

doi: 10.7690/bgzdh.2014.09.007

# 一种水声扩频通信系统模型的仿真与分析

朱远航, 邓知辉

(湖南信息职业技术学院信息工程系, 长沙 410200)

**摘要:** 针对影响水声通信系统高速和高可靠性能的主要障碍问题, 提出了一种改进的 RAKE 接收技术方案。通过研究水声信道衰落特性和水声相干多途信道模型, 建立水声扩频通信系统模型, 详细分析编码技术对系统性能的影响, 并给出 Rake 接收机在不同合并方式下的仿真分析及数据。仿真结果表明, 该方案能较好地解决水声数据传输中的多径干扰, 是有效、可行的。

**关键词:** 水声通信; 扩频; RAKE 接收机; 多径通信

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## Underwater Acoustic Communication System Model Simulation and Analysis

Zhu Yunhang, Deng Zhihui

(Department of Information & Engineering, Hunan College of Information, Changsha 410200, China)

**Abstract:** Aiming at the main faults which influence high speed and high reliability of underwater acoustic communication, put forwards an improved RAKE receiver technology. Through research underwater acoustic communication channel decay features and underwater acoustic coherence multipath channel model, establish underwater acoustic spread spectrum model, analyze influence of coding technology on system performance in detail, then give simulation analysis and data of Rake receiver under different merger modes. The simulation results show that the method can solve the problem of multipath interference in underwater acoustic data transmission, it is effectively and feasibly.

**Keywords:** underwater acoustic communication; spread spectrum; RAKE receiver; multi-path fading

### 0 引言

水下无线通信在海洋资源开发中显得越来越重要。然而, 容易产生声吸收和声起伏现象的各种海洋噪声和生物噪声, 使信号产生强烈又多变的传播, 导致严重的信号衰落效应, 使通信性能极大地偏离人们理论分析结果, 随着频率的升高, 海水介质对声波的传播损失成幂次方增长, 对高频信号的衰减非常严重, 传输带宽很窄, 导致水声通信设备比无线通信设备复杂得多; 因此, 水声通信是难度最大的无线通信之一<sup>[1]</sup>。

扩频技术是唯一能工作在负信噪比条件下的通信技术, 特别是直接扩频技术对抵抗多径干扰非常有效, 其中的 RAKE 接收技术在抑制干扰的同时, 还能充分利用多径干扰的能量, 从而提高信噪比, 很好地改善了接收机的性能。同时, 扩频技术对实现水下多址通信和建立水声通信网络也有很大的意义。但是水声信道非常特殊与复杂, 对适用于水声信道的扩频通信技术的研究开发仍是一个充满挑战的领域。文献[2]在国内较早地使用扩频技术将水下多途信号分集接收; 文献[3]采用 m 序列直接扩频码及 RAKE 接收原理分离多途信号; 文献[4]提出了正

交 M-ary/DS 水声扩频通信方案, 并在接收端采用了 RAKE 接收技术。目前, 研究水声扩频通信技术所面临的 2 个最为主要的难题是可跟踪信道时变及高效带宽利用率的扩频技术。

笔者对水声通信系统中应用直扩技术进行数据传输的可行性及性能进行研究, 给出了水声信道的衰落特性和水声相干多途信道模型, 详细分析了编码技术对系统性能的影响, 最后给出 Rake 接收机在不同合并方式下的仿真分析及数据, 从理论上验证了该方案的可行性。

### 1 水声扩频通信系统

扩频技术抗干扰能力强、保密性高、截获率低, 是远程军用通信的首选技术。通过 RAKE 接收机信道的多普勒搜索补偿、多途衰落等技术, 对水声信号进行相关处理, 较好地保证了水声通信的可靠性。

#### 1.1 水声信道模型

水声信道复杂多变, 会使发送信号产生时变多径传播, 在接收端, 信号由不同路径和不同传播方向的振幅波进行矢量叠加, 由于多次反射和折射, 到达接收机时时延不同, 相位也不同, 同时, 其中

收稿日期: 2014-04-17; 修回日期: 2014-05-06

基金项目: 湖南省教育厅资助科研课题“多自主式水下机器人(AUV)通信系统的研究”(13C659)

作者简介: 朱远航(1968—), 女, 湖南人, 硕士, 副教授, 从事信号处理研究。

的某一条路径上的信号其衰减和时延也是随机变化的，使接收信号出现起伏和衰落。假若直接接收会产生较高的误码率，所以在通信领域中对衰落信道的理论研究是非常重要的。

在数学上，水声信道可以表征为时变线性滤波器，其时变多径信道冲激响应

$$h(t) = \alpha_1 \delta(t - \tau_0) + \sum_{i=2}^N \alpha_i \delta(t - \tau_i) \quad (1)$$

典型的多径时变信道模型可以用图 1<sup>[5]</sup>来表征。

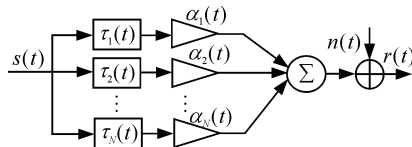


图 1 时变多径信道模型 (加性白噪声)

$\alpha_i$ 、 $\tau_i$  分别为接收点接收到的声线幅度及时延，若声线发射信号为  $s(t)$ ，则通过多径信道传播后的接收波形为：

$$r(t) = \alpha_1 s(t - \tau_0) + \sum_{i=2}^N \alpha_i s(t - \tau_i) + n(t) \quad (2)$$

### 1.2 直接序列扩频通信技术

直接序列扩频通信抗干扰能力很强，它通过发射带宽远大于信息带宽来换取信噪比上的增益，实现低信噪比条件下的可靠通信，因此在强噪声环境下得到了广泛的应用。但在带宽受限的水声信道中，通信速率受到了限制。为了得到更好的抗多径衰落效果，笔者将分集接收技术与直接序列扩频通信系统相结合。

### 1.3 RAKE 接收技术

如图 1 所示，在接收端叠加后的多径信号是随机的，而且时延信号差很小，一般很难分离。而 RAKE 接收技术实现了基于扩频的多径分集接收，它将接收的多径信号进行有效的分离、合并，增加信号的能量，提高传输可靠性，改善了系统性，对于抑制时延扩展引起的多径干扰以及降低衰落都具有很好的效果。同时，为保证接收信号的信噪比最大化，让 RAKE 接收机中的分支数与图 1 所示的信道的多径数目准确对应。同时，信息在信道中传播时，笔者采用信道编码技术，设计信号变换来抵抗噪声、干扰及衰落等各种信道损伤，使通信系统的误码率进一步降低。

## 2 水声扩频 RAKE 接收机仿真

如图 2 所示，笔者建立了 1 个远程水声通信系

统，采用直扩通信技术，BPSK 调制及 RAKE 接收为核心，用 Matlab 软件进行计算机仿真来检测该接收机的性能。

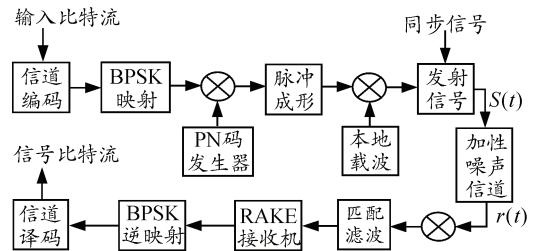


图 2 水声通信系统收发仿真框图

在该仿真过程中模拟了多径时延从 0.5~20 ms 的 7 条水声信道传播路径。在仿真实验中，信号分别通过矩形脉冲成形及升余弦滤波器 ( $\alpha=0.25$ ) 的脉冲成形 2 种方式，对比发现：后者数字信号的带宽虽然比前者要窄，但是消除了发射信号的许多旁瓣，极大地改善信号的频域特性。

### 2.1 水声信道性能分析

图 3 为单纯 BPSK 调制和 DS-BPSK 调制得到的误码率 (bit error rate, BER) 仿真曲线 ( $R_b=10$  bit/s)。由图 3 可以发现：系统在多径干扰相同的情况下，BPSK 水声信道随着信噪比 (signal noise ratio, SNR) 的增大，是否采用直扩技术对系统的误码率影响越来越明显，单纯的 BPSK 调制 BER 一直稳定在较高值，几乎不变；如果采用直扩技术，BER 却大幅度下降。DSSS 的抗多径干扰能力非常明显。但当传输信息的码率比较高时，即使 SNR 很高，系统 BER 也很大，这时即使直接进行解扩，也无法准确地恢复原始信息。所以单纯的扩频技术在信道条件恶劣的情况下也不能正常工作，因此笔者在 DS-BPSK 调制的接收系统中引进了 RAKE 接收机。

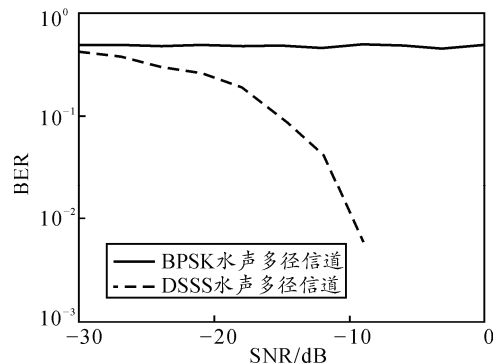


图 3 BPSK 和 DS-BPSK 调制误码率曲线

### 2.2 RAKE 接收机仿真

图 4 为  $R_b=40$  bit/s 时不同接收机得到的误码率曲线，从中可以看出：当采用了 RAKE 接收技术后，

系统 BER 性能有明显改善，而且从实验仿真中发现：即使传输信息码率比较高时，也可以得到较低的系统 BER。采用 BPSK 调制、信道编码的水声 DSSS 系统传输时 BER 性能仿真结果如图 5 (Rb=40 bit/s)。从中可以发现采用信道编码技术后系统的性能明显提高。

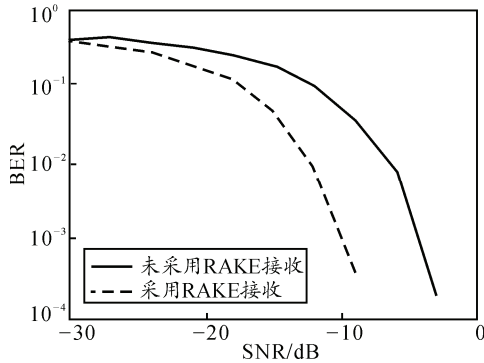


图 4 不同接收机得到的误码率曲线

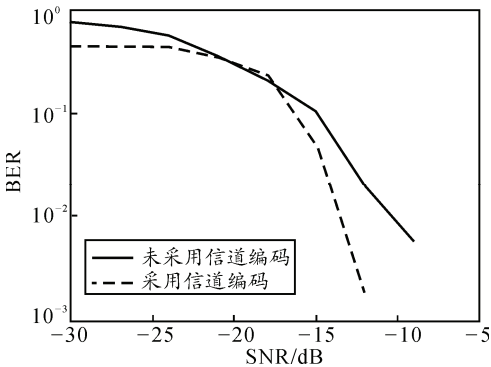


图 5 有无信道编码得到的误码率曲线

### 2.3 合并方式对系统性能的影响

在合并接收 RAKE 接收机的不同径信号时，笔者分别采用了增益合并、最大比合并及选择式合并等 3 种方式。图 6~图 8 分别是在不同情况下采用不同合并方式的 RAKE 接收机的误码率曲线。由仿真结果可见，不同的合并方式对系统的性能也会产生不同的影响。

从图 6~图 8 可以看出，当分集路径不多或者多径能量比较平均时，采用最大比合并与等增益合并 2 种方式时系统性能相当，其误码率曲线几乎重叠；而选择式合并方式下的 BER 性能明显下降。而多径能量不均匀，即某径相对衰减比较严重的时候，采用最大比合并方式的 BER 性能比等增益合并方式要好。同时通过仿真结果显示：当 RAKE 接收路径中直达路径较强，而其他路径衰减比较严重(或者多径时延的长度小于扩频码的宽度)，还是采用等增益合并方式，则也会赋予那些只接收到很少信息能量的路径比较大的权值，反而导致 RAKE 接收的

BER 性能下降，最终结果还不如采用选择式合并方式进行合并接收。

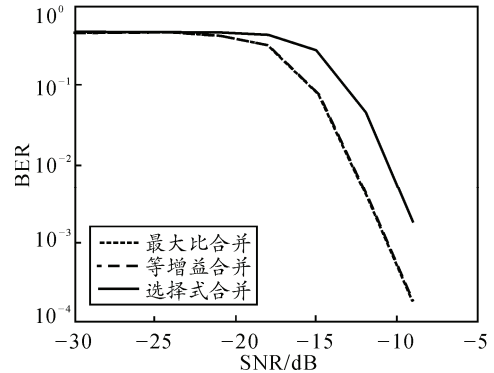


图 6 分集支路比较少时的误码率曲线

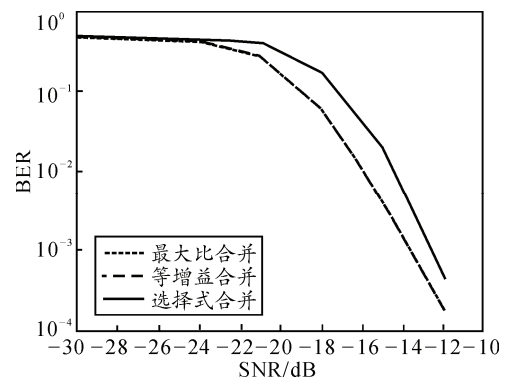


图 7 多径的能量均匀时的误码率曲线

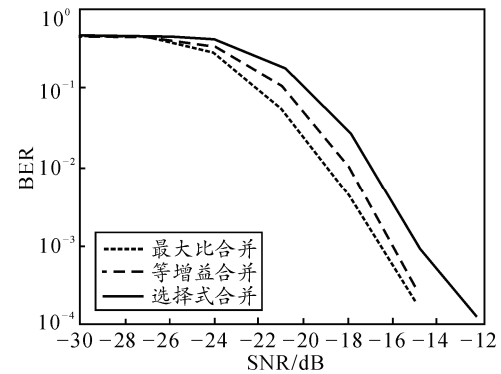


图 8 多径的能量不均匀时的误码率曲线

### 3 结论

针对水声信道中存在的多径效应，笔者研究了基于直扩系统的 RAKE 接收机分集技术。完成了基于直接扩频、信道编码、解调和 RAKE 接收合并方式等的水声通信系统的建模与仿真。结果显示，直接扩频系统进行 DPSK 调制及信道编码都能很好地改善水声通信系统的性能。在多径比较严重的水声信道中，最大比合并方式和等增益合并方式性能相对选择式合并方式来说更好。在这 2 种合并方式下，笔者还分析了码长分别在 31、63、127 3 种情况下的系统性能，发现 RAKE 接收系统的误码率随着 PN

码周期的增大而降低。

参考文献:

[1] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 3-9.

[2] 陈岩, 张建兰, 陈庚. 中国声学学会 2001 年青年学术会议论文集: 应用扩频和分集技术进行水声通讯的研究[C]. 北京: 中国声学学会, 2001, 3(11): 170-172.

[3] 黄晓萍, 桑恩方. 一个水声扩频通信系统设计与实现[J]. 海洋工程, 2007, 25(1): 127-132.

[4] 韩晶, 黄建国, 张群飞, 等. 正交 Mary/DS 扩频及其在水声远程通信中的应用[J]. 西北工业大学学报, 2006,

24(4): 463-467.

[5] John G. Proakis. 数字通信[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2005: 7-8.

[6] 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: 41-44.

[7] 仇佩亮, 陈惠芳, 谢磊. 数字通信基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 582-585.

[8] 曾立. RAKE 接收技术在水声通信中的应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2004: 55-63.

[9] 曹俊. 水声扩频通信中的 RAKE 接收技术仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 36-40.

[10] 朱远航, 张平华, 邓明元. 直接序列扩频通信系统性能研究[J]. 兵工自动化, 2013, 32(2): 84-87.

\*\*\*\*\*

(上接第 22 页)

综上所述, 得出案例 X 与案例 Y 的相似度的计算公式为:

$$SIM(X, Y) = 1 - DIST(X, Y) = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i A(X_i, Y_i)^r}{\sum_{i=1}^n W_i}} \quad (3)$$

3 应用举例

现通过实例说明在案例库组织形式下基于案例推理的装备诊断与维修方法。某新型正实车试验的 M 型装备的动力系统为 XXA 型, N 型装备的动力系统为 XX 型, 已列装部队, 且建立了源案例库。

根据 2.1 中案例组织的要求, 提取 M 型发动机故障信息  $f_6 = \{ \text{负荷运转情况下冒大量黑烟, 功率不足} \}$ , 形成目标案例  $C_1$ , 其中故障特征集  $f_n$  如表 2。

表 2 目标案例故障特征集

属性	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{14}$
权重	0.4	0.3	0.2	0.1

表中:  $f_{11}$  为负荷情况下冒大量黑烟;  $f_{12}$  为发动机功率降低;  $f_{13}$  为装备过程中出现排火现象;  $f_{14}$  为排气温度过高。

由于 M 型步兵战车还处在实车试验阶段, 没有相应的源案例进行匹配, 所以选择相似车型——N 型装备进行案例检索, 得到相关的故障特征子空间  $C_i$  及相应的权重, 如表 3 所示。

表 3 源案例故障特征子空间组成

$C_i$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{14}$
$C_{11}$	0.2	0.3	0.3	0.2
$C_{11}$	0.2	0.1	0.4	0.3
$C_{11}$	0	0.4	0.3	0.3
$C_{11}$	0.5	0.2	0	0.3
$C_{11}$	0.4	0.3	0.1	0.2
$C_{11}$	0.2	0.4	0.4	0
$C_{11}$	0	0.4	0.6	0

将目标案例的故障特征子空间与源案例的故障特征子空间集利用相似度计算公式进行匹配, 结果

如表 4 所示。

表 4 匹配的相似度

案例	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{16}$	$C_{17}$
S(相似度)	0.876	0.814	0.763	0.735	0.933	0.749	0.631

由表可知:  $C_{15}$  的匹配度最高, 调  $C_{15}$  所在的源案例进行故障维修的指导, 如果在维修过程中仍不能解决问题, 则需根据相应的规则进行推理或者向专家咨询解决问题, 并将此案例整理作为源案例放入新型装备的案例库。

4 结束语

笔者根据装甲装备维修保障领域的特点, 对现存的案例检索的流程做了有针对性的改进, 并给出了相应案例库的组织结构, 为新型装备列装之后故障的解决提供了可参考的解决路径; 也通过相似车型或相似部件的故障诊断与维修案例的精简与提炼, 减少了存储空间, 提高了检索效率, 使案例推理技术更好地适应装甲装备维修保障领域的需求。

参考文献:

[1] 汪诚, 李应红, 张恒喜. 基于 CBR 技术的航空远程故障诊断和维修体系[J]. 航空维修与工程, 2004(2): 53-55.

[2] 吴昊. 基于案例推理的民用飞机系统维修间隔期确定方法[J]. 航空维修与工程, 2011(4): 55-57.

[3] 崔莅凯. 智能化农业信息系统中不精确推理和基于案例推理的研究[D]. 云南: 昆明理工大学计算机系, 2002.

[4] 高明. 水轮发电机组故障诊断系统设计及故障诊断技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005: 9.

[5] 李锋, 冯珊. 基于人工神经网络的案例检索与案例维护[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(8): 1053-1056.

[6] 程刚, 钟秋海. 相似案例自适应选择算法与其应用[J]. 控制与决策, 2007, 22(3): 357-360.

[7] 杨斌宇. 基于案例的推理在智能决策支持系统中的应用[D]. 吉林: 吉林大学, 2004.