

doi: 10.19697/j.cnki.1673-4432.201801013

基于 Chirp-BOK 扩频的水声通信系统

伊锦旺¹, 朱逸², 王贤凌¹, 陈祥捷², 张佳敏¹

(1. 厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024;

2. 厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建 厦门 361005)

[摘要] 利用线性调频 (Chirp) 信号在水下通信中具有良好的抗噪声和抗多径特性, 提出基于 Chirp-BOK (binary orthogonal keying, 二进制正交键控调制) 扩频的水声通信系统。系统采用二进制正交键控调制以及匹配滤波接收器, 利用正向调频信号和反向调频信号, 结合 BOK 调制技术, 实现适合水声环境的扩频通信系统。噪声信道和多径信道下的仿真实验结果表明, 该系统具有良好的抗噪声和抗多径性能, 适用于水声系统的扩频通信。

[关键词] 水声通信系统; 线性调频信号; 二进制正交键控调制; 扩频通信; 抗噪声; 抗多径

[中图分类号] TN914.42 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1673-4432 (2018) 01-0070-06

浅海水声信道是一个十分复杂的无线信道, 存在严重的多径效应和噪声干扰, 而且收发平台的相对运动会产生较大的多普勒效应。此外, 水下通信系统中, 声波的工作频率一般选取在较低频段上, 使得水声通信的可用带宽受到极大的限制。要在恶劣的水声信道下, 完成稳定可靠高效的信息传输是当前水声通信研究的关键问题。扩频技术具有抗多径能力强、低信噪比、保密性高等优点, 成为目前水声通信技术的研究热点。线性调频 (Chirp) 信号是一种常见的非平稳宽带信号, 其在时域和频上的自相关性以及能量聚集特性, 使得基于 Chirp 信号的扩频通信方式具有良好的抗干扰能力和稳健性, 可用于水下复杂环境的通信^[1]。Winkler^[2] 首次将其应用于无线通信领域, 利用 Chirp 上扫频和下扫频信号传输二进制数据, 即二进制正交键控调制 (binary orthogonal keying, BOK)。近年来, Chirp-BOK 已经被证明是一种稳健的水声通信方式。Demirors 等^[3] 利用 Chirp-BOK 调制技术实现水下稳健的通信反馈链路, 以保证水下声调制解调器参数的实时自适应变化。Lee 等^[4] 将 Chirp-BOK 通信方案应用于超声波频段的传输, 并在严重频率选择性衰落信道中实现可靠的远距离传输。Neasham 等^[5] 通过 Chirp-BOK 技术实现水下自主航行器之间的可靠通信, 并通过海水实验证明其方案不仅具有较低的算法复杂度, 且具有良好的抗多径和抗噪声能力。本文提出基于 Chirp-BOK 扩频的水声通信系统, 利用正向调频信号和反向调频信号, 结合 BOK 调制技术, 实现适合水声环境的扩频通信系统。

1 基于 Chirp-BOK 的通信系统模型

由于水下声信道的带宽窄、背景噪声大、多普勒频移率高、多径效应严重等问题, 会造成水声通

收稿日期: 2017-11-12

修回日期: 2018-01-31

基金资助: 国家自然科学基金项目 (61701422); 福建省自然科学基金项目 (2017J01785, 2016J01323); 厦门理工学院高层次人才项目 (YKJ15034R); 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 (厦门大学) 开放课题基金 (201602)

作者简介: 伊锦旺 (1984-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为水声通信, E-mail: jwyi@xmut.edu.cn.

引文格式: 伊锦旺, 朱逸, 王贤凌, 等. 基于 Chirp-BOK 扩频的水声通信系统 [J]. 厦门理工学院学报, 2018, 26 (1): 70-75.

Citation: YI J W, ZHU Y, WANG X L, et al. Underwater acoustic communication system based on Chirp-BOK spread spectrum [J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2018, 26 (1): 70-75. (in Chinese)



信质量严重下降。为了提高水声通信系统的可靠性及传输速率, 将扩频通信技术引入到水声通信中, 提出基于 Chirp-BOK 扩频的水声通信系统。

1.1 系统框架

利用 Chirp 脉冲信号调制码元信息, 实现扩展频谱的目的, 构建如图 1 所示的基于 Chirp-BOK 的水声通信系统框架。将传输数据比特“1”表示为正向调频信号, “0”表示为反向调频信号。接收机采用匹配滤波器, 正向、反向调频信号经过信道传输后都会对两个匹配滤波器形成输入。以正向调频匹配滤波器为例, 代表信码“1”的正向调频信号通过匹配滤波器的输出是一个峰值功率正比于时间带宽积的压缩脉冲, 再通过取样、判决就可以恢复出信码“1”; 而输入不相匹配的反向调频信号时, 输出则是一个均匀分布的低幅度值, 从而保证判决检测的可行性。

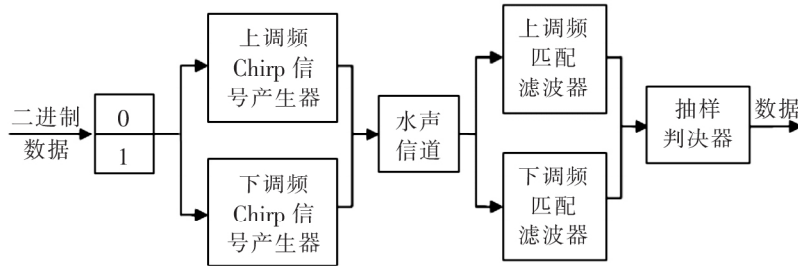


图 1 基于 Chirp-BOK 扩频的水声通信系统框图

Fig. 1 Diagram of underwater communication system based on Chirp-BOK

1.2 Chirp 信号调制技术

基于 Chirp-BOK 的扩频通信系统, 采用二进制正交键控调制, 其原理为生成一对正交的正向和反向调频信号。这对信号利用的频带和时宽相同, 具有相同的中心频率和持续时间, 且频率互为相反数。在调制过程中, 可以分别在正向调频信号和反向调频信号上调制不同的信息。一般将传输数据比特“1”表示为正向调频信号, 将传输“0”表示为反向调频信号。这两个信号是正交的, 其信号表达式如下:

$$\begin{cases} \text{“1” 信码} \longrightarrow f(t) = \cos(2\pi f_0 t + \pi k t^2) \\ \text{“0” 信码} \longrightarrow f(t) = \cos(2\pi f_0 t - \pi k t^2) \end{cases} \quad (1)$$

1.3 Chirp 信号检测技术

匹配滤波器是一种线性滤波器, 其输出端的信号功率与噪声功率比值达到最大, 接收机采用匹配滤波器检测接收信号。Chirp 信号具有良好的脉冲压缩特性, 与之相对应的匹配滤波器的冲激响应是其他参数完全相同而调频方向相反的 Chirp 信号, 该特性极大简化了匹配滤波器的构造^[6]。

以上调频 Chirp 信号为例, 由式 (1) 构造其匹配滤波器的冲击响应如下:

$$h(t) = \cos(2\pi f_0 t - \mu t^2/2), \quad -T/2 \leq t \leq T/2. \quad (2)$$

则上调频 Chirp 信号经过匹配滤波器的输出如下:

$$\begin{aligned} g(t) &= h(t) c(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} c(t) h(t - \tau) d\tau \\ &= \sqrt{BT} \cos(2\pi f_0 t) \frac{\sin\left[\pi B t \left(1 - \frac{|t|}{T}\right)\right]}{\pi B t}, \quad -T \leq t \leq T. \end{aligned} \quad (3)$$

从式 (3) 可以看出, 匹配滤波器的输出具有和 sinc 函数类似的特性, 从而可将输入的低峰值功率的 Chirp 信号转换成一个能量集中于很短时间内, 具有高峰值功率的输出信号, 这样的特性非常利于检测和捕获 Chirp 信号。最后通过对匹配滤波器的输出进行抽样判决即可还原信息码。

2 系统性能分析

基于 MATLAB 构建系统仿真模型并进行性能分析。为便于性能比较, 仿真中将 Chirp-BOK 调制

与经典二进制相移键控 (binary phase shift keying , BPSK) 调制进行比较, 并分别在加性高斯白噪声信道 (additive white gaussian noise , AWGN) 和多径信道下分析两种方案的性能。

2.1 AWGN 信道仿真

浅海水声信道噪声一般可看作准平稳的高斯白噪声。假设信号功率 S , 信号传信率 R_b , 信号比特能量 E_b , 噪声功率 N , 噪声功率谱密度 N_0 , 带宽 B , AWGN 信道仿真时采用比特信噪比 E_b/N_0 作为系统性能的衡量指标^[7] , 其与一般信噪比 S/R 的转换公式如下:

$$\frac{S}{R} = \frac{E_b R_b}{N_0 B} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right) \frac{R_b}{B} \quad (4)$$

归一化处理后, 可得 BPSK 调制的理想误比特率 P_{e1} 和 Chirp-BOK 调制的理想误比特率 P_{e2} ^[8] 如下:

$$P_{e1} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{E_b/N_0}) \quad (5)$$

$$P_{e2} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{E_b/2N_0}) \quad (6)$$

由式 (5) 和 (6) 可知, 二者的理想误比特率只与比特信噪比有关, 与码率和带宽无关。

AWGN 信道仿真结果如图 2 所示, 从上到下 4 条曲线分别表示: Chirp-BOK 仿真性能曲线、Chirp-BOK 理想性能曲线、BPSK 仿真性能曲线和 BPSK 理想性能曲线。由图可见 BPSK 调制的抗噪性能更好, 这是因为 AWGN 信道中 BPSK 具有良好的相关性, 而 Chirp-BOK 由于采用正交信号, 其相关性为 0。Chirp-BOK 的仿真曲线与其理想曲线的误码性能相差约 1~3 dB, 这是由于 Chirp 信号受噪声影响, 导致匹配滤波器的性能下降, 而随着信噪比的提高, 接收机的检测性能也随之提高, 两者之间的性能差异逐渐缩小。为进一步说明这个问题, 如图 3 所示为 Chirp 信号在无噪声和 -5 dB 高斯噪声下的功率谱密度的对比。可以看出, 受噪声影响信号的功率谱密度出现大幅度抖动。

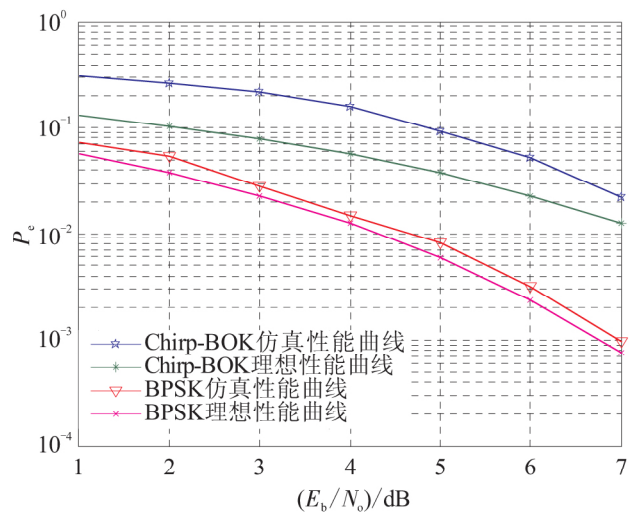


图 2 AWGN 信道 Chirp-BOK 调制和 BPSK 调制的性能分析

Fig. 2 Performance of Chirp-BOK and BPSK in AWGN channel

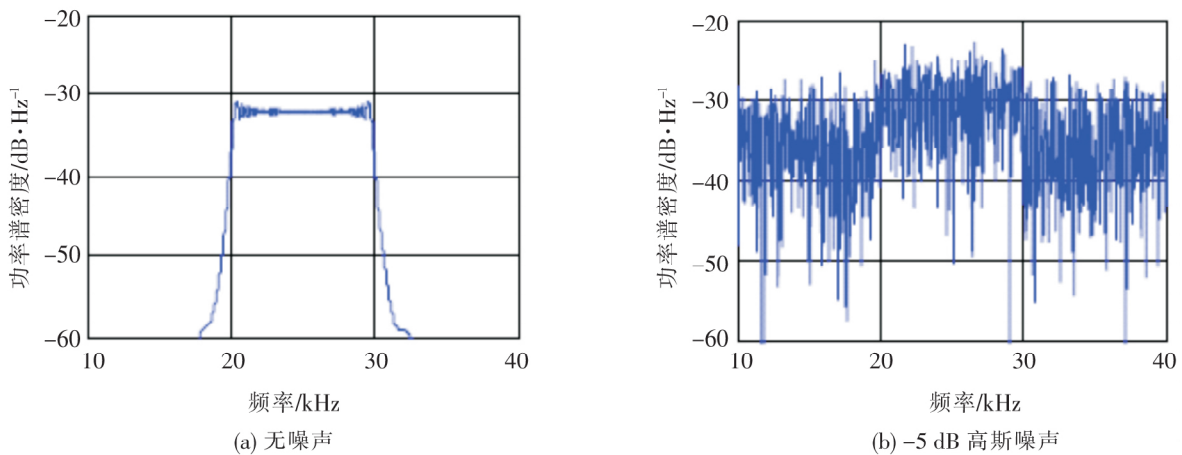


图 3 Chirp 信号的功率谱密度

Fig. 3 Power spectral density of Chirp signal

如图 4 所示为 AWGN 信道中 BPSK 调制的直扩系统与 BPSK 调制的一般系统 (即未进行直扩操作) 的性能仿真。由图可知, 采用 BPSK 调制的直扩系统的性能曲线不仅与理想 BPSK 调制的一般系统接近, 且大部分情况下性能优于后者, 说明扩频系统在 AWGN 信道下具有较好的抗噪性能。这是因为虽然扩频系统的带限噪声功率得到扩展, 但是带限宽度仍然很宽, 基带内噪声功率谱没有明显下降, 因此 AWGN 信道对宽带噪声干扰作用有限。

2.2 多径信道仿真

多径效应是造成声信号在海洋环境中产生畸变的重要原因。考虑水声环境特点, 仿真实验采用典型的 3 声线多径传输信道模型, 由直达声、一次海面反射、一次海底反射组成。仿真信道为频率选择性衰落信道, 多径能量服从负指数分布, 多径时延服从均匀分布, 多径信道的传输函数如下

$$r(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \sqrt{P_l} \delta(t - \tau_l) \quad (7)$$

其中: L 为多径的总径数; P_l 为第 l 径信号的幅度; τ_l 为第 l 径信号的时延。则有

$$P_l = \exp(-\tau_l / \tau_{\text{mean}}) \quad (8)$$

其中: τ_{mean} 为多径时延的均值。

假设各径延时分别为 0、2、4 ms, 由式 (7) 可以计算出各径的衰减系数分别为 1、0.37、0.135。信号经过该多径信道前后的频谱如图 5 所示, 可知由于多径效应的存在, 信号经过仿真信道后, 波形发生抖动, 频域发生频率选择性衰落。

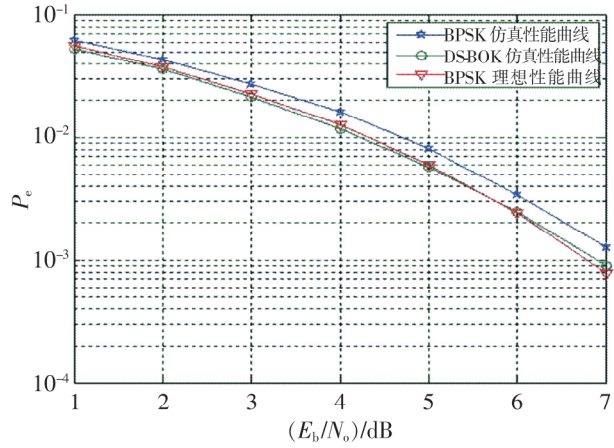
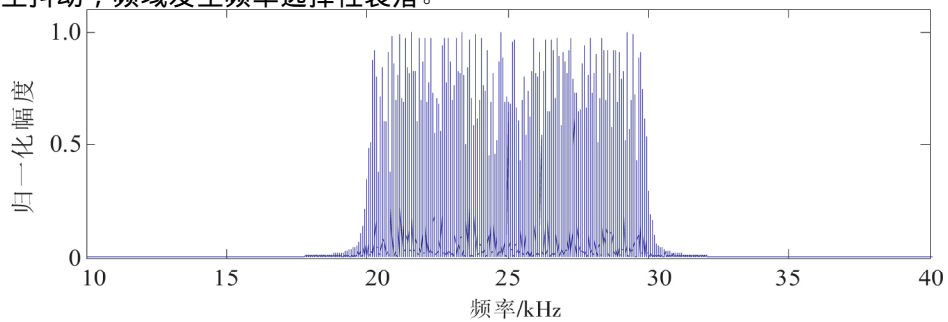
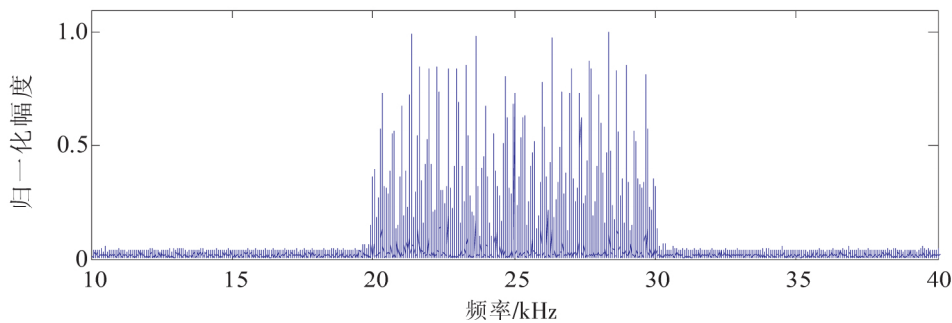


图 4 AWGN 信道采用 BPSK 调制的直扩系统性能分析
Fig. 4 Performance of BPSK spread spectrum system in AWGN channel



(a) 经过多径信道之前的信号频谱



(b) 经过多径信道之后的信号频谱

图 5 经过多径信道前后的信号频谱

Fig. 5 Signal spectrum before and after multipath fading

保持 BPSK 和 Chirp-BOK 两种调制方式的码元时间长度相同，即信息码率相同，仿真得到两者在上述多径 (multipath) 衰落信道下的误比特率曲线分别为 BPSK-Multipath、Chirp-Multipath，并添加 Chirp-BOK 在 AWGN 信道的性能曲线 (Chirp-AWGN) 作为性能参照，如图 6 所示。

从仿真结果可知，多径信道中 BPSK 调制出现严重误码平台，并不适用多径环境下的水声通信。而 Chirp-BOK 调制方式在多径衰落下具有较好的误码性能。在信息码率相同的条件下，这是因为 Chirp 扩频系统送入信道的发送信号具有很宽的频谱，具有一定的抗频率选择性衰落的特性，从而能够保证多径环境下的有效通信，即相对于 BPSK 调制，Chirp-BOK 调制通过扩频方式利用较大的带宽换取多径信道中的性能提高。此外，当信噪比提高时，Chirp-AWGN 和 Chirp-Multipath 两者之间的性能差异减小，这是因为接收机采用匹配滤波器，而 Chirp 信号在 Gaussian 白噪声信道下能获得比多径信道下更好的匹配特性，从而使得 Gaussian 白噪声信道下接收信号的检测性能提高。

为进一步分析 Chirp-BOK 系统的性能，在 3 组不同时延参数信道中仿真系统的抗多径性能。信道如前所述，采用 3 径衰落信道，具体参数如表 1 所示。

表 1 3 种不同时延参数信道的设置

Table 1 Parameter configuration for different multipath channels

路径数目	信道 1			信道 2			信道 3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
归一化时延/ms	0	1	2	0	3	6	0	5	10

3 组不同信道下 Chirp-BOK 系统误码性能的仿真结果如图 7 所示。由图 7 可见，随着信噪比增加，系统的误码率降低，符合理论分析结果。3 种不同的多径信道在低信噪比时对应的 3 条误码曲线性能相近，因为此时通信系统的性能主要取决于信噪比而非多径参数。而对于相同的信噪比，当多径信道时延降低时，误码性能显著提高。综上所述，Chirp-BOK 系统在多径信道中具有良好的误码性能。

3 结语

利用 Chirp 信号在水下通信中良好的抗噪声、抗多径等特性，针对水声环境提出基于 Chirp-BOK 调制的水声扩频通信系统，系统采用二进制正交键控调制，接收机采用匹配滤波器检测接收信号，并构建系统仿真模型。理论分析和 AWGN 信道以及多径信道的仿真结果说明，Chirp-BOK 系统具有良好的抗噪声和抗多径性能，适用于

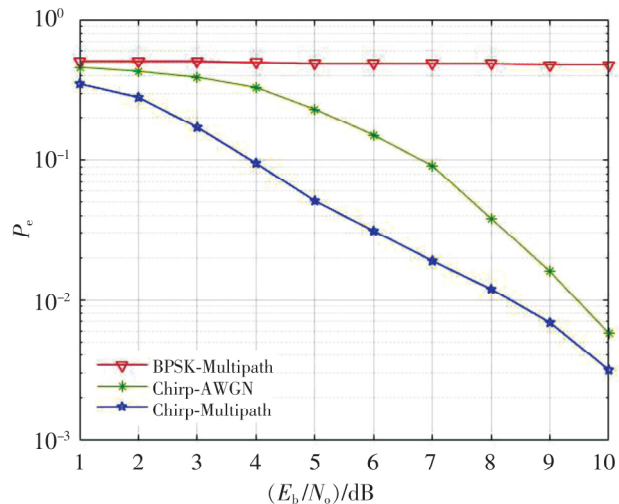


图 6 Chirp-BOK 调制和 BPSK 调制的抗多径性能比较

Fig. 6 Performance of Chirp-BOK and BPSK in multipath channels

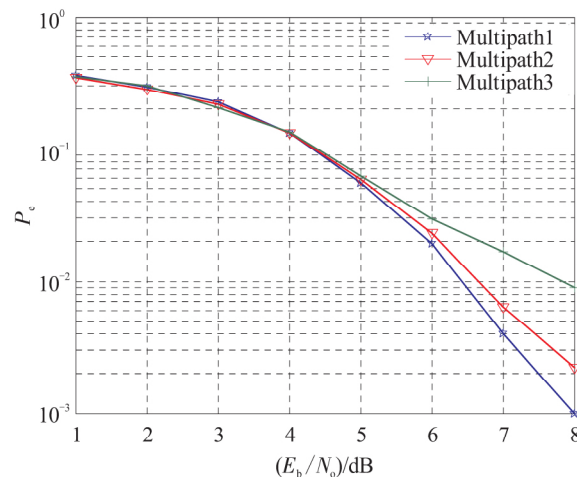


图 7 3 种多径信道下的 Chirp-BOK 系统的性能

Fig. 7 Performance of Chirp-BOK in different multipath channels

水声系统的扩频通信。本工作对于 Chirp 扩频技术在水声通信领域的应用研究具有一定的参考价值, 但部分工作仍需完善, 例如将 Chirp 信号与传输速率更高的调制方式进行结合, 进一步提高系统的数据传输速率。

[参考文献]

- [1] COOK C. Radar signals: an introduction to theory and application [M]. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [2] WINKLEY M R. Chirp signals for communication [C] //IEEE WESCONN Conference, Piscataway: IEEE Press, 1962: 113-115.
- [3] DEMIRORS E, SKLIVANITIS G, SANTAGATI G E, et al. Design of a software-defined underwater acoustic modem with real-time physical layer adaptation capabilities [C] //International Conference on Underwater Networks & Systems. Rome: ACM Press, 2014: 25.
- [4] LEE H, KIM T H, CHOI J W, et al. Chirp signal-based aerial acoustic communication for smart devices [C] // Conference on Computer Communication. Atlan: IEEE Press, 2015: 2407-2415.
- [5] NEASHAM J A, GOODFELLOW G, SHARPHOUSE R. Development of the "Seatrac" miniature acoustic modem and USBL positioning units for subsea robotics and diver applications [M]. Oceans: IEEE Press, 2015: 1-8.
- [6] CHANDRA A, BOSE C. Series solutions for $\pi/4$ -DQPSK BER with MRC [J]. International Journal of Electronics, 2012, 99(3): 391-416.
- [7] 韩佳南. CSS-BOK 的匹配滤波接收研究 [J]. 通信技术, 2011, 44(4): 40-42.
- [8] PROAKIS J G, SALEHI M. Digital communications [M]. New York: McGraw Hill Education, 2007: 178-182.

Underwater Acoustic Communication System Based on Chirp-BOK Spread Spectrum

YI Jinwang¹, ZHU Yi², WANG Xianling¹, CHEN Xiangjie², ZHANG Jiamin¹

(1. School of Optoelectronic & Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. MOE Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and
Marine Information Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: An underwater acoustic communication system based on Chirp-BOK spread spectrum was proposed, using Chirp signal's excellent noise and multipath tolerant properties for underwater communication. The proposed system involved binary orthogonal keying and matching filter to implement reliable and efficient data transmission for underwater acoustic channel, while tolerating the disadvantages of low SNR and multipath fading environment. Simulation results for both AWGN channel and multipath channel have shown that the proposed scheme excels in the performance of anti-noise and anti-multipath.

Key words: underwater acoustic communication system; Chirp; binary orthogonal keying; spread spectrum communication; anti-noise; anti-multipath

(责任编辑 宋 静)