

一种有效的水声通信多普勒处理方法

林 伟¹, 陈 强², 汪 玉²

(1.西北工业大学航海学院, 西安 710072; 2.海军装备研究院舰船所, 北京 100073)

摘要: 在水声通信中, 由于发射和接收平台之间的相对运动, 多普勒频移是无法避免的。多普勒频移使信号频率和相位发生变化, 降低载波估计的精度, 造成自适应均衡器的发散, 使整个系统的性能下降。文中设计了一种应用于水声多载波相干调制系统的多普勒处理方法, 采用块估计和线性插值以抵消多普勒频移的影响。仿真结果表明, 该方法能有效地抵消多普勒频移对多载波相干调制系统的影响。在信噪比为 -10dB、数据率为 100bit/s 的条件下, 系统允许相对运动速度可达到 $\pm 10\text{m/s}$ 。

关键词: 多载波相干调制; 多普勒估计与补偿; 水声通信

中图分类号: TN 911.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2005)-04-0206-04

An efficient Doppler processor for underwater acoustic communications

LIN Wei¹, CHEN Qiang², WANG Yu²

(1. College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2. Institute of Naval Vessels, Navy Academy of Armament, Beijing 100073, China)

Abstract: Doppler shift is unavoidable in underwater acoustic communications because of relative moving between the transmitter and the receiver. Doppler shifts change received signal frequencies and phases, decrease accuracy of carrier frequencies estimation and result in divergence, presenting serious effect on system performance. An efficient Doppler processor applied to an acoustic multicarrier coherent modulation system has been designed. A block Doppler estimation technique and interpolation are used to remove Doppler shift. Simulation results show that the method can efficiently compensate for the Doppler effects on multicarrier coherent modulation systems. Relative velocities up to $\pm 10\text{m/s}$ can be tolerated at 100bit/s and signal-to-noise ratio of -10dB.

Key words: multicarrier coherent modulation; Doppler estimation; Doppler compensation; underwater acoustic communication

1 引 言

在水声通信中, 特别是在与水下航行器的通信中, 由于发射和接收平台之间的相对运动, 多普勒频移是无法避免的。多普勒频移使信号频率和相位产生偏差, 使整个通信系统的性能下降。多普勒频移

对多载波调制系统的影响尤为严重。

多载波调制^[1,2]是目前水声通信中正在探索的技术之一, 它将所发射带宽划分成一系列子带宽, 每一子带内的信号可以采用任一种调制方式。多载波相干调制(MCCM)是在子带内采用相干调制的方式。MCCM 适合应用于信噪比差、多径干扰强的远程浅海信道的水声通信系统中, 特别是与水下航行器的通信中。而多普勒频移不仅会降低相干检测时码元同步的精度, 造成自适应均衡器的发散, 而且会影响载波估计的精度, 使自适应均衡器与锁相环相结合

收稿日期: 2004-10-20; 修回日期: 2005-01-21

作者简介: 林伟(1979-), 女, 浙江温州人, 研究生, 研究方向: 水下通

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的结构难以补偿多普勒频移的影响, 从而给整个系统性能带来比单载波系统更为严重的下降, 因此必须考虑应用多普勒频移估计和补偿技术, 对多普勒频移进行补偿。

目前, 在水声通信领域中, 有两种常用方法用于多普勒补偿: 一种是采用 DFE 加二阶数字锁相环 (DPLL) 的结构, 并对均衡系数和相移进行联合最佳估计。这种方法适合于小的多普勒频移; 另一种方法是在均衡前加多普勒处理结构, 估计出多普勒频移, 再对其进行补偿。这种方法适合于大的多普勒频移的场合。

本文采用了一种针对 MCCM 系统有效的多普勒频移估计和补偿方法, 它是利用块估计进行多普勒频移估计, 采用线性插值进行多普勒频移的补偿, 其估计精度高, 补偿方法简单, 特别适合 MCCM 系统。

2 多普勒频移估计与补偿的原理

2.1 相对多普勒频移的估计

在宽带信号中, 每个不同的频率都有各自不同的多普勒频移, 但是它们相对多普勒频移都一样, 即它们具有相同的多普勒频移因子, 为相对运动速度 v 与声波在水中的传播速度 c 的比值。如果相对多普勒频移已知, 则可以通过对接收信号进行反方向的时间压缩或伸展来补偿多普勒频移, 由此可见, 对接收信号的多普勒补偿等效于对信号的重采样。这意味着对多普勒频移的补偿分为两步^[3]: 首先通过接收信号估计出多普勒频移因子, 然后对接收信号进行重采样, 消去多普勒频移。其原理图如图 1 所示^[3]。

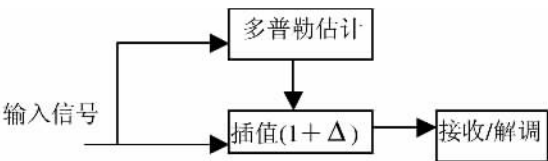


图 1 多普勒估计与补偿结构
Fig.1 Doppler estimation/compensation structure

多普勒频移因子的估计通常是用已知发射序列与其接收序列的相关来实现的^[3-5]。设发射信号的相关峰的位置 (即数据帧长) 为 T_{tp} , 经多普勒频移后, (接收信号产生时间压缩或扩展, 相关峰的位置 (数据

帧长) 变为 T_{rp} , 则多普勒频移因子 可由下式求出:
$$=T_{rp} / T_{tp}-1 \tag{1}$$

若数据帧长较大, 则利用式 (1) 可以得到非常精确的多普勒估计。考虑到在系统实现时, 若采用整个接收序列进行自相关, 需要较大的计算量和存储空间, 本文采用改进方法, 在数据帧的前后加线性调频 (LFM) 信号, 利用 LFM 的相关峰计算数据帧长的变化, 从而减少计算量, 其示意图如图 2 所示。

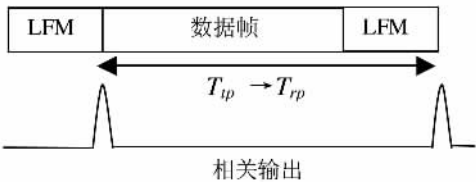


图 2 帧长测量的示意图
Fig.2 Packet length measurement

2.2 多普勒频移的补偿方法

对接收信号进行多普勒补偿等效于对接收信号的重采样, 但在多普勒频移较小, 精度要求很高的情况下, 改变采样率比较困难。文中采用线性插值法来实现多普勒补偿。实际上, 采样频率的增大或减小也等效于固定时间内采样点的增多或减少, 采用插值法进行多普勒补偿有两个参数要确定: 新的采样点的位置及其采样值。插值法是用估计的相对多普勒频移 确定出新的采样点的位置, 然后用其相邻的两个已知采样样本进行线性插值计算出新的采样值。所得的新样本组成的信号就是消除频移后的信号。

3 多普勒补偿的性能分析

我们结合整个多载波相干调制通信系统的性能仿真来分析多普勒处理方法的性能, 通过比较有无多普勒补偿时系统的误码率曲线, 来说明补偿方法的有效性。

在采用多载波相移键控 (MC-PSK) 调制的 MCCM 系统的接收机中, 信号经时间同步、多普勒处理后, 对每个码元内的载波频率进行估计, 经反映射, 恢复携带在频率上的信息。同时用估计出的载波对本码元的 PSK 信号进行解调, 再经 DFE 抵消码间干扰, 经反映射后与频率反映射的输出进行并/串转换, 恢复二进制信息。接收系统的框图如图 3 所示。

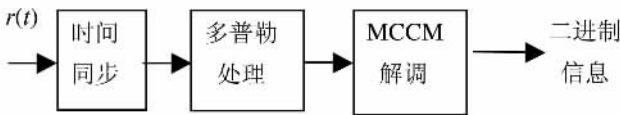


图3 采用 MC-PSK 调制的接收系统框图
Fig3 Receiver structure using MC-PSK modulate

3.1 仿真描述

发射序列为独立同分布的二进制序列,数据采用分帧发送,在每帧的起始加训练序列,其长度为100;LFM 信号的带宽取为 400Hz,持续时间 T 为

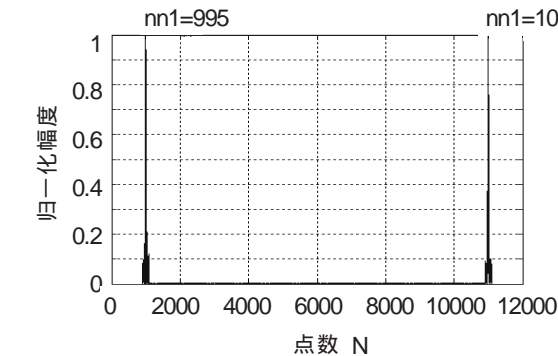


图4 信号相关图
Fig.4 Signal correlator output

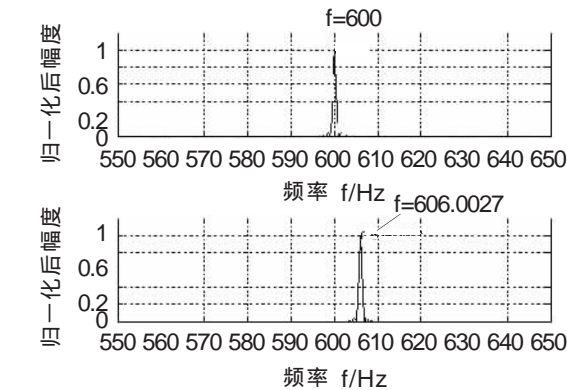


图5 补偿前后信号频谱图
Fig.5 Frequency of compensation and received signals

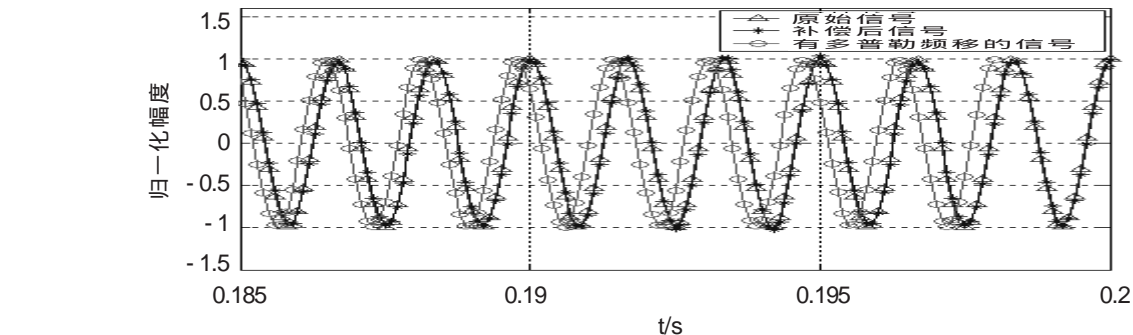


图6 原始信号、频移后信号与补偿后信号时域波形

0.3s; 每帧长度约为 2000 个数据点,数据率 20bit/s~100bit/s, 采样频率 f_s 为 10kHz。

载波选取时,在 400Hz 的系统带宽内均匀选取 16 个频率,并将 16 个频率分成两组,相邻码元采用不同组内的频率以抗 ISI。相位调制可以采用 BPSK 调制、QPSK 调制及 DPSK 调制等,仿真时采用 QPSK 调制。自适应均衡算法采用递推最小二乘 (RLS) 算法。

信道由声场模型产生,声速数据采用南海试验的测量数据。仿真信道水深 200m,传播距离为 100km。用射线模型仿真给出四条传播路径,各路径的传播损失分别为: 134.8dB、134.3dB、142.3dB、137.5dB,相对时延分别为: 727ms、615ms、264ms、0ms。

3.2 多普勒频移估计与补偿的仿真

我们首先对多普勒频移估计和补偿方法的性能进行仿真分析。仿真时取一频率为 600Hz 信号。相对多普勒频移 为 0.01 时信号频率变化为 606Hz。

对含有多普勒频移的接收信号进行多普勒补偿,首先要做的就是利用接收信号中的前缀信号和已知的前缀信号的相关性来求出接收信号的 T_{rp} ,信号相关图如图 4 所示。由式(1)可得到多普勒频移因子的估计值,所得的估计值 为 0.01,与实际值相符。根据估计出的多普勒频移因子,采用上述方法补偿多普勒频移得到我们所需要的信号。补偿前后频域波形的对比如图 5 所示,上面的频谱图是补偿后信号的频谱图,下图为多普勒频移后信号频谱图。由图中我们可以看出,经过多普勒补偿后信号频率可恢复为原始的 600Hz。图 6 所示的是原始信号与有多普勒频移影响的信号及补偿后信号的时域局部波形的对比图,由图中我们可以看出补偿后信号与原始信号波形相符。

3.3 多普勒频移对系统性能影响的仿真

我们按照图 3 对包括多普勒处理在内的整个 MCCM 系统的性能进行了仿真。

图 7 为采用 4 条路径信道的参数, 等效数据率为 100bit/s, 相对运动速度为 10m/s 时系统的误码率曲线。图中还给出了没有多普勒频移时系统的性能曲线。

由图可见, 无多普勒补偿的误码率曲线不随信噪比的增大而下降, 这说明由于多普勒频移的影响, 系统无法正常工作; 经多普勒补偿后的误码率曲线与没有多普勒影响的误码率曲线非常接近。若系统相干检测的输出误码率在 10^{-2} 以下时, 可以通过纠错编码达到无误输出, 由图 7 可见, 当误码率为 10^{-2} 时, 与没有多普勒的系统相比, 经多普勒补偿的系统所需增加的信噪比不到 1dB, 所采用的多普勒补偿方法较好地抵消了多普勒的影响。

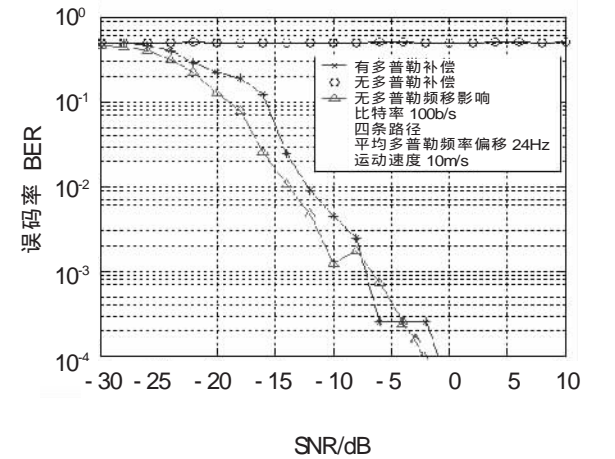


图 7 4 条路径时的系统性能曲线
Fig.7 System performance of 4 paths

4 总 结

多普勒处理环节是 MCCM 系统的重要部分, 该环节正常工作与否关系到整个系统能否正常工作。仿真结果表明, 上述针对 MCCM 系统中多普勒处理方法在信噪比为 -10dB、数据率为 100bit/s, 系统相对运动速度在 $\pm 10\text{m/s}$ 以内的条件下, 系统可以正确接收。因此该方法能有效地抵消多普勒频移对 MCCM 系统性能的影响。

参 考 文 献

[1] Kilfoyle D B, Baggeroer A. The state of the art in the underwater acoustic telemetry[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 4-27.

[2] Bejjani E, Belfiore J C. Multicarrier coherent communication for the underwater acoustic channel[A]. OCEANS'96, MTS/IEEE, Prospects for the 21st Century[C]. 1996, 3: 1125-1130.

[3] Sharif B, Neasham J, Hinton O R, Adams A E. A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communications[J], IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 52-60.

[4] Sharif B, Neasham J, Hinton O R, Adams A E. Adaptive Doppler compensation for coherent acoustic communication[J]. IEEE Proc-Radar, Sonar Navig, 2000, 147 (5): 239-246.

[5] Johnson M, Freitag L, Stojanovic M. Improved Doppler tracking and correction for underwater acoustic communications[A]. in proc ICASSP 97[C]. Munich, Germany, 1997. 575-578.



上海市声学学会召开第六次会员代表大会

上海市声学学会于 2005 年 9 月 9 日在科学会堂召开第六次会员代表大会, 到会 125 人(包括委托代缴费 25 人)。会议听取学会理事会工作报告、修改章程报告、财务报告及学术报告等, 并进行新理事会换届选举, 组成学会第七届理事会。

上海市声学学会第七届理事会理事 20 名:
钱梦麟 胡文祥 王锦柏 寿文德 周红生 顾亚平
杜选民 孟昭文 汪鸿振 胡长青 杨志刚 毛东兴
龚农斌 曹 萍 张明发 魏化军 王文平 汪源源

梁 华 杨瑞文 范静平 殷善开
当日下午, 在科学会堂召开第七届理事会第一次会议, 到会理事 25 名(事假 3 名), 选举结果如下:
理事长: 钱梦麟
副理事长: 顾亚平 胡兵 孟昭文
秘书长: 龚农斌
理事会还决定聘请朱家安、周八妹、杨志刚, 张俊等四人
为学会副秘书长。