

超高速毫米波无线局域网通信系统性能分析

陈 鹏 缪小龙 何世文 黄永明 杨绿溪

(东南大学信息科学与工程学院, 江苏南京 210096)

摘 要: 针对中国毫米波频段(45GHz), 制定下一代 IEEE 802.11aj 无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)协议标准通信系统的物理层结构及发射机发送方式, 研究了一种新的适用于该标准的循环移位分集(Cyclic Shift Diversity, CSD)方案, 该方案在不增加接收机额外复杂度的前提下能够获得较好的性能。同时, 本文对通信系统在各种调制和编码方式(Modulation and Coding Scheme, MCS)下的性能进行了仿真和评估。结果表明, 在将系统发射功率控制在 20dB 时, 采用码率为 1/2 的 16-QAM 调制方式可以在保证误帧率性能的同时获得较高的吞吐率。

关键词: 超高速毫米波无线局域网; 通信性能; 误码分析; 循环移位分集

中图分类号: TN928 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2015)01-0066-07

Performance Analysis for Ultra-high Rate Millimeter Wave Wireless Local Area Network Communication Systems

CHEN Peng MIAO Xiao-long HE Shi-wen HUANG Yong-ming YANG Lu-xi

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: IEEE 802.11aj is a standard of next generation wireless local area network(WLAN) for millimeter wave band (45GHz) of China. A structure of physical layer and a structure of transmitter are designed for communication system. This paper made a research on a new scheme of cyclic shift diversity for IEEE 802.11aj standard. The scheme can achieve good performance without additional effort at the receiver. In addition, this paper made an analysis on the performance of all modulation and coding schemes. In conclusion, in order to limit the transmitting power at 20dB, the 16-QAM modulation of rate-1/2 could achieve high throughput ensuring the PER performance at the same time.

Key words: ultra-high rate millimeter wave wireless local area network; communication performance; frame error rate analysis; cyclic shift diversity

1 引言

近年来,随着高清通信技术的迅速发展和普及,出现了越来越多的高清电视应用,国内外针对这一应用需求均开展了大量的研究。同时,针对频谱稀缺的情况,高频段无线通信技术,特别是超高速毫米波无线通信技术,已经成为无线通信领域的研究热点^[1]。

近年来,美国电气和电子工程师协会制定的无线局域网技术标准,如 IEEE 802.15.3c^[2]、IEEE 802.11ad^[3] 等也广泛应用于日常生活中,而且,这些技术也大大地提升无线通信系统性能、增加无线通信系统容量与改善用户无线通信数据体验。2005 年,中国电子技术标准化研究院成立了无线个域网(Wireless Personal Area Network, WPAN)标准工作组,专门负责组织短

收稿日期: 2014-08-13; 修回日期: 2014-09-26

基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX03003006-02); 国家自然科学基金(61471120, 61271018, 61372101); 江苏省自然科学基金(BK20130019, BK2011597); 工业支撑项目(BE2012167); 教育部新世纪优秀人才资助计划(NCET-11-0088); 中兴通讯股份有限公司产学研项目(CON1211090001)资助课题; 安徽省青年人才基金项目(2012SQRL209)

距离无线通信领域的标准研究与制定工作。2012年,IEEE 802.11工作组正式采纳了中国提出的建议,成立了 IEEE 802.11aj 任务组,专门针对中国毫米波频段制定下一代无线局域网标准。

超高速毫米波无线局域网技术标准 IEEE 802.11aj 主要应用于室内环境,包括会议室、住宅、小隔间等场景^[4]。在室内环境下,终端设备的移动速度受限,信道时变特性并不显著,但由于室内环境反射和散射物体较多,系统受多径效应的影响较大,因此,时延扩展是系统信道模型主要考虑的因素。

IEEE 802.11aj 标准支持两种物理层类型,单载波物理层(Single Carrier Physical Layer, SC PHY)和正交频分复用物理层(Orthogonal Frequency Division Multiplexing Physical Layer, OFDM PHY)。SC PHY 可以实现更低的功耗以及低复杂度的收发射机,同时 IEEE 802.11aj 标准首次在 WLAN 中引入了单载波多输入多输出(Single Carrier Multiple-Input Multiple-Output, SC MIMO)系统;而 OFDM PHY 可以在频率选择性信道中实现更好的性能。本文主要针对正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)传输方案展开研究。本文的目的是通过仿真评估 IEEE 802.11aj 标准在 OFDM 模式下各种 MCS 的性能,以及相应 MCS 下所能达到的数据速率。

2 系统模型

考虑一个 N_{Tx} 根发射天线, N_{Rx} 根接收天线的多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)通信系统模型,如图 1 所示:

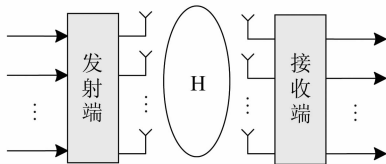


图 1 MIMO 通信系统模型

Fig. 1 MIMO communication system model

用 $S_i(f)$ ($i=1,2,\dots,N_{Tx}$) 表示各发射天线上的频域信号,用 $H_{k,i}(f)$ ($i=1,2,\dots,N_{Tx},k=1,2,\dots,N_{Rx}$) 表示第 i 根发射天线和第 k 根接收天线之间的信道传输函数,用 $n_k(f)$ ($k=1,2,\dots,N_{Rx}$) 表示第 k 根接收

天线处的高斯噪声,则接收端信号的频域表达式为:

$$R_k(f) = \frac{1}{\sqrt{N_{Tx}}} \sum_{i=1}^{N_{Tx}} H_{k,i}(f) S_i(f) + n_k(f),$$

$$k = 1, 2, \dots, N_{Rx} \quad (1)$$

其中, $1/\sqrt{N_{Tx}}$ 为发射功率归一化因子, N_{Tx} 和 N_{Rx} 分别表示发射天线数和接收天线数。

本文采用的信道脉冲响应模型为 Saleh 和 Valenzuela 最早提出的簇模型^[5](cluster model)。图 2 中的每一个垂直条代表一个脉冲响应,垂直条间的间隔表示多径时延。图中的线代表每个簇的延伸,簇和簇之间有重叠的区域,而重叠区域中的脉冲响应由相重叠的簇的功率叠加组成。

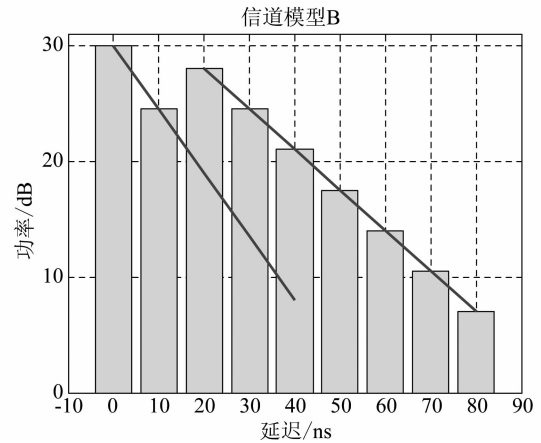


图 2 信道模型的脉冲响应

Fig. 2 Impulse response of channel model

信道模型的脉冲响应函数通常表示为^[6]:

$$h(t, \varphi_{tx}, \theta_{tx}, \varphi_{rx}, \theta_{rx}) = \sum_i A^{(i)} C^{(i)}(t - T^{(i)}, \varphi_{tx} - \Phi_{tx}^{(i)}, \theta_{tx} - \Theta_{tx}^{(i)}, \varphi_{rx} - \Phi_{rx}^{(i)}, \theta_{rx} - \Theta_{rx}^{(i)}) \quad (2)$$

其中, h 表示脉冲响应函数; $t, \varphi_{tx}, \theta_{tx}, \varphi_{rx}, \theta_{rx}$ 分别表示时刻和发送端、接收端处的角坐标; $A^{(i)}, C^{(i)}$ 分别表示第 i 个簇的信道增益和脉冲响应; $T^{(i)}, \Phi_{tx}^{(i)}, \Theta_{tx}^{(i)}, \Phi_{rx}^{(i)}, \Theta_{rx}^{(i)}$ 分别表示第 i 个簇到达的时间以及第 i 个簇发送端和接收端处的角坐标。

3 毫米波 MIMO 系统发射装置

3.1 系统发射装置

IEEE 802.11aj OFDM 模式下的发射机框如图 3 所示。数据分组发送的基本流程为:扰码器对数据

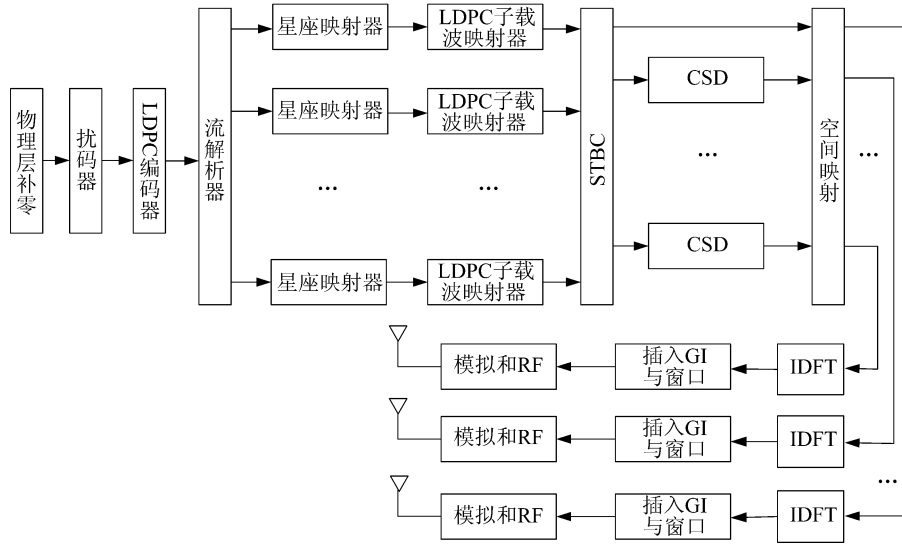


图 3 IEEE 802.11aj OFDM 模式下的发射机框图

Fig. 3 Block diagram of the transmitter in IEEE 802.11aj OFDM mode

比特流进行扰码,扰码器的初始状态为非 0 随机值;扰码后的数据经过低密奇偶校验码(Low Density Parity Check Code, LDPC)编码器进行编码;之后流解析器将比特流被重新排列成一组新的、等于空间流数(N_{SS})的比特串,每个空间流分别经过星座映射器、LDPC 子载波映射器; N_{SS} 个空间流再经过空时分组编码(Space-time Block Code, STBC)输出 N_{STS} 个空时流,多个空时流需要利用 CSD 来解除信号间的相关性;之后经过空间扩展将空时流映射到发射天线上,每根天线上的数据符号依次经过 IDFT 变换、插入保护间隔和加窗、模拟与射频操作后进行发送。

3.2 调制编码方案

IEEE 802.11aj 标准引入 LDPC 码作为编码方式。LDPC 码是一种特殊的线性分组码,而且是一种具有低密度特性的校验检测码,其校验矩阵的大部分元素为 0,只有少量的矩阵元素为 1。具有较强的纠错能力的 LDPC 码可以获得接近香农容量的性能,同时仍然保持相对较低的译码复杂度。IEEE 802.11aj 标准采用码长为 672 的 LDPC 码,可选择的码率为 1/2, 5/8, 3/4, 13/16。调制方式有 BPSK, QPSK, 16-QAM 和 64-QAM 四种。表 1 给出了后继表格中所使用的标记符号和相应说明;表 2 定义了 540MHz 系统带宽下,单个空间流传输时的 MCS 参数和数据速率。

表 1 MCS 参数符号说明
Tab. 1 Explanation of MCS parameters

符号	说明
R	码率
N_{BPPCS}	每个子载波上的编码比特数
N_{SD}	每个 OFDM 码元的数据子载波数
N_{SP}	每个 OFDM 码元的导频子载波数
N_{CBPS}	每个 OFDM 码元的编码比特数
N_{DBPS}	每个 OFDM 码元的数据比特数

表 2 单个空间流的 OFDM 540MHz MCS 参数

Tab. 2 OFDM 540MHz MCS parameters of single stream								
MCS 标号	调制	R	N_{BPPCS}	N_{SD}	N_{SP}	N_{CBPS}	N_{DBPS}	数据速率 (Mbps)
0	BPSK	1/2	1	168	8	168	84	173.25
1	QPSK	1/2	2	168	8	336	168	346.50
2	QPSK	3/4	2	168	8	336	252	519.75
3	16-QAM	1/2	4	168	8	672	336	693.00
4	16-QAM	3/4	4	168	8	672	504	1039.50
5	64-QAM	5/8	6	168	8	1008	630	1299.38
6	64-QAM	3/4	6	168	8	1008	756	1559.25
7	64-QAM	13/16	6	168	8	1008	819	1689.19

3.3 循环移位分集参数分析

在 MIMO 系统中,从发送端的每一个天线往外发送相同的信号可能会导致无意的和不期望造成的波束成型效应。由于数据帧中的前导序列用于自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)设置,从所有天线发送相同的前导序列会导致接收端前导部分功率的大的波动,从而引起饱和或者量化误

差。为了解除单个空间流从不同发射天线传输的信号间的相关性,不同天线上的信号使用不同的循环移位进行发送。

循环移位分集是一种简单而有效的消除波束成型效应的方案,同时也能够获得空间分集增益。它可以看作是一种特殊的空时编码,并且对接收端而言不需要增加额外的复杂度。假设一个周期为 T 的 OFDM 码元为 $s(t)$,则循环移位 T_{CS} 时段后的信号可以表示为:

$$s(t; T_{CS}) \Big|_{T_{CS} < 0} = \begin{cases} s(t - T_{CS}), & 0 \leq t < T + T_{CS} \\ s(t - T_{CS} - T), & T + T_{CS} \leq t \leq T \end{cases} \quad (3)$$

本文使用一种新的适用于 IEEE 802.11aj 标准的构建循环移位取值的方案^[7]。假设发送端单个空间流从多个天线发送,各天线使用不同的循环移位,则表达式(1)可以改写为:

$$R_k(f) = \frac{1}{\sqrt{N_{Tx}}} \sum_{i=1}^{N_{Tx}} H_{k,i}(f) S(f) e^{-j2\pi\tau_i f} + n_k(f), \quad k = 1, 2, \dots, N_{Rx} \quad (4)$$

其中, τ_i 表示第 i 根发射天线上的循环移位值。如果把循环移位 in 信号频域中产生的相位偏转因子看成是各子信道的一部分,则可以定义系统的等效信道:

$$H_{k,eq}(f) = \frac{1}{\sqrt{N_{Tx}}} \sum_{i=1}^{N_{Tx}} H_{k,i}(f) e^{-j2\pi\tau_i f}, \quad k = 1, 2, \dots, N_{Rx} \quad (5)$$

假设等效信道中各子信道具有相似的频域自相关特性,频域自相关函数用 $\phi_H(\Delta f) = E\{H_i^*(f)H_i(f + \Delta f)\}$ 表示,则等效信道的频域自相关函数可以表

示为:

$$\begin{aligned} \phi_{H_{eq}}(\Delta f) &= E\{H_{eq}^*(f)H_{eq}(f + \Delta f)\} \\ &= \phi_H(\Delta f) \frac{1}{N_{Tx}} \sum_{i=1}^{N_{Tx}} e^{-j2\pi\tau_i\Delta f} \end{aligned} \quad (6)$$

由于 $\left| \frac{1}{N_{Tx}} \sum_{i=1}^{N_{Tx}} e^{-j2\pi\tau_i\Delta f} \right| \leq 1$, 因此 $\phi_{H_{eq}}(\Delta f) = \phi_H(\Delta f)$

$\frac{1}{N_{Tx}} \sum_{i=1}^{N_{Tx}} e^{-j2\pi\tau_i\Delta f} \leq \phi_H(\Delta f)$, 即等效信道与子信道相比,自相关性有所衰减。如果选择合适的 τ_i , 使衰减因子为 0, 那么可以使等效信道的自相关性进一步减弱, 从而引入更多的随机特性, 获得分集增益。假设周期性地在一组相邻的子载波位置上, 使衰减因子为 0, 而在整数倍 $N_{Tx} \cdot \Delta f$ (Δf 为子载波间隔) 位置上, 衰减因子的值为 1, 用公式表示为:

$$\phi_{H_{eq}}(k\Delta f) = \begin{cases} \phi_H(k\Delta f) & \text{if } k = lN_{Tx} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

其中, k, l 均为整数。为了达到上式所述结论, 各发送天线上循环移位的取值为:

$$\tau_i = \frac{i-1}{N_{Tx}\Delta f} \quad \text{or} \quad n_i = (i-1) \frac{N_{FFT}}{N_{Tx}}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{Tx} \quad (8)$$

图 4 为天线配置为 4×1 的系统等效信道的频域响应, 左边为没有采用循环移位的结果, 右边为采用上述循环移位方案的结果。从仿真结果可以看出, 采用上述循环移位方案后, 消除了相邻子载波位置上信道的相关性, 使信道的脉冲响应呈现随机化, 增强了信道的频率选择性, 从而使系统获得更大的分集增益, 提升系统的误码率性能。

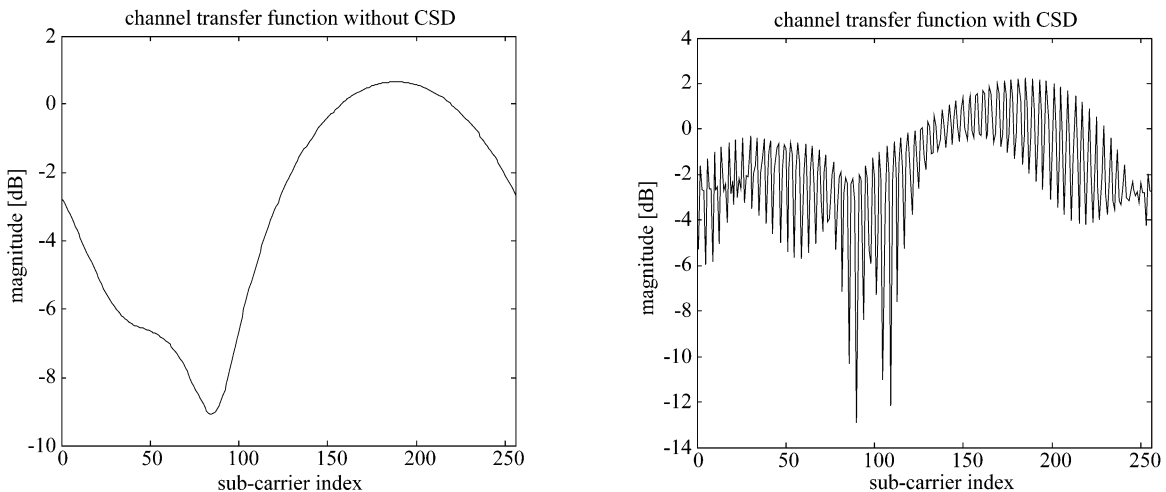


图 4 等效信道的频域响应

Fig. 4 Frequency response of the equivalent channel

表3给出了应用于IEEE 802.11aj标准不同空间流数的循环移位值。其中 $T_c = 1/F_s = 1/660\text{MHz} = 1.515\text{ns}$,表示符号采样间隔。

表3 分组中数据字段的循环移位值
Tab.3 Cyclic shift values for data field of a PPDU

分组中数据字段的循环移位值 $T_{CS}(n)$				
$N_{STS,total}$	空时流 n 的循环移位(ns)			
	1	2	3	4
1	0	-	-	-
2	0	-128 T_c	-	-
3	0	-170 T_c	-85 T_c	-
4	0	-128 T_c	-64 T_c	-192 T_c

4 性能仿真分析

基于MATLAB数值仿真平台,本节评估CSD取值方案的性能以及基于IEEE 802.11aj标准的MIMO-OFDM系统在45GHz频段下的通信性能。仿真过程通过设置不同的信噪比(Signal-to-Noise Rate, SNR)来统计传输的误帧率(Frame Error Rate, FER)。仿真场景设定为会议室,信道模型为视距(Line-Of-Sight, LOS)模型,发射机和接收机之间的距离为10m,信道多径数为15,最大时延扩展为60ns。本节仿真均在接收端理想同步的前提下进行,同时信道估计为理想信道估计。仿真参数设定如表4所示:

表4 仿真参数设定
Tab.4 Parameters set for simulation

仿真参数	参数取值
符号速率	660MHz
子载波总数	256
数据子载波数	168
导频子载波数	8
循环前缀长度	64
数据帧长度	4096 字节
SNR 步进值	1dB

4.1 CSD 取值方案性能分析

考虑CSD取值方案在发射天线为2,接收天线为1的系统下的性能。系统带宽为540MHz, MCS取1和3。仿真结果如图5所示:当MCS=1,系统误帧率为 10^{-1} 时,与单输入单输出(Single-Input Single-Output, SISO)系统相比,CSD传输方案可以获得1.3dB左右的性能增益,而基于Alamouti算法的ST-

BC在相同的天线配置下几乎没有获得额外的性能增益;当MCS=3,系统误帧率为 10^{-1} 时,与SISO系统相比,CSD传输方案可以获得1dB左右的性能增益,而STBC在相同的天线配置下可以获得2dB左右的性能增益。可见,CSD取值方案可以在低MCS(MCS=1)下实现接近于STBC的性能;而在高MCS(MCS=3)下,CSD取值方案与STBC相比有一定的性能损失,但CSD的系统实现复杂度较低。

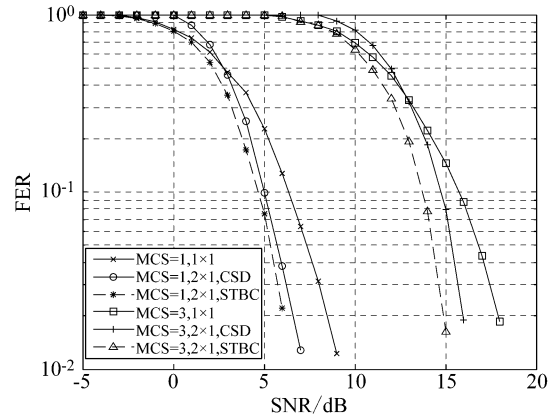


图5 CSD 误帧率性能曲线

Fig.5 Frame error rate curve of CSD

4.2 系统在各MCS下的性能分析

单个空间流情况下,系统在各MCS下的误帧率性能曲线如图6所示。从仿真结果可以看到:QPSK与BPSK相比,在相同的编码速率下($R=1/2$),误帧率性能相差约为3dB,这与无编码的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道下的结果一致。随着MCS的增加,系统的误帧率性能逐渐下降,这是由LDPC码率的增高和调制阶数的增高,导致抵抗噪声和信道衰落能力下降所引起的。

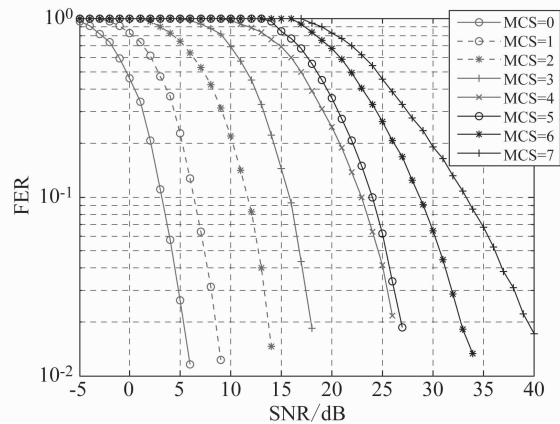


图6 单个空间流系统误帧率性能曲线

Fig.6 Frame error rate curve for single stream system

单个空间流情况下,系统在各 MCS 下的吞吐率性能曲线如图 7 所示。从仿真结果可以看到:随着 MCS 的增加,系统吞吐率的峰值不断增加;相同 MCS 曲线下,系统吞吐率随着 SNR 的增加逐渐增加,并且在误帧率为 0 后趋于稳定。在发射功率最大为 20dB 的限制下,若要求系统的 PER 到 10^{-1} ,则系统能够支持最高为 MCS=3 的调制编码方式,此时系统可以达到的最高吞吐率为 693Mbps。

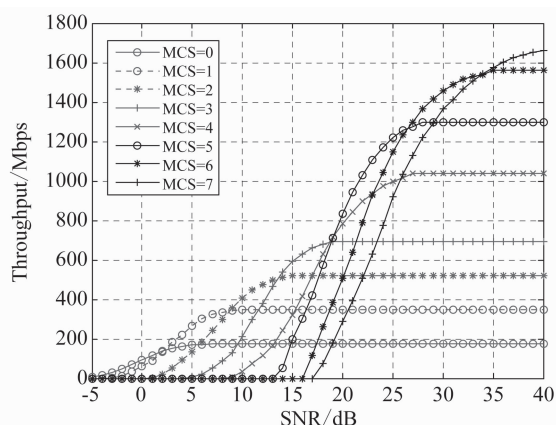


图 7 单个空间流系统吞吐率性能曲线

Fig. 7 Throughput curve for single stream system

5 结论

基于 IEEE 802.11aj 标准,本文简要介绍了 MIMO 通信系统模型和设计了毫米波 MIMO 系统的发射装置。并且,在相应的信道模型下,对系统的通信性能进行了仿真和评估。本文还介绍了一种新的适用于 IEEE 802.11aj 标准的循环移位分集方案,在不增加接收端额外复杂度的前提下可以获得较好的性能增益。本文的仿真结果和结论对 IEEE 802.11aj 标准的发展和完善的具有一定的参考价值。

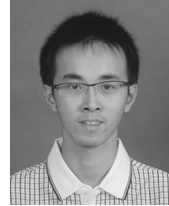
参考文献

- [1] Xu H H, 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.
- [2] 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.
- [3] IEEE P802.11 Task Group ad. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications [S]. 2010.
- [4] 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.
- [5] Saleh A A M, Valenzuela R A. A statistical model for indoor multipath propagation [J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 1987, 5: 128-137.
- [6] Maltsev A, Erceg E, Perahia E. Channel models for 60 GHz WLAN systems [R]. IEEE 802.11 TGad Technology Report 10/0334r08, 2010: 4-11.
- [7] Witrisal K, Kim Y H, Prasad R. Antenna diversity for OFDM using cyclic delays [J]. Benelux: Roc. SCVT-2001, 2001, 10: 13-17.
- [8] Chang Hsien-wen, Wang Li-chun. Achieving arbitrary multiplexing rates for MIMO-OFDM systems by hybrid cyclic delay diversity [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(3): 1072-1079.
- [9] Gustafson C, Haneda K, Wyne S, et al. On mm-Wave Multipath Clustering and Channel Modeling [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(3): 1445-1455.
- [10] Haneda K, Gustafson C, Wyne S. 60 GHz spatial radio transmission: Multiplexing or beamforming? [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(11): 5735-5743.
- [11] Artemenko A, Maltsev A, Mozharovskiy A, et al. Millimeter-Wave Electronically Steerable Integrated Lens Antennas for WLAN/WPAN Applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(4): 1665-1671.
- [12] Li Qiang, Yan Qing, Teh K C, et al. A multi-relay-selection scheme with cyclic delay diversity [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 63(4): 349-352.
- [13] Chen Yu-fan, Sheen Wern-ho, Wang Li-chun. Optimization of cyclic-delay diversity aided frequency-selective scheduling in OFDMA downlink systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(4): 1645-1659.
- [14] Kim Y J, Kim H Y, Rim M, et al. On the optimal cyclic delay value in cyclic delay diversity [J]. IEEE Transactions Broadcast, 2009, 55(4): 790-795.

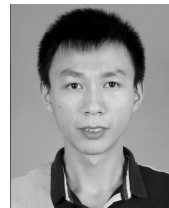
- [15] Chen Y F, Sheen W H. A GA-based optimization for frequency selective scheduling in downlink OFDMA systems with cyclic-delay diversity [C] // in Proc. IEEE WCNC, 2012, 4: 1257-1262.
- [16] Sun Song-lin, Rong Bo, Ju Yan-hong. Covert OFDM transmission using CDD based frequency selective channel [C] // Communication and Information System Security Symposium, 2013: 701-705.
- [17] Li Wei-duo, Jang Jung-yup, Kim Dong-hu, et al. Relay cyclic delay diversity based on SFBC-OFDM systems [C] // ICT Convergence (ICTC), 2013: 596-597.
- [18] Hur S H, Rao B D. Sum rate analysis of a reduced feedback OFDMA downlink system employing joint scheduling and diversity [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(2): 862-876.
- [19] 李丹, 柯峰. 一种基于基扩展模型的 OFDM 频域快时变信道估计方法 [J]. 信号处理, 2012, 28(2): 194-199.
Li Dan, Ke Feng. BEM Based Frequency Domain Fast Time Varying Channel Estimation Method for OFDM Systems [J]. Signal Processing, 2012, 28(2): 194-199. (in Chinese)
- [20] Razak N A, Said F, Aghvami A H. Performance of relay cyclic delay diversity in multicarrier system [J]. IEEE Personal, Indoors and Mobile Radio Communications, 2009: 2025-2029.
- [21] Deneire L, Vandenameele P, Perre L, et al. A Low-Complexity ML Channel Estimator for OFDM [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 51(2): 135-140.
- [22] Okada M, Komaki S. Pre-DFT Combining Diversity Assisted COFDM [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2001, 50(2): 487-496.
- [23] Edfors O, Sandell M, Wilson S K, et al. OFDM channel estimation by singular value decomposition [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(7): 931-939.
- [24] Jing Y, Jafarkhani H. Single and multiple relay selection schemes and their achievable diversity orders [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1414-1423.

- [25] Bauch G, Malik J. Cyclic delay diversity with bit-interleaved coded modulation in orthogonal frequency division multiple access [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(8): 2092-2100.

作者简介



陈鹏 男, 1989 年生, 江苏盐城人, 东南大学信息科学与工程学院硕士研究生, 主要研究领域为无线局域网通信信号处理。E-mail: topcp@sina.com



缪小龙 男, 1988 年生, 江苏南通人, 东南大学信息科学与工程学院硕士研究生, 主要研究领域为 MIMO 通信、无线局域网。

E-mail: miaoxiaolong2007@126.com



何世文 男, 1978 年出生, 湖南郴州人, 博士, 东南大学毫米波国家重点实验室博士后, 主要研究方向为多输入多输出通信、协作通信、绿色通信、大规模多输入多输出通信、毫米波通信无线局域网通信技术和优化理论。

E-mail: shiwenhe@seu.edu.cn



黄永明 男, 1977 年生, 江苏吴江人, 东南大学信息科学与工程学院教授, 博导, 主要研究领域为 MIMO 通信、协作通信和卫星移动通信。

E-mail: huangym@seu.edu.cn



杨绿溪 男, 1964 年生, 东南大学信息科学与工程学院教授, 博导, 主要研究领域为移动通信中的 MIMO 空时信号处理、中继协作通信与网络编码、盲信号处理与阵列信号处理。

E-mail: lxyang@seu.edu.cn