

基于协作认知网络的虚拟 MIMO 信号及干扰分布特性研究

鲍煦¹, 宋铁成², 沈连丰²

(1. 江苏大学 计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 提出了一种在无线认知网络中主从用户协作的虚拟 MIMO 传输方案, 给出了虚拟 MIMO 信号和系统干扰的互补累积分布函数的紧致上下界及其渐进分布, 理论推导和数值仿真证明了上下界具有相同的渐进分布特性。仿真结果显示虚拟 MIMO 技术增强了主用户的抗干扰性能。

关键词: 虚拟 MIMO; 互补累积分布函数; 渐进分布; 泊松点过程

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)05-0085-06

Properties of virtual MIMO signal and interference in cooperation cognitive networks

BAO Xu¹, SONG Tie-cheng², SHEN Lian-feng²

(1. School of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A virtual MIMO scheme based on cooperation of the primary and secondary users was proposed in the wireless cognitive networks. The tight upper and lower bounds about the complementary cumulative distribution function of the virtual MIMO signal and interference were derived. The asymptotic distributions of the bounds were also obtained. The theoretical derivations and numerical simulations testified that the upper and lower bounds had the same asymptotic distribution. The numerical simulation results reveal that the virtual MIMO technique improves the anti-interference ability of the primary signal.

Key words: virtual MIMO; complimentary cumulative distribution function; asymptotic distribution; Poisson point process

1 引言

虚拟 MIMO 技术继承了 MIMO 技术的优点并且更适合在分布式无线网络中应用(每个节点只配有单天线), 因此近来越来越受到研究者的关注^[1-3]。为了度量虚拟 MIMO 技术给网络传输容量带来的提升, 文献[4]引入了节点传输成功概率的概念。此成功概率的计算需要通过推导信号和干扰的互补累积分布函数(CCDF, complimentary cumulative distribu-

tion function)来实现^[5]。然而, 由于无线网络中节点空间位置的随机性使得信号和干扰的 CCDF 分布很难求得。文献[6]推导了干扰的 CCDF 上下界, 但其上界并不紧致, 与仿真的实际结果有较大的差异。此外, 关于虚拟 MIMO 信号的分布特性在最近的文献中都没有提及。本文提出一种应用于认知网络的虚拟 MIMO 传输方案, 推导虚拟 MIMO 信号和干扰的 CCDF 分布函数的上下界及其渐进特性。

收稿日期: 2010-11-17; 修回日期: 2011-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972026); 江苏大学高级人才基金资助项目(11JDG130)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60972026); Programs of Senior Talent Foundation of Jiangsu University(11JDG130)

2 系统模型及传输方案

2.1 系统模型

系统模型如图 1 所示，主从用户共同存在同一区域，从用户与主用户共用频谱资源。主从用户节点构成分布式 ad hoc 网络，其发送端节点在空间中的坐标位置建模为均匀泊松点过程 (HPPP, homogeneous poisson point process) $F = \{x_1, x_2, \dots\} \subset R^2$ 。从用户发送端与接收端的距离假设是固定的，并且接收端的空间坐标并不在泊松点过程 F 内。将主用户发送端的位置设置为坐标原点，主用户接收端位于坐标 $z = (0, z)$ 。在该系统中，主用户已知从用户节点的存在并能相互协作。从用户发送端以概率 p 发送数据，概率 $\bar{p} = 1 - p$ 侦听主用户的活动。该系统中所有的节点假设同步，从用户之间的同步可以通过侦听主用户收发双方传输数据的同步前缀来实现。假设主用户发射功率为 P_p ，从用户发射功率为 P_s 。信道衰落假设在空间和时间上相互独立，并且具有单位方差。任意节点位置 x 和 y 之间的信道衰落功率函数定义为 h_{xy} ，大尺度路径损耗函数定义为 $l(x-y) = \|x-y\|^{-a}$ ，其中， a 是路径损耗因子，满足 $a > 2$ 。因此主用户接收端所受到的系统干扰为

$$I_{F_p \setminus \{o\}}(z) = \sum_{x \in F_p \setminus \{o\}} P_s h_{xz} l(x-z) \quad (1)$$

其中， F_p 表示主从用户发送节点的集合（以概率 p 发送数据）， $F_{\bar{p}}$ 表示静默从用户集合（即以概率 $\bar{p} = 1 - p$ 静默）。由于主用户发送端在集合 F_p 内且

位于原点 o ，因此主用户接收端的干扰来自集合 $F_p \setminus \{o\}$ 内。当从用户空间密度较大时，用户之间的干扰远远大于背景噪声，所以本文不考虑噪声对系统的影响。

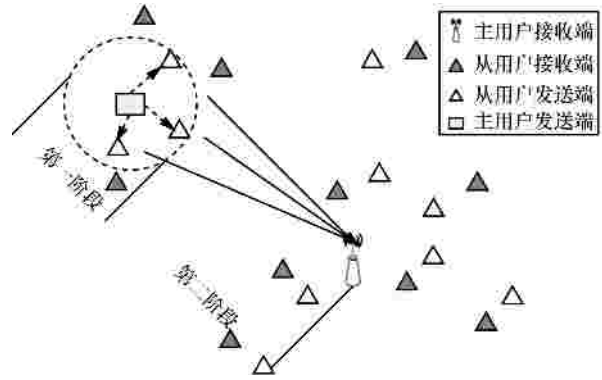


图 1 系统模型

2.2 传输方案

主用户与从用户工作在同一频段，为了提高主用户传输数据的抗干扰能力，主用户为邻近的静默从用户分配若干时隙以便静默从用户为其转发数据。具体方案如图 2 所示。

1) 主用户首先向周围的从用户发送“询问”数据分组。该数据分组类似于训练序列，一方面可供静默从用户测试信道信干比 (SIR, signal interference ratio)，另一方面“询问”数据分组也包含主用户的身份号，以区分不同的主用户。

2) 邻近的静默从用户接收到“询问”数据分组后，立即测量 SIR 值，若其 SIR 满足式(2)，则向主用户发送“应答”数据分组通知主用户其符合协作

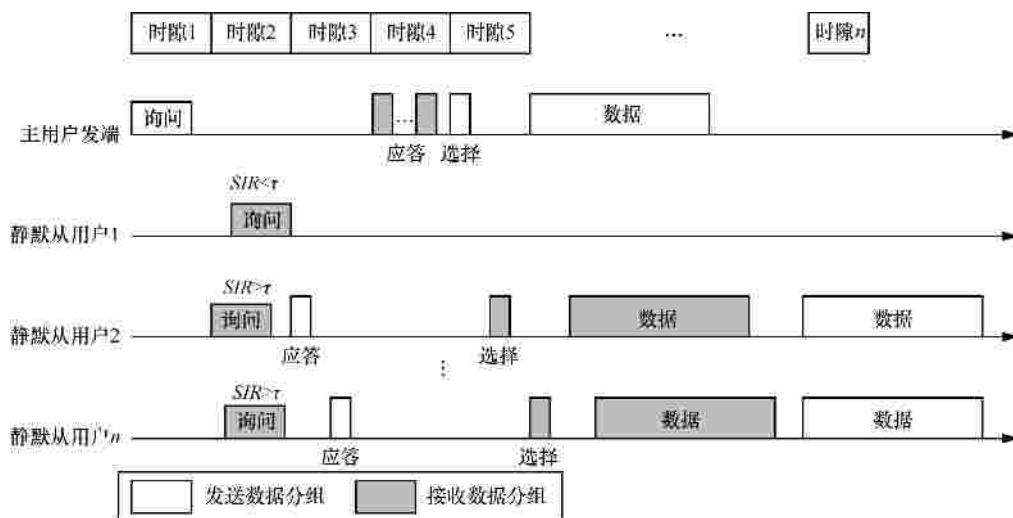


图 2 虚拟 MIMO 传输方案举例

条件，主用户则发送“选择”数据分组通知被选从用户准备组成虚拟 MIMO 阵列为其转发数据。

$$SIR_{(o,x)} = \frac{P_s h_{ox} l(x)}{I_{F_p \setminus \{o\}}} > t \quad (2)$$

其中， t 是 SIR 阈值， $I_{F_p \setminus \{o\}}$ 表示静默从用户在位置 x 处所受到的干扰：

$$I_{F_p \setminus \{o\}} = \sum_{y \in F_p \setminus \{o\}} P_s h_{yx} l(y-x) \quad (3)$$

3) 当主用户完成数据传输后，虚拟 MIMO 阵列中的从用户利用主用户为其分配的时隙同时译码转发 (decode and forward) 至主用户接收端，完成协作传输。

基于以上传输方案，在主用户接收端的信号可以表示为

$$S = \sum_{x \in F_p \cap F_t} P_s h_{xz} l(x-z) + P_p h_{oz} l(z) \quad (4)$$

其中，

$$F_t := \arg\{SIR_{(o,x)} > t\} \quad (5)$$

通常 ad hoc 网络干扰信号是空间相关的，因此式(4)中虚拟 MIMO 信号同样空间相关，所以 F_t 不是泊松点过程。然而当信道路径衰落模型为 $l(x) = \|x\|^{-\alpha}$ 时空间相关性趋于 0^[5]，因此本文中随机点过程 F_t 可以视作泊松点过程。

3 虚拟 MIMO 信号和干扰的 CCDF 上下界及其渐进分布

本节分析协作认知网络中虚拟 MIMO 信号和系统干扰的 CCDF 上下界，并给出渐进分布。分析的结果具有普适性，并不拘泥于第 2 节提出的虚拟 MIMO 传输方案。

定义 $E^{lo}(\cdot)$ 为去心 Palm 测度 (reduced palm measure) 的数学期望^[7]，它是点过程的条件期望函数 (即给定点过程中某个点在坐标原点，但不包括该点的期望)。用点来表示条件生成函数 G 作用的变量，例如 $G(u(\cdot - y)) = E^{lo} \left[\prod_{x \in f} u(x - y) \right]$ 。下文的分析将用到随机几何知识，特别是泊松点过程的概率生成函数 (PGFL, probability generating functional) 和 Palm 分布以及 Campbell-Mecke 定理^[7]。

定理 1 当从用户发送节点为空间密度是 l 的均匀泊松点过程时，假设节点发送数据概率为 p ，

条件生成函数为 G ，虚拟 MIMO 信号的互补累积分布函数： $\bar{F}_s(y) = \Pr(S > y)$ 的下界是 $\bar{F}_s^l(y)$ ，上界是 $\bar{F}_s^u(y)$ 。

$$\bar{F}_s^l(y) = \max \left\{ 1 - G \left(F_h \left(\frac{y}{P_l(\cdot - z)} \right) \right), 1 - F_h \left(\frac{y}{P_p l(z)} \right) \right\} \quad (6)$$

$$\bar{F}_s^u(y) = 1 - (1 - j(y)) F_h \left(\frac{y}{P_p l(z)} \right) G \left(F_h \left(\frac{y}{P_l(\cdot - z)} \right) \right) \quad (7)$$

其中， $F_h(\cdot)$ 为信道功率衰落的累积分布函数 (CDF, cumulative density function)

$$j(y) = \exp \left\{ \left[t(y - P_p l(z)) + l(1-p) \int_{R^2} (1-u(x)) p_t dx \right] \right\}, \quad t > 0 \quad (8)$$

$$v(x) = \exp \left(t P_l(x-z) \int_0^{y/P_l(x-z)} n dF_h(n) \right) \quad (9)$$

$$p_t = \Pr(SIR_{(o,x)} > t) \quad (10)$$

证明 由于 F_t 和 F_p 都是泊松点过程，根据泊松点过程的定义^[7]，集合 $F_p \cap F_t$ 仍然是泊松点过程，将其分为 2 个子集：

$$f_n = \{x \in F_p \cap F_t, P_s h_{xz} l(x-z) > y\} \quad (11)$$

$$f_n^c = \{x \in F_p \cap F_t, P_s h_{xz} l(x-z) < y\} \quad (12)$$

所以虚拟 MIMO 信号的 CCDF 函数为

$$\begin{aligned} \bar{F}_s(y) &= \Pr(S = S_{f_n} + S_{f_n^c} + P_d > y) = \bar{F}_s^l(y) \\ &= \max \left\{ \Pr(S_{f_n} > y), \Pr(P_d > y) \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

其中， P_d 为在主用户接收端的直接传输功率： $P_d = P_p h_{oz} l(z)$ 。

$$\Pr(S_{f_n} > y) = 1 - \Pr(S_{f_n} < y) = 1 - \Pr(f_n = \emptyset) \quad (14)$$

集合 f_n 为空集的概率可以用去心条件期望函数 (reduced conditional expectation function) 得到：

$$\begin{aligned} \Pr(f_n = \emptyset) &= E^{lo} \prod_{x \in F_p \cap F_t} \mathbf{1}(P_s h_{xz} l(x-z) < y) \\ &= E^{lo} \prod_{x \in F_p \cap F_t} F_h \left(\frac{y}{P_l(x-z)} \right) \\ &= G \left(F_h \left(\frac{y}{P_l(\cdot - z)} \right) \right) \\ &= \exp \left\{ - \int_{R^2} \left(1 - F_h \left(\frac{y}{P_l(x-z)} \right) \right) \Lambda(dx) \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

上式中最后一行根据泊松点过程的概率生成函数定义可得。

$\Lambda(\cdot)$ 定义为 $F_{\bar{p}} \cap F_t$ 集合中的二维随机测度, 这是非均匀泊松点过程。因为在集合 F_t 中不同的节点具有不同的阈值概率 $\Pr(SIR_{(o,x)} \leq t)$, 即非均匀分布。因此, 随机测度 $\Lambda(\cdot)$ 可以表示为

$$\Lambda(dx) = \Pr(SIR_{(o,x)} \leq t) l(1-p) dx \quad (16)$$

若考虑瑞利衰落, 则根据条件拉普拉斯函数 $L^o(\cdot)$ 可得阈值概率:

$$\begin{aligned} \Pr(SIR_{(o,x)} \leq t) &= P^{l_0} (h_{o,x} \leq t I_{F_p \setminus \{o\}} / (P_s l(x))) \\ &= E^{l_0} \left[\exp(-t I_{F_p \setminus \{o\}} / (P_s l(x))) \right] \\ &= L_{I_{F_p \setminus \{o\}}}^{l_0} (t / (P_s l(x))) \\ &= \exp \left(-2pl \int_0^\infty \frac{u}{1 + P_s l(x) / (t l(u))} du \right) \end{aligned} \quad (17)$$

当大尺度路径损耗函数定义为 $l(x-y) = \|x-y\|^{-a}$ 时, 阈值概率可求得:

$$\Pr(SIR_{(o,x)} \leq t) = \exp(-l p \|x\|^2 (t P_s / P_p)^{2/a} K(a))$$

其中,

$$K(a) = \frac{2\pi G(2/a)G(1-2/a)}{a} = \frac{2\pi^2}{a \sin(2\pi/a)} \quad (18)$$

定义 $\bar{F}_s^{l_1}(y)$ 为 $\Pr(S_{f_n} > y)$, $\bar{F}_s^{l_2}(y)$ 为 $\Pr(P_d > y)$,

虚拟 MIMO 信号的 CCDF 表达式为

$$\begin{aligned} \bar{F}_s(y) &= \Pr(S > y) \\ &= \Pr(S = S_{f_n} + S_{f_n^c} + P_d > y) \\ &= \Pr[S > y | S_{f_n} > y] \bar{F}_s^{l_1}(y) \\ &\quad + \Pr[S > y | S_{f_n} \leq y, P_d > y] \Pr(P_d > y) (1 - \bar{F}_s^{l_1}(y)) \\ &\quad + \Pr[S > y | S_{f_n} \leq y, P_d < y] \Pr(P_d < y) (1 - \bar{F}_s^{l_1}(y)) \end{aligned} \quad (19)$$

利用 Chernoff 界, 可得

$$\begin{aligned} \Pr[S > y | S_{f_n} \leq y, P_d < y] \\ &= \Pr[S > y | f_n = \emptyset] e^{-\gamma} E^{l_0} (e^{tS} | f_n = \emptyset) \end{aligned} \quad (20)$$

其中,

$$\begin{aligned} E^o (e^{tS} | f_n = \emptyset) \\ &= E^o \left(\exp \left\{ t \left[\sum_{x \in F_{\bar{p}} \cap F_t} P_h l(x-z) l(P_h l(x-z) - y) + P_p h_l(z) \right] \right\} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= E^{l_0} \left(\prod_{x \in F_{\bar{p}} \cap F_t} \exp \left(t P_s l(x-z) \int_{u(x)}^{y/P_s l(x-z)} n dF_h(n) \right) \right) e^{tE(h)P_p l(z)} \\ &= \exp \left\{ \int_{R^2} (1-u(x)) \Lambda(dx) \right\} e^{tE(h)P_p l(z)} \\ &= \exp \left\{ l(1-p) \int_{R^2} (1-u(x)) p_t dx \right\} e^{tE(h)P_p l(z)} \end{aligned} \quad (21)$$

因此, 式(20)可以写为

$$\begin{aligned} \Pr[S > y | S_{f_n} \leq y, P_d < y] \\ &= \exp \left\{ \left[t(y - P_p l(z)) + l(1-p) \int_{R^2} (1-u(x)) p_t dx \right] \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

其中, $t > 0$, $p_t = \Pr(SIR_{(o,x)} \leq t)$ 。通过寻找最优 t 使式(22)取值最小从而得到最佳上界, 本文利用数值仿真的方法找到 t 的最佳值。

根据式(19)和式(22), 上界 $\bar{F}_s^u(y)$ 为

$$\begin{aligned} \bar{F}_s^u(y) &= \bar{F}_s^{l_1}(y) + (1 - \bar{F}_s^{l_1}(y)) \left(1 - (1-j(y)) F_h \left(\frac{y}{P_p l(z)} \right) \right) \\ &= 1 - G \left(F_h \left(\frac{y}{P_s l(-z)} \right) \right) + G \left(F_h \left(\frac{y}{P_s l(-z)} \right) \right) \\ &\quad \left(1 - F_h \left(\frac{y}{P_p l(z)} \right) + j(y) F_h \left(\frac{y}{P_s l(z)} \right) \right) \\ &= 1 - (1-j(y)) F_h \left(\frac{y}{P_p l(z)} \right) G \left(F_h \left(\frac{y}{P_s l(-z)} \right) \right) \end{aligned} \quad (23)$$

其中,

$$j(y) = \exp \left\{ \left[t(y - P_p l(z)) + l(1-p) \int_{R^2} (1-u(x)) p_t dx \right] \right\}$$

定理 1 证毕。

推论 1 假设信道为单位方差的瑞利衰落且 $l(x) = \|x\|^{-a}$, 虚拟 MIMO 信号的 CCDF 上下界的渐进分布 (当 $y \rightarrow \infty$ 时) 相同。

$$\bar{F}_s^{l_1}(y) \sim \bar{F}_s^u(y) \sim 2pl(1-p)(P_s)^{2/a} \frac{G(2/a)}{a} y^{-2/a} \quad (24)$$

证明 显然, 在瑞利衰落信道下式(13)中 $\bar{F}_s^{l_2}(y)$ 趋于 0 的速率远远大于 $\bar{F}_s^{l_1}(y)$ 。因此, $\bar{F}_s^{l_1}(y)$ 与 $\bar{F}_s^u(y)$ 具有相同的渐进分布 ($y \rightarrow \infty$), 分布特性如下:

$$\begin{aligned} \bar{F}_s^{l_1}(y) \sim \bar{F}_s^u(y) &= 1 - \exp \left(- \int_{R^2} (1-v(x)) \Lambda(dx) \right) \\ &\stackrel{(a)}{\sim} \int_{R^2} \left(1 - F_h \left(\frac{y}{P_s l(x-z)} \right) \right) \Lambda(dx) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= l(1-p) \int_{R^2} \left(1 - F_h \left(\frac{y}{P_s l(x-z)} \right) \right) \Pr(SIR_{(o,x)}(t)) dx \\
 &= l(1-p) \int_{R^2} \exp \left(-\frac{y}{P_s l(x-z)} \right) \exp \left(-l p \|x\|^2 \left(t P_s / P_p \right)^{2/a} K(a) \right) dx \\
 &= l(1-p) \int_{R^2} \exp \left(-\frac{y}{P_s l(x-z)} - l p \|x\|^2 \left(t P_s / P_p \right)^{2/a} K(a) \right) dx \\
 &\sim l(1-p) \int_{R^2} \exp \left(-\frac{y}{P_s l(x-z)} \right) dx \\
 &= l(1-p) \int_{R^2} \exp \left(-\left\| \left(P_s^{-1} y \right)^{1/a} x \right\|^a \right) dx \\
 &= l(1-p) \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \exp \left(-\left(\left(P_s^{-1} y \right)^{1/a} r \right)^a \right) r dr dq \\
 &= l(1-p) \left(P_s^{-1} y \right)^{-2/a} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \exp(-r^a) r dr dq \\
 &\stackrel{(b)}{=} 2\pi l(1-p) \left(P_s \right)^{2/a} \frac{G(2/a)}{a} y^{-2/a} \tag{25}
 \end{aligned}$$

(a) 根据 $1 - e^{-x} \sim x, x \rightarrow 0$ 。(b) 基于 $\int_0^\infty x^m e^{-bx^n} dx = \frac{G(g)}{nb^g}, g = \frac{m+1}{n}, m, b, n > 0$ [8]。

$j(y)$ 的渐进分布为 $j(y) \sim e^{-y}$ 因为当 $y \rightarrow \infty$ 时, $u(x)$ 中的积分项 $\int_0^{y/P_s l(x-z)} n dF_h(n)$ 趋于常数且 $l(1-p) \int_{R^2} (1-u(x)) p_t dx < \infty$ 。得到 CCDF 上界 $F_S^u(y)$ 的渐进分布:

$$\begin{aligned}
 \bar{F}_S^u(y) &= \left[1 - (1-j(y)) F_h \left(\frac{y}{P_s l(\cdot-z)} \right) \right] + \\
 &\quad (1-j(y)) F_h \left(\frac{y}{P_s l(\cdot-z)} \right) \bar{F}_S^{l_1}(y) \\
 &\sim 1 - (1 - e^{-y})(1 - e^{-y}) + (1 - e^{-y})(1 - e^{-y}) \bar{F}_S^{l_1}(y) \\
 &\sim e^{-y} + (1 - e^{-y}) \bar{F}_S^{l_1}(y) \\
 &\stackrel{(c)}{\sim} 2\pi l(1-p) \left(P_s \right)^{2/a} \frac{G(2/a)}{a} y^{-2/a} \tag{26}
 \end{aligned}$$

(c) 成立因为 e^{-y} 渐进趋于 0 的速率远远大于 $y^{-2/a}$ 。式(25)和式(26)表明虚拟 MIMO 信号的 CCDF 上下界具有相同的渐进分布 因此推论 1 渐进紧致。推论 1 证毕。

图 3 显示了在从用户密度 $l(\text{lamda}) = 0.5, 0.1$ 时的虚拟 MIMO 信号 Monte Carlo 仿真及上下界, 其中, $P_p = 2, P_s = 1$ 。可以看到当阈值 y 增大时, 上下

界是紧致的, 且定理 1 中的上界优于 Markov 上界 [6]。事实上, 在瑞利衰落信道且 $l(x) = \|x\|^{-a}$ 条件下, 参与协同的从用户数可以表示为

$$\begin{aligned}
 N_c &= \int_{R^2} \Lambda(dx) \\
 &= l(1-p) \int_{R^2} \exp \left(-l p \|x\|^2 \left(t P_s / P_p \right)^{2/a} K(a) \right) dx \\
 &= l(1-p) \int_{R^2} \exp \left(-\left\| \left(l p \left(t P_s / P_p \right)^{2/a} K(a) \right)^{1/2} x \right\|^2 \right) dx \\
 &= l(1-p) \left(l p \left(t P_s / P_p \right)^{2/a} K(a) \right)^{-1/2} \int_{R^2} \exp(-\|x\|^2) dx \\
 &= \pi \sqrt{l} (1-p) (p K(a))^{-1/2} \left(P_p / t P_s \right)^{1/a} \tag{27}
 \end{aligned}$$

由于参与协同的从用户节点数随着空间密度增大而增多, 虚拟 MIMO 信号的 CCDF 分布具有较大的拖尾, 即从用户干扰增大时主用户信号衰减较慢, 有利于信号的传输。

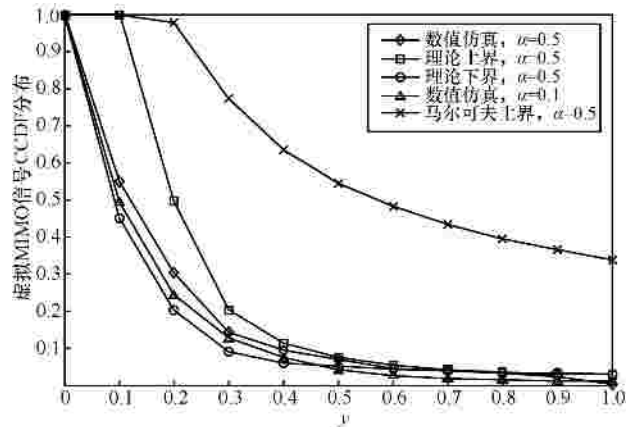


图 3 虚拟 MIMO 信号的仿真及上下界比较

定理 2 当从用户发送节点为空间密度是 l 的均匀泊松点过程时, 假设节点发送数据概率为 p , 条件生成函数为 G , 系统干扰的互补累积分布函数: $\bar{F}_I(y) = P_r(I > y)$ 的下界是 $\bar{F}_I^l(y)$, 上界是 $\bar{F}_I^u(y)$ 。

$$\bar{F}_I^l(y) = 1 - \mathcal{G} \left(F_h \left(\frac{y}{P_s l(\cdot-z)} \right) \right) \tag{28}$$

$$\bar{F}_I^u(y) = 1 - (1-j^{\%}(y)) \mathcal{G} \left(F_h \left(\frac{y}{P_s l(\cdot-z)} \right) \right) \tag{29}$$

其中, $\mathcal{G}(\cdot)$ 是 F_p 的 PGFL 函数,

$$\begin{aligned}
 j^{\%}(y) &= \exp \left\{ -ty - l p \int_{R^2} (1 - \mathcal{I}(x)) dx \right\}, \\
 \mathcal{I}(x) &= \exp \left(t P_s l(x-z) \int_0^{y/P_s l(x-z)} n dF_h(n) \right),
 \end{aligned}$$

推论 2 假设信道为单位方差的瑞利衰落且 $I(x) = \|x\|^{-a}$, 主用户受到的干扰 CCDF 上下界的渐进分布 (当 $y \rightarrow \infty$ 时) 相同。

$$\bar{F}_I^l(y) \sim \bar{F}_I^u(y) \sim 2\pi l p(P_s)^{2/a} \frac{G(2/a)}{a} y^{-2/a} \quad (30)$$

证明方法与推论 1 相同。

从推论 1, 2 可以看出当 $p=0.5$ 时虚拟 MIMO 信号与干扰具有相同的渐进分布, 即采用虚拟 MIMO 技术可以大大提高信号的抗干扰能力。

4 结束语

本文提出了在认知网络中主从用户利用虚拟 MIMO 技术的协作方案, 推导了虚拟 MIMO 信号及主用户所受干扰的 CCDF 上下界及其渐进分布表达式, 证明了其上下界具有相同的渐进分布。这些结论能够用于估计网络中主从用户最大的传输容量。

参考文献:

[1] LANEMAN J, TSE D, WORNELL G. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.

[2] SADEK A, SU W, LIU K. Multinode cooperative communications in wireless networks[J]. IEEE Trans Signal Process, 2007, 55(1): 341-355.

[3] QU Q, MILSTEIN L, VAMAN D. Cooperative and constrained MIMO communications in wireless ad hoc/sensor networks[J]. IEEE Trans Wirel Commun, 2010, 9(10): 3120-3129.

[4] WEBER S, YANG X, ANDREWS J. Transmission capacity of wireless ad hoc networks with outage constraints[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2005, 51(12):4091-4102.

[5] HAENGGI M, GANTI R. Interference in large wireless networks[J].

Foundations and Trends in Networking, 2008, 3(2): 127-248.

[6] GANTI R, HAENGGI M. Interference and outage in clustered wireless ad hoc networks[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2009, 55(9): 4067-4086.

[7] STOYAN D, KENDALL W, MECKE J. Stochastic Geometry and Its Applications[M]. New York: Wiley, 1995.

[8] GRADSHTEYN I, RYZHIK I. Table of Integrals, Series and Products[M]. London, UK: Elsevier Academic Press, 2007.

作者简介:



鲍煦 (1982-), 男, 江苏靖江人, 博士, 江苏大学讲师, 主要研究方向为认知无线网络容量分析、接入和资源分配协议设计等。



宋铁成 (1967-), 男, 江苏张家港人, 东南大学移动通信国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信、无线传感器网络、协同通信及认知无线电技术。



沈连丰 (1952-), 男, 江苏徐州人, 东南大学移动通信国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线接入技术、智能家居网络、无线传感器网络及认知无线电技术。