

[引用格式] 王小阳, 郑思远, 李斌, 等. 基于 AD 变采样抑制多普勒的移动水声通信系统[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(5): 465-469.

基于 AD 变采样抑制多普勒的移动水声通信系统

王小阳, 郑思远, 李斌, 童峰

(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: 针对自主式水下航行器(AUV)等水下移动平台移动水声通信中的多普勒问题, 考虑到传统的软件变采样多普勒校正方法需要先接受完整的一帧信号, 并在多普勒估计后对信号进行重采样, 运算复杂度较高, 硬件实现较难。文中提出了基于模数转换(AD)变采样抑制多普勒的 AUV 移动通信方案, 在信号的前段做多普勒估计, 而后通过微控制单元(MCU)调整 AD 采样率接收信号, 相当于直接对信号做多普勒补偿。根据该方案所设计的水声通信系统能够实时通信, 并且改善了通信质量; 同时采用直接扩展频谱技术和信道编码, 进一步提高了通信性能, 海试验证了该方法的有效性。

关键词: 自主式水下航行器(AUV); 移动水声通信; 多普勒补偿; AD 变采样

中图分类号: TJ630.34; TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2018)05-0465-05

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2018.05.014

Mobile Underwater Acoustic Communication System Based on AD Variable Sampling

WANG Xiao-yang, ZHENG Si-yuan, LI Bin, TONG Feng

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of the Ministry of Education, College of Ocean & Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: For the Doppler problem in mobile underwater acoustic communication of underwater mobile platforms such as autonomous undersea vehicle(AUV), the traditional software variable sampling Doppler correction method needs to accept one complete frame signal at first, and the signal is resampled after Doppler estimation, so it has high computational complexity and is difficult to implement in hardware. In this paper, an AUV mobile communication scheme based on analog-to-digital(AD) variable sampling suppression Doppler is proposed. The Doppler estimation is performed in the front part of the signal, then the AD sampling rate is adjusted by the microcontroller unit(MCU) to receive the signal, which is equivalent to Doppler compensation directly to the signal. The underwater acoustic communication system designed according to the scheme can communicate in real time and improve the communication quality. Simultaneously, adopting the direct spread spectrum technology and channel coding helps further improve communication performance of the system. Sea trial verifies the effectiveness of the proposed scheme.

Keywords: autonomous undersea vehicle(AUV); mobile underwater acoustic communication; Doppler compensation; AD variable sampling

0 引言

当前水声通信面临多径扩展、时变衰落、多

普勒时域和频域扩展等问题^[1]。随着海洋资源的深入开发, 各类水下自主移动平台(如 AUV、ROV 等)被应用于完成水下勘测、试验、航行等多种工

收稿日期: 2018-07-30; 修回日期: 2018-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(11574258).

作者简介: 王小阳(1993-), 男, 在读硕士, 主要研究方向为水声通信.



作。而基于移动平台的水声通信其最大难题就是如何克服由平台间相对运动引起的多普勒扩展,发射端调整发射信号帧格式、接收端进行多普勒估计等信号处理方式尤为关键^[2]。

国内外学者对于水声多普勒信号处理方式也在不断尝试中。Johnson 等^[3]提出一组相关器与接收信号求相关的方法,利用相关峰值最高的相关器计算多普勒因子。Sharif 等^[4]提出用线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号对多普勒进行估计,根据 2 个 LFM 相关峰值间隔做多普勒估计,该方法简单稳健,但估计精度依赖线性调频插入的间隔,若提高估计精度在一定程度上会影响通信效率。Tu 等^[5]针对不同传播路径中存在的不同多普勒因子,在接收端设计一种可匹配特定路径多普勒因子的重采样方案,但在浅海信道复杂多径下的多普勒需花费大量时间匹配多普勒因子。何成兵等^[6]提出一种可自动匹配水声多径信道的精确多普勒频移估计方法,该方案信道适应性强且估计精度高。岳玲等^[7]利用双曲调频的多普勒不变性,提出一种适用于低信噪比下收发双方高速移动的多普勒估计和补偿方法。崔健等^[8]提出用循环前缀,针对水声系统进行多普勒估计,该算法有较高的精度。

上述研究多集中于如何提高多普勒因子估计精度,而考虑到实际应用时通信效率的研究则比较少。常规多普勒信号处理方式需要在 1 帧信号接收完成后得到多普勒估计值,再对整帧信号进行重采样或线性差值计算,软件重采样需要先将信号重构,再进行二次采样,运算复杂度较高。

文中针对移动平台的水声通信问题,采用扩频调制体制保证通信的可靠性,将信号帧中的同步信号同时作为多普勒估计信号,当通信过程中信号同步完成时,多普勒估计结果也会相应计算出来。此时,利用估计结果在解调前变换信号采样率,能够大大提升系统在移动平台工作时的通信性能。利用该方案设计出的系统具有算法复杂度低,能够快速、实时解调且误码率低等优点,最终通过海试试验验证了其可行性。

1 算法介绍

1.1 DS-DBPSK 调制

扩展频谱技术是将要发送的信息通过伪随机

序列调制到很宽的频带上去,再在接收端通过解调和扩过程恢复出发送的信息序列。扩频技术主要包括直接序列扩频(direct sequence spread spectrum, DSSS, 简称 DS)、跳频、线性调频和一些混合扩频等,其中,DS 系统具有较强的抗干扰能力、抗多径能力且能够在较低的信噪比条件下工作^[9],因此文中采用 DS 方式。差分相干解调是将接收到的信号延迟 1 个码元间隔 T_b 后再与原信号相乘,在完成解调的同时也完成了解差分,经过低通滤波后进行抽样判决。它的优点是不需要产生本地相干载波,而在水声信道中对载波的估计和跟踪是比较困难的。文中采用的是直接序列扩频-差分二相相移键控(DS-differential binary phase shift keying, DS-DBPSK)调制方式,具体实现框图如图 1 所示。

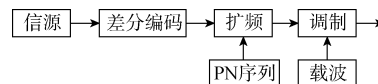


图 1 DS-DBPSK 系统实现框图
Fig. 1 Block diagram of DS-DBPSK system implementation

1.2 多普勒时域估计

传统时域估计是在信号帧的最前和最末端利用线性调频信号进行多普勒估计,首先接收完整的 1 帧信号后计算多普勒偏移,其次根据估计结果再对数据段做线性插值或重采样。多普勒时域扩展相当于信号收缩或扩展的程度^[10],可以取信号中两侧 LFM 的相关峰值得到信号时域长度,并根据式(1)计算出多普勒因子。

$$\Delta \approx T_p / T_p - 1 \tag{1}$$

式中: T_p 为接收到的信号时域长度; T_p 为原始信号时域长度。

为了减少多普勒估计和补偿时间,所设计信号帧格式如图 2 所示。通常利用传统时域多普勒估计,LFM 信号应在数据帧的两端,这样可以保证所估计的多普勒偏移量是考虑整帧信号得到的结果,但是需要牺牲信号处理时间。文中将 LFM 信号放在信号数据段之前,多普勒处理可以在 1 个信号帧长度内完成。

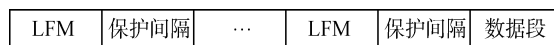


图 2 信号帧格式图
Fig. 2 Format diagram of signal frame

当多普勒偏移在短时间内(即1帧信号长度)没有大幅度变化的情况下,该方法解调性能等同于时域估计法。文中将系统搭载在移动平台上主要考虑平台移动带来的多普勒偏移,在海况平稳的情况下可忽略水流的影响。在1帧信号内移动平台可视为匀速航行,因此采用这样的方式不仅可以提高系统通信效率,同时也可保证通信性能。

1.3 基于 AD 变采样的多普勒补偿

在通信过程中,接收端完成信号同步后,多普勒偏移估计也同时完成。此时根据估计结果可直接调整系统的 AD 采样率,相当于对数据段信号做了一次多普勒补偿。利用 AD 变采样率的方法比较灵活方便,即便对于小尺度的偏移量,只要计算出对应的重采样率就可以对信号进行处理,进一步提升了系统的实时性能,便于硬件实现。

1.4 接收机硬件实现

文中方案设计的接收机基于 Coetex-M4 内核的 STM32F4 系列处理器实现。该处理器主频最高可达 168 MHz,具有运算周期短和功耗低的优点。

接收机采用硬件变采样的方法,首先利用接收信号帧中的 LFM 信号进行多普勒估计,接着调整硬件采样率,及时对数据段做多普勒补偿。补偿后的信号数据段送入接收机,其解调流程同经典差分解调 DS 接收机,总体结构框图如图 3 所示。利用数据前段做多普勒估计的方法可以及时调整硬件采样率,大大降低单片机内算法的复杂度,保证通信时效,便于在 AUV 等小尺寸平台进行硬件实现。

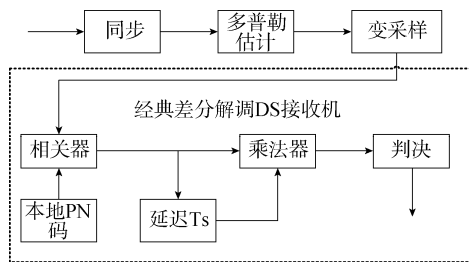


图3 基于 AD 变采样的扩频通信系统接收机

Fig. 3 Receiver of spread spectrum communication system based on AD variable sampling

2 理论分析

2.1 复杂度分析

文中1帧发射信号时长为6.8 s,信号采样率

为75 000 Hz,数据量为510 000点。传统多普勒补偿即在多普勒估计后对接收到的数据进行重采样,具体是:原信号序列先进行整数因子 I 倍的升采样,然后根据式(2)用线性插值算法求出输出序列。

$$y(m+1) = (1 - I t_{m+1}) y_1(m+1) + I t_{m+1} y_2(m+1) \quad (2)$$

式中: $y(m+1)$ 为重采样后的输出点; y_1 和 y_2 为升采样后的相邻点。

由算法公式可知,重采样过程算法时间复杂度为 $O(m^2)$,这是采样传统补偿算法需要额外承担的计算。文中 $m = I \times 510\,000$; 除此之外,升采样的过程增加数据量,其额外占用单片机内存的空间复杂度为 $O(m-m/I)$ 。

2.2 仿真分析

为了验证文中多普勒补偿方法的有效性,取中心频率 15.5 kHz 的原始信号经多普勒信道(为验证效果设置仿真频偏较大,实际行船或移动平台造成的频偏较小,范围在几十赫兹内);另外将多普勒信号经由文中补偿方案处理,3组信号频谱图如图4所示。可以看出,基于AD变采样的多普勒补偿方案可以有效改善多普勒频率偏移。

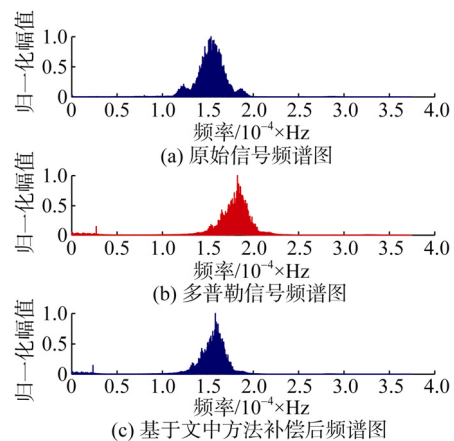


图4 信号频谱图

Fig. 4 Signal spectrum

3 海试试验验证

3.1 试验设置

试验海域为厦门港海域,行船示意图见图5。船A抛锚定点,航行器B以3 kn的速度靠近船A,随着两船靠近速度逐渐变慢。收发换能器相距1.2 km,入水深度为3 m。声速梯度见图6。

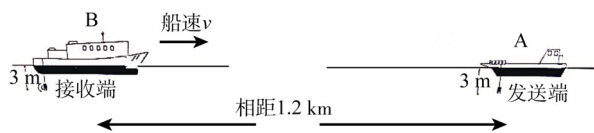


图 5 行船示意图
Fig. 5 Sail schematic

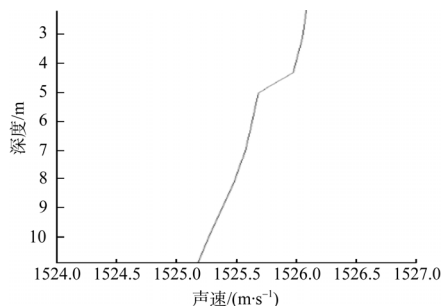


图 6 声速梯度图
Fig. 6 Gradient map of sound velocity

为了进行文中方法的性能评估，试验时发射信号格式如图 7 所示，前段为多普勒估计段，包含 2 个长度为 22.6 ms 的 LFM 信号，作为多普勒测量信号。后段为数据段，调制采用的载波频率为 15.5 kHz。发射端将长度为 48 的字符串经过数据类型转换、卷积编码、差分编码等操作转为二进制类型的数据，共 780 bit；接着借助 PN 码进行直接序列扩频完成信号调制。研究所设计的试验系统采用先差分编码再扩频的方法，具有更良好的抗噪性能^[11]。

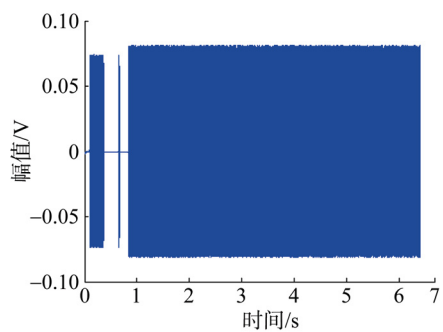


图 7 发射信号格式图
Fig. 7 Format map of transmitting signal

3.2 结果分析

海试信道冲激响应见图 8，可以看出信道存在明显的多径。海试信道时变响应见图 9^[12]，可以看到，由于收发平台相对运动造成的明显多普勒偏移，在短时间内多普勒偏移量较小，符合大多数移动平台下的通信情况。此时，采用文中提

出的基于 AD 变采样的多普勒补偿方法可以实时处理多普勒信号，能够很好地改善通信质量。

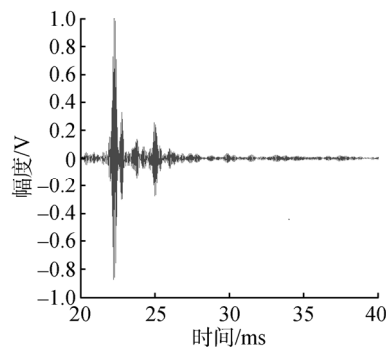


图 8 信道冲激响应
Fig. 8 Impulse response of channel

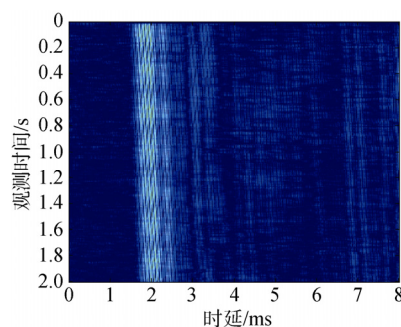


图 9 信道时变响应
Fig. 9 Time-varying response of channel

为了评估文中研究设计的系统性能，从结果中选择 10 帧信号，分别利用软件、硬件进行估计和解调，其中软件利用 matlab 估计，硬件通过 STM32 单片机估计，它们对应的频偏值如图 10 所示，可以看出，信号频偏在 5~20 Hz 之间不等。图 11 是这些信号所对应的误码率曲线，其中实线部分为硬件解调误码率曲线，虚线为软件解调误码率曲线。分别比较了多普勒补偿前、补偿后和经过信道编码的误码率结果，可以看出，信号解调误码率和对应的多普勒频偏呈正相关。从整体结果看，软件解调性能稍优于硬件解调，但相差不多，分析原因可能是硬件的采样芯片、系统时钟等的精度不如软件。另外，经过多普勒补偿后的误码率低于 0.06，通信性能明显优于信号补偿前的情况，结合文中采用的差分编码能进一步提升水下通信质量，通信误码率达到 0.01 以下。总体看来，基于 AD 变采样的多普勒补偿方式能起到很好的补偿效果，并且在多普勒偏移量较小时(频偏量 6 Hz 左右)，无需采用线性插值对信号重

新处理,利用AD采样的灵活性可以任意修改采样率以满足大多数条件下的多普勒补偿。

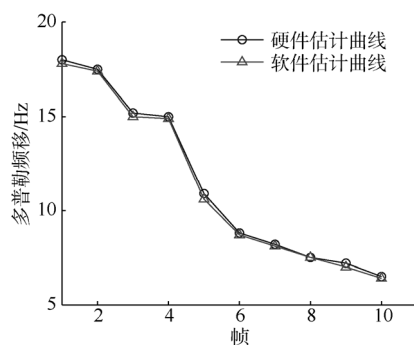


图10 多普勒估计曲线

Fig. 10 Doppler estimation curves

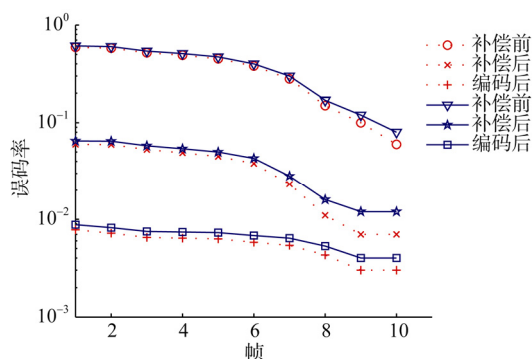


图11 信号解调误码率曲线

Fig. 11 Bit error rate curves of signal demodulation

4 结束语

针对移动平台上的水声通信系统,提出一种基于AD变采样的多普勒补偿方法,该方案可大大减少系统内算法处理时间,使系统能在平台航行时进行实时水声通信。海试试验结果表明,文中设计的系统可以实时处理水声信道中的多普勒效应,能够提高系统性能,降低实现复杂度,且通信效果良好。

参考文献:

- [1] 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): 811-816.
Xu Xiao-mei. Development and Applications of Underwater Acoustic Communication and Networks[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(6): 811-816.
- [2] 贾宁, 黄建纯. 水声通信技术综述[J]. 物理, 2014, 43(10): 650-657.
Jia Ning, Huang Jian-chun. An Overview of Underwater Ac-

oustic Communications[J]. Physics, 2014, 43(10): 650-657.

- [3] Johnson M, Freitag L, Stojanovic M. Improved Doppler Tracking and Correction for Underwater Acoustic Communications[C]//Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1997. ICASSP-97., Munich: 1997 IEEE International Conference, 1997, 1: 575-578.
- [4] Sharif B S, Neasham J, Hinton O R, et al. A Computationally Efficient Doppler Compensation System for Underwater Acoustic Communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 52-61.
- [5] Tu K, Duman T M, Stojanovic M, et al. Multiple-resampling Receiver Design for OFDM over Doppler-Distorted Underwater Acoustic Channels[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(2): 333-346.
- [6] 何成兵, 黄建国, 孟庆微, 等. 水声多径信道多普勒因子精确估计方法[J]. 电声技术, 2010, 34(12): 57-59.
He Cheng-bing, Huang Jian-guo, Meng Qing-wei, et al. Accurate Doppler Factor Estimation for Multipath Underwater Acoustic Channels[J]. Audio Engineering, 2010, 34(12): 57-59.
- [7] 岳玲, 樊书宏, 王明洲, 等. 高速移动水声通信中的多普勒频移估计方法研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(11): 2366-2370.
Yue Ling, Fan Shu-hong, Wang Ming-zhou, et al. Study on Doppler-shift Estimation for Underwater High-range-rate Acoustic Mobile Communications[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(11): 2366-2370.
- [8] 崔健, 黄建国. OFDM水声通信中的综合多普勒补偿方法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(1): 129-131.
Cui Jian, Huang Jian-guo. Combined Doppler Estimation and Compensation of OFDM in Underwater Communication[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(1): 129-131.
- [9] 孙立强. 时反镜扩频水声通信技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [10] Li B, Zhou S, Stojanovic M, et al. Pilot-tone Based ZP-OFDM Demodulation for an Underwater Acoustic Channel[C]//Oceans 2006. MA: IEEE, 2006: 1-5.
- [11] 周跃海, 曹秀岭, 吴燕艺, 等. 时变信道下的被动时间反转扩频水声通信[J]. 应用声学, 2015, 34(6): 509-515.
Zhou Yue-hai, Cao Xiu-ling, Wu Yan-yi, et al. Spread Spectrum Underwater Acoustic Communication Based on Passive Time Reversal in Time Varying Channels[J]. Applied Acoustics, 2015, 34(6): 509-515.
- [12] Zhou Y H, Tong F, Zhang G Q. Distributed Compressed Sending Estimation of Underwater Acoustic OFDM Channel[J]. Applied Acoustics, 2016, 117: 160-166.

(责任编辑: 陈 曦)