

一种联合 QoS 约束及波束形成准则的蜂窝网络 高效协作传输技术

宋海龙¹ 张书真²

(吉首大学信息科学与工程学院 吉首 416000)¹ (中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)²

摘 要 针对由于通信干扰严重导致的蜂窝网络数据传输效率不高、能耗较大的问题,提出一种联合 QoS 约束及波束形成准则的蜂窝网络高效协作传输技术。该技术采用了由宏蜂窝、飞蜂窝组成的蜂窝网络系统模型,分析了网络通信过程中的信号干扰及功率情况。基于 QoS 约束的高效协作传输算法,采用 QoS 约束把数据传输的能量效率问题优化成波束成形和功率分配问题,并将 QoS 约束考虑进波束形成准则,从而改善网络的干扰状态,提高能量效率。实验仿真结果的对比情况表明,该技术可以提高蜂窝网络进行数据传输的能量效率,并减少通信干扰。

关键词 蜂窝网络, QoS 约束, 高效协作传输, 波束成形

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.12.045

Efficient Cellular Networks Collaboration Transmission Technology with QoS Constraints and Beamforming Criterion

SONG Hai-long¹ ZHANG Shu-zhen²

(School of Information Science and Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China)¹

(School of Information Science and Engineering, Zhongnan University, Changsha 410083, China)²

Abstract For the issues that data transfer efficiency is not high and the energy is larger caused by the serious cellular network interference, a efficient cellular networks collaboration transmission technology with QoS constraints and beamforming criterion was proposed. The technology uses a heterogeneous system model composed of the macrocell cellular network and the femtocell, and analyzes the network communication and power signal interference conditions. Based on QoS constrain efficient collaboration transmission algorithm, the QoS constraints is used to optimize energy efficiency of data transmission into a beam-forming and power allocation, and the QoS constraints is introduced into beam-forming criteria to improve the state of the network interference and increase the energy efficiency. The comparison of the experimental results indicates that this technique can improve the energy efficiency of the cellular network for data transmission, and reduce the communication interference.

Keywords Cellular networks, QoS constraints, Efficient collaboration transmission, Beamforming

1 引言

高效节能的通信已受到越来越多研究学者的关注,这是由于无线通信需要消耗大量能量且现阶段的电池技术的发展相对滞后,使得节能高效的通信技术成为了无线网络领域的研究热点^[1,2]。由于异构网络可以使通信的传输距离变短,因此现阶段异构无线网络是提高蜂窝系统能量效率的一种有效的方案。在蜂窝系统中,宏蜂窝用于保证网络覆盖,飞蜂窝被用于提供短距离通信和数据的高速传输^[3,4]。此外,全频率复用是现代无线通信系统发展的必然趋势,然而通信干扰严重地限制了这种异构无线网络的性能。因此本文通过 QoS 约束对异构网络采用纳什均衡的合作决策和协同传输方案,从而实现异构网络数据的节能高效传输^[5,6]。

彭舰等^[7]提出一种基于 Sink 轨迹固定的异构延迟容忍网络数据传输机制,该机制根据节点能量消耗和传输延迟计

算出不同时刻各节点的传输概率,有效地控制了 HDTMSN 的消息副本冗余,能够节省网络传输能耗和网络带宽。张琛等^[8]提出一种异构网络跨层协作传输技术研究方案,该方案基于 OFDMA 下行传输系统并支持宏基站和低功率基站在资源块级别的协作传输,考虑在 Macro 和 Pico 基站之间采用 RB 级别的协作传输技术以减少严重的层间干扰,所提出的协作传输策略在系统吞吐量性能方面优于现有的 eICIC 技术。刘唐等人^[9]提出一种异构延迟容忍移动传感器网络中基于转发概率的数据传输技术,该技术根据节点能量消耗和消息传输延迟计算出节点的传输概率和转发概率,将消息当前的延迟容忍度作为消息丢弃依据的消息队列管理机制,可以降低网络传输能耗,延长网络寿命。Lu 等人^[10]提出一种异构用户协作通信的高速率广播网络高精度传输算法,对所提出的合作计划的各种结构进行了研究,还研究了所提出的方案在实际实施上的系统性能对信道估计误差的影响。Lei

到稿日期:2015-01-08 返修日期:2015-03-29 本文受国家自然科学基金(61173169,61363073),湖南省教育厅科研项目基金(13C755)资助。
宋海龙(1977—),男,博士生,讲师,主要研究方向为网络编码、编码密码, E-mail: highsong@126.com; 张书真(1977—),女,硕士,副教授,主要研究方向为信号分析、数字图像处理。

等^[11]提出一种无线异构传感器网络中基于网络编码的高能效的数据融合和传输技术,该技术引入了一种五层的网络模型,并且建立了网络拓扑,使得接收器能够以更高的速率接收数据,而不引入过多的额外传输,有效地提高了网络的能量效率。Keivan 等^[12]提出一种基于非实时下行数据传输的异构 DS-CDMA 蜂窝网络,使用了基于效用的优化方案,并动态规划了非实时业务的时域最优调度。使用的分数高斯噪声 (FGN) 模型中采用适当时间尺度来表示自相似性以及在下行线路的干扰,可以显著增加平均小区吞吐量并改善网络延迟性能。

2 系统模型

考虑到无线网络中飞蜂窝的下行链路传输形式,此系统由单一的宏蜂窝和几个飞蜂窝基站组成,采用全频率复用^[13,14]。此外,不同宏蜂窝之间的干扰不会被考虑,系统模型如图 1 所示。移动和固定通信设备都配有单个天线,基站配备 N_T 个天线提供空分复用,基站为 M 个移动设备提供服务,其中为了消除干扰,飞蜂窝内的小型基站还配备了多个天线,任一小型基站 i 都有 N_i 条天线,共有 N_F 个小型基站被部署在飞蜂窝内^[15,16]。

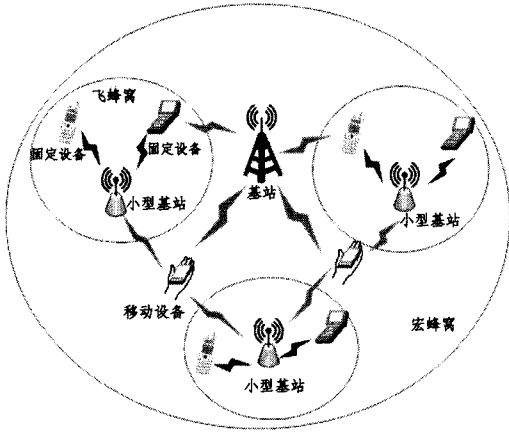


图 1 系统模型

假设本文系统存在慢衰落信道,信道状态信息(CSI)是唯一可用的任何一对发射器和接收器。此外,移动设备的信号与干扰加噪声比(SINR)状态会反馈给所有的小型基站。在实际的系统中,只有相邻的信息是必要的。

然后在移动设备 i 中接收到的信号可以表示为:

$$S_i = H_i^k \psi_i \kappa_i + \sum_{n=1}^M H_i^n (\psi_n, \kappa_n) + \sum_{j=1}^{N_F} H_{ij}^k \lambda_j c_j + g_i \quad (1)$$

其中, H_i^k 表示在移动设备 i 与基站之间的信道向量, H_{ij}^k 表示在移动设备 i 与小型基站 j 之间的信道向量,包括大尺度衰落和小尺度衰落^[17]。 ψ_n 是基站与移动设备 n 之间的波束形成向量。 κ_n 是移动设备 n 的输入数据,是零均值单位方差的复高斯随机变量^[18,19]。 λ_j 是小型基站 j 对于固定设备 j 的波束形成矢量。 c_j 是固定设备 j 的输入数据,这是零均值单位方差的复高斯随机变量。 g_i 是在移动设备 i 在 $(0, \eta^2)$ 之间分布的加性高斯白噪声。

$H_i^k \psi_i \kappa_i$ 表示有用信号, $\sum_{n=1}^M H_i^n (\psi_n, \kappa_n)$ 表示在宏蜂窝中其它移动设备的干扰信号, $\sum_{j=1}^{N_F} H_{ij}^k \lambda_j c_j$ 表示所有的小型基站中的干扰信号。可以得到移动设备 i 的 SINR 为:

$$\zeta_i = \frac{3 \lg(H_i^k \psi_i)^2}{\sum_{n=1}^M (H_i^n \psi_n)^2 + \sum_{j=1}^{N_F} (H_{ij}^k \lambda_j)^2 + \eta^2} \quad (2)$$

移动设备 i 的数据速率为:

$$v_i = \ln(1 + \frac{2\zeta_i}{\pi}) \quad (3)$$

此外, SINR 的门限阈值 ζ_i^T 被用来保证移动设备的 QoS。固定设备接收到的信号能够表示为:

$$S_n = A_n \lambda_i c_i + \sum_{j=1}^{N_r} A_{nj} \lambda_j c_j + A_n (\sum_{z=1}^{N_F} \psi_z \kappa_z + D_i) \quad (4)$$

其中, N_r 表示固定设备的个数, A_i 表示固定设备 i 与基站之间的信道向量, A_{ij} 表示在小型基站与固定设备 i 之间的信道向量,包括大尺度衰落和小尺度衰落。 D_i 是在固定设备 i 在 $(0, \eta^2)$ 之间分布的加性高斯白噪声。

$A_n \lambda_i c_i$ 表示有用信号, $\sum_{j=1}^{N_r} A_{nj} \lambda_j c_j$ 表示由其他小型基站产生的干扰信号,而 $A_n (\sum_{z=1}^{N_F} \psi_z \kappa_z + D_i)$ 表示由基站引起的干扰信号。固定设备的 SINR 表示为:

$$\zeta_n = \frac{3 \lg(A_n \lambda_i)^2}{\sum_{j=1}^{N_F} (A_{nj} \lambda_j)^2 + \sum_{z=1}^{N_F} (A_n \psi_z)^2 + \eta^2} \quad (5)$$

固定设备 i 的数据速率为:

$$v_n = \ln(1 + \frac{2\zeta_n}{\pi}) \quad (6)$$

为了实现高能效的数据传输,本文考虑了发送功率以及电路功率。对于基站,移动设备 i 的发射功率表示为:

$$P_i = \|\psi_i\|^2 \quad (7)$$

然后,得到基站的总发送功率为:

$$P_T = \sum_{i=1}^M \|\psi_i\|^2 \quad (8)$$

因此,基站的总功率是:

$$P_Z = P_T + P_D \quad (9)$$

P_D 表示基站的电路功率。

同样,小型基站 i 的发射功率可以表示为:

$$P_i^F = \|\lambda_i\|^2 \quad (10)$$

小型基站 i 的总功率为:

$$P_i^Z = P_i^F + P_i^D \quad (11)$$

P_i^D 表示小型基站的电路功率。

3 联合 QoS 约束及波束形成准则的高效协作传输技术

由于基站的传输方式是固定的,因此为了实现高能效的数据传输方案,需要针对小型基站的传输方式进行讨论。由于小型基站都配备多个天线,采用 QoS 约束把问题优化成波束成形和功率分配。

对于多用户 MIMO 下行链路通信,为了抑制同信道干扰,根据波束形成准则,将小型基站 i 的波束形成定义为:

$$f(i) = (\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_F} H_i^k H_{ij}^k + \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_F} A_i A_{ij}) \quad (12)$$

将 QoS 约束考虑进波束形成准则,使得移动设备和固定设备在波束形成器中被平等对待,这时则需要提高移动设备的优先级,使得其 SINR 值低于 SINR 阈值 ζ_i^T 。

假设有一组移动设备 L ,其 SINR 低于阈值,则对于移动设备 $i(i \in L)$,其 SINR 能够表示为:

$$\zeta_i = \frac{\|H_i^k \psi_i\|^2}{\lg(1 + G_i) + \eta^2} \quad (13)$$

如果已知 SINR 阈值 ζ_i^T 则可以得到 G_i^T, G_i^T 表示 SINR 为 ζ_i^T 的情况下期望的干扰:

$$G_i^T = 2 \exp\left(\frac{\|H_i^k \psi_i\|^2}{\zeta_i} - \eta^2\right) - 1 \quad (14)$$

当移动设备的 QoS 无法满足要求时,为了使得移动设备的 SINR 值低于 SINR 阈值 ζ_i^T ,则需要使移动设备 i 的期望的干扰满足 $\zeta_i^T < \zeta_i$ 。

因此,将 QoS 约束考虑进波束形成准则后,小型基站 i 的波束形成定义为:

$$f(i) = I_i(t) + \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_F} x_i H_i^k H_{ij}^k\right) + \left(\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_F} y_i A_i A_{ij}\right) \quad (15)$$

其中, $I_i(t)$ 表示在迭代第 t 个循环期间小型基站 i 的基本矩阵:

$$I_i(t+1) = I_i(t) + (x_i H_i^k H_{ij}^k + y_i A_i A_{ij}) \quad (16)$$

x_i 表示移动设备 i 的权值,在本文中权值 x_i 为:

$$x_i = \begin{cases} \frac{\zeta_i - \zeta_i^T}{2\zeta_i}, & i \in L, \zeta_i > \zeta_i^T \\ \frac{\zeta_i}{2\zeta_i^T}, & i \in L, \zeta_i \leq \zeta_i^T \end{cases} \quad (17)$$

y_i 表示归一化因子,可以得到:

$$y_i = \begin{cases} 0, & L = \emptyset \\ \frac{1}{\sum_{i \in L} x_i}, & L \neq \emptyset \end{cases} \quad (18)$$

在式(15)中,在每次迭代期间权值随着信道状态和干扰情况而发生变化。波束形成器表明为了减少移动设备的干扰, SINR 需要低于阈值,而权值越大,对应的设备干扰越大。

因此,对于小型基站 i ,归一化的波束形成器表示为:

$$\overline{f(i)} = I_i(t) + \frac{v_i}{\|v_i\|} \quad (19)$$

4 实验仿真及分析

本节将通过 Matlab7.1 编程仿真对所提出算法的性能进行验证。模拟的场景宏蜂窝网络包括了基站、小型基站、移动设备和固定设备,基站与每一个飞蜂窝的距离为 200m,基站位于宏蜂窝的中间,小型基站位于飞蜂窝中间,固定设备随机分布在飞蜂窝的区域内,移动设备随机分布在宏蜂窝内、飞蜂窝外的区域。其他网络参数如表 1 所列,仿真参数的设置遵循 3GPP 技术报告中的 Case1 场景。

表 1 网络参数

参数	值
信号带宽	8kHz
噪声功率谱密度	-150dBm/Hz
路径衰落	-37log(d)
基站的发射功率	35dBm
基站的电路功率	250mW
SINR 阈值	6dB
基站的天线数	5
小型基站的发射功率	20 dBm
小型基站的电路功率	50mW
小型基站的天线数	4

在只有小型基站来覆盖蜂窝网络的条件下,移动设备为 4 个,固定设备为 6 个,通过 Matlab7.1 进行仿真,得到了此条件下的网络能量效率。从图 2 中可以看出,随着迭代步数的增加,网络消耗的能量开始逐渐增多,并且能量消耗的增长趋势趋于平缓;还可以看出,本文算法的能量消耗在 (0.87J, 1.66J) 区间内,Lei 的算法的能量消耗在 (1.14J, 2.32J) 区间内,Keivan 的算法的能量消耗在 (1.23J, 2.03J) 区间内。因此

本文算法的能量消耗量最小,具有明显的节能优势。这是由于本文将 QoS 约束引入到波束形成准则来控制 SINR 值,从而减少了信道干扰,提高了能量的利用效率。

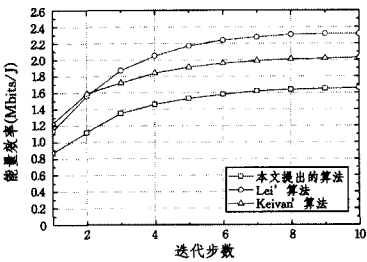


图 2 小型基站覆盖网络下的能量效率

图 3 为只有基站来覆盖蜂窝网络的条件下,移动设备为 4 个,固定设备为 6 个,通过 Matlab7.1 进行编程仿真后得到的结果。从图 2 和图 3 中的能量效率的对比情况可以看出,只采用基站进行覆盖网络消耗的能量消耗量小于只采用小型基站进行网络覆盖时所消耗的能量。从图 3 中 3 种算法的能量效率对比情况可以看出,发送相同的数据量时,本文算法所消耗的能量更少。这是由于本文的方法使用波束形成准则分析出 SINR 阈值会影响移动设备的干扰,从而采用 QoS 约束来对 SINR 加以约束,而另外两种算法在对蜂窝网络数据传输技术的研究上并没有对移动设备间的干扰问题进行有效分析。

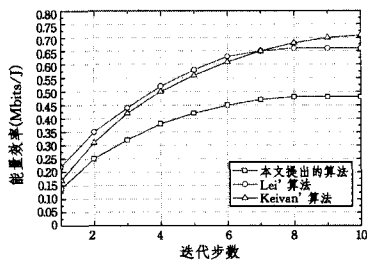


图 3 基站覆盖网络下的能量效率

在宏蜂窝中保留 1 个基站、4 个移动设备和 n 个固定设备的情况下进行了模拟仿真,其中设定小型基站的个数也为 n ,即有多少个小型基站就会有多个固定通信设备。在逐渐增加小型基站的情况下,得到了图 4 所示的仿真结果。图 4 显示了小型基站的平均能量效率,从图中的曲线分布情况可以看出,随着小型基站数量的增加,小型基站用于传输数据的平均能量消耗量减小。小型基站数为 2 时,在本文的算法中小型基站的平均能量消耗量为 3.7J,而 Lei 的算法为 4.5J, Keivan 的算法为 5.6J。在小型基站数为 16 时,在本文的算法中小型基站的平均能量消耗量为 0.4J,而 Lei 的算法为 1.8J, Keivan 的算法为 1.6J。因此,本文算法在数据传输的高效节能性能上表现出了比对比算法更好的效果。

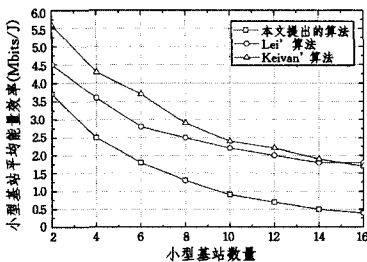


图 4 增加小型基站数量时的平均能量效率

(下转第 219 页)

- [15] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005:35-50
- [16] 马祖长,孙怡宁,梅涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004,25(4):114-124
Ma Zu-chang, Sun Yi-ning, Mei Tao. Survey on Wireless Sensors Network[J]. Journal of China Institute of Communications, 2004,25(4):114-124
- [17] 李津生,洪佩琳. 下一代 Internet 网络技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2001
- [18] 王钦. 基于 ZigBee 技术的无线传感网络研究与实现[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2011,25(8):46-51
Wang Qin. Research and Implementation of Wireless Sensor Network based on ZigBee[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2011,25(8):46-51

(上接第 214 页)

结束语 通信干扰严重地限制了蜂窝无线网络的性能。为了有效提升网络的能量效率,本文提出一种联合 QoS 约束及波束形成准则的蜂窝网络高效协作传输技术,采用了由宏蜂窝、飞蜂窝组成的异构蜂窝网络系统模型,通过基于纳什均衡 QoS 约束的高效协作传输技术,采用纳什均衡 QoS 约束把问题优化成波束成形和功率分配,并将 QoS 约束考虑进波束形成准则,改善网络的干扰状态,提高能量效率。与文献[11]和文献[12]的对比分析表明,本文算法在提高蜂窝网络的能量效率上取得了更好的效果。

参考文献

- [1] Z Ying, J Chang-gang. A kind of routing algorithm for heterogeneous wireless sensor networks based on affinity propagation [C]//The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC). IEEE, 2014:2481-2485
- [2] Xu C, Liu T, Guan J, et al. CMT-QA: quality-aware adaptive concurrent multipath data transfer in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(11):2193-2205
- [3] Trestian R, Ormond O, Muntean G M. Energy-Quality-Cost tradeoff in a multimedia-Based heterogeneous wireless network environment[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2013, 59(2):340-357
- [4] Wu J, Shang Y, Qiao X, et al. Robust bandwidth aggregation for real-time video delivery in integrated heterogeneous wireless networks[J]. Multimedia Tools and Applications, 2013, 74(11):4117-4138
- [5] Al-Hamadi H, Chen R. Redundancy management of multipath routing for intrusion tolerance in heterogeneous wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2013, 10(2):189-203
- [6] Haldar K L, Ghosh C, Agrawal D P. Dynamic spectrum access and network selection in heterogeneous cognitive wireless networks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2013, 9(4):484-497
- [7] 彭舰,徐彪,孙彦清,等. 基于 Sink 轨迹固定的异构延迟容忍网络数据传输机制[J]. 北京邮电大学学报, 2014, 37(2):53-57
Peng Jian, Xu Biao, Sun Yan-qing, et al. Data transmission algorithm based on path-Fixed Sink in heterogeneous delay tolerant mobile sensor networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014, 37(2):53-57
- [8] 张琛,栗欣,王文清,等. 异构网络跨层协作传输技术研究[J]. 通信学报, 2014, 35(8):198-205
Zhang Chen, Su Xin, Wang Wen-qing, et al. Research of cross-tier cooperative transmission technology in heterogeneous network[J]. Journal on Communications, 2014, 35(8):198-205
- [9] 刘唐,彭舰,杨进. 异构延迟容忍移动传感器网络中基于转发概率的数据传输[J]. 软件学报, 2013, 24(2):215-229
Liu Tang, Peng Jian, Yang Jin. Data delivery for heterogeneous delay tolerant mobile sensor networks based on forwarding probability[J]. Journal of Software, 2013, 24(2):215-229
- [10] Lu S J, Chang R Y, Chung W H, et al. Realizing high-accuracy transmission in high-rate data broadcasting networks with heterogeneous users via cooperative communication[J]. Digital Signal Processing, 2014, 25(2):93-103
- [11] Wang Lei, Yang Yu-wang, Zhao Wei. Network-Coding-Based Energy-Efficient data fusion and transmission for wireless sensor networks with heterogeneous receivers[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014, 13(1):479-482
- [12] Navaie K, Valaee S, Sharafat A R. Optimum model-based non-real-time downlink data transmission in heterogeneous DS-CDMA cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(6):2357-2367
- [13] Alonso R S, Tapia D I, Bajo J, et al. Implementing a hardware-embedded reactive agents platform based on a service-oriented architecture over heterogeneous wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(1):151-166
- [14] Maia G, Guidoni D L, Viana A C, et al. A distributed data storage protocol for heterogeneous wireless sensor networks with mobile sinks[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(5):1588-1602
- [15] Kwon O C, Song H. Cross-layer optimized multipath video streaming over heterogeneous wireless networks[C]//Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), 2013 Asia-Pacific. IEEE, 2013:1-4
- [16] Tarnoi S, Kumwilaisak W, Saengudomlert P, et al. QoS-aware routing for heterogeneous layered unicast transmissions in wireless mesh networks with cooperative network coding[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014, 2014(1):1-18
- [17] Trestian R, Ormond O, Muntean G M. Enhanced power-friendly access network selection strategy for multimedia delivery over heterogeneous wireless Networks[J]. TBC, 2014, 60(1):85-101
- [18] Manfredi S. Congestion control for differentiated healthcare service delivery in emerging heterogeneous wireless body area networks[J]. Wireless Communications, IEEE, 2014, 21(2):81-90
- [19] Amin R, Martin J, Deaton J, et al. Balancing spectral efficiency, energy consumption, and fairness in future heterogeneous wireless systems with reconfigurable devices[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(5):969-980