

# 不同数字电视地面广播传输系统 在多径衰落信道下的性能比较

郑紫微<sup>1</sup>, 杨知行<sup>1</sup>, 朱义胜<sup>2</sup>, 潘长勇<sup>1</sup>

(1. 清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室, 北京 100084; 2. 大连海事大学信息工程学院, 辽宁大连 116026)

**摘要:** 本文分析了数字电视地面广播通信信道具有长脉冲响应的多径衰落的特点, 从频域上表达了其多径衰落信道模型; 基于单载波和多载波两种不同的传输模式, 推导了数字电视地面广播传输系统在该多径衰落信道下的系统截止率和中断概率的表达式; 比较了基于不同数字电视地面广播传输标准和解决方案的传输系统在数字电视地面广播多径衰落信道下的系统输出的截止率和中断概率的性能。

**关键词:** 地面数字电视广播; 频域多径信道模型; 截止率; 中断概率

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 03-0425-04

## Performance Comparison of Digital Television Terrestrial Broadcasting Transmission Systems over Multipath Fading Channels

ZHENG Zi-wei<sup>1</sup>, YANG Zhi-xing<sup>1</sup>, ZHU Yi-sheng<sup>2</sup>, PAN Chang-yong<sup>1</sup>

(1. State Key Lab on Microwave & Digital Communications, Electronics Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. College of Information Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

**Abstract:** The characteristics of the digital television terrestrial broadcasting (DTTB) channels with long impulse responses are analyzed, and the frequency domain multipath channel model is given. Based on single carrier and multicarrier these two different transmission modes, the cutoff rate expressions and the outage probability expressions of the DTTB transmission systems are derived. The performance of different DTTB standards-based or scheme-based transmission systems over DTTB multipath fading channels are compared both analytically and by computer simulations.

**Key words:** digital television terrestrial broadcasting (DTTB); frequency domain multipath channel model; cutoff rate; outage probability

### 1 引言

衡量系统的性能有系统差错概率, 信道容量, 平均截止率, 中断概率等多种指标<sup>[1]</sup>. 系统的平均截止率, 相比于信道容量, 额外考虑了调制技术的影响因素, 因此, 通常被看作为实用的容量指标; 它规定了系统可达到的编码率和差错性能界, 能够被用来作为进行不同编码调制策略的性能比较<sup>[2]</sup>. 在无线通信中, 均衡可以被用来补偿由弥射信道所引起的多径产生的码间干扰<sup>[3]</sup>. 通信系统可以采用单载波或多载波两种不同的传输模式. 对于单载波传输模式, 在无线通信信道下, 系统必需采用均衡器来补偿信道的非理想频率响应特性所导致的码间干扰而引起的信道失真. 然而, 对于多载波传输模式, 由于将可用的信道带宽  $W$  分成一些较窄宽度为  $f = W/N$  的  $N$  个子信道, 每个子信道可近似地视为理想线性滤波器信道, 如果每个子载波的带宽足够小, 则码间干扰可以忽略,

所以, 系统无需进行均衡处理<sup>[1]</sup>. 正交频分复用 (OFDM) 构成了一种特定形式的多载波调制技术, 因其具有可以充分地利用快速傅氏变换 (FFT) 算法的高效性等优点<sup>[4]</sup> 而倍受关注并得到深入的研究和在 xDSL<sup>[5]</sup>、移动通信<sup>[6]</sup>、数字电视地面广播 (DTTB)<sup>[7-9]</sup> 等诸多领域中的广泛应用. 近几年来, 对于 DTTB 传输技术的研究不断深入, 并已有多种 DTTB 传输标准和解决方案被提出来<sup>[7-9, 11]</sup>. 从实验测试结果的角度, 文献 [10] 对依据三种不同的 DTTB 传输标准: (1) 美国高级电视系统委员会 (Advanced Television Systems Committee, ATSC) 研发的格形编码的八电平残留边带 ((Trellis-Coded 8-Level Vestigial Side-Band (8-VSB)) 调制系统<sup>[11]</sup>; (2) 欧洲数字视频地面广播 (Digital Video Broadcasting - Terrestrial, DVB-T) 标准采用的编码正交频分复用 (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing, COFDM) 调制<sup>[7]</sup>; (3) 日本地面综合业务数字广播 (Terrestrial Integrated Service Digital Broadcasting, ISDB-T) 采用的频带分段

收稿日期: 2002-10-18; 修回日期: 2003-05-20

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50177001); 国家“九八五”项目; 信息产业部电子信息产业发展基金 (No. 2002-291)

传输 (Bandwidth Segmented Transmission, BST) 正交频分复用 (OFDM) 调制<sup>[8]</sup>. 所构架的时域均衡单载波系统<sup>[11]</sup>和多载波 (OFDM) 系统<sup>[7,8]</sup>进行了各种性能的比较. 对于地面数字电视广播这样一个频率选择性的且具有长脉冲响应的多径衰落信道<sup>[10]</sup>, 一方面, 时域均衡不能很好地消除由此而导致的在接收机端接收的符号间存在的码间干扰而使得时域均衡单载波系统<sup>[11]</sup>比多载波 (OFDM) 系统<sup>[7,8]</sup>具有较差的抗多径干扰性能<sup>[10]</sup>, 另一方面, 使得对系统差错概率的精确计算极为困难. 以合适的系统性能指标为衡量标准, 从理论上对各种 DTIB 传输标准和解决方案进行深入比较研究, 对制定我国自己的 DTIB 传输标准无疑具有重要的理论参考价值, 因此, 在下文中, 我们将从信息论的角度, 比较基于不同 DTIB 传输标准和解决方案的传输系统在地面数字电视广播多径衰落信道下的系统输出的截止率和中断概率的性能.

## 2 地面数字电视广播信道及其低通等效多径信道模型的频域表达

从技术上讲, 地面数字电视广播的信道是一个宽带 (8MHz)、高容量 (多级码元)、大范围 (几十公里) 的信道, 与卫星电视广播、有线电视广播信道相比, 该信道的干扰是最复杂的. 地面数字电视广播信道, 除具有常规的干扰, 如高斯白噪声 (电视屏产生雪花)、脉冲 (家电/汽车冲放电产生) 干扰等, 还具有以下其他几个方面的干扰: 首先是严重的长脉冲响应的多径干扰, 其影响的结果是使接收机产生误码, 从而出现马赛克现象, 其次是通过频道频率分配与常规电视同播时所产生的同频/邻频干扰. 在下文中, 我们仅从地面数字电视广播信道的多径衰落情形研究基于不同 DTIB 传输标准和解决方案的传输系统的截止率和中断概率性能.

多径衰落情形下的地面数字电视广播信道可表示为如下的低通等效多径信道模型<sup>[13]</sup>

$$h(t) = \sum_{l=1}^L h_l e^{j\phi_l} \delta(t - \tau_l) \quad (1)$$

在方程(1)中,  $L$  为信道的多径路径数,  $h_l$ ,  $\phi_l$  和  $\tau_l$  分别为第  $l$  个多径路径的信号幅值, 相位和延迟. 方程(1)的时域多径信道模型可以表示成如下的频率响应的形式

$$H(f) = \sum_{l=1}^L h_l e^{j(\phi_l - 2\pi f \tau_l)} \quad (2)$$

方程(2)所表示的多径信道模型的频率响应的功率谱密度 (PDF) 为

$$|H(f)|^2 = \sum_{i=1}^L h_i^2 + \sum_{i=1}^L \sum_{j=1, j \neq i}^L h_i h_j \cos[2\pi(f - f_i - f_j)(\tau_i - \tau_j)] \quad (3)$$

对于长脉冲响应的多径信道, DTIB 传输系统的信号所占据的带宽一般都比每一个  $1/(\tau_i - \tau_j)$  大, 因此, 方程(3)所表示的功率谱密度有如下的分布函数

$$p_x(x) = 1/\left\{ d \sqrt{1 - [(x - c)/d]^2} \right\}, c = d \sum_{i=1}^L h_i^2, x = \sum_{i=1}^L h_i^2 \quad (4)$$

在方程(4)中,  $c = \sum_{i=1}^L h_i^2$ ,  $d = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1, j \neq i}^L h_i h_j$ .

## 3 截止率和中断概率表达及分析

对于采用具有  $Q$  个信号点的信号星座的编码通信系统, 在各个数据符号等概率的情况下, 由文献[1], 可以得到通信系统在 AWGN 信道下的截止率  $R_0$  有如下的对数表达式

$$R_0 = -\log_2 \left\{ \frac{1}{Q^2} \prod_{i=1}^Q \prod_{j=1}^Q \exp \left[ -\frac{1}{4N_0} |s_i - s_j|^2 \right] \right\} \quad (5)$$

在式(5)中,  $|s_i - s_j|^2$  表示任何两个符号对之间的欧氏距离,  $N_0$  表示噪声的功率谱密度. 对平坦衰落的高斯噪声信道, 由文献[13], 同样地可相似地得到如下的表达式

$$R_0 = -\log_2 \left\{ \frac{1}{Q^2} \prod_{i=1}^Q \prod_{j=1}^Q E \left[ \exp \left[ -\frac{1}{4N_0} |s_i - s_j|^2 \right] \right] \right\} \quad (6)$$

在式(6)中,  $E[\cdot]$  表示与归一化的信道的幅值相对应的随机变量,  $E[\cdot]$  表示期望值.

因为在各种地面数字电视广播标准中, 不管是采用单载波的传输模式<sup>[11]</sup>, 还是采用多载波的传输模式<sup>[7-9]</sup>, 通信系统都相应地采用了各种交织方法, 所以, 在下面的算法推导和分析中, 我们假设通信系统采用了合适的交织方法而使得所有的信道系数独立同分布 (i. i. d.)<sup>[12]</sup>, 同时假设根据各标准和解决方案的接收机具有好的同步和信道估计性能.

在单载波通信系统中, 每个数据符号占据了整个的带宽且招受同样的衰落影响. 由前文的分析, 对于地面数字电视广播这样一个频率选择性的且具有长脉冲响应的多径衰落信道, 对于单载波系统, 必需采用均衡器来补偿信道的非理想频率响应特性所导致的码间干扰而引起的信道失真. 在均衡器的输出有如下的信噪比 (SNR) 表达式<sup>[1]</sup>

$$\epsilon = 1/E \{ 1/(1 + |H(f)|^2) \} - 1 \quad (7)$$

在式(7)中,  $\epsilon = E_s/N_0$  表示接收机的信噪比 (SNR),  $E_s$  表示接收机的平均符号能量. 由通信系统采用合适的交织方法的假设, 则可以近似地认为系统的均衡器输出噪声为高斯的, 从而, 式(7)可用于式(5)进行截止率  $R_0$  的计算.

为表达方便, 令  $g_{i,j} = |s_i - s_j|^2/4E_s$ .

对于经过均衡处理的单载波通信系统, 由式(7)结合式(5)可直接通过如下计算通信系统在整个信道的截止率  $R_0$ , 即有

$$E \left\{ \frac{1}{1 + |H(f)|^2} \right\} = \frac{1}{d} \int_{c-d}^{c+d} \frac{1}{1+x} \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{x-c}{d} \right)^2}} dx$$

$$= \frac{1}{rd} \int_{-1}^1 \frac{1}{\left( \frac{1+c}{d} + \right)} \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{x-c}{d} \right)^2}} dx = \frac{1}{rd} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{1+c}{d} \right)^2 - 1}} dx \quad (8)$$

$$\epsilon = rd \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{1+c}{d} \right)^2 - 1}} dx - 1 = \sqrt{(1+cr)^2 - d^2} - 1 \quad (9)$$

$$R_0 = -\log_2 \left\{ \frac{1}{Q^2} \prod_{i=1}^Q \prod_{j=1}^Q \exp \left[ -\left( \sqrt{(1+c)^2 - d^2} - 1 \right) g_{i,j} \right] \right\} \quad (10)$$

对于多载波 (OFDM) 通信系统, 如通信系统采用合适的交织方法, 则在频率选择性的多径衰落信道上, 每一个子载波信道都可看作为一个平坦衰落的 AWGN 信道<sup>[14]</sup>, 所以, 可用式

(6) 来计算多载波 (OFDM) 在整个信道上的截止率  $R_0$ , 即有

$$\begin{aligned} E \left[ \exp \left( - \frac{2}{4N_0} |s_i - s_j|^2 \right) \right] &= E \left[ \exp \left( - \frac{1}{2} |H(f)|^2 g_{i,j} \right) \right] \\ &= \frac{1}{d} \int_0^{c+d} e^{-x} g_{i,j} \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{x-c}{d} \right)^2}} dx \\ &= \frac{1}{d} \int_0^1 e^{-(c+d)g_{i,j}x} \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx \\ &= e^{-c g_{i,j}} \left[ \frac{1}{d} \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx \right] = e^{-c g_{i,j}} I_0(d g_{i,j}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$R_0 = - \log_2 \left\{ \frac{1}{Q^2} \prod_{i=1}^Q \prod_{j=1}^Q e^{-c g_{i,j}} I_0(d g_{i,j}) \right\} \quad (12)$$

在式 (11) 和式 (12) 中,  $I_0(\cdot)$  表示第一类零阶修正贝塞尔 (Bessel) 函数。

从式 (10) 和式 (12) 可以看出, 截止率  $R_0$  受多径衰落情况 ( $c, d$ ), 编码增益 ( $g_{i,j}$ ), 和帧结构 ( $\cdot$ ) 的影响。

在帧结构中, 如果考虑采样时间、导频训练序列、循环前缀等影响因素, 则有效数据符号在接收机的信噪比 (SNR)  $u = E_u / N_0$  可表示为

$$u = \{ (n n_s) / [ T(n + n_{cp})(n_s + n_t) ] \} \cdot \quad (13)$$

在式 (3) 中,  $n_s, T, n, n_t, n_{cp}$  分别表示有效数据符号数, 采样时间, 载波数, 导频训练序列符号数, 循环前缀数。  $E_u$  表示接收机有效数据符号的平均符号能量, 且有  $E_u = \{ (n n_s) / [ T(n + n_{cp})(n_s + n_t) ] \} \cdot E_s$ , 从而有  $g_{i,j} = \{ [ T(n + n_{cp})(n_s + n_t) ] / (n n_s) \} \cdot |s_i - s_j|^2 / 4 E_u$ 。

由式 (13) 有

$$u = \{ (n n_s) / [ T(n + n_{cp})(n_s + n_t) ] \} \quad (14)$$

按照截止率和中断概率的定义<sup>[1,14]</sup>, 截止率  $R_0$  低于系统的期望传输率  $R_d$  的概率即为系统按该期望传输率  $R_d$  传输该数据块时可能使得在接收机端的检测发生错误的概率, 这一概率也就是系统对应于该期望传输率下的中断概率  $p_{out}$ 。因此, 在某个期望传输率下的中断  $R_d$  概率可表示如下

表 1 基于不同 DTTB 传输标准和解决方案进行计算机仿真时所采用的相应参数

传输系统	ATSC 8-VSB	DVB-T COFDM	ISDB-T BST-OFDM	DMB-T TDS-OFDM
信道内编码	2/3 网格码	2/3 卷积码	2/3 卷积码	2/3 网格码
交织方式	12 至 1 网格码交织	位交织、频交织	位交织、频交织、时交织	时交织、频交织
数据符号数 $N_s$	965	6116	2496	3780
训练符号数 $N_t$	272	701	313	378
子载波数 $N$	1	8192	2809	3780
循环前缀的比重 $N_p/N$	0	1/4	1/4	0
采样时间 $T(\mu s)$	0.0378	0.1094	0.1230	0.1323
有效带宽 $f_B(\text{MHz})$	7.173	7.61	7.431	7.56
调制方式	8-VSB	64QAM	64QAM	64QAM

从图 2 和图 3 可以看出, 采用多载波 (OFDM) 的各个方案都比采用单载波的 ATSC 标准的 8-VSB 方案具有较好的截止率和中断概率性能, 这与文献 [10] 中的实验测试结果是一致的, 即各个多载波 (OFDM) 方案比 ATSC 的 8-VSB 单载波方案具有更好的抗多径衰落干扰性能; DMB-T 的 TDS-OFDM 方案比

$$p_{out} = p\{ (R_0 < R_d) | R_d \} \quad (15)$$

假设系统所采用的码率为  $R_c$ , 则期望传输率  $R_d$  与所采用的调制方式有关 (每个 QPSK 符号上承载着 2 比特编码位, 所以,  $R_d = 2 R_c$ 。每个 16QAM 符号上承载着 4 比特编码位, 所以,  $R_d = 4 R_c$ 。每个 64QAM 符号上承载着 6 比特编码位, 所以,  $R_d = 6 R_c$ )。因此, 中断概率  $p_{out}$  受多径衰落情况, 编码增益, 帧结构, 和调制方式的共同影响。

#### 4 基于不同 DTTB 传输标准和解决方案的系统性能仿真

根据文献 [13] 产生数字电视地面广播的多径衰落信道, 即, 信道的多径路径数  $L$  按如下概率产生:

$$p_l(L) = \begin{cases} 0.0980, & L = 1 \\ 0.3137, & L = 2 \\ 0.2647, & L = 3 \\ 0.2451, & L = 4 \\ 0.0785, & L = 5 \end{cases} \quad (16)$$

各径幅值  $h_l$  为具有衰减均值为  $\mu_{dB} = 21.5 \text{ dB}$ , 标准偏差为  $\sigma_{dB} = 5.0 \text{ dB}$  的对数正态分布; 各径相移  $\theta_l$  相互独立且满足在  $[-\pi, \pi]$  上的均匀分布; 各径延迟  $\tau_l$  满足具有平均延迟时间为  $\mu = 85 \mu s$  的瑞利分布。

基于上述产生的多径衰落信道, 对于 ATSC 标准的 8-VSB 单载波解决方案<sup>[11]</sup>, DVB-T 的 COFDM 多载波解决方案<sup>[7]</sup>, ISDB-T 的 BST-OFDM 多载波解决方案<sup>[8]</sup>, 和最近由清华大学数字电视传输技术研发中心所提出 DMB-T 的 TDS-OFDM 多载波解决方案<sup>[9]</sup>, 我们进行了系统的截止率和中断概率的仿真。仿真中所采用的参数根据各个 DTTB 传输标准和解决方案如表 1 所示。在假设根据各个标准和解决方案的接收机具有好的同步和信道估计性能的前提下进行仿真, 各个系统的截止率仿真结果如图 1 所示, 各个系统的中断概率仿真结果如图 2 所示。

DVB-T 的 COFDM 方案和 ISDB-T 的 BST-OFDM 方案都具有较好的截止率和中断概率性能, 这是因为 DMB-T 的 TDS-OFDM 方案把 OFDM 保护间隔和训练序列有机地组合成一个公共的符号区间, 当各个多载波 (OFDM) 方案具有相同的 OFDM 保护间隔的时候, DMB-T 的 TDS-OFDM 方案具有更高的符号效率。

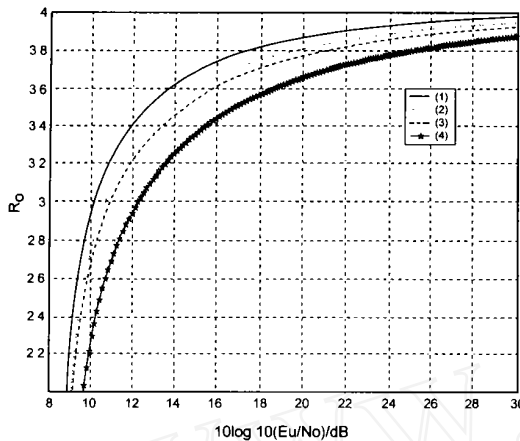


图1 基于不同标准和方案的系统的截止率性能  
(1) DMB-T 的 TDS-OFDM 多载波解决方案; (2) DVB-T 的 COFDM 多载波解决方案; (3) ISDB-T 的 BST-OFDM 多载波解决方案; (4) ATSC 标准的 8-VSB 单载波解决方案。

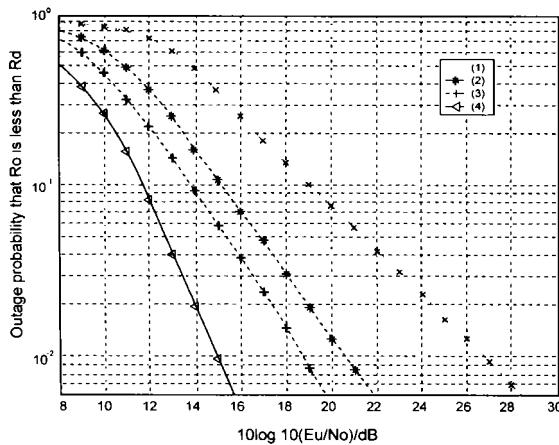


图2 基于不同标准和方案的系统的中断概率性能  
(1) ATSC 标准的 8-VSB 单载波解决方案; (2) ISDB-T 的 BST-OFDM 多载波解决方案; (3) DVB-T 的 COFDM 多载波解决方案; (4) DMB-T 的 TDS-OFDM 多载波解决方案。

## 5 结论

本文分析了数字电视地面广播通信信道具有长脉冲响应的多径衰落的特点,从频域上表达了其多径衰落信道模型,并推导和分析了基于单载波和多载波两种不同传输模式的数字电视地面广播传输系统在该多径衰落信道下的系统输出的截止率和中断概率的表达式;在假设根据各个标准和解决方案的接收机具有好的同步和信道估计性能的前提下,从计算机仿真结果的角度比较了基于不同数字电视地面广播传输标准和解决方案的传输系统在数字电视地面广播多径衰落信道下的系统输出的截止率和中断概率的性能。

### 参考文献:

- [ 1 ] J G Proakis. Digital Communications, 3rd Ed [M]. New York:McGraw-Hill, 1995.  
[ 2 ] G Caire, G Taricco, E Biglieri. Bit-interleaved coded modulation [J].

IEEE Trans Inform Theory, 1998, 44 (3) :927 - 946.

- [ 3 ] S U H Qureshi. Adaptive equalization [J]. Proceeding of IEEE, 1985, 37(9) :1340 - 1387.  
[ 4 ] L J Cimini Jr. Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing [J]. IEEE Trans Commun, 1985, 33(7) :665 - 675.  
[ 5 ] J A C Bingham. Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come [J]. IEEE Commun Mag, 1990, 28(5) :5 - 14.  
[ 6 ] J Chuang, N Sollenberger. Beyond 3G: Wideband wireless data access based on OFDM and dynamic packet assignment [J]. IEEE Commun Mag, 2000, 38(7) :78 - 87.  
[ 7 ] ETSI ETS 300 744. Digital Video Broadcasting (DVB); Frame Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television (DVB-T) [S]. ETSI, March 1997.  
[ 8 ] ITU-R WP 11A/ 59. Channel Coding, Frame Structure and Modulation Scheme for Terrestrial Integrated Service Digital Broadcasting (ISDB-T) [S]. ITU-R WP 11A/ 59-E, May 1999.  
[ 9 ] P R China Patent 00 123 597 4. Terrestrial Digital Multimedia/ Television Broadcasting System [P]. March 21, 2001.  
[ 10 ] Y Wu, B Caron, P Bouchard, G Chouinard. Comparison of terrestrial DTV transmission systems: The ATSC 8-VSB, the DVB-T COFDM and the ISDB-T BST-OFDM [J]. IEEE Trans Broadcasting, 2000, 46(2) :101 - 113.  
[ 11 ] ATSC Digital Television Standard. ATSC Standard A/ 53 [S]. September 1995.  
[ 12 ] CCIR WP 5B. Contribution to Work on the Characterization of the Transmission Path for a VHF/ UHF Television Channel [R]. UK: CCIR WP, 1991.  
[ 13 ] S H Jamali, T Le-Ngoc. Coded Modulation Techniques For Fading Channels [M]. USA: Kluwer Academic Publishers, 1994.  
[ 14 ] T S Rappaport. Wireless Communications: Principles and Practice [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996.

### 作者简介:



郑紫微 男, 1975 年生于福建永春, 分别于 1997 年, 2000 年, 2003 年在大连海事大学获工学学士, 硕士, 博士学位, 自 2002 年 9 月起, 在清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室从事数字电视地面广播宽带传输以及第四代移动通信的核心技术研究, 现为清华大学电子工程系博士后, 目前主要研究领域为: 高性能数字信号处理算法, 宽带信息传输和移动通信的理论

与技术。

杨知行 男, 1946 年生于湖南祁阳, 1970 年清华大学无线电技术专业毕业, 现任清华大学电子工程系教授, 博士生导师, 兼任微波与数字通信技术国家重点实验室常务副主任; 清华大学数字电视传输技术研发中心主任; 国家数字电视标准化专家委员会委员; 信息产业部数字电视标准化总体协调工作组组长, 主要从事宽带信息传输技术领域的科研和教学工作。

朱义胜 男, 1945 年生于山东, 大连海事大学信息工程学院教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究领域为: 电网络理论, 宽带匹配, 数字通信。

潘长勇 男, 1975 年生于安徽六安, 清华大学电子工程系讲师, 曾获国家发明二等奖一项、教育部科技进步一等奖一项。