

The Key Technologies Study in the Underwater Acoustic Communications on Wavelet Packet Modulation

WANG Zhongxun^{1,2}, YANG Rijie², QIAO Gang³

1. Institute of science and technology for opto-electronic information, Yantai University, Yantai, China

2. Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai, China

3. Institute of underwater acoustic engineering, Haerbin Engineering University, Haerbin, China

e-mail: ytwzx3@tom.com

Abstract: Wavelet packet modulation is more and more applied in the wireless communication. A cluster induced by wavelet packet is derived by wavelet packet transform in the signal space. A cluster of wavelet packet multicarrier modulation blue print would be get. The paper will apply wavelet modulate in the underwater acoustic communications. The result of simulation indicates that this method not only has little power but also is better than OFDM in the Doppler shift.

Keywords: wavelet packet; underwater acoustic communications; multicarrier modulation; wavelet transform

基于小波包调制的水声通信关键技术研究

王中训^{1,2}, 杨日杰², 乔钢³

1. 烟台大学光电信息科学技术学院, 烟台, 中国, 264005

2. 海军航空工程学院通信工程系, 烟台, 中国, 264000

3. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨, 中国, 150001

e-mail: ytwzx3@tom.com

【摘要】小波包调制在无线电通信中得到了越来越多的应用, 通过小波包变换在信号空间中导出一簇诱导小波包基, 可以得到一簇小波包多载波调制解调方案。本文将小波包调制应用于水声通信中, 仿真结果表明, 该方法不仅峰均功率比较小, 在存在多普勒频移时, 其性能优于 OFDM。

【关键词】小波包; 水声通信; 多载波调制; 小波变换

1 引言

近年来, 随着信号处理技术的发展, 各种新技术被广泛应用于水声通信中。多载波水声通信由于频带利用率高而被受关注, 目前实现多载波调制的方法已有多种, 比如矢量编码方式、结构化信道信号方式、滤波多音调制、OFDM 以及小波变换方式等^{[1][2]}。目前只有 OFDM 被应用于水声通信^[3], 并且已经显示出优越性, 本文尝试将小波包调制应用于水声通信。小波包(wavelet packet)概念是由 M. V. Wickerhauser, R. R. Coifman^[4]等人在小波变换的基础上进一步提出来的。其核心同时对小波分解后的逼近信号(低通信号)和细节信号(高频信号)进行进一步的分解, 形成一种二叉树的结构。

2 小波包理论基础

2.1 小波包的定义及性质

二进离散小波变换^[5]的尺度函数 $\phi(t)$ 和小波函数 $\psi(t)$ 有如下的二尺度关系:

$$\phi(2^j t) = \sum_k g_0(k) \phi(2^{j+1} t - k) \in A_j \quad (2-1)$$

$$\psi(2^j t) = \sum_k g_1(k) \phi(2^{j+1} t - k) \in W_j \quad (2-2)$$

式中和 $g_0(k)$ 和 $g_1(k)$ 分别为镜像滤波器(QMF)组中的低通和高通单位冲击响应。同样, 若对细节信号同时进行分解即可得到小波包的一般迭代公式(2-2)

$$\mu_{2l}(t) = \sum_k g_0[k] \mu_l(2t - k) \quad (2-3)$$

$$\mu_{2l+1}(t) = \sum_k g_1[k] \mu_l(2t - k) \quad (2-4)$$

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (Y2005G15)
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of Shandong(Y2005G15)

其中， $\mu_0 = \phi$ 和 $\mu_1 = \psi$ 分别为尺度函数和小波，信号空间 $L^2(R)$ 被逐级分成正交的子空间。以三级分解为例，分解结构如图所示。

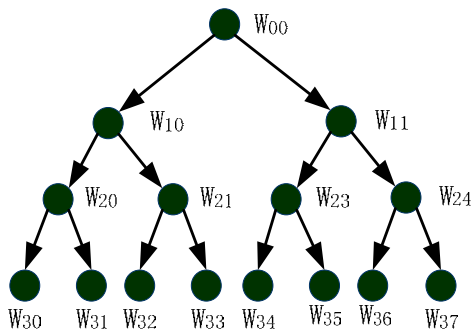


Figure 2.1. Example of admissible wavelet packet binary tree
图 2.1. 小波包三级分解图

图中 W_{00} 为信号空间，则 $W_{00} = W_{10} \oplus W_{11} = W_{20} \oplus W_{21} \oplus W_{22} \oplus W_{23} = W_{30} \oplus W_{31} \oplus \dots \oplus W_{37}$ 。已经证明若 $B_0^p = \{ \psi_0^p(t - 2^j n) \}_{n \in \mathbb{Z}}$ 为 W_{00} 则可通过(2-3),(2-4)依次得到各个子空间的正交基。

2.2 小波包分解和综合

连续小波信号^[6]的表达式：

$$W_\phi x(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\phi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2-5)$$

令尺度 $a = 1/2^s$ 和 $b = k/2^s$ 平移，其中 s 和 k 属于整数集 \mathbb{Z} 。在时间—尺度平面上， $\phi(t)$ 的连续小波变换点 $(b = k/2^s, a = 1/2^s)$ ，的只是一个数，他表示了 $\overline{\phi(t)}$ 与 $x(t)$ 在时间—尺度点的关系。令其为离散小波变换。它生成时间—尺度平面上的一个稀疏集。用：

$$\omega_{k,s} = W_\phi x\left(\frac{k}{2^s}, \frac{1}{2^s}\right) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\phi\left(\frac{t - k/2^s}{1/2^s}\right)} dt \quad (2-6)$$

表示在点 $(b = k/2^s, a = 1/2^s)$ 的小波系数。在时间—尺度平面上连续小波变换生成冗余信息。通过选择 $(b = k/2^s, a = 1/2^s)$ ，利用离散小波变换处理信号更加方便。

设：

$$\begin{aligned} x_{s+1}(t) \in A_{s+1} &\Rightarrow x_{s+1}(t) = \sum_k a_{k,s+1} \phi_{k,s+1}(t) \\ x_s(t) \in A_s &\Rightarrow x_s(t) = \sum_k a_{k,s} \phi_{k,s}(t) \\ y_s(t) = W_s &\Rightarrow y_s(t) = \sum_k \omega_{k,s} \phi_{k,s}(t) \end{aligned} \quad (2-7)$$

由于多分辨分析要求满足

$$A_{s+1} = A_s + W_s \quad (2-8)$$

而可以得到：

$$\begin{aligned} x_{s+1}(t) &= x_s(t) + y_s(t) \\ \sum_k a_{k,s+1} \phi_{k,s+1}(t) &= \sum_k \omega_{k,s} \phi_{k,s}(t) + \sum_k a_{k,s} \phi_{k,s}(t) \end{aligned} \quad (2-9)$$

将分解关系：

$$\phi(2^{s+1}\{h_0[2k-l]\phi(2^s t-l) + h_1[2k-l]\phi(2^s t-k)\}t-l) = \sum_k \phi_{k,s+1}(t) \quad (2-10)$$

带入得到在分辨率 s 下的所有基的方程然后比较 $\phi_{k,s+1}(t)$ 和 $\phi_{k,s}(t)$ 的系数可以得到：

$$\begin{aligned} a_{k,s} &= \sum_l h_0[2k-l] a_{l,s+1} \\ \omega_{k,s} &= \sum_l h_1[2k-l] a_{l,s+1} \end{aligned} \quad (2-11)$$

其中方程右端相当于卷积后 2 抽取。这样建立了任何尺度下尺度函数和相邻高阶尺度系数之间的关系。重复这些算法，可以得到不同尺度下的信号成分。如图：

$$a_s = \{a_{k,s}\}, \omega_s = \{\omega_{k,s}\}, h_0 = \{h_0[k]\}, h_1 = \{h_1[k]\}, k \in \mathbb{Z} \quad (2-12)$$

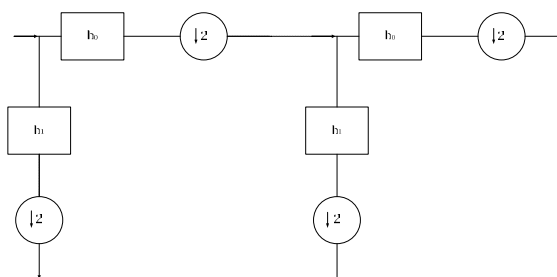


Figure 2.2 Schematic diagram wavelet packet decompose
图 2.2. 小波包分解示意图

任何变换有唯一的逆使得原始数据能够被完全恢复是重要的。存在唯一的逆离散小波变换，使得原始函数能够根据不同的尺度的分量完全恢复。重构算法

是基于尺度函数和小波函数的二尺度关系。考虑第 s 个分辨率下这些分量的和：

$$x_s(t) + y_s(t) = \sum_k a_{k,s} \phi_{k,s}(t) + \sum_k \omega_{k,s} \varphi_{k,s}(t) = x_{s+1}(t) \quad (2-13)$$

将二尺度关系带入得：

$$\sum_k a_{k,s} \sum_l g_0[l] \phi(2^{s+1}t - 2k - l) + \sum_k \omega_{k,s} \sum_l g_1[l] \phi(2^{s+1}t - 2k) = \sum_l a_{l,s+1} \phi(2^{s+1}t - l) \quad (2-14)$$

比较上式两端 $\phi(2^{s+1}t - l)$ 的系数，得到：

$$a_{l,s+1} = \sum_l \{g_0[l - 2k] a_{k,s} + g_1[l - 2k] \omega_{k,s}\} \quad (2-15)$$

其中等式右端对应于先插值后卷积^[7]。

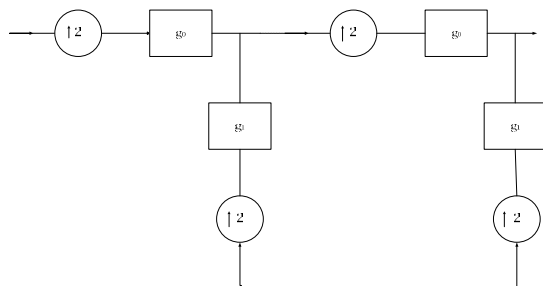


Figure 2.3. Schematic diagram wavelet packet decompose
图 2.3. 小波包综合示意图

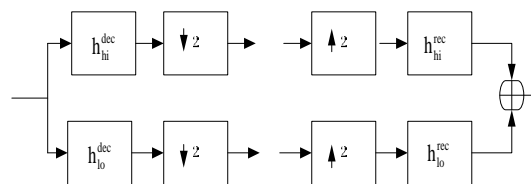


Figure 2.4. Schematic diagram wavelet packet synthetic
图 2.4. 小波包分解与综合

3 小波包多载波调制系统

用小波包基代替正交频分复用中使用的正弦或余弦函数，小波包基 MCCS 使用不同的小波包作为时间域波形。如果逼近函数 φ 生成 $L^2(\mathbf{R})$ 空间中的规范正交集，则对应的小波包是正交的。现在子载波是小波包，而且接收器中的匹配滤波器被相应地设计。对于子载波来说，由于存在大量地小波包可供选择，经过试验选择小波包使得它们地频谱非常接近于正交频分

复用地频谱。

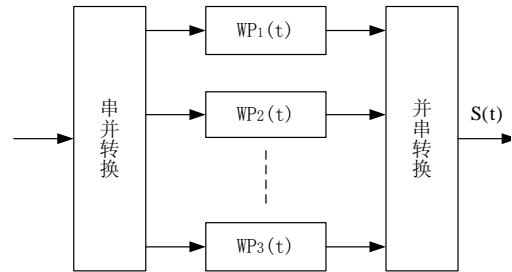


Figure 3.1. Wavelet packet modulation (transmitter)
图 3.1. 小波包调制发射框图

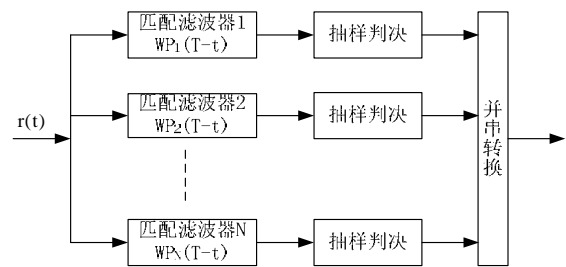


Figure 3.2. Wavelet packet demodulation (Receiver)
图 3.2. 小波包调制接收框图

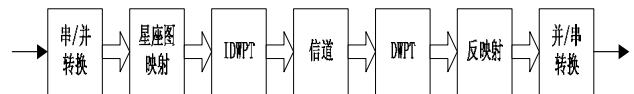


Figure 3.3. Framework of the Wavelet packet modulation communication systems
图 3.3. 小波包多载波调制系统基本框图

4 小波包调制的优势

尽管基于小波包调制中的小波包基函数的时域和频域都是重叠的，但他们是彼此正交的，因此利用小波包作为子载波可以更加有效的利用频谱。除此之外，小波包调制还在抗干扰方面，数据传输率和安全性方面具有 OFDM 无法比拟的优势。

带宽利用率：在 OFDM 系统中，每一个消息调制成正弦载波需要带宽为 $(1 + \alpha) / T_1$ ，其中 α 是一个用来描述脉冲信号特征的滚降系数。脉冲信号通常为升余弦特性，因此 α 在 0 和 1 之间选择^[8]。因此传输 2^l 个信息所用的总带宽为：

$$W_{FDM} = \frac{2^l (1 + \alpha)}{T_1} \quad (4-1)$$

假定 γ 为小波包函数 $\Psi_0^1(t)$ 的带宽效率，即：

$$\int_{-2\pi\beta_\gamma/T_0}^{2\pi\beta_\gamma/T_0} |\Psi_0^1(\omega)|^2 d\omega = \gamma \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi_0^1(\omega)|^2 d\omega \quad (4-2)$$

若将 2^ℓ 个小波包函数在双边带上传输，则小波包调制的所需带宽为

$$W_{DWPM} = \frac{2^{\ell+1} \beta_\gamma}{T_\ell} \quad (4-3)$$

从而所需带宽之比为：

$$\eta = \frac{W_{DWPM}}{W_{FDM}} = \frac{2\beta_\gamma}{1+\alpha} \quad (4-4)$$

可以选择 $\eta < 1$ ，使带宽利用率提高。

传输速率：小波包调制可以看作是 TDM 和 FDM 的结合，即在时域上有重叠，也在频域上有重叠，频谱利用率可以得到进一步提高。

数据安全性：小波包调制是按照一定小波基进行特定地分解，因此接收端不仅需要知道小波基还需要知道分解方式才能正确解调，并且在频谱上还有类似于白噪声地特性，从而增加了数据地安全性^[9]。

5 仿真结果

为了验证小波包调制在水声通信中的有效性，针对水声通信中存在的多普勒的情况进行了仿真。

频率偏移导致两个不好的后果，一是每个子载波输出信号幅度的减小，二是由于子载波间正交性的丧失而引入的子载波间干扰。在水声通信中，由于通常工作在低频（带宽和载波相比很大），并且声速远低于无线电（通常取为：1500m/s，比无线电低 5 个数量级），因此当存在多普勒时（特别是在潜艇、舰船以及水下穿梭潜器通信），与无线电相比更加严重的影响了 OFDM 系统的性能。小波包调制作为一种新型的多载波调制方式被尝试应用于移动水声通信。仿真结果表明，在存在较大多普勒频移时，基于离散小波包变换(DWPT)的多载波系统明显优于基于离散傅立叶变换(DFT)的多载波系统。

6 结论

本文研究了小波包多载波调制在多载波水声通信中的新技术，并且通过仿真进行了系统验证。多普勒频移是制约多载波水声通信中性能的最主要的因素之

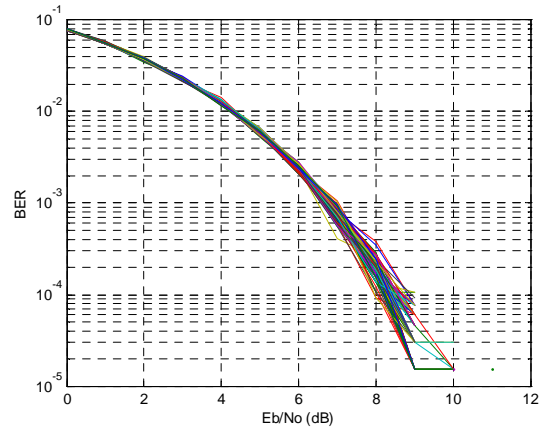


Figure 5.1. Part of the simulation results without Doppler
图 5.1. 无多普勒时部分仿真结果

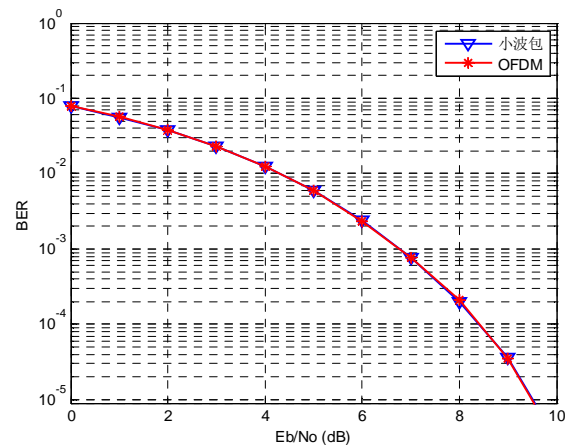


Figure 5.2. Comparison of OFDM and wavelet packet modulation without Doppler
图 5.2. 无多普勒时 OFDM 和小波包调制的比较

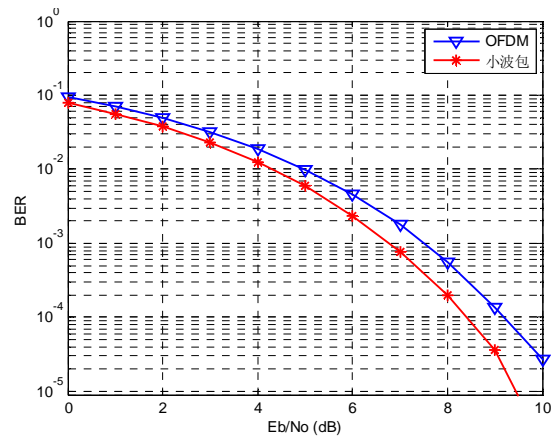


Figure 5.3. Comparison of OFDM and wavelet packet modulation with Doppler
图 5.3. 频偏为 0.05/T0 时的仿真结果

一，小波包调制在存在多普勒频移时其性能明显优于基于离散傅立叶变换的多载波系统（OFDM），为移动多载波水声通信提供了一个新的研究方向。

References (参考文献)

- [1] ZHAO Liang, ZHU Min. Frequency-domain equalization for multi-carrier underwater acoustic communication[J]. Technical Acoustics, March 2007 Page(s):472-476.
赵亮, 朱敏. 一种用于多载波水声通信系统的频域均衡算法[J]. 声学技术, 2007 (03) Page(s):472-476.
- [2] Luo Yasong, Liu Zhong, Hu Hongning. Algorithm of frequency-domain decision feedback equalization for MCM underwater acoustic communication[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), March 2009 Page(s):19-21.
罗亚松, 刘忠, 胡洪宁. 多载波水声通信的频域判决反馈均衡算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009(03) Page(s):19-21.
- [3] Gong Chun, Zhou Guojing. Research and Application of OFDM Technique in High Speed Underwater Acoustic Communication[J]. Ship Electronic Engineering, June 2008 Page(s):184-186
龚纯, 周国敬. OFDM 技术在高速水声通信中的研究与应用[J]. 舰船电子工程, 2008(06) Page(s):184-186.
- [4] P. R. Coifman, M. V. Wicerhauser. Adapted waveform analysis as a tool for modeling, feature extraction and denoising[J]. Optical Engineering, 1994, Vol.33 (No.7): 2170-2174.
- [5] S. Arivazhagan, W. S. L. Jebarani, G. Kumaran, Performance comparison of discrete wavelet transform and dual tree discrete wavelet transform for automatic airborne target detection conference on computational intelligence and multimedia applications[C]. 2007. International Conference on Volume 3, 13-15 Dec. 2007 Page(s):495-500.
- [6] L. Brechet, M. F. Lucas, C. Doncarli, D. Farina. compression of biomedical signals with mother wavelet optimization and best-basis wavelet packet selection biomedical engineering[J]. IEEE Transactions on Volume 54, Issue 12, Dec. 2007 Page(s):2186 – 2192.
- [7] S. Mallat, A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Trans. Pattern anal. Machine intell, vol.11, pp.674-693. July 1989.
- [8] M. Yasir, M. J. Mughal, N. D. Gohar, S. A. Moiz, Performance comparison of Wavelet based OFDM (WOFDM) V-BLAST MIMO system with different detection algorithms emerging technologies[C]. 2008. ICET 2008. 4th International Conference on 18-19 Oct. 2008 Page(s):110-115.
- [9] Kon Max Wong. Wavelet packet division multiplexing and wavelet packet design under timing error effects [J]. IEEE Trans. Signal Porcessing.vol.45.Dec.1997 PP.2877-2889.