

# 高速移动通信环境下 OFDM 与 SC-FDE 的系统性能研究\*

马振国,任进,耿捷,巴德凯  
(北方工业大学 信息工程学院,北京 100144)

**摘要:** 构建了正交频分复用系统 (OFDM) 和单载波频域均衡系统 (SC-FDE), 且 OFDM 与 SC-FDE 都运用训练字控制系统。在 OFDM 系统中, 应用 802.11p 无线局域网物理层标准并考虑同样标准参数到 SC-FDE 里, 使用 1/2 卷积码和 4QAM、16QAM 调制。仿真结果表明, 在 4QAM 情况下, OFDM 性能略好于 SC-FDE; 而在 16QAM 情况下, OFDM 性能大优于 SC-FDE。此外, OFDM 和 SC-FDE 在移动速度增大的同时, 两者错误等级都随之增高。

**关键词:** 单载波; OFDM; SC-FDE; 802.11p

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)03-0058-03

## Performance evaluation of OFDM and SC-FDE in high speed mobile environment

Ma Zhenguo, Ren Jin, Geng Jie, Ba Dekai  
(College of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** This paper considers the link-level performance of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) and single-carrier (SC) transmission with frequency domain equalizer (FDE) in mobile environment. Both the OFDM and SC-FDE use the physical layer specifications for application to train control system. It will apply 802.11p wireless LAN specifications for OFDM and will consider similar parameter sets for SC-FDE transmission. It uses a convolutional code of rate 1/2 for 4QAM and 16QAM to modulate. The simulation results for 4QAM show that OFDM is slightly better than SC-FDE, while the results for 16QAM show that OFDM is much better than SC-FDE. On the other hand, both OFDM and SC-FDE show that their error level get higher while their mobile speed is increasing.

**Key words:** single carrier; OFDM; SC-FDE; 802.11p

在对抗多径衰落信道方面, 基本的传输技术可以分为多载波和单载波两大类。在多载波传输技术中, 最具代表性的是 OFDM 技术, 它通过 IFFT 变换将数据符号调制到一组正交的子载波上。在单载波传输技术中, 需要在接收端采用均衡器来消除码间干扰的影响, 均衡可以在时域进行, 也可以在频域进行, 相应的系统分别称为单载波时域均衡系统 SC-TDE (Single Carrier Time Domain Equalization) 和单载波频域均衡系统 SC-FDE (Single Carrier Frequency Domain Equalization)。目前的移动通信系统采用时域均衡来克服码间干扰 (ISI), 但

是时域均衡的复杂度随着传输速率的提高而快速递增, 所以普遍认为时域均衡单载波调制技术不能满足下一代移动通信的需要<sup>[1]</sup>, OFDM 将取而代之。OFDM 技术由于采用了特殊的信号处理方式, 对抗多径衰落的能力无与伦比, 而大规模集成电路技术又保证了其硬件的可实现性, 其复杂度基本上随着传输速率的提高而线性增长。但是 OFDM 也有相位噪声和频偏特别敏感以及峰平比 PAPR 大的缺点<sup>[2-3]</sup>。单载波频域均衡系统综合了 OFDM 系统和单载波时域均衡系统的优点, 在复杂度和性能方面采取了折衷设计。因此, 近年来针对单载波频域均衡的研究越来越多。本文构建了正交频分复用系统

\* 基金项目: 北方工业大学大学生科技活动资助项目

# 网络与通信

Network and Communication

(OFDM)<sup>[4]</sup>和单载波频域均衡系统(SC-FDE)<sup>[5]</sup>,在高速移动环境下应用 802.11p 无线局域网物理层标准比较两者的性能。

## 1 OFDM 系统

在发送端,二进制信息输入数据经过调整后,经过串并转换和快速傅里叶反变换 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)把长度为  $N$  的频域数据  $X(k)$  变成时域数据  $x(n)$ :

$$x(n)=\text{IFFT}\{x(k)\}=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}X(k)e^{j2\pi kn/N},0\leq k\leq N-1 \quad (1)$$

接收到的信号可表示为:

$$y(n)=x(n)\otimes h(n)+v(n),n=0,1,\dots,N-1 \quad (2)$$

其中, $\otimes$ 表示卷积, $h(n)$ 是信道的冲激响应, $v(n)$ 为加性高斯白噪声(AWGN)。

$$h(n)=\sum_{i=0}^{L-1}a_i\delta(n-\tau_i) \quad (3)$$

其中, $L$ 为信道的多径数, $a_i$ 是第  $i$  径的复信道, $\tau_i$ 是第  $i$  径的复信道延时。

在接收端,假定理想同步,通过去除循环前缀 CP(Cyclic Prefix),快速傅里叶变换 FFT(Fast Fourier Transform)解调,得到频域信号为:

$$Y(K)=X(K)H(K)+W(K),0\leq K\leq N-1 \quad (4)$$

## 2 SC-FDE 系统

### 2.1 系统结构

SC-FDE 系统发送的是调制后的高速率单载波信号,接收端通过 FFT 和 IFFT 变换来实现频域均衡,实际上是对接收信号的频域分析。

在发射端,数据符号经过串并变换成长度为  $N$  的帧,将每帧的最后  $N_g$  个符号复制到帧头作为 CP,形成长度为  $N+N_g$  的数据块。然后经过并串变化通过多径衰落信道和高斯白噪声信道到达接收端。

在接收端,对接收到的数据块进行删除循环前缀的操作,然后使用 FFT 将信号变换到频域,在频域经过均衡处理后,再通过 IFFT 操作变换回时域进行判决,得到重建的数据符号。

设每  $N$  个映射后的码元  $x_n$  组成一个传输数据块(符号),信道冲激响应为  $h(n)$ ,令符号的码元数小于信道冲激响应为:

$$y_n=h_n\otimes x_n+v_n,n=0,1,\dots,N-1 \quad (5)$$

其中, $v_n$ 为 AWGN,其方差为  $\sigma_n^2$ ,噪声的特征变量相互独立, $\otimes$ 为卷积符号。FFT 将信号变换到频域,可表示为:

$$Y_k=X_kH_k+V_k,k=0,1,\dots,N-1 \quad (6)$$

其中, $H_k$ 、 $V_k$ 分别是信道的频率响应和噪声的傅里叶变换,假设同步和信道估计都是理想的,进行频域均衡以后,得到:

$$Z_k=W_kY_kH_k+W_kV_k \quad (7)$$

$W_k$ 为频域滤波器的系数,判决前的信号为:

$$z_n=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}W_kY_kH_k e^{j\frac{2\pi}{N}kn}+\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}W_kV_k e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (8)$$

### 2.2 采用的均衡算法

单载波系统一般通过训练字对信道响应进行估计,并通过某种自适应算法不断更新均衡器的系数以跟踪信道的变化。根据自适应均衡器的输出是否被用于反馈,均衡技术通常可以分为线性均衡和非线性均衡两类。线性均衡器相对简单,如图 1 所示,信道衰弱不严重时可以较好地消除信道影响。最小均方误差(MMSE)均衡要求判决值和期望值的均方差最小,MMSE 均衡器的系数为<sup>[5-6]</sup>:

$$W_k=\frac{H_k^*}{|H_k|^2+\sigma_n^2/P} \quad (9)$$

其中, $H_k^*$ 是  $H_k$  的共轭, $P$ 是信号的功率。该准则的补偿加入了信噪比的修正项。



图 1 均衡器结构图

## 3 仿真结果及其分析

在仿真过程中的多普勒参数为:移动台的移动速度为  $V=150\text{ km/h}=41.7\text{ m/s}$ ,载频  $f_c=2\times 10^9\text{ Hz}$ ,光速  $C=3\times 10^8\text{ m/s}$  则通过公式  $f_d=f_c\cdot\cos\theta\cdot V/C$  计算,得到最大多普勒频移  $f_d(\max)=2\times 10^9\times 41.7/(3\times 10^8)=278\text{ Hz}$ 。 $\cos\theta=1$  时取最大值。同时可以求出速度  $V$  为  $30\text{ km/h}$ 、 $60\text{ km/h}$  时的最大多普勒频移  $f_d(\max)$  分别为  $55.6\text{ Hz}$  和  $111\text{ Hz}$ 。OFDM 系统与 SC-FDE 系统都采用了最小二乘 LS (Least-Square) 信道估计方法。OFDM 与 SC-FDE 系统仿真参数如表 1 和表 2 所示。信道参数如表 3 所示。

表 1 OFDM 参数

参数	值
频带宽度	10 MHz
RMS 延时扩展	0.3 $\mu\text{s}$
循环前缀	1.6 $\mu\text{s}$
TTFT	6.4 $\mu\text{s}$
FFT 大小	64
采样率	10 MS/s
有用子载波	52 (4 导频)
使用频带宽度	8.125 MHz
信道估计方法	LS

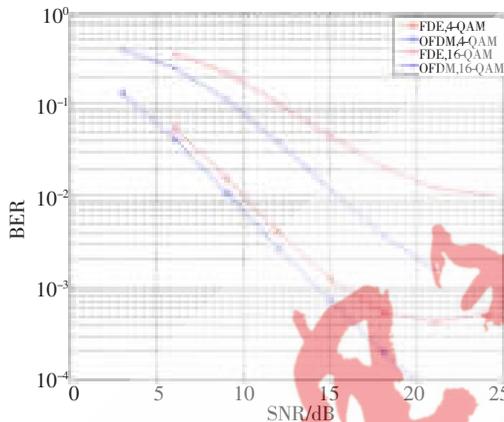
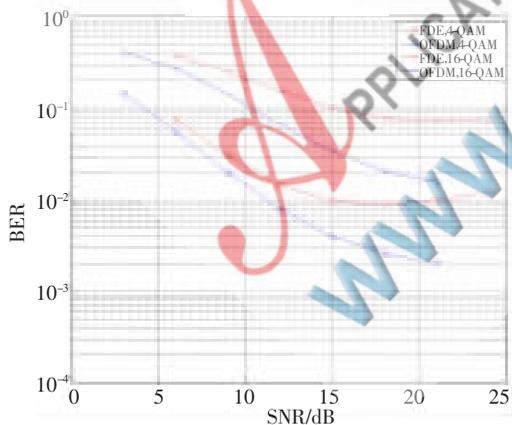
表 2 SC-FDE 参数

参数	值
频带宽度	10 MHz
RMS 延时扩展	0.3 $\mu\text{s}$
最大延时扩展	1.5 $\mu\text{s}$
滚降系数	0.25
符号速率	8 MS/s
FFT 大小	64
循环前缀	16
信道估计方法	LS

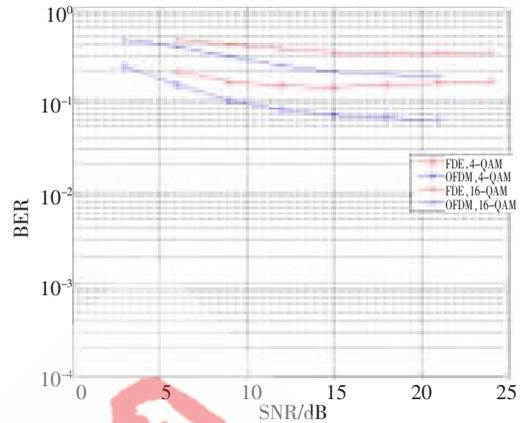
表 3 信道参数

路径	相对时延/ $\mu\text{s}$	平均功率/dB
1	0	0
2	0.2	-2.5
3	0.4	-5
4	0.6	-7.5
5	0.8	-10
6	1.0	-12.5
7	1.2	-15
8	1.4	-17.5

从图 2 可以看出,在移动速度  $V=30\text{ km/h}$  时,OFDM 和 SC-FDE 系统误码性能较好;从图 3 可以看出,当  $V=60\text{ km/h}$  时,系统误码率增高;从图 4 可以看出,当  $V=150\text{ km/h}$  时,系统误码率性能明显变差,即随着移动速度  $V$  的增加,系统抗多普勒频移的能力大大下降了,且 OFDM 的性能优于 SC-FDE 性能。在 4QAM 情况时,OFDM 略优于 SC-FDE,在 16QAM 情况时,OFDM 误码率大优于 SC-FDE。

图 2 OFDM 与 SC-FDE 性能比较 ( $V=30\text{ km/h}$ )图 3 OFDM 与 SC-FDE 性能比较 ( $V=60\text{ km/h}$ )

多普勒效应是无线通信系统中普遍存在但又难解决的问题,尤其是对应于高速移动环境下的 OFDM 和 SC-FDE 系统来说。本文通过仿真实现了在训练序列控制下的 OFDM 和 SC-FDE。应用 802.11p 物理层标准,比较 OFDM 与 SC-FDE,随着移动速度增大性能下降,在 4QAM 时,OFDM 略优于 SC-FDE,在 16QAM 时,OFDM

图 4 OFDM 与 SC-FDE 性能比较 ( $V=150\text{ km/h}$ )

误码率大优于 SC-FDE。

## 参考文献

- [1] GODARA L C. Application of antenna arrays to mobile communications Part II: Beam-forming and direction-of-arrival Considerations[J]. Proceedings of the IEEE, 1997,85(8):1195-1245.
- [2] SPENCER Q H, SWINDLEHURST A L, HAARDT M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004,52(2):461-471.
- [3] MONSEN P. MMSE equalization of interference on fading diversity channel [J]. IEEE Transactions on Communication, 1984,32(1):5-12.
- [4] BOLCSKEI H, GESBERT D, PAULRAJ A J. On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002,50(2):225-234.
- [5] FALCONER D, ARIYAVISITAKUL S L, BENYAMIN-SEEYAR A, et al. Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems[J]. IEEE Transactions on Communication, 2002,40(4):58-66.
- [6] BELFIORE C A, PARK J H. Decision feedback equalization[J]. Proceedings of the IEEE, 1979,67(8):1143-1156.

(收稿日期:2012-08-09)

## 作者简介:

马振国,男,1989年生,本科,主要研究方向:移动通信宽带技术。

任进,男,1983年生,博士,讲师,主要研究方向:无线通信及关键技术。