

基于 IEEE 802.11ad 标准的单载波 60 GHz 通信系统性能分析

张昌明* 肖振宇 曾烈光 高波 苏厉 金德鹏
(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要: 基于 IEEE 802.11ad 标准, 该文设计了单载波(Single-Carrier, SC)60 GHz 通信系统的物理层结构, 并对系统性能进行评估。研究了硬件减损(hardware impairments)对通信性能的影响, 包括相位噪声及功率放大器(Power Amplifier, PA)的非线性影响, 且 PA 非线性的影响更为显著。结果表明, 硬件减损对 $\pi/2$ -BPSK 及 $\pi/2$ -QPSK 调制的影响较小, 而对 $\pi/2$ -16QAM 的影响较大。为获得较高的通信速率且保证较好的通信性能, 一般情况下应选择 $\pi/2$ -QPSK 调制, 在硬件减损很小时可采用 $\pi/2$ -16QAM 调制。

关键词: 无线通信; 通信性能; 误码分析; 相位噪声; 非线性功率放大器

中图分类号: TN 928

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0218-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00447

Performance Analysis of Single-Carrier (SC) 60 GHz Communication System Based on IEEE 802.11ad Standard

Zhang Chang-ming Xiao Zhen-yu Zeng Lie-guang Gao Bo Su Li Jin De-peng
(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to analyze the performance of Single-Carrier (SC) 60 GHz communication system, a structure of physical layer is designed based on IEEE 802.11ad standard. The impacts of hardware impairments on the communication performance are studied, including phase noise and non-linear distortion of Power Amplifier (PA), and the non-linear distortion is more significant. Simulation results indicate that the performance degradation caused by hardware impairments is much less for $\pi/2$ -BPSK and $\pi/2$ -QPSK modulation than that for $\pi/2$ -16QAM modulation. To get a high bit rate and acceptable performance, $\pi/2$ -QPSK modulation is a good choice in general, and $\pi/2$ -16QAM is better when hardware impairments are trivial.

Key words: Wireless communication; Communication performance; BER analysis; Phase noise; Non-linear Power Amplifier (PA)

1 引言

随着对短距离高速无线通信需求的日益增长, 毫米波通信(60 GHz)成为目前的研究热点^[1,2]。与其它短距离无线通信相比, 60 GHz 的主要特征为: 极大的带宽为 Gbps 量级的通信速率提供了条件, 如美国分配了 57-64 GHz 的频段^[3]; 允许较大的等效全向辐射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP), 约为 IEEE 802.11n 的 10 倍及超宽带(Ultra Wide Band, UWB)的 30000 倍^[4]。

近年来在 60 GHz 标准化研究上取得了较大进展, 相继出现 ECMA 387^[5], IEEE 802.15.3c^[6], IEEE 802.11ad^[7]等几项标准, 其中 IEEE 802.11ad 将于 2012 年底正式完成。与其它两项标准相比, IEEE

802.11ad 主要对无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)展开研究, 与现有的 Wi-Fi 产品兼容, 得到许多厂商的支持, 具有更好的市场前景^[8]。

由于 60 GHz 通信的频点高、带宽大, 硬件的非理想因素会造成一定的硬件减损(hardware impairments), 对通信性能产生较大影响。硬件减损主要包括相位噪声和功率放大器(Power Amplifier, PA)的非线性影响。对 IEEE 802.15.3c, 已有一些研究关注硬件减损下的通信性能^[9,10]; 对 IEEE 802.11ad, 据调研仅有文献[11]做了相关研究, 但其研究内容不够充分, 未能具体反映出硬件减损与通信性能的关系。本文的研究重点是评估在 IEEE 802.11ad 标准下硬件减损对通信性能的影响, 及在不同 PA 功率回退时如何选择调制编码方案(Modulation and Coding Scheme, MCS), 以实现更高的通信速率。在 IEEE 802.11ad 的物理层设

2011-05-12 收到, 2011-10-21 改回

国家 863 计划项目(2009AA011205), 国家重大专项(2009ZX03006, 2011ZX03004-001-01)和国家自然科学基金(61021001)资助课题

*通信作者: 张昌明 zcmchf@gmail.com

计中, 传输方案分单载波(Single-Carrier, SC)和正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), SC 方案更能对抗硬件减损的影响, 有更好的应用前景, 因此本文将针对 SC 传输展开研究。

2 信道模型

IEEE 802.11ad 工作组描述的信道特性主要受以下几方面影响: (1)发送端和接收端的距离; (2)传输信道是有视距(Line-Of-Sight, LOS)模式还是无视距(Non-Line-Of-Sight, NLOS)模式; (3)发送端和接收端天线的方向。

60 GHz WLAN 的信道模型可以描述为^[12]

$$\begin{aligned} h(t, \varphi_{\text{tx}}, \theta_{\text{tx}}, \varphi_{\text{rx}}, \theta_{\text{rx}}) &= \sum_i A^{(i)} C^{(i)}(t - T^{(i)}, \varphi_{\text{tx}} - \Phi_{\text{tx}}^{(i)}, \theta_{\text{tx}} - \Theta_{\text{tx}}^{(i)}, \\ &\quad \varphi_{\text{rx}} - \Phi_{\text{rx}}^{(i)}, \theta_{\text{rx}} - \Theta_{\text{rx}}^{(i)}) \\ C^{(i)}(t, \varphi_{\text{tx}}, \theta_{\text{tx}}, \varphi_{\text{rx}}, \theta_{\text{rx}}) &= \sum_k \alpha^{(i,k)} \delta(t - \tau^{(i,k)}) \delta(\varphi_{\text{tx}} - \varphi_{\text{tx}}^{(i,k)}) \\ &\quad \cdot \delta(\theta_{\text{tx}} - \theta_{\text{tx}}^{(i,k)}) \delta(\varphi_{\text{rx}} - \varphi_{\text{rx}}^{(i,k)}) \delta(\theta_{\text{rx}} - \theta_{\text{rx}}^{(i,k)}) \end{aligned} \quad (1)$$

信道响应为分簇到达模型, 且各簇都包括时间和空间上分布比较密集的几条径。其中 h 为信道总的冲击响应函数; $\varphi_{\text{tx}}, \theta_{\text{tx}}, \varphi_{\text{rx}}, \theta_{\text{rx}}$ 代表发送端与接收端的角坐标; $A^{(i)}, C^{(i)}$ 为第 i 簇的信道增益和冲击响应; δ 为单位脉冲函数; $T^{(i)}, \Phi_{\text{tx}}^{(i)}, \Theta_{\text{tx}}^{(i)}, \Phi_{\text{rx}}^{(i)}, \Theta_{\text{rx}}^{(i)}$ 为第 i 簇到达的时间及第 i 簇发送端与接收端的角坐标; $\alpha^{(i,k)}$ 是第 i 簇中第 k 条径的幅度; $\tau^{(i,k)}, \varphi_{\text{tx}}^{(i,k)}, \theta_{\text{tx}}^{(i,k)}, \varphi_{\text{rx}}^{(i,k)}, \theta_{\text{rx}}^{(i,k)}$ 是第 i 簇中第 k 条径的相对时延及相对角坐标。

3 硬件减损模型

3.1 相位噪声

IEEE 802.11 工作组给出的相位噪声功率谱密度为式(3)所示^[13], 对研究 60 GHz WLAN 的相位噪声有重要参考价值。

$$\text{PSD}(f) = \text{PSD}(0) \left[\frac{1 + (f/f_z)^2}{1 + (f/f_p)^2} \right] \quad (3)$$

其中, $\text{PSD}(0)$ 为 $f=0$ 时的功率谱密度, 取值为 -90 dBc/Hz; 极点频率 $f_p=1$ MHz; 零点频率 $f_z=100$ MHz; 当 f 趋于无穷大时, $\text{PSD}(f)$ 的极限值为 -130 dBc/Hz。图 1 给出了理论相位噪声和实际生成相位噪声的功率谱密度分布。由于相位噪声是由高斯白噪声通过滤波器响应得到的, 而白噪声并非理想, 所以生成的相位噪声的功率谱密度在理论值上下有抖动。在该模型下, 相位噪声的功率谱密度值比较

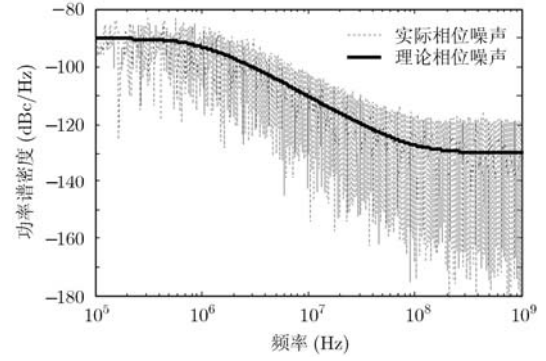


图 1 相位噪声的功率谱密度分布

小, 而且在时域上所产生的相位偏差一般小于 5° , 因此, 所造成的影响较小。

3.2 功率放大器的非线性特性

PA 的非线性影响包括幅度失真(AM-AM)和相位失真(AM-PM)。IEEE 802.11ad 工作组给出的 AM-AM 及 AM-PM 模型如式(4)和式(5)所示^[13], 适用于 60 GHz 系统 PA 的研究。在式(4)中, A 和 $G(A)$ 代表输入和输出的电压幅度; 线性增益 $g=4.65$; 失真拐点平滑程度 $s=0.81$; 输出电压幅度饱和值 $A_{\text{sat}}=0.58$ V。在式(5)中 $\Psi(A)$ 为输入电压幅度为 A 时所产生的相位失真大小, 单位为角度制; α, β, q_1, q_2 的取值分别为 2560, 0.114, 2.4, 2.3。

$$G(A) = g \frac{A}{\left(1 + (gA/A_{\text{sat}})^{2s}\right)^{1/(2s)}} \quad (4)$$

$$\Psi(A) = \frac{\alpha A^{q_1}}{\left(1 + (A/\beta)^{q_2}\right)} \quad (5)$$

PA 功率回退定义为式(6)所示, 其中 P_o 为 PA 输出功率的平均值; P_{sat} 为输出功率的饱和值。

$$\text{功率回退} = -10 \lg(P_o/P_{\text{sat}}) \quad (6)$$

图 2 进一步描述了非线性 PA 的幅度失真和相位失真, 从中可以发现, 输入信号幅度越大, 幅度失真和相位失真就越严重。由式(6)可知, 功率回退越小, P_o 越大, 即 PA 输入信号的幅度 A 越大, 所产生的失真就越大, 因此功率回退的大小直接影响 PA 非线性失真的程度。

4 仿真系统模型

为了评估 SC 60 GHz 的通信性能, 设计了图 3 所示的系统结构框图。信源产生随机二进制数据后, 通过编码、调制、插入独特字(Unique Word, UW)、升采样、波形成型、上变频引入相位噪声及 PA 引入非线性影响的过程, 完成了发射机的处理, 进入信道; 接收机从信道接收到数据后, 下变频过程中

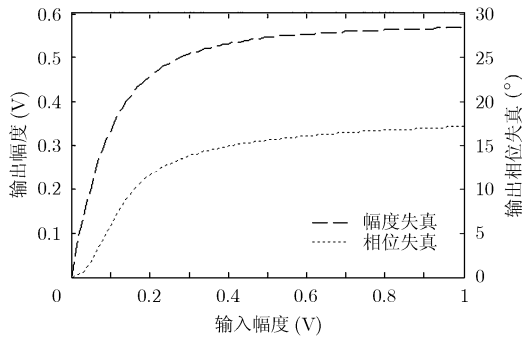


图 2 PA 非线性特性

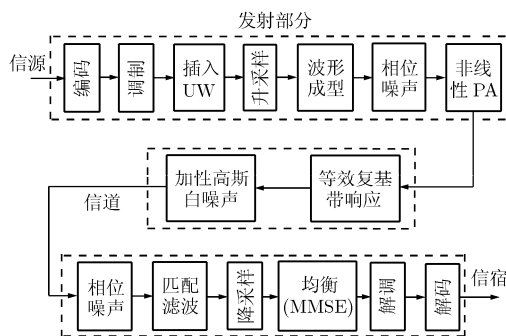


图 3 系统仿真结构

引入相位噪声, 然后通过匹配滤波、降采样、均衡、解调解码处理后完成信号的接收。

4.1 调制编码方案

根据 IEEE 802.11ad 标准, 编码方式采用 LDPC 码, 编码效率根据不同的速率需求及性能要求设计了 1/2, 5/8, 3/4, 13/16 共 4 种模式。调制方式有 $\pi/2$ -BPSK, $\pi/2$ -QPSK, $\pi/2$ -16QAM 共 3 种方式, 即分别在 BPSK, QPSK, 16QAM 调制之后对符号进行附加相位旋转, 其中第 k 个符号旋转的相位为 $k\pi/2$ 。基于 $\pi/2$ 的相位旋转可以保证 BPSK 相邻码元间的相位变化不超过 $\pi/2$, 能对相位突变进行平滑。相位旋转对 QPSK 和 16QAM 没有特别的影响, 这里主要是为了与 BPSK 处理过程保持一致。

在以上 MCS 设计下, 性能最优的为编码效率为 1/2 下的 $\pi/2$ -BPSK 调制, 为了能获得更好的性能, 针对该方案设计 2 倍重复码作为另一种 MCS; 性能最差的方案为编码效率为 13/16 下的 $\pi/2$ -16QAM 调制, 这在 IEEE 802.11ad 标准中未考虑。因此, 一共设计了 12 种 MCS 方案, 如表 1 所示。

4.2 频域均衡

本文采用频域均衡方案, 在发送端, 数据块之间插入了特定的 UW, 以满足循环前缀特性, UW 是长度为 64 的格雷保护序列, 调制方式采用 $\pi/2$ -BPSK。每一个数据块的符号数为 448, 具有表 1 所示的不同的调制编码方式。

表 1 调制编码方案

MCS	编码效率	调制方式	重复倍数
1	1/2	$\pi/2$ -BPSK	2
2	1/2	$\pi/2$ -BPSK	1
3	5/8	$\pi/2$ -BPSK	1
4	3/4	$\pi/2$ -BPSK	1
5	13/16	$\pi/2$ -BPSK	1
6	1/2	$\pi/2$ -QPSK	1
7	5/8	$\pi/2$ -QPSK	1
8	3/4	$\pi/2$ -QPSK	1
9	13/16	$\pi/2$ -QPSK	1
10	1/2	$\pi/2$ -16QAM	1
11	5/8	$\pi/2$ -16QAM	1
12	3/4	$\pi/2$ -16QAM	1

在接收端, 频域均衡的处理流程为图 4 所示。首先以一个数据块和 UW 为一组进行 FFT 变换, 然后将得到的频域数据与 $W(k)$ 相乘, 最后经 IFFT 变换到时域, 并抽取有用数据。本文求取 $W(k)$ 采用式(7)所示的最小均方误差(MMSE)算法, 其中, $H(k)$ 为信道频率响应; SNR(Signal to Noise Ratio) 为信号噪声功率比。

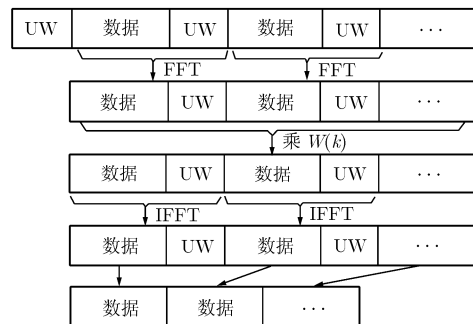


图 4 接收端频域均衡流程

$$W(k) = \frac{H^*(k)}{|H(k)|^2 + 1/\text{SNR}} \quad (7)$$

5 仿真结果与性能分析

本节在 MATLAB 平台上进行仿真, 评估在硬件减损影响下 SC 60 GHz 的通信性能。仿真过程通过设置不同的 SNR 环境, 统计传输的误码率(Bit Error Rate, BER)。仿真过程对 $\pi/2$ -BPSK, $\pi/2$ -QPSK 及 $\pi/2$ -16QAM 设置的 SNR 步径长度分别 0.3 dB, 0.5 dB 和 1 dB。

本节中符号定时同步及载波恢复被当作理想过程, 且接收端根据已知信道响应直接进行频域均衡。

信道模型采用会议室模式下的 LOS 及 NLOS 信道, 且分别模拟生成 200 次信道响应进行仿真, 并选取其中性能较好的 180 次统计平均 BER。根据 IEEE 802.11ad 标准, 符号速率都统一设定为 1.76 GHz, 则通信速率为

$$\text{通信速率} = 1.76 \times 10^9 \times \frac{448}{512} \times \log_2 M \times R(\text{bps}) \quad (8)$$

其中 M 为调制进制数, R 是编码效率。对 MCS=1 的二倍重复码, 通信速率应为式(8)计算结果的 1/2。通信速率随 MCS 从 1 至 12 变化递增, 而 MCS 的选择需要在性能和速率两方面进行折衷。

5.1 无硬件减损的性能分析

图 5 为在没有硬件减损时各种 MCS 的误码性能, 可作为研究硬件减损影响的参考, 性能分析将主要在 BER 为 10^{-5} 下展开。

在图 5(a)和 5(b)中都可以发现, MCS=1 与 MCS=2 相比, 由于采用 2 倍重复码, MCS=1 的性能更优 2.5 dB, 不过这是以更低的通信速率换取更好的通信性能。 $\pi/2$ -QPSK 与 $\pi/2$ -BPSK 相比在相同编码效率下性能相差约 3 dB, 这与无编码的 AWGN 信道一致。 $\pi/2$ -16QAM 的性能相比其它两种方式有较大的差距, 且在不同编码效率下, 各条性能曲线之间的距离相比其它两种调制方式略大。

在 $\pi/2$ -BPSK 和 $\pi/2$ -QPSK 调制下, NLOS 信道与 LOS 信道的性能差距在 0.5 dB 以内; 在 $\pi/2$ -16QAM 调制下, 性能差距为 1 dB 左右。NLOS 信道比 LOS 信道更复杂, 有比较明显的多径现象, 而二者性能差距并不大, 可见频域均衡已经在很大程度上消除了多径的影响。

无硬件减损下, 若要求所有 MCS 方案的 BER 都达 10^{-5} 以下, LOS 信道下 SNR 只需达 12 dB, NLOS 信道下 SNR 只需达 14 dB。因此在这种情况下, 为获得较高的通信速率, 可采用 $\pi/2$ -16QAM 调制, 选择 MCS=12 时可达最高速率 4.42 Gbps。

在基于理想硬件的基础上, 下文将加入相位噪声和 PA 非线性影响评估通信性能。从第 3 节的模型中可知, 非线性 PA 的影响比相位噪声大得多, 因此将分析在有相同相位噪声不同 PA 非线性程度下的影响, 其中功率回退描述了 PA 非线性的程度。

5.2 8 dB 功率回退下的性能

图 6 描述了 8 dB 功率回退下的性能曲线, 此时所引起的硬件减损很小。与图 5 相比, 在 LOS 及 NLOS 信道下, 硬件减损对 $\pi/2$ -BPSK 和 $\pi/2$ -QPSK 调制的影响很小, 几乎没有性能损失。而对 $\pi/2$ -16QAM 调制的影响比较明显, 当编码速率为 3/4 时, BER 为 10^{-5} 下的性能损失已经超过了 3

dB。

相位调制的所有星座点都在同一个圆上, 幅度都相等, 所引起的非线性失真大小相同, 各个星座点符号经过非线性 PA 后, 如果进行功率归一化处理, 它们之间的距离仍不会发生变化。而功率一定时, $\pi/2$ -16QAM 各个星座点的距离比相位调制更近, 且由于幅度大小不同, 由式(4), 式(5)知非线性失真程度也不同, 星座点经过非线性 PA 后距离会改变, 从而导致较大的性能损失。

在这种功率回退很大时, 系统只要适当增大 SNR, 仍可以保证较好的性能。MCS=12 时, LOS 信道下只要 SNR 达到 16 dB, NLOS 信道下达到 17 dB, 系统误码率便可降至 10^{-5} 以下, 而其它 MCS 下对 SNR 的要求更低。因此, 为了获得较高的通信速率, 仍可考虑采用 $\pi/2$ -16QAM 调制。

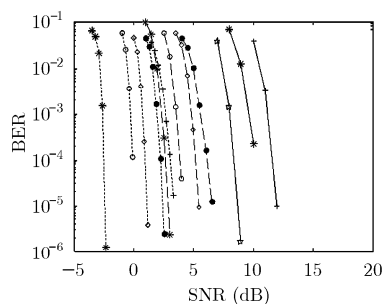
5.3 0.5 dB 功率回退下的性能

在 IEEE 802.11ad 标准中, SC 传输方案的最小功率回退为 0.5 dB, 图 7 为该功率回退下的性能曲线。此时 $\pi/2$ -BPSK 和 $\pi/2$ -QPSK 调制仍然具有较好的性能。与图 5 作比较可以发现, $\pi/2$ -BPSK 的性能损失为 0.5 dB 左右; $\pi/2$ -QPSK 的性能损失在 4 dB 范围内; $\pi/2$ -16QAM 受到的影响非常大, 最小的 BER 将保持在 0.1 左右。

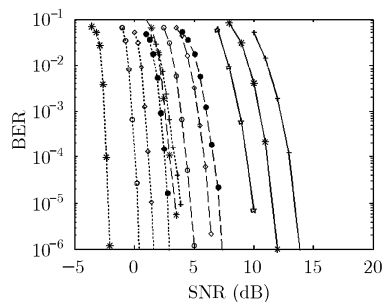
LOS 信道下 SNR 达到 10 dB, NLOS 信道达到 11 dB, 采用 $\pi/2$ -BPSK 或 $\pi/2$ -QPSK 调制都能使 BER 控制在 10^{-5} 以内。一般地, 在硬件减损影响较为严重的条件下, $\pi/2$ -16QAM 调制将不能用于物理层设计, 而若采用 $\pi/2$ -QPSK 调制下 MCS=9 对应的方案, 即编码效率为 13/16 时, 最高速率仍可达 2.31 Gbps。

6 结束语

针对 60 GHz 无线通信受硬件减损特别是 PA 非线性的影响较大, 本文基于 IEEE 802.11ad 标准, 对 SC 60 GHz 的 LOS 与 NLOS 信道的通信性能进行了评估。硬件减损对通信性能的影响与调制方式有关, $\pi/2$ -BPSK 和 $\pi/2$ -QPSK 受到的影响比较小, 即使功率回退小至 0.5 dB, 只要适当增加 SNR 仍可进行正常通信; $\pi/2$ -16QAM 受到的影响很大, 功率回退较小时不能进行有效通信。为了保证通信性能同时获得较高的通信速率, 一般情况下应选择 $\pi/2$ -QPSK 调制, 功率回退很大即硬件减损很小时可采用 $\pi/2$ -16QAM 调制。本文的结论对 IEEE 802.11ad 标准的进一步完善具有重要意义。



(a) LOS 信道



(b) NLOS 信道

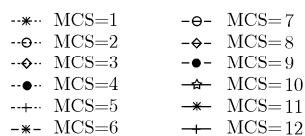
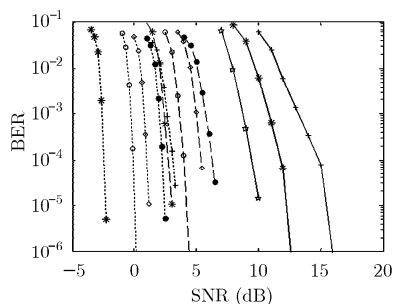
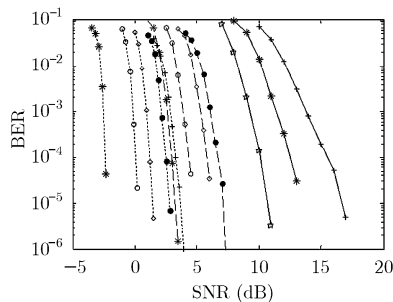


图 5 无硬件减损下的性能



(a) LOS 信道



(b) NLOS 信道

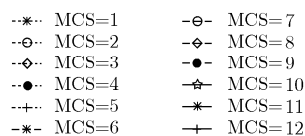
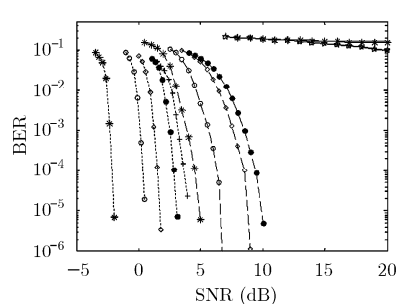
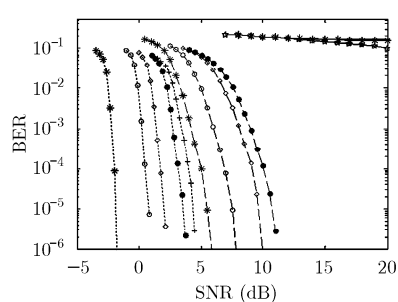


图 6 8 dB 功率回退下的性能



(a) LOS 信道



(b) NLOS 信道

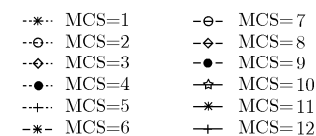


图 7 0.5 dB 功率回退下的性能

参 考 文 献

- [1] Kato S, Harada H, Funada R, *et al.* Single carrier transmission for multi-gigabit 60-GHz WPAN system [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(8): 1466-1478.
 - [2] Xu H H and Liu K. Research on wireless communication networks in the 60GHz frequency band [C]. International Conference on Internet Technology and Applications, Wuhan, China, Aug. 20-22, 2010: 1-4.
 - [3] Federal Communications Commission. Code of federal regulations, part 15—Radio frequency devices section 15.255: operation within the band 57.0–64.0 GHz. <http://law.justia.com/cfr/title47/47-1.0.1.1.12.html#47.1.0.1.1.12.3.236.35>, Jan., 2001.
 - [4] Yong S K, Xia P, and Valdes-Garcia A. 60 GHz technology for Gbps WLAN and WPAN [M]. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2011: 2-5.
 - [5] ECMA 387. ISO/IEC 13156-High rate 60 GHz PHY, MAC and HDMI PAL [S]. 2009.
 - [6] IEEE 802.15 WPAN Millimeter Wave Alternative PHY Task Group 3c (TG3c). Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for high rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) [S]. 2009.
 - [7] IEEE P802.11 Task Group ad. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications [S]. 2010.
 - [8] Perahia E, Cordeiro C, Park M, *et al.* IEEE 802.11ad: defining the next generation multi-Gbps Wi-Fi [C]. IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Las Vegas, USA, Jan. 9-12, 2010: 1-5.
 - [9] Lei M, Lakkis I, Sum C S, *et al.* Hardware impairments on LDPC coded SC-FDE and OFDM in multi-Gbps WPAN (IEEE 802.15.3c) [C]. Wireless Communications and Networking Conference, New Jersey, USA, Mar. 31-Apr. 3, 2008: 442-446.
 - [10] Sum C S, Funada R, Wang Junyi, *et al.* Error performance and throughput evaluation of a multi-Gbps millimeter-wave WPAN system in multipath environment in the presence of adjacent and co-channel interference [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(8): 1433-1442.
 - [11] Zhang X, Lu L, Funada R, *et al.* Physical layer design and performance analysis on multi-Gbps millimeter-wave WLAN system [C]. IEEE International Conference on Communication Systems, Singapore, Nov. 17-19, 2010: 92-96.
 - [12] Maltsev A, Erceg E, Perahia E, *et al.* Channel models for 60 GHz WLAN systems [R]. IEEE 802.11 TGad Technology Report 10/0334r08, 2010: 4-11.
 - [13] Perahia E, Park M, Stacey R, *et al.* IEEE P802.11 wireless LANs TGad evaluation methodology [R]. IEEE 802.11 TGad Technology Report 09/0296r16, 2010: 3-5, 9-15.
- 张昌明: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为超宽带无线通信、60 GHz 毫米波通信。
肖振宇: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为超宽带无线通信、60 GHz 毫米波通信。
曾烈光: 男, 1947 年生, 教授, 研究方向为通信传输/接入网络理论与系统、ASIC、SOC 及 NOC 的设计研究等。