

移动 WiMAX 网络频谱效率和能量效率研究^①解志斌^{②*} 杨 维* 许昌龙^{**}

(* 北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)

(** 东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘 要 基于 IEEE802.16e 协议,给出了全球微波互联接入(WiMAX)多小区/多用户情况下信干噪比(SINR)的近似计算方法,据此计算出了 WiMAX 的 7 小区模型的频谱效率和能量效率,分析了频谱效率和能量效率同小区半径、发射功率等网络参数的关系。仿真结果显示:链路的频谱效率受用户和基站之间距离的影响较大,受发射功率影响几乎可以忽略;整个小区的频谱效率在小区半径较大时,主要受噪声影响,半径较小时,主要受干扰影响;小区的能源效率随着发射功率的增大会出现一个最大值;小区能源效率随带宽的增大而增大。这些都为移动 WiMAX 网络的能量优化提供了依据。

关键词 移动全球微波互联接入(WiMAX),多小区,多用户,频谱效率,能量效率

0 引言

无线移动通信为人们的生活提供了许多便利,同时也造成了巨大的能量消耗。面对巨大的能耗压力,无线移动通信的节能技术已成为当前研究热点^[1]。作为 3G 标准之一的 IEEE802.16e 移动全球微波互联接入(worldwide interoperability for microwave access, WiMAX)在 IP 电话(voice over internet protocol, VoIP)、多媒体广播等方面得到了广泛的应用^[2]。截至 2011 年底,WiMAX 在美国、日韩、拉美等地区已覆盖超过 2000 万用户。本文基于移动 WiMAX 的 7 小区拓扑模型,以中心小区作为研究对象,对基站小区整体频谱效率和能量效率进行了分析,研究了频谱效率和能量效率同网络关键参数如覆盖范围、发射功率等的关系,为小区数目和基站发射功率的优化提供理论依据。

针对网络能量效率和频谱效率的研究,Chen 等在文献[3]中对链路级水平下,能量效率同架设成本、能量效率同频谱效率、功率和带宽以及功率和延时之间的基本关系,未在网络级进行分析。Wen 等在文献[4]中基于第三代合作伙伴计划(3GPP)长

期演进(LTE)标准建立了网络仿真模型,分析了能量效率同网络所使用的无线频率以及带宽之间的关系,但未考虑基站覆盖和发射功率的影响。Alsedairy 等在文献[5]中,分析了近距离通信场景的能量效率和频谱效率等,但未考虑用户受到的干扰。本文综合考虑了 WiMAX 7 小区模型中小区间干扰、小区半径和基站发射功率等因素对能量效率和频谱效率的影响,从网络级层次分析了中心小区的能量效率和频谱效率性能。根据香农信道公式,频谱效率是信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)的函数,因此本文对该 7 小区结构下的 SINR)进行了近似计算,分析了单用户的频谱效率同用户和基站之间距离以及发射功率的关系、小区整体的频谱效率同覆盖范围的关系以及小区整体的能量效率同发射功率和传输带宽的关系。

1 系统模型

图 1 为 IEEE802.16 典型的 1×1 频率复用方式的 7 小区结构系统模型^[2],小区半径为 R ,中心小区中的用户会受到相邻 6 个小区的同频干扰。IEEE802.16e 标准的物理层采用了正交频分多址

① 国家自然科学基金(51274018),国家科技支撑计划课题(2013BAK06B03)和东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2010D11)资助项目。

② 男,1987 年生,硕士;研究方向:无线宽带通信;联系人,E-mail: wyang@bjtu.edu.cn
(收稿日期:2012-05-30)

(orthogonal frequency division multiple access, OFDMA) 技术,可以支持时分双工(time division duplexing, TDD)和频分双工(frequency division duplexing, FDD)两种物理层帧结构^[2,6,7]。但 WiMAX 论坛的认证中只包含了 TDD^[6]。TDD 模式下,传输的单位是帧,每帧包含若干个 OFDMA 符号。传输资源是以子信道的方式分配给用户。每个子信道都是时域和频域二维意义上的概念,这些子信道在时域上可以横跨多个符号,频域上可以占一部分 OFDMA 子载波,不同的用户会分配到不同的子信道上,而这些子信道之间是互相正交的,不考虑来自小区内其他移动台的干扰。因此,只需考虑相邻基站对中心小区用户造成的同频干扰。

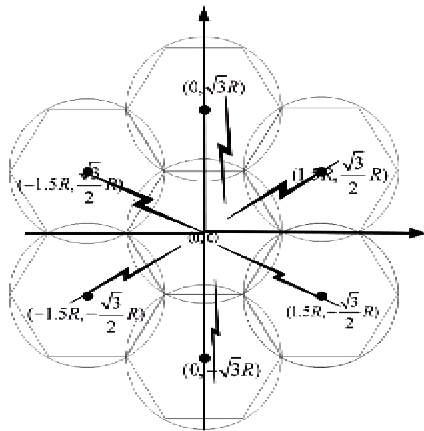


图1 仿真系统模型

2 SINR 的计算

中心小区中的用户既要受到噪声的影响,也要受到其相邻小区干扰的影响。因此,需要先计算小区间干扰以及移动台的热噪声,得到 SINR,然后才能计算每个用户的数据速率,从而进一步得到每个用户或者小区整体的频谱效率和能量效率。

2.1 小区间干扰的计算

令 i 为选定的研究对象, x 表示用户在目标小区中的位置。基站 i 到位置 x 处的路径损耗可以表示为

$$L_i(x) = (K |x - i|)^\beta \quad (1)$$

其中 $|x - i|$ 表示位置 x 和基站 i 之间的距离, K 和 β 是两个给定的参数。 β 为信号传输过程中的路径损耗,不同无线环境下 β 的值有很大不同,表 1 中列出了几种测定后的无线环境路径损耗。在自由空间传播模型中 $K = 4\pi/\lambda$, $\beta = 2$ 。论文中,选择 $K = 1$,

$\beta = 4$, 同修正的 cost231 Hata 模型相对应。令 j 表示和 i 相邻且对 i 造成干扰的其他基站, P_{ii} 和 P_{ij} 分别是基站 i 和 j 的发射功率,则 $L_i(x) \times P_{ii}$ 表示接收端的信号, $L_j(x) \times P_{ij}$ 表示其他小区的干扰。小区间干扰的影响可以表示为

$$SIR(x) = \frac{L_i(x) \times P_{ii}}{\sum_{i \neq j} L_j(x) \times P_{ij}} \quad (2)$$

表 1 不同无线环境的路径损耗值

参数	参数值
自由空间	2
市区蜂窝无线传播	2.7 ~ 3.5
被建筑物阻挡	4 ~ 6
被工厂阻挡	2 ~ 3

2.2 热噪声的计算

令 $Noise$ 表示接收端的热噪声, Δf 表示噪声所占的带宽。计算噪声时, Δf 是被有效使用的那部分带宽。在移动 WiMAX 中,需要在传输带宽 BW 上乘一个比例 $n \times N_{used}/N_{FFT}$ 。因此,热噪声的计算式为

$$Noise = -174 + 10\lg(BW \times n \times \frac{N_{used}}{N_{FFT}}) \quad (3)$$

式中, n 是取样因子,取样因子与 WiMAX 系统的两个重要参数传输带宽 (BW) 和采样频率 (F_s) 之间的关系为 $F_s = \text{floor}(n \times BW/8000) \times 8000$,它决定了子载波的宽度和符号的有效时间。当传输带宽是 1.25、1.5、2 和 2.75MHz 的整数倍时, n 的值为 28/25。 N_{used} 是传输中实际使用的子载波, N_{FFT} 是 OFDMA 总共的子载波数。

OFDMA 子载波数和实际使用的子载波数同传输带宽以及所采用的信道分配方式都有关系。带宽越大,则 OFDMA 子载波数越多。可以看到,带宽的变化,其直接影响就是接收端的热噪声。WiMAX 中的物理带宽 W 可以为 1.25MHz、5MHz、10MHz 和 20MHz,其采用的信道分配方式包括完全使用子信道(full usage of sub-channel, FUSC)、部分使用子信道(partial usage of sub-channel, PUSC)、支持自适应调制编码(adaptive modulation and coding, AMC)子信道等^[7]。分配方式不同,可以使用的子载波数也不同。移动 WiMAX PUSC 下行链路的参数规定如表 2 所示^[9]。

表 2 移动 WiMAX DL PUSC 配置

参数	参数值			
带宽 (MHz)	1.25	5	10	20
子载波总数	128	512	1024	2048
保护子载波数	43	91	183	367
使用的子载波	85	421	841	1681

假设图 1 中的每个基站其发射功率都相同,如果一个小区内存在多个用户,给每个用户分配相同的资源。令 $\bar{P}_i$ 表示基站总的发射功率,则每个用户的功率可以表示为

$$p = \bar{P}_i \times w/BW \quad (4)$$

其中 w 表示分配给每个用户的带宽, BW 表示总的传输带宽。在考虑小区间干扰的情况下,基站 i 在某个位置 x 处的信噪比可以表示为

$$\begin{aligned} SINR(x) &= \frac{\frac{p}{L_i(x)}}{\frac{w}{BW} \times Noise + \frac{w}{BW} \sum_{i \neq j} \frac{\bar{P}_i}{L_j(x)}} \\ &= \frac{1}{s(x)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{其中, } s(x) = \frac{Noise \times L_i(x)}{\bar{P}_i} + \sum_{i \neq j} \frac{L_i(x)}{L_j(x)}。$$

3 全小区频谱效率和能量效率

采用上述方法计算得到 SINR,并结合信息论原理,即可得到单用户的频谱效率和能量效率。针对小区中的每个用户计算其统计平均,则可得到小区整体的性能指标。

根据香农公式,用户的比特速率 R 、带宽 W 和信噪比 SINR 之间的关系可以表示为

$$\begin{aligned} R &= BW \times \psi(SINR) \\ \psi(SINR) &= b \log_2(1 + \frac{1}{a} SINR) \end{aligned} \quad (6)$$

在加性高斯白噪声(AWGN)条件下, $a = b = 1$ 。实际过程中,如果带宽有损耗或者采用了各种编码方式, b 的取值会小于 1,而 a 的取值则不等于 1。对于平坦衰落的情况, Li 等人在文献[10]中给出了 a 和 b 的近似取值: $a = 2$, $b = 1$ 。为了更符合实际,选择平坦衰落的情况。对于位置为 x 处的用户,其频谱效率可以表示为比特速率与带宽的比值:

$$SE(x) = \psi(SINR(x)) \quad (7)$$

公式(7)的结论只是链路级的频谱效率,而小区整体的频谱效率,则要从统计的角度来分析。如果用户均匀分布于 $A \in R^2$ (R 表示蜂窝半径),则 A 上的频谱效率可以表示为所有用户频谱效率的均值。若 A 是基站 i 所覆盖的小区,则小区 i 的频谱效率可以表示为

$$SE(i) = \overline{SE(A)} = \frac{1}{Q} \sum_q SE(x_q) \quad (8)$$

其中, Q 表示小区中的用户数, x_q 表示第 q 个用户的位置。

常规的宏基站需要为大片区域提供服务,并保证一个最小的可靠覆盖。在城市地区,宏蜂窝半径通常为 1000 ~ 5000m。基站的能量消耗通常和小区半径以及覆盖的程度有关系。每个基站平均消耗的功率 P 和其平均发射功率 $\bar{P}_i$ 可以用一个线性表达式

$$P = c \times \bar{P}_i + d \quad (9)$$

联系起来^[11],其中 c 、 d 均为给定的常数。 c 表示了功率放大器、馈线损耗以及发射端降温的能耗, d 表示了信号处理、备用电池和其他设备冷却的能耗。现在我们可以得到某个基站 i 的能量效率 $EE(i)$, 如公式

$$EE(i) = \frac{BW \times SE(i)}{P} = \frac{BW \times SE(i)}{c \times \bar{P}_i + d} \quad (10)$$

所示。其中 $SE(i)$ 表示基站 i 的频谱效率, BW 表示所使用的传输带宽。因此,能量效率最终可以表示为 bit/J。

4 仿真结果与分析

基于图 1 的模型,分别讨论了中心小区的频谱效率同小区半径的关系、小区能量效率同小区半径和发射功率以及传输带宽的关系。系统模型的一些参数采用 IEEE802.16e 移动 WiMAX 的规定,具体见表 3。由于用户分布的随机性,将采用 Monte Carlo 方法进行仿真,并且假设有 100 个用户均匀分布在中心小区,用户每一次随机分布作为一次快照。对于每个选定的小区半径,分别统计其 50 次快照的数据,然后计算平均结果,作为小区的特征指标。

表 3 系统仿真参数

参数	参数值
用户位置	均匀分布
用户数量	100
基站发射功率(dBm)	33、38、43
天线增益(dBi)	12
噪声功率谱密度(dBm/Hz)	-174
带宽(MHz)	1.25、5、10、20
FFT 点数	128、512、1024、2048
a 和 b	$a = 2, b = 1$
c 和 d	$c = 21.45, d = 354.44$
K 和 β	$K = 1, \beta = 4$

4.1 频谱效率

图 2 表示单用户链路的频谱效率和同用户位置的关系。仿真时基站的功率依次取值为 33dBm、38dBm、43dBm,天线增益 12dB,用户和基站的距离从 50m 增加到 5000m。从图 2 中可以看出,频谱效率随着用户同基站距离的增大而呈现单调递减的关系,从最初 50m 处的 5 bit/(s·Hz) 以上快速下降到 4000m 处的 1bit/(s·Hz) 以下。由此可见小区边缘的用户,其通信质量远远不如靠近小区的用户。增加发射功率后,所得的曲线其基本走势不变。当用户距离基站较近时,曲线几乎重合,说明此时发射功率的增加并没有提升频谱效率。当用户和基站距离较远时,发射功率增加,小区的频谱效率会有所提升,但幅度不是很明显。当发射功率从 33dBm(2W) 提升到 43dBm(20W) 时,其 4000m 处的频谱效率从 0.826 提升到 1.3838,增加了约 0.55bit/(s·Hz)。而在发射功率提高到一定程度后,不论用户所处位置同基站远近,频谱效率都不会在增加,这从发射功率为 50dBm 和 55dBm 的两条曲线几乎重合就可以看

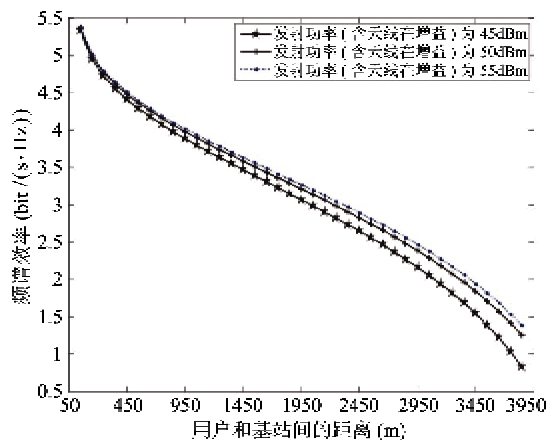


图 2 链路频谱效率与用户位置的关系

出。所以希望通过增加发射功率而提高频谱效率,其所需的功率将会很大,十分耗费能源,和当今绿色通信的理念相悖。

图 3 表示整个小区的频谱效率同小区半径的关系。从图 3 中可以看到,在小区半径小于 3000m 时,整个小区总体的频谱效率较高且基本保持不变。这主要是由于小区的频谱效率是小区中所有用户频谱效率的均值,如果每个用户的 SINR 都较高,则中心小区的频谱效率就会较高。对公式(5)的两边在整个小区上求平均,可以看到影响整个小区 SINR 平均值的因素有两个,分别是同频干扰项 $\sum_{i \neq j} L_i(x)/L_j(x)$ 和噪声 $Noise \times \bar{L}/\bar{P}_t$ 。当小区半径较小时,因距离所产生的衰落较小,由于发射功率远大于噪声,因此干扰因素起主导作用,此时小区整体 SINR 受小区半径影响较小,所以这时频谱效率曲线基本保持平稳。当半径大于 3000m 之后,频谱效率呈现下降趋势。这主要是由于当小区的半径较大后,功率成指数衰落,而 $Noise \times \bar{L}/\bar{P}_t$ 同 R^β 成正比,因此半径显著增加后噪声起主导作用,小区的 SINR 水平受热噪声的影响更加明显。因此,在曲线的后半段,当用户和基站的距离超过 3000m 之后,小区的频谱效率呈现下降趋势。

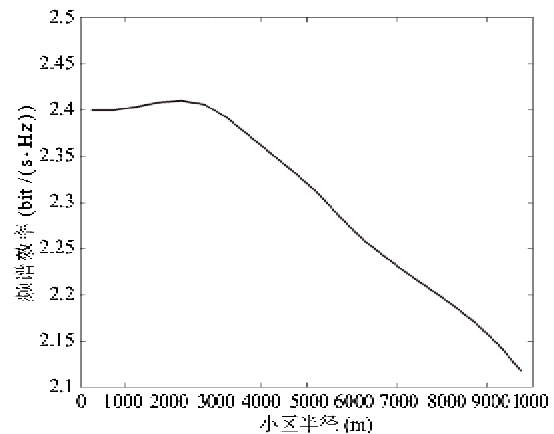


图 3 小区频谱效率同小区半径的关系

可见,从链路级和网络级频谱效率的角度出发,选择适当的发射功率和小区覆盖范围,可以避免盲目提高发射功率或增加小区数目带来的能量浪费。

4.2 能量效率

图 4 表示小区能量效率同发射功率的关系。共 100 个用户均匀分布在小区中,天线增益为 12dB,令发射功率(含天线增益)从 20dBm 增加到 65dBm,并将半径分别为 500m、1000m 和 1500m 的三种小区

进行了对比。能量效率的计算基于公式(10)。从图4中可以看到,并不是发射功率越大,小区的能量效率就越高。当小区的能量效率达到一个最高值之后,便随着发射功率的增大而急剧降低。此外,对于半径不同的小区,其曲线走势基本相同。同时,能量效率最高值出现的位置,随着小区的配置而略有不同。但是,三种不同半径的小区,其能量效率的最高值均在6500bit/J。目前最常用的发射功率是43dB,其能量效率仅为最大值的1/2。

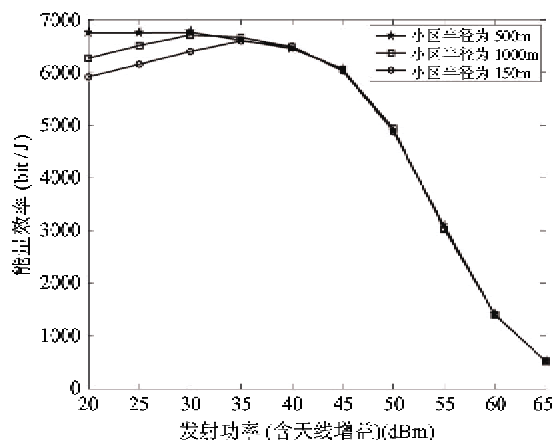


图4 小区能量效率同小区半径的关系

图5表示小区能量效率和传输带宽的关系。移动 WiMAX 标准规定了多种传输带宽,如1.25MHz、5MHz、10MHz和20MHz。仿真时设定小区半径为1000m,发射功率为43dBm,天线增益为12dB,100个用户均匀分布于小区当中。从图5中可以看到,使用带宽越大,则能量效率越高。在频率资源十分紧张的今天,只有在高频段才可以获得较大的传输带宽。WiMAX的工作频率可以从2.5GHz变化到

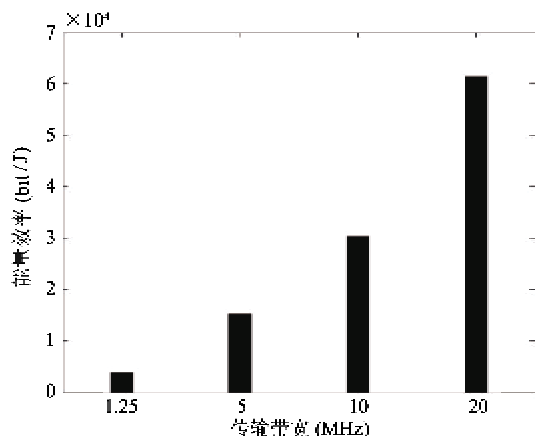


图5 小区能量效率同传输带宽的关系

6GHz,由于工作在高频,所以可以获得的传输带宽较高。目前,WiMAX中广泛使用的带宽为10MHz,从仿真结果来看,这个选择是比较折中的。

5 结论

本文以移动 WiMAX 7 小区结构作为网络模型,分析了中心小区的频谱效率和能量效率同小区半径、发射功率以及传输带宽等因素的关系。研究过程中考虑了小区间干扰对频谱效率和能量效率的影响,给出了小区间干扰的近似计算。仿真实验表明,小区半径在某一区间内变化时,小区的频谱效率会保持不变,小区半径太大,则频谱效率会降低。当发射功率取值合适时,小区的能量效率会出现一个最大值。此外,如果所使用的传输带宽越大,则能量效率也越高。通过对小区覆盖半径和基站发射功率进行优化,可以使网络性能保持在较高水平,同时降低网络能耗。

参考文献

- [1] Kakemizu M, Chugo A. Approaches to green networks. *Fujitsu Scientific and Technical Journal*, 2009, 45 (4): 98-109
- [2] 田韬,张新程,周晓津. WiMAX 16e 无线网络技术与应用. 北京:人民邮电出版社,2009. 272-319
- [3] Chen Y, Zhang S, Xu S, et al. Fundamental trade-offs on green wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(6): 30-37
- [4] Wen W Q, Xiao L, Sun Y. Research of relationship of wireless energy efficiency and spectrum. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Wuhan, China, 2011. 1-4
- [5] Alsedairy T A, Imran M A. Energy efficiency with adaptive modulation and spectrum sharing for cellular systems. In: *Proceedings of the 11th Annual Postgraduate Symposium on The Convergence of Telecommunications, Networking & Broadcasting*, Liverpool, UK, 2010. 27-31
- [6] Mobile WiMAX - Part I: A technical overview and performance evaluation. http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Mobile_WiMAX_Part1_Overview_and_Performance.pdf; WiMAX Forum, 2006
- [7] IEEE standard for local and metropolitan area networks Part 16: air interface for broadband wireless access systems. <http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/802.16-2009.pdf>; WiMAX Forum, 2009

- [8] Coverage of mobile WiMAX. <http://www.scribd.com/doc/12867873/mobile-WiMAX-link-budget>; Mobile WiMAX Group, 2009
- [9] Korowajczuk L. LTE, WiMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis. West Sussex: John Wiley & Sons, 2011. 391-395
- [10] Li J, Blaose A, Zhao Y. Rayleigh flat fading channels capacity. In: Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference, Halifax, Canada, 2005. 214-217
- [11] Richter F, Fehske A J, Fettweis G P. Energy efficiency aspects of base station deployment strategies for cellular networks. In: Proceedings of the 70th Vehicular Technology Conference, Anchorage, USA, 2009. 1-5

Study on spectrum and energy efficiency for mobile WiMAX networks

Xie Zhibin^{*}, Yang Wei^{*}, Xu Changlong^{**}

(^{*} School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044)

(^{**} National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract

Based on the IEEE802.16e protocol, the method for approximate calculation of the signal to interference plus noise ratio (SINR) of a world wide interoperability for microwave access (WiMAX) cell in the case of multi-cell/multi-user was deduced. By using the SINR, the spectrum efficiency and the energy efficiency of a central cell were calculated for a WiMAX 7-cell model. The relationships between the spectrum efficiency, the energy efficiency and the network parameters such as cell radius and transmitted power were analyzed to provide the theory basis for network energy consumption optimization. The simulation results show that the spectrum efficiency of the link is mainly affected by the distance between a user's location and the base station (BS), and the transmitted power has little effect on it; the spectrum efficiency of a cell is mainly affected by interference when its radius is small and by noise when the radius is large; the energy efficiency reaches a maximum value for a specific transmitted power; the energy efficiency grows with the transmission bandwidth increasing. The results can help to make decisions about cell radius or transmitted power so as to reduce the energy consumption of networks.

Key words: mobile world wide interoperability for microwave access (WiMAX), multi-cell, multi-users, spectrum efficiency, energy efficiency