

OFDM 系统研究及其 Simulink 仿真

张天瑜

(无锡市广播电视大学 机电工程系, 江苏 无锡 214011)

摘 要: 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)是一种高效的多载波宽带数字调制技术,在无线通信系统中有较广泛的应用。通过对 OFDM 系统的基本原理以及该系统中各个模块的特点进行研究,用 Simulink 构建数字电视地面广播(Digital Television Terrestrial Broadcasting, DTTB)中的 TDS-OFDM 系统仿真模型。仿真结果表明, TDS-OFDM 系统的误码率较低,具有较强的抗多径衰落和频率选择性衰落能力。

关键词: 正交频分复用; Simulink 仿真; 多径效应; 码间干扰; 载波间干扰; 块间串扰; 奈奎斯特准则; 误码率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-1374(2008)06-0699-06

Research of OFDM system and Simulink simulation

ZHANG Tian-yu

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Wuxi Radio & Television University, Wuxi 214011, China)

Abstract: OFDM is an efficient multi-carrier broadband digital modulation technology, which is widely used in wireless communication system. First the basic principle of OFDM system and characteristics of the respective modules in OFDM system are studied, and then the simulation model of TDS-OFDM system in DTTB is established with Simulink. The simulation results show that the bit error rate of TDS-OFDM system is lower and it has the better ability of anti-multipath fading and anti-frequency selective fading.

Key words: OFDM; Simulink simulation; multipath effect; ISI; ICI; IBI; Nyquist criterion; bit error rate.

0 引 言

衡量通信系统好坏的一个重要因素就是频谱利用率,应尽可能用较少的频谱资源传送更多的数据。OFDM 是一种高效的多载波宽带数字调制技术,它将所要传送的高速串行数据分解到多个并行的正交子信道中,并将其调制在多路并行子载波上发送,从而使每个正交子信道的码元宽度大于信道时延,再通过添加循环前缀,保证

OFDM 系统不受多径效应引起的码间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI)、多普勒效应引起的载波间干扰(Inter-Carrier Interference, ICI)和块间串扰(Inter-Block Interference, IBI)的影响,它可以对抗多径衰落和频率选择性衰落,减少了无线信道对信号的影响,具有较高的频谱利用率。目前,OFDM 系统已逐渐应用于高速数字用户环路(High-speed Digital Subscriber Line, HDSL)、非对称数字用户环路(Asymmetric Dig-

收稿日期: 2008-08-15

作者简介: 张天瑜(1980-),男,汉族,江苏无锡人,无锡广播电视大学讲师,工程硕士,主要从事通信、控制、电工电子、小波方面的研究, E-mail: zhangty003@tom.com.

ital Subscriber Line, ADSL), 高清晰度电视 (High Definition Television, HDTV) 和数字电视地面广播 (Digital Television Terrestrial Broadcasting, DTTB) 以及第四代移动通信的标准中。预计 OFDM 必将取代码分多址 (Code Division Multiple Access, CDMA) 成为新一代宽带

无线移动通信的核心技术^[1-7]。

1 OFDM 系统的基本原理

OFDM 系统中信号调制和解调的原理框图如图 1 所示。

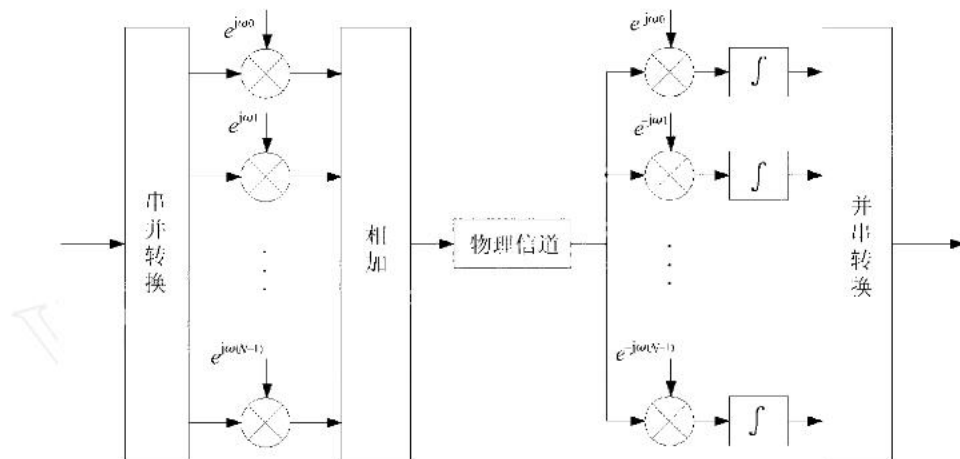


图 1 OFDM 系统中信号调制和解调的原理框图

一个 OFDM 信号由多个经过调制的子载波信号组成, 其中每个子载波的调制方式都可以选用相移键控 (Phase-Shift Keying, PSK) 或者正交

幅度调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM)。OFDM 系统发送端的信号可表示为^[8-9]:

$$s(t) = \begin{cases} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} d_i \operatorname{rect} \left[t - t_0 - \frac{T}{2} \right] \exp \left[j 2 \pi \left(f_c + \frac{i}{N} \right) (t - t_0) \right] \right\}, & t_0 \leq t \leq t_0 + T \\ 0, & t < t_0 \\ 0, & t > t_0 + T \end{cases} \quad (1)$$

式中: d_i ——分配给每个子信道的信号;

N ——子载波的个数;

rect ——矩形方波;

T ——OFDM 符号的时间宽度;

f_c ——第 1 个子载波的载波频率;

t_0 ——起始时刻。

对式(1)中的第 j 个子载波进行解调, 然后在 $t_0 \sim t_0 + T$ 这段时间内进行积分, 则 OFDM 系统接收端的信号可表示为:

$$\hat{d}_j = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \exp \left[-\frac{j 2 \pi j}{T} (t - t_0) \right] \times \sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp \left[\frac{j 2 \pi i}{T} (t - t_0) \right] dt \quad (2)$$

由于

$$\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \exp(j\omega_m t) \exp(-j\omega_n t) dt = \delta_{mn} = \begin{cases} 1, m = n \\ 0, m \neq n \end{cases} \quad (3)$$

所以

$$\hat{d}_j = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{N-1} \int_{t_0}^{t_0+T} d_i \exp \left[j \frac{2 \pi (i - j)}{T} (t - t_0) \right] dt = d_j \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 从理论上讲 OFDM 系统接收端的信号与发送端的信号是完全相同的, 但是由于噪声的存在, 所以接收端的信号与发送端的信号还是略有差异的。

离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 和离散傅里叶逆变换 (Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT) 的表达式分别为:

$$\operatorname{DFT}[x(n)] = X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{-j\omega n} \quad (5)$$

$$\operatorname{IDFT}[X(e^{j\omega})] = x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (6)$$

由式(4)~式(6)可以看出, 在 N 个子载波中 OFDM 的已调信号在第 i 个码元间隔内可以表示为:

$$\hat{d}_i = \sum_{l=0}^{N-1} X_i(l, t) \exp(j2\pi f_l t) \quad (7)$$

式中: $X_i(l, t)$ ——第 i 个码元间隔内所携带的信息。

将 $X(l)$ 取代 $X_i(l, t)$, 则 OFDM 的已调信号可表示为:

$$s(t) = \sum_{l=0}^{N-1} X(l) \exp(j2\pi f_l t) \quad (8)$$

对接收信号进行抽样, 抽样频率为 f_s , 利用 DFT 对抽样信号进行解调, 利用 N 点 DFT 可以计算出信号的第 k 个频谱分量为:

$$S(k\Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} s\left(\frac{n}{f_s}\right) \exp\left(-\frac{j2\pi nk}{N}\right) \quad (9)$$

式中: $\Delta f = \frac{f_s}{N}$ ——DFT 的分辨率;

$S(k\Delta f)$ ——第 k 个频谱分量;

$s\left(\frac{n}{f_s}\right)$ ——抽样信号。

将 $t = \frac{n}{f_s}$ 代入式(8), 可得:

$$s\left(\frac{n}{f_s}\right) = \sum_{l=0}^{N-1} X(l) \exp\left(\frac{j2\pi f_l n}{f_s}\right) \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 可得:

$$S(k\Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} X(l) \exp\left(\frac{j2\pi n f_l}{f_s}\right) \exp\left(-\frac{j2\pi nk}{N}\right) =$$

$$\sum_{l=0}^{N-1} X(l) \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(\frac{j2\pi n f_l}{f_s}\right) \exp\left(-\frac{j2\pi nk}{N}\right) = \sum_{l=0}^{N-1} X(l) \delta\left(\frac{f_l}{f_s} - \frac{k}{N}\right) \quad (11)$$

由式(11)可以看出, 当子载波的频率是解调用的 DFT 分辨率的整数倍时, 可以用 DFT 对信号进行解调。当子载波的频率 $f_l = \frac{k}{N} f_s$ 时, 由式(10)可得:

$$s\left(\frac{n}{f_s}\right) = \sum_{l=0}^{N-1} X(l) \exp\left(\frac{j2\pi n l}{N}\right) \quad (12)$$

由式(12)可知, 多载波已调信号的时域信号可以由 IDFT 计算得到。

由上述分析可以看出, OFDM 系统的多载波调制与解调可以分别由 IDFT/DFT 来代替。通过 N 点 IDFT 运算, 把频域信号变换为时域信号, 经过子载波调制之后, 发送到无线信道中。其中, 每一个 IDFT 的输出信号都是对连续的多个经过调制的子载波的叠加信号进行抽样所得, 在 OFDM 系统的实际应用中, 可以采用快速傅里叶逆变换/快速傅里叶变换 (Inverse Fast Fourier Transform/ Fast Fourier Transform, IFFT/FFT) 来实现 IDFT/DFT^[10]。其具体的实现过程如图 2 所示。

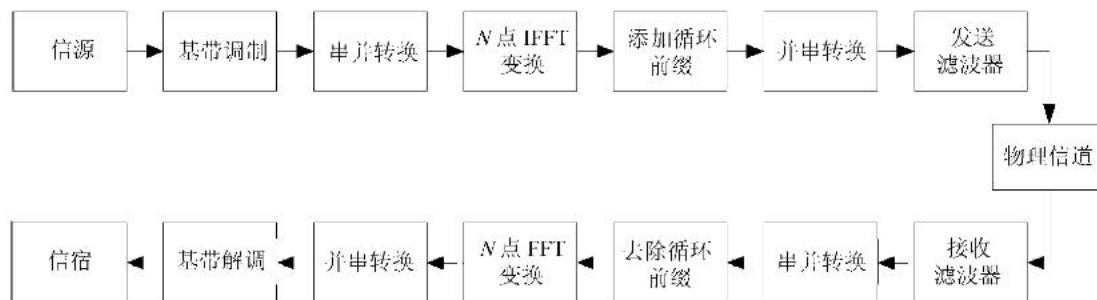


图2 OFDM 系统的实现框图

2 OFDM 系统的技术特点

OFDM 之所以能取代 CDMA, 成为新一代宽带无线移动通信的核心技术, 主要因为它具有以下的特点。

2.1 频谱利用率高

由于 FFT 处理使各子载波可以部分重叠, 理论上可以接近 Nyquist 极限, 并且可以实现各信号之间的正交性, 因此, 可以有效地避免码间干扰。这使 OFDM 系统可以实现很高的小区容量, 所以 OFDM 技术比频分复用 (Frequency Divi-

sion Multiplexing, FDM) 技术拥有更高的频谱利用率。FDM 与 OFDM 的频谱利用率情况分别如图 3 和图 4 所示。

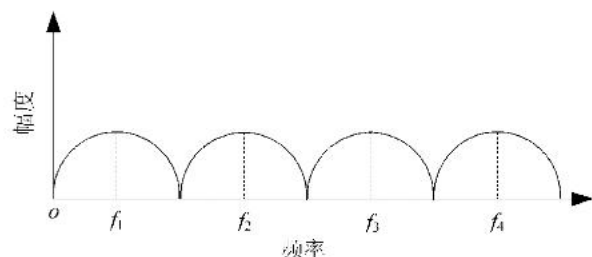


图3 FDM 的频谱利用率

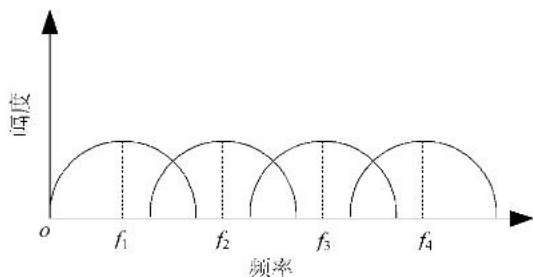


图 4 OFDM 的频谱利用率

2.2 抗多径衰落

由于传统单载波信号的多径均衡其复杂程度随着带宽的增大而急剧增加,很难支持宽带传输。而 OFDM 是一种多载波技术,它将宽带传输转化为许多个子载波上的窄带传输,每个子载波上的信道可以看作是水平衰落信道,从而达到抗多径衰落的目的。

2.3 高速传输数据

OFDM 的自适应调制机制可以使不同的子载波根据信道情况和噪音背景的不同使用相应的调制方式。当信道条件好的时候,采用效率高的调制方式;当信道条件差的时候,采用抗干扰能力强的调制方式。此外,OFDM 还采用了加载算法,它可以使系统把更多的数据集中在条件好的信道中进行高速传输,因此,OFDM 适合高速数据传输。

2.4 抗码间干扰能力强

码间干扰是数字通信系统中除噪声干扰之外的主要的干扰,它是一种乘性的干扰。造成码间干扰的原因有很多,但只要传输信道的频带有限,就会造成一定的码间干扰。根据奈奎斯特准则:

$$x(nT) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases}$$

成立的充要条件为:

$$\sum_{m=-\infty}^{+\infty} X \left(f + \frac{m}{T} \right) = T$$

当信号的带宽 w 满足 $w \geq \frac{1}{2T}$ 时,可以设计出无 ISI 的系统。由于 OFDM 技术中采用了循环前缀,使得 T 变大,所以更容易设计出无 ISI 的系统,因此,OFDM 技术具有较强的抗码间干扰能力。

3 OFDM 系统的仿真与结果分析

在国外目前最新的 DTTB 中,调制和解调部分大都采用了 OFDM 技术,如欧洲的 DVB-TCOFDM,日本的 ISDB-TBST OFDM 等。在此背景下,我国对上述的几个地面数字电视系统进行了深入研究,提出了最新的 TDS-OFDM 技术。DTTB 的传输层框图如图 5 所示。

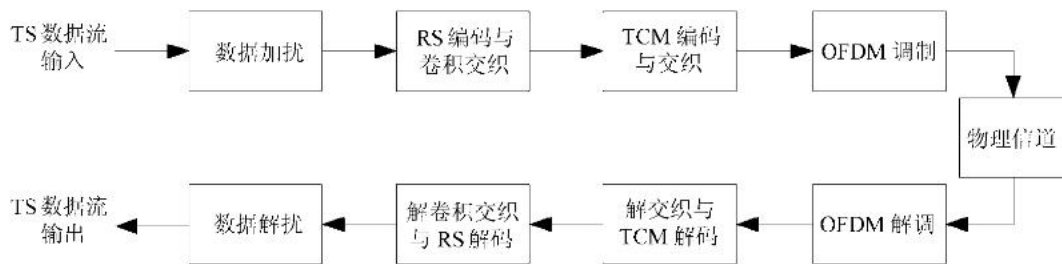


图 5 DTTB 的传输层框图

以 DTTB 中的 TDS-OFDM 系统为例,在 Matlab 软件中,利用 Simulink 工具箱中的相关模块构建该系统的仿真模型,如图 6 所示。

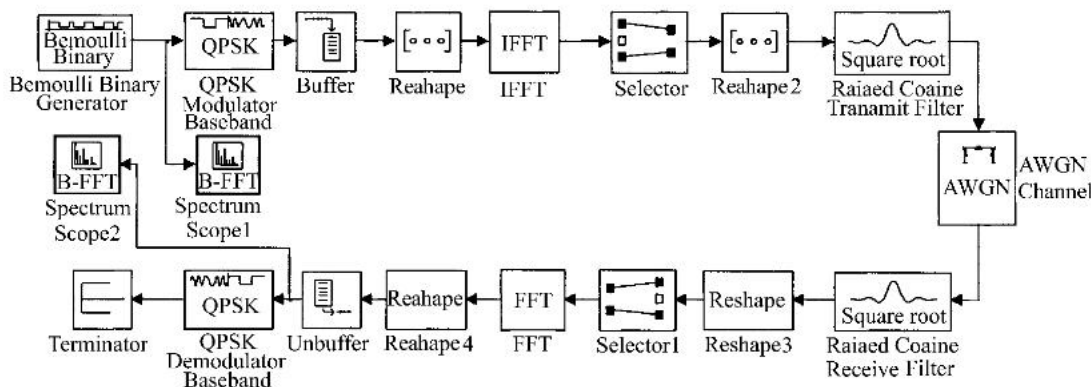


图 6 TDS-OFDM 系统的仿真模型

在图 6 中, Reshape 模块用于实现串/并、并/串转换, Selector 模块用于添加循环前缀, 经过的信道是加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 信道。通过仿真可以得到原始信号和接收端信号的频谱, 如图 7 和图 8 所示。

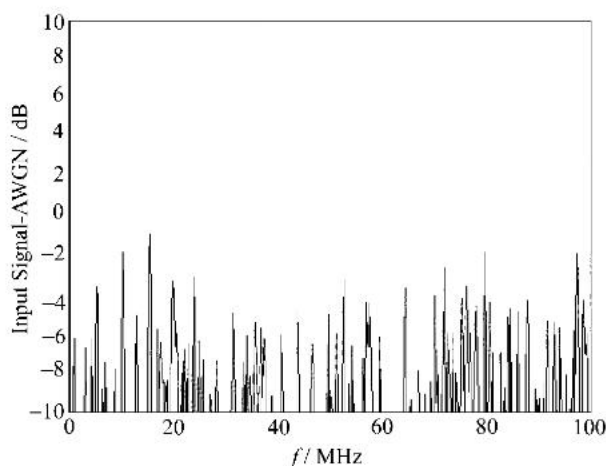


图 7 原始信号的频谱

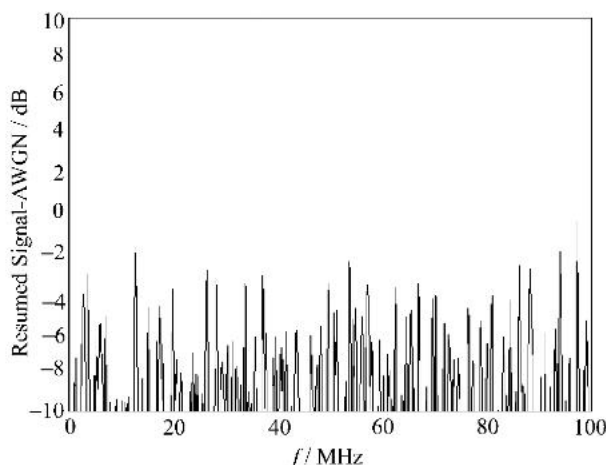


图 8 TDS-OFDM 系统接收端信号的频谱

而如果不采用 TDS-OFDM 系统, 则接收端信号的频谱如图 9 所示。

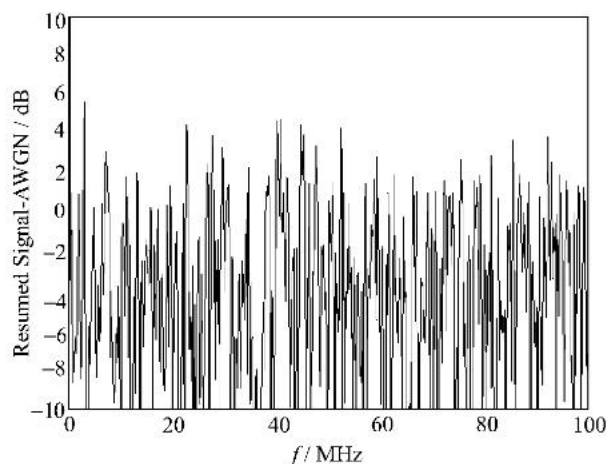


图 9 非 OFDM 系统接收端信号的频谱

通过改变 AWGN 信道的信噪比, 它们的误码率 (Bit Error Rate, BER) 变化曲线如图 10 所示。

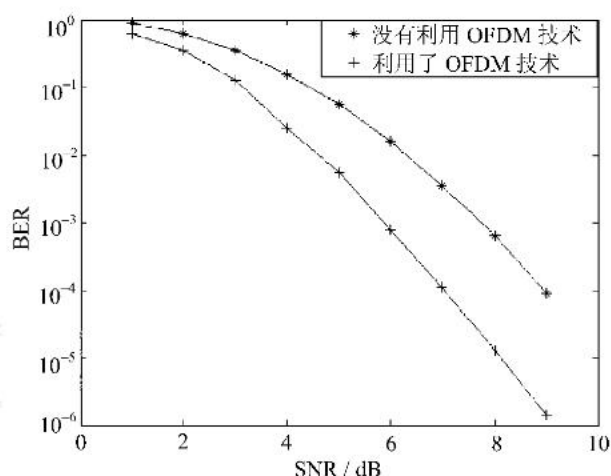


图 10 误码率随信噪比的变化曲线

通过图 7 和图 8 的对比可以看出, 虽然 TDS-OFDM 系统接收端的信号频谱没有像理论推导的那样与原始信号的频谱完全一致, 其中也还是包含了一些噪声的成分, 但是与图 9 相比, TDS-OFDM 系统抗干扰能力强的优势是明显的。此外, 从图 10 可以看出, 随着信噪比的增加, TDS-OFDM 系统的误码率明显低于非 OFDM 系统的误码率。

4 结 语

目前无线通信领域中的任何一项新兴技术几乎都是以 OFDM 为核心, 尽管 OFDM 技术也存在一些内在的局限和问题, 如子载波的排列和分配、频偏问题、相位噪声、信道估计和导频设计的复杂性等, 但是它成为新一代宽带无线移动通信技术的标志已经不可逆转。

参考文献:

- [1] Slimane S. B. Reducing the peak-to-average power ratio of OFDM signals through precoding[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56 (2): 686-695.
- [2] Wu H. C. Analysis and characterization of intercarrier and interblock interferences for wireless mobile OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2006, 52 (2): 203-210.
- [3] Pokle S. B., Kulat K. D. MATLAB simulation of a wireless communication system using OFDM principle[J]. IETE Technical Review, 2006, 23 (3): 187-

- 197.
- [4] Athaudage C. R. N. , Angiras R. R. V. Sensitivity of FFT-equalised zero-padded OFDM systems to time and frequency synchronisation errors[J]. IEE Proceedings of Communications ,2005 ,152 (6) :945-951.
- [5] Jeon H. G. , Serpedin E. A novel simplified channel tracking method for MIMO-OFDM systems with null sub-carriers [J]. Signal Processing , 2008 , 88 (4) :1002-1016.
- [6] Le K. N. Inter-carrier interference power of OFDM in a uniform scattering channel[J]. Computer Communications ,2008 ,31 (17) :4130-4135.
- [7] 陈学亮,黄建忠,王新梅. 基于 TDMA 的级联 TCM 无线网络接入模型[J]. 长春工业大学学报:自然科学版,2005 ,26(3) :45-48.
- [8] 张振川. OFDM 系统技术研究及其性能分析[J]. 东北大学学报,2007 ,28(2) :201-204.
- [9] 孙志雄. 基于 MATLAB 的 OFDM 系统仿真分析[J]. 信息技术, 2007 ,31(12) :155-157 ,160.
- [10] 吕爱琴,田玉敏,朱明华. 基于 MATLAB 的 OFDM 系统仿真及性能分析[J]. 计算机仿真, 2005 ,22(10) :164-168.

www.cnki.net