

# 瑞利多径衰落信道下 OFDM/OQAM 系统容量分析

张 凯, 薛伦生, 陈西宏, 刘晓鹏, 贺绍桐

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

**摘要** 系统容量是分析通信系统性能的一个重要指标,提出了正交频分复用/偏移正交幅度调制(OFDM/OQAM)系统在瑞利多径衰落信道中的信道容量均值和方差进行研究。分析得到瑞利信道模型的概率密度函数并推导出任意两个相关瑞利信道间联合概率密度函数,进而得到 OFDM/OQAM 系统在瑞利信道下的容量均值和方差的数学表达式,式中以系统的子载波数、信道的信噪比和多径数目为参数。通过对系统进行仿真,分析子载波数、信噪比和多径数对系统容量均值和方差的影响。仿真结果表明:系统容量均值与信噪比成正比,与系统子载波数成反比;系统的容量方差由系统的信噪比和信道的多径数共同影响决定。

**关键词** 正交频分复用;偏移正交幅度调制;容量;瑞利衰落信道

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.01.014

**中图分类号** TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)01-0081-05

## An Analysis of the Capacity in OFDM/OQAM Systems under Condition of Multipath Rayleigh-Fading Channels

ZHANG Kai, XUE Lunsheng, CHEN Xihong, LIU Xiaopeng, HE Shaotong

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Capacity is an important indicator in communication systems performance. This paper researches on the mean value of the capacity and the variance in Orthogonal Frequency Division Multiplexing/Offset Quadrature Amplitude Modulation(OFDM/OQAM) system under condition of multipath Rayleigh-Fading channels, obtains the probability density function (PDF) of Rayleigh channels model, and deduces the alliance of probability density function in two random relevance Rayleigh channels. The paper gets the mathematical expression about the mean and variance OFDM/OQAM system capacity in multipath Rayleigh-Fading channels, where the function of the parameter is related to the number of the subcarriers of an OFDM/OQAM system, the signal to noise ratio(SNR) and the number of multipath. The result shows that the systems mean is proportional to SNR and inverse proportional to the number of the subcarriers; the systems variance is defined by SNR and the number of multipath.

**Key words:** OFDM; OQAM; capacity; Rayleigh-fading channel

正交频分复用(Offset Quadrature Amplitude Modulation OFDM)技术是目前应用广泛的一种并

行多载波技术,它将数据分解为多个子数据以并行的方式在多个子载波上进行传输,同时利用不同的

**收稿日期:** 2016-06-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(61671468)

**作者简介:** 张 凯(1993-),男,河南淮阳人,硕士生,主要从事调制解调研究. E-mail:m18629468316@163.com

**引用格式:** 张凯,薛伦生,陈西宏,等. 瑞利多径衰落信道下 OFDM/OQAM 系统容量分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(1): 81-85. ZHANG Kai, XUE Lunsheng, CHEN Xihong, et al. An Analysis of the Capacity in OFDM/OQAM Systems under Condition of Multipath Rayleigh-Fading Channels[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(1): 81-85.

子载波之间的相互正交特性使频谱效率达到最大化,但需要加入循环前缀(CP)来消除多径干扰,使得频谱的利用率和功率效率降低<sup>[1-5]</sup>。为了克服上述系统中存在的不足,提出了正交频分复用/偏移正交调制(Orthogonal Frequency Division Multiplexing/Offset Quadrature Amplitude Modulation OFDM/OQAM)技术,该技术不必添加CP或者其他保护间隔,具有更高的频谱和功率利用率,同时采用具有良好时频聚焦特性的成型滤波器使系统可以更好的克服符号间和载波间干扰<sup>[6-11]</sup>。

系统的容量是分析系统性能的一个重要的指标,不同的调制方式和系统在不同信道下的容量问题有大量的文献进行了研究,文献[12]分析了OFDM系统在瑞利衰落信道下的容量均值和方差的表达式,得到当子载波的数目趋于无穷时系统的容量趋于一个常数。文献[13]研究了OFDM系统在莱斯多径信道下的系统容量方差。文献[14]通过随机几何理论对中继OFDM系统容量进行了分析。文献[15]分析了多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统的信道容量及其天线的优化问题。文献[16~18]研究了多输入多输出-正交频分复用(Multiple Input Multiple Output-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, MIMO-OFDM)系统的容量问题,给出多天线宽带衰落信道对MIMO-OFDM系统容量影响的各种因素。

大量的论文已经研究了OFDM系统中的容量问题,但对OFDM/OQAM系统的容量问题的研究内容相对较少,本文研究对基于瑞利衰落信道下的OFDM/OQAM系统的容量均值和方差问题,通过推导得到两个相关瑞利信道的联合概率密度表达式,进而得到OFDM/OQAM系统容量均值和方差公式,最后仿真得出不同参数对系统容量的影响。

## 1 OFDM/OQAM系统模型

OFDM/OQAM系统是一种基于滤波器组的多载波调制技术,系统通过设计具有良好时频聚焦特性的原型滤波器使系统在无CP的情况下具有较强的抗干扰能力,同时原型滤波器的使用减小了系统的带外干扰。OFDM/OQAM系统的发送信号可以表示为:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{M-1} a_{m,n} g_{m,n}(t) \quad (1)$$

式中, $a_{m,n}$ 表示第 $n$ 个符号,第 $m$ 个子载波发送的实数信号,是由正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)映射后的符号经过一个时间偏移后得到的实部或虚部,因此 $a_{m,n}$ 是一个实值符号,

$g_{m,n}(t)$ 表示在时频坐标点 $(m,n)$ 处的滤波器函数:

$$g_{m,n}(t) = g(t - n\tau_0) e^{j2\pi m\nu_0 t} e^{j\frac{\pi}{2}(m+n)} \quad (2)$$

式中: $\nu_0$ 和 $\tau_0$ 代表OFDM/OQAM系统子载波间隔和发送信号时间间隔,满足 $\nu_0 = \frac{1}{2\tau_0}$ , $g(t)$ 表示成形滤波器基函数。

OFDM/OQAM信号经过一个多径衰落信道到达接收端,设信道的脉冲响应为 $h(t,\tau)$ ,高斯白噪声为 $n(t)$ ,则OFDM/OQAM系统接收信号可以表示为:

$$r(t) = h(t) s(t) + n(t) = \int_0^{\Delta} h(t,\tau) s(t-\tau) d\tau + n(t) \quad (3)$$

式中: $\Delta$ 是多径信道的最大传播时延; $n(t)$ 表示零均值、方差为 $\sigma^2$ 的加性高斯白噪声。将发送信号 $s(t)$ 代入到上式中得到:

$$r(t) = \sum_n \sum_{m=0}^{M-1} a_{m,n} e^{j2\pi m\nu_0 t} e^{j\frac{\pi}{2}(m+n)} \int_0^{\Delta} h(\tau) g(t-\tau - n\tau_0) e^{j2\pi m\nu_0 (t-\tau)} d\tau + n(t) \quad (4)$$

当 $\tau \in [0, \Delta]$ ,可以假设:

$$g(t-\tau - n\tau_0) \approx g(t - n\tau_0) \quad (5)$$

则上式可表示为:

$$r(t) = \sum_n \sum_{m=0}^{M-1} a_{m,n} e^{j2\pi m\nu_0 t} e^{j\frac{\pi}{2}(m+n)} g(t - n\tau_0) H_{m,n} + n(t) \quad (6)$$

式中: $H_{m,n}$ 表示多径衰落信道 $h(t,\tau)$ 在频率 $m\nu_0$ 频域响应:

$$H_{m,n} = \int_0^{\Delta} h(\tau) e^{j2\pi m\nu_0 (t-\tau)} d\tau \quad (7)$$

若无线信道为非时变信道,即在同一个信道传输不同的符号的时候信道参数固定,即 $H_{m,n} = H_m$ ,则接收信号最终可以表示为:

$$r(t) = \sum_n \sum_{m=0}^{M-1} a_{m,n} g(t) H_m + n(t) \quad (8)$$

在时频格点 $(m_0, n_0)$ 处,对接收信号进行解调就可以得到符号 $a_{m_0, n_0}$ ,再进行QAM解调合并实部和虚部就能得到最终的发射数据。

## 2 OFDM/OQAM系统容量

### 2.1 瑞利多径信道模型

本文中采用的信道为瑞利多径衰落信道,表示为 $h(t,\tau)$ 。瑞利衰落信道可以由一个复高斯随机变量 $X+jY$ 表示,其中 $X, Y$ 均为均值为0、方差为 $\sigma^2$ 的独立同分布高斯随机变量。 $m_1, m_2$ 子信道中,时间为 $(n_1 - 1)T < t < n_1 T$ 和 $(n_2 - 1)T < t < n_2 T$ 内,信道的频域响应表示为:

$$\begin{aligned} H_{m_1, n_1} &= X_{n_1, m_1} + jY_{n_1, m_1} \\ H_{m_2, n_2} &= X_{n_2, m_2} + jY_{n_2, m_2} \end{aligned} \quad (9)$$

令  $Z$  表示复高斯随机变量  $X + jY$ , 其幅度为  $Z = \sqrt{X^2 + Y^2}$ .  $Z$  为瑞利随机变量, 设其多径数为  $L$ , 可得其概率密度函数  $f_{|H_{c(n, m)}|}(x)$  为<sup>[17]</sup>:

$$f_{|H_{c(n, m)}|}(x) =$$

$$\begin{cases} \frac{\left(\prod_{i=1}^L x_i\right)}{\sigma^{2L}} \exp\left[-\frac{\sum_{i=1}^L x_i^2}{2\sigma^2}\right], \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_L]^T \geq 0 \\ 0, x < 0 \end{cases} \quad (10)$$

考虑 2 个多径数为  $L$  的瑞利随机变量  $Z_1, Z_2$ , 均值为 0, 方差分别为  $\sigma_1^2, \sigma_2^2$ , 2 个复随机变量可以写成:

$$\begin{aligned} Z_1 &= X_1 + jY_1 \\ Z_2 &= X_2 + jY_2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} f_{|H_{c(m_1, n_1)}|, |H_{c(m_2, n_2)}|}(\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2) &= \frac{\prod_{i=1}^{L_1} z_{1i} \prod_{j=1}^{L_2} z_{2j}}{\sigma_1^{2L_1} \sigma_2^{2L_2} (1 - [\rho_{XX}^2 + \rho_{XY}^2])^{L_1 + L_2 - 2}} \\ \exp\left[-\frac{1}{2(1 - [\rho_{XX}^2 + \rho_{XY}^2])} \left[ \frac{z_{11}^2 + z_{1L_1}^2 + (1 - \rho_{XX}^2) \sum_{i=2}^{L_1-1} z_{1i}^2}{\sigma_1^2} + \frac{z_{21}^2 + z_{2L_2}^2 + (1 - \rho_{XX}^2) \sum_{i=2}^{L_2-1} z_{2i}^2}{\sigma_2^2} \right] \right] \\ \prod_{i=1}^{L_1-1} \prod_{j=1}^{L_2-1} I_0 \left[ \frac{[\rho_{XX}^2 + \rho_{XY}^2]^{\frac{1}{2}}}{(1 - [\rho_{XX}^2 + \rho_{XY}^2])} \frac{\prod_{i=1}^{L_1} z_{1i} \prod_{j=1}^{L_2} z_{2j}}{\sigma_1 \sigma_2} \right], \mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2 \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $I_0(\cdot)$  为第一类修正的零阶贝塞尔函数。

## 2.2 系统信道容量的均值和方差

在文献<sup>[7]</sup>中, OFDM 系统的容量表示为:

$$C_{m, n} = \log_2(1 + \text{SNR} |H|^2) \quad (15)$$

其中系统的信噪比为:

$$\text{SNR} = E[S^2(t)] / \sigma_n^2 \quad (16)$$

式中:  $E[S^2(t)]$  为系统发生信号的功率;  $\sigma_n^2$  为高斯白噪声的功率。

OFDM 系统是一种特殊的滤波器组多载波系统, OFDM/OQAM 是其中的一种扩展形式, 因此, OFDM/OQAM 系统的容量同样可以表示为:

$$C_{m, n} = \log(1 + \text{SNR} |H(m, n)|^2) \quad (17)$$

式中:  $H(m, n)$  是第  $m$  个子载波上的第  $n$  个符号的信道频率响应。

则系统容量的均值可以表示为:

$$\mu_c = E\left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} C_{m, n}\right] =$$

$$\begin{aligned} E\left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \log(1 + \text{SNR} |H(m, n)|^2)\right] = \\ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^{+\infty} \log(1 + \text{SNR} \cdot x^2) f_{|H_{c(m, n)}|}(x) dx \end{aligned} \quad (18)$$

容量的方差可以表示为:

文中, 以  $\rho_{XX}, \rho_{YY}$  表示 2 个相关信道中实数间或虚数间高斯随机变量的相关系数,  $\rho_{XY}, \rho_{YX}$  表示实数与虚数间高斯随机变量的相关系数, 在不同的信道中, 相关系数不同, 但  $0 < \rho_{XY}, \rho_{YX} < 1$ 。在循环复高斯随机变量中, 相关系数有如下关系:

$$\rho_{XX} = \rho_{YY}, \rho_{XY} = -\rho_{YX} \quad (12)$$

那么, 各高斯随机变量  $X_i, Y_j, Z_k$  的协方差分别为:

$$\begin{aligned} \text{cov}(X_1, Y_1) &= \text{cov}(X_2, Y_2) = 0 \\ \text{cov}(X_1, Y_2) &= -\text{cov}(X_2, Y_1) = \rho_{XY} \sigma_1 \sigma_2 / 2 \\ \text{cov}(X_1, X_2) &= \text{cov}(Y_1, Y_2) = \rho_{XX} \sigma_1 \sigma_2 / 2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{cov}(Z_1, Z_2) = \sqrt{2} \sigma_1 \sigma_2 \sqrt{2\rho_{XX}^2 + 2\rho_{XY}^2}$$

式中:  $|H_{m_1, n_1}|$  和  $|H_{m_2, n_2}|$  的联合概率密度表达式可以表示为:

$$\begin{aligned} \sigma_C^2 = E\left[\left(\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} C_{m, n}\right)^2\right] - \left(E\left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} C_{m, n}\right]\right)^2 = \\ \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} E(C_{m, n}^2) + \frac{1}{N^2} \sum_{n_1, n_2 \neq n_1}^{N-1} \sum_{n_2}^{N-1} E(C_{m_1, n_1} C_{m_2, n_2}) - \mu_C^2 = \\ \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^{+\infty} \log_2(1 + \text{SNR} x^2)^2 f_{|H_{c(m, n)}|}(x) dx - \mu_C^2 + \\ \frac{1}{N^2} \sum_{n_1, n_2 \neq n_1}^{N-1} \sum_{n_2}^{N-1} \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \log(1 + \text{SNR} x_1^2)^2 \\ \log(1 + \text{SNR} x_2^2)^2 f_{|H_{c(m_1, n_1)}|, |H_{c(m_2, n_2)}|}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad (19)$$

式中:  $f_{|H_{c(m, n)}|}(x)$ ,  $f_{|H_{c(m_1, n_1)}|, |H_{c(m_2, n_2)}|}(x_1, x_2)$  为瑞利信道的概率密度函数和联合概率密度函数。从上面均值和方差的公式(18)和(19)中可以看出, 系统的容量均值和方差与载波数、信噪比和信道参数有关。

## 3 仿真分析

由于无法准确的知道两相关信道间的相关系数 本文通过对系统进行仿真分析 OFDM/OQAM 系统信道多径数, 信噪比和子载波数对信道容量均值和方差的影响, 在仿真中, 信道模型为 IEEE802.22 无线瑞利衰落信道, 信道的多径数为 6, 多径时延为

$\{-3\ 0\ 2\ 4\ 7\ 11\}$   $\mu\text{s}$ , 各径平均增益为  $\{-6\ 0\ -7\ -22\ -16\ -20\}$  dB, 信道长度为 129。

图 1 表现了不同多径条件下, 系统容量均值随 SNR 的变化情况, 从图中可以看出, 当信噪比 (SNR) 逐渐增大时, 系统容量均值的大小也在逐渐增加。同时, 当瑞利信道的多径数逐渐增加, 系统的容量均值只有少量增加, 因此, 多径数对系统容量均值的影响并不明显。

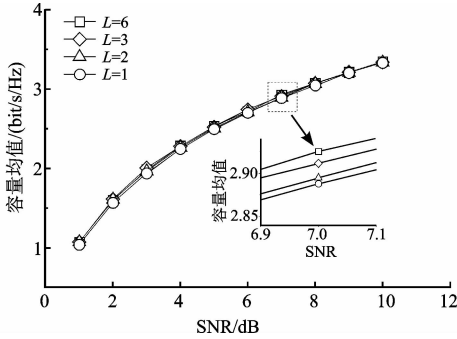


图 1 信道多径对系统容量均值的影响

Fig. 1 The number of channel multipath influence the system mean

图 2 反映出不同多径数目下, 容量方差随 SNR 的变化情况, 随着多径数的增多, 信道的方差逐渐增大, 但当多径数达到三径之后随着多径数的增加方差大小的变化并不明显。同时随着信噪比的增大, 信道容量方差先增大再逐渐减小, 且不同的多径数系统容量方差达到最大值的信噪比并不相同, 是由于信噪比和多径数共同影响信道参数, 最后对系统容量进行影响的结果。

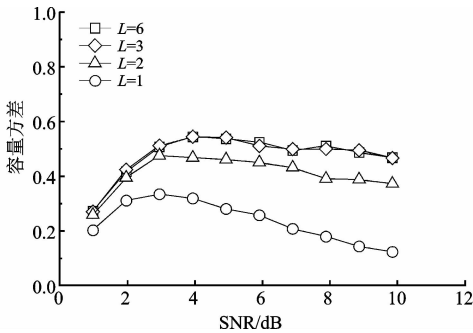


图 2 多径数对系统容量方差的影响

Fig. 2 The number of channel multipath influence the system variance

图 3 描绘了子载波数的不同对系统容量均值的影响, 仿真中分别采用载波数为 256、512、1 024、2 048 的 OQAM/OFDM 系统, 图中明显看出随着子载波数的增加系统的容量均值逐渐增大, 但是随着子载波数的增大系统容量均值的增加幅度逐渐放缓, 当子载波数大于 1 024 后系统容量均值基本不变。

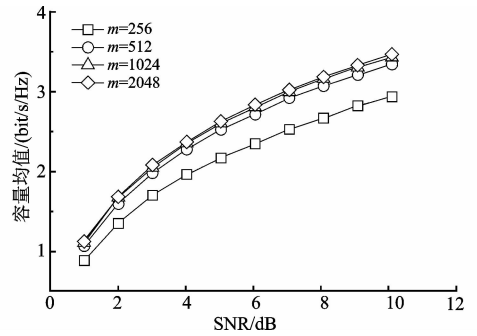


图 3 子载波数的多少对系统容量均值的影响

Fig. 3 The number of subcarriers influence the system mean

## 4 结语

本文对瑞利多径衰落信道下 OQAM/OFDM 系统的容量均值和方差公式进行了推导, 并对造成系统容量均值和方差改变的因素进行仿真。仿真结果表明: 在瑞利衰落信道下, OQAM/OFDM 系统容量均值与信噪比成正比, 与系统子载波数成反比, 信道的多径数对其影响并不明显; 系统的容量方差的大小由系统的信噪比和信道的多径数共同影响决定。本文对 SISO-OQAM/OFDM 系统进行了分析研究, MIMO-OQAM/OFDM 系统中不同参数对系统容量的影响是下一步研究的重点。

## 参考文献 (References):

- [1] LIANG X W, ZHU Q. Energy Efficient Joint Power and Subcarrier Assignment Scheme in OFDM Relay System[J]. The Journal of China University of Posts and Telecommunications, 2015, 22(5): 56-62.
- [2] ZHANG J Q, PEI Y K. Comparison of Achievable Rate of OFDM and Single Communication Systems [J]. Tsinghua Science and Technology, 2012, 17(1): 73-74.
- [3] 陈西宏, 胡茂凯, 薛伦生, 等. 对流层散射信道下多天线分集 OFDM 系统研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2014, 15(2): 53-56.  
CHEN X H, HU M K, XUE L S, et al. An Analysis of OFDM System under Troposcatter Fading with Multi-Antenna Diversity[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2014, 15(2): 53-56. (in Chinese)
- [4] 陈西宏, 刘强, 胡茂凯. OFDM 中基于粒子群优化的限幅算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2010, 11(2): 52-56.  
CHEN X H, LIU Q, HU M K. A Clipping Algorithm Based on PSO in OFDM[J]. Journal of Air

- Force Engineering University (Natural Science Edition), 2010, 11(2):52-56. (in Chinese)
- [5] CHOI Jiwoong, LEE Yonghwan. Optimum Pilot Pattern for Channel Estimation in OFDM Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(5):2083-2088.
- [6] SIOHAN P, SICLET C, LACAÏLLE N. Analysis and Design of OFDM/OQAM Systems Based on Filterbank Theory [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2002, 50(5): 1170-1183.
- [7] LÉLÉ C, SIOHAN P, LEGOUABLE R. 2 dB Better Than CP-OFDM with OFDM/OQAM for Preamble-based Channel Estimation [C]// IEEE International Conference on Communication, 2008:1302-1306.
- [8] FARHANG-BOROJENY B. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 28(3): 92-112.
- [9] SAEEDI-SOURCK H, WU Y. Complexity and Performance Comparison of Filter Bank Multicarrier and OFDM in Uplink of Multicarrier Multiple Access Networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(4): 1907-1921.
- [10] 梁燕, 秦梦瑶, 张贺伟, 等. FBMC/OQAM 系统导频辅助信道估计方法概述 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2015, 27(4): 477-483.  
LIANG Y, QIN M Y, ZHANG H W, et al. Survey of Pilot-Aided Channel Estimation in FBMC/OQAM [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2015, 27(4): 477-483. (in Chinese)
- [11] 李啸天, 雷菁, 刘伟, 等. 正交频分复用/偏移正交振幅调制半盲信道估计 [J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(5):169-174.  
LI X T, LEI J, LIU W, et al. Semi-Blind Channel Estimation for OFDM/OQAM System [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(5):169-174. (in Chinese)
- [12] Alan Clark, Peter J. Smith, and Desmond P. Taylor. Instantaneous Capacity of OFDM on Rayleigh-Fading Channels [J]. IEEE Transactions on information theory, 2007 53(1):355-361.
- [13] 周雯, 范立生. 莱斯多径衰落信道下 OFDM 系统的容量方差分析 [J]. 信号处理, 2011, 27(8), 1213-1218.  
ZHOU W, FAN L S. Capacity Variance of OFDM Systems over Multipath Ricean Fading Channels [J]. Signal Processing, 2011, 27(8), 1213-1218. (in Chinese)
- [14] 付雅茹, 朱琦. 基于随机几何理论的中继 OFDM 系统容量分析 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(10):2354-2358.  
FU Y R, ZHU Q. Capacity Analysis in Relay-assisted OFDM Systems Based on the Random Geometry Theory [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(10):2354-2358. (in Chinese)
- [15] 金志刚, 高铭, 陈喆. 多输入多输出信道容量研究及天线优化 [J]. 电波与科学学报, 2012, 27(5): 1019-1024.  
JIN Z G, GAO M, CHEN Z. Multi-Input Multi-Output Channel Spatial Correlation and Channel Capacity [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(5): 1019-1024. (in Chinese)
- [16] ATHAUDAGE C R N, SAITO M, EVANS J. Capacity of OFDM Systems in Nakagami-m Fading Channels: The Role of Channel Frequency Selectivity [C]// IEEE International Symposium on Personal, Indoor & Mobile Radio Communications, 2008:1-4.
- [17] MALLIK R K. On Multivariate Rayleigh and Exponential Distributions [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(6): 1499-1515.
- [18] BOLCSKEI H, GESBERT D, PAULRAJ J A. On the Capacity of OFDM-Based Spatial Multiplexing Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(2):225-234.

(编辑:徐楠楠)