

水声通信系统中分布式空时分组码的研究

许妍妍, 张 歆

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 协作传输可以获得无线信道内在的空间分集, 有效改善通信系统的性能, 增加通信系统的覆盖范围。对水声通信系统中两中继节点协作的译码转发方案进行了研究, 提出了基于译码转发协议(DF)的分布式空时分组扩频编码(DSTBSC)方案, 该方案可以克服多径衰落对分布式空时分组码(DSTBC)信号正交性的影响。给出了 DSTBSC 方案的系统模型, 着重分析了在采用两中继译码转发时, 中继节点的误码对水声通信系统性能的影响。在接收端不考虑信号冲突的情况进行仿真, 结果表明, 与直接传输方案相比, 采用两中继节点、译码转发的 DSTBSC 方案, 在两中继节点处均无误码和一个中继有误码时在相同的比特误码率(BER)条件下均可获得约 4dB 的分集增益, 增加了传输距离。

关键词: 分布式空时分组码; 协作分集; 译码转发; 空间分集

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-04-0389-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.04.010

Research on distributed space-time block coding (DSTBC) in underwater acoustic communication system

XU Yan-yan, ZHANG Xin

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Cooperative transmission can obtain spatial diversity inherent in wireless channel, improve performances of communication system effectively, and increase the coverage of communication systems. In this paper, the cooperative diversity scheme of two relay nodes decoding forward (2relay-DF) in underwater acoustic communication system has been studied. Based on decoding forward (DF) protocol, the distributed space-time block spreading code (DSTBSC) scheme is proposed. This scheme can overcome the influence of multipath fading on the orthogonality of DSTBC signal. This paper presents a system model of DSTBSC scheme, mainly analyzes the effect of decoding error on the system performance of 2relay-DF. Signal conflict at the receiving end is not considered in the simulation of this work. Simulations show that, compared with the direct transmission scheme, the DSTBSC decoding forwarding scheme with two relay nodes can get about 4dB diversity gain and increase the transmission distance in the same BER condition when no decoding error exists at the two relay nodes or the decoding error exists only at one of the two relay nodes.

Keywords: distributed space-time block codes (DSTBC), cooperative diversity, decode forward, spatial diversity

0 引言

近年来, 协作分集作为未来无线网络的一个传输策略吸引了大量的研究, 其基本思想是利用中继节点发送信号的副本来协作传递信息。这种方案利用中继节点构成虚拟的多输入多输出(MIMO)系统, 探讨了无线信道内在的空间和多用户分集。该空间分集新技术, 包括分布式空时编码方案、节点转发协议在内, 能有效抗信道衰落^[1-5]。协作传输可以有效增加通信系统的覆盖范围, 这对于在传输过程中信号衰减严重的水声通信很具有吸引力, 因而

在水声通信系统中也得到广泛关注^[1-11]。

J. W. Han 等对水声协作分集系统中的放大转发(AF)协议进行了研究^[1], 其仿真结果表明, 采用 AF 协议的水声协作分集系统的性能比直接传输的性能有 3~5dB 的分集增益。但仿真结果也表明, 当信道中信噪比较低时, 中继节点会放大噪声导致系统性能更差。M. Vajapeyam 等提出了时间反转-分布式空时分组编码(TR-DSTBC)方案^[2,7,8], 应用于多径衰落水声信道中。为了消除码间干扰的影响, 目的节点采用了判决反馈均衡器(DFE)。仿真和试验结果表明, TR-DSTBC 方案在获得分集增益的同时, 还可以获得多径增益。

我们在研究水声 MIMO 系统时提出了一种空时分组扩频编码(STBSC)方案^[6], 利用扩频编码及 Rake 接收来克服水声信道中的多径干扰对 STBC 信

收稿日期: 2011-08-18; 修回日期: 2011-11-25

作者简介: 许妍妍(1983—), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 研究方向为水声通信、协作通信。

通讯作者: 许妍妍, E-mail: hanhaoxia@163.com

号的影响。本文将其扩展形成分布式空时分组扩频编码(DSTBSC)方案,应用于水声协作分集系统中。本文对采用 DSTBSC 方案和译码转发(DF)协议的水声协作传输系统的性能进行仿真,着重分析了在采用译码转发时,中继节点的误码对方案性能的影响。仿真结果表明,与直接传输方案相比,采用两个中继节点、译码转发的 DSTBSC 方案,只要一个中继节点正确译码,该方案可以获得 4dB 的分集增益并且提高了 10km 的传输距离。

本文首先简要介绍系统模型及 DSTBSC 方案,然后利用水声多径衰落信道模型对方案的误码率性能进行仿真,并与直接传输的性能进行比较。

1 水声协作传输系统模型

1.1 系统模型

考虑采用两个中继节点进行协作传输,简称两中继协作的情况。图 1 为两中继协作的系统模型,图 1 中, S 表示源节点, R_1 、 R_2 分别表示两个中继节点, D 表示目的节点。

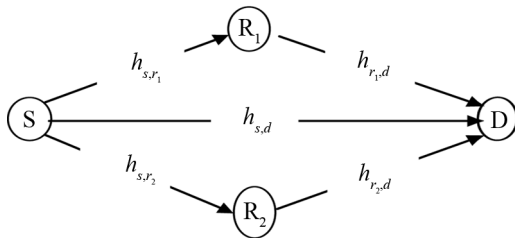


图 1 两中继协作的系统模型
Fig.1 Model of two relay cooperation system.

源节点将要发送的信号直接序列扩频(DSSS)、二进制相移键控(BPSK)调制后以广播的形式发送给中继节点和目的节点,中继节点将接收的信号解扩、解调恢复出原始信号再进行分布式空时分组编码(DSTBC)、DSSS、BPSK 调制后转发给目的节点。在接收端,利用中继标识和扩频码的相关性质对不同传播路径和不同时延的接收信号进行分离和 Rake 接收,经相关解扩、解调后进行空时分组译码,经判决得到发射信息。由协作传输的过程可以看出,在 S 与 D 之间可能存在 3 条通信链路:源节点和目的节点之间的直达(无中继)链路 S-D;经由两个中继节点转发的协作传输链路 S- R_i -D, $i=1, 2$ 。

1.2 DSTBSC 编码方案及性能分析

图 2 给出了 DSTBSC 编码方案的流程图。DSTBSC 编码是在两个中继节点上进行的。中继节点将接收的信号解扩、解调恢复原始信号后,再进

行分布式空时分组扩频编码(DSTBSC),如图 2(b)所示。

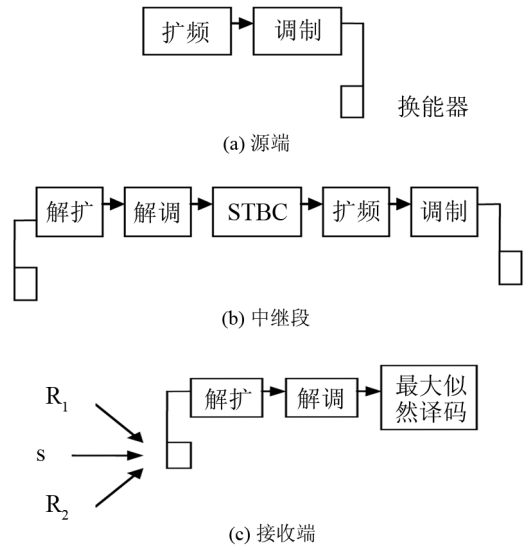


图 2 DSTBSC 编码方案的流程图
Fig.2 Flow diagram of DSTBSC coding scheme

编码器在每一次编码操作中取两个调制符号 x_{r_1} 和 x_{r_2} 形成一个分组,并根据式(1)所示的 Alamouti 编码矩阵进行编码。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{r_1} & -x_{r_2}^* \\ x_{r_2} & x_{r_1}^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $x_{r_i}^*$ 是 x_{r_i} ($i=1, 2$) 的复共轭。分别用 x^1 和 x^2 来表示中继节点 1 和节点 2 的发射序列,则有

$$\mathbf{x}^1 = [x_{r_1}, -x_{r_2}^*] \quad (2)$$

$$\mathbf{x}^2 = [x_{r_2}, x_{r_1}^*] \quad (3)$$

Alamouti 方案的主要特征是两个发射信号相互正交 $\mathbf{x}^1 \cdot \mathbf{x}^2 = x_{r_1} x_{r_2}^* - x_{r_2}^* x_{r_1} = 0$ 。

用扩频码 \mathbf{C} 对两路 DSTBC 信号进行扩频,得到

$$t_1 = x_{r_1} \mathbf{C} - x_{r_2}^* \mathbf{C} \quad (4)$$

$$t_2 = x_{r_2} \mathbf{C} + x_{r_1}^* \mathbf{C} \quad (5)$$

信号序列 t_{r_1} 和 t_{r_2} 经调制后分别由两个中继节点发射,经信道传输后,在接收端, t 时刻和 $t+T$ 时刻接收的信号可表示为

$$r_1 = h_{r_1,d} x_{r_1} \mathbf{C} + h_{r_2,d} x_{r_2} \mathbf{C} + z_1 \quad (6)$$

$$r_2 = -h_{r_1,d} x_{r_2}^* \mathbf{C} + h_{r_2,d} x_{r_1}^* \mathbf{C} + z_2 \quad (7)$$

式中, z_1 、 z_2 为信道噪声, $h_{r_1,d}$ 、 $h_{r_2,d}$ 为中继与目的节点之间信道的衰落系数,如图 1 所示。

用扩频码的副本 \mathbf{C} 对 t 时刻和 $t+T$ 时刻接收的信号进行相关解扩,得到解扩信号分别为

$$d_1 = h_{r_1,d} x_{r_1} + h_{r_2,d} x_{r_2} + \mathbf{C}^T z_1 \quad (8)$$

$$d_2 = -h_{r_1,d} x_{r_2}^* + h_{r_2,d} x_{r_1}^* + \mathbf{C}^T z_2 \quad (9)$$

式中, \mathbf{C}^T 表示 \mathbf{C} 的转置。这里假设扩频码 \mathbf{C} 具有理想的自相关性质。

假设目的节点可以正确估计出信道衰落系数, 则可以构造最大似然译码判决统计量为

$$\tilde{x}_{r_1} = h_{r_1,d}^* d_1 + h_{r_2,d} d_2^* = (|h_{r_1,d}|^2 + |h_{r_2,d}|^2) x_{r_1} + h_{r_1,d}^* \mathbf{C}^T z_1 + h_{r_2,d} (\mathbf{C}^T z_2)^* \quad (10)$$

$$\tilde{x}_{r_2} = h_{r_2,d}^* d_1 - h_{r_1,d} d_2^* = (|h_{r_1,d}|^2 + |h_{r_2,d}|^2) x_{r_2} + h_{r_2,d}^* \mathbf{C}^T z_1 - h_{r_1,d} (\mathbf{C}^T z_2)^* \quad (11)$$

由式(10)、(11)可以看到, 当信道衰落系数已知时, 统计结果 \tilde{x}_{r_i} 仅是 x_{r_i} 的函数。因此, 可以采用最大似然译码准则对 x_{r_i} 进行独立译码, 得到

$$\hat{x}_{r_i} = \arg \min_{\hat{x}_{r_i} \in S} (|h_{r_1,d}|^2 + |h_{r_2,d}|^2 - 1) |\hat{x}_{r_i}|^2 + d^2 (\tilde{x}_{r_i}, \hat{x}_{r_i}) \quad (12)$$

式中, S 为调制信号集, $i=1, 2$ 。

假设所有信道都是瑞利衰落信道, 则源节点到第 i 个中继节点的平均误比特率(BER)为^[5]

$$P_i = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_i}{2 + \bar{\gamma}_i}}) \quad i=1, 2 \quad (13)$$

其中: $\bar{\gamma}_i = \frac{E_b}{N_0} E\{|h_{s,r_i}|^2\}$ 为源节点到中继节点 i 的平均信噪比; E_b/N_0 表示比特信噪比; $E\{|h_{s,r_i}|^2\}$ 表示 $|h_{s,r_i}|^2$ 的平均值。

目的节点按照式(10)、(11)对来自两中继节点的信号进行最大比值合并, 假设 $\bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}$, 则从中继节点到目的节点的平均 BER 为

$$P_{MRC} = (2 + \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{2 + \bar{\gamma}}}) [\frac{1}{2} (1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{2 + \bar{\gamma}}})]^2 \quad (14)$$

式中, $\bar{\gamma} = \frac{E_b}{N_0} E\{|h_{r,d}|^2\}$ 表示中继节点 i 到目的节点的平均信噪比。

假设 $P_1 = P_2$, 于是, 从源节点到目的节点的平均误比特率为

$$P_e = (1 - P_i) P_{MRC} + 0.5 P_i \quad (15)$$

目的节点接收直达信号的平均比特误码概率为:

$$P_d = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_d}{2 + \bar{\gamma}_d}}) \quad (16)$$

式中, $\bar{\gamma}_d = \frac{E_b}{N_0} E\{|h_{s,d}|^2\}$ 为源节点到目的节点的平均信噪比。

2 仿真结果

我们用水声信道模型对 DSTBSC 编码的性能进行了仿真分析。信道参数是根据实测的海洋中的声速曲线, 在给定传输距离条件下, 由射线模型产

生。表 1 为仿真时用到的信道参数, 表中, S-R₁、S-R₂ 分别表示源节点到中继节点 1、2 的信道, 传输距离均为 10km; R₁-D、R₂-D 分别表示中继节点 1、2 到目的节点的信道, 传输距离均为 30km; S-D 表示源节点到目的节点的信道, 传输距离为 30km。PL(单位: dB)表示信道衰减系数, TP(单位: ms)为相对传播时延。按照信号传输的过程, 用 S-R₁、S-R₂ 中最先到达路径的参数对 S-R₁、S-R₂ 的信道参数进行归一化, 用 R₁-D、R₂-D 和 S-D 中最先到达路径的参数对 R₁-D、R₂-D 和 S-D 的信道参数进行了归一化。由于仿真信道的时变性, 我们在信道参数的基础上采用复高斯瑞利衰落和射线模型相结合。

表 1 归一化多径衰落信道参数
Table.1 The normalized multipath fading channel parameters

S-R ₁		R ₁ -D		S-D	
PL	TP	PL	TP	PL	TP
1.018	33.8	1.723	6.3	1.795	58.1
0.557	20.7	0.959	101.1	1.000	0
0.516	24.4			0.637	67.7
S-R ₂		R ₂ -D			
PL	TP	PL	TP		
1.000	0	0.754	61.4		
1.001	29.8	1.009	56.5		
0.776	22				

仿真时, 发射信息长度为 100 的随机二进制序列, 采用 BPSK 调制, 载波频率为 4 kHz。扩频码采用 32 位的 Gold 码, 码片速率为 2 kb/s。采用蒙特卡罗仿真, 数据总数为 1×10^5 。

我们着重分析了中继节点采用译码转发协议时, 中继节点有译码错误时, DSTBSC 方案传输距离为 40 km 的性能, 并与非协作的直接传输的传输距离为 30 km 条件下的性能进行了比较。图 3 给出了中继节点处和目的节点处的比特信噪比(SNR)在 -4 dB 至 8 dB 之间变化时, 目的节点处的比特误码

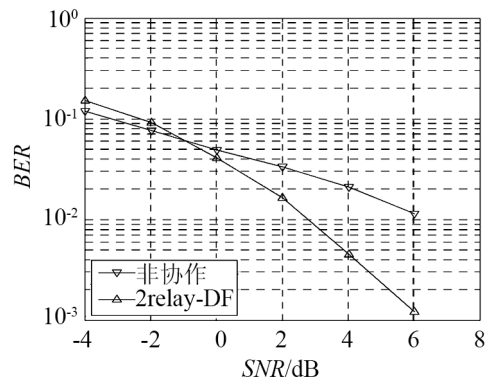


图 3 两中继译码转发和非协作的性能比较
Fig.3 Comparison of performance between 2relay-DF and no cooperation

率(BER)曲线,图中,“2relay-DF”表示 DSTBSC 方案的 BER 曲线,“非协作”表示直接传输的 BER 曲线。

由图 3 可见,相比直接传输,DSTBSC 方案随着 SNR 的增加显著地改善了目的节点的 BER 性能。当接收端的 BER 为 10^{-2} 时,DSTBSC 方案可以获得约 3.5dB 的分集增益。

为了深入分析中继节点有传输误码时 DSTBSC 方案的性能,我们对三种情况,即中继节点处无误码,一个中继节点传输有误码和两个中继都有误码时目的节点处的 BER 进行了仿真和比较,仿真结果如图 4 所示。图中,“2relay-DF(-10 和 10 dB)”表示两中继节点处的信噪比分别为 -10 dB(BER 为 2.7×10^{-1})和 10dB(BER 为 0)时目的节点的误比特率曲线,“2relay-DF(-10dB)”表示两中继处的信噪比均为 -10 dB 时目的节点的 BER 曲线,2relay-DF(10dB)表示两中继处的信噪比均为 10 dB 时的 BER 曲线。图中同时给出了直接传输时目的节点的 BER 曲线。

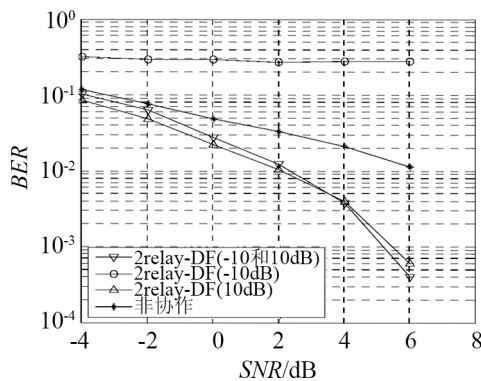


图 4 当中继节点处有误码和无误码时,两中继译码转发与非协作的性能比较

Fig.4 Comparison of performance between 2relay-DF and no cooperation with and without decoding error at nodes

从图 4 中可以看出,相比直接传输,当接收端的 BER 为 10^{-2} 时,DSTBSC 方案在两中继节点处均无误码和一个中继有误码时,均可获得约 4dB 的分集增益;在两中继节点处均有误码时的 BER 比直接传输时要差。很明显,这是因为中继节点处的错误传播。

3 结论

本文提出了一种将分布式空时分组编码与直接序列扩频相结合的 DSTBSC 方案,用于水声通信协作分集系统中,仿真表明 DSTBSC 方案相比直接传输的误比特率性能有很大改善且提高了系

统的覆盖范围,分析了在采用译码转发协议时,中继节点有译码错误对 DSTBSC 方案性能的影响。DSTBSC 方案在两中继节点处均无误码和一个中继有误码时均可获得约 4dB 的分集增益。这也意味着中继节点的选择、转发协议等需要在今后进行更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] Han Jung woo, Hyung Jun Ju. A study on the cooperative diversity technique with amplify and forward for underwater wireless communication[C]// IEEE Kobe Techno-ocean 2008, 1-3.
- [2] Vajapeyam M, Mitra U. Performance of distributed space-time cooperative schemes for underwater acoustic communications[C]// Global Telecommunications Conference 2006, 27: 1-5.
- [3] Vajapeyam M, Mitra U. Distributed space-time cooperative schemes for underwater acoustic communications[C]// OCEANS-Asia Pacific 2006, 1-8.
- [4] XUE Hui, ZHANG Hong. Research on technique of cooperative diversity based on tow-hop of space-time block coding decode and forward[C]// Mechanic Automation and control Engineering, 2010: 5695-5698.
- [5] Mahinthan V, Mark J W. A simple cooperative diversity scheme based on orthogonal signaling[C]// Wireless communications and Networking Conference, 2005, 2: 1012-1017.
- [6] 张歆, 张小蓊. 水声多径信道中的标识延迟空时扩展发射分集[J]. 电子与信息学报, 2009, 8: 2024-2027.
ZHANG Xin, ZHANG Xiaojie. A transmitter diversity scheme based on labelled delay space time spreading in underwater acoustic communication systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 8: 2024-2027.
- [7] 黄润林, 龙奕. 一种降低 OFDM 信号峰均功率比的预编码方法[J]. 声学技术, 2008, 27(6): 884-887.
HUANG Runlin, LONG Yi. A precoding method used to reduced peak-to average power ratio of OFDM signal[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(6): 884-887.
- [8] 赵安邦, 解立坤, 沈广楠, 等. Pattern 时延差编码水声通信抗多普勒的差分解码研究[J]. 声学技术, 2009, 28(4): 459-462.
ZHAO Anbang, XIE Likun, SHEN Guangnan, et al. Research on Doppler-resisting differential decoding in underwater acoustic time pattern delay shift coding communication system[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(4): 459-462.
- [9] 马雪飞, 赵春晖, 乔钢. OFDM 水声通信线性最小均方差算法信道均衡[J]. 声学技术, 2009, 27(4): 467-471.
MA Xuefei, ZHAO Chunhui, QIAO Gang. Channel equalization of orthogonal frequency division multiplexing underwater communication based on linear minimum mean square error[J]. Technical Acoustics, 2009, 27(4): 467-471.
- [10] 许肖梅. 水声通信与水声网络的发展与应用[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 813-817.
XU Xiaomei. Development and applications of underwater acoustic communication and networks[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(6): 813-817.
- [11] 张国松, 刘海燕. 水声通信 Doppler 扩展估计的实验研究[J]. 声学技术, 2008, 27(6): 896-899.
ZHANG Guosong, LIU Haiyan. Experimental study of Doppler spreading estimation in under water acoustic communication[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(6): 896-899.