

# 一种新的水声 MIMO 空时频编码技术

姜 煜, 白兴宇

(杭州应用声学研究所 声纳技术国家级重点实验室, 杭州 310012)

**摘要:** 基于贝尔实验室垂直分层空时编码(VB-LAST)的水声多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)通信技术, 通过充分开发空间资源, 可在不增加系统带宽的条件下成倍提高数据传输速率, 是一种极具潜力的高速水下通信技术。但由于其接收信号中同时含有同频干扰及多径干扰, 当信道多径扩展严重时, 其性能下降严重。为此, 提出一种新的空时频编码技术, 该技术通过将各层信号调制到彼此正交的子载波上, 不但可在接收端完全消除同频干扰, 同时还能获得频率分集增益, 从而使水声 MIMO 通信系统的性能获得极大改善。仿真及湖试结果证明了其有效性。

**关键词:** 垂直分层空时编码; 多输入多输出; 空时频编码; 同频干扰

中图分类号: TN913

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-06-0533-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.06.014

## A novel space-time-frequency coding for underwater MIMO communication system

JIANG Yu, BAI Xing-yu

(Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, National Key Laboratory of Science and Technology on Sonar, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** As a potential high speed underwater acoustic communication technique, the MIMO technique based on VB-LAST coding can realize spatial multiplexing to greatly increase data rate without increasing the system bandwidth. But the received signal includes intersymbol interference and co-channel interference simultaneously, so the performance of system is descended seriously and especially by the seriously multipath spreading. A novel space-time-frequency coding technique is proposed to improve the MIMO system performance. It modulates every substream by orthogonal subcarrier to avoid co-channel interference and obtain frequency diversity gain. Thereby, the performance of underwater acoustic MIMO communication system can be greatly improved. Good performance of MIMO communication system based on the novel space-time-frequency coding technique is demonstrated by simulation and lake trial results.

**Key words:** VB-LAST; MIMO; space-time-frequency coding; co-channel interference

## 0 引言

在发射端及接收端同时使用多个阵元的水声 MIMO 通信技术, 通过充分开发空间资源, 可在不增加系统带宽的条件下成倍提高数据传输速率, 从而有效解决水下通信系统带宽资源缺乏的难题, 为大幅提高水声通信速率提供一种新的技术手段。

美国早在 2002 年就开始了水声 MIMO 通信技术的研究, 通过几次海上试验, 证明了将 MIMO 技术应用于水声通信的可行性及在提高系统频谱效率方面的巨大优势<sup>[1,2]</sup>。而国内关于这方面的研究还处于起步阶段<sup>[3,4]</sup>。

MIMO 通信系统的调制技术也称空时编码技

术。空时编码技术将多天线技术和信道编码技术相结合, 以期同时获得空间分集和时间分集。空时编码形式众多, 其中由贝尔实验室提出的垂直分层空时编码方案<sup>[5]</sup>, 由于具有极高的频谱效率且易于实现而受到人们广泛关注。VB-LAST 编码能充分利用多径传播, 使系统的频谱效率随发射天线数的增加而呈线性增加。由于水下声信道存在丰富的多径散射, 且频谱资源极为匮乏, 因此, 尤其适合采用 VB-LAST 编码技术, 以在不增加系统带宽的条件下, 大幅提高系统通信速率。仿真及湖试结果证明, 对于多径扩展不大(通常在 100 ms 以下)的水声信道, 基于垂直分层空时编码的水声 MIMO 系统具有良好的通信性能。但对于多径扩展较大的信道, 其性能下降较为严重。为此, 提出一种新的、可有效提高系统稳健性的空时频编码方案, 该方案在垂直分层空时编码的基础上, 进一步引入频域编码,

收稿日期: 2010-11-17; 修回日期: 2011-03-17

作者简介: 姜煜(1975-), 女, 高级工程师, 博士, 研究方向为水声通信技术。

通讯作者: 姜煜, E-mail: jiangyubxy@yahoo.com.cn

不但可使系统获得频率分集增益,还可在接收端完全消除同频干扰,从而使系统性能得以显著改善。仿真及测试结果证明了该编码方案的良好性能。

## 1 基于 VBLAST 编码的水声 MIMO 通信系统

### 1.1 基于 VBLAST 编码的水声 MIMO 通信原理

VBLAST 编码的本质是一种空间复用技术。其首先利用串并转换,将高速源数据流按发射阵元数分割为几个低速子数据流(也称之为层),然后对应于各发射阵元同时并行发送出去。由于这些子数据流占据相同的频带,因此可使系统获得极高的频谱效率。具有  $N$  个发射阵元和  $M$  个接收阵元,基于 VBLAST 编码的水声 MIMO 通信系统的离散时间复基带模型如图 1 所示。

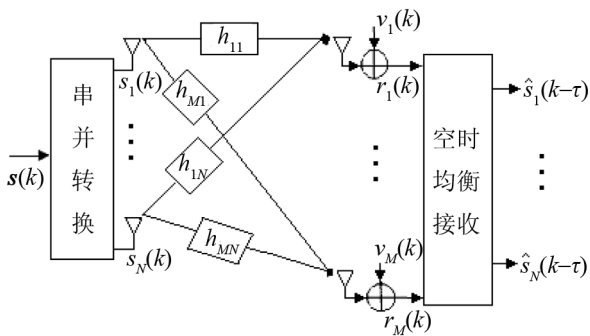


图 1 基于 VBLAST 编码的水声 MIMO 通信系统模型  
Fig.1 Model of underwater acoustic MIMO communication system based on VBLAST coding

图 1 中,  $s_1(k), \dots, s_N(k)$  是在时刻  $k$ , 分别由  $N$  个发射阵元同时发射出去的彼此独立的信息符号。在接收端,  $M$  个接收信号  $r_1(k), \dots, r_M(k)$  以符号间隔被采样。由于存在多径干扰,水声信道通常表现为频率选择性衰落信道,则从发射阵元  $j(j=1, \dots, N)$  到接收阵元  $i(i=1, \dots, M)$  间的频率选择性子信道可表示为有限冲激响应(FIR)向量  $\mathbf{h}_{ij}=[h_{ij}(0), h_{ij}(1), \dots, h_{ij}(L-1)]$ , 其中  $h_{ij}(l)(0 \leq l \leq L-1)$  为独立同分布的零均值复高斯过程,  $L$  为频率选择性子信道的长度(即信道阶数)。对图 1 所示水声 MIMO 通信系统有:

$$\mathbf{r}(k)=\mathbf{H}(k)\mathbf{s}(k)+\mathbf{v}(k) \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{r}(k)=[r_1(k), r_2(k), \dots, r_M(k)]^T$  为  $M$  维接收信号列向量,  $\mathbf{s}(k)=[s_1(k), s_2(k), \dots, s_N(k)]^T$  为  $NL$  维发射信号列向量, 而  $\mathbf{s}_j(k)=[s_j(k), s_j(k-1), \dots, s_j(k-L+1)]$ ,  $j=1, \dots, N$ , 为对应于第  $j$  个发射天线的  $L$  维发射信号行向量(包含  $L-1$  个延迟信号)。 $\mathbf{v}(k)=[v_1(k), v_2(k), \dots, v_M(k)]^T$  为  $M$  维加性高斯白噪声列向量。 $\mathbf{H}(k)$  为  $M \times NL$  维( $\mathbf{h}_{ij}$  为  $L$  维行向量)频率选择性

MIMO 信道特性矩阵, 定义为

$$\mathbf{H}(k)=\begin{bmatrix} \mathbf{h}_{11} & \dots & \mathbf{h}_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_{M1} & \dots & \mathbf{h}_{MN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1)表明,对基于 VBLAST 编码的水声 MIMO 通信系统,在其接收信号中同时含有码间干扰(ISI)和同频干扰。为有效克服两种干扰,可在接收端采用较为稳健的自适应空时判决反馈均衡技术。同时,由于在水声信道中快速相位波动时有发生,因此还必须采用数字锁相环技术对信号进行载波相位跟踪<sup>[6]</sup>。内嵌数字锁相环(Digital Phase-Locked-Loop, DPLL)的水声 MIMO 通信系统自适应空时判决反馈均衡器(Decision Feedback Equalizer, DFE)结构如图 2 所示。

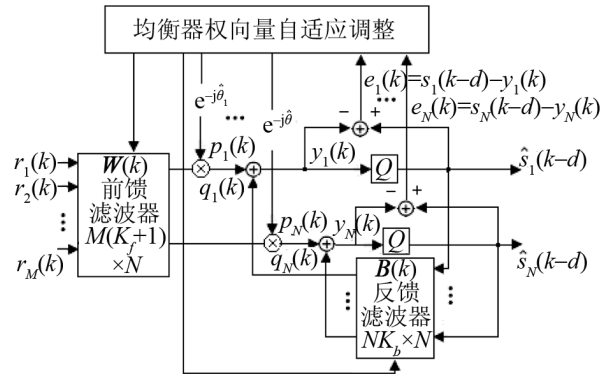


图 2 内嵌数字锁相环的空时判决反馈均衡器  
Fig.2 Adaptive space-time decision feedback equalizer embedded DPLL

图 2 中,空时判决反馈均衡器的前馈部分为  $N$  个空时滤波器,分别用来恢复  $N$  层发射信号。其中每个空时滤波器均由  $M$  个时域均衡器组成,而每个时域均衡器均由  $K_f$  阶 FIR 横向滤波器构成。 $\mathbf{W}(k)=[w_1(k), w_2(k), \dots, w_N(k)]$  表示前馈滤波器的  $M(K_f+1) \times N$  维加权矩阵,其中  $w_n(k)$  是第  $n(1 \leq n \leq N)$  个空时滤波器(用来恢复第  $n$  层发射信号)的  $M(K_f+1)$  维权向量。 $e^{-j\hat{\theta}_n}$  用来对第  $n$  个空时滤波器的输出进行载波相位恢复。 $P_n(k)$  表示对第  $n$  个前馈空时滤波器的输出进行载波相位恢复后的结果,则:

$$P_n(k)=\mathbf{w}_n^H(k)\tilde{\mathbf{r}}(k)e^{-j\hat{\theta}_n} \quad (3)$$

式(3)中,上标 H 表示向量共轭转置。 $\tilde{\mathbf{r}}(k)$  为第  $n$  个前馈空时滤波器的  $M(K_f+1)$  维输入列向量:

$$\tilde{\mathbf{r}}(k)=[\mathbf{r}(k), \mathbf{r}(k-1), \dots, \mathbf{r}(k-K_f)]^T \quad (4)$$

式(4)中,  $\mathbf{r}(k-l)=[r_1(k-l), r_2(k-l), \dots, r_M(k-l)]$ ,  $0 \leq l \leq K_f$ , 为  $M$  维行向量。上标 T 表示向量转置。 $\mathbf{B}(k)=[b_1(k), b_2(k), \dots, b_N(k)]$  表示反馈空时滤波器的  $NK_b \times N$  维加权矩阵,其中  $K_b$  为反馈部分横向滤波器的抽头个数,  $\mathbf{b}_n(k)(1 \leq n \leq N)$  为  $NK_b$  维列向量。则第  $n$  个反馈空时滤波器的输出为

$$q_n(k) = \mathbf{b}_n^H(k) \hat{\mathbf{s}}(k-d) \quad (5)$$

式(5)中,  $\hat{\mathbf{s}}(k-d) = [\hat{s}_1(k-d), \hat{s}_2(k-d), \dots, \hat{s}_N(k-d)]^T$  为反馈滤波器的输入, 是  $NK_b$  维列向量。其中  $\hat{\mathbf{s}}_j(k-d) = [\hat{s}_j(k-d), \hat{s}_j(k-d-1), \dots, \hat{s}_j(k-d-K_b+1)]$ ,  $j=1, \dots, N$ , 是由第  $j$  层已检测信号构成的  $K_b$  维行向量,  $d$  是时延参数。则第  $n(1 \leq n \leq N)$  层被检测信号的判决变量  $y_n(k)$  为

$$y_n(k) = p_n(k) + q_n(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_n(k) \\ \mathbf{b}_n(k) \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{r}}(k)e^{-j\hat{\theta}_n} \\ \hat{\mathbf{s}}(k-d) \end{bmatrix} \quad (6)$$

为自适应更新空时判决反馈均衡器权向量, 可采用 LMS-MIMO-DFE 算法, 其具体描述如下:

(1) 初始化: 令  $\hat{\mathbf{w}}_n(0) = \mathbf{0}$ ;  $\hat{\mathbf{b}}_n(0) = \mathbf{0}$ ;

$k=0$ ;  $\mu = \text{常数}(0 < \mu < 1)$ ;

$\Phi(0) = \mathbf{0}$ ;  $K_1 = \text{常数}(0 < K_1 < 1)$ ;

$\hat{\theta}_n(0) = 0$ ;  $K_2 = 0.1 \times K_1$ ;

(2) 更新:  $k=k+1$ ;

$$y_n(k) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{w}}_n(k-1) \\ \hat{\mathbf{b}}_n(k-1) \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{r}}(k)e^{-j\hat{\theta}_n} \\ \hat{\mathbf{s}}(k-d) \end{bmatrix};$$

$$e_n(k) = s_n(k-d) - y_n(k);$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{w}}_n(k) \\ \hat{\mathbf{b}}_n(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{w}}_n(k-1) \\ \hat{\mathbf{b}}_n(k-1) \end{bmatrix} + \mu e^*(k) \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{r}}(k)e^{-j\hat{\theta}_n} \\ \hat{\mathbf{s}}(k-d) \end{bmatrix};$$

$$\Phi(k) = \mathbf{I}_m \{ p_n(k)(s_n(k-d) + q_n(k))^* \};$$

$$\hat{\theta}_n(k+1) = \hat{\theta}_n(k) + K_1 \Phi(k) + K_2 \sum_{i=0}^k \Phi(i) \quad (7)$$

对于式(7)所述自适应空时判决反馈均衡算法, 在实际应用时, 先令  $s_n(k-d)$  等于已知的训练序列, 以使均衡器调整到收敛状态, 均衡器一旦收敛, 即可从训练模式切换到判决引导模式, 此时的  $s_n(k-d)$  将等于由  $y_n(k)$  得到的判决量。

### 1.2 基于 VBLAST 编码的水声 MIMO 通信系统仿真研究

本节通过仿真实验, 研究在不同信道条件下基于 VBLAST 编码的水声 MIMO 通信系统的性能。两组信道参数分别如表 1 和表 2 所示。

仿真实验中, MIMO 系统配有 2 个发射阵元和 4 个接收阵元。系统总信息速率为 40 kbps(即每个发射阵元信息发送速率为 20 kbps)。发射信号中心频率为 30 kHz, 采用 QPSK 调制。每帧数据包含 2500 个符号, 其中训练序列长 100 个符号。仿真时, 均

表 1 1#信道参数  
Table 1 Parameter of channel 1#

项目	幅度	延迟/ms
直达波	1	0
第一个多径到达波	0.3	20
第二个多径到达波	0.2	30
第三个多径到达波	0.1	60

表 2 2#信道参数

Table 2 Parameter of channel 2#

项目	幅度	延迟/ms
直达波	1	0
第一个多径到达波	0.7	100
第二个多径到达波	0.6	120
第三个多径到达波	0.3	180

衡器各参数设置为: 前馈部分时域均衡器的阶数  $K_f = 5$ , 反馈部分时域均衡器的抽头个数  $K_b = 2$ , 时延参数  $d=2$ , 步长  $\mu = 0.005$ 。采用 LMS-MIMO-DFE 算法在两组信道条件下进行 50 次 Monte Carlo 仿真, 实验的系统性能对比曲线如图 3 所示。

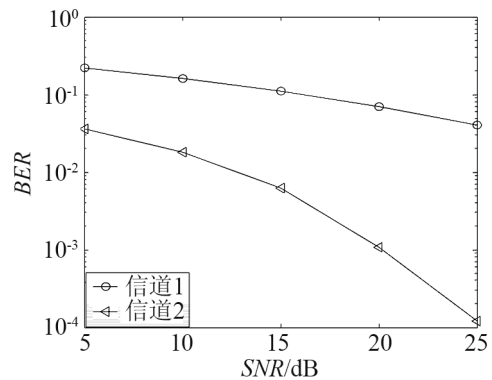


图 3 2 组信道条件下水声 MIMO 通信系统误码性能对比曲线  
Fig.3 The compare of BER performance of underwater acoustic MIMO communication system in two channels

图 3 表明, 对于信道条件较好的信道 1, 基于 VBLAST 编码的水声 MIMO 通信系统性能良好, 在未进行信道编码、20 dB 信噪比条件下, 其误码率可达  $10^{-3}$  数量级。而对于多径时延较大(大于 100 ms), 传播条件比较恶劣的信道 2, 基于 VBLAST 编码的水声 MIMO 通信系统则性能下降严重。为此提出一种新的空时频编码技术, 以保证水声 MIMO 通信系统在较为恶劣的环境下, 仍能可靠通信。

## 2 新的空时频编码技术

基于垂直分层空时编码(VBLAST)的水声 MIMO 通信系统, 其各发射阵元所发送子数据流占据同一频带, 因此, 在其接收信号中同时含有码间干扰及同频干扰。码间干扰是由信道的多径传播而产生, 可在接收端利用空时均衡予以克服。而同频干扰则可通过在发射端进行适当编码进行消除。基于此, 本文提出一种新的空时频编码技术, 在垂直分层空时编码的基础上进一步引入频域编码, 将各发射阵元所发送信号分别调制到彼此正交的子载波上, 变单载波水声 MIMO 系统为多载波 MIMO 系统, 不但可使系统获得频率分集增益, 还可在接



