

◇ 研究报告 ◇

# 基于时间反转扩频的隐蔽水声通信方法\*

柳文明<sup>†</sup> 韩树平 杨刚 朱子尧 徐景峰 林楠

(海军潜艇学院 青岛 266199)

**摘要** 针对低信噪比条件下水下小尺度平台与通信浮标间进行隐蔽水声通信时,强多径干扰导致通信困难的问题,提出了一种基于时间反转技术的直接序列扩频隐蔽通信方法。该方法利用多通道主/被动时间反转的空时聚焦效应,提高了低信噪比条件下直接序列扩频通信的抗多径干扰能力,并且具有良好的低检测概率通信能力。仿真和水池实验结果表明:该方法满足水下小尺度平台处理结构简单、低功耗的要求,实现了水下单阵元平台与通信浮标之间的双向隐蔽通信。

**关键词** 隐蔽水声通信,直接序列扩频,时间反转镜,空时聚焦

中图分类号: TN95 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2017)06-0505-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.06.005

## Covert underwater acoustic communication method based on time reversal spread spectrum

LIU Wenming HAN Shuping YANG Gang ZHU Ziyao XU Jingfeng LIN Nan

(Naval Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

**Abstract** For the low SNR under the condition of small scale platform and communication buoy between hidden underwater communication, strong multipath interference leads to the problem of communication, this paper presents a direct sequence spread spectrum time reversal technique of covert communication method based on. The focusing effect of using multichannel active/passive time reversal space, improves the ability of anti multipath interference under the condition of direct sequence spread spectrum communication and low SNR, and has low detection probability and good communication ability. Simulation and water tank experiment results show that this method meets the requirements of underwater small-scale platform processing with simple structure and low power consumption, and realizes bidirectional covert communication between water single array platform and communication buoy.

**Key words** Covert underwater acoustic communication, Direct sequence spread spectrum, Time reversal mirror, Space-time focusing

2017-08-29 收稿; 2017-10-10 定稿

\*中国博士后基金资助项目 (2014M552658)

作者简介: 柳文明 (1985-), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 研究方向: 水声信号处理。

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: wsonar@163.com

## 1 引言

无人潜航器(Unmanned underwater vehicle, UUV)、水下滑翔机等小尺度自主式航行器在水下长时间作业时,需要定期与通信浮标通过水声通信进行数据交换,从浮标处获取导航信息,并将搜集到的情报信息传递给浮标。为了防止水声通信造成发射平台暴露,避免干扰、欺骗等水声对抗手段的破坏,必须在保证通信可靠性的前提下提高信号的低检测性能,实现低信噪比条件下的隐蔽水声通信。

水声信道是一种可用带宽有限、噪声干扰强烈、多径效应明显的时-频-空变非平稳信道,严重影响了水声通信系统的性能<sup>[1]</sup>。水下小尺度平台受到自身体积、功耗等因素限制,通常采用单阵元换能器结构,接收信噪比较低且处理能力较弱,在复杂水声信道中通信难度较大。直接序列扩频是实现低信噪比隐蔽水声通信的有效通信方式<sup>[2]</sup>,但是其抗水声信道强多径干扰能力有限,需要结合其他的抗多径技术,因此信道均衡<sup>[3]</sup>、RAKE接收<sup>[4]</sup>、分集技术<sup>[5]</sup>、纠错编码<sup>[6]</sup>等技术得到广泛研究。在低信噪比条件下信道均衡器性能恶化,很容易造成均衡器发散而失效<sup>[4]</sup>。RAKE接收机是有效的抗多径衰落的方法,但在低信噪比下难以实现多径抽头的精确估计和分离,使得RAKE接收机无法应用<sup>[7]</sup>。时间反转镜(Time reversal mirror, TRM)技术具有良好的空-时聚焦性能<sup>[8]</sup>,在水声通信中受到广泛关注。它利用声场互易性,能够实现自适应匹配声信道,从而抑制码间干扰和信道衰落。但是在低信噪比下,时反处理器受强噪声干扰将导致时反聚焦能力下降<sup>[9]</sup>。目前,实现低信噪比条件下稳健的隐蔽通信仍是水声通信中的难题<sup>[10]</sup>。

为了实现低信噪比条件下水下小尺度平台与通信浮标之间的隐蔽水声通信,本文提出一种将时间反转与直序扩频技术相结合的隐蔽水声通信方法。该方法在通信浮标处利用垂直阵实现空间分集,在上行通信中采用多通道被动时反技术(Passive time reversal mirror, PTRM)实现空间增益和能量聚焦,下行通信中采用主动时反技术(Active time reversal mirror, ATRM)实现在水下平台位置的空

间聚焦和时间压缩,提高了接收信噪比,抑制了多径干扰,改善了直序扩频通信系统的性能。

## 2 时间反转扩频水声通信技术原理

### 2.1 多通道被动时间反转

对于单输入多输出(Single input multiple output, SIMO)被动时反系统,假设第*i*路通道的冲激响应为 $h_i(t)$ ,水下平台依次发射探测序列 $p(t)$ 和信息序列 $s(t)$ ,则第*i*路通道接收到的探测序列和信息序列分别为

$$p_{ir}(t) = p(t) \otimes h_i(t) + n_{ip}(t), \quad (1)$$

$$s_{ir}(t) = s(t) \otimes h_i(t) + n_{is}(t), \quad (2)$$

其中, $n_{ip}(t)$ 、 $n_{is}(t)$ 均为干扰噪声。利用 $p_{ir}(t)$ 得到被动时间反转预处理器 $p_{ir}(-t)$ ,将 $s_{ir}(t)$ 与 $p_{ir}(-t)$ 做卷积运算,为了消除探测序列 $p(t)$ 的影响,再与 $p(t)$ 进行卷积,得到被动时反处理后的信号:

$$\begin{aligned} r_i(t) &= s_{ir}(t) \otimes p_{ir}(-t) \otimes p(t) \\ &= s(t) \otimes h_i(t) \otimes h_i(-t) \otimes p(-t) \otimes p(t). \end{aligned} \quad (3)$$

假设探测序列 $p(t)$ 具有良好的自相关性,满足 $p(t) \otimes p(-t) \approx \delta(t)$ ,将*N*路接收信号经被动时反处理后做等增益合并,得到总的输出信号为

$$\begin{aligned} r_{tr}(t) &= \sum_{i=1}^N r_i(t) + n_r(t) \\ &= s(t) \otimes \sum_{i=1}^N h_i(t) \otimes h_i(-t) + n_r(t), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\sum_{i=1}^N h_i(t) \otimes h_i(-t)$ 称为时反信道,由于各通道的 $h_i(t)$ 相互间独立并且具有随机性,使得时反信道具有聚焦效果,导致主峰能量更强,在理想情况下时反信道近似为 $\delta(t)$ ,此时多通道被动时反合并后的输出信号 $r_{tr}(t)$ 近似为发射信号序列 $s(t)$ 。

可以看出,多通道信号经过被动时反处理后合并,不仅克服了多径干扰,而且在时间上和空间上实现了聚焦,提高了信号的增益,有利于在低信噪比条件下恢复信号。

### 2.2 多通道主动时间反转

与被动时间反转不同,主动时间反转需要采用收发合置垂直阵,采用多输入单输出(Multiple-input-single-output, MISO)通信模式,利用接收到

的探测信号作为主动时反处理器。首先水下平台发射探测序列  $p(t)$ ，垂直阵第  $i$  路通道接收到的探测序列为  $p_{ir}(t)$ ，利用该信号得到第  $i$  路通道主动时反预处理器  $p_{ir}(-t)$ ，将信息码元  $q(t)$  与  $p_{ir}(-t)$  做卷积，同时与  $p(t)$  做卷积以消除探测信号的影响，然后各阵元同时将时反后的信息序列发射回信道。根据声场的互易性原理<sup>[11]</sup>，第  $i$  路阵元与水下平台之间的冲激响应  $h'_i(t) = h_i(t)$ ，则在水下平台处接收到的第  $i$  路信息序列为

$$r_{i\_tr}(t) = q(t) \otimes h_i(t) \otimes h_i(-t) \otimes p(-t) \otimes p(t), \quad (5)$$

由于  $p(t) \otimes p(-t) \approx \delta(t)$ ，水下平台总的接收序列为

$$q_{tr}(t) = q(t) \otimes \sum_{i=1}^N h_i(t) \otimes h_i(-t) + n_q(t), \quad (6)$$

在理想情况下，时反信道可近似为  $\delta(t)$ ，此时接收序列  $q_{tr}(t)$  近似为发射信息序列  $q(t)$ 。

可以看出，主动时反实现了在探测信号发射位置上的空间聚焦和时间压缩，不仅提高了接收信噪比，同时也起到了消除多径干扰的作用。

### 2.3 DS-DBPSK 直序扩频基本原理

直接序列扩频 (Direct sequence spread spectrum, DSSS) 是利用高速率伪随机序列将信息码元的频谱扩展，在接收端采用相同的伪随机序列进行相关解扩，恢复出原始的信息码元。DS-DBPSK (Direct sequence -difference binary phase shift keying) 采用了差分编码，利用相邻码元的相对载波相位来表示数字信息，将差分编码后的序列经过伪随机序列调制生成扩频序列，再利用扩频序列调制载波。DBPSK 可以有效解决 PSK 调制中的相位突变问题，对同步精度要求较低且具有抗多普勒性能，在复杂水声信道环境中具有良好的稳健性。

## 3 时反扩频双向水声通信系统方案

若实现水下小尺度平台与通信浮标之间的双向隐蔽通信，考虑到收发平台受自身体积、设备复杂度和功耗等因素的限制，在系统的收发端采用不同的结构。双向水声通信系统的换能器示意图如图 1 所示。水下平台 PS 追求结构简单低功耗，故采用单阵元换能器，通信浮标受设备结构和功耗限制相对

较小，故采用收发合置的垂直阵 VLA，用于实现空间分集。文中将 PS 传递信息给 VLA 称为上行通信，将 VLA 发送信息给 PS 称为下行通信。

系统采用 DS-DBPSK 调制方式，信号帧结构如图 2 所示。

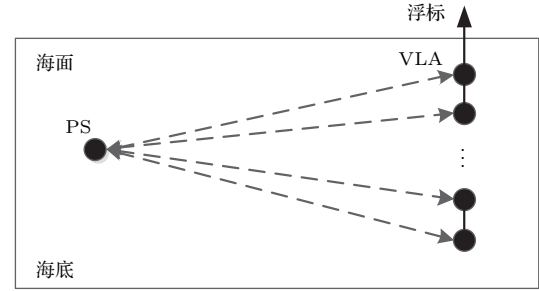


图 1 SC-FDE 系统组成框图

Fig. 1 The block diagram of SC-FDE system

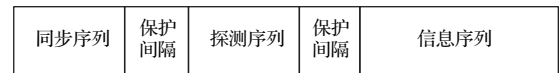


图 2 时反扩频系统数据帧结构

Fig. 2 Data frame structure of time reversal spread spectrum system

为了保持隐蔽性，同步序列和探测序列都采用性能良好的伪随机序列。其中探测序列在选择时应具有良好的信道响应获取能力和自相关特性<sup>[9]</sup>。由于通信信号发射平台和接收平台之间通常存在相对运动，需要进行多普勒补偿并且及时地更新信道特性，否则会影响被动时间反转的自适应聚焦性能。本方案采用分块传输的办法来解决信道时变的问题，将通信数据块时间范围内信道视为稳定信道。在处理每块数据时，先利用同步序列采用时频二维搜索的方法实现信号捕获与同步<sup>[12]</sup>，同时完成多普勒估计，然后采用重采样的方法对接收数据进行多普勒补偿。上行通信采用 SIMO 通信模式，其信号处理流程图如图 3 所示。首先，发射端 PS 将信息序列先经过编码后再进行直接序列扩频调制，然后通过发射换能器发射到水声信道，接收端 VLA 各通道将接收信号经前置滤波处理后，实现信号同步，并将探测信号取出，将其时间反转作为被动时反预处理器，将各通道信息序列经过时反滤波处理后进行等增益合并，然后再进行解扩和解调，恢复出原始信息序列。

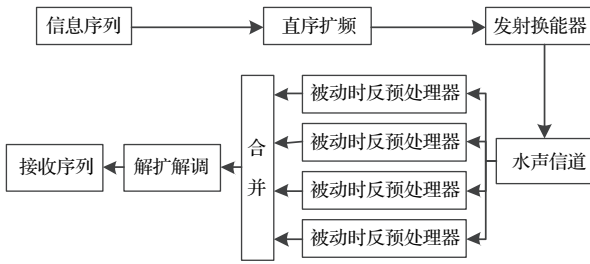


图3 上行通信信号处理流程图

Fig. 3 Flow chart of uplink communication

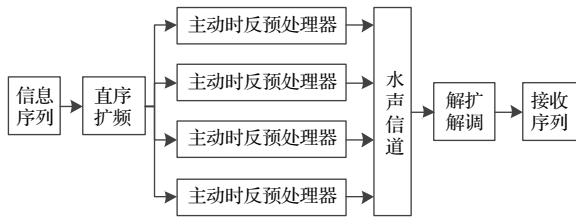


图4 下行通信信号处理流程图

Fig. 4 Flow chart of downlink communication

下行通信采用MISO通信模式，图4给出了下行通信的信号处理流程图。首先水下平台PS先发射探测序列给垂直阵VLA，VLA各通道将接收到的探测序列保存下来，经过时间反转后作为主动时反预处理器，将信息序列经过主动时反处理后发射

$$\text{SNR}_i = \frac{\left(\sum_{i=1}^L A_i\right)^2}{\sum_{i=1}^L \sigma_i^2} = \text{SNR}_0 + 10 \lg \left[ 1 + \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1, j \neq i}^L A_i A_j}{\sum_{i=1}^L A_i^2} \right]. \quad (9)$$

由式(9)可见，时反处理可以提高接收信噪比，且信道冲激响应的多径结构越复杂，每径的能量越大，时反增益也越大。

当垂直阵各阵元所接收到的信号间满足独立性条件时，则 $N$ 路接收阵合并后的输出信噪比为<sup>[13]</sup>

$$\text{SNR}_r = \text{SNR}_i + 10 \lg N. \quad (10)$$

可见，多通道分集增益与接收阵元个数相关，同时，空间分集接收还可以补偿信道频率响应的失真，起到了抗信道衰落的作用<sup>[14]</sup>。

对于下行通信，根据声场互易性原理，系统的处理增益与上行通信相同<sup>[15]</sup>。此外，由于主动时反具有能量聚焦效应，使得声场空间在水下平台处的

能量明显高于其他位置处的能量<sup>[16]</sup>。对主动时反发射信号在声场空间中的能量分布进行分析。根据声场赫姆霍兹(Helmholtz)波动方程：

$$\Delta G + k^2 n^2(\mathbf{r})G = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}'), \quad (11)$$

其中，用格林函数 $G(\mathbf{r}_{\text{PS}}, \mathbf{r}_i; \omega)$ 表示发射位置PS到第 $i$ 个接收阵元之间的声场。根据声场互易性，

$$G(\mathbf{r}_{\text{PS}}, \mathbf{r}_i; \omega) = G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_{\text{PS}}; \omega). \quad (12)$$

假设信息序列的频谱为 $S(\omega)$ ，利用探测序列估计得到 $G(\mathbf{r}_{\text{PS}}, \mathbf{r}_i; \omega)$ 作为主动时反预处理器，则垂直阵发射信号在空间形成的声压场为

$$P_{\text{TR}}(\omega) = S(\omega) \sum_{i=1}^N G^*(\mathbf{r}_{\text{PS}}, \mathbf{r}_i; \omega) G(\mathbf{r}_{\text{PS}}, \mathbf{r}_i; \omega). \quad (13)$$

## 4 系统性能分析

本节理论推导时间反转直序扩频系统的处理增益和空时聚焦性能，用于分析低信噪比条件下系统的通信性能和低检测性能。

系统采用直序扩频通信方式，可以提高接收信噪比，并且增强系统的抗干扰能力，扩频处理增益为

$$G_{\text{DSSS}} = \frac{(S/N)_{\text{out}}}{(S/N)_{\text{in}}} = N_c, \quad (7)$$

式(7)中 $N_c$ 为扩频码的周期长度。

对于上行通信，假设第 $i$ 路通道的信道冲激响应为

$$h_i(t) = \sum_{l=1}^L A_l \delta(t - \tau_l), \quad (8)$$

其中， $L$ 表示多径的数目， $A_l$ 和 $\tau_l$ 分别表示每径的幅度和时延。假设各条多径的信噪比相同，即 $\text{SNR}_0 = A_k^2 / \sigma_k^2$ ，理想情况下时反处理将 $L$ 条多径同相合并，则第 $i$ 路通道时反后的信噪比为

可以看出,当 $r = r_{PS}$ 时,即在PS位置处实现了信道匹配,此时声压场能量出现最大值。而在声场空间其他位置上无法实现信道匹配,不存在能量聚焦。在相同的能量接收机检测条件下,相对于在PS位置,在声场空间其他位置上难以检测到通信信号,从而实现了低检测概率通信。

## 5 仿真与实验分析

为了检验所提技术方案的性能,利用水池实验对上行通信进行验证,利用Kraken简正波声场模型生成仿真信道,对下行通信性能进行仿真验证。

### 5.1 上行通信

上行通信实验在消声水池内进行,消声水池长宽高分别为14 m×1.2 m×1.85 m,沙质底,水池四周贴消声瓦,模拟实际浅海环境。发射换能器距离水面0.35 m,接收换能器阵由4个垂直等间距阵元组成,阵元之间相距约0.25 m,最上面一个换能器距离水面0.2 m。收发换能器之间的水平距离为8 m。将接收换能器阵通道从上至下依次编号为通道1至

通道4。

发射信号采用DS-DBPSK调制,采样率为48 kHz,载波频率为12.5 kHz,带宽为10.5 kHz~14.5 kHz,采用31位的 $m$ 序列进行扩频,码元宽度为7.8 ms。发射数据帧结构与图2相同,其中探测信号为15.6 ms的 $m$ 序列,信息序列为4000个二进制信息码,信息序列经过滚降因子为0.5的升余弦滚降滤波器进行发射滤波。

利用探测信号匹配滤波估计信道,图5(a)和图5(b)分别给出了通道1和通道4的信道冲激响应。可以看出,两路通道均存在明显的多径干扰,信道最大多径时延约为6 ms,信息序列通过该信道将会造成较为严重的码间干扰。图5(c)为通道1时间反转后的信道冲激响应图,可以看出时反信道冲激响应具有较明显的旁瓣。图5(d)为4路通道合并的时反信道冲激响应图,可见此时的信道冲激响应峰值明显尖锐,旁瓣得到了较好的抑制。可见多通道被动时反具有明显的空间聚焦和时间压缩能力,能够明显抑制多径干扰。

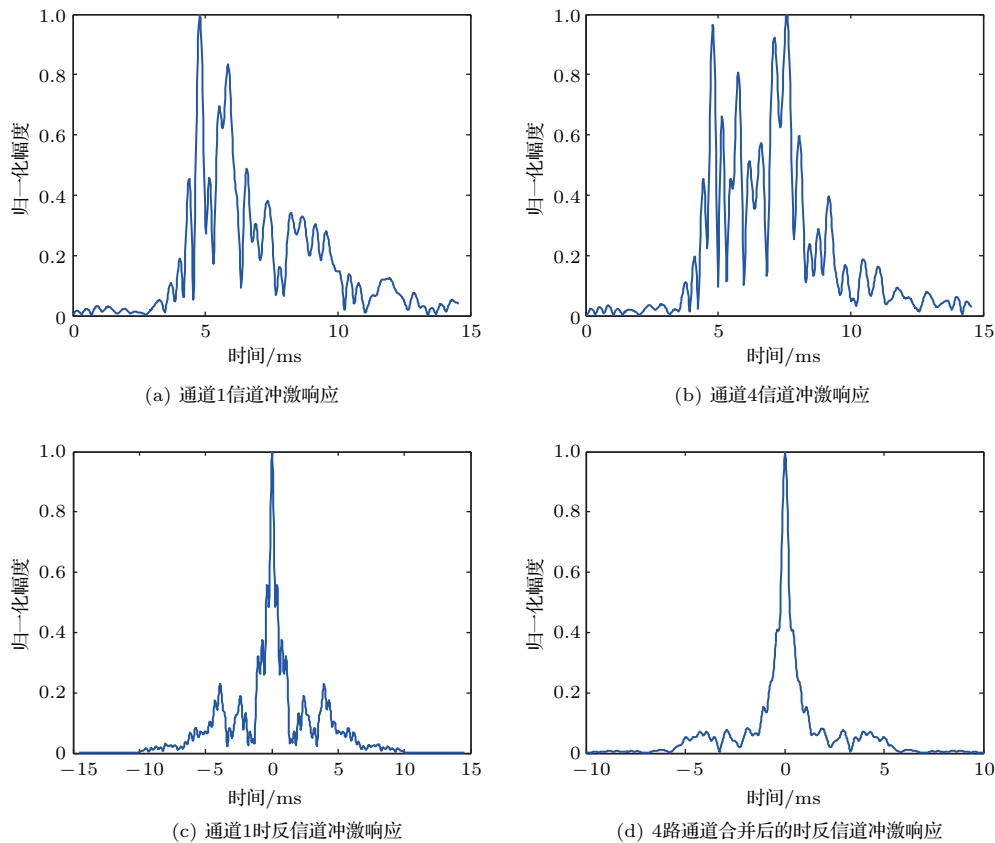


图5 各通道冲激响应归一化图

Fig. 5 Diagram of normalization channel impulse response

对低信噪比条件下的上行通信性能进行仿真。图6为通道1的直序扩频信号经时反均衡前后的误码率曲线对比图,可以看出,由于多径干扰较为严重,单通道扩频的抗码间干扰能力有限;而经过时反均衡后,信道的多径干扰得到抑制,误码率明显降低。但是当信噪比过低时,经时反均衡后的误码率反而提高,如当接收信噪比低于-8 dB时,信道1时反均衡后的误码率反而高于正常扩频通信误码率。这是由于信噪比过低导致时反均衡器性能恶化。而采用4通道时反扩频时,误码率明显降低,在低信噪比下的通信性能明显改善,可见多通道时反可以提高时反均衡的抗噪声性能。

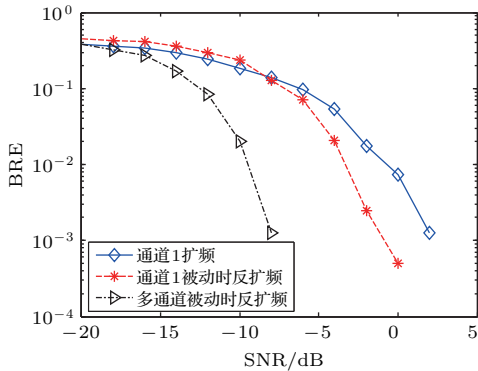


图6 不同条件下信噪比-误码率曲线

Fig. 6 Relationship between BER and SNR under different conditions

### 5.2 下行通信

下行通信采用Kraken信道仿真软件生成仿真信道,仿真信道的环境参数设置与水池实验基本相同,通信信号参数与上行通信信号一致。仿真分析下行通信的空时聚焦性能,接收阵将接收到的探测信号进行时间反转,作为主动时反预处理器。若不考虑发射信号特性对时反空时聚焦的影响,在收发

平台垂直二维空间内,通过将主动时反信道的格林函数与信道空间的格林函数做互相关,得到二维空间内的能量分布如图7所示。

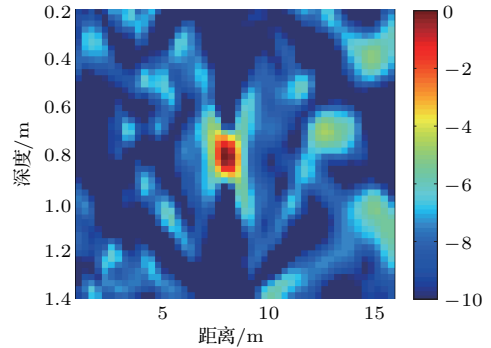


图7 主动时反空间能量分布示意图

Fig. 7 Sketch map of spatial energy distribution under active time reversal mirror

可以明显看出,在水下平台位置处的声场能量明显高于其他位置,形成了空间能量聚焦,在同样的能量检测条件下,在其他位置处难以检测到通信信号,说明下行通信具有良好的隐蔽通信性能。

主动时间反转不仅能够实现在水下平台位置的信号能量空间聚焦,而且能够在该位置处实现时间压缩,进而实现多径重组抑制码间干扰,有利于通信信号解调。若不考虑噪声干扰的影响,当不采用扩频以及其他信道均衡方法的情况下,对比在水下平台位置和在在其水平距离0.5 m的位置处接收信号的星座图如图8所示。

可以看出,在不采用任何均衡方法时,水下平台位置处接收信号的星座图明显聚集,残留少量的码间干扰基本不影响解码。而在偏离该位置接收时,信号星座图发散,根本无法直接解调信息码元,需要采用其他的均衡方法。

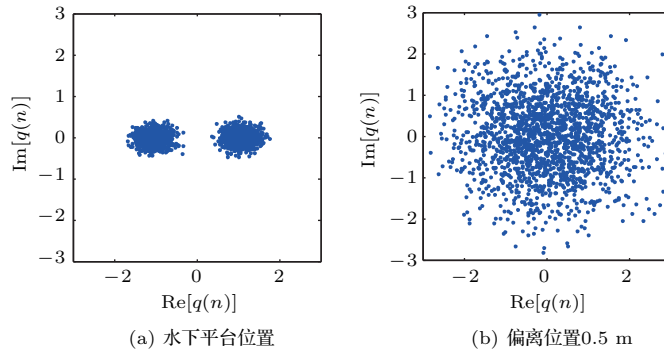


图8 不同位置接收BPSK信号星座图

Fig. 8 BPSK constellation plots at different reception locations

仿真在不同信噪比条件下采用主动时反扩频通信在水下平台位置和偏离位置0.5 m处接收时的误码率曲线,如图9所示。可以看出,由于在水下平台位置处实现了能量空间聚焦和时间压缩,此处的直扩通信误码率明显低于在偏离位置处的误码率。可见,主动时间反转具有明显的低检测概率通信性能。

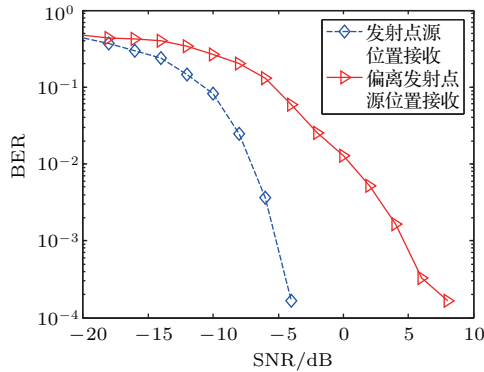


图9 不同接收位置处的信噪比-误码率曲线

Fig. 9 Relationship between BER and SNR at different reception locations

## 6 结论

为了实现低信噪比条件下水下小尺度平台与通信浮标之间的双向隐蔽通信,本文提出了结合时间反转技术和直序扩频技术的水声通信方法。该方法利用主/被动时间反转技术良好的空时聚焦效应,实现了低信噪比下的能量聚焦和多径重组。仿真和水池实验表明,该方法明显提高了低信噪比下直扩系统的通信性能,实现了复杂信道条件下水下小目标平台与通信浮标之间的双向隐蔽通信。值得关注的是,利用时间反转技术的空时聚焦效应,实现低信噪比下的抗多径干扰,可以应用于改善低信噪比条件下水下导航信号测距性能,将时间反转技术应用于水下导航测距通信一体化将是下一步研究的方向。

## 参 考 文 献

- [1] WALREE P A V. Propagation and scattering effects in underwater acoustic communication channels[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, 38(4): 614-631.
- [2] SOZER E M, PROAKIS J G, STOJANOVIC M, et al. Direct sequence spread spectrum based modem for underwater acoustic communication and channel measurements[C]//*Oceans '99 Mts/ieec*. Riding the Crest Into the Century. IEEE, 1999, 1: 228-233.
- [3] BLAIR B J S. Analysis of and techniques for adaptive equalization for underwater acoustic communication[J]. Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [4] BLACKMON F, SOZER E, STOJANOVIC M, et al. Performance comparison of RAKE and hypothesis feedback direct sequence spread spectrum techniques for underwater communication applications[C]// *Oceans*. IEEE, 2002, 1: 594-603.
- [5] TSIMENIDIS C C, HINTON O R, ADAMS A E, et al. Underwater acoustic receiver employing direct-sequence spread spectrum and spatial diversity combining for shallow-water multiaccess networking[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 594-603.
- [6] TRUBUIL J, GOALIC A, BEUZELIN N. An overview of channel coding for underwater acoustic communications[C]// *Military Communications Conference*, 2012, *Milcom*. IEEE, 2012: 1-7.
- [7] YANG T C, YANG W B. Performance analysis of direct sequence spread spectrum underwater acoustic communications with low signal-to-noise-ratio input signals[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 123(2): 842-855.
- [8] EDELMANN G F, AKAL T, HODGKISS W S, et al. An initial demonstration of underwater acoustic communication using time reversal[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(3): 602-609.
- [9] 殷敬伟, 惠娟, 惠俊英, 等. 无源时间反转镜在水声通信中的应用[J]. *声学学报*, 2007, 32(4): 362-368.  
YIN Jingwei, HUI Juan, HUI Junying, et al. Application of passive time reversal mirror in underwater acoustic communication[J]. *Acta Acustica*, 2007, 32(4): 362-368.
- [10] HURSKY P, PORTER M B, SIDERIUS M, et al. Point-to-point underwater acoustic communications using spread-spectrum passive phase conjugation[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 120(1): 247-257.
- [11] STOJANOVIC M. Retrofocusing techniques for high rate acoustic communications[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 117(3): 1173-1185.
- [12] 周锋. 水声扩频通信关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 31-33.
- [13] SONG H C, ROUX P, HODGKISS W S, et al. Multiple-input-multiple-output coherent time reversal communications in a shallow-water acoustic channel[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, 31(1): 170-178.
- [14] YANG T C. A Study of spatial processing gain in underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008, 32(3): 689-709.
- [15] 孙琳, 李若, 周天. 基于被动时反的时分复用下行通信研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2013, 34(10): 1254-1260.  
SUN Lin, LI Ruo, ZHOU Tian. A research of time division multiplexed downlink communications using passive time reversal[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(10): 1254-1260.
- [16] BLOMGREN P, KYRITSI P, KIM A D, et al. Spatial focusing and intersymbol interference in multiple-input-single-output time reversal communication systems[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008, 33(3): 341-355.