

浅海环境中的时间反转多用户水声通信

张 涵 孙炳文[†] 郭圣明

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 在无线电通信中,多用户通信可以采用时分多址(TDMA)、频分多址(FDMA)或者码分多址(CDMA)技术来实现,在水声通信中,信道的多途传播特性带来的空间差异,提供了另外的多用户通信手段。时间反转(或相位共轭)技术,能够实现对空间中指定点的聚焦接收和多途压缩,它为空间位置不同的多个用户提供了相互独立的通信通道,能够很好地克服用户之间的同道干扰(CI)。本文在垂直阵接收的基础上,利用时间反转技术来实现不同用户在同一信道中的同时通信,结合带锁相环的自适应判决反馈均衡技术来消除残余的多途码间干扰,并进行了初步的海上试验,实现了两个不同深度上用户的同时通信。

关键词 时间反转,多用户水声通信,判决反馈自适应均衡,锁相环

Time-reversal multi-user underwater acoustics communication in shallow water

ZHANG Han SUN Bing-Wen GUO Sheng-Ming

(Institute of acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract In radio-communications, Multi-user communications can be realized by using Time Division Multiple Access (TDMA), Frequency Division Multiple Access (FDMA) or Code Division Multiple Access (CDMA). In the underwater acoustic channel, the complex spatial structure of the acoustic field resulted from multipath propagation necessitates alternative method to be used for multi-user communications in shallow-water. Time reversal (or phase conjugation) approach has good compressibility in both temporal and spatial domains; besides, its focal property can be taken advantage of to retrofocus on the source location no matter how complicated the environment is. So it provides parallel independent communication channels for the different users and reduces the co-channel interference. In this paper, based on the vertical receiver array, the time reversal technique is used to realize the different users' communication in the same underwater channel. Additionally, an adaptive decision-feedback equalizer with Phase-Lock Loop is used to reduce the inter-symbol interference (ISI). A sea experiment was conducted to verify the related theory and the results show that the multi-user simultaneous communication can be realized.

Key words Time reversal, Multi-user underwater acoustics communication, Adaptive decision-feedback equalization, Phase-lock loop

2007-05-11 收稿; 2007-06-05 定稿

作者简介:张涵(1981-),女,武汉市人,硕士研究生,研究方向:水下多用户通信。

孙炳文(1980-),男,助理研究员。

郭圣明(1969-),男,研究员,硕士生导师。

[†]通讯作者:孙炳文, E-mail:ariesmu@sohu.com

1 引言

近年来,随着水声通信技术和网络通信需求的增加,多用户水下声通信逐渐成为一个广泛关注的研究对象。用户数的增加,使得浅海多途信道的影响更加复杂,通信性能显著下降,其主要原因就是码间干扰(ISI)和信道的同道干扰(CI)。在无线电信道中,多用户通信可以采用时分多址(TDMA)、频分多址(FDMA)、或者码分多址(CDMA)等技术来实现,而在水下声信道中,复杂的多途传播特性带来的空间差异,提供了另外的多用户通信手段来缓解信道容量、频带有限、速率低等方面的限制。D. B. Kilfoyle 等人^[1]采用空间调制技术来实现多个并行传输路径的通信,其主要目的是为了提高信道容量。他们在阵发射和接收的基础上,通过对发射-接收之间的传递函数矩阵的分解来构建相应的空间滤波器,主要是利用了不同用户之间的空间差异性以及发射-接收阵对空间多途的分辨能力。时间反转(Time reversal)作为一种自适应的环境匹配处理技术,能够实现对多途的时间和空间压缩以及对指定接收点的聚焦,已经被引入到水声通信当中^[2-4]。时间反转聚焦通信可以为不同空间位置的多个用户提供相互独立的通信渠道,能够很好地克服用户之间的同道干扰(CI)。H. C. Song 等人^[3]在利用发射阵的基础上,实现了对同一距离(2~3 个)不同接收深度上的同时通信。其主要目的也是为了提高信道容量和通信速率。T. C. Yang^[4]则是在阵接收的基础上,利用被动相位共轭技术(PPC)与带锁相环的自适应判决反馈均衡技术的结合,来进行阵接收处理的声通信研究,并且指出在短阵情况下这种通信方式也可以为后续的均衡技术提供一种稳定的信道特性。本文在 T. C. Yang 研究工作基础上,利用垂直接收阵时间反转

聚焦来实现对单个用户的聚焦接收、利用带锁相环的自适应判决反馈均衡技术来消除残余的多途码间干扰,从而实现多个用户在同一信道中的同时通信,并进行了初步的海上试验,实现了两个不同深度上的用户的同时通信。

文章内容组织安排如下:在第二部分中简要介绍所采用的时间反转多用户通信系统模型及其基本原理,第三部分给出海上试验结果,最后的第四部分是对全文的简要总结。

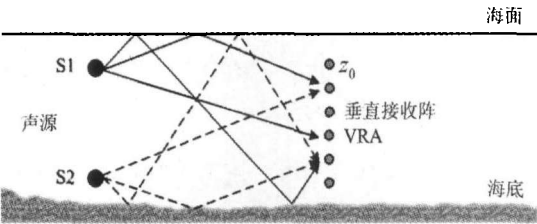


图 1 垂直阵接收的浅海多用户通信示意图

2 时间反转多用户通信系统模型

考虑图 1 所示的多用户通信情形:两个通信用户 S1 和 S2 位于不同的深度 z_{s1} 和 z_{s2} , 距离垂直接收阵的水平距离为 r ; 垂直接收阵 VRA 由 N 个水听器组成,阵元等间隔分布,第 n 个接收阵元对应的深度为: $z_n = z_0 + (n-1)d$, $n=1, \dots, N$, 其中 d 为阵元间距, z_0 是最上端靠近海面的第一个阵元的深度。设 $s_k(t)$ 为信息码, $h_{k,n}(t)$ 为第 k 个用户与第 n 个接收阵元之间的信道响应函数,它包含了大量复杂的多途,则阵接收信号可以写成

$$g_n(t) = \sum_{k=1}^2 g_{k,n}(t),$$
$$g_{k,n}(t) = A_k s_k(t) \otimes h_{k,n}(t) \tag{1}$$

式中 $k=1,2$ 分别对应于通信模型中的两个发射用户,幅度 A_k 表示不同用户可能具有的不同发射声源级。在频域中可以写成

$$G_n(\omega) = \sum_{k=1}^2 G_{k,n}(\omega),$$
$$G_{k,n}(\omega) = A_k S_k(\omega) H_{k,n}(\omega) \tag{2}$$

为了克服各个用户之间的互干扰，在某一用户接收的同时抑制另外用户的信号，可以采用时间反转聚焦的阵处理方法^[2]，对应的阵接收加权输出为

$$G_{k'}(\omega) = \sum_{n=1}^N W_{k',n}(\omega) G_n(\omega),$$

$k' = 1, 2$ (3)

$W_{k',n}(\omega)$ 是对第 k' 个用户通信的加权系数，对于时间反转聚焦来说有 $W_{k',n}(\omega) = H_{k',n}^*(\omega)$ ，即第 k' 个用户与第 n 个接收阵元之间的信道响应函数的共轭。这样可以有阵接收输出

$$G_{k'}(\omega) = \sum_{n=1}^N W_{k',n} G_n(\omega) = \sum_{k=1}^2 A_k S_k(\omega) Q_{k',k}(\omega),$$

或 $g_{k'}(t) = \sum_{k=1}^2 A_k s_k(t) \otimes q_{k',k}(t) \tag{4}$

其中

$$Q_{k',k}(\omega) = \sum_{n=1}^N H_{k',n}^*(\omega) H_{k,n}(\omega),$$
$$q_{k',k}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q_{k',k}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \tag{5}$$

对于 $k \neq k'$ 的那些项，就是不同用户之间

的同道干扰(CI)。文献[5]称 $Q_{k',k}$ 为“ Q 函数”，并详细介绍了它的性能特点，其中最基本的就是聚焦特性 $Q_{k',k} \approx Q_{k'0}(\omega) \delta_{k',k}$ ，反映了不同通信用户之间的阵接收信号空间差异，是我们区分不同通信用户的基础，原则上垂直接收阵阵元越多并且覆盖整个水层，聚焦效果越明显，不同通信用户之间的同道干扰越小。当然，权系数 $W_{k',n}(\omega)$ 也可以采用其它方法来得到，例如匹配场处理、自适应波束形成技术等，对应不同形式的多用户通信实现方法。

时间反转处理本身只是压缩但没有消除多途，到阵接收相加的环节才得到更大程度上的多途抑制。为了进一步克服多途引起的码间串扰，可以在阵接收处理的基础上，再结合成熟的带数字锁相环的判决反馈自适应均衡技术来进行，即将上述多用户通信系统分成两个步骤来实现：时间反转阵接收处理和判决反馈自适应均衡，最终通过解码得到两个用户的传递信息，具体流程如图 2 所示。在实际工作中，阵加权系数的获取或者说对信道响应函数的估计，可以通过不同用户的标识码(对应时间反转聚焦中的探测信号)处理来获得，而信息码部分可以是共用的。

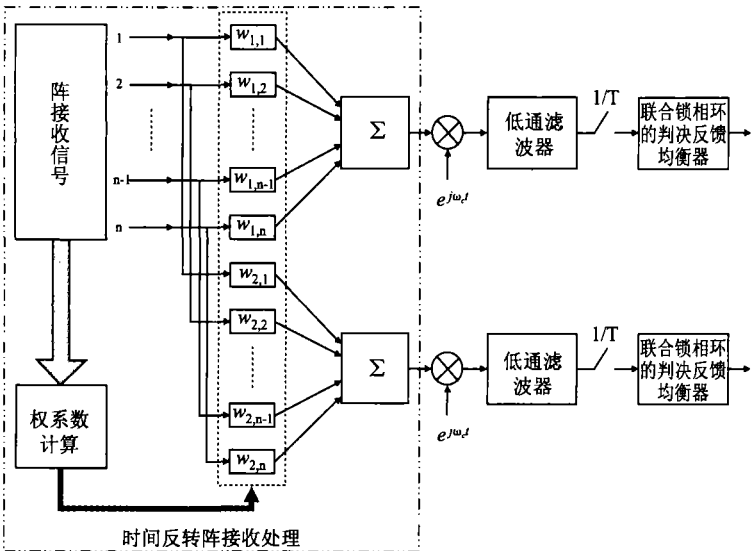


图 2 两个用户的水声通信处理流程图

3 海上试验数据分析

针对上述多用户通信模型，设计并进行了相应的近海海上试验，海洋环境以及发射和接收布置如图 1 所示：海底地形平坦，海深约 39m；垂直接收阵共有 16 个水听器阵元，等间隔地分布在 5.5m 到 35.5m 的海深范围；两个发射用户分别处于 15.3m 和 18.8m，距离垂直接收阵约 1km。发射信号采用 BPSK 的调制方

式，信息序列如图 3 所示，其中探测信号采用一个码元宽度(7 个载波周期)的正弦脉冲，信息码序列为连续 8 个周期的 7 阶 M 序列码；载波频率为 7kHz，带宽为 2kHz，即 6.0kHz~8.0kHz，采样率为 40kHz。试验期间测量得到的海域声速剖面如图 4 所示：剖面总体上呈正梯度变化趋势，只是在 5m 到 25m 的范围内，有一个低声速区，最大声速变化约 3m/s。

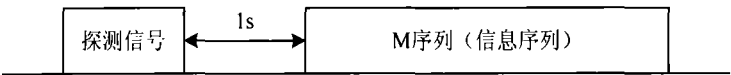


图 3 发射数据模型

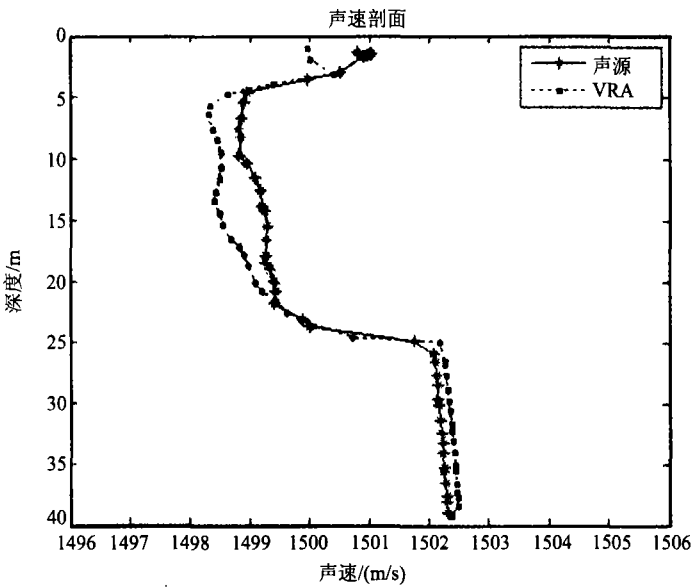


图 4 试验海域声速剖面，其中虚线代表接收船处数据，实线代表发射船处数据

为了评估试验环境中两个用户之间的同道干扰影响，利用单独通信时的数据进行了比较计算，具体结果如图 5 所示。可以知道：对于用户（1），当两个用户之间的信号相差 9dB 以上的时候，误码率趋近没有同道干扰的情形，即可以忽略另一用户的影响；同样对于用户（2），当两个用户之间的信号相差 5dB 以上时误码率就已经趋近没有同道干扰

的情形。

对于试验所采用的阵接收系统和信号处理过程，图 6 给出了对应的 Q 函数特性分析结果，可以知道对两个用户的聚焦接收提供了大于 9dB(峰值与另一用户所在深度位置的旁瓣比值)的同道干扰抑制能力，结合图 5 的结果，表明已经能够区分两个不同深度上的通信用户(两个用户发射源级一样)。

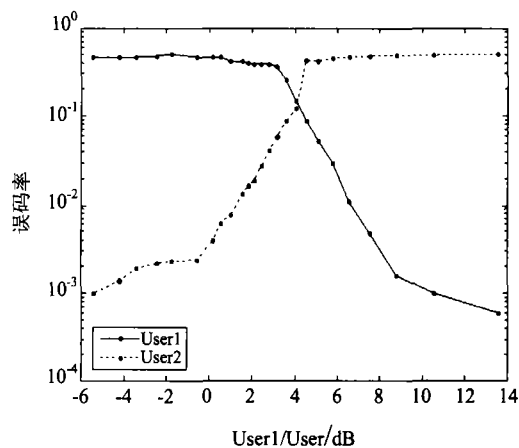


图5 误码率与同道干扰的变化关系

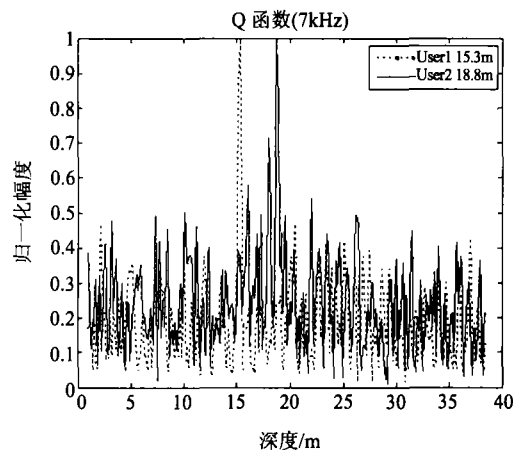


图6 聚焦性能分析

试验数据的处理过程如前图2所示：首先，利用接收的探测信号的时间反转形式，来与对应通道的信息码接收信号进行卷积然后相加处理，之后，利用带锁相环的自适应均衡处理去除残余的码间干扰，再解码得到各个用户的信息。

图7所给的分别是探测码接收信号的时间反转码，它是由两个用户分别发射的探测信号（一个码元宽度7个周期的单频脉冲），在每个深度的接收阵元处接收到后，进行时间反转而得到的时间反转码。这些时间反转码携带了不同通信用户之间阵接收信号的空间差异。在探测码随后发射的是同时发射的两个用户的信息序列，接收阵接收到后分别再与之前所得的每个用户的时间反转码卷积，从而区分出两个用户的信息。经过上述处理后得到的两个用户的星座图如图8(a)所示，经过均衡后，如图8(b)所示。结果表明两个用户的误码率分别是 10^{-3} 和 10^{-2} 。两个用户的误码率的差别，主要是深度上不同的聚焦性能差异。值得注意的是，由于所使用的垂直阵阵元数较少，聚焦处理的主瓣-旁瓣比不是很高，并没有达到“无同道干扰”理想情况下的误码率级别。

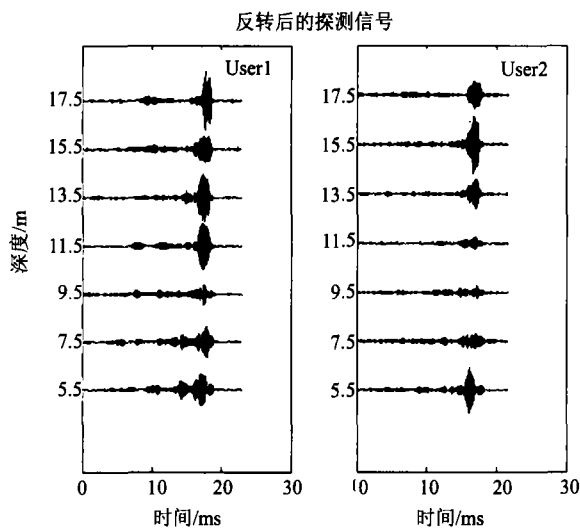


图7 海试得到的两个用户的时间反转码

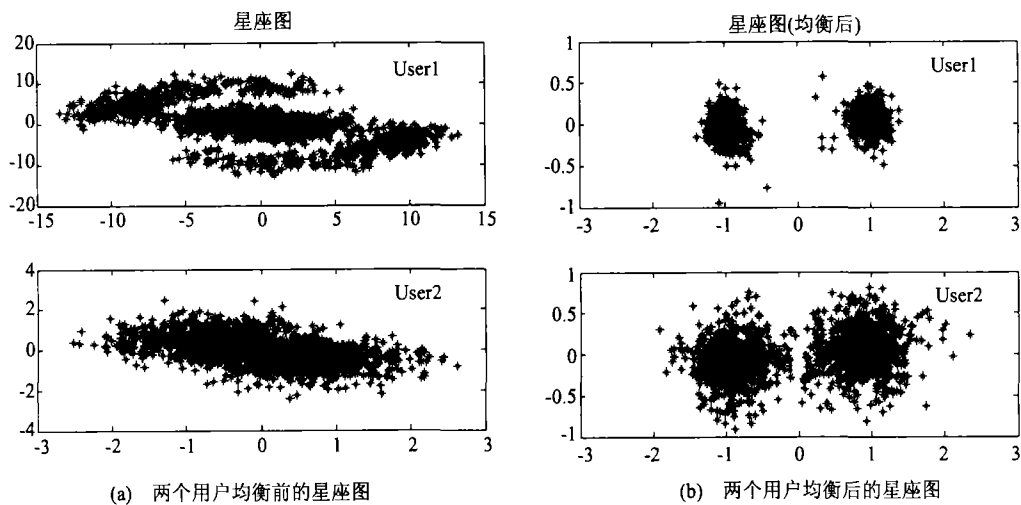


图 8 试验处理结果

4 总结

本文在垂直阵的基础上，利用时间反转聚焦接收和自适应均衡技术来实现浅海信道中的多用户通信，其中聚焦接收是为了消除不同用户之间的同道干扰，带锁相环的自适应判决反馈均衡则是为了消除残余的码间干扰。针对两个用户同时通信的情形，进行了近海海上试验，实现了不同深度上的两个用户的同时通信，用户 1 和用户 2 的误码率分别是 10^{-3} 和 10^{-2} ，基本上接近了无同道干扰情况下的数值；至于两个用户的误码率的差别，主要是由于深度上不同的聚焦性能引起的差异。值得注意的是，因为所使用的垂直阵阵元数较少，聚焦处理的主瓣-旁瓣比不是

很高，并没有达到“无同道干扰”理想情况下的误码率级别，这需要在进一步的研究工作从算法和阵形设计方面加以改进。

参 考 文 献

[1] D.B.Kilfoyle, J.C.Preisig, A.B.Baggeroer. Spatial Modulation Experiments in the Underwater Acoustic Channel. IEEE J. Ocean. Eng., 2005, 30(2): 406-415.

[2] G.F.Edelmann, H.C.Song, S.Kim, et. al. Underwater Acoustic Communications Using Time Reversal. IEEE J. Ocean. Eng., 2005, 30(4): 852-863.

[3] H.C.Song, P.Roux, W.S.Hodgkiss, et. al.. Multiple- Input-Multiple-Output Coherent Time Reversal Communications in a Shallow-Water Acoustic Channel. IEEE J. Ocean. Eng., 2006, 31(1): 170-178.

[4] T.C.Yang. Correlation-based decision-feedback equalizer for underwater acoustic Communications. IEEE J. Ocean. Eng., 2005, 30(4): 865-880.