

# 复杂电磁环境下 IEEE802.11g 系统中 OFDM 信号仿真

刘高辉, 王恒超

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

**摘要:** 为了更好地研究动态多场景下传播环境对 OFDM 系统中信号的影响, 对复杂环境下 IEEE802.11g 中 OFDM 信号进行了仿真; 首先, 搭建了高速移动、多径传播以及同频干扰等因素对 OFDM 信号传输影响的数学模型; 其次, 在介绍了 OFDM 发射信号和接收模型的基础上, 分析了 IEEE802.11g 设备面临的复杂信号环境; 最后, 仿真并分析了复杂环境对 OFDM 通信系统性能的影响; 结果表明高速移动、多径传播以及同频干扰等复杂环境会引起 OFDM 系统性能的恶化; 模型不仅可以研究复杂环境对 OFDM 信号性能的影响, 还可以作为下一步 OFDM 系统性能提升的验证平台, 具有一定的实用性。

**关键词:** IEEE802.11g; 正交频分复用; 仿真; 复杂电磁环境

## Simulation of OFDM Signal in IEEE802.11g System under Complex Electromagnetic Environment

Liu Gaohui, Wang Hengchao

(College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to better study the influence of propagation environment on the signal in OFDM system in dynamic multi-scenario, the OFDM signal in IEEE802.11g under complex environment is simulated. First of all, a mathematical model of the influence of high-speed mobile, multipath propagation and co-channel interference on OFDM signal transmission is set up. Secondly, based on the introduction of the OFDM transmission signal and reception model, the complex signals that IEEE802.11g equipment faces Environment. Finally, the influence of complex environment on the performance of OFDM communication system is simulated and analyzed. The results show that the complex environment of high-speed mobile, multipath propagation and co-channel interference will cause the degradation of OFDM system performance. The model not only can study the influence of complex environment on the performance of OFDM signal, but also can be used as the verification platform for the performance improvement of OFDM system in the future, which is of certain practicality.

**Keywords:** IEEE802.11g; OFDM; simulation; complex electromagnetic environment

### 0 引言

近年来, 随着无线通信技术和计算机技术的快速发展, IEEE802.11 系列协议已经成为无线局域网的主要标准。自从 1991 年推出 IEEE802.11b 和 IEEE802.11a 以来, 由于两者各有所长但却互不兼容, 因此争论不断<sup>[1]</sup>。在这种情况下, 推出了结合 IEEE802.11a 和 IEEE802.11b 两者各自优点的 IEEE802.11g 协议标准, IEEE802.11g 运行在 2.4 GHz 频段, 既实现了较高的传输数据速率也实现了与 IEEE802.11b 产品的兼容。IEEE802.11g 主要的调制技术有: 补码键控 (CCK) 和正交频分复用 (OFDM) 技术等。但是, 面对用户对数据速率不断地增加的需求, CCK 的数据速率比较低, 因此 CCK 调制方式<sup>[2]</sup>已经无法满足用户需求。因此, 本文主要研究 IEEE802.11g 中使用的 OFDM 技

术。在许多运动场景中, 由于发射端和接收端之间相对的高速移动, 导致无线信道的时变特性更加明显, 高速移动引起的多普勒效应会导致多普勒频偏<sup>[3]</sup>, 会破坏 OFDM 系统子载波之间的正交性<sup>[4]</sup>, 出现明显的载波间干扰 (ICI)<sup>[5]</sup>。无线信道不像有线信道固定且对信号影响可预见, 由于信号在无线信道传输的过程中会遇到楼宇、树木等各种障碍物以及起伏的地形, 所以接收端接收的信号不是单一路径的信号而是许多经过不同路径信号叠加的总和, 每条经过不同路径的信号到达接收端的时间和相位均不相同, 引起接收信号的幅度发生剧烈变化而产生多径衰落。由于无线通信设备越来越多, 频谱这种不可再生资源也越来越紧张, 多个系统共用同一频段的情况越来越普遍, 特别是 IEEE802.11g 工作的 2.4 GHz 频段, 由于该频段是全球免牌照频段, 可以免费使用, 例如无线城市的 Wi-Fi 系统、医用微波治疗仪、微波炉和 2.4 G 无绳电话等, 在这种情况下出现相互干扰就不可避免了。文献 [6] 中构建基于 Simulink 的基带 OFDM 无线通信系统的仿真模型, 研究了不同信道以及不同长度的保护间隔时 OFDM 系统的误码率变化

收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-03-12。

基金项目: 国家自然科学基金(61671375)。

作者简介: 刘高辉(1968-), 男, 陕西西安人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事通信信号处理和雷达信号处理方向的研究。

情况。文献 [7] 中构建了高速移动环境下的 OFDM 仿真系统模型, 通过选择合适的时变信道参数, 研究了发射端或者接收端在不同移动速度的情况下引起的多普勒效应对系统性能的影响。文献 [8] 对时变多径衰落信道下的 OFDM 系统性能进行了分析与研究。目前, 还未见到文献对综合高速移动、多径效应、同频干扰等多个复杂环境下 IEEE802.11g 中 OFDM 信号进行过仿真。因此, 为了研究多场景复杂电磁环境下 OFDM 系统的性能, 本文通过搭建复杂环境下 OFDM 系统的仿真模型, 通过该模型不仅可以研究高速移动产生的多普勒频移、无线信道障碍物引起的多径效应以及同频干扰等复杂环境对 OFDM 系统性能的影响, 还可以作为今后 OFDM 系统性能进一步提升的实验和验证平台。

## 1 复杂环境下 OFDM 系统的信号模型

### 1.1 发射端等效基带信号

OFDM 技术是一种多载波调制技术, 其主要思想是在频域将信道划分成许多正交子信道, 将高速数据信号转换成并行的  $N$  路低速子数据流<sup>[9]</sup>, 在  $N$  个相互正交的载波上进行传输, 如果某一个子载波在某一频率处取得频率的最大值, 则其余子载波在此处的频率取值为零。解调的过程就是计算每一个子载波频率谱取值最大的地方, 只需要确定所有子载波在频率上不要出现移动情况, 就能够从合成的信号中无差错的解调出每一个信道上传输的信号, 并且不会因其他信道上调制信号的干扰而造成误码<sup>[10]</sup>。

在实际系统中, OFDM 技术的调制和解调是通过 IFFT (逆快速傅里叶变换) 和 FFT (快速傅里叶变换) 来实现的, 发射端的 OFDM 等效基带信号表示为<sup>[7]</sup>:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} d_i e^{j\omega_i t} \quad (0 \leq t \leq T) \quad (1)$$

式中,  $N$  表示子载波个数;  $T_s$  表示采样周期;  $T$  表示 OFDM 符号周期;  $d_i$  ( $i=0, 1, \dots, N-1$ ) 表示第  $i$  个子信道的数据符号;  $\omega_i = 2\pi f_i = 2\pi (f_0 + i * \Delta f)$  表示第  $i$  个子载波的载波角频率, 子载波间隔为  $\Delta f = 1 / (N * T_s) = 1 / T$ , 为了方便公式推导, 令  $f_0 = 0$ 。

### 1.2 多径传播与高速移动因素

在无线移动通信中, 由于传输路径中障碍物或者地势的起伏而引起信号在传输过程中发生散射、绕射或者反射等现象<sup>[11]</sup>, 使得发射端信号通过不同的传输路径到达接收端, 因此接收端接收到的信号是发射端信号在无线传输中经不同时延的多路径信号叠加的总和。再加上发射端和接收端之间的相对移动, 还加入了多普勒效应, 使多径衰落具有时变性。无线时变衰落信道的冲激响应可表示为:

$$h(t, \tau) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{p=1}^{N_p} a_p \delta(\tau - \tau_p) e^{j2\pi f_d \tau} \quad (2)$$

式中,  $f_{Dp}: 0 < f_{Dp} < F_D$ ;  $\tau_p: 0 < \tau_p < \tau_{\max}$ ;  $F_D$  表示最大多普勒频移,  $\tau_{\max}$  表示多径传输的最大时延,  $N_p$  表示多径径数。

式 (2) 对  $\tau$  作 FFT 变换, 得时变无线衰落信道传输函数为:

$$H(t, \omega) = \frac{1}{N_p} \sum_{p=1}^{N_p} a_p e^{-j\omega \tau_p + j\omega \tau} \quad (3)$$

式中,  $\omega_{Dp} = 2\pi f_{Dp}$ ,  $\omega$  的取值与  $\omega_i$  ( $i = 0, 1, \dots, N-1$ ) 相同。

OFDM 信号  $S(t)$  经过  $H(t, \omega)$  函数后的信号可表示为:

$$\begin{aligned} y(t) &= s(t) * h(t, \omega) = \frac{1}{\sqrt{NN_p}} \sum_{p=1}^{N_p} a_p e^{-j\omega \tau_p + j\omega \tau} \sum_{i=1}^{N-1} d_i e^{j\omega_i t} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{NN_p}} \sum_{p=1}^{N_p} a_p e^{j\omega \tau} \sum_{i=0}^{N-1} d_i e^{j\omega_i (t - \tau_p)} \approx \\ &= \frac{1}{\sqrt{NN_p}} \sum_{p=1}^{N_p} a_p s(t - \tau_p) e^{j\omega \tau} \end{aligned} \quad (4)$$

### 1.3 同频干扰因素

研究干扰信号对 OFDM 信号的影响。按照信号频率, 通常将干扰信号分成非同频干扰信号和同频干扰信号<sup>[12-14]</sup>, 为了研究更具体, 本文只研究同频干扰信号对 OFDM 信号的影响。本文选取 BPSK 信号作为同频干扰信号, 由于表示 BPSK 信号的两种码元的波形相同, 相位相反, 故 BPSK 信号在时域中表示为一个双极性全占空矩形脉冲序列与一个正弦载波的乘积, 即:

$$e_{BPSK}(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s) \cos \omega t \quad (5)$$

式中,  $g(t)$  表示脉冲宽度为  $T_s$  的单个矩形脉冲,  $a_n$  的统计特性为:

$$a_n = \begin{cases} 1 & \text{概率为 } p \\ -1 & \text{概率为 } 1 - p \end{cases} \quad (6)$$

因此考虑高速移动、多径传播和同频干扰等因素之后接收端的信号可表示为:

$$\begin{aligned} y'(t) &= \frac{1}{\sqrt{NN_p}} \sum_{p=1}^{N_p} a_p s(t - \tau_p) e^{j\omega \tau} + \\ &= \sum_n a_n g(t - nT_s) \cos \omega t + AWGN \end{aligned} \quad (7)$$

式中, 第一项为高速移动与多径传播之后的接收信号, 第二项为同频干扰信号, 第三项为高斯白噪声。

## 2 复杂环境下 OFDM 系统仿真框图

根据上文对 OFDM 的基本原理的分析和研究, 在 Matlab 环境下搭建了综合考虑考虑高速移动、多径传播以及同频干扰等复杂环境下 OFDM 系统的仿真框图, 如图 1。

在发射端, 对输入的数据经过卷积编码、交织、16QAM 调制、插入导频, 再通过  $N$  点的 IFFT 变换等步骤, 完成多载波调制, 然后再添加 CP (循环前缀), 之后经过上采样、成型滤波和上变频等, 最后进行模数变换使信号进入无线信道中进行传输。

在无线移动通信过程中, 信号在无线信道会受到高速移动、多径传播以及同频干扰信号等复杂环境的影响。为了研究不同复杂环境对 OFDM 信号的影响关系, 在传输过程中加入对应的影响因素。因为多普勒频偏的大小与发射

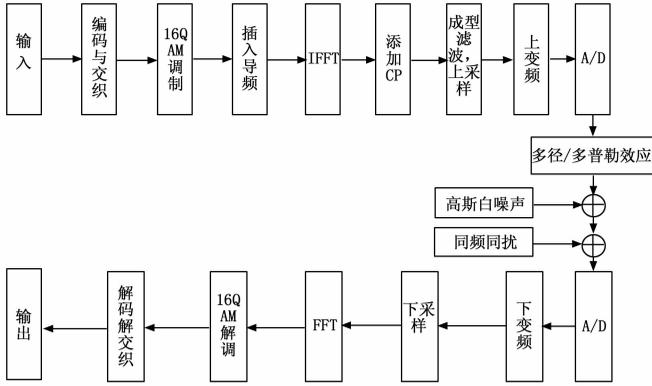


图 1 复杂环境下 OFDM 系统仿真框图

端和接收端之间的相对运动的速度有关, 设置不同的相对移动速度就可以模拟实际应用中由于快速移动而产生的多普勒频移对 OFDM 系统性能产生的影响。为了模拟多径传输环境, 在仿真模型中, 设有 1—5 条多径传输的有效路径, 可分别设定每一条路径的冲击响应幅值和归一化延迟时间 (时延值/采样间隔), 通过选取不同的径数和延迟时间来模拟实际应用中由于障碍物的遮挡而引起信号的散射、绕射和反射产生的多径效应。在临近接收端时, 附近的同频干扰信号会混入有用信号中一同进入接收端, 对 OFDM 信号形成干扰, 因此在信道中加入同频干扰信号。

在接收端, 信号在经过无线传输信道到达接收端之后进行数模转换、下变频等一系列与发射端相反的逆变换解调出原始信息。

### 3 仿真结果及分析

#### 3.1 仿真参数

根据图 1 的仿真框图并结合 IEEE802.11g 的基本参数规定, 给出 OFDM 系统仿真的参数, 如表 1 所示。

表 1 IEEE802.11g 中的 OFDM 主要参数

参数名	参数值
FFT/IFFT 点数	64
数据符号时间/ $\mu\text{s}$	3.2
循环前缀时间/ $\mu\text{s}$	0.8
OFDM 符号时间 $T/\mu\text{s}$	$3.2 + 0.8 = 4$
数据子载波数 $N_d$	48
导频子载波数 $N_p$	4
总子载波数 $N$	$N_d + N_p = 52$
子载波间隔 $\Delta f/\text{kHz}$	312.5
调制方式	16QAM

设定多径信道的最大时延扩展为 200 ns, 而 IEEE802.11 协议所规定的保护间隔 (即循环前缀) 的长度为最大时延扩展的 3~4 倍, 即最大为 800 ns。为了获得较高的数据传输速率, 802.11 协议规定 OFDM 符号长度为 4  $\mu\text{s}$  (其中 OFDM 数据符号时间为 3.2  $\mu\text{s}$ , 循环前缀时间为 0.8  $\mu\text{s}$ ), 又根据子载波间隔等于 OFDM 数据付好时间的

倒数, 决定了 802.11 系列协议子载波的间隔为 312.5 kHz。

#### 3.2 不同移动速度下的接收端星座图

对比高速移动环境和静态环境, 通信系统信号的不同点主要表现在存在较大的多普勒频移和信道时变上。多普勒频移是由多普勒现象引起的, 由于发射端和接收端之间的相对运动, 使得接收信号的频率相对发射端信号的频率变大或者变小。当接收端相对于发射端远离时, 接收到的信号频率会变小, 相反, 接收端的信号频率会变大, 多普勒频移也体现了无线通信系统中通信信号的时变性。多普勒频移和速度的关系:

$$f_d = \frac{vf_c}{C} \cos\theta \quad (8)$$

其中:  $C$  为光速,  $v$  为移动速度,  $f_c$  为载波频率,  $\theta$  为波到达方向和接收机移动方向的夹角 (设其为零)。

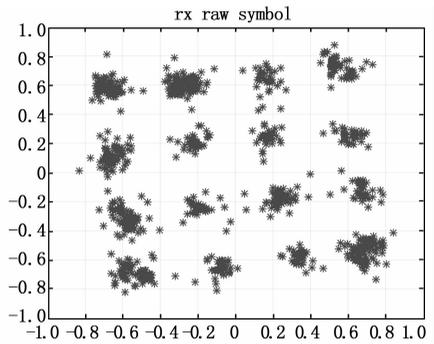


图 2 速度为 80 km/h 时的星座图

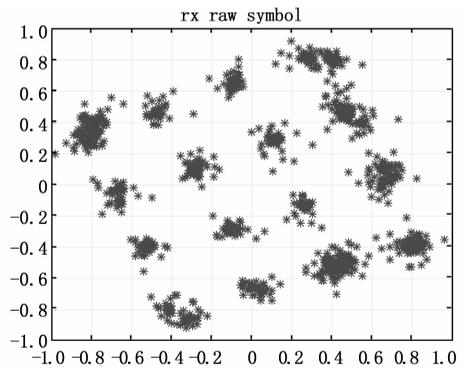


图 3 速度 120 km/h 时的星座图

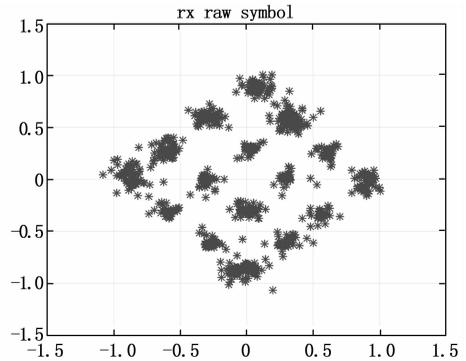


图 4 速度为 160 km/h 时的星座图

为了研究由于高速移动而引起的多普勒频移对

IEEE802.11g 中 OFDM 信号的影响, 根据式 (8), 本文分别仿真得到移动速度分别为 80 km/h、120 km/h 和 160 km/h 下的接收端的星座图。图 2—图 4 分别是在瑞利衰落信道下发射端和接收端相对移动速度分别为 80 km/h、120 km/h 和 160 km/h 下的接收端的星座图, 通过观察图 2—图 4, 可以得出: 发射端和接收端的相对移动引起的多普勒频移会导致接收端的星座图发生旋转。当发射端和接收端处于低速状态时 (80 km/h) 时, 接收端的星座图发生旋转较小, 随着发射端和接收端的相对移动速度不断的增加, 接收端的星座图旋转的角度越来越大。OFDM 系统在接收端能够正确解调是建立在子载波之间正交性上的, 当没有频率偏移时, OFDM 系统的各个子载波之间保持正交, 可以无差错的解调, 当由于发射端和接收端之间存在相对运动时, 产生多普勒频移, 破坏子载波间的正交性, 引起载波间干扰, 从而导致系统性能的下降。因此, 根据仿真得到的结果表明随着接收端和发射端之间的移动速度越来越大, IEEE802.11g 中的 OFDM 信号受多普勒频移的不利影响也随之变大, 因此, 在今后的研究工作中需要采用分集、信道估计的技术来减少高速移动对 IEEE802.11g 中的 OFDM 信号的影响。

### 3.3 不同路径数下的接收端星座图

无线通信的主要特征是多径传播和多径时延。同一发射端发射的信号由于多径传播的存在导致到达接收端的信号并不是单一信号而是许多具有不同时延和能量的信号的综合。为了研究不同路径条数对 IEEE802.11g 中的 OFDM 系统接收端信号的影响, 在保持移动速度 140 km/h 不变的情况下分别选取 1 径 (归一化延迟时间为 1  $\mu$ s)、3 径 (归一化延迟时间分别为 1, 2, 4  $\mu$ s) 和 5 径 (归一化延迟时间分别为 1, 2, 4, 5, 7  $\mu$ s) 三种情况观察接收端信号的星座图如图 5—图 7。

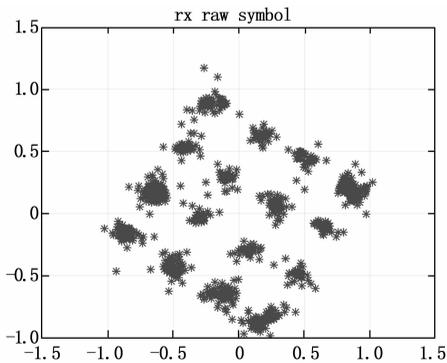


图 5 1 径接收端星座图

图 5 为单一路径时接收端的星座图, 对比图 6 (3 径) 和图 7 (5 径) 的接收端星座图的变化可以看出, 随着路径条数以及各路径延迟时间的增加, 接收端的星座点发生随机扩散, 且随着路径和各径延迟时间的增加随机扩散越来越明显, 从而导致 OFDM 系统的性能下降。图 7 显示的接收端星座图已经很模糊, 各个星座点已经无法辨识, 误码

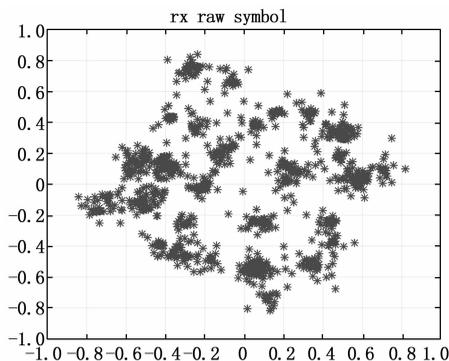


图 6 3 径接收端星座

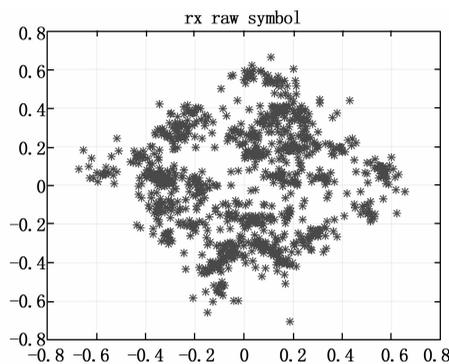


图 7 5 径接收端星座图

率极高。这表明多径传播和多径时延对 IEEE802.11g 中的 OFDM 信号有着明显的影响, 因此, 为了提高 OFDM 系统的性能, 在今后的仿真中需要加入信道均衡来消除多径传输和延迟对 OFDM 系统的不利影响。

### 3.4 同频干扰信号对有用信号的频谱影响

随着各种通信设备的爆发式增长, 同频干扰信号对有用信号的干扰越来越严重。为了研究同频干扰信号对 OFDM 系统的影响, 在无线信道中给有用信号加入同频干扰信号, 本文中取 BPSK 信号作为干扰信号来探究干扰信号对 OFDM 系统的影响。

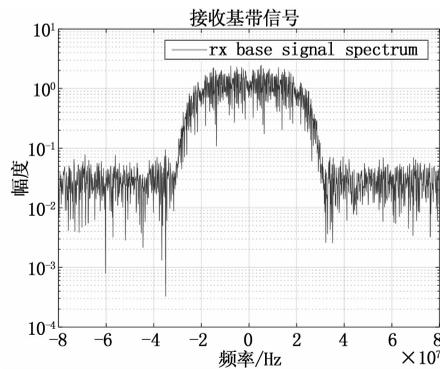


图 8 无干扰信号的接收端信号频谱

通过观图 8 和图 9 的频谱图变化, 由图可见, 在 OFDM 系统接收端加入以 BPSK 信号为同频干扰的信号以后, 由于 BPSK 信号在很窄的带宽内信号功率却远高于

