

## 蜂窝系统上行小区间干扰链路统计分析

朱元萍<sup>\*①③</sup> 徐景<sup>①②</sup> 杨旻<sup>①②</sup> 王江<sup>②④</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)

<sup>②</sup>(上海无线通信研究中心 上海 200335)

<sup>③</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

<sup>④</sup>(中国科学院无线传感网与通信重点实验室 上海 200050)

**摘要:** 在同频复用网络中, 小区间干扰已成为限制系统性能提升的关键因素之一。该文对单个干扰小区产生的上行小区间干扰链路进行统计建模, 通过分析路损的矩生成函数和累积量生成函数, 得出了干扰链路路损分布函数的近似表达式。进一步地, 根据得出的统计模型分析系统参数设置对干扰路损分布的影响。研究发现, 阴影衰落的标准差越大, 上行干扰路损分布越接近高斯分布。另外, 传播模型参数中的衰减指数也对路损分布有较大的影响。

**关键词:** 无线通信; 小区间干扰; 路损; 阴影衰落; 概率密度函数

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)08-1971-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01613

## Statistical Analysis of the Uplink Inter-cell Interference for Cellular Systems

Zhu Yuan-ping<sup>①③</sup> Xu Jing<sup>①②</sup> Yang Yang<sup>①②</sup> Wang Jiang<sup>②④</sup>

<sup>①</sup>(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

<sup>②</sup>(Shanghai Research Center of Wireless Communications, Shanghai 200335, China)

<sup>③</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>④</sup>(Key Laboratory of Wireless Sensor Network and Communications, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** For frequency reuse one systems, the inter-cell interference is one of the restricting factors of the system performance. This paper presents a statistical modeling of the path loss of uplink inter-cell interference link from single interference cell. Through the derivation and analysis of the Moment Generating Function (MGF) and the Cumulant Generating Function (CGF), the reliable approximated probability density function of the path loss of interfering link is derived. Based on the investigation of the derived results, it is observed that with the increase of the variance of shadow fading, the distribution of the path loss of interfering link tends to be Gaussian distribution. In addition, the attenuation exponent of the path loss model has great influence on the distribution of the path loss.

**Key words:** Wireless communication; Inter-cell interference; Path loss; Shadow fading; Probability Density Function (PDF)

### 1 引言

在无线通信系统中, 为了缓解频率资源紧张的现状, 在各个小区之间采取同频率复用的方式已经被诸如 3GPP LTE 和 IEEE 802.16 等多种主流接入网络采用。同频复用方案在最大化频谱利用的同时引入了新的挑战: 更严重的小区间干扰。尤其是对处于小区边缘地区的用户而言, 下行链路将受到相

邻小区的强干扰, 同时这些用户也会对靠近的邻小区基站(evolved NodeB, eNB)造成较强的上行干扰。

为了应对小区间干扰的挑战, 工业界和学术界都积极地探索各种干扰协调方案<sup>[1-4]</sup>。对于方案的有效性, 常常需要通过大量耗时耗力的仿真来进行验证。若通过分析得出小区间干扰的统计特性, 一方面能避免进行长时间的系统仿真; 另一方面, 一些统计量也对系统性能评估息息相关, 例如干扰的均值可以反映小区间干扰的平均水平, 而干扰的方差可以反映干扰的波动性, 分析这些统计量有利于干扰协调方案的设置。一些学者已经尝试从统计学的角度对小区间干扰或用户的信干噪比(Signal to Interference and Noise Ratio, SINR)进行分析或建

2012-12-12 收到, 2013-04-19 改回

国家自然科学基金(61210002), 科技部国际合作项目(2012DFG11910), 上海市科委重点项目(12JC1404202)和国家科技重大专项(2012ZX03003009-003)资助课题

\*通信作者: 朱元萍 yuanping.zhu@shrwc.org

模。例如,文献[5]分析了不同模型假设的下行链路信干比(Signal to Interference Ratio, SIR)的协方差函数,并用于系统中断概率(outage probability)的计算。文献[6]中根据大量仿真数据对每个子载波的 SINR 进行了统计分析。文献[7]采用理论分析结合数值计算的方式得出家庭基站网络中的下行链路 SINR 的概率密度函数,并分析系统参数设置对其的影响。文献[8]通过对部分频率复用场景的下行干扰分析,评估网络的接入概率。上述研究针对下行干扰展开,得到一些统计特性相关的结论。在蜂窝系统中,下行链路的干扰源是位置固定的基站。由于基站的发射功率相对比较稳定,下行干扰受调度的影响很小。而上行链路的干扰源是用户,同样的资源块在不同的调度周期可能会分配给不同的用户,故上行干扰受调度策略的影响会有较大的波动性。考虑到上下行链路的区别,下行链路建模的一些方法和结论对上行链路而言并不适用。文献[9]通过大量仿真得到上行小区间干扰的统计直方图,并未从理论上给出具体的表达式。文献[10]对自组织网络中随机分布的节点之间信号和干扰进行统计分析,由于场景的差异,所得的结论不适用于蜂窝网络。

在无线通信系统中,无论是研究信号还是干扰,都与传播损耗息息相关。电波传播过程中的损耗包括大尺度损耗和小尺度衰落。其中小尺度的衰落主要是由无线信道多径效应导致的幅度相位快变化,因此在对无线信号的长时间内统计分析中,大都不考虑小尺度衰落的影响。大尺度损耗包括与传播距离的指数函数相关的损耗和与受地形地貌及建筑物影响的阴影衰落,因此,用户的分布和小区的形状会对信号及干扰的分布有很大的影响。已有学者对处于小区中心的基站和随机分布在小区内用户(User Equipment, UE)之间的路损进行统计建模<sup>[11-15]</sup>,以研究信号链路路的衰减分布。而对于小区间干扰,很多研究都基于对数域的干扰服从高斯分布这一假设<sup>[16-18]</sup>,却并没有从理论上进行论证。文献[19]和文献[20]研究了六边形和圆形小区模型下,两个节点处于同一小区和不同小区内的距离分布,但并没进一步做干扰分布分析。文献[21]分析了多种场景下的干扰链路路损分布,并得出固定发射功率的假设下干扰的各阶原点矩,但对于干扰节点随机分布于一个圆形小区内而接收节点位于该小区外的场景,并没有给出干扰路损分布函数的闭合表达式,且文章对干扰各阶矩的分析基于干扰用户的数目服从泊松分布的假设,根据文中示意的场景,在一个小区内可能会有同时存在多个干扰源,这对蜂窝网络的场景是不适用的。

在同频复用蜂窝网络中,基站受到的强干扰主要来源于与之紧邻的一圈干扰小区中。由于各个小区之间的调度相互独立,来自这些主要干扰小区的上行干扰是独立同分布的。单小区干扰的统计分析是研究多小区干扰的重要基础,因此需要先对单个干扰小区场景的上行干扰链路进行分析,然后再拓展到多小区的场景。本文对蜂窝网络中上行小区间干扰链路路损进行统计建模,所述的路损包括与传播距离相关的传播损耗和阴影衰落。通过分析来自单个干扰小区的上行干扰路损的矩生成函数(Moment Generating Function, MGF)和累积量生成函数(Cumulant Generating Function, CGF)<sup>[22]</sup>,得出描述路损分布的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)表达式,并分析了采用高斯分布近似描述小区间干扰分布的适用性及系统参数变化对干扰链路路损分布的影响。

## 2 系统模型

本文的分析基于圆形小区模型,如图 1 所示,基站位于各个小区的圆心位置,用户随机均匀分布在小区内。小区半径是  $R$ ,基站间的距离(Inter Site Distance, ISD)是  $\sqrt{3}R$ 。为便于区分,将  $eNB_0$  所辖小区定义为目标小区,与其相邻的小区定义为干扰小区,图中干扰小区的服务基站为  $eNB_1$ 。假设系统是满载的,即对于给定上行频带,每个小区都有用户正在使用,且不同小区的频率资源调度是相互独立的。 $UE_0$  表示目标小区内调度到给定频段的用户,并将干扰小区中使用同一频段的用户记为  $UE_1$ 。将  $UE_1$  与  $eNB_0$  之间的距离表示为  $d$ 。由于用户位置的随机性,距离  $d$  也是一个随机变量。

## 3 上行干扰统计模型

假定  $PL$  表示包含大尺度传播损耗和阴影衰落两部分的路损,单位为 dB。基于系统模型假设,  $UE_1$

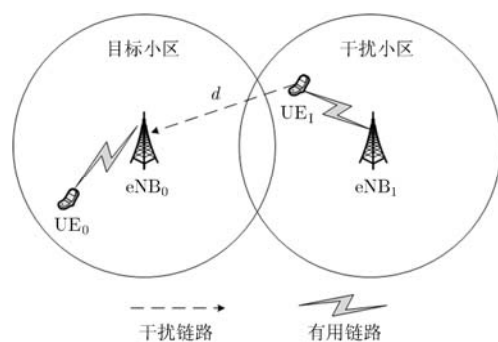


图 1 上行小区间干扰系统模型

到  $eNB_0$  的上行干扰链路路损可表示为

$$PL = A + B \lg d + X_\sigma \quad (1)$$

其中  $A$  和  $B$  是确定传播模型的路损常数,  $A$  与参考点的位置选取相关,  $B$  是衰减指数的 10 倍。 $A + B \lg d$  表示大尺度传播损耗;  $X_\sigma$  表示阴影衰落, 主要受地形地貌及周围建筑物的影响。

### 3.1 阴影衰落和大尺度传播损耗的概率密度函数

通常, 线性域的阴影衰落被建模为一个对数正态(lognormal)的随机变量。因此, 对应于对数域, 阴影衰落  $X_\sigma$  是一个均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的高斯随机变量, 其概率密度函数表示为

$$f_{X_\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

定义  $Y = A + B \lg d$  表示与传播距离相关的大尺度传播损耗,  $\lambda = d/R$  表示干扰用户  $UE_1$  到  $eNB_0$  的归一化距离, 则有  $Y = A + B \lg R + B \lg \lambda$ 。基于前述系统模型假设, 基站间的距离为  $ISD = \sqrt{3}R$ , 容易得出  $\lambda$  的范围为  $(\sqrt{3}-1) \leq \lambda \leq (\sqrt{3}+1)$ 。小区半径  $R$  通常在网络部署后已确定, 因此对于给定的  $A$ ,  $B$  和  $R$ ,  $Y$  的分布受  $\lambda$  的分布影响, 而  $\lambda$  的分布由用户的位置分布特性决定。

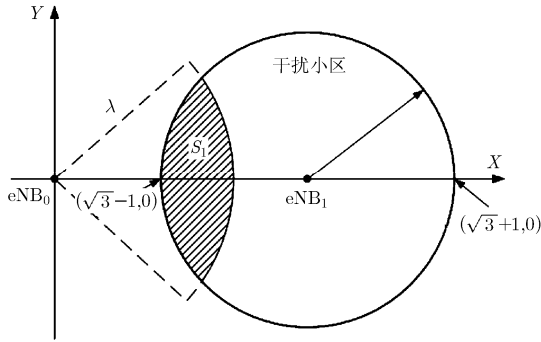


图2 上行干扰链路归一化距离分布示意图

图2给出了简化的上行干扰场景图, 其中归一化后的干扰小区半径为 1。用户在小区内均匀分布, 故  $\lambda$  的累积概率分布函数应为图2中阴影部分的面积  $S_1$  与半径归一化的干扰小区面积之比, 即可表示为

$$F_\lambda(\lambda) = \left[ \lambda^2 \arccos\left(\frac{\lambda^2 + 2}{2\sqrt{3}\lambda}\right) + \arccos\left(\frac{4 - \lambda^2}{2\sqrt{3}}\right) - \frac{\sqrt{8\lambda^2 - \lambda^4 - 4}}{2} \right] / \pi \quad (3)$$

进一步, 可以得到  $\lambda$  的概率密度函数为

$$f_\lambda(\lambda) = \frac{dF_\lambda(\lambda)}{d\lambda} = \frac{2\lambda}{\pi} \arccos\left(\frac{\lambda^2 + 2}{2\sqrt{3}\lambda}\right) \quad (4)$$

由于  $\lambda = e^{(Y-A-B \lg R) \ln 10 / B}$ , 结合式(4), 可以给出  $Y$  的概率密度函数为

$$f_Y(y) = f_\lambda(\lambda(Y)) \left| \lambda'(Y) \right|_{Y=y} = \frac{2 \ln 10 e^{2(y-A-B \lg R) \ln 10 / B}}{B\pi} \times \arccos\left(\frac{e^{(y-A-B \lg R) \ln 10 / B} + 2e^{-(y-A-B \lg R) \ln 10 / B}}{2\sqrt{3}}\right) \quad (5)$$

其中  $Y$  的取值范围为  $A + B \lg R + B \lg(\sqrt{3}-1) \leq y \leq A + B \lg R + B \lg(\sqrt{3}+1)$ 。

如前所述, 干扰链路的路损为  $PL = Y + X_\sigma$ , 且  $Y$  和  $X_\sigma$  相互独立。根据文献[22], 相互独立的随机变量求和, 和变量的概率密度函数可由求和项的概率密度函数进行卷积得到, 因此  $PL$  的概率密度函数为

$$f_{PL} = f_Y * f_{X_\sigma} \quad (6)$$

其中“\*”表示卷积运算。将式(2)和式(5)代入式(6), 可以通过数值计算的手段得出  $PL$  的概率密度函数, 但却不易得出其闭合表达式。

### 3.2 干扰链路路损的变换域分析

对阴影衰落  $X_\sigma$  而言, 利用定义容易得出其矩生成函数和累积量生成函数为

$$\Phi_{X_\sigma}(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{X_\sigma}(x) e^{sx} dx = \exp(\sigma^2 s^2 / 2) \quad (7)$$

$$\Psi_{X_\sigma}(s) = \ln \Phi_{X_\sigma}(s) = \sigma^2 s^2 / 2 \quad (8)$$

同样地, 可以写出  $Y$  的矩生成函数为

$$\begin{aligned} \Phi_Y(s) &= \int f_Y(y) e^{sy} dy \\ &= \int e^{sy} \frac{2 \ln 10 e^{2(y-\Gamma) \ln 10 / B}}{B\pi} \times \arccos\left(\frac{e^{(y-\Gamma) \ln 10 / B} + 2e^{-(y-\Gamma) \ln 10 / B}}{2\sqrt{3}}\right) dy \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中,  $\Gamma = A + B \lg R$ 。  $\Phi_Y(s)$  的泰勒级数展开的形式为

$$\Phi_Y(s) = 1 + m_1^{(Y)} s + \frac{m_2^{(Y)}}{2!} s^2 + \dots + \frac{m_n^{(Y)}}{n!} s^n + \dots \quad (10)$$

其中  $m_n^{(Y)}$  ( $n=1, 2, \dots$ ) 表示  $Y$  的  $n$  阶原点矩, 其计算公式为

$$m_n^{(Y)} = \int_Y y^n f_Y(y) dy \quad (11)$$

很明显, 在小区半径和路损模型相关参数已知的情况下, 通过数值计算的方式容易得出  $Y$  的  $n$  阶矩。

同样地,  $Y$  的累积量生成函数也可表示为泰勒级数展开形式:

$$\begin{aligned}\Psi_Y(s) &= \ln \Phi_Y(s) \\ &= c_1^{(Y)}s + \frac{c_2^{(Y)}}{2!}s^2 + \dots + \frac{c_n^{(Y)}}{n!}s^n + \dots\end{aligned}\quad (12)$$

式(12)中的  $c_n^{(Y)}$  表示  $Y$  的  $n$  阶累积量。随机变量的累积量和原点矩之间的函数关系可以用 M-C 公式(矩-累积量转换公式)<sup>[23]</sup>给出, 该公式利用随机变量的各阶原点矩求出随机变量的各阶累积量, 如式(13)所示。

$$c_n^{(x)}(I) = \sum_{p=1}^q (-1)^{q-1} (q-1)! \prod_{p=1}^q m_{n_p}^{(x)}(I_p) \quad (13)$$

其中  $I = \{1, 2, \dots, n\}$  表示  $n$  个元素的集合。  $I_p$  是  $I$  的非空子集, 满足  $\bigcup_{p=1}^q I_p = I$  条件的  $I_p$  相互无交连,  $q$  是符合前述条件的分割子集数,  $n_p$  表示子集  $I_p$  中的元素个数, 而  $m_{n_p}^{(x)}(I_p)$  表示随机变量  $x$  的  $n_p$  阶原点矩。基于式(13),  $x$  的  $n$  阶累积量  $c_n^{(x)}$  由其前  $n$  阶原点矩组成的多项式表示。

$PL = Y + X_\sigma$  的矩生成函数和累积量生成函数分别为

$$\left. \begin{aligned}\Phi_{PL}(s) &= \Phi_Y(s)\Phi_\xi(s) = \Phi_Y(s)e^{\sigma^2 s^2/2} \\ \Psi_{PL}(s) &= \ln\{\Phi_Y(s)\Phi_\xi(s)\} = \Psi_Y(s) + \sigma^2 s^2/2\end{aligned}\right\} \quad (14)$$

为了分析便利, 我们对  $PL$  进行归一化, 得到  $PL' = (PL - m_{PL})/\sigma_{PL}$ 。其中  $m_{PL}$  和  $\sigma_{PL}$  分别表示  $PL$  的均值和标准差。  $PL'$  的矩生成函数和累积量生成函数分别为

$$\left. \begin{aligned}\Phi_{PL'}(s) &= \Phi_{PL}(s/\sigma_{PL})e^{-sm_{PL}/\sigma_{PL}} \\ \Psi_{PL'}(s) &= \frac{s^2}{2!} + \frac{c_3^{(Y)}}{3!(\sqrt{c_2^{(Y)} + \sigma^2})^3} s^3 + \dots \\ &\quad + \frac{c_n^{(Y)}}{n!(\sqrt{c_2^{(Y)} + \sigma^2})^n} s^n + \dots\end{aligned}\right\} \quad (15)$$

### 3.3 单小区上行小区间干扰路损的近似分布函数

归一化的路损  $PL'$  的累积量生成函数中,  $s^n$  ( $n \geq 3$ ) 的系数为  $c_n^{(Y)}/[n!(c_2^{(Y)} + \sigma^2)^{n/2}]$ 。若阴影衰落的方差  $\sigma^2$  越大, 该系数的绝对值越小。当其绝对值远远小于 1 时, 则可以近似忽略。若  $n \geq 3$  的高阶项都能忽略, 归一化路损  $PL'$  的累积量生成函数为  $\Psi_{PL'}(s) \approx s^2/2!$ 。这意味着  $PL'$  服从均值为 0, 方差为 1 的标准正态分布。相对应地, 这种情况下路损  $PL$  服从均值为  $m_{PL}$ , 方差为  $\sigma_{PL}$  的高斯分布。

但是, 直接采用高斯分布近似路损的分布是一种比较粗糙的手段, 在三阶以上的高阶累积量不能忽略时会引入比较大的近似误差。为了探寻更准确的近似分布函数, 我们对  $PL'$  的累积量生成函数进行逆变换

$$f_{PL'}(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{+i\infty} \exp[\Psi_{PL'}(s)]e^{-sx} ds \quad (16)$$

定义  $s = j\omega$ , 并将式(15)给出的  $\Psi_{PL'}(s)$  代入式(16), 可得

$$\begin{aligned}f_{PL'}(x) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[\Psi_{PL'}(j\omega) - j\omega x] d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{x^2}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}(\omega+jx)^2} e^{\Delta} d\omega\end{aligned}\quad (17)$$

其中  $c_n^{(PL')} = c_n^{(Y)}/(\sqrt{c_2^{(Y)} + \sigma^2})^n$ ,  $\Delta = \sum_{n=3}^{\infty} c_n^{(PL')} \cdot (j\omega)^n/n!$ 。

考虑到当  $n$  大到一定的程度时,  $c_n^{(PL')}/n! \ll 1$ , 很多高阶项均可忽略。在这种情况下, 可以采用截短的级数  $\Delta \approx \sum_{n=3}^N c_n^{(PL')}(j\omega)^n/n!$  来表示  $\Delta$  以便于运算。在本文中取  $N=3$ , 即  $\Delta \approx c_3^{(PL')}(j\omega)^3/3!$ 。对  $e^{\Delta}$  进行泰勒展开, 可得  $e^{\Delta} = 1 + \Delta + \Delta^2/2! + \dots$ , 取其前 3 项, 再将  $\Delta \approx c_3^{(PL')}(j\omega)^3/3!$  代入, 可得

$$e^{\Delta} \approx 1 + \frac{c_3^{(PL')}(j\omega)^3}{3!} + \frac{1}{2!} \left( \frac{c_3^{(PL')}}{3!} \right)^2 (j\omega)^6 \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)中, 即可得出

$$\begin{aligned}f_{PL'}(x) &\approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} + \sum_{n=3}^6 p_n j^n \\ &\quad \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^n e^{-\frac{1}{2}\omega^2 - j\omega x} d\omega\end{aligned}\quad (19)$$

式(19)中, 对应于  $n=3, 4, 5, 6$ ,  $p_n$  分别为  $p_3 = c_3^{(PL')}/3!$ ,  $p_4 = p_5 = 0$ ,  $p_6 = [c_3^{(PL')}/3!]^2/2!$ 。

基于文献[24]中的方法, 可以计算式(19)中的积分项, 如式(20)所示。

$$\begin{aligned}\int_{-\infty}^{+\infty} \omega^n e^{-\frac{1}{2}\omega^2 - j\omega x} d\omega &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial^n}{\partial u^n} \left( e^{-\frac{1}{2}\omega^2 + u\omega} \right) \Bigg|_{u=-jx} d\omega \\ &= \sqrt{2\pi} e^{\frac{1}{2}u^2} g^{(n)}(u) \Bigg|_{u=-jx}\end{aligned}\quad (20)$$

其中,  $g^{(n)}(u) = \sum_{i=0}^n b_i^{(n)} u^i$ ,  $b_i^{(n)}$  是  $n$  阶多项式  $g^{(n)}(u)$  第  $i$  项的系数。  $g^{(n)}(u)$  的计算可以采用递归的思想, 即

$$\begin{aligned}g^{(n)}(u) &= u g^{(n-1)}(u) + \frac{d g^{(n-1)}(u)}{du} \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} b_i^{(n-1)} u^{i+1} + \sum_{i=1}^{n-1} i b_i^{(n-1)} u^{i-1} \\ &= b_1^{(n-1)} + \sum_{i=1}^{n-1} [(i+1)b_{i+1}^{(n-1)} + b_{i-1}^{(n-1)}] u^i + b_{n-1}^{(n-1)} u^n\end{aligned}\quad (21)$$

因此有  $g^{(3)}(u) = 3u + u^3$ ,  $g^{(4)}(u) = 3 + 6u^2 + u^4$ ,  $g^{(5)}(u) = 15u + 10u^3 + u^5$ ,  $g^{(6)}(u) = 15 + 45u^2 + 15u^4 + u^6$ 。进而可以得出  $PL'$  概率密度函数为

$$f_{PL'}(x) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} + \frac{1}{2\pi} \sum_{n=3}^6 p_n J^n \sqrt{2\pi} e^{\frac{1}{2}u^2} g^{(n)}(u) \Big|_{u=-jx}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \left[ 1 - 15p_6 - 3p_3x + 45p_6x^2 + p_3x^3 - 15p_6x^4 + p_6x^6 \right] \quad (22)$$

干扰链路路损  $PL$  的概率密度函数为

$$f_{PL}(x) = \frac{1}{\sigma_{PL}} f_{PL'}\left(\frac{x - m_{PL}}{\sigma_{PL}}\right) \quad (23)$$

### 4 仿真和理论结果分析

为了验证理论分析，本文首先比较了不同参数设置下，蒙特卡洛仿真(Monte Carlo simulations)和理论近似的结果。然后通过比较不同阴影参数设置下的路损分布，体现阴影衰落方差对上行小区间干扰链路路损分布的影响。相关的系统参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真和计算参数设置

系统参数	设置
小区半径	$R = 1000$ m
基站间距	$ISD = \sqrt{3}R$
大尺度路损模型	$A = 15.3, B = 37.6$
UE 的分布	小区内均匀分布
UE 和 eNB 的天线类型	全向天线
阴影衰落的标准差	$\sigma = 4, 6, 8, 10, 12$ (dB)
蒙特卡洛仿真次数	5000000

图 3 给出了对应于不同的阴影衰落标准差取值时，上行干扰链路的路损分布曲线。其中理论计算的曲线是根据式(6)进行数值计算得出的。比较理论计算值和蒙特卡洛仿真的结果，可以发现二者在不同的  $\sigma$  取值时，都能很好地吻合，这说明了理论推导的正确性。此外，对于每一种阴影衰落标准差的取值，图 3 都给出了对应的高斯分布和理论近似的分布曲线。高斯分布是由均值和方差确定的，理论近似则是根据上一节中推导的式(22)和式(23)得出的。很明显，在阴影衰落的标准差取值较小的时候

(比如  $\sigma = 4$  dB 及  $\sigma = 6$  dB 时)，高斯近似的结果与理论计算的结果差距较大，而理论近似结果则有很好的表现。

借助 KL(Kullback–Leibler)距离<sup>[25]</sup>，可以对高斯近似和理论近似分布分别与理论计算分布的吻合程度给出更直观的描述。两种分布  $P$  和  $Q$  之间的 KL 距离定义为  $D_{KL}(P \parallel Q) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \lg[p(x)/q(x)]dx$ 。其中  $p(x)$  和  $q(x)$  分别对应于分布  $P$  和  $Q$  的概率密度函数。KL 距离的取值范围在 0 到正无穷之间，值越大，表明两种分布之间的差距越大，反之差距越小。

将理论计算分布和理论近似分布之间的 KL 距离定义为  $D_{KL}(T \parallel A)$ ，将理论计算分布和高斯近似分布之间的 KL 距离定义为  $D_{KL}(T \parallel G)$ 。表 2 给出了不同的阴影衰落标准差设置下两个 KL 距离的值。从该表的结果，可以直观地看出，无论是  $D_{KL}(T \parallel A)$ ，还是  $D_{KL}(T \parallel G)$ ，都随着  $\sigma$  的增大而减小，这说明随着阴影衰落标准差的增加，理论近似的结果越来越准确，并且上行干扰链路的路损分布越来越接近于高斯分布。另一方面，对应于每一个  $\sigma$  的值，都有  $D_{KL}(T \parallel A) < D_{KL}(T \parallel G)$ ，即使在  $\sigma$  为 4 dB 和 6 dB 时， $D_{KL}(T \parallel A)$  也很小。这说明理论推导的近似分布是很可靠的，尤其是在阴影标准差较低的场景，比高斯近似的准确程度高得多。

上述结果表明直接将对数域小区间干扰分布建模成高斯分布是不合理的，应该对不同的场景予以区别。

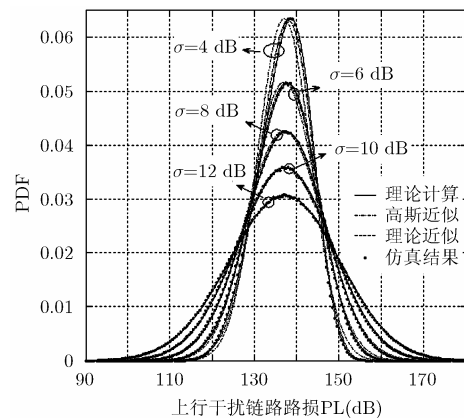


图 3 上行干扰链路的路损分布 ( $\sigma = 4, 6, 8, 10, 12$  (dB))

表 2 近似和理论分布的 KL 距离

$\sigma$	4 dB	6 dB	8 dB	10 dB	12 dB
$D_{KL}(T \parallel A)$	$5.73 \times 10^{-4}$	$1.12 \times 10^{-4}$	$1.94 \times 10^{-5}$	$5.02 \times 10^{-6}$	$2.15 \times 10^{-6}$
$D_{KL}(T \parallel G)$	$4.50 \times 10^{-3}$	$1.10 \times 10^{-3}$	$3.18 \times 10^{-4}$	$1.09 \times 10^{-4}$	$4.35 \times 10^{-5}$

## 5 结论

本文对源于单个干扰小区的上行小区内干扰链路路损进行统计建模, 分别分析了大尺度传播损耗和阴影衰落两个组成部分的统计模型, 并利用分析的结果推导出干扰路损的矩生成函数和累积量生成函数, 得出干扰路损的近似分布函数的闭合表达式。分析发现, 阴影衰落的方差对干扰路损的分布影响很大: 随着阴影的方差逐渐增大, 干扰链路路损分布终将趋于高斯分布; 但在阴影方差较小的时候, 路损的分布则明显不是高斯分布。本文中通过推导得出的理论近似分布函数可以很好地描述不同场景下的路损分布, 且通过对比仿真结果和数值结果显示: 即使是对于阴影衰落方差较小的场景, 文中推导出的近似分布与理论分布之间的吻合程度也很高, 比简单的假设为高斯分布要准确和合理得多。

## 参考文献

- [1] Rangan S and Madan R. Belief propagation methods for intercell interference coordination in femtocell networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(3): 631-640.
  - [2] Pischella P and Belfiore J C. Power control in distributed cooperative OFDMA cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(5): 1900-1906.
  - [3] Huang Ming and Xu Wen. Macro-femto inter-cell interference mitigation for 3GPP LTE-A downlink[C]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops, Munchen, 2012: 75-80.
  - [4] Lopez-Perez D, Ladanyi A, Juttner A, et al. Optimization method for the joint allocation of modulation schemes, coding rates, resource blocks and power in self-organizing LTE networks[C]. Proceedings of IEEE INFOCOM, London, 2011: 111-115.
  - [5] Graziosi F and Santucci F. Analysis of second order statistics of the SIR in cellular mobile networks[C]. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Amsterdam, 1999, 3: 1316-1320.
  - [6] Moiseev S N, Filin S A, Kondakov M S, et al. Analysis of the statistical properties of the SINR in the IEEE 802.16 OFDMA network[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Istanbul, 2006, 12: 5595-5599.
  - [7] Sung K W, Haas H, and McLaughlin S. A semi-analytical PDF of downlink SINR for femtocell networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking-Special Issue on Femtocell Networks*, Article ID 256370, 2010: 1-9.
  - [8] Novlan T D, Ganti R K, Ghosh A, et al. Analytical evaluation of fractional frequency reuse for OFDMA cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(12): 4294-4305.
  - [9] Viering I, Klein A, Ivrlac M, et al. On uplink intercell interference in a cellular system[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Istanbul, 2006, 5: 2095-2100.
  - [10] Musesir A, Bode M, Sung K W, et al. Analysis SIR for self-organizing wireless networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Article ID 912018, 2009: 1-8.
  - [11] Bharucha Z and Haas H. The distribution of path loss for uniformly distributed nodes in a circle[J]. *Research Letters in Communications*, Article ID 376895, 2008: 1-4.
  - [12] Broyde Y and Messer H. A cellular sector-to-users path loss distribution model[C]. Proceedings of IEEE/SP 15th Workshop on Statistical Signal Processing, Wales, 2009: 321-324.
  - [13] Baltzis K B. Analytical and closed-form expressions for the distribution of path loss in hexagonal cellular networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2011, 60(4): 599-610.
  - [14] Abdulla M and Shayan Y R. Closed-form path loss predictor for gaussianly distributed nodes[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Cape Town, 2010: 1-6.
  - [15] Baltzis K B. Closed-form description of microwave signal attenuation in cellular systems[J]. *Radio Engineering*, 2010, 19(1): 11-16.
  - [16] Zhang Q T and Song S H. A systematic procedure for accurately approximating lognormal-sum distributions[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(1): 663-666.
  - [17] Beaulieu N C and Rajwani F. Highly accurate simple closed-form approximations to lognormal sum distributions and densities[J]. *IEEE Communications Letters*, 2004, 8(12): 709-711.
  - [18] Beaulieu N C and Xie Q. An optimal lognormal approximation to lognormal sum distributions[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, 53(2): 479-489.
  - [19] Zhuang Y and Pan J. A geometrical probability approach to location-critical network performance metrics[C]. Proceedings of IEEE INFOCOM, Orlando, 2012: 1817-1825.
  - [20] Zhuang Y, Luo Y, Cai L, et al. A geometric probability model for capacity analysis and interference estimation in wireless mobile cellular systems[C]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, Houston, 2011: 1-6.
  - [21] Salbaroli E and Zanella A. Interference analysis in a poisson field of nodes of finite area[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(4): 1776-1783.
  - [22] Papoulis A. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes (3rd Edition)[M]. New York: McGraw Hill Incorporation, 1991: 86-148.
  - [23] Brillinger D R. The identification of a particular nonlinear time series system[J]. *Biometrika*, 1977, 64(3): 509-515.
  - [24] Dufresne P C and Goldstein R S. Pricing swaptions within an affine framework[J]. *Journal of Derivatives*, 2002, 10(1): 1-18.
  - [25] Kullback S and Leibler R A. On information and sufficiency [J]. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1951, 22(1): 79-86.
- 朱元萍: 女, 1987年生, 博士生, 研究方向为移动通信中的同频组网、干扰建模与管理技术、中继技术。
- 徐景: 男, 1975年生, 副研究员, 研究方向为无线通信网络物理层传输、跨层优化、中继技术、B3G/4G通信系统网络架构设计及资源管理、系统性能分析和相关技术的标准化。
- 杨旸: 男, 1974年生, 研究员, 研究方向为3G/4G移动通信网络、无线传感器和MESH网络、动态无线资源分配算法、媒质接入控制(MAC)协议、无线多媒体业务流特征分析、跨层性能分析和优化、移动自组织网络。