

放大转发双向中继网络的移动级联信道统计特征分析*

刘海滨, 向良军, 袁继兵, 郑林华

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对放大转发协议下双向中继网络移动级联信道,为了分析其统计特征,结合用户完成信息交互的过程,将移动级联信道分解为传输部分和干扰部分两个时间过程。依据它们的双高斯乘积特点,分别给出了对应的一阶概率密度分布、二阶自相关函数和多普勒功率谱的表达式。与此同时,通过采用 Gamma 分布对级联信道进行了概率近似,得到了描述移动级联信道时变特性的电平通过率和平均衰落时间等指标的近似计算式。借助数值仿真验证了上述表达式的正确性。

关键词:双向中继网络;移动级联信道估计;Gamma 分布;自相关函数;电平通过率;

中图分类号:TN911 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)04-0066-05

Statistical properties of mobile cascade channel in amplify-and-forward two-way relay networks

LIU Haibin, XIANG Liangjun, YUAN Jibing, ZHENG Linhua

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:The statistical properties of mobile cascade channel in amplify-and-forward (AF) two-way relay networks (TWRN) is focused on. Based on the statistical properties of double Gaussian, the mobile cascade channel is divided into transmission and interference processes. In addition, the probability distribution functions (PDF), temporal auto-correlation functions (ACF) and Doppler spectrums of the two processes are derived, respectively. Furthermore, by approximating the PDFs of the cascade channel by the concise Gamma distributions, closed-form and approximated expressions of two critical temporal merits, level-crossing rate (LCR) and average duration of fades (ADF), are provided. Numerical simulation demonstrates the validity of the proposed expressions.

Key words: two-way relay networks; mobile cascade channel; gamma distribution; auto-correlation function; level-crossing rate

近些年来,基于放大转发(AF)协议的双向中继网络(TWRN)^[1]在保持其处理方式简单、硬件复杂度低等优势基础上,将所占用时隙数目降低了一半,克服了网络时隙利用率低的缺陷,由于这些特点,作为一项新兴的研究领域,TWRN成为众多科研人员的关注热点,得到了迅速发展。

目前,作为实现基础的信道估计技术进展缓慢,仍然沿袭传统的 Rayleigh 信道方式,如文献[2],参考发送内容确定的训练序列,采用最小二乘(LS)方法和线性最小均方误差(LMMSE)方法计算当前的信道状态信息(CSI)。立足于从发送端经过中继到达接收端的级联信道符合双高斯乘积分布的特点^[3],一些学者由此出发,探索更为适用的估计方法,如文献[4-5]根据网络级联信道变量前二阶矩同 Rayleigh 子信道方差的关系,给出了最大似然(ML)估计方法,随后证明了其

有效性。文献[6]在多天线(MIMO)环境下,推导了一种基于期望-最大化(EM)的级联信道最大后验(MAP)方法。尽管估计精度有所提高,但是需要反复运算并修正关于信道变量的先验分布模型。另外,仅仅通过均值、方差、概率分布(PDF)等描述信道随机变化特征并不全面,同时也需要自相关函数(ACF)、电平通过率(LCR)和平均衰落持续时间(ADF)等来刻画移动通信环境下级联信道随时间起伏的快慢程度,如文献[7]的作者在移动通信用户被大量散射体包围的前提下首先提出了散射双环模型,随即给出了级联信道的时域 ACF 表达式。Batool Talha 在研究^[8-10]中将散射双环模型进行了扩展,分别给出了收发用户至中继为视距(LOS)传输或非视距(NLOS)传输条件下,移动级联信道的 LCR 及 ADF 的解析表达式。

* 收稿日期:013-11-19

作者简介:刘海滨(1983—),男,吉林吉林人,博士研究生,E-mail:china132011@163.com;

郑林华(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:lhzheng@nudt.edu.cn

为了加深理解 TWRN 移动级联信道时域变化特性,本文着眼于多个单天线中继的 TWRN 移动级联信道。通过描述该网络信息交互的流程,将用户至中继群之间的多个 Rayleigh 信道过程从整体功能上等效为传输部分及干扰部分。尽管能够得到这两类过程的概率分布函数,但是包含其中的贝塞尔函数为后续推导造成了极大的不便。为此,受文献[11]启发,采用同样具备单峰、长拖尾特征,但是形式简洁的 Gamma 分布对原分布作近似化处理。同时,在得到两类级联信道分量的 ACF 和相应的多普勒功率谱之后,推导了 LCR 和 ADF 的近似表达式。通过数值仿真部分,说明了上述各表达式的正确性,而相关研究成果也增进了对于 TWRN 移动级联信道变化方式及特点的认识。

1 系统模型

假设移动通信用户 A 和 B 之间阻隔严重,难以满足 LOS 传播的条件,需要依靠其他用户作为中继进行连接,并由此构成了 TWRN。一次完整的信息交互在时间上可以分为两个阶段进行:在第一个时隙,用户 A 和 B 同时分别向多个中继发送信号 s_1 和 s_2 ;中继将接收信号进行线性放大操作之后,在第二个时隙内转发。整个过程如图 1 所示。

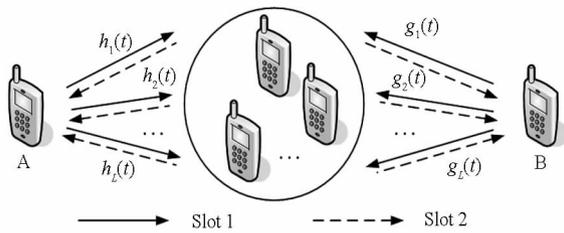


图 1 双向中继移动级联信道模型

Fig. 1 Mobile cascade channel model of AF TWRN

假设在单个信号收发的过程中,分段 Rayleigh 信道保持不变,则用户 A、B 的接收信号可以各自表示为

$$\begin{cases} y_A = \alpha \mathbf{h}^T(t) \mathbf{h}(t) s_1 + \alpha \mathbf{h}^T(t) \mathbf{g}(t) s_2 \\ \quad + \alpha \mathbf{h}^T(t) \mathbf{n}_{1A}(t) + \mathbf{n}_{2A}(t) \\ y_B = \alpha \mathbf{g}^T(t) \mathbf{h}(t) s_1 + \alpha \mathbf{g}^T(t) \mathbf{g}(t) s_2 \\ \quad + \alpha \mathbf{g}^T(t) \mathbf{n}_{1B}(t) + \mathbf{n}_{2B}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中出现的向量 $\mathbf{h}(t) = (h_1(t), h_2(t), \dots, h_L(t))^T$ 和 $\mathbf{g}(t) = (g_1(t), g_2(t), \dots, g_L(t))^T$ 分别表示用户 A 和 B 到 $L(L=2, 3, \dots)$ 个中继处的多个 Rayleigh 信道,可以通过零均值、方差各自为 σ_h^2 和 σ_g^2 的复高斯过程描述。向量 $\mathbf{n}_{1A}(t)$ 、

$\mathbf{n}_{1B}(t)$ 和 $\mathbf{n}_{2A}(t)$ 、 $\mathbf{n}_{2B}(t)$ 则代表在两个时隙中混入的加性高斯白噪声,不失一般性,可令其方差均为 σ_n^2 。另外 α 为中继放大系数,在用户发射功率为 P_A 、 P_B 、中继放大功率为 P_R 的前提下,有 $\alpha = \sqrt{\frac{P_R}{\sigma_h^2 P_A + \sigma_g^2 P_B + \sigma_n^2}}$ 。

双向中继传输模式相比于一般的单向方式,尽管提高了时隙资源利用率,但是也增加了终端信号处理的复杂度。以用户 A 为例,由式(1)可见,接收信号中包含用户 B 发来的有用信息 s_2 、冗余信息 s_1 及高斯白噪声。故而在数据检测之前有必要进行无用信号的消除操作。因此,可将整个 TWRN 移动级联信道在功能上分为传输部分 $\mathbf{h}^T(t) \mathbf{g}(t)$ 和干扰部分 $\mathbf{h}^T(t) \mathbf{h}(t)$ 。直接对它们进行估计一方面免去了因子分解得到 $\mathbf{h}(t)$ 和 $\mathbf{g}(t)$ 的过程;另一方面也减少了计算量及量化误差的额外引入,提高了整体效率。为了简洁,分别采用符号 $a(t)$ 和 $b(t)$ 表示干扰部分和传输部分,即

$$\begin{cases} a(t) = \mathbf{h}^T(t) \mathbf{h}(t) = \sum_{i=1}^L h_i^2(t) \\ b(t) = \mathbf{h}^T(t) \mathbf{g}(t) = \sum_{i=1}^L h_i(t) g_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

2 概率分布

从式(2)看到, $a(t)$ 表示一个 L 长度的零均值、方差为 σ_h^2 的复高斯向量与自身的内积;而 $b(t)$ 等价于两个长度为 L 、零均值且方差为 σ_h^2 、 σ_g^2 的复高斯向量内积。根据文献[12],可知 $a(t)$ 和 $b(t)$ 在相位上同为均匀分布,幅度上则服从广义 K (Generalized-K) 分布,有

$$p_{|a|}(r) = \frac{4}{\Gamma(L/2)} \left(\frac{1}{2\sigma_h^2} \right)^{L/2+1} r^{L/2} K_{L/2-1} \left(\frac{r}{\sigma_h^2} \right) \quad (3)$$

$$p_{|b|}(r) = \frac{4}{\Gamma(L)} \left(\frac{1}{\sigma_h \sigma_g} \right)^{L+1} r^L K_{L-1} \left(\frac{2r}{\sigma_h \sigma_g} \right) \quad (4)$$

其中 $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数,而 $K_L(\cdot)$ 表示阶数为 L 的第二类修正贝塞尔函数^[13]。

根据文献[13]给出的积分关系式,可以分别得到 $a(t)$ 和 $b(t)$ 幅度的均值和均方值,有

$$\begin{cases} E(r_a) = \sigma_h^2 \frac{\Gamma(1/2)\Gamma(L/2+1/2)}{\Gamma(L/2)} \\ E(r_a^2) = 2L\sigma_h^4 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} E(r_b) = \sigma_h \sigma_g \frac{\Gamma(3/2)\Gamma(L+1/2)}{\Gamma(L)} \\ E(r_b^2) = L\sigma_h^2 \sigma_g^2 \end{cases} \quad (6)$$

由于贝塞尔函数的特殊性,难以直接由式

(3) 和式(4)作进一步的理论推导及运算。通常做法是利用具有单峰、长拖尾特征的 Gamma 分布对原有分布进行近似处理^[11]。

当形状参数 k 和尺度参数 θ 已知时,相应的 Gamma 分布及其整数矩有

$$\begin{cases} p_{\Gamma}(r) = \frac{\theta^{-k}}{\Gamma(k)} r^{k-1} \exp\left(-\frac{r}{\theta}\right) \\ E_{\Gamma}(r^n) = \frac{\Gamma(k+n)\theta^n}{\Gamma(k)}, \quad n=0,1,\dots \end{cases} \quad (7)$$

以 $a(t)$ 为例,结合式(5)和式(7),令两种分布的一、二阶矩相等,可以得到其近似 Gamma 分布 $p_{\Gamma_a}(r)$ 的参数 θ_a 和 k_a ,有

$$\begin{cases} \theta_a = \frac{2L\sigma_h^2\Gamma(L/2)}{\sqrt{\pi}\Gamma(L/2+1/2)} - \sigma_h^2 \frac{\sqrt{\pi}\Gamma(L/2+1/2)}{\Gamma(L/2)} \\ k_a = \sigma_h^2 \frac{\sqrt{\pi}\Gamma(L/2+1/2)}{\Gamma(L/2)} \cdot \frac{1}{\theta_a} \end{cases} \quad (8)$$

同样,近似 Gamma 分布 $p_{\Gamma_b}(r)$ 的 θ_b 和 k_b 为

$$\begin{cases} \theta_b = \frac{2L\sigma_h\sigma_g\Gamma(L/2)}{\sqrt{\pi}\Gamma(L+1/2)} - \sigma_h\sigma_g \frac{\sqrt{\pi}\Gamma(L+1/2)}{2\Gamma(L)} \\ k_b = \sigma_h\sigma_g \frac{\sqrt{\pi}\Gamma(L+1/2)}{2\Gamma(L)} \cdot \frac{1}{\theta_b} \end{cases} \quad (9)$$

3 自相关函数和多普勒功率谱

同文献[7]所考虑的环境相类似,在推导过程中,始终假设用户和中继被散射体所包围。故而彼此之间为 NLOS 传输,用户与中继间的通信完全依靠散射产生的多径效应实现。

关于传输部分 $b(t)$,其 ACF $R_b(\tau)$ 为

$$\begin{aligned} R_b(\tau) &= E[b(t+\tau)b^*(\tau)] \\ &= E\left[\sum_{i=1}^L h_i(t+\tau)g_i(t+\tau) \cdot \sum_{i=1}^L h_i^*(\tau)g_i^*(\tau)\right] \\ &= \sigma_h^2\sigma_g^2 J_0(2\pi f_A\tau)J_0(2\pi f_B\tau) \sum_{i=1}^L J_0^2(2\pi f_i\tau) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $J_0(\cdot)$ 表示零阶的第一类贝塞尔函数^[13],而 f_A 、 f_B 和 f_i 分别代表用户 A、B 及中继 i 的多普勒频率。当网络工作波长为 λ 、移动速度为 v_A 、 v_B 和 v_i 时,有 $f_A = \frac{2\pi v_A}{\lambda}$ 、 $f_B = \frac{2\pi v_B}{\lambda}$ 及 $f_i = \frac{2\pi v_i}{\lambda}$ 成立。

类似,干扰部分 $a(t)$ 的 ACF $R_a(\tau)$ 有

$$R_a(\tau) = 2\sigma_h^4 J_0^2(2\pi f_A\tau) \sum_{i=1}^L J_0^2(2\pi f_i\tau) \quad (11)$$

由于 ACF 与多普勒功率谱互为傅里叶变换关系,根据式(10)和式(11)可以得到相应的多普勒功率谱为

$$\begin{cases} S_b(f) = L\sigma_h^2\sigma_g^2 \int_{-\infty}^{\infty} \rho_b(\tau) \cdot \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \\ S_a(f) = 2L\sigma_h^4 \int_{-\infty}^{\infty} \rho_a(\tau) \cdot \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \end{cases} \quad (12)$$

尽管不能获得解析表达形式,但是根据 $J_0(\cdot)$ 的偶函数性质,有如下关系成立

$$\begin{cases} S_b(f) = \sigma_h^2\sigma_g^2 \int_0^{\infty} J_0(2\pi f_A\tau)J_0(2\pi f_B\tau) \cdot \\ \quad \sum_{i=1}^L J_0^2(2\pi f_i\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau \\ S_a(f) = 2\sigma_h^4 \int_0^{\infty} J_0^2(2\pi f_A\tau) \cdot \\ \quad \sum_{i=1}^L J_0^2(2\pi f_i\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau \end{cases} \quad (13)$$

4 电平通过率及平均衰落持续时间

LCR^[8]描述了衰落信道变化过程在 1s 内由高到低(由低到高)经过某一给定电平 r 的次数,LCRN $_{\xi}(r)$ 可以由下式计算得到

$$N_{\xi}(r) = \int_0^{\infty} r p_{\xi\xi}(r, \dot{r}) d\dot{r} \quad (14)$$

其中 $p_{\xi\xi}(r, \dot{r})$ 表示过程 $\xi(t)$ 及其同一时刻下时间导数 $\dot{\xi}(t)$ 的联合概率密度函数,通常只有当 $\xi(t)$ 为 Rayleigh 或 Rice 过程时能够得到闭合的分析表达式。

针对移动级联信道传输部分 $b(t)$,有^[10]

$$\begin{aligned} p_{bb}(r, \dot{r}) &= p_b(r) \cdot p_{b|\dot{b}}(\dot{r}|r) \\ &\approx \frac{\theta_b^{-k_b} \cdot r^{k_b-1}}{\sqrt{2\pi\beta_b}\Gamma(k_b)} \exp\left(-\frac{r}{\theta_b} - \frac{\dot{r}^2}{2\beta_b}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

符号 β_b 表示 $b(t) = r$ 条件下,ACF $R_b(\tau)$ 在原点处的负曲率^[10],有

$$\begin{aligned} \beta_b &= -\theta_b r \cdot \left. \frac{d^2 p_b(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=0} \\ &= 4\pi^2 \theta_b r (f_A^2 + 2f_R^2 + f_B^2) \end{aligned} \quad (16)$$

将式(15)和式(16)代入式(14),参考文献[13],可以得到

$$N_b(r) = \sqrt{\frac{2\beta_b r}{\pi}} \frac{\theta_b^{-k_b}}{\Gamma(k_b)} r^{k_b-1} \exp\left(-\frac{r}{\theta_b}\right) \quad (17)$$

同 LCR 相对应的另一个指标为 ADF,它表示随机过程 $\xi(t)$ 低于给定电平 r 的时间间隔长度的数学期望 $T_{\xi}(r)$ 。可以由下式计算^[8]

$$T_{\xi}(r) = \frac{F_{\xi}(r)}{N_{\xi}(r)} \quad (18)$$

其中 $F_{\xi}(r)$ 表示随机过程 $\xi(t)$ 的累计分布函数。对于 $b(t)$ 的近似 Gamma 分布,由参数关系式,可以得到

$$F_b(r) = 1 - \frac{\Gamma(k_b, r/\theta_b)}{\Gamma(k_b)} \quad (19)$$

$\Gamma(\cdot, \cdot)$ 表示不完全 Gamma 函数^[13]。结合式(17)和式(19),即可得到 $T_b(r)$ 。

5 数值仿真

不失一般性,假设复高斯子信道 $h_i(t)$ 和 $g_i(t)$ ($i=1,2,\dots,L$) 均服从单位方差的复高斯分布。为了保证级联信道满足预先给定的时域自相关特性,采用确定性谐波叠加(SOS)方式中具有高精度的 LPNM 法^[14] 以得到仿真数据 $a(t)$ 和 $b(t)$ 。同时令网络工作频率为 150MHz, A 和 B 的移动速度分别为 8m/s 和 2m/s; 中继的数量 L 为 2。

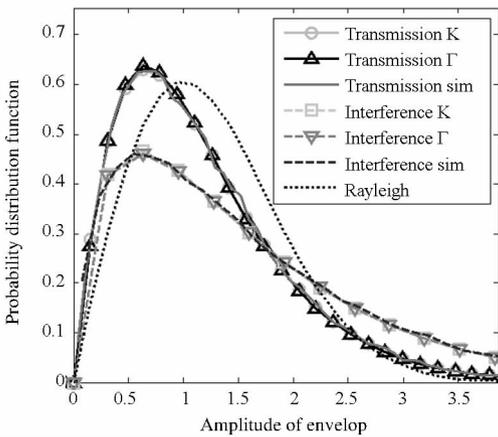


图2 移动级联信道的概率分布及仿真

Fig.2 PDF and simulation of mobile cascade channel

图2 给出了传输部分 $b(t)$ 和干扰部分 $a(t)$ 的直方统计结果、Generalized-K 分布及近似 Gamma 分布。首先,可以看到移动级联信道同典型的 Rayleigh 信道有显著区别。另外,仿真结果和两种分布方式间的差别很小,表明采用矩匹配方法得到的 Gamma 分布以较高精度近似表达了形式复杂的 Generalized-K 分布,便于后续数学处理。同时,在中继数量相同的情况下,传输部分和干扰部分的包络均值相近,间接说明在 TWRN 中,根据估计的干扰部分幅度相位值去除冗余影响,将明显提高接收信号检测概率和信息处理的性能。

图3 和图4 描述了在中继整体移动速度分别为 2m/s 和 6m/s 的情况下,根据式(10)、式(11)和式(13)得到的 $b(t)$ 和 $a(t)$ 的归一化 ACF 及多普勒功率谱曲线,同时绘制了仅有 A 移动时的 Rayleigh 信道情况作为对比。在 ACF 方面,可以看出随着中继速度的增加,移动级联信道相关时间减少,振动的周期及幅度迅速降低,均显著区别于 Rayleigh 信道。在多普勒功率谱方面,则表现为由 U 状的 Jakes 类型过渡为峰值逐渐集中于零

点处附近的形式,同时多普勒频率也有所扩展。

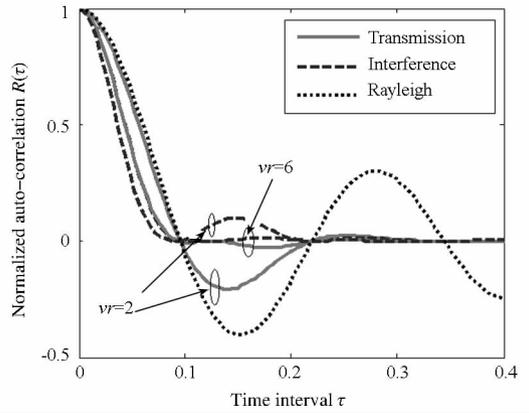


图3 移动级联信道的归一化自相关函数

Fig.3 Normalized ACRs of mobile cascade channel

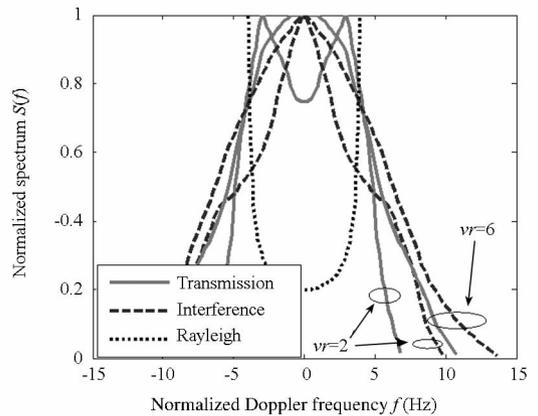


图4 移动级联信道的归一化功率谱

Fig.4 Normalized spectrums of mobile cascade channel

图5 和图6 分别给出了中继移动速度为 2m/s 和 6m/s 时,在传输过程 $b(t)$ 和 Rayleigh 信道过程的条件下得出的近似 LCR 和 ADF。可以发现当中继速度加快时,移动级联信道的 LCR 整体增大,对应着 ADF 数值的降低。且移动级联信道 LCR 下降阶段要慢于 Rayleigh 信道环境。图中给出的近似计算所得数值同仿真真曲线较为吻合,说明了推导结果的正确性。

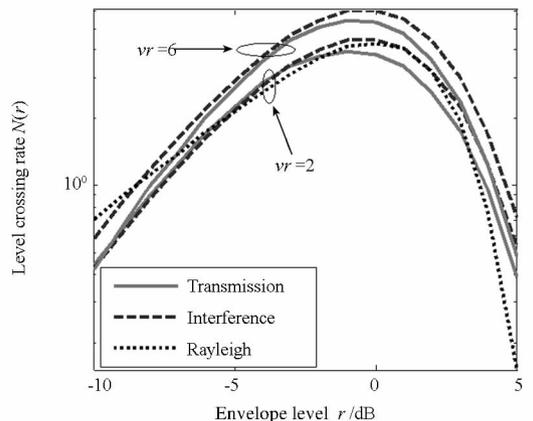
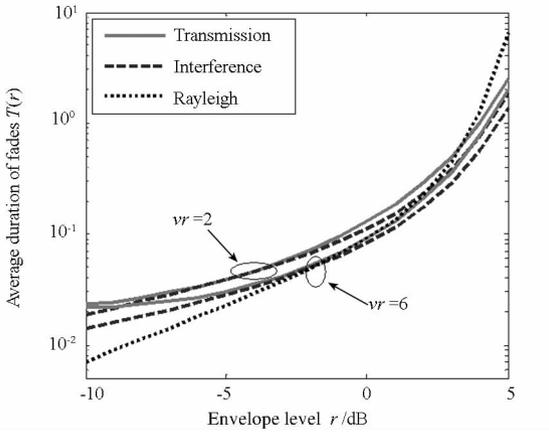


图5 传输过程 $b(t)$ 的电平通过率

Fig.5 LCR of transmission part $b(t)$

图 6 传输过程 $b(t)$ 的平均衰落持续时间Fig. 6 ADF of transmission part $b(t)$

6 结论

针对放大转发协议下的双向中继网络,将用户-中继-用户的双高斯乘积类型的移动级联信道在功能上分解为传输部分和干扰部分两个时间过程。根据子信道满足 Rayleigh 分布的前提,给出了各自的概率密度分布、自相关函数和多普勒功率谱的表达式。通过 Gamma 分布对广义 K 分布的矩匹配近似,分析推导了描述移动级联信道时变特征的电平通过率和平均衰落持续时间的近似计算式。最后的数值仿真验证了以上各表达式的正确性。

参考文献 (References)

- [1] Hyungsik J, Eunsung O, Daesik H. Catching resource-devouring worms in next-generation wireless relay systems: two-way relay and full-duplex relay [J]. Communications Magazine, IEEE, 2009, 47(9): 58-65.
- [2] Abu H M, Moon H L, Tae C S, et al. Pilot-based channel estimation in two-way amplify-and-forward relay networks [C]//Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2012 International Conference on, 2012: 996-999.
- [3] Patel C, Stuber G, Pratt T. Statistical properties of amplify and forward relay fading channels [J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2006, 55(1): 1-9.
- [4] Feifei G, Rui Z, Yingchang L. On channel estimation for amplify-and-forward two-way relay networks [C]//Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008: 1-5.
- [5] Feifei G, Rui Z, Yingchang L. Optimal channel estimation and training design for two-way relay networks [J]. Communications, IEEE Transactions on, 2009, 57(10): 3024-3033.
- [6] Lioliou P, Viberg M, Matthaiou M. Bayesian approach to channel estimation for af mimo relaying systems [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2012, 30(8): 1440-1451.
- [7] Patzold M, Hogstad B, Youssef N. Modeling, analysis, and simulation of mimo mobile-to-mobile fading channels [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2008, 7(2): 510-520.
- [8] Talha B, Patzold M. Level-crossing rate and average duration of fades of the envelope of mobile-to-mobile fading channels in cooperative networks under line-of-sight conditions [C]//Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE, 2008: 1-6.
- [9] Talha B, Patzold M. Level-crossing rate and average duration of fades of the envelope of mobile-to-mobile fading channels in K-parallel dual-hop relay networks [C]//Wireless Communications & Signal Processing, 2009. WCSP 2009. International Conference on, 2009: 1-5.
- [10] Talha B, Patzold M. On the statistical analysis of equal gain combining over multiple double rice fading channels in cooperative networks [C]//Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010 - Fall), 2010 IEEE 72nd, 2010: 1-5.
- [11] Al-Ahmadi S, Yanikomeroğlu H. On the approximation of the pdf of the sum of independent generalized-K rvs by another Generalized-K pdf with applications to distributed antenna systems [C]//Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010 IEEE, 2010: 1-6.
- [12] Simon M. Probability distributions involving gaussian random variables [M]. Pasadena: Springer, 2006: 1-200.
- [13] Gradshteyn I, Ryzhik I. Tables of integrals, series and products (7 Edition) [M]. San Diego: Academic, 2007: 1-1221.
- [14] Patzold M, Killat U, Shi Y, et al. A deterministic method for the derivation of a discrete wssu multipath fading channel model [J]. European Transactions on Telecommunications, 1996, 7(2): 165-175.