

异构网络动态配置空白子帧干扰协调算法

张新¹, 张艳², 金春风²

(1. 西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121; 2. 西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710121)

摘要: 为了解决 LTE-A 系统下两层异构网络中的小区间干扰协调问题, 提出了在增强小区中调度几乎空白子帧的干扰方案; 为了降低干扰和进一步提高信道利用率, 设计了一种动态分配几乎空白子帧的算法; 该算法基于小区增强覆盖技术, 指出由增强小区用户与总用户的比例来动态的调整几乎空白子帧比例; 仿真结果对比了固定比例的几乎空白子帧和动态设定几乎空白子帧的算法, 表明动态配置几乎空白子帧的算法, 提高了系统容量, 改善了信道利用率。

关键词: 异构网络; 小区间干扰; 几乎空白子帧

A Dynamic Almost Blank Subframes Allocation for Interference Coordination in Heterogeneous Networks

Zhang Xin¹, Zhang Yan², Jin Chunfeng²

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710121, China;

2. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and

Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In order to solve the problem of Inter-cell interference coordination under the LTE-A system based on two-tier heterogeneous networks, an interference scheme of almost black subframes is scheduled in range expansion. To reduce interference and further improve the channel utilization, an algorithm of dynamic almost black subframes allocation is proposed. The algorithm is based on the cell enhancement technology, pointing out that expand users proportion of total subscribers to dynamically adjust the ratio of almost blank subframes. The simulation results show that the proposed algorithm achieves system capacity and the efficiency of channel improvements, comparing with a fixed proportion of the almost black subframes.

Keywords: heterogeneous networks; inter-cell interference coordination; almost black subframes

0 引言

随着移动通信系统的不断演进, 网络规模呈现爆炸式的增长, 传统的单一网络拓扑结构下系统容量已达到理论极限^[1]。统计表明, 未来将会有 80% 以上的系统吞吐量发生在室内热点场景, 单一的网络拓扑结构已不能满足这种场景需求^[2]。为了解决以上问题, 新一代的移动通信系统在宏 (Macro) 基站覆盖的小区内增加低功率节点, 如微 (Pico) 基站、家庭基站 (Femtocell)、中继节点 (Relay) 等, 这种由宏基站和低功率节点构成的网络拓扑称为异构网^[3]。

在异构网络中, 由于基站类型不同、基站位置摆放的随意性等因素使得异构网络中同层、跨层干扰问题变得异常突出^[4]。在相关文献的研究工作中, 文献 [5] 针对载波聚合技术的小区选择问题, 提出了一种动态的成员载波小区选择算法, 提高了 Pico 小区的系统容量, 但牺牲了 Macro 基站的用户性能。文献 [6] 考虑了宏小区层和 Small Cell 层自适应配置几乎空白子帧 (almost black scheme, ABS) 的问题, 指出以较小的系统吞吐量损失为代价, 换取了边缘用户性能改

善。文献 [7] 提出了在增强小区 (range expansion, RE) 内, 对低功率节点的导频信号加入偏置值, 使得更多的用户接入低功率节点。但是这种接入策略使低功率基站增强区内的用户受到 Macro 基站强烈的下行干扰。文献 [8-9] 给出了几乎空白子帧 (almost black scheme, ABS) 干扰协调技术和 RE 技术对系统容量和公平性的影响, 指出可以牺牲 Macro 用户的性能换取 Pico 用户的性能提升。文献 [8-9] 虽然都指出了在一定比例的几乎空白子帧上传输 Pico 数据, 以达到降低干扰的目的, 却没有指出如何确定 ABS 所占的比例。

基于上述研究工作, 提出了一种基于增强小区用户数动态确定 ABS 比例的下行干扰协调算法, 实现动态频谱分配, 以获得提升系统容量和增强小区用户数据传输率的平衡。

1 两层异构网络场景部署及干扰分析

对于两层异构网络之间的相互干扰, 文献 [10] 介绍了 20 多种场景。这里主要讨论两层异构网络中, 用户受到 Macro 基站与 Pico 基站的下行干扰情况。

Macro-Pico 两层异构网络结构下行干扰如图 1 所示, 其中点画线表示 Macro 小区的覆盖范围, 虚线表示的未采用 RE 技术的 Pico 小区的覆盖范围, 实线表示的是 Pico 增强小区的覆盖范围。从图 1 可以看出, 在未采用 RE 技术时, 用户 UE1、UE3、UE4、UE5 均接入基站 macro; 当用户 UE1 进入基站 pico2 的增强区域内, 此时用户 UE1 受到基站 Macro 严重的下行干扰; 用户 UE5 由于接基站 Pico1 的覆盖范围但不在基站 Pico1 的覆盖范围内, 受到基站 Pico1 的下行干扰。

收稿日期: 2015-12-30; 修回日期: 2016-01-29。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61272120); 西安市科技计划资助项目 (CX1117(5))

作者简介: 张新 (1968-), 女, 陕西西安人, 博士, 教授, 主要从事异构网络方向的研究。

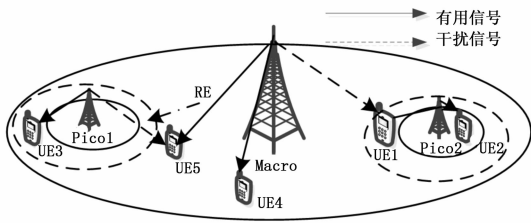


图 1 两层异构网络下行干扰示意图

2 基于用户比例调度的 ABS 的下行干扰协调算法

2.1 增强小区系统容量分析

在异构网络中，由于存在两种基站的分布，小区中每个用户依据检测到 Macro 和 Pico 基站的信干噪比（Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR）来选择接入小区^[11]。

在图 1 所示的场景中，宏基站下覆盖 N_p 个随机放置的 Pico 基站， N_u 为 Macro-Pico 基站覆盖范围内的小区总用户数目。假设第 i ($1 \leq i \leq N_u$) 个用户接入第 p ($1 \leq p \leq N_p$) 个 Pico 小区的信干噪比为 $\psi_{i,p}$ ，定义 ψ 为 N_u 个用户接入的 N_p 个 Pico 小区的信干噪比，

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} & \cdots & \psi_{1N_p} \\ \psi_{21} & \psi_{22} & \cdots & \psi_{2N_p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \psi_{N_u-1,1} & \psi_{N_u-1,2} & \cdots & \psi_{N_u-1,N_p} \\ \psi_{N_u,1} & \psi_{N_u,2} & \cdots & \psi_{N_u,N_p} \end{bmatrix},$$

同理第 i ($1 \leq i \leq N_u$) 个用户接入 Macro 基站的信干噪比为 ρ_i ，定义 ρ 为 N_u 个用户接入的宏小区的信干噪比， $\rho = [\rho_1 \ \rho_2 \ \cdots \ \rho_{N_u}]$ 则 ρ 的 $N_p \times N_u$ 阶矩阵可以表示为：

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_1 & \rho_1 & \cdots & \rho_1 \\ \rho_2 & \rho_2 & \cdots & \rho_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{N_u-1} & \rho_{N_u-1} & \cdots & \rho_{N_u-1} \\ \rho_{N_u} & \rho_{N_u} & \cdots & \rho_{N_u} \end{bmatrix}.$$

针对同一用户 i ，定义 $\gamma_{i,p}$ 为此用户在 Macro 基站和第 p ($1 \leq p \leq N_p$) 个 Pico 基站覆盖下的信干噪比差，即

$$\gamma_{i,p} = \rho_i - \psi_{i,p},$$

此时

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{1,1} & \gamma_{1,2} & \cdots & \gamma_{1N_p} \\ \gamma_{2,1} & \gamma_{2,2} & \cdots & \gamma_{2N_p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{N_u-1,1} & \gamma_{N_u-1,2} & \cdots & \gamma_{N_u-1,N_p} \\ \gamma_{N_u,1} & \gamma_{N_u,N_p-1} & \cdots & \gamma_{N_u,N_p} \end{bmatrix},$$

在 γ 的第 i 行序 $[\gamma_{i,1} \ \gamma_{i,2} \ \cdots \ \gamma_{N_u,N_p}]$ 中，绝对值最大的元素 $\gamma_{i,p}$ 所对应的基站 p 就是目标基站，此时 $\gamma_{i,p}$ 记为： $\gamma_{i,p_{Max}}$ ，即

$$\gamma_{i,p_{Max}} = \max[|\gamma_{i,p}|].$$

当 $\gamma_{i,p} > 0$ 时，表示用户选择接入 Macro 基站；当 $\gamma_{i,p} < 0$ 时，表示用户选择接入 Pico 基站，此时用户接入 Pico 基站的信干噪比为 $\psi_{i,p_{Max}}$ ，统计 $\gamma_{i,p} < 0$ 的个数即为接入 Pico 基站的用户数。将 $\gamma_{i,p_{Max}}$ 的累积分布函数记为 $F(\gamma_{i,p_{Max}})$ ，则接入到

Pico 小区的用户数 (N_{L-pue}) 也可表示为：

$$N_{L-pue} = F(0)N_u.$$

在 RE 技术中，通过在小区选择参数中加入一个 λ 的偏置值，当 Pico 基站的信干噪比差小于 Macro 基站的信干噪比差时，由于增加了接收强度 λ ，原本接入 Macro 基站的部分用户被强行接入 Pico 基站，因此，在 RE 技术下有更多的用户接入 Pico 基站^[12]。

在增强小区情况下的 Macro 基站与 Pico 基站信干噪比差记为：

$$\gamma_{i,p_{Max}} = \gamma_{i,p_{Max}} - \lambda;$$

同理，当 $\gamma_{i,p_{Max}} > 0$ 时，表示用户选择接入 Macro 基站；当 $\gamma_{i,p_{Max}} < 0$ 时，表示用户选择接入 Pico 基站，此时用户的信干噪比为 $\psi_{i,\lambda p_{Max}}$ 统计用户 $\gamma_{i,p_{Max}} < 0$ 的个数，则考虑增强小区情况下的 Pico 基站的用户总人数 N_{pue} 为：

$$N_{pue} = F(\lambda)N_u.$$

显然，接入 Pico 基站的用户总人数是关于 λ 的累积分布函数与用户总人数的乘积。考虑使用比例公平 (Proportional Fair, PF) 调度算法，使调度用户获得平等的服务机会^[13]，则单位带宽下， N_u 个用户接入 Macro 基站的系统容量 (单位为：bps/Hz) 可以表示为 λ 的函数，即

$$C_{macro}(\lambda) = \sum_{i=N_{pue}+1}^{N_u} \frac{1}{N_{muc}} \log(1 + \rho_i) \quad (1)$$

其中：

$$N_{muc} = N_u - N_{pue} = N_u(1 - F(\lambda))$$

则

$$C_{macro}(\lambda) = \sum_{i=N_{pue}+1}^{N_u} \frac{1}{N_u \cdot (1 - F(\lambda))} \log(1 + \rho_i)$$

同理， N_u 个用户接入 Pico 基站的系统容量可以写成 λ 的函数，即

$$C_{pico}(\lambda) = \sum_{i=1}^{N_{pue}} \frac{1}{N_u \cdot F(\lambda)} \log(1 + \psi_{i,\lambda p_{Max}}) \quad (2)$$

因此，在由 Macro-Pico 构成的两层异构网络场景中，由式 (1) 和 (2) 可知， N_u 个用户的系统总容量可以表述为：

$$C_{tot}(\lambda) = \sum_{i=1}^{N_{pue}} \frac{1}{N_u \cdot F(\lambda)} \log(1 + \psi_{i,\lambda p_{Max}}) + \sum_{i=N_{pue}+1}^{N_u} \frac{1}{N_{muc}} \log(1 + \rho_i)$$

2.2 增强小区中 ABS 动态配置的系统容量分析

从上述分析可知，增强小区覆盖技术由于增加了 λ 值而扩大了其覆盖范围，提升了 Pico 基站的系统容量。增强型 pico 小区可划分为中心小区和增强小区，增强小区的用户由于是同频部署将受到较为严重的 Macro 基站的下行干扰。

异构网络干扰协调方案中 ABS 的资源配置是一种比较常见的时域干扰协调技术，Macro 基站针对不同用户的干扰情况，让 Macro 基站的某些子帧上只含参考信号的信息而无 Macro 数据发送，以此来达到降低用户干扰的目的。在 3GPP 中 ABS 子帧分配示意图如图 2 所示：Macro 基站的子帧划分为正常子帧和非正常子帧 (也称为 ABS)。定义 β 为 ABS 占总信道数的比例， $0 < \beta < 1$ 。图 2 以 $\beta = 0.5$ 的比例来说明 Macro 和 Pico 基站的子帧示意图。其中，正常子帧用来发送 Mac-

ro 和 Pico 基站的数据, ABS 只用来发送 Pico 基站的数据, 由此可知, Macro 基站的正常子帧、ABS 与 Pico 基站的保护子帧和非保护子帧是一一对应的^[14]。

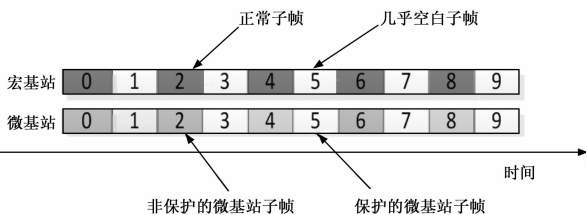


图 2 3GPP 中 ABS 子帧分配示意图

固定的 ABS 比例值为 0.5 时相较于动态的 ABS 比例, 分配过多的 ABS 子帧会导致服务于 Macro 基站的性能下降; ABS 子帧较少时会降低增强用户的数据传输率。因此如何确定 ABS 的比例是重中之重。在文献 [11] 的基础上, 根据进入 Pico 增强小区的用户数动态的确定 ABS 的比例, 转移了 Macro 基站的负载, 降低了增强小区用户受到的干扰, 合理的利用了同频资源, 提高了小区系统容量。

根据用户受干扰程度将接入 pico 小区的用户分为高、低干扰用户, 定义增强小区的用户为高干扰用户, 记为: N_{H-pue} , 中心小区的 Pico 用户为低干扰用户, 记为: N_{L-pue} 。则高干扰用户可以表示为:

$$N_{H-pue} = N_{pue} - N_{L-pue}$$

根据 ABS 干扰协调技术, 高干扰用户将被分配至 ABS 中接收数据, 此时,

$$\beta = \frac{N_{H-pue}}{N_u}$$

也可以写成:

$$\beta = F(\lambda) - F(0)$$

β 值的大小取决于高干扰用户占接入 Macro-Pico 基站用户总数的比例。此时单位带宽下接入 Macro 基站的用户总人数的系统容量可表述为:

$$C_{macro}(\lambda) = \sum_{i=N_{pue}+1}^{N_u} \frac{1-\beta}{N_{muc}} \log(1 + \rho_i)$$

Pico 基站用户在非保护子帧接收数据时, 定义用户接入 Pico 中心小区的信干噪比为 ψ_{mbs} , Pico 基站用户在保护子帧接收数据时, 定义用户接入 Pico 增强小区的信干噪比为 $\psi_{i,abs}$, 此时, Pico 基站的系统总容量为:

$$C_{pico}(\lambda) = \sum_{i=1}^{N_{H-pue}} \frac{\beta}{N_{H-pue}} \log(1 + \psi_{i,abs}) + \sum_{i=N_{H-pue}+1}^{N_{pue}} \frac{(1-\beta)}{N_{pue} - N_{H-pue}} \log(1 + \psi_{i,mbs})$$

在增强小区动态配置 ABS 信道的情况下, 则系统总容量可以表述为:

$$C_{tot}(\lambda) = \sum_{i=1}^{N_{H-pue}} \frac{\beta}{N_{H-pue}} \log(1 + \psi_{i,abs}) + \sum_{i=N_{H-pue}+1}^{N_{pue}} \frac{(1-\beta)}{N_{pue} - N_{H-pue}} \log(1 + \psi_{i,mbs}) + \sum_{i=N_{pue}+1}^{N_u} \frac{(1-\beta)}{N_u - N_{pue}} \log(1 + \rho_i)$$

3 系统仿真结果及分析

3.1 仿真参数设置

系统采用一个 Macro 基站和 N_p 个 Pico 基站构成的异构网络场景。其中 Macro 基站的覆盖半径为 600 m, N_p 个 Pico 基站位置随机设置, 共有 100 个用户。其他部分仿真参数如下表所示, 可以看出, 仿真参数是依据 LTE-Advanced 标准制定的。

表 1 仿真参数

仿真参数	取值
宏基站路	$L = 128.1 + 37.6 \log_{10}(R)$
径损耗/dB	R , 单位为 km
微基站路	$L = 140.7 + 36.7 \log_{10}(R)$
径损耗/dB	R , 单位为 km
宏基站发送功率/dB m	43
微基站发送功率/dB m	30
衰落模型	瑞利平坦衰落
业务模型	满 buffer 业务
用户分布	均匀分布

3.2 仿真结果分析

基于上述的仿真场景, 给出了一个 Macro 基站和多个 Pico 基站下用户数的累积分布函数 $F(\sigma_{i,m_{max},p_{max}})$, 对于某个给定的 λ 值, $F(\lambda)$ 表示接入 Pico 基站的用户比例, $1 - F(\lambda)$ 表示接入 Macro 基站的用户比例。

图 3 在 Pico 基站数等于 3 的情况下, 可以看出, 通过增加偏置值确实增加了 Pico 基站的用户数, 转移了 Macro 基站的系统负载。当 $\lambda = 3$ 时, 且没有加入 ABS 的抗干扰技术, 可以看出原本接入 Pico 基站的用户比例约为 18%, 加入偏置值 $\lambda = 3$ 时, 接入 Pico 基站的用户总数提高到了 35% 左右; 同理可以看到加入 ABS 的抗干扰技术时, 接入 Pico 基站的用户总数达到了 50% 左右。

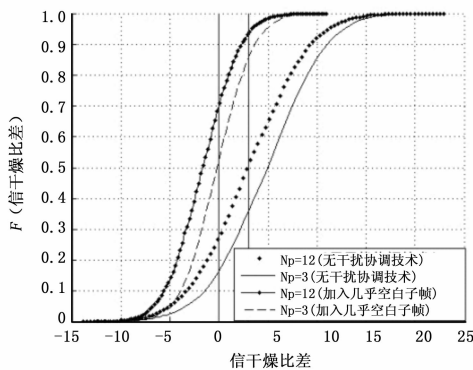


图 3 用户累积分布函数

图 4 为动态 ABS 配置的仿真, 传统 ABS 配置的 β 值一般取 0.5, 可以看出新算法中的 β 是随着 λ 值的增大而增大的。 λ 值越大, 表明有更多的用户进入增强小区, 需要分配更多的 ABS 来降低增强小区用户的干扰。如果 β 值取得过大, 会造成 Macro 用户性能下降; 如果 β 值取得过小, 则又不能很好的降低增强小区用户的干扰。所以, 动态的 ABS 的比例, 不仅能降低增强小区用户受到的干扰, 而且提高了 Pico 小区转移负载的能力, 使信道资源的利用更加合理。

在同一 λ 值下，不同的 Pico 基站数对应不同的 β 值，12 个 Pico 基站下需要的 β 值小于 3 个 Pico 基站下的 β 值，这是因为 Pico 基站越多，但是高干扰用户数反而更少，所以需要分配的 ABS 会少。

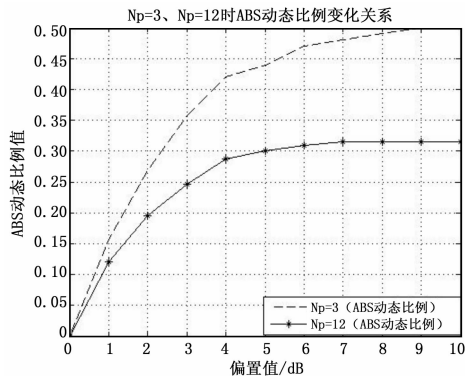


图 4 不同 λ 时的 ABS 动态比例

图 5 为固定 ABS 比例和动态分配 ABS 比例情况下的系统容量对比。表明在 3 个微基站下，固定的几乎空白子帧比例值下的系统容量基本没有明显变化，动态的几乎空白子帧比例值下系统容量在一定范围内有所增加，且动态的几乎空白子帧比例值下系统容量高于固定的几乎空白子帧比例值下的系统容量。

与固定的 ABS 子帧比例值为 $\beta = 0.5$ 情形相比，新算法增加了系统容量，不仅提高了信道资源利用率，同时提高了增强小区用户的数据传输率。

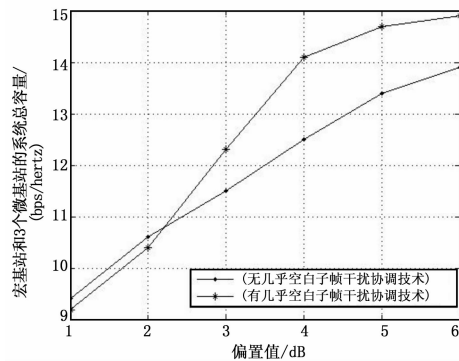


图 5 宏基站和 3 个微基站下的系统总容量

4 结论

为了提高两层异构网络中下行信道资源的利用率，在增强小区中调度几乎空白子帧的干扰协调方案的基础上提出了一种

(上接第 214 页)

扩展性。通过 Zetta 服务器互联可以实现超大规模的分布式 IoT 应用，未来可以在智慧城市，智能社区，智能工厂等各行各业中广泛应用，开创互联网+普及时代。

参考文献:

[1] 陆凌生, Node.js 权威指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
 [2] Zetta online [Z/OL]. http://www.zettajs.org.
 [3] 薛燕红, 物联网技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

动态确定几乎空白子帧比例的算法。新算法通过增强小区用户数与总用户数的比例来确定的几乎空白子帧比率，改善了信道资源的利用。仿真结果表明，新算法不仅提高了系统总容量，同时也实现了下行信道资源的合理利用。

参考文献:

[1] Myunggon H, Seungyoung P. Recursive load balance scheme for two-tier cellular networks using enhanced inter-cell interference coordination [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015, 2015 (1): 1-12.
 [2] 廖原. LTE-Advanced 异构网络小区干扰协调技术的研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
 [3] 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 (8): 198-205.
 [4] Fei Z S, Ding H C, Xing C W, et al. Performance analysis for range expansion in heterogeneous networks [J]. Science China Information Sciences, 2014, 57 (8): 1-10.
 [5] 孙长印, 姜静, 卢光跃. 异构网中载波聚合系统的成员载波选择和干扰协同 [J]. 电讯技术, 2012, 12: 1887-1892.
 [6] 周昊. LTE-A 异构网络中自适应 ABS 配置与功率控制算法的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
 [7] Damnjanovic A, Montojo J, Wei Y B, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks [J]. Wireless Communications, IEEE, 2011, 18 (3): 10-21.
 [8] ISMAIL G I. Capacity and Fairness Analysis of Heterogeneous Networks with Range Expansion and Interference Coordination. [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15: 1084-1087.
 [9] Guvenc I, Moo-Ryong J, Demirdoeng I, et al. Range expansion and inter-cell interference coordination (ICIC) for picocell networks [A]. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) [C]. San Francisco, 2011: 1-6.
 [10] Interference management in UMTS femtocells [EB/OL]. http://small-cellforum.org/smallcellforum/resources-white-papers/Index Num-ber: 003.
 [11] Seungseob L, Sukyong L, Kyungsoo K, et al. Optimal deployment of pico base stations in LTE-Advanced heterogeneous networks [J]. Computer Networks, 2014, 72: 127-139.
 [12] Gao L Q, Tian H, Wang M, et al. Dynamic bias setting for range extension in LTE-advanced macro-pico heterogeneous networks [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2013, 20 (4): 28-33.
 [13] Roy C P, Hoill J, Sun-Moon J. ABS Scheduling Technique for Interference Mitigation of M2M Based Medical WBAN Service [J]. Wireless Personal Communications, 2014, 79 (4): 2685-2700.

[4] 薛珑斌, 刘钊远. 基于 Websocket 的远程实时通讯 [J]. 计算机和数字工程, 2014 (3).
 [5] 汪鑫, 彭雨薇. 基于树莓派的网络监控系统研究与实现 [J]. 硅谷, 2014 (14): 25-26.
 [6] 孙溪. 800 Mhz TETRA 无线政务专用网的物联网数据传输模块的开发 [J]. 中国仪器仪表, 2014 (7).
 [7] 苗雪. 基于 Intel/NXP/TI 智能家居安防系统网关解决方案 [J]. 智能建筑和城市信息, 2015 (11): 36-39.
 [8] 高嘉译, 高强等. 面向移动应用的后端服务平台 [J]. 计算机系统应用, 2014 (2): 22-27.