

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.03.018

引用格式:武侠,齐一飞,杨吉辉,等.采用部分频率复用的小小区网络建模与分析[J].电讯技术,2016,56(3):337-341. [WU Xia,QI Yifei,YANG Jihui, et al. Modeling and analysis of small cell networks with fractional frequency reuse[J]. Telecommunication Engineering,2016,56(3):337-341.]

采用部分频率复用的小小区网络建模与分析*

武 侠,齐一飞**,杨吉辉,刘振栋,勇俊岩
(烟台供电公司,山东 烟台 264000)

摘 要:小小区组网技术被认为是解决迅速增长的移动数据量需求的方法。然而,密集的小小区组网会导致严重的小区间干扰。传统的部分频率复用方法不能完全照搬用在部署不规则的小小区网络内,急需一种合理高效建模采用频率复用小小区网络的方法,对其性能进行评估。利用随机几何理论对小小区网络考虑部分频率复用场景进行建模,推导了考虑部分频率复用的小小区网络下行覆盖概率和网络吞吐量的表达式。数值仿真结果显示:部分频率复用技术可以提高小小区网络下行覆盖概率,但是会降低网络图吞吐量。在满足覆盖概率约束条件下,得到了使得网络吞吐量最大的频率复用因子的表达式。以上结果对未来采用频率复用技术的小小区组网的具体实施具有重要的指导意义。

关键词:小小区网络;部分频率复用;随机几何;覆盖概率;网络吞吐量

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)03-0337-05

Modeling and Analysis of Small Cell Networks with Fractional Frequency Reuse

WU Xia,QI Yifei,YANG Jihui,LIU Zhendong,YONG Junyan
(Yantai Power Supply Company,Yantai 264000,China)

Abstract: Small cell enhancement has been considered as a promising way to cope with the rapid growth of need for mobile data traffic. However, it also leads to severe inter-cell interference (ICI). Traditional fractional frequency reuse (FFR) can not be entirely applied to small cell scenario with irregular deployment and a reasonable and efficient method for modeling the network with frequency reuse is needed to evaluate its performance. This paper uses stochastic geometry theory to model small cell network considering FFR and derives the expressions of coverage probability and throughput of small cell network considering FFR. The simulation results show that the FFR can improve the downlink coverage probability of small cell networks but will decrease the throughput of small cell networks. Finally, it obtains the expression of optimal frequency reuse factor maximizing the throughput under some constrains of coverage probability. These results have important guiding significance for the implementation of small cell networks in the future.

Key words: small cell network; fractional frequency reuse; stochastic geometry; coverage probability; network throughput

1 引 言

现代移动通信服务要面对海量的数据、稀缺的

频谱资源、各种各样的需求变化和商业模式的调整等带来的挑战。我国目前用于移动通信服务的无线

* 收稿日期:2015-06-30;修回日期:2015-10-12 Received date:2015-06-30;Revised date:2015-10-12

** 通信作者:654457446@qq.com Corresponding author:654457446@qq.com

• 337 •

频谱几乎不可能满足未来用户对通信服务快速增长的需求。工业和信息化部研究院在 2013 年公布的《2020 年中国 IMT 服务的频谱需求》报告中指出,到 2020 年,中国移动通信服务的频谱需求将达到 1 864 MHz^[1]。目前的第三代与第四代移动通信技术中所使用的无线调制编码技术已经逐渐趋近于无线频谱利用率的极限,很难再有性能提升。除了改进调制编码技术外,改变无线网络的拓扑结构,开发利用空间域资源,是解决问题的另一条途径,其中小小小区组网技术是近期研究人员关注的热点。小小小区组网技术通过减小基站的覆盖范围来缩短用户与基站的通信距离,从而提高移动网络的通信质量,同时降低网络的能耗^[2]。从 3GPP TR 36.932^[3]中我们可以发现小小小区不再像宏蜂窝具有较规则的拓扑结构,而是具有更加随机的分布,使用一种密集的小小区组网技术是可行的、经济的方案^[4]。与此同时,小小小区组网技术也面临着许多技术难题,严重的小区间干扰就是其中的关键问题。

在传统密集的宏蜂窝无线通信系统里,通常会采用一些干扰的协调技术,其中一种可行的方法就是让这些相邻的小区工作在不同的频点上,这就是频谱复用的做法^[5]。文献[6]中介绍了一种新的部分频率复用方案用于分配正交频分多址接入(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)多跳网络的资源。文献[7]提出了一种自适应的部分频率复用方案,即把小区虚拟地分成两个不同的区域。文献[8]提出了一种用于子载波和功率分配的算法,该算法通过动态部分频率复用来避免小区间干扰。文献[9]提出一种利用部分频率复用的三小区协作网络。以上的这些研究都是在规则网络拓扑下进行的,然而,在小小小区网络中,部分频率复用的情况和蜂窝网络不同。这是因为蜂窝网络为了考虑到更广范围的覆盖以及减小覆盖的盲区,一般都采用网格型的覆盖,而最常见的就是六边形网格。对于一个小小小区网络,其网络拓扑则会因为低功率节点的随机化的部署而呈现出小区形状不规则的现象,因此部分频率复用的策略与蜂窝网络不同,不能够再采用一个有规律的整齐的频率分配策略。上述文献都是采用较复杂的系统级仿真对网络性能进行评估,而本文所采用的随机几何建模方法是一种新的网络性能建模分析方法。

随机几何理论^[10]是近年来建模分析无线网络的非常强大的理论工具,通过数值推导得到相应指标的表达式,便可以借助简单的数值仿真代替复杂

的系统级仿真,在极大降低了复杂度的同时又保持了很高的精确度,特别适合对具有随机分布节点的网络进行分析。本文即利用随机几何理论对小小小区网络进行建模,分析推导了小小小区部分频率复用情况下的下行覆盖概率和网络吞吐量的表达式,并且在考虑覆盖概率约束条件的情况下,得到了使吞吐量最大化的最优频率复用因子表达式。

2 系统模型和假设

我们考虑单层小小小区下行网络,该网络由小小小区基站组成。小小小区基站是基于一个独立的二维泊松点过程(Poisson Point Process, PPP)^[10]分布的,定义为 Φ , 密度是 λ 。移动台也是随机分布在整个网络中,并且移动台接入与其距离最近的小小区基站。为便于分析,假设一个基站同一时刻只服务一个移动台。对于无线信道的建模,我们同时考虑大尺度衰落与小尺度衰落。大尺度衰落我们只考虑标准的基于距离的路径损耗,衰落因子为 $\alpha > 2$; 小尺度衰落通过瑞利衰落建模。因此,对于任意一个移动台,它接收到的来自第 i 个基站的功率为 $P_i g_i R_i^{-\alpha}$, 其中 P_i 是小小小区基站的发射功率,我们假设所有的小小区基站都使用相同的发射功率,而 $g_i \sim \exp(1)$ 是第 i 个基站到移动台传输功率上所加的瑞利衰落因子, R_i 是第 i 个基站到移动台的通信距离。

基于上述系统模型和假设,系统的任意一个移动台的接收信干噪比(Signal Interference plus Noise Ratio, SINR) Γ 可以表示为

$$\Gamma = \frac{P_t g_0 R_0^{-\alpha}}{\sum_{i \in \Phi/B_0} P_t g_i R_i^{-\alpha} + N_0} \tag{1}$$

式中: g_0 和 R_0 分别代表瑞利衰落因子和目标移动台到其服务基站的距离; B_0 是目标移动台的服务基站; N_0 是热噪声功率。因为密集小小小区网络是干扰受限的,我们忽略热噪声功率的影响,假设满负载模型,即所有干扰基站都是激活状态。

另外,令 δ 表示小小小区网络中的频率复用因子,并且 δ 的取值范围是不小于 1 的整数,当取 1 时,相当于全频率复用。

3 网络下行覆盖概率分析

本节讨论采用部分频率复用的小小区网络覆盖概率。首先我们给出任意一个接收机的覆盖概率定义^[10]:

$$\eta_{\text{CP}} = P(\Gamma > T) \tag{2}$$

上式描述了任意一个移动台的下行 SINR 大于信干噪比 T 的概率。小小网络考虑部分频率复用的下行覆盖概率由定理 1 (小小网络考虑部分频率复用的下行覆盖概率) 给出。

定理 1 小小网络考虑部分频率复用的下行覆盖概率

$$\eta_{CP} = \pi\lambda \int_0^\infty \exp\left\{-\pi u\lambda - \frac{2\pi\lambda}{\delta}\rho(T)\right\} du \quad (3)$$

式中: $\rho(T) = \int_r^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + Tu^{\frac{\alpha}{2}}x^{-\alpha}}\right) x dx$ 。

证明:定理 1 的证明过程与文献[10]的证明过程类似。由于篇幅所限,此处只说明不同点。

由于小小网络中基站分布的随机性,为了简化模型,我们假定每个小小网络使用的频点随机分布在总使用频带上,即每一个小小网络基站独立地随机选择各频点中的一个进行传输,则根据染色定理,使用相同频点基站的集合也是一个二维泊松点过程,且密度为 $\lambda/\delta^{[11]}$,即干扰基站的密度由原来的 λ 变成了 λ/δ ,经过简单的数学运算得到结果。

当 $\alpha=4$ 时,类似文献[10]中的推导,式(3)简化为

$$\eta_{CP} = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{T} \arctan \sqrt{T}}{\delta}} \quad (4)$$

4 网络下行吞吐量分析

网络的吞吐量定义为小小网络中所有用户的传输速率之和。在一个特定的频点上,由于每一个小小网络基站只服务一个用户,所以吞吐量可以定义为

$$\tau = \lambda \cdot \text{Bandwidth} \cdot \eta_{ASE} \quad (5)$$

式中: η_{ASE} 为平均频谱效率; Bandwidth 是总带宽,在后文的描述里,默认网络总带宽为 W 。

平均频谱效率是网络中单频点上传输速率的期望值。假设小小网络采用理想链路自适应调制技术,即每一时刻的调制方案都能够使得基站/移动台的传输/接收速率达到香农极限,利用香农公式我们定义平均频谱效率为

$$\eta_{ASE} = \mathbb{E} [\text{lb}(1+I)] \quad (6)$$

式中: I 是一个随机变量,指的是某一时刻接收机处的 SINR 的瞬时值。

当 $\alpha=4$ 时,小小网络考虑部分频率复用的网络下行吞吐量由定理 2 给出。

定理 2 小小网络考虑部分频率复用的网络下行吞吐量

$$\tau = \frac{\lambda W}{\delta \ln 2} \int_0^\infty \frac{1}{\left(1 + \frac{\sqrt{\gamma} \arctan \sqrt{\gamma}}{\delta}\right) (1 + \gamma)} d\gamma \quad (7)$$

证明:由上一节的推导可知,随机变量 I 的互补累计分布函数 (Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF) 满足式(3),因此

$$\eta_{ASE} = \int_0^\infty \text{lb}(1 + \gamma) p_I(\gamma) d\gamma \quad (8)$$

式中: $p_I(\gamma)$ 是随机变量 I 的概率密度函数。由于

$$P(I > \gamma) = \int_\gamma^\infty p_I(\gamma) d\gamma, \quad (9)$$

有

$$\frac{dP(I > \gamma)}{d\gamma} = \frac{d}{d\gamma} \left(\int_\gamma^\infty p_I(\gamma) d\gamma \right) = -p_I(\gamma) \quad (10)$$

所以,当 $\alpha=4$ 时,

$$\begin{aligned} \eta_{ASE} &= - \int_0^\infty \text{lb}(1 + \gamma) d\Pr(I > \gamma) = \\ &= - \text{lb}(1 + \gamma) \Pr(I > \gamma) \Big|_0^\infty + \\ &= \int_0^\infty \Pr(I > \gamma) d \text{lb}(1 + \gamma) = \\ &= \frac{1}{\delta \ln 2} \int_0^\infty \frac{1}{\left(1 + \frac{\sqrt{\gamma} \arctan \sqrt{\gamma}}{\delta}\right) (1 + \gamma)} d\gamma \end{aligned}$$

得证。

将式(7)对 δ 求导得

$$\begin{aligned} \frac{d\tau}{d\delta} &= \frac{d}{d\delta} \left(\frac{\lambda W}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{1}{(\delta + \sqrt{\gamma} \arctan \sqrt{\gamma}) (1 + \gamma)} d\gamma \right) = \\ &= - \frac{\lambda W}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{1}{(\delta + \sqrt{\gamma} \arctan \sqrt{\gamma})^2 (1 + \gamma)} d\gamma < 0, \end{aligned}$$

则网络吞吐量是频率复用因子 δ 的单调递减函数。

5 仿真结果与分析

我们借助随机几何理论分析工具推导了采用部分频率复用的小小网络覆盖概率和网络吞吐量的理论公式,场景如前文所述。与蒙特卡洛仿真需要多次仿真才能达到收敛不同,本文对所得公式进行数值仿真。在这一节我们利用 Matlab 数值仿真工具首先对小小网络下行覆盖概率,即公式(4)进行数值仿真。

图 1 是频率复用因子采用不同配置时,小小网络下行传输 SINR 的概率分布图。图 2 给出的是小小网络下行覆盖概率与频率复用因子的关系。从图中可以看出,随着频率复用因子 δ 的增大,小小网络的下行传输质量不断地被改善,但是这种由频率复用因子所带来的增益随着 δ 的增大而变得越来越

不明显。从图 2 中可以看出当频率复用因子 δ 达到 10^4 后,覆盖概率趋近于 1。这是因为当频率复用因子 δ 很大之后,每一个小小区都采用一个与其他小区不同的频谱,将不会有小区间干扰产生。虽然说在这种情况下有特别优越的通信质量,但是这种场景要求一个无穷大或是非常大的频谱带宽,所以这种场景并不现实。

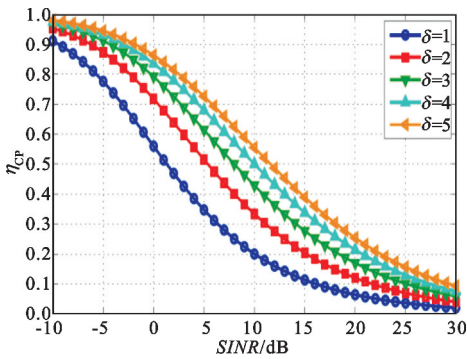


图 1 不同复用因子情况下的下行覆盖概率
Fig. 1 Downlink coverage probability with different reuse factors

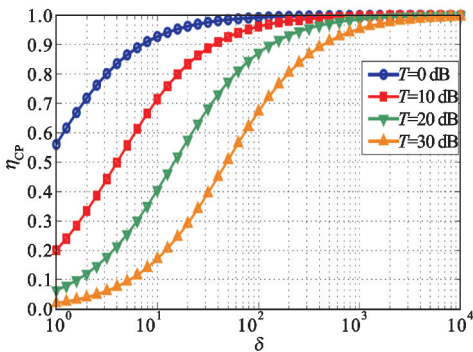


图 2 不同目标 SINR 情况下的下行覆盖概率
Fig. 2 Downlink coverage probability with different target SINR

由上一节的分析,我们知道网络吞吐量是频率复用因子 δ 的单调递减函数,所以小小区网络中的覆盖概率与网络吞吐量关于频率复用因子 δ 是一对互斥的性能。通过调整频率复用因子 δ 来提升其中一项性能将导致另一项性能的降低,为了同时考虑覆盖概率和吞吐量使得网络性能达到最优,这就成了一个多目标的最优化线性问题。

我们利用经典求解方法,将多目标最优化问题化成一个单目标最优化问题,如下:

$$\begin{cases} \max \tau = \frac{\lambda W}{\delta \ln 2} \int_0^\infty \frac{1}{\left(1 + \frac{\sqrt{\gamma} \arctan \sqrt{\gamma}}{\delta}\right) (1 + \gamma)} d\gamma \\ \text{s. t. } \eta_{CP}^i > \varepsilon_i, i \in C \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\eta_{CP}^i > \varepsilon_i$ 之所以带有 i ,是因为这个限制条件可以是多个,即在不同的目标 SINR (T_i) 上的覆盖概率要大于一个相应的值 ε_i ,并设 C 是这些限制条件的集合。由于 τ 关于 δ 是一个单调递减的函数,不难求得最优的频率复用因子为

$$\delta^* = \lceil \max \left\{ \frac{\varepsilon_i \sqrt{T} \arctan \sqrt{T}}{1 - \varepsilon_i} \right\} \rceil, i \in C. \quad (12)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 是上取整运算符。部分场景下的最优频率复用因子取值见表 1。

表 1 部分场景下的最优频率复用因子 δ 取值			
Tab. 1 Optimal frequency reuse factor of some scenarios			
覆盖概率的阈值 ε			最优值 δ^*
$T=0$ dB	$T=10$ dB	$T=20$ dB	
0.7	0.4	0.1	3
0.8	0.5	0.2	4
0.9	0.5	0.2	8
0.8	0.6	0.2	6
0.8	0.5	0.3	7
0.9	0.6	0.3	8

6 结束语

本文利用随机几何理论对小小区网络考虑部分频率复用场景进行建模,推导了考虑部分频率复用的小小区网络下行覆盖概率和网络吞吐量的表达式。通过数值仿真和分析得出小小区网络下行覆盖概率与频率复用因子 δ 呈正比例关系,而网络吞吐量与频率复用因子 δ 呈反比例关系。随后,在满足覆盖概率约束条件下,我们得到了使得网络吞吐量最大的最优频率复用因子的表达式。值得一提的是,本文在建模小小区网络的时候只考虑了单层基站的情况,没有考虑小小区与传统宏小区共存的情况,因此,下一步将对小小区与宏蜂窝网络组成的异构网络进行研究。

参考文献:

[1] 吴刚,杜立新,潘煜,等. 无线电频谱资源价值研究——以移动通信、导航及广播行业为例[J]. 北京邮电大学学报(社会科学版),2014,16(4):62-69.
WU Gang,DU Lixin,PAN Yu,et al. Radio spectrum resource value research-in mobile communications,navigation and radio industry,for example[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications (Social Science Edition),2014,16(4):62-69. (in Chinese)
[2] SHAKIR M,QARAQE K,TABASSUMH,et al. Green heterogeneous small-cell networks:toward reducing the CO2 emissions of mobile communications industry using uplink

- power adaptation [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(6): 52–61.
- [3] 3GPP TR 36. 932, Scenarios and requirements for small cells enhancements for E-UTRA and E-UTRAN [S].
 - [4] HOYDIS J, KOBAYASHI M, DEBBAH M. Green small-cell networks [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2011, 6(1): 37–43.
 - [5] 啜刚, 王文博, 常永宇. 移动通信原理与系统 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2009.
CHUAI Gang, WANG Wenbo, CHANG Yongyu. Mobile communication principle and system [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2009. (in Chinese)
 - [6] ZHAO Y, FANG X, HU X, et al. Fractional frequency reuse schemes and performance evaluation for OFDMA multi-hop cellular networks [C] // Proceedings of 5th International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities and Workshops. Washington DC: IEEE, 2009: 1–5.
 - [7] HWANG J Y, OH Y, HAN Y. Adaptive frequency reuse scheme for interference reduction in two-hop relay networks [C] // Proceedings of 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference. Taipei: IEEE, 2010: 1–5.
 - [8] ZHANG L, ZENG Y, ZHANG P, et al. Dynamic frequency reuse scheme for wireless multi-hop relay networks [C] // Proceedings of 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Beijing: IEEE, 2009: 1–4.
 - [9] WANG L C, YEH C J. 3-cell network MIMO architectures with sectorization and fractional frequency reuse [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(6): 1185–1199.
 - [10] ANDREWS J, BACCELLI F, GANTI R. A tractable approach to coverage and rate in cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(11): 3122–3134.
 - [11] STOYAN D, KENDALL W S, MECKE J. Stochastic geometry and its applications [M]. 2nd ed. New Jersey, USA: Wiley & Sons, 1996.

作者简介:



武 侠(1981—),男,山东烟台人,2003 年于华北电力大学获学士学位,现为工程师;

WU Xia was born in Yantai, Shandong Province, in 1981. He received the B. S. degree from North China Electric Power University in 2003. He is now an engineer.

Email: 57454114@qq.com

齐一飞(1988—),男,山东烟台人,2013 年于北京邮电大学获硕士学位,现为助理工程师;

QI Yifei was born in Yantai, Shandong Province, in 1988. He received the M. S. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2013. He is now an assistant engineer.

Email: 654457446@qq.com

杨吉辉(1966—),男,山东烟台人,1997 年于山东经济学院获学士学位,现为高级政工师、国网山东省电力公司烟台供电公司信息通信分公司主任;

YANG Jihui was born in Yantai, Shandong Province, in 1966. He received the B. S. degree from Shandong Economic University in 1997. He is now a senior political engineer and the director of Information and Communication Company of Yantai Power Supply Company of State Grid Shandong Electric Company.

刘振栋(1972—),男,山东烟台人,1993 年和 2011 年分别于华北电力大学获学士学位和硕士学位,现为高级工程师、国网山东省电力公司烟台供电公司信息通信分公司副主任;

LIU Zhendong was born in Yantai, Shandong Province, in 1972. He received the B. S. degree and the M. S. degree from North China Electric Power University in 2006 and 2011, respectively. He is now a senior engineer and the vice director of Information and Communication Company of Yantai Power Supply Company of State Grid Shandong Electric Company.

勇俊岩(1964—),男,山东烟台人,1994 年于重庆大学获学士学位,现为工程师。

YONG Junyan was born in Yantai, Shandong Province, in 1964. He received the B. S. degree from Chongqing University in 1994. He is now an engineer.