J] IEEE Communications Magazine, 1995, 33(5): 26-38.
- [13] Mitola III J; Maguire Jr G. Q. Cognitive radio: Making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications,1999, 6(4):13-18.
- [14] 973 国家重点基础研究发展计划[EB/OL]. [2009-01-01]. <http://www.973.gov.cn/>.
- [15] Gao Song, Qian Li-jun, Vaman D R , et al. Energy efficient adaptive modulation in wireless cognitive radio sensor networks[C]// IEEE International Conference on Communications, 2007. NY: IEEE, 2007; 3 980-3 986.
- [16] Guenkova-Luy T, Kassler A J, Mandato D. End-to-end quality-of-service coordination for mobile multimedia applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(5): 889 - 903.
- [17] A mandate for change is a mandate for smart[EB/OL]. (2008-11-06). http://www.ibm.com/ibm/ideasfromibm/us/smartplanet/topics/utilities/20081106/smarterplanet_energy.pdf.
- [18] Conversations for a Smarter Planet: 10 in a series [EB/OL]. (2009-02-09). http://www.ibm.com/ibm/ideasfromibm/us/smartplanet/topics/telecom/20090209/smarterplanet_telco.pdf.
- [19] Ikebe H, Yamashita N, Nishii R. Green energy for telecommunications [C]//Proceedings of 29th International Telecommunications Energy Conference. NY: IEEE,2007:750-755.
- [20] Armour S, O'Farrell T, Fletcher S, et al. Green radio: sustainable wireless networks [EB/OL] (2009-06-12). http://kn.theiet.org/magazine/rateit/communications/Green_radio_file.cfm.
- [21] Scheck H O. Power consumption and energy efficiency of fixed and mobile telecom networks[EB/OL]. (2008-04). http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/06/0F/T060F0060080024PDFE.pdf.