

复合衰落信道的衰落统计分析

王晓东^① 卜智勇^② 陈允峰^③

^①(海军航空工程学院电子工程系 烟台 264001)

^②(上海无线通信研究中心 上海 200050)

^③(中国电子科技集团公司第三十六研究所 嘉兴 314001)

摘要: 该文基于条件概率密度方法分析复合衰落信道下接收信号包络及其导数的联合概率密度函数,由此得到了复合衰落信道的平均电平交叉率和平均衰落持续时间的统一表达式,最后结合高斯-厄米特积分给出 Rayleigh-Lognormal, Ricean-Lognormal, Nakagami-Lognormal 3种典型复合衰落下接收包络的概率密度函数、累积分布函数、平均电平交叉率、平均衰落持续时间的近似解析式。仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 复合衰落信道; 条件概率密度; 平均电平交叉率; 平均衰落持续时间

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)03-0643-05

Fade Statistics in Composite Fading Channels

Wang Xiao-dong^① Bu Zhi-yong^② Chen Yun-feng^③

^①(Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

^②(Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai 200050, China)

^③(The 36th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Jiaxing 314001, China)

Abstract: The Joint Probability Density Function (JPDF) of signal envelope and its derivative, which is subjected to composite fading, is analyzed by means of conditional probability density. New uniform expressions for the average Level Crossing Rate (LCR) and Average Fade Duration (AFD) of signal envelope are derived using the above obtained JPDF, then some results of the PDF, Cumulative Distribution Function (CDF), average LCR and AFD of signal envelopes, characterized by Rayleigh-Lognormal, Ricean-Lognormal, Nakagami-Lognormal fading models, are derived via Gauss-Hermite quadrature. Simulation results validate the correctness of these expressions.

Key words: Composite fading channels; Conditional probability density; Average Level Crossing Rate (LCR); Average Fade Duration (AFD)

1 引言

无线通信系统中接收信号包络的平均电平交叉率(LCR)和平均衰落持续时间(AFD)描述信号衰落的二阶统计特征^[1],它们在信道建模、系统设计和性能分析等方面中具有非常重要的作用。例如,利用平均 LCR 和 AFD 得到突发错误的统计特性,并以此优化设计系统的编码方案和交织深度^[2]。

在移动通信中,当移动终端(MT)的移动速度比较低或处于静止状态时,MT 很难获得足够的样本对小尺度衰落进行平均处理,此时必须采用综合小尺度衰落和阴影衰落的复合衰落(composite fading)模型来分析链路质量和系统性能^[3]。根据无线接收信号包络可表述为短期多径衰落和长期阴影衰落两部分的乘积这一特点^[4],Krantzik 基于随机变量乘积方法导出复合衰落信道下接收信号包络 r 和包络对时间的导数 $\dot{r} = dr/dt$ 的联合概率密度函数(JPDF)为^[5-9]

$$f_{R,\dot{R}}(r, \dot{r}) = \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{s^2} f_{X,\dot{X}}\left(\frac{r}{s}, \frac{\dot{r}}{s} - \frac{\dot{s}r}{s^2}\right) f_{S,\dot{S}}(s, \dot{s}) ds d\dot{s} \quad (1)$$

其中 $r \geq 0, -\infty < \dot{r} < \infty$, $f_{X,\dot{X}}(x, \dot{x})$ 为小尺度衰落部分 x 及其对时间导数 \dot{x} 的联合概率密度函数(JPDF), $f_{S,\dot{S}}(s, \dot{s})$ 为阴影衰落部分 s 及其对时间导数 \dot{s} 的 JPDF。基于式(1),Krantzik 分析了小尺度衰落建模为 Rayleigh 分布、阴影衰落建模为对数正态分布时衰落间隔的分布; Pätzold 分析了小尺度衰落建模为 Ricean 分布时的衰落统计特性^[6]和相应扩展模型下的平均 LCR 和 AFD^[7]; 此后, Tjhung 利用式(1)计算了小尺度衰落建模为 Nakagami- m 分布模型下的平均 LCR 和 AFD^[8]。

观察式(1)发现计算这个二重积分是比较麻烦的,特别是当小尺度衰落分布表达式较复杂时(如 Ricean 分布),其积分过程和计算结果的形式都比较复杂^[9]。本文从无线传输信道的特征出发,基于条件概率密度函数^[3,10],提出一种简便地计算复合衰落信道下接收包络的平均 LCR 和 AFD 的新方法,通过这种方法统一了 3 种典型复合衰落模型下的平均 LCR 和 AFD 表示,并给出其与基于式(1)所得结果的差异性

和统一性。

2 复合衰落信道模型

假设接收机接收的复合衰落信号包络为 $r(t)$ ，根据 $r(t)$ 在局部范围(几十到几百个波长)的平均可以建模为变化缓慢的阴影衰落，则 $r(t)$ 在某一时刻采样 r 的概率密度函数(PDF) $f_R(r)$ 可由以阴影衰落部分 s 为条件的 r 的条件概率密度函数 $f_{R|S}(r|s)$ 对 s 的 PDF 取积分得到，即

$$f_R(r) = \int_0^\infty f_{R|S}(r|s)f_S(s)ds, \quad r \geq 0 \quad (2)$$

阴影衰落部分 s 一般建模为对数正态分布的随机变量(RV)，其 PDF 为

$$f_S(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s^k} \exp\left[-\frac{(20\lg s - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], \quad s \geq 0 \quad (3)$$

其中 $k = \ln(10)/20$ ， μ_s 为接收信号包络的区域均值，它是收发距离和路损指数的函数， σ_s 为阴影衰落的标准偏差。

由于阴影衰落与小尺度衰落产生于不同的传播机制^[3]，一般假设它们是统计独立的，因此， $f_{R|S}(r|s)$ 由小尺度衰落部分 x 的分布所决定。在不存在 LoS 分量时， x 一般建模为服从 Rayleigh 分布的 RV，此时， $s = E[r(t)] = \sqrt{\pi\Omega_X}/2$ ，其中 $\Omega_X = E[x^2]$ ，则

$$f_{R|S}(r|s) = \frac{\pi r}{2s^2} \exp\left[-\frac{\pi r^2}{4s^2}\right] \quad (4)$$

当存在占主要成分的 LoS 分量时， x 一般建模为服从 Ricean 分布的 RV，此时 $s = E[r] = \alpha \cdot \sqrt{\pi\Omega_X}/2$ ，其中 $\Omega_X = E[x^2]$ ， $\alpha = \exp(-K/2) \cdot [(1+K) \cdot I_0(K/2) + K \cdot I_1(K/2)] / \sqrt{1+K}$ ， K 为 LoS 分量与散射分量的功率比， $I_0(\cdot)$ 和 $I_1(\cdot)$ 分别为第一类零阶和一阶修正 Bessel 函数，则

$$f_{R|S}(r|s) = \frac{(K+1)\alpha^2 \pi r}{2s^2} \exp\left\{-K - \frac{(K+1)\alpha^2 \pi r^2}{4s^2}\right\} \cdot I_0\left(\frac{r\alpha}{s} \sqrt{\pi(K+1)K}\right) \quad (5)$$

当 $K=0$ 时， $\alpha=1$ ，式(5)退化为式(4)。

鉴于 Nakagami- m 分布能较好地拟合实测信道数据，因此，它被广泛用于更一般小尺度衰落信道的建模^[11]。当 x 建模为服从 Nakagami- m 分布的 RV 时， $s = E[r] = \beta \cdot \sqrt{\Omega_X/m}$ ，其中 $\Omega_X = E[x^2]$ ， $\beta = \Gamma(m+0.5)/\Gamma(m)$ ，衰落参数 m 刻画了衰落程度，且 $m \geq 0.5$ ， $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数，则

$$f_{R|S}(r|s) = \frac{2r^{2m-1} \beta^{2m}}{\Gamma(m) s^{2m}} \exp\left\{-\frac{\beta^2 r^2}{s^2}\right\} \quad (6)$$

当 $m=1$ 时， $\beta = \sqrt{\pi}/2$ ，式(6)退化为式(4)。

从物理概念上，式(2)包含的含义不同于接收信号包络 $r(t)$ 建模为阴影衰落过程 $s(t)$ 和小尺度多径衰落过程 $x(t)$ 的乘积。因为 $r(t)$ 建模为 $s(t)$ 和 $x(t)$ 的乘积时并没有对两者的变化速度做出限制；而基于条件概率密度函数的分析方法要求 $s(t)$ 的变化速度要比 $x(t)$ 缓慢得多，因此，基于 RV 乘积的分析方法的适用范围更广泛。另一方面，无线信道建模

时一般同时满足基于条件概率密度方法和基于随机变量乘积方法所要求的条件，因此两种方法都可以用来分析复合衰落信道，而且它们的结果应该是统一的。

3 接收包络及其导数的 JPDF

要计算平均 LCR 和 AFD 就必须得到衰落信号包络 $r(t)$ 和它对时间导数 $\dot{r}(t)$ 的 JPDF $f_{R,\dot{R}}(r,\dot{r})$ 。采用求 $f_R(r)$ 的方法，首先得到以阴影衰落 s 为条件的 r 和 \dot{r} 的条件 JPDF，然后对 $f_S(s)$ 积分，即

$$\begin{aligned} f_{R,\dot{R}}(r,\dot{r}) &= \int_0^\infty f_{R,\dot{R}|S}(r,\dot{r}|s)f_S(s)ds \\ &= \int_0^\infty f_{\dot{R}|R,S}(\dot{r}|r,s)f_{R|S}(r|s)f_S(s)ds, \\ r &\geq 0, \quad -\infty < \dot{r} < \infty \end{aligned} \quad (7)$$

由接收信号包络的采样样本 $r = sx$ ，则 $\dot{r} = \dot{x}s + x\dot{s}$ 。在 r 和 s 确定的条件下， \dot{r} 为 \dot{x} 和 \dot{s} 两个 RV 的线性叠加，因此根据 \dot{x} 和 \dot{s} 的分布可以求得 \dot{r} 的概率分布。

假设小尺度衰落部分是产生于全向同性散射的，则 \dot{x} 服从于独立于 x ， s 和 \dot{s} 的均值为零的正态 RV，其方差根据不同的衰落模型分别为^[12]

$$\sigma_{\dot{X}}^2 = \begin{cases} (\pi f_m)^2 \Omega_X, & \text{Rayleigh} \\ (\pi f_m)^2 \Omega_X / (K+1), & \text{Ricean} \\ (\pi f_m)^2 \Omega_X / m, & \text{Nakagami-}m \end{cases} \quad (8)$$

其中 f_m 为最大 Doppler 频移， $\Omega_X = E[x^2]$ ，信道参数 K, m 的定义同式(5)和式(6)。

对于阴影衰落部分，采用文献[7]中的定义， $s(t)$ 由均值为 0，方差为 1 的标准正态随机过程 $u(t)$ 根据 $\exp(\kappa \cdot \sigma_s \cdot u(t) + \mu_s)$ 得到，其中 κ ， σ_s 和 μ_s 的定义同式(3)。 $u(t)$ 的功率谱 $W(f)$ 的形状为高斯谱形式，即 $W(f) = (1/\sqrt{2\pi}\sigma_c) \exp(-f^2/2\sigma_c^2)$ ，其中 σ_c 由 $W(f)$ 的 3dB 截止频率 f_{3dB} 确定， $f_{3dB} = \sigma_c \sqrt{2\ln 2}$ ，由于阴影衰落相对于小尺度衰落要缓慢得多， f_{3dB} 比最大多普勒频移 f_m 要小得多。据此模型， \dot{s} 为一个依赖于 s 的正态随机变量^[7]，其均值为零，方差为 $(2\pi\sigma_c\sigma_s\kappa s)^2$ 。

根据独立正态随机变量的线性叠加服从正态分布的性质知 \dot{r} 是正态分布的随机变量，其均值为零，方差为 $\sigma_{\dot{r}|r,s}^2 = s^2\sigma_{\dot{X}}^2 + x^2\sigma_{\dot{S}}^2 = s^2\sigma_{\dot{X}}^2 + (r/s)^2\sigma_{\dot{S}}^2$ ，则

$$\begin{aligned} f_{R|\dot{R},S}(\dot{r}|r,s) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi[s^2\sigma_{\dot{X}}^2 + (2\pi\sigma_c\sigma_s\kappa r)^2]}} \\ &\cdot \exp\left\{-\frac{\dot{r}^2}{2[s^2\sigma_{\dot{X}}^2 + (2\pi\sigma_c\sigma_s\kappa r)^2]}\right\} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $\sigma_{\dot{X}}^2$ 定义见式(8)，其它参数的定义同上。

将式(3)，式(4)和式(9)代入式(7)得到 Rayleigh-Lognormal 复合衰落(Suzuki 分布)接收信号包络与其导数的 JPDF，同理，将式(3)，式(5)和式(9)代入式(7)得到 Ricean-Lognormal

(RLN)信道下的 $f_{R,\dot{R}}(r, \dot{r})$, 将式(3), 式(6)和式(9)代入式(7)得到 Nakagami-Lognormal(NLN)信道下的 $f_{R,\dot{R}}(r, \dot{r})$ 。

4 复合衰落信道的平均 LCR 和 AFD

关于 R 的平均 LCR 定义为衰落信号包络由下而上穿过电平 R 的平均速率, 其计算式为^[1,11]

$$N(R) = \int_0^{\infty} \dot{r} f_{R,\dot{R}}(r = R, \dot{r}) d\dot{r} \quad (10)$$

其中 $f_{R,\dot{R}}(r, \dot{r})$ 由式(7)给出。将 $f_{R,\dot{R}}(r, \dot{r})$ 代入式(10), 得到复合衰落信道下接收信号的平均 LCR 为

$$\begin{aligned} N(R) &= \int_0^{\infty} f_{R|S}(r = R | s) f_S(s) \sqrt{\sigma_{\dot{r}|r=R,s}^2} / 2\pi ds \\ &= \int_0^{\infty} f_{R|S}(r = R | s) f_S(s) \sqrt{[s^2 \sigma_X^2 + (2\pi \sigma_c \sigma_s \kappa R)^2]} / 2\pi ds \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $f_{R|S}(r | s)$ 根据不同的衰落模型分别对应式(4)–式(6), $f_S(s)$ 由式(3)给出。

将基于条件概率密度函数方法得到的式(11)同文献[9]中基于 RV 乘积方法得到式(6b), 式(6c)和式(6d)比较发现: 当基于 RV 乘积分析方法中的小尺度衰落部分的均值 $E[x] = \sqrt{\pi \Omega_x} / 2 = 1$ 时, 文献[9]中的式(6b), 式(6c)和式(6d)统一到本文的式(11); 而在基于条件概率密度分析中已假定包络的本地均值为阴影衰落部分, 这包含了假设小尺度衰落部分的均值为 1 的内在本质。因此, 当采用基于 RV 乘积的分析方法时, 在 $E[x] = 1$ 的条件下, 它与基于条件概率密度的分析方法从数学上讲是等价的。

AFD 定义为当信号包络处于电平 R 以下时的平均持续时间, 其计算式为^[1,11]

$$\tau_R = F(R) / N(R) = \text{prob}(r \leq R) / N(R) \quad (12)$$

其中 $N(R)$ 由式(11)给出, 接收包络的 CDF $F(R)$ 可通过对式(2)积分得到, 即

$$F(R) = \int_0^R \int_0^{\infty} f_{R|S}(r | s) f_S(s) ds dr = \int_0^{\infty} F(R | s) f_S(s) ds \quad (13)$$

其中对于不同的小尺度衰落模型, $F(R | s)$ 分别为

$$\begin{aligned} F(R | s) &= \int_0^R f_{R|S}(r | s) dr \\ &= \begin{cases} 1 - \exp[-\pi R^2 / (4s^2)], & \text{Rayleigh} \\ 1 - Q_1(\sqrt{2K}, \alpha R \sqrt{\pi(1+K)/2}/s), & \text{Ricean} \\ P(m, (\beta R/s)^2), & \text{Nakagami-}m \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $Q_1(a, b) = \int_b^{\infty} x \cdot \exp(-\frac{x^2 + a^2}{2}) J_0(ax) dx$ 为一阶 Marcum Q 函数, $P(a, b) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^b e^{-x} x^{a-1} dx$ 为不完全 Gamma 函数^[13]。

上述结果都含有关于 $f_S(s)$ 的积分, 由于这一特殊形式, 我们无法继续获得更简洁的解析形式, 但是借助于高斯-厄米特积分(GHQ)^[13], 可方便地计算不同复合衰落模型下接收信

号的 PDF, CDF, 平均 LCR 和 AFD, 具体结果为

$$f_R(r) = \sum_{l=1}^N \{ [\varpi_l f_l(r)] / \sqrt{\pi} \} \quad (15)$$

其中 N 为 GHQ 分点数, ϖ_l 为积分权值系数, $f_l(r) = f_{R|S}(r | s = s_l)$, $s_l = \exp(\kappa \cdot \sqrt{2} \sigma_s t_l + \kappa \cdot \mu_s)$, t_l 为求积节点, κ , σ_s 和 μ_s 的定义见式(3), $f_{R|S}(r | s = s_l)$ 根据不同的衰落模型分别对应式(4)–式(6)。同理, 复合衰落下接收信号包络的 CDF 为

$$F(R) = \sum_{l=1}^N \{ [\varpi_l F_l(r = R)] / \sqrt{\pi} \} \quad (16)$$

其中 $F_l(r = R) = F(R | s = s_l)$, $F(R | s = s_l)$ 由式(14)给出, 其它参数定义同式(15)。平均 LCR 为

$$N(R) = \sum_{l=1}^N \left[\varpi_l f_l(r = R) \sqrt{[s_l^2 \sigma_X^2 + (2\pi \sigma_c \sigma_s \kappa R)^2]} / 2\pi^2 \right] \quad (17)$$

其中 $f_l(r)$ 由式(15)给出, 其它参数的定义同上。将式(16)和式(17)代入式(12)得到 AFD 为

$$\begin{aligned} \tau_R &= \sqrt{2\pi} \sum_{l=1}^N \{ \varpi_l F_l(r = R) \} \\ &\quad / \sum_{l=1}^N \left\{ \varpi_l f_l(r = R) \sqrt{[s_l^2 \sigma_X^2 + (2\pi \sigma_c \sigma_s \kappa R)^2]} \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

以上所获得复合衰落环境下的分析结果在 $\sigma_s = \mu_s = 0$, 即 $s_l = 1$ 的极端条件下, 退化为仅考虑小尺度衰落信道环境下的结果, 但由于上面采用了条件概率分析的方法, 退化的结果对应于小尺度衰落模型均值为 1 时的情形。

5 仿真结果

本节根据第 2 节中描述的信道模型设计了单径(频率平坦)复合衰落仿真模型, 以此来验证上面得到的理论分析结果。仿真平台基于 Matlab 软件包, 所采用的仿真参数见表 1。

表 1 复合衰落信道仿真参数表

参数名称	取值
最大多普勒频移 f_m	100Hz
$W(f)$ 的 3dB 带宽 f_{3dB}	10Hz
小尺度衰落均方差 Ω_X	满足小尺度衰落部分均值为 1 的值
阴影衰落标准偏差 σ_S	6dB
区域均值 μ_S	0dB

图 1 给出了 Suzuki, RLN 和 NLN 复合衰落下的接收包络的 PDF 曲线, 为方便比较, 图中剔除了本地均值 μ_s 的影响。图中横轴以 dB 刻度表示, 纵轴所表示的概率对应接收包络的对数随机变量 $(20 \lg(r) - \mu_s)$ 的概率。从图中可以看出仿真结果较好地吻合了理论表达式所计算的结果。对于不同的参数配置, PDF 曲线在小的接收水平上差别较大, 小尺度衰落越严重, 相应的 PDF 曲线展宽越大, 说明接收包络取小信号电平的机会越大。另外, 同小尺度衰落模型一样, RLN 和 NLN 复合衰落模型之间存在近似关系, 如, $m = 3.5$, 按照关系对应 $K = \sqrt{m^2 - m} / (m - \sqrt{m^2 - m}) = 5.458$, 从图中

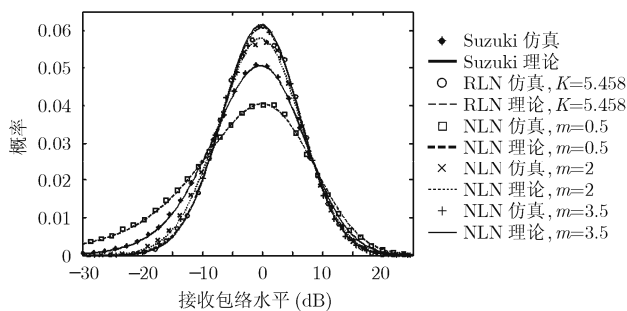


图1 复合衰落下接收包络 PDF 的比较

可以看出, 两种情况的曲线是接近重合的。

图2给出了Suzuki, RLN和NLN复合衰落下平均LCR的曲线, 为比较, 图3给出了相应的均值为1的小尺度衰落部分的平均LCR。从图中看出, 中等阴影(6dB)下, 在小信号电平区域, 复合衰落信号的衰落主要由小尺度衰落决定, 小尺度衰落水平的降低(即 m 或 K 的增大)使得在小信号水平区域的LCR的降低。但在大信号水平区域, 即 R 大于均值时, 复合衰落下的分析结果与仅考虑小尺度时的分析结果相差很大, 直观的解释是仅考虑小尺度衰落时要达到较大的信号水平的机会要比考虑复合衰落时的情形少, 不过这些差别都依赖于阴影衰落标准偏差 σ_s 。而且图1中RLN与NLN的模型近似关系对于LCR不再保持, 特别是在小信号电平区域, 两者的区别较大。

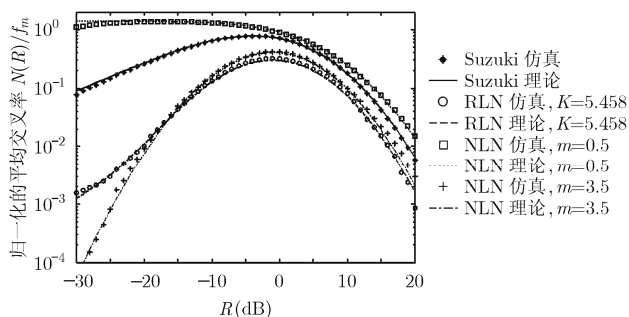


图2 复合衰落下接收包络的平均LCR

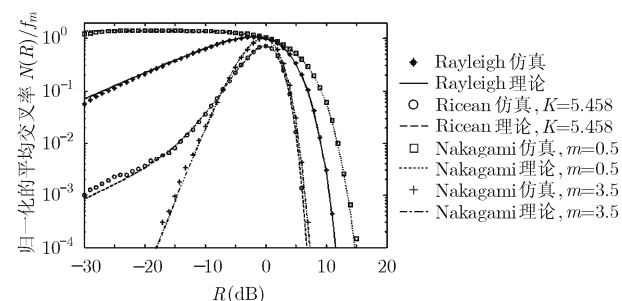


图3 仅考虑小尺度衰落的平均LCR

图4中给出了复合衰落下各种衰落模型的AFD曲线。从图中看出, 由于引入了阴影衰落, 在接收均值(本地均值)

为阴影衰落部分的条件下, 随着小尺度衰落的增强, 平均衰落持续时间 $\tau_R \times f_m$ 是减少的, 这同文献[14]中图4仅考虑小尺度衰落情形下的大信号电平区域的结果是一致的。

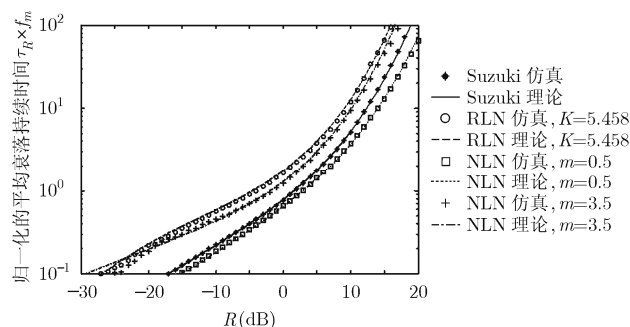


图4 复合衰落下接收包络的AFD

6 结束语

本文利用条件概率密度方法分析复合衰落信道环境下接收信号包络的平均LCR和AFD, 给出了Suzuki, RLN, NLN复合衰落模型下接收包络PDF、CDF、平均LCR和AFD的统一解析式, 仿真结果验证了表达式的正确性。本文所采用的方法和导出的结果可以用于MT低速移动速度场景下移动通信系统的设计和分析。

参考文献

- [1] Jakes Wm C. Microwave Mobile Communications. New York: IEEE Press, 1994: 31-36.
- [2] Morris J M. Burst error statistics of simulated Viterbi decoded BPSK on fading and scintillating channels. *IEEE Trans. on Commun.*, 1992, 40(1): 34-41.
- [3] Stüber G L. Principles of Mobile Communication. 2nd ed. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002: 61-67.
- [4] Lee W C Y and Yeh Y S. On the estimation of the second-order statistics of log-normal fading in mobile radio environment. *IEEE Trans. on Commun.*, 1974, 22(6): 869-873.
- [5] Krantzik A and Wolf D. Analysis of a modified Suzuki fading channel model. In: 1989 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, West Germany, 1989: 2250-2253.
- [6] Pätzold M. Mobile Fading Channels. New York: John Wiley and Sons, 2002: 155-239.
- [7] Pätzold M, Killat U, and Laue F. An extended suzuki model for land mobile satellite channels and its properties. *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, 1998, 47(2): 617-630.
- [8] Tjhung T T and Chai C C. Fade statistics in Nakagami-Lognormal channels. *IEEE Trans. on Commun.*, 1999, 47(12): 1769-1772.

- [9] Tjhung T T and Chai C C. Fade statistics in microcellular mobile radio channels with shadowing. In: IEEE International Conference on Communications, Singapore, 1998: 1645-1649.
- [10] Suzuki H. A statistical model for urban radio propagation. *IEEE Trans. on Commun.*, 1977, 25(7): 673-680.
- [11] Simon M K and Alouini M S. Digital Communication over Fading Channels. New Jersey: Wiley, 2005: 33-36, 585-586.
- [12] Lin Y and Alouini M S. Average level crossing rate and average outage duration of generalized selection combining. *IEEE Trans. on Commun.*, 2003, 50(12): 1997-2000.
- [13] Abramowitz M and Stegun I A. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables. New York: Dover, 1970: 260, 890, 924.
- [14] Yacoub M D, Bautista J E, and Guedes L G. On higher order statistics of the Nakagami-m distribution. *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, 1999, 48(3): 790-794.
- 王晓东: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为宽带无线接入系统.
- 卜智勇: 男, 1970年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为无线接入网络、通信信号处理.
- 陈允峰: 男, 1976年生, 工程师, 硕士, 研究方向为微波集成电路设计.