

基于复小波变换的 OCWDM 多载波调制系统用于 DVB-T

吴 游¹, 殷奎喜¹, 赵 华¹, 吴 勇²

(1. 南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210046)

(2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210046)

[摘要] 用二元树复小波变换取代 OFDM 中的傅立叶变换, 应用于 DVB 系统. 在 DVB-T 中, 将 Orthogonal Complex Wavelet Division Multiplex (OCWDM) 多载波调制系统在高斯信道、平坦衰落信道、频率选择性信道中进行仿真. 同 OFDM 相比较, OCWDM 在高斯信道和平坦衰落信道下误码率有着明显的降低; 在频率选择性信道下, OCWDM 的误码率也低于 OFDM. OCWDM 有着很好的抗噪声和抗衰落、抗多径特性. DTCWT 的小波基具有正交性, 不需要循环前缀来消除码间干扰和子载波间干扰, 简化了 OCWDM 调制过程. DTCWT 可以直接通过数字滤波器实现, 运算复杂度低, 硬件实现简单. OCWDM 在 DVB 系统中有着很好的应用前景.

[关键词] 二元树复小波变换, 小波复用, 多载波调制, 数字电视系统

[中图分类号] TN911 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2010)02-0038-05

Multicarrier Modulation Based on DualTree Complex Wavelet Transform Applied in DVB-T

Wu You¹, Yin Kuixi¹, Zhao Hua¹, Wu Yong²

(1. School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

(2. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract DualTree Complex Wavelet Transform (DTCWT) replaces DFT in OFDM applied in DVB system. In DVB-T, Orthogonal Complex Wavelet Division Multiplex (OCWDM) is simulated in gauss channel, flat fading channel and frequency selective channel. The results show that OCWDM has much lower BER compared with OFDM in gauss channel and in flat fading channel. Also in frequency selective channel, OCWDM outperforms OFDM. OCWDM has good denoising property, anti-fading property and antimultipath property. OCWDM does not need CP to reduce ISI and ICI because of its orthogonality. It simplifies modulation steps. DTCWT can be realized by digital filters. It reduces computational complexity and OCWDM can be realized by hardware easily. OCWDM applied in DVB-T has a broad sight.

Key words dual tree complex wavelet transform, wavelet division multiplex, multicarrier modulation, DVB

随着数字技术的不断发展, 数字电视相对于模拟电视的巨大优势使之成为公认的下一代电视系统. 1995年, 欧洲 150个组织成立了 DVB(Digital Video Broadcasting 数字视频广播)联盟. 1997年, DVB联盟发表了它的数据广播技术规范, 包括卫星数字电视传输标准 DVB-S、有线电视传输标准 DVB-C和地面传输标准 DVB-T. DVB-T系统是数字电视系统中实现难度最高和最具有发展前景的一个分支系统. 面对既要满足恶劣地面广播多变通道的条件, 又要满足多功能业务和多套节目的需要, DVB-T标准中采用 OFDM复用技术.

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 是一种无线环境下的高速传输技术. 它具有比较高的频谱利用率和优良的抗多径干扰能力. 基于这种正交频分复用调制原理有 2种技术, 一种是基于傅里叶变换的 OFDM (DFT-OFDM) 技术^[1, 2], 另一种是基于正交小波变换的 OWDM (DWT-

收稿日期: 2009-05-11

基金项目: 国家 863 计划 - 视频 GB 关键技术研究项目 (2007AA12Z238).

通讯联系人: 殷奎喜, 教授, 博士生导师, 研究方向: 移动通信. E-mail: yinkuixi@njnu.edu.cn

OFDM)技术^[3-6]. OWDM 中的 DWT 运算复杂度低, 调制方式简单, 并且对小波基的选择灵活多变. 文献 [3]证实了 OWDM 在 DVB-T 中的有效应用. DWT 的共轭镜像滤波器组虽然能够保证信号完全重构, 但是因为 DWT 中的下采样运算, 会给信号带来较大的混叠, 引入自噪声, 使信号畸变, 有着一定的局限性. 而在 OFDM 中, 首先对信号进行多相位星座映射, 所以信号不仅包含幅度信息, 还包含相位信息. 复小波变换对处理这些复信号有着更大的优势. Kingsbury^[7-9]提出的二元树复小波变换 (DTCWT) 是复小波变换的离散实现. 当对应小波基近似满足 Hilbert 变换关系时, DTCWT 能够极大的减少通常 DWT 中的平移敏感性, 同时保证了其正交性. 将 DTCWT 取代 DFT 应用在 DVB-T 系统中既保持了 OWDM 的优势, 又弥补了 OWDM 由于缺乏平移性带来的缺陷. DTCWT 采用共轭镜像滤波器组级联实现, 运算简单. 本文将 DTCWT 取代 DFT 应用在 DVB-T 系统中, 复小波多载波调制系统 (OCWDM) 能够有效地提高在不同信道下的传输性能. 第 1 节介绍了二元树复小波变换的算法以及特性; 第 2 节提出了基于二元树复小波变换的复小波多载波调制系统 (OCWDM) 在 DVB-T 数字电视系统中的模型和特点; 第 3 节仿真了 OCWDM 在高斯信道、平信道和频率选择坦衰落性信道中的误码率性能; 最后给出了本文的结论.

1 复小波变换

相比较傅里叶变换的频域特性, 小波变换具有局部时频分解特性, 可以同时时在时域和频域重复, 提高了频谱利用率. 对于一维离散信号为 $f(n)$, $n \in Z, f(n) \in L^2(Z)$, 即 $\sum |f(n)|^2 < +\infty$, 则 $f(n)$ 离散小波变换可表示为:

$$DWTf = DW T(j\ k) = 2^{j/2} \sum_n f(n) \phi(2^n - k), \tag{1}$$

式 (1) 的重构公式即逆离散小波变换为:

$$f(n) = \sum_j \sum_k DW T(j\ k) \phi_j^*(n), \tag{2}$$

其中: 小波函数 $\phi_{jk}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k)$ 对于所有的 $j, k \in Z$ 都是相互正交的, 即

$$\int \phi_{jk}(t) \cdot \phi_{j'k'} dt = \delta_{jj'}, \tag{3}$$

在同一尺度下, 因为 $W_j \perp V_j$, 小波函数 $\phi_{jk}(t)$ 和尺度函数 $\phi_{jk'}(t)$ 之间是正交的, 即

$$\int \phi_{jk}(t) \cdot \phi_{jk'}(t) dt = 0, \tag{4}$$

由式 (3) 和 (4) 可知: 正交小波都具有非零平移自正交性和小波函数之间的互正交性, 能消除码间干扰 ISI (Inter-Symbol Interference) 和子载波间干扰 ICI (Inter-Carrier Interference). 离散实小波变换 “à trous 算法” 中分解包含下采样运算, 重构包含用零插值运算. 下采样运算在频域中如式 (5) 所示:

$$X(\omega)H(\omega) \downarrow_2 = \frac{1}{2} \left[X\left(\frac{\omega}{2}\right)H\left(\frac{\omega}{2}\right) + X\left(\pi - \frac{\omega}{2}\right)H\left(\pi - \frac{\omega}{2}\right) \right], \tag{5}$$

所以 $[e^{j\omega} X(\omega)H(\omega)] \downarrow_2 \neq e^{j\omega} [X(\omega)H(\omega)] \downarrow_2$, 频域会产生混叠, 缺乏平移不变性.

DTCWT^[8] 通过共轭镜像滤波器组级联实现. 滤波器组可采用奇 / 偶长滤波器组或 Q-sh ift 滤波器组实现. Q-sh ift 滤波器的计算复杂度要远低于奇 / 偶长滤波器, 系数完全对称, 由正交小波完成, 能够保证更好的频率特性, 所以 DTCWT 一般采用 Q-sh ift 滤波器组. DTCWT 采用了二元树结构的两路 DW T, 一树生成实部, 一树生成虚部. 如图 1 所示: 第一层变换的滤波器 $H_{0a}, H_{0b}, H_{1a}, H_{1b}$ 均为奇数长度的滤波器; 其它层为 Q-sh ift 滤波器组. H_{00a} 有 $\frac{1}{4}$ 采样点 (+ q) 的群延迟, $H_{00a}(z) = z^{-1}H_L(z^{-1})$; H_{01a} 有 (+ 3q) 的

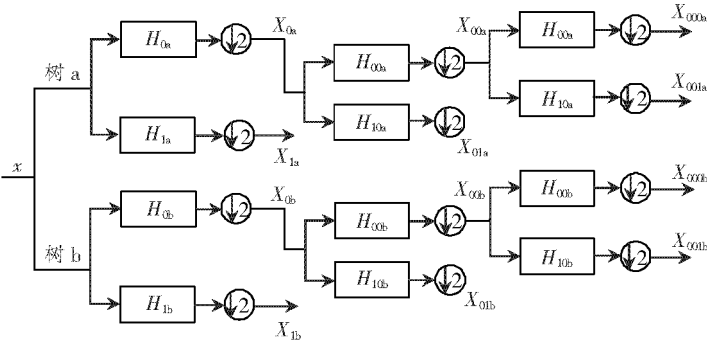


图 1 二元树复小波变换分解图

Fig.1 Dual-tree complex wavelet transform diagram

群延迟, $H_{01a}(z) = H_L(-z)$; H_{01b} 有 $(+q)$ 的群延迟, $H_{01b}(z) = z^{-1}H_L(-z^{-1})$; 而 H_{00b} 有 $(+3q)$ 的群延迟, $H_{00b}(z) = H_L(z)$; 两树之间就可以有 $(+2q)$ 的群延迟. 这样两树对应滤波器的相频响应之间有半个采样周期的群延迟, 且 2 个滤波器的幅频响应相同. 两树在该层和所有前层上产生的延迟差的总和相对于原始输入为一个采样周期, 确保 b 树中第一层的抽样恰好采样到 a 树中因二抽取所丢失的采样值. DTCWT 克服了下采样带来的混叠, 不会因为输入信号一个很小的平移会使小波系数产生非常明显的变化, 引入自噪声, 造成信号畸变.

构成 Q-shift 滤波器组的滤波器是长度为 $2n$ 的低通滤波器 $H_L(z)$, 有着 $\frac{1}{4}$ 采样周期的群延迟的 H_L 可以通过多项式矩阵获得:

$$\begin{bmatrix} H_L(z) \\ z^{-1}H_L(-z^{-1}) \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta_n)z\mathbf{R}(\theta_{n-1})z\cdots\mathbf{R}(\theta_1)\begin{bmatrix} 1 \\ z^{-1} \end{bmatrix}, \tag{6}$$

其中 $\mathbf{R}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix}$, $z = \begin{bmatrix} z & 0 \\ 0 & z^{-1} \end{bmatrix}$.

H_L 满足完全重构条件: $H_L(z)H_L(z^{-1}) + H_L(-z^{-1})H_L(-z) = 2$
这样得到的 $H_{L2}(z) = H_L(z^2) + z^{-1}H_L(z^{-2})$ 为线性相位, 长度为 $4n$, 有 $\frac{1}{2}$ 采样周期的群延迟, 如图 2 所示: H_{L2} 随着 n 越大, 滤波器的通带越平滑, 通带稍微变窄, 带外衰减越大, H_{L2} 越接近理想的低通滤波器.

OFDM 主要是基于 FFT 变换, 对信号经过一个矩形窗处理, 它的子载波的频谱包络主瓣能量不集中, 旁瓣衰减慢, 对频偏敏感, 容易产生子载波间干扰. 经过 DTCWT 调制后的信号频谱如图 3 所示, 第一个旁瓣比主瓣大约低 20 dB, 主瓣包含了绝大部分的信号能量, 旁瓣衰减慢比较快.

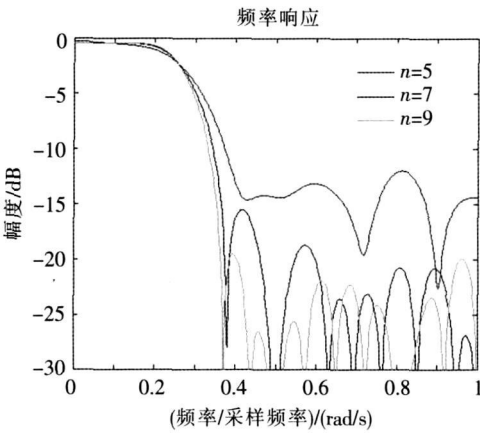


图 2 n 不同的 H_{L2} 滤波器的频率响应

Fig.2 The frequency response of H_{L2} with different n

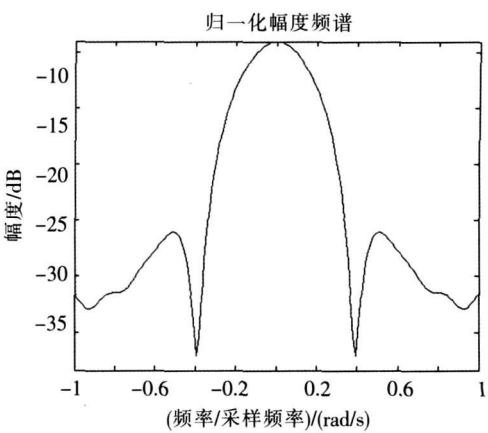


图 3 DTCWT 调制信号的频谱

Fig.3 The frequency spectrum of DTCWT signal

对于长度为 N 的信号, DFT 需要 N^2 次乘法和 N^2 次加法, 快速傅里叶变换 FFT 的运算复杂度 $ON = N \log_2 N$; DTCWT 变换过程由滤波器组来实现, 每次需要 N 次乘法和 N 次加法, 运算复杂度为 $ON = 2N$, 比较 $N \log_2 N$, 随着 N 越大, 节省的运算量还是很可观的.

2 DVB-T 中的 OCWDM 系统模型

OCWDM 是一种基于复小波基函数作为编码波形的正交多路复用技术, 具有有限的持续时间, 且时频重复, 相对于频分复用和时分复用提供了潜在的容量增加和抗复杂信道环境的鲁棒性.

在 DVB-T 系统中, 为了提高传输效率首先对信号进行符号映射, DVB-T 的星座调制有 QPSK (QAM)、16QAM、64QAM 3 种. 需要传送的信号不是对单一载波调制, 而是将其分配在相毗邻的频谱关系是正交的大量载波上. DVB-T 有 8 k 模式和 2 k 模式 2 种. 8 k 模式有 8 196 个子载波, 2 k 模式下有 2 048 个子载波. 但每一种模式下都有一定数目的虚拟载波没有用, 因此实际系统中传输数据的载波数不是 8 192 和 2 048 而是 6 048 和 1 512 2 k 模式所需的 FFT 点数较少, 结构比较简单, 比较适应于普通数字地面数字广播; 8 k

模式具有更强的抗 ISI能力, 比较适合大范围单频网络 (SFN). DVB-T 系统中放置了大量导频信号, 穿插于数据之中, 并以高于数据 3 dB 的功率发送, 这些导频信号便于完成系统同步、载波复用、时钟调整和信道估计. 由于导频信号数量多, 且散布在数据中, 所以能够较及时地发现和估计信道特性的变化.

在 DVB-T 中, OCWDM 的发送信号流程图如图 4所示: 发送端通过扰码器、RS编码器和交织器进行信道编码; 再通过映射器将编码后的码流映射到符号星座上, 调制方式可采用 64QAM /16QAM /QPSK; 经过串 /并转换后, 通过 DTCWT调制得到 OCWDM 符号, 经过 D/A 转换通过天线发送. 接收信号流程图如图 4所示: 在接收端, 从天线接收下来的数据经高频头, 变成中频模拟信号, 放大后经过 A /D变成数字信号, A /D采样钟受压控晶振控制, 直接由采样钟同步部分估计得到. A /D转换后的数据一路做 AGC 检测去控制高频头的输出, 另一路径 R/C 变换成 OCWDM 符号. 同步部分直接根据插入已知导频估计和跟踪定时; 同时估计由于收发上下变频引起的频偏, 经过频偏控制单元跟踪频偏, 送到数字频偏校正单元对数据进行频偏校正. 经过频偏校正后的数据流做 DTCWT解调. 解调后的信号由频率同步模块和跟踪导频信号, 得到帧同步头位置. 然后进行信道解码, 恢复码流.

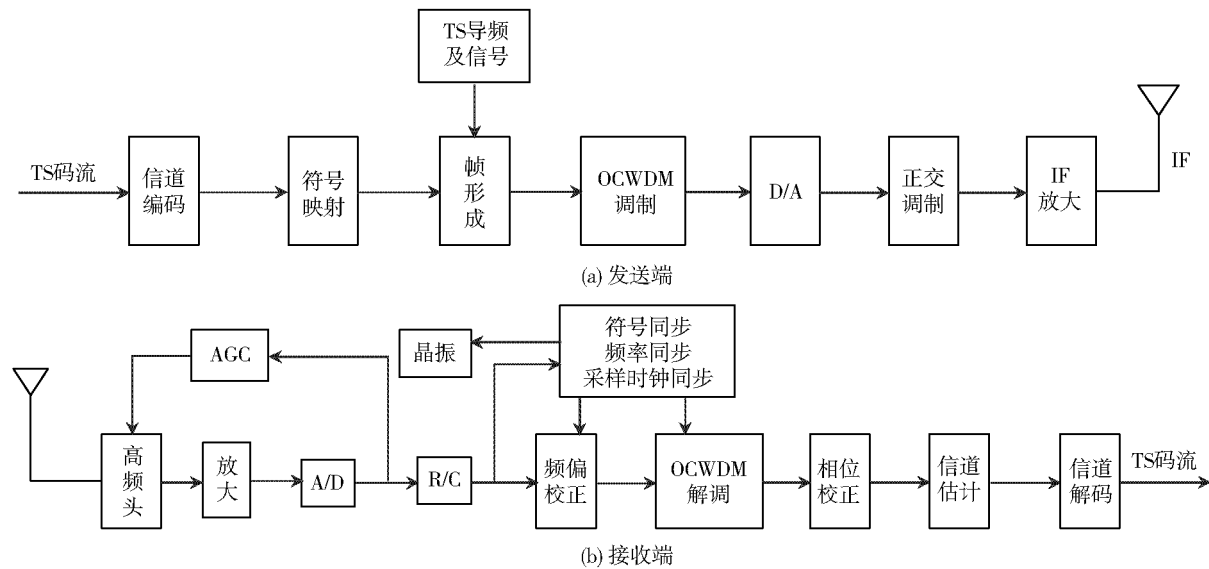


图 4 信号的发送与接收流程图
Fig.4 The flow charts of transmitter and receiver

3 仿真结果

本文的仿真采用 DVB-T 2k 移动模式. 在 matlab6. 5 仿真平台首先将信源信号通过调制成 1 512 个 16-QAM符号信号, 插入已知导频信号; 一共为 1 705个载波; 通过 2 048个点数的 IFFT 变换, 形成 OFDM 符号; 通过高斯信道、平坦衰落信道、频率选择性衰落信道; 比较 OFDM 以及 OCWDM 分别在高斯信道、平坦衰落信道和频率选择信道中传输性能. 设定符号周期为 0. 5 μs, OFDM 的保护时隙的长度为 $\frac{1}{4}$, OCWDM 无需保护时隙.

OCWDM 和 OFDM 在不同的信噪比 SNR 下在高斯信道中的误码率 (BER)性能如图 5所示, OCWDM 比 OFDM 在高斯信道下的误码率要低很多, 在信噪比为 10 dB 时, OCWDM 的误码率从 0. 1 左右下降到 0. 01左右, OCWDM 有很好抗噪声特性. OCWDM 和 OFDM 在不同的信噪比 SNR 下在平坦衰落信道中的误码率 (BER)性能如图 6所示, OCWDM 的误码率低于 OFDM; OCWDM 在平坦衰落信道下的抗噪声性能和抗衰落特性明显优于 OFDM.

对于频率选择性信道仿真设定由 4个信道组合而成, 最大频偏 $f_d = 200$ Hz. OCWDM 和 OFDM 在不同的信噪比 SNR 下在频率选择性衰落信道中的误码率 (BER)性能如图 7所示, OCWDM 的特性要优于 OFDM, OCWDM 同样具有抗多径的性能.

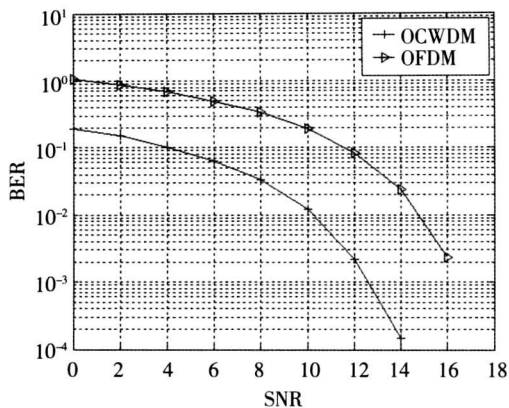


图 5 OCWDM 和 OFDM 在高斯信道下的误码率性能曲线
Fig.5 The performance curves of OCWDM and OFDM in Gaussian channel

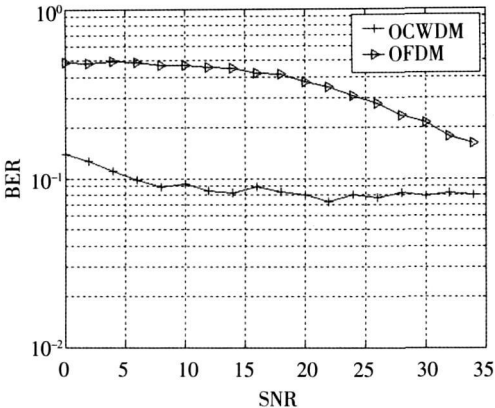


图 6 OCWDM 和 OFDM 在平坦衰落信道下的误码率性能曲线
Fig.6 The performance curves of OCWDM and OFDM in flat fading channel

4 结论

本文将基于二元树复小波变换的多载波调制系统 (OCWDM)应用于 DVB-T 中, 讨论了其核心结构以及分析了其优越的性能. 理论上分析了 OCWDM 的优势, DTCWT 保留了确保子载波之间的正交特性, 同时在接收端能够对复信号完全重构, 不会引入自噪声; 并在高斯信道、平坦衰落信道和频率选择性信道下仿真了其误码率特性. 仿真结果表明, 在高斯信道、平坦衰落信道、频率选择性信道下的传输特性都明显优于 OFDM. OCWDM 有着很好的抗噪声、抗衰落、抗多径特性; 并且 DTCWT 直接通过数字滤波器实现, 运算量少, 硬件实现方便. 因此将 OCWDM 应用于数字电视系统中, 有着很好的应用前景.

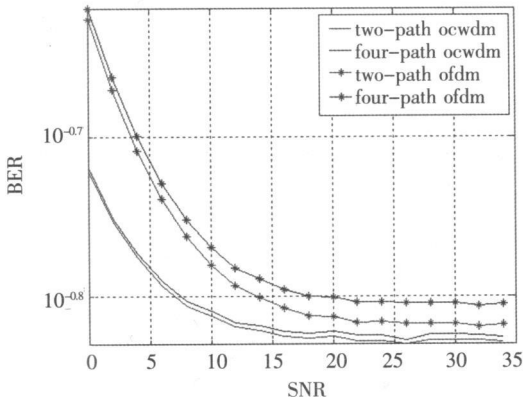


图 7 OCWDM 和 OFDM 在频率选择性衰落信道下的误码率性能曲线
Fig.7 The performance curves of OCWDM and OFDM in frequency selective fading channel

[参考文献]

[1] Richard van Nee, Ramjee Prasad. OFDM for Wireless Multimedia Communications[M]. Boston: Artech House, 2000.

[2] Wu Zhijiang, Nassar C R. Narrowband interference rejection in OFDM via carrier interferometry spreading codes[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2005, 4(4): 1 491-1 505.

[3] Linfot S. A study of different wavelets in orthogonal wavelet division multiplex for DVB-T[J]. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 2008, 54(3): 1 042-1 047.

[4] Mital V, Gautam Y, Mallik R K, et al. Analysis of wavelet modulation in frequency-selective fading[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(6): 3 818-3 826.

[5] Linfot S. L Wavelet families for orthogonal wavelet division multiplex[J]. Electronics Letters, 2008, 44(18): 1 101-1 102.

[6] Zhou L, Li J, Li F, et al. OWDM system based on ML algorithm and blind identification in multipath fading channel[J]. Electronics Letters, 2004, 40(12): 749-750.

[7] Kingsbury N G. Image processing with complex wavelets[C] // Discussion Meeting on Wavelets: the Key to Intermittent Information. London: Philos Trans Royal Soc, 1999, 1760(357): 2 543-2 560.

[8] Kingsbury N G. A dual-tree complex wavelet transform with improved orthogonality and symmetry properties[C] // Proceeding of IEEE Int Conf Image Process. Vancouver: IEEE, 2000, 375-378.

[9] Kingsbury N G. Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals[J]. J Appl Comput Harmon Anal, 2001, 10(3): 234-253.

[10] 章国安, 张小东, 毕光国. 基于复小波包基函数调制的调频多址通信系统[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(7): 961-967.

[11] 袁东风, 张海霞, 编著. 宽带移动通信中先进信道编码技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.

[责任编辑: 顾晓天]