

基于干扰消除的异构蜂窝网络中断分析

宋康^① 韦磊^② 冀保峰^{①③} 王雅芳^① 黄永明^① 杨绿溪^{*①}

^①(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

^②(国网南京供电公司 南京 210019)

^③(河南科技大学信息工程学院 洛阳 471023)

摘要: 在异构网络中,小小区可以为宏基站用户提供接入服务,并能够根据自身条件调节传输参数。该文研究在宏基站端干扰消除技术,来消除宏基站到小小区用户的干扰。该文分析了采用此种方案后异构网络下行链路的整体性能,推导了宏基站和小小区用户接收端信噪比的概率密度函数和分布函数。在此基础上,得到了系统整体中断概率的闭合表达式。理论推导和仿真结果表明,干扰消除方案能够有效提升异构蜂窝网络的整体性能。

关键词: 异构蜂窝网络;性能分析;干扰消除

中图分类号: TN929.5; TN911.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)02-0255-07

DOI: 10.11999/JEIT150532

Outage Performance for Heterogeneous Cellular Networks with Interference Cancellation

SONG Kang^① WEI Lei^② JI Baofeng^{①③} WANG Yafang^①
HUANG Yongming^① YANG Lüxi^①

^①(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

^②(State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

^③(Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: In heterogeneous cellular networks, small cells provide for the handover of users from the macro cell and organize itself during the transmission. This paper studies the downlink outage performance of heterogeneous cellular networks with an interference cancellation scheme employed at macro base station, which aims to eliminate the cross-tier interference from macro base station to small cell users. Then, the downlink performance of heterogeneous cellular networks is investigated. Expressions of the Probability Density Function (PDF) and Cumulative Distribution Function (CDF) of the received SNRs of both macro and small cell users are derived and closed-form expressions of overall outage probability of the system are provided. Both analytical results and simulations show that the overall performance of the heterogeneous cellular networks is improved with interference cancellation.

Key words: Heterogeneous cellular networks; Performance analysis; Interference cancellation

1 引言

异构网络是下一代移动通信系统的重要特征之一^[1-5],主要特点是在宏小区(macro cell)基站范围

内部署许多覆盖范围较小的站点,也就是部署许多小小区(small cell)。小小区可以采用覆盖范围小的微基站、微微基站、家庭基站等实现。这些覆盖范围小的站点能够提升同时传输数据流数量,提高空间复用能力,从而进一步提升原有网络的容量。因此,相比于传统网络,异构网络能更好地使用频谱资源,为用户提供有效的带宽资源以保证用户速率要求。同时,如果将小小区的基站部署在宏小区边缘,则能对位于宏小区边缘的用户进行更好的覆盖,从而更好地提升宏小区边缘用户的性能。不可否认,异构网络也带来巨大的挑战,特别是对于网络间干扰的管理,小小区的部署与覆盖范围选取,用户在不同网络间切换等问题提出了更高的要求,相关问题引起了学术界和工业界的广泛关注^[6-8]。其中,

收稿日期: 2015-05-07; 改回日期: 2015-10-09; 网络出版: 2015-11-18

*通信作者: 杨绿溪 lxyang@seu.edu.cn

基金项目: 国家 863 计划(2015AA01A703), 国家自然科学基金(61372101, 61271018, 61201172, 61422105, U1404615), 江苏省杰出青年基金(BK20130019), 江苏省电力公司合作项目, 毫米波国家重点实验室开放课题(K201504)

Foundation Items: The National 863 Program of China (2015AA01A703), The National Natural Science Foundation of China (61372101, 61271018, 61201172, 61422105, U1404615), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20130019), Research Fund of Jiangsu Electric Power Company, Open Funds of State Key Laboratory of Millimeter Waves (K201504)

文献[6]给出了一种考虑小小区范围拓展的异构网络性能分析方法,并且分别推导了上下行的覆盖概率的闭合表达式。

在异构网络中,由于小小区与宏小区共享频率资源,存在相干信道干扰(Inter-Channel Interference, ICI),如果处理不当,将会大大地降低整个系统的性能,因此对跨层干扰的研究具有重要的意义。目前,很多学者对干扰管理技术进行了研究^[9-14]。特别地,干扰消除方法具有简单且高效的特点,可以应用于异构蜂窝网络中,相关研究近几年引起了学者的广泛关注。NISHIMORI 等人^[15]提出了在异构蜂窝网络中借助中继进行干扰消除的方法,利用宏小区中的中继对小小区到宏小区用户的干扰进行译码,在译码时,不需要中断宏基站信号的接收。CHANDRASEKHAR 等人^[16]提出了一种基于信干比的分布式调整的算法,用于减少宏小区对家庭小区的相关信道干扰。WANG 等人^[17]为微基站设计了一种自适应发射机,使得微基站中的用户能够智能地进行干扰消除,研究自适应策略对系统平均吞吐量的影响。LATRACH 等人^[18]提出了最大化用户的信干比策略,使用户消除相邻宏小区或者小小区的最大干扰,达到减少下行链路中用户的干扰的目的。LEE 等人^[19]在每个小小区中运用脏纸编码(Dirty Paper Coding, DPC)技术,借助中继进行干扰消除。然而,现有文献对异构蜂窝网络进行干扰消除后的系统中断概率的性能分析相当少。

干扰消除(Interference Cancellation, IC)技术作为一种简单的干扰管理技术,是近年来无线通信领域研究的热点,它能在理论上实现目标小区的干扰的完全消除。本文以异构网络为模型,对两层异构蜂窝网络的干扰消除方案进行研究和分析,设计了一种适用于异构网络的干扰消除方案,并推导出采用该方案时系统的整体中断概率。主要思路是首先设计一种干扰消除方案,该方案中小小区之间不需进行协作,只需将自己的跨层信道信息传送给宏基站,宏基站利用干扰消除技术根据反馈信道信息调整预编码矩阵,进而消除对小小区的干扰。在此基础上,本文对系统采用干扰消除策略后的中断概率进行了理论分析,推导出系统整体中断概率的闭合表达式。尽管以异构蜂窝网络为模型,本文所得到的结论不仅仅适用于异构蜂窝网络,同时也适用于智能电网^[20]等领域类似问题。

2 系统模型

本文所研究的系统模型如图1所示,整个两层网络由一个宏小区和 M 个小小区组成。宏小区由一

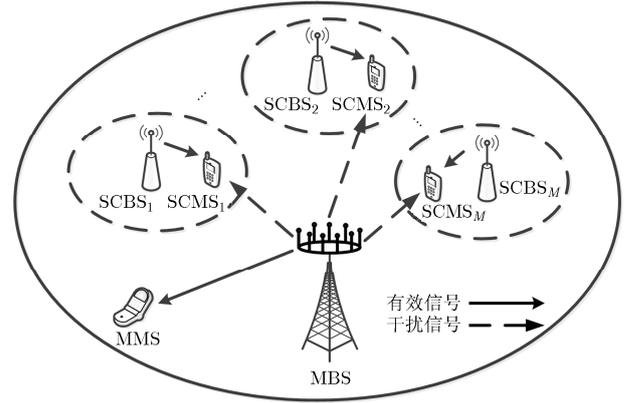


图1 异构蜂窝网络模型图

个具有 N_B 根天线的宏基站(Macro Base Station, MBS)和多个单天线移动台(Macro Mobile Stations, MMS)组成;每个小小区中有一个单天线基站(Small Cell Base Station, SCBS)和多个具有 N_S 根天线的移动台(Small Cell Mobile Stations, SCMS)。为了简化分析,在每个小区中同一时间只有一个激活的移动台,多于一个激活用户的情景可类似进行推广。因为宏小区中部署的小小区数目不多,因此假设小小区之间没有重覆盖区域。

在下行时隙中, MBS 向 MMS 发送数据,同时 SCBS 分别向自己的 SCMS 发送数据,假定归一化发送信号为 $q_i, i \in \{1, 2, \dots, M\}$ 和 q_B , 且发送信号满足功率约束:

$$\mathbb{E}[\|q_B\|^2] = \mathbb{E}[\|q_i\|^2] = 1 \quad (1)$$

(1)如果激活的 MMS 在 SCBS 的覆盖范围内,这样 MMS 和 SCMS 接收到的信号分别为

$$\mathbf{y}_{\text{SCMS}_i} = \sqrt{P_B} \mathbf{H}_{B_i} \mathbf{w} q_B + \sqrt{P_S} \mathbf{h}_{S_i} q_i + \mathbf{n}_{\text{SCMS}_i} \quad (2)$$

$$y_{\text{MMS}} = \sqrt{P_B} \mathbf{g}_{\text{BM}} \mathbf{w} q_B + \sqrt{P_S} g_{\text{SM}} q_i + n_{\text{MMS}} \quad (3)$$

其中 P_B 表示 MBS 的发射功率; P_S 表示 SCBS 的发射功率; $\mathbf{g}_{\text{BM}} \in \mathbb{C}^{1 \times N_B}$ 表示 MBS 对 MMS 的信道系数; $g_{\text{SM}} \in \mathbb{C}$ 表示 SCBS 对 MMS 的信道系数; $\mathbf{H}_{B_i} \in \mathbb{C}^{N_S \times N_B}$ 表示 MBS 对第 i 个 SCMS 的信道系数; $\mathbf{h}_{S_i} \in \mathbb{C}^{N_S \times 1}$ 表示第 i 个 SCBS 对 SCMS 的信道系数;本文中假设信道服从瑞利分布。 $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{N_B \times 1}$ 表示宏基站发送的预编码向量; $\mathbf{n}_{\text{SCMS}_i}$ 和 n_{MMS} 表示加性复高斯白噪声, $\mathbf{n}_{\text{SCMS}_i} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 和 $n_{\text{MMS}} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 。

根据式(2)和式(3),第 i 个小小区的 SCMS 和 MMS 接收信干噪比为

$$\gamma_{\text{SCMS}_i} = \frac{P_S \|\mathbf{h}_{S_i}\|^2}{P_B \|\mathbf{H}_{B_i} \mathbf{w}\|^2 + 1} \quad (4)$$

$$\gamma_{\text{MMS}} = \frac{P_B |\mathbf{g}_{\text{BM}} \mathbf{w}|^2}{P_S |g_{\text{SM}}|^2 + 1} \quad (5)$$

(2)如果激活的 MMS 不在所有 SCBS 的覆盖范围内, 那么 SCBS 对激活的 MMS 不存在干扰, 式(3)和式(5)变为

$$y_{\text{MMS}} = \sqrt{P_{\text{B}}} \mathbf{g}_{\text{BM}} \mathbf{w} q_{\text{B}} + n_{\text{MMS}} \quad (6)$$

$$\gamma_{\text{MMS}} = P_{\text{B}} |\mathbf{g}_{\text{BM}} \mathbf{w}|^2 \quad (7)$$

3 干扰消除算法

干扰消除中的干扰零空间(Interference Nulling, IN)是一种线性近似的脏纸编码技术, 使用户的预编码矩阵存在于干扰信道的零空间中, 这样便可以把干扰理论上完全消除。由式(4)可以看出小小区中的移动台 SCMS 接收的干扰信号主要为宏小区的干扰, 因此需要设计宏基站 MBS 的预编码向量来消除这个干扰。本节采用干扰消除方案, 小小区中的移动台 SCMS 向宏基站汇报跨层信道信息, 宏基站通过发送合理的预编码向量, 使得宏小区对 SCMS 的干扰降为 0。

根据干扰消除基本原理预编码向量 \mathbf{w} 需满足如下条件 $\mathbf{w} \in \text{Null}(\tilde{\mathbf{H}})$, 其中,

$$\tilde{\mathbf{H}} = [\mathbf{h}_{\text{B1}}^{\text{H}} \quad \mathbf{h}_{\text{B2}}^{\text{H}} \quad \cdots \quad \mathbf{h}_{\text{BM}}^{\text{H}}]^{\text{H}} \quad (8)$$

$$\text{Null}(\tilde{\mathbf{H}}) = \{\mathbf{v} \in \mathbb{C}^{N_{\text{B}} \times 1} : \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{v} = \mathbf{0}\} \quad (9)$$

如果 $\text{Null}(\tilde{\mathbf{H}})$ 的维度大于 1, 即 $\dim(\text{Null}(\tilde{\mathbf{H}})) > 1$, 那么发送的预编码向量 \mathbf{w} 的求解转化为最大化 $|\mathbf{g}_{\text{BM}} \mathbf{w}|$ 的问题, 该最优化问题可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{w}_{\text{opt}} &= \arg \max_{\|\mathbf{w}\|^2=1} |\mathbf{g}_{\text{BM}} \mathbf{w}|^2 \\ \text{s.t.} \quad &\mathbf{w} \in \text{Null}(\tilde{\mathbf{H}}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

因为 $\mathbf{w} \in \text{Null}(\tilde{\mathbf{H}})$ 等价于存在矢量 \mathbf{x} , 使得 $\mathbf{w} = \mathbf{C}\mathbf{x}$, 其中 $\mathbf{C} = \text{Null}(\tilde{\mathbf{H}})$ 。经过一些代数变换, 上述最优化问题可以转化为

$$\mathbf{x}_{\text{opt}} = \arg \max_{\|\mathbf{x}\|^2=1} |\mathbf{g}_{\text{BM}} \mathbf{C}\mathbf{x}|^2 \quad (11)$$

容易看出, 式(11)的是一个凸函数优化问题, 根据文献[21]中的求解方法, 得到

$$\mathbf{x}_{\text{opt}} = \frac{(\mathbf{g}_{\text{BM}} \mathbf{C})^{\text{H}}}{\|\mathbf{g}_{\text{BM}} \mathbf{C}\|} \quad (12)$$

因此, 预编码向量的最优解 \mathbf{w}_{opt} 为

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \mathbf{C} \frac{(\mathbf{g}_{\text{BM}} \mathbf{C})^{\text{H}}}{\|\mathbf{g}_{\text{BM}} \mathbf{C}\|} \quad (13)$$

因为 $\mathbf{h}_{\text{Bi}} \mathbf{w}_{\text{opt}} = 0$, 所以式(2)可以进一步表示为

$$\mathbf{y}_{\text{SCMS}_i} = \sqrt{P_{\text{S}}} \mathbf{h}_{\text{Si}} q_i + n_{\text{SCMS}_i} \quad (14)$$

因此, 第 i 个小小区的 SCMS 获得的信噪比为

$$\gamma_{\text{SCMS}_i} = P_{\text{S}} \|\mathbf{h}_{\text{Si}}\|^2 \quad (15)$$

由于小小区中 SCMS 配置多根天线, 因此可以采用最大比合并(Maximal-Ratio Combining, MRC)

接收机来优化组合接收信号, 获得的输出信号表示为

$$\hat{y}_{\text{SCMS}_i} = \frac{\mathbf{h}_{\text{Si}}^{\text{H}} \mathbf{y}_{\text{SCMS}_i}}{\|\mathbf{h}_{\text{Si}}\|^2} \quad (16)$$

本文所采用的干扰消除方案可以总结如图 2。

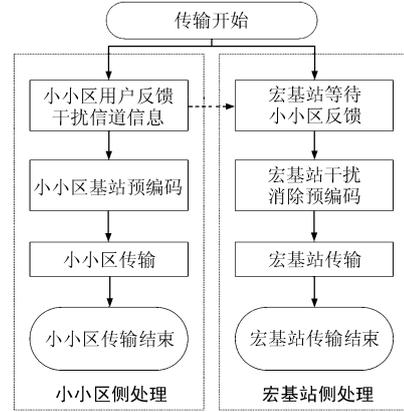


图2 干扰消除算法流程图

接下来, 下一节将对异构蜂窝网络中的用户性能进行研究和分析, 推导系统中断概率的表达式。

4 异构蜂窝网络中的用户性能分析

根据上面讨论的干扰消除算法, 本节将对系统的整体性能进行分析。假设信道服从瑞利分布, 信道系数 \mathbf{g}_{BM} , g_{SM} , \mathbf{H}_{Bi} 和 \mathbf{h}_{Si} 满足 $\mathbf{g}_{\text{BM}} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \Omega_{\text{BM}} \mathbf{I}_{N_{\text{B}}})$; $g_{\text{SM}} \sim \mathcal{CN}(0, \Omega_{\text{SM}})$; $\mathbf{H}_{\text{Bi}} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \Omega_{\text{B}} \mathbf{I}_{N_{\text{B}}})$; $\mathbf{h}_{\text{Si}} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \Omega_{\text{S}} \mathbf{I}_{N_{\text{S}}})$ 。为简单起见, 假设 $\Omega_{\text{BM}} = \Omega_{\text{B}}$, $\Omega_{\text{SM}} = \Omega_{\text{S}}$, 其他情况可以进行类似推导。下面分别推导 γ_{SCMS_i} 和 γ_{MMS} 的累积分布函数。

4.1 SCMS 接收端的信噪比分布

根据 Γ 分布的定义, $\|\mathbf{h}_{\text{Si}}\|^2$ 满足 $\|\mathbf{h}_{\text{Si}}\|^2 \sim \Gamma(N_{\text{S}}, \theta_{\text{S}})$, 其中 $\theta_{\text{S}} = \Omega_{\text{S}}$, 因此 $\|\mathbf{h}_{\text{Si}}\|^2$ 的概率密度函数和累积分布函数分别为

$$f_{\|\mathbf{h}_{\text{Si}}\|^2}(x) = \frac{1}{\Gamma(N_{\text{S}}) \theta_{\text{S}}^{N_{\text{S}}}} x^{N_{\text{S}}-1} e^{-x/\theta_{\text{S}}} \quad (17)$$

$$F_{\|\mathbf{h}_{\text{Si}}\|^2}(x) = \frac{1}{\Gamma(N_{\text{S}})} \gamma(N_{\text{S}}, x/\theta_{\text{S}}) \quad (18)$$

采用干扰消除后, $\gamma_{\text{SCMS}_i} = P_{\text{S}} \|\mathbf{h}_{\text{Si}}\|^2$, 利用式(17)和式(18)推导出 γ_{SCMS_i} 的概率密度函数和累积分布函数

$$p_{\gamma_{\text{SCMS}_i}}(z) = \frac{1}{\Gamma(N_{\text{S}}) \theta_{\text{S}}^{N_{\text{S}}}} x^{N_{\text{S}}-1} e^{-z/(P_{\text{S}} \theta_{\text{S}})} \quad (19)$$

$$P_{\gamma_{\text{SCMS}_i}}(z) = \frac{1}{\Gamma(N_{\text{S}})} \gamma\left(N_{\text{S}}, \frac{z}{P_{\text{S}} \theta_{\text{S}}}\right) \quad (20)$$

4.2 MMS 接收端的信噪比分布

由于 MMS 可能出于小小区覆盖范围以内, 也可能处于小小区覆盖范围之外, 因此根据 MMS 是否能够接收到来自小小区的干扰将 MMS 的累计分布函数的推导分为如下两种情况。

4.2.1 MMS 位于小小区覆盖范围以内 由于 $|g_{\text{BM}}\mathbf{w}_{\text{opt}}|^2$ 服从伽玛分布^[22], 满足 $|g_{\text{BM}}\mathbf{w}_{\text{opt}}|^2 \sim \Gamma(N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}, \theta_{\text{B}})$, 且参数 θ_{B} 满足 $\theta_{\text{B}} = \Omega_{\text{B}}/(N_{\text{B}} - MN_{\text{S}})$, 因此 $|g_{\text{BM}}\mathbf{w}_{\text{opt}}|^2$ 的概率密度函数和累计分布函数为

$$f_{|g_{\text{BM}}\mathbf{w}_{\text{opt}}|^2}(x) = \frac{1}{\Gamma(N_{\text{B}} - MN_{\text{S}})\theta_{\text{B}}^{N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}}} x^{N_{\text{B}} - MN_{\text{S}} - 1} e^{-x/\theta_{\text{B}}} \quad (21)$$

$$F_{|g_{\text{BM}}\mathbf{w}_{\text{opt}}|^2}(x) = \frac{1}{\Gamma(N_{\text{B}} - MN_{\text{S}})} \gamma\left(N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}, \frac{x}{\theta_{\text{B}}}\right) \quad (22)$$

其中 $\Gamma(\cdot)$ 是伽玛函数, $\gamma(\cdot, \cdot)$ 是不完全伽玛函数。

由于 $|g_{\text{SM}}|^2$ 满足 $|g_{\text{SM}}|^2 \sim \Gamma(1, \Omega_{\text{S}})$, 因此 $|g_{\text{SM}}|^2$ 概率密度函数和累计分布函数为

$$f_{|g_{\text{SM}}|^2}(x) = (1/\Omega_{\text{S}})e^{-x/\Omega_{\text{S}}} \quad (23)$$

$$F_{|g_{\text{SM}}|^2}(x) = 1 - e^{-x/\Omega_{\text{S}}} \quad (24)$$

为了求得 γ_{MMS} 的累积分布函数, 需要借助下面的引理。

引理 1 如果 $X \sim \Gamma(m_1, \theta_1)$, $Y \sim \Gamma(m_2, \theta_2)$, 且 X 和 Y 是独立分布的, 那么 $Z = aX/(bY + c)$ 的概率密度函数为

$$p_Z(z) = \frac{z^{m_1-1} e^{-\frac{cz}{a\theta_1}}}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)\theta_1^{m_1}\theta_2^{m_2} a^{m_1} b^{m_2}} \sum_{i=0}^{m_1} \binom{m_1}{i} \times \frac{c^{m_1-i}}{\left(\frac{z}{a\theta_1} + \frac{1}{b\theta_2}\right)^{m_2+i}} \Gamma(m_2 + i) \quad (25)$$

其中, $\binom{\cdot}{\cdot}$ 表示二项式系数。

证明 因为 $X \sim \Gamma(m_1, \theta_1)$, $Y \sim \Gamma(m_2, \theta_2)$ 是独立分布的, 所以 X 和 Y 的联合概率解析表达式为

$$p_{XY}(x, y) = \frac{x^{m_1-1} y^{m_2-1}}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)\theta_1^{m_1}\theta_2^{m_2}} e^{-\frac{x}{\theta_1} - \frac{y}{\theta_2}} \quad (26)$$

假设 $z = ax/(by + c)$, $w = by$, 即 $x = (w + c)z/a$, $y = w/b$, 故雅克比行列式为 $\det(J_F(z, w)) = (w + c)/(ab)$ 。

所以 Z 和 W 的联合概率密度表达式为

$$p_{ZW}(z, w) = \frac{\det(J_F(z, w))}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)\theta_1^{m_1}\theta_2^{m_2}} \left(\frac{w}{b}\right)^{m_2-1} \times \left[\frac{(w+c)z}{a}\right]^{m_1-1} e^{-\frac{(w+c)z}{a\theta_1} - \frac{w}{b\theta_2}} \quad (27)$$

因此可以代入 Z 的概率分布表达式 $p_Z(z) =$

$$\int_0^\infty p_{ZW}(z, w)dw, \text{ 得到}$$

$$p_Z(z) = \frac{z^{m_1-1} e^{-\frac{cz}{a\theta_1}}}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)\theta_1^{m_1}\theta_2^{m_2} a^{m_1} b^{m_2}} \sum_{i=0}^{m_1} \binom{m_1}{i} \times c^{m_1-i} \int_0^\infty w^{i+m_2-1} e^{-\left(\frac{z}{a\theta_1} + \frac{1}{b\theta_2}\right)w} dw \quad (28)$$

经过积分之后, 得到式(25)。

在 γ_{MMS} 的表达中, 由于 $|g_{\text{SM}}|^2 \sim \Gamma(1, \Omega_{\text{S}})$, $|g_{\text{BM}}\mathbf{w}_{\text{opt}}|^2 \sim \Gamma(N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}, \theta_{\text{B}})$, 因此利用引理 1 得到 γ_{MMS} 的概率密度函数为

$$p_{\gamma_{\text{MMS}}}(z) = \frac{1}{\Gamma(N_{\text{B}} - MN_{\text{S}})\theta_{\text{B}}^{N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}}\Omega_{\text{S}}P_{\text{B}}^{N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}}P_{\text{S}}} e^{-\frac{1}{P_{\text{B}}\theta_{\text{B}}}z} \times \sum_{i=0}^{N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}} \binom{N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}}{i} \frac{z^{N_{\text{B}} - M \times N_{\text{S}} - 1}}{\left(\frac{z}{P_{\text{B}}\theta_{\text{B}}} + \frac{1}{P_{\text{S}}\Omega_{\text{S}}}\right)^{i+1}} \Gamma(i + 1) \quad (29)$$

对式(29)含 z 的分式部分进行部分分式展开, 得到

$$\frac{z^{N_{\text{B}} - MN_{\text{S}} - 1}}{\left(\frac{z}{P_{\text{B}}\theta_{\text{B}}} + \frac{1}{P_{\text{S}}\Omega_{\text{S}}}\right)^{i+1}} = \sum_{j=1}^{i+1} \frac{a_j}{\left(\frac{z}{P_{\text{B}}\theta_{\text{B}}} + \frac{1}{P_{\text{S}}\Omega_{\text{S}}}\right)^j} \quad (30)$$

其中 a_1, a_2, \dots, a_{i+1} 是常量。根据部分分式展开的性质, a_1, a_2, \dots, a_{i+1} 可以根据留数定理得到。

利用文献[23]中公式 3.352.1, 3.353.1, 3.353.2 和公式 8.211, 可以得到 γ_{MMS} 的累积分布函数

$$P_{\gamma_{\text{MMS}}}(z) = \frac{1}{\Gamma(N_{\text{B}} - MN_{\text{S}})\theta_{\text{B}}^{N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}}\Omega_{\text{S}}P_{\text{B}}^{N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}}P_{\text{S}}} e^{-\frac{1}{P_{\text{B}}\theta_{\text{B}}}z} \times \sum_{i=0}^{N_{\text{B}} - M \times N_{\text{S}}} \binom{N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}}{i} \sum_{j=1}^{i+1} a_j S_j(z) \times \Gamma(i + 1) \quad (31)$$

其中, $\mu = \frac{1}{P_{\text{B}}\theta_{\text{B}}}$, $\beta = \frac{P_{\text{B}}\theta_{\text{B}}}{P_{\text{S}}\Omega_{\text{S}}}$, $S_j(z)$ 满足式(32)。

$$S_j(z) = \begin{cases} e^{\mu\beta} [\text{Ei}(-\mu z - \mu\beta) - \text{Ei}(-\mu\beta)], & j = 1 \\ \frac{1}{(j-1)!} \sum_{k=1}^{j-1} (k-1)! (-\mu)^{j-k-1} \beta^{-k} \\ - \frac{(-\mu)^{j-1}}{(j-1)!} e^{\mu\beta} \text{Ei}(-\mu\beta) - e^{-\mu z} \\ \cdot \sum_{k=1}^{j-1} \frac{(k-1)! (-\mu)^{j-k-1}}{(j-1)! (\beta + z)^k} + \frac{(-\mu)^{j-1}}{(j-1)!} \\ \cdot e^{\mu\beta} \text{Ei}[-(z + \beta)\mu], & j = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (32)$$

4.2.2 MMS 位于小小区覆盖范围以外 若 MMS 位于小小区覆盖范围之外, 根据式(7)和式(19)可以推导出 γ_{MMS} 的累积分布函数为

$$P_{\gamma_{\text{MMS}}}(z) = \frac{1}{\Gamma(N_{\text{B}} - MN_{\text{S}})} \gamma\left(N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}, \frac{z}{P_{\text{B}}\theta_{\text{B}}}\right) \quad (33)$$

4.3 系统的中断概率

当系统中某一接收端的接收信噪比低于门限值时, 将无法保证接收端的服务质量(Quality of Service, QoS)要求, 系统将会发生中断。系统的中断概率可以表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= \Pr\left\{\min(\gamma_{\text{MMS}}, \gamma_{\text{SCMS}_1}, \dots, \gamma_{\text{SCMS}_M}) < \gamma_{\text{th}}\right\} \\ &= 1 - \Pr\left\{\gamma_{\text{MMS}} > \gamma_{\text{th}}, \gamma_{\text{SCMS}_1} > \gamma_{\text{th}}, \dots, \right. \\ &\quad \left. \gamma_{\text{SCMS}_M} > \gamma_{\text{th}}\right\} \end{aligned} \quad (34)$$

其中 γ_{th} 表示 SNR 的门限。

因为 \mathbf{g}_{BM} , \mathbf{H}_{B_i} 和 g_{S_i} 中的元素是相互独立的, 所以式(34)可以展开为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= 1 - \Pr\left\{\gamma_{\text{MMS}} > \gamma_{\text{th}}\right\} \prod_{i=1}^M \Pr\left\{\gamma_{\text{SCMS}_i} > \gamma_{\text{th}}\right\} \\ &= 1 - \left[1 - P_{\gamma_{\text{MMS}}}(\gamma_{\text{th}})\right] \prod_{i=1}^M \left[1 - P_{\gamma_{\text{SCMS}_i}}(\gamma_{\text{th}})\right] \\ &= 1 - \left[1 - P_{\gamma_{\text{MMS}}}(\gamma_{\text{th}})\right] \prod_{i=1}^M \left[1 - \frac{\gamma\left(N_{\text{S}}, \frac{\gamma_{\text{th}}}{P_{\text{S}}\theta_{\text{S}}}\right)}{\Gamma(N_{\text{S}})}\right] \end{aligned} \quad (35)$$

根据文献[23]中的公式 8.356.3, 即 $\gamma(\alpha, x) + \Gamma(\alpha, x) = \Gamma(\alpha)$, 因此, 当激活的 MMS 在 SCBS 的覆盖范围内时, 系统的中断概率式(35)化简为

$$P_{\text{out}} = 1 - \left[1 - P_{\gamma_{\text{MMS}}}(\gamma_{\text{th}})\right] \prod_{i=1}^M \left[\frac{\Gamma\left(N_{\text{S}}, \frac{\gamma_{\text{th}}}{P_{\text{S}}\theta_{\text{S}}}\right)}{\Gamma(N_{\text{S}})}\right] \quad (36)$$

如果激活的 MMS 不在 SCBS 的覆盖范围内, 可以进行类似的推导, 系统的中断概率变为

$$P_{\text{out}} = 1 - \left[\frac{\Gamma\left(N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}, \frac{\gamma_{\text{th}}}{P_{\text{B}}\theta_{\text{B}}}\right)}{\Gamma(N_{\text{B}} - MN_{\text{S}})}\right] \prod_{i=1}^M \left[\frac{\Gamma\left(N_{\text{S}}, \frac{\gamma_{\text{th}}}{P_{\text{S}}\theta_{\text{S}}}\right)}{\Gamma(N_{\text{S}})}\right] \quad (37)$$

5 仿真结果及分析

本小节对本文所提的基于异构蜂窝网络的干扰消除方法的性能进行数值仿真。系统中断概率由式(34)给出, MBS 到 MMS 链路和所有小小区的中断概率分别定义为 $\Pr\{\gamma_{\text{MMS}} < \gamma_{\text{th}}\}$ 和 $1 - \prod_{i=1}^M \Pr\{\gamma_{\text{SCMS}_i} > \gamma_{\text{th}}\}$ 。速率门限值设为 $\gamma_{\text{th}} = 1$

bit/(s·Hz), 宏小区基站、小小区基站和移动台之间的信道为 Rayleigh 信道。考虑如图 1 所示的场景, MBS 与 MMS 之间的距离为 200 m, SCBS 与 SCMS 之间的距离为 50 m。MBS 到各个移动台的路径损耗模型为 $34.5 + 38 \lg(d[\text{m}])$, SCBS 到 SCBS 的路径损耗模型为 $37 + 32 \lg(d[\text{m}])$ [3]。仿真图中“IC”表示采用干扰消除方案, “w/o IC”表示未采用干扰消除方案, “理论结果”表示采用干扰消除方案后系统中断概率的理论推导结果, “Sims”表示系统中断概率实际仿真结果, “Macro”表示 MBS 到 MMS 链路的仿真结果, “Small”表示所有小小区的仿真结果。

图 3 研究了当激活的 MMS 不在小小区的覆盖范围内时, 异构蜂窝网络中采用所提的干扰消除方案与传统的没有采用干扰消除方案在系统中断概率方面的性能比较。仿真参数设置为 $M = 2$, $N_{\text{S}} = 2$, $N_{\text{B}} = 5$; 从图中可以看出, 本文提出的干扰消除方案能有效改善系统中断概率性能。系统未采用干扰消除方案时, 所有小小区的中断概率性能不佳, 直接导致系统性能的下降。从图中还可以看出, 本文理论推导的系统中断概率与实际场景的仿真结果相吻合, 通过仿真验证了理论推导的正确性。

图 4 主要研究 MBS 天线数对系统性能的影响, 具体参数为 $M = 3$, $N_{\text{S}} = 2$, $N_{\text{B}} = 7$, 其他参数与图 3 一样。对比图 3 与图 4 发现, 两次仿真中 MBS 到 MMS 链路的中断概率不变, 主要是由于两者的 $N_{\text{B}} - MN_{\text{S}}$ 的值不变。虽然 N_{S} 不变, 但小小区个数 M 增加, 导致 SCMS 的中断概率增加, 系统中断概率也随之增加。同时, 随着 N_{B} 的增加, 对应于不采用干扰消除方案时 MMS 的中断概率将会降低。

图 5 研究了当激活的 MMS 在小小区的覆盖范围内时, 异构蜂窝网络中采用本文所提出的干扰消除方案与传统的没有采用干扰消除方案在系统中断概率方面的性能比较。从仿真结果可以看出, 式(36)理论推导的系统中断概率与实际场景的仿真结果相吻合, 通过仿真对其进行了验证。

6 结论

本文研究了干扰消除技术在异构网络中的应用。首先针对异构网络中的特点, 以减少跨层网络中宏基站对小小区中移动台的干扰为目标, 给出了一种在宏基站端进行干扰消除的方案。该方案中, 小小区之间不需要交互大量的信息, 只需将自己的跨层信道信息传送给宏基站。文中对所给出的干扰消除方案的性能进行了分析, 推导了宏小区和小小区中的移动台接收信噪比的概率密度函数和累积分

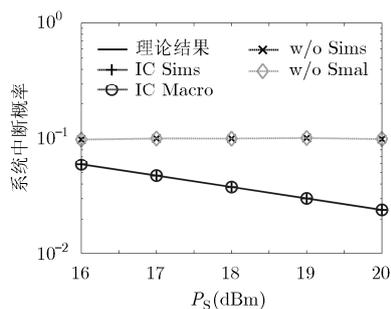


图3 MMS不在SCBS内时中断概率随发射功率 P_s 变化图 ($N_B=5$)

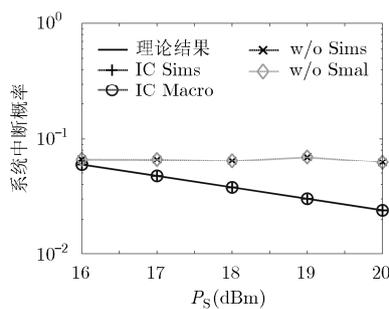


图4 MMS不在SCBS内时中断概率随发射功率 P_s 变化图 ($N_B=7$)

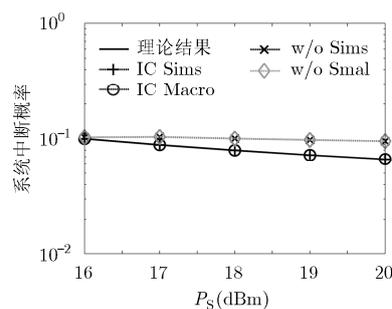


图5 MMS在SCBS内时中断概率随发射功率 P_s 变化图 ($N_B=5$)

布函数，进而得到系统中断概率的闭合表达式。最后，借助于仿真工具，验证了所给出干扰消除方案的有效性，以及方案性能推导的正确性。

参考文献

- [1] HAIDER F, GAO X, YOU X H, *et al.* Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 122-130.
- [2] HU R Q and QIAN Y. An energy efficient and spectrum efficient wireless heterogeneous network framework for 5G systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(5): 94-101.
- [3] HE S, HUANG Y, WANG H, *et al.* Leakage-aware energy-efficient beamforming for heterogeneous multicell multiuser systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1268-1281.
- [4] HUANG Y, He S, JIN S, *et al.* Area-classified interference coordination for heterogeneous cellular network[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014, 30(1): 1-16.
- [5] SONG K, JI B, HUANG Y, *et al.* Performance analysis of antenna selection in two-way relay networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(10): 2520-2532.
- [6] 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.
- [7] YUAN T T, FEI Z S, LI N, *et al.* A QoE-based cell range expansion scheme in heterogeneous cellular networks[J]. *Science China Information Sciences*, 2015, 58(8): 1-11.
- [8] 杜晓玉, 孙力娟, 郭剑, 等. 异构无线传感器网络覆盖优化算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(3): 696-702.
DU Xiaoyu, SUN Lijuan, GUO Jian, *et al.* Coverage optimization algorithm for heterogeneous WSNs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(3): 696-702.
- [9] 赵睿, 何世文. 低复杂度 MISO 干扰信道协同波束成形算法[J]. *华侨大学学报*, 2014, 35(6): 625-630.
ZHAO Rui and HE Shiwen. A lower-complexity algorithm for MISO interference channel coordinated beamforming[J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2014, 35(6): 625-630.
- [10] 赵睿, 杨绿溪. 基于泊松点过程分布的多蜂窝协作系统中干扰对齐技术研究[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(5): 1194-1199.
ZHAO Rui and YANG Luxi. Research on interference alignment technique in multi-cell cooperative systems based on poisson point process[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(5): 1194-1199.
- [11] 李敏, 林敏. 同信道干扰条件下的多天线放大转发中继中断概率分析[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(1): 163-168.
LI Min and LIN Min. Outage probability analysis of dual-hop MIMO amplify-and-forward relaying with multiple co-channel interferences[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(1): 163-168.
- [12] NAM W, BAI D, Lee J, *et al.* Advanced interference management for 5G cellular networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(5): 52-60.
- [13] SORET B, PEDERSEN K I, JORGENSEN N T K, *et al.* Interference coordination for dense wireless networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(1): 102-109.
- [14] 石雷, 韩江洪, 石怡, 等. 无线多跳网络下基于干扰管理的高容量跨层优化策略[J]. *通信学报*, 2014, 35(12): 89-97.
SHI Lei, HAM Jianghong, SHI Yi, *et al.* High capacity cross layer optimization strategy for multi-hop wireless network with interference management[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(12): 89-97.
- [15] NISHIMORI K, KITAO K, and IMAI T. Interference cancellation using relay station in heterogeneous networks[C]. *Proceedings of 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, San Francisco, 2011: 1-5.
- [16] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J G, MUHAREMOVICT T, *et al.* Power control in two-tier femtocell networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(8): 4316-4328.
- [17] WANG R and DU Y. Het-net throughput analysis with picocell interference cancellation[C]. *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on of Communications*

- Workshops (ICC), Kyoto, 2011: 1-6.
- [18] LATRACH A, NASRI R, and AFFES S. Downlink interference cancellation strategy for shared-spectrum LTE HetNet[C]. Proceedings of 2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Cagliari, 2013: 1809-1815.
- [19] LEE K T and CHEN K C. Interference cancellation in heterogeneous networks[C]. Proceedings of 2013 IEEE 24th International Symposium on International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, 2013: 796-800.
- [20] 唐良瑞, 陈媛媛. 智能配电网中异构无线网络负载均衡算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1667-1674.
TANG Liangrui and CHEN Yuanyuan. Load balancing algorithm in heterogeneous wireless networks for smart distribution grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(10): 1667-1674.
- [21] BOYD S and VANDENBERGHE L. Convex Optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 127-187.
- [22] XU W, LIANG L, ZHANG H, *et al.* Performance enhanced transmission in device-to-device communications: Beamforming or interference cancellation?[C]. Proceedings of 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Anaheim, 2012: 4296-4301.
- [23] GRADSHTEYN I S and RYZHIK I M. Table of Integrals, Series, and Products[M]. 7th Edition, Waltham: Academic Press, 2007: 340-901.
- 宋 康: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为协作通信、异构网络及相关性能分析.
- 韦 磊: 男, 1982 年生, 工程师, 主要研究方向为智能电网.
- 冀保峰: 男, 1985 年生, 讲师, 主要研究方向为中继协作通信、超宽带无线局域网.
- 王雅芳: 女, 1989 年生, 硕士生, 研究方向为异构自组织网络.
- 黄永明: 男, 1977 年生, 教授, 主要研究方向为 MIMO 通信信号处理、多用户通信信号处理和协作通信.
- 杨绿溪: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信空时信号处理、协作通信和网络编码.