

# 基于T-MMB标准的OFDM信道均衡技术

郑济均<sup>1</sup>, 林竞力<sup>2</sup>, 朱维乐<sup>1</sup>

(1. 空军大连通信士官学校有线电通信系 辽宁 大连 116100; 2. 西华大学电气信息学院 成都 610039;  
3. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**在慢变信道中, 差分调制OFDM接收端无需均衡。如果信道变化剧烈, 尤其当信道在一帧数据周期中发生变化时, 接收符号的误码率会大大增加。由于差分调制系统无导频信号, 因此传统的利用导频信号或训练符号的均衡技术无法实现。该文对倒谱分析在信号处理中的应用进行了研究, 提出了一种适合于手机电视/移动多媒体广播传输系统(T-MMB)信道均衡算法。该算法利用T-MMB采用差分调制的特点, 采用倒谱分析的方法对信道进行均衡。虽然该算法是在最小相位信道条件下得出, 但对非最小相位信道也有均衡效果。仿真结果显示, 该算法具有良好的均衡效果。

**关键词** 倒谱分析; 信道均衡; 正交频分复用; 移动多媒体广播传输系统

中图分类号 TN92

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.05.009

## Equalization Method for Differential OFDM in T-MMB

ZHENG Ji-jun<sup>1</sup>, LIN Jing-li<sup>2</sup>, and ZHU Wei-le<sup>1</sup>

(1. Wire Communication Department, Dalian Airforce Communication NCO Academy Dalian Liaoning 116100;

2. School of Electrical and Information engineering, Xihua University Chengdu 610039;

3. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** Equalization methods are unnecessary for differential modulation OFDM in slowly varying channel. When the channel varies drastically, the bit error rate (BER) will be aggravated. Due to no pilot in differential modulation OFDM, the equalization methods using pilot signal can not be used in differential modulation OFDM. A channel equalization method suitable for mobile TV/mobile multimedia broadcasting systems is proposed in the paper. Cepstral technique is employed in the method to attain the channel equalization. The simulation results indicate that this method has a favorable equalization effect.

**Key words** cepstrum analysis; channel equalization; OFDM; T-MMB

差分调制技术在正交频分复用(OFDM)系统中已得到广泛的应用<sup>[1-8]</sup>。文献[8]的标准支持高阶差分调制、LDPC编码、时间复用及信道复用、时间交织、能量扩散以及组帧等技术, 在8 MHz系统中, 引入频分复用和快速信息信道技术, 实现了1.712 MHz系统和8 MHz系统的相互兼容<sup>[8]</sup>, 是一种拥有自主知识产权的技术标准。

由于采用了差分调制, 在慢变信道中, 接收端无需均衡。如果信道变化剧烈, 尤其当信道在一帧数据周期中发生变化时, 接收符号的误码率会大大增加。由于差分调制系统无导频信号, 因此传统的利用导频信号或训练符号的均衡技术无法实现, 目前尚未有针对差分调制正交频分复用(OFDM)系统的均衡技术。本文研究了基于T-MMB标准的快变信

道中的手机电视均衡问题, 提出了基于倒谱分析的均衡方法, 取得了良好的效果。

## 1 系统描述

T-MMB标准中, 发送端分为窄带和宽带两种模式, 窄带带宽为1.712 MHz, 宽带带宽为8 MHz。当带宽为1.712 MHz时, 发送端原理框图如图1所示。上层数据输入信号单元传输帧产生模块, 输出的信号单元传输帧即为基带信号传输帧。基带信号传输帧经过上变频转换为射频信号输出。



图1 发送端原理框图(带宽为1.712 MHz)

当带宽为8 MHz时, 发送端原理框图如图2所

示。上层数据输入5路信号单元传输帧产生模块, 其输出频分复用成1路基带传输帧, 再经过上变频转换为射频信号输出。各路信号单元传输帧在时间上是同步的。

信号单元传输帧产生模块如图3所示。上层数据经过业务复用后, 输出配置信息、业务信息和业务数据。多路业务数据分别经过能量扩散、LDPC编码

和时域交织后复用成主业务信道数据, 配置信息和业务信息经过能量扩散和删余卷积编码后, 同主业务信道数据进行比特传输帧复用, 再经过符号映射、频域交织和差分调制, 连同空符号和相位参考符号生成OFDM符号。连续的OFDM符号组成信号单元传输帧。

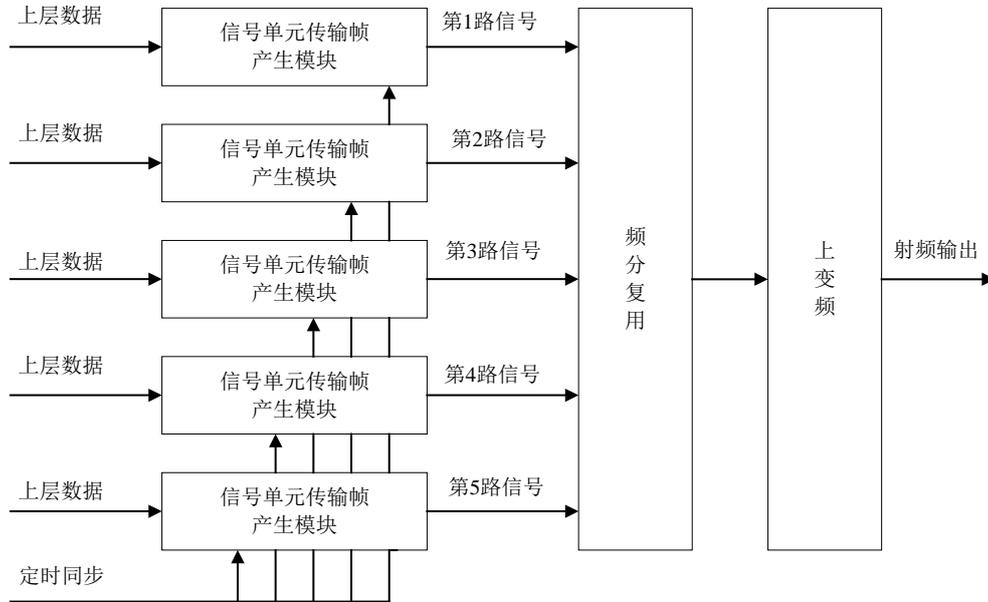


图2 发送端原理框图(带宽为8 MHz)

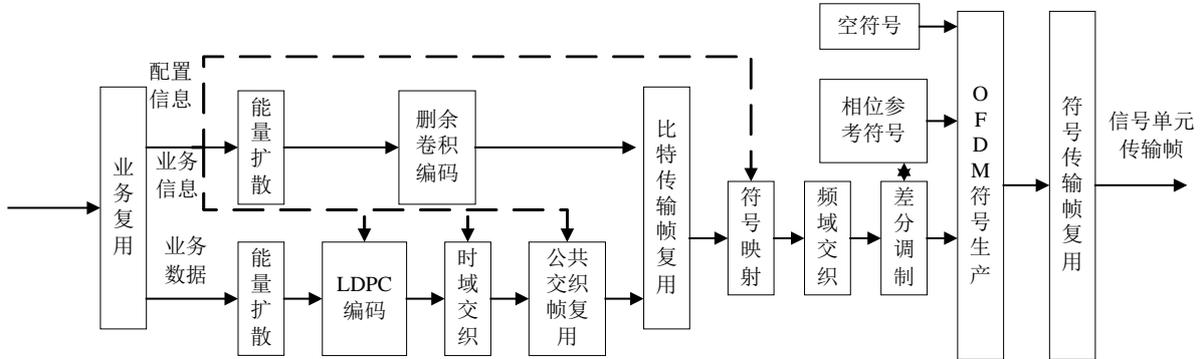


图3 信号单元传输帧产生模块

系统基带信号形式为:

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=0}^L \sum_{k=K/2}^{K/2} \sum_{i=0}^4 z_{m,l,k} \times e^{j2\pi(i-2)\Delta f t} \times g_{k,l}(t - mT_F - T_{NULL} - (l-1)T_s) \quad (1)$$

$$g_{k,l}(t) = \begin{cases} 0 & l = 0 \\ e^{j2\pi k(t-\Delta)/T_u} \text{Rect}(t/T_s) & l = 1, 2, \dots, L \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $L$  为每帧数据中OFDM符号数;  $K$  为载波数;  $T_F$  为帧周期;  $T_{NULL}$  为空符号周期;  $T_s$  为OFDM符号周期;  $\Delta f = 1.544 \text{ MHz}$ ;  $T_u$  为载波间隔的倒数;  $\Delta$  为保护间隔;  $z_{m,l,k}$  表示第  $l$  个OFDM符号中第  $k$  个载波

上的D-QPSK符号或D-8PSK符号;  $T_s = T_u + \Delta$ 。传输帧结构如图4所示。其中快速信息块(FIB)和公共交织帧(CIF)的具体数目与传输模式有关。

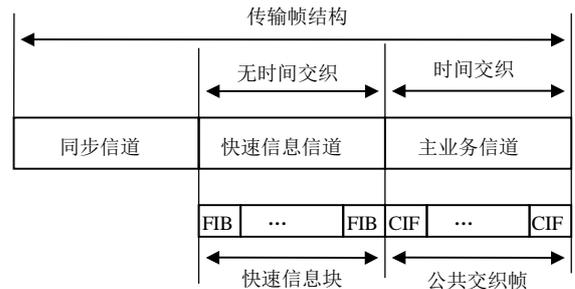


图4 传输帧结构

## 2 倒谱分析简介

文献[9]介绍的倒谱分析方法是一种非线性信号处理方法,被广泛应用于语音和图像信号处理。一个信号的复倒谱定义为傅里叶变换的对数的傅里叶反变换,即:

$$\hat{x}[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \lg X(e^{jw}) dw \quad (3)$$

而信号的倒谱定义为傅立叶变换幅度的对数的傅里叶反变换,即:

$$c_x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \lg |X(e^{jw})| dw \quad (4)$$

复倒谱具有如下性质:

- 1) 即使  $x[n]$  为有限长,  $\hat{x}[n]$  也为无限长。
- 2) 复倒谱的下降速度至少为  $1/|n|$ 。

一个因果序列,其傅里叶变换的实部和虚部之间满足希尔伯特变换关系。如果  $x[n]$  是最小相位的,则  $\lg |X(e^{jw})|$  和  $\arg[X(e^{jw})]$  之间满足希尔伯特变换关系,其中  $\lg |X(e^{jw})|$  为复倒谱傅里叶变换的实部,  $\arg[X(e^{jw})]$  为虚部。

复倒谱与原始序列是一一对应的关系。但复倒谱的计算涉及相位卷绕问题,计算量相对较大,过程也比较复杂。由于倒谱只与幅度有关,所以倒谱的计算相对简单。但是,倒谱与原始序列一般不存在一一对应的关系,即已知倒谱并不一定能确定原始序列,除非原始序列是最小相位序列。

当满足最小相位条件时,倒谱和复倒谱满足如下关系:

$$\hat{x}[n] = c_x[n] l_{\min}[n] \quad (5)$$

式中,  $l_{\min}[n] = 2u[n] - \delta[n]$ ;  $u[n]$  为单位阶跃序列;  $\delta[n]$  为单位样本序列。由于信号和复倒谱是一一对应的,对于最小相位序列,可以从其倒谱恢复原始信号。

## 3 信道估计算法描述

若无线信道建模为冲击响应滤波器<sup>[10]</sup>:

$$h(\tau, t) = \sum_i h_i(t) \delta(\tau - \tau_i) \quad (6)$$

假设信道抽头是互不相关的,为宽平稳随机过程(WSS)。假设传输的信号为  $s(t)$ ,则接收的采样信号为:

$$r(n) = \sum_i h_i(n) s(n - \tau_i) + n(n) \quad (7)$$

式中,  $n(n)$  为高斯白噪声。

假设接收信号已经完成了同步。对接收到的帧

头部分进行快速傅里叶变换(FFT)运算,可得到第  $k$  个接收信号为:

$$r_k = z_k H_k + n_k \quad (8)$$

式中,  $H_k = \sum_i h_i e^{-j2\pi k(\tau_i/T_u)}$  为子载波  $f_k = k/T_u$  处的信道传递函数;  $T_u$  为OFDM符号周期。

由于QPSK符号幅度为1,在高信噪比条件下由式(8)可得到信道传递函数幅度的近似值为:

$$|H_k| \approx |r_k| \quad (9)$$

由前面倒谱分析可知,对于最小相位信道,已知信号幅度的情况下可以恢复原始信号。

下面从最小相位信道和非最小相位信道分别进行说明。

### 3.1 最小相位信道估计

对于最小相位信道,信道估计框图如图5所示。由于满足最小相位条件,所以可以通过倒谱求得原始序列。首先,通过式(9)求得信道传递函数的幅度,再通过式(5)求复倒谱,最后由复倒谱的逆运算求得信道的传递函数。本文用FFT和IFFT代替傅里叶变换及其反变换。由于FFT运算有周期性,所以求得的倒谱和复倒谱都是有时间混叠的近似值。但因倒谱下降的速度很快,所以可通过补零FFT减小混叠干扰。通常OFDM子载波数目远远多于多径数目,相当于对信道进行了补零,可得到精确的信道传递函数。

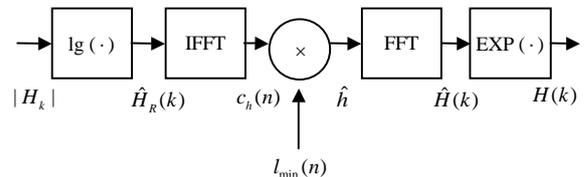


图5 信道估计框图

### 3.2 非最小相位信道估计

任何非最小相位因果序列均可以表示为一个最小相位序列和一个全通系统的级联,即:

$$x[n] = x_{\min}[n] * x_{\text{ap}}[n] \quad (10)$$

式中,“\*”表示卷积;  $x_{\text{ap}}[n]$  表示全通序列。对于非最小相位信道,仍按照上述最小相位信道的算法取模,得到:

$$|X(k)| = |X_{\text{ap}}(k)| |X_{\min}(k)| = |X_{\min}(k)| \quad (11)$$

由式(11)可知,由于全通系统幅度为1,致使应用倒谱分析对非最小相位信道进行估计时,可得到信道的幅度,相差只是全通系统的相位。如果全通系统相位变化不大,或在  $2\pi$  范围内无相位卷绕,则该方法仍可对非最小相位信道均衡。

当得到信道的传递函数后, 在式(8)中除以传递函数值, 即可在频域实现OFDM系统的均衡, 即:

$$z_k = r_k / H_k + n_k \quad (12)$$

### 4 仿真验证与总结

为了验证算法效果, 对算法进行了计算机仿真。仿真针对传输模式1进行。传输帧周期为96 ms, 有12个FIB和4个CIF。针对4个信道模型进行仿真, 其中最小相位信道模型为[0.891 3 0.762 1 0.456 5 0.018 5] [0.838 1 0.019 6 0.681 3 0.379 5], 非最小相位信道模型为[0.621 8 0.738 2 0.176 3 0.405 7]和[0.821 4 0.444 7 0.615 4 0.791 9](此信道抽头系数为matlab随机产生)。f1和p1信道模型<sup>[1]</sup>为Digital Video Broadcasting (DVB)系统仿真用模型, 其中f1信道的衰落服从Ricean分布, p1服从Rayleigh。相邻的OFDM符号分别与不同的信道进行卷积运算。信道模型由计算机随机产生, 仿真进行了100次求均值运算, 信号采用16QAM调制, 仿真中无信道编码。

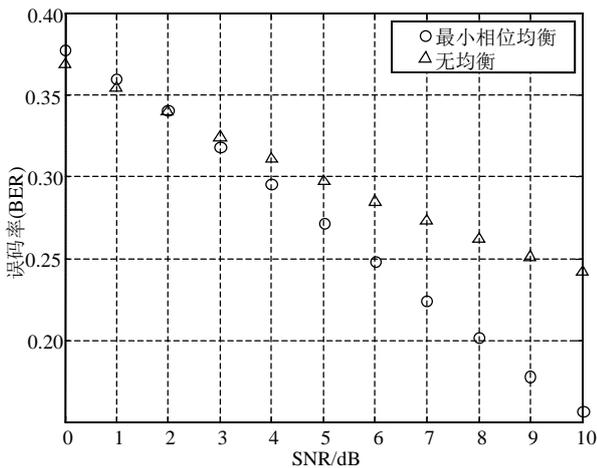


图6 最小相位信道均衡

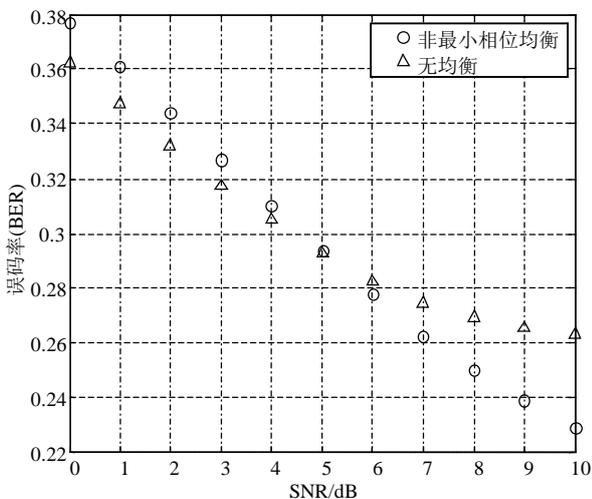


图7 非最小相位信道均衡

图6和图7分别为最小相位信道和非最小相位信道下信噪比(SNR)与误码率(BER)的关系。图8为f1、p1信道下, 不同信噪比与均方误差(MSE)的关系。分析图6和图7可知, 在低信噪比情况下, 由于噪声干扰, 均衡效果并不显著, 随着信噪比的提高均衡效果十分明显。

图8显示本文均衡算法对f1、p1均有一定效果。但由于Rayleigh信道较Ricean信道复杂, 且p1信道有特征值接近单位圆, 致使该系统有一定不稳定的趋势, 因此其MSE远大于f1信道。

由仿真结果可看出, 本文的利用倒谱分析进行信道均衡的方法, 对于差分调制OFDM系统有明显的均衡效果。

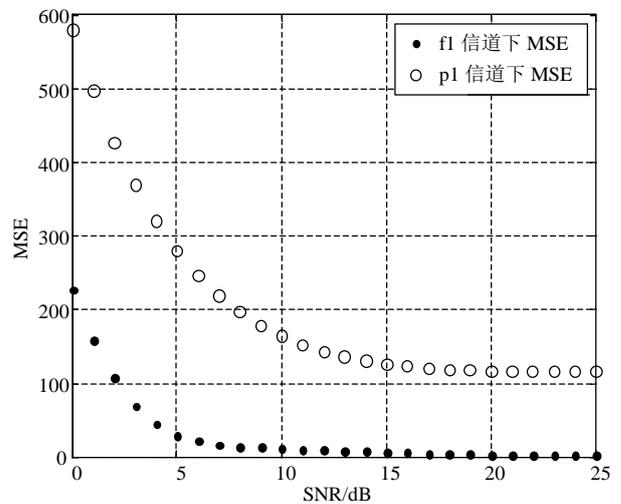


图8 信噪比与均方误差

### 参考文献

- [1] 秦雅娟, 刘元安. OFDM系统中的差分调制及其性能[J]. 铁道学报, 2006, 28(1): 59-62.  
QIN Ya-juan, LIU Yuan-an. Differential modulation and its performance in OFDM systems[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(1): 59-62.
- [2] 陆浩, 陈静, 朱琦, 等. 差分调制在OFDM系统中的应用[J]. 中国数据通信, 2005, 7(1): 40-46.  
LU Hao, CHEN Jing, ZHU Qi, et al. DAPSK modulation in OFDM system[J]. China Data Communications, 2005, 7(1): 40-46.
- [3] SAYHOOD K H, WU L. Differential amplitude phase shift keying: a new modulation method for turbo code in digital radio broadcasting[J]. Journal of Electronics (China), 2003, 20(2): 86-96.
- [4] LIU Kai-ming, WANG Wen-bo, LIU Yuan-an. High data rate OFDM system with simplified DAPSK demodulation[J]. Journal of China University of Posts and Telecommunications, 2005, 12(2): 21-26.

- high dynamic GPS receiver[D]. Beijing: Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [3] ZARLINK SEMICONDUCTOR. GP4020 GPS baseband processor design Manual[EB/OL]. [2009-06-10]. <http://www.zarlink.com>.
- [4] 陆大金. 随机过程及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
- LU Da-jin. Stochastic processes and its applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986.
- [5] KAPLAN E D, HEGRATY C J. GPS原理与应用[M]. 2版. 寇艳红, 译, 北京: 电子工业出版社, 2007.
- KAPLAN E D, HEGRATY C J. Understanding GPS: Principles and applications[M]. 2nd ed. Translate by KOU Yan-hong. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [6] PROAKIS J G. Digital communications [M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.
- [7] JAMES BAO-YEN T. Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- [8] MAO Wei-lung, TSAO Hen-wai, CHANG Fan-ren. A new fuzzy bandwidth carrier recovery system in GPS for robust phase tracking[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(4): 431-434.
- [9] 杨颖, 陈培, 王云, 等. 扩频通信同步系统中锁相环的设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 32(3): 243-248.
- YANG Ying, CHEN Pei, WANG Yun, et al. The design of DPLL for carrier synchronization used in spread spectrum communication systems[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(3): 243-248.
- [10] STEPHENS S A, THOMAS J B. Controlled-root formulation for digital phase-locked loops[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(1): 78-95.
- [11] ZHANG Wei, ZHANG Ke, BIN Wu-bin. Simulation and analysis of GPS software receiver[C]//Second International Conference on Computer Modeling and Simulation. Washington: IEEE Press, 2010: 314-317.
- [12] HUMPHREYS T E, PSIAKI M L, KINTNER P M. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS carrier phase tracking[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4): 1624-1637.

编辑 张俊

(上接第685页)

- [5] LI Ke, HOU Chun-ping, FU Jin-lin, et al. Improved frequency domain differential demodulation for fast fading HF channels[C]//Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCom'09 5th International Conference. [S.l.]: [s.n.], 2009.
- [6] HAAS E, KAISER S. Two-dimensional differential demodulation for OFDM[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51: 580-586.
- [7] ETSI ETS 300 401 ed.1 (1995-02). Digital audio broadcasting (DAB); DAB to mobile, portable and fixed receivers[S].[S.l.]: ETSI, 1995.
- [8] 北京新岸线有限公司. 手机电视/移动多媒体广播传输系统帧结构、信道编码、调制及复用. [EB/OL]. [2010-02-11]. [http://forum.ent.eet-cn.com/FORUM\\_POST\\_10053\\_1200092541\\_0.HTM](http://forum.ent.eet-cn.com/FORUM_POST_10053_1200092541_0.HTM).
- Beijing Nufront Co. Mobile TV/mobile multimedia broadcasting framing structure, channel coding, modulation and radio frequency characteristics for broadcasting channel[EB/OL]. [2010-02-11].[http://forum.ent.eet-cn.com/FORUM\\_POST\\_10053\\_1200092541\\_0.HTM](http://forum.ent.eet-cn.com/FORUM_POST_10053_1200092541_0.HTM).
- [9] 奥本海姆·A·V, 谢弗·R·W. 离散时间信号处理[M]. 黄建国, 刘树棠, 译. 北京: 科学出版社, 2000: 632-634.
- OPPENHEIM A V, SCHAFER R W. Discrete-time signal processing[M]. Translated by HUANG Jian-guo, LIU Shu-tang. Beijing: Science Press, 2000: 632-634.
- [10] CIMINI L J. Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing [J]. IEEE Trans Commun, 1985, COM-33: 665-675.
- [11] ETSI EN 300 744 V1.5.1. Digital video broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television[S]. [S.l.]: ETSI, 2004.

编辑 税红