

水声通信 Doppler 扩展估计的实验研究

张国松, 刘海燕, 周士弘

(杭州应用声学研究所声纳技术国防科技重点实验室, 杭州 310012)

摘要: 发射机和接收机之间的相对运动引起 Doppler 扩展, 即时间选择性衰落, 它导致发射信号频率扩展。Doppler 扩展是动态通信时导致误码率上升的主要原因之一, 所以通信接收机首先需要估计 Doppler 扩展, 然后才能补偿 Doppler 扩展, 从而降低动态情况下的误码率。单频信号是频率敏感信号, 根据相对发射机的频率偏移量可以估计 Doppler 扩展。由于声传播速率相对较低, Doppler 扩展导致接收信号相对发射信号产生时间上的伸缩变化, 这样也可以采用测量伸缩量的办法估计 Doppler 扩展。通过水声通信湖上试验, 验证了这两种方法的可行性, 为未来的水声通信研究提供借鉴和参考。

关键词: Doppler 扩展; 时间伸缩变化; 频率偏移; 水声通信

中图分类号: TN913.45

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-06-0896-04

Experimental study of Doppler spreading estimation in underwater acoustic communication

ZHANG Guo-song, LIU Hai-yan, ZHOU Shi-hong

(Hangzhou Applied Acoustics Institute, National Defense State Key Laboratory of Sonar Technology, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Relative motion between the transmitter and the receiver results in Doppler spreading, time selective dispersion, which results in transmitted signal frequency spread. In moving communication, Doppler spreading is one of main causes to deteriorate communication performances, the receiver needs to estimate it firstly and then compensate it, so that the receiver is able to reduce bit error rate further. Tone signal is frequency sensitive signal, and Doppler estimation is done by frequency offset from the transmitted signal to receiver. Due to relative low speed of acoustic transmission in water, Doppler spreading results in time extension and compression of receiving signal relative to transmitted signal, so it can be estimated by measuring time extension and compression. By analyzing the lake trial data, two methods are tested, and a reference for underwater communication research in the future is provided.

Key words: Doppler spreading; time extension and compression; frequency offset; underwater communication

1 引言

发射机和接收机之间的相对运动引起 Doppler 扩展, 即时间选择性衰落, 导致发射信号频率扩展^[1]。Doppler 扩展引起接收机不能实现频率同步, 产生频率偏移, 从而引起误码率的提高。水声传播速率

相对较低, 收发机之间的相对运动、水介质的不均匀性和水中暗流等均会引起 Doppler 扩展^[2]。接收机需要正确估计出 Doppler 扩展, 然后补偿信道的时间选择性衰落, 进而降低比特误码率。本文通过试验的办法研究和分析 Doppler 的估计方法和它们的应用环境, 为未来的水声通信提供借鉴和参考。

2 接收信号 Doppler 扩展分析

Doppler 效应源自于收发双方的相对运动, 在水声信道中的暗流、波浪等原因也会导致 Doppler 扩展。在多径信道中, 接收信号可以表示为:

收稿日期: 2008-01-26; 修回日期: 2008-04-01

基金项目: 声纳技术国防科技重点实验室基金项目(9140C24030207-ZS24)

作者简介: 张国松(1981-), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为近距高速水声通信技术。

通讯作者: 张国松, E-mail: fit8alone@126.com

$$r(t) = \sum_{i=1}^M A_i \cos \phi_i s((1 + \Delta_i)t_i - \tau_i) + w(t) \quad (1)$$

$$0 \leq t_i \leq T/(1 + \Delta_i)$$

$A_i, \phi_i, \Delta_i, t_i, \tau_i$ 是第 i 条路径的幅值、初相、Doppler 扩展因子、时间延迟和传输时间, T 是发射信号的时间长度, M 是多径的数量, $s(t)$ 是发射信号, $w(t)$ 是高斯白噪声。

$$\Delta_i = v \cos \theta_i / c \quad (2)$$

v 是相对运动速度, θ_i 是第 i 条路径的略射角, c 是声传播速率。从式(1)中可以看出, 每条路径的信号到达接收机的初相角和略射角都不同, 但是初相并不影响最终的 Doppler 扩展因子。接收信号发生的 Doppler 扩展是多条路径 Doppler 扩展的叠加, 所以最终的 Doppler 扩展因子的估计值 $\hat{\Delta}$ 是多径信号叠加后信号的 Doppler 扩展因子。

3 单频信号估计 Doppler 扩展分析

单频信号(Continuous Wave, CW)是主动声纳中的常用信号, 属于频率敏感信号, 用于测量目标的相对运动速率。在水声通信中, 可以利用 CW 信号的频率特性, 估计信道的 Doppler 扩展。一个频率 f_c 的 CW 信号可表示为:

$$s_{cw}(t) = \cos(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (3)$$

代入式(1)得,

$$r_{cw}(t) = \sum_{i=1}^M A_i \cos \phi_i \cos(2\pi f_c (1 + \Delta_i)t_i - \tau_i) + w(t) \quad (4)$$

$$0 \leq t_i \leq T/(1 + \Delta_i)$$

观察式(4), Doppler 扩展因子的引入导致 CW 信号产生了频偏。用接收机测量 CW 信号的频率 f_r 估计 Doppler 扩展 $\hat{\Delta}$ 为:

$$\hat{\Delta} = \frac{f_r - f_c}{f_c} \quad (5)$$

这种估计方法需要增加频率分辨率来提高 Doppler 扩展因子的估计精度^[3], 持续时间 T 限制估计精度。

4 宽带信号估计 Doppler 扩展分析

通信信号通常是宽带信号, 每个频率成分产生不同的频率偏移量, 因此无法利用频率偏移量估计 Doppler 扩展。式(1)说明 Doppler 扩展引起发射信号产生时间上的伸缩变化, 因此通过测量伸缩量的办法可以估计 Doppler 扩展因子。

线性调频 (Linear Frequency Modulation, LFM)信号是也是主动声纳中的常用信号, 具有较好的时间分辨率特性。LFM 信号是 Doppler 宽容信号, 它可以允许 $1.74/(BT) * 100\%$ 的 Doppler 扩展^[4], B 是 LFM 的带宽, LFM 模糊度函数如图 1 所示。利用这一特性, 采用多组拷贝贝相关的办法可以估计 Doppler 扩展。这种方法根据接收信号与已知扩展拷贝贝信号的相关性估计 Doppler 扩展, 见图 2。

图 2 所示的方法需要多组拷贝贝相关器, 而且计算量随着估计精度的提高而增加, 不利于实际系统的实现。B. S. Sharif 等提出“块估计方法”^[4], 克服拷贝贝相关估计计算量大的局限性。这种方法通过首尾一对 LFM 测量一段时间产生的伸缩变化来估计 Doppler 扩展因子 Δ , 见图 3。发射的数据包时间长度 T_p 是已知的, 接收端测量两个相关峰之间的时间距离 T_m , 那么可以准确得出 Doppler 扩展因子的估计为:

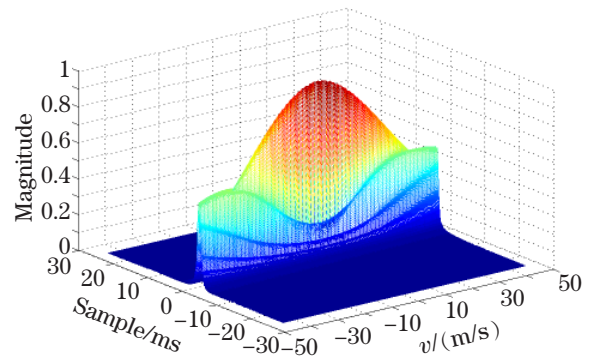


图 1 LFM 的模糊度函数

Fig.1 Ambiguity function of LFM

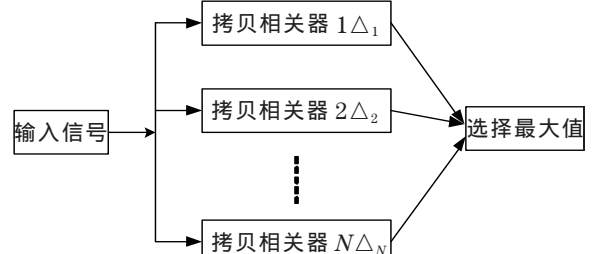


图 2 拷贝贝相关估计示意图

Fig.2 Doppler spreading estimation by copy-correlators

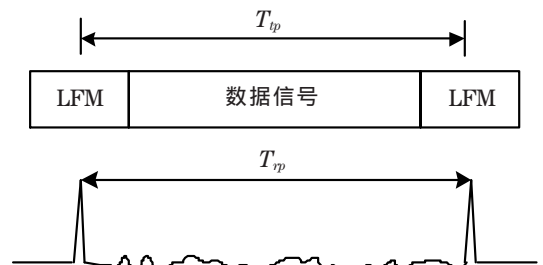


图 3 “块估计方法”示意图

Fig.3 Sketch of "block estimation method"

$$\hat{\Delta} = \frac{T_p}{T_{rp}} - 1 \quad (6)$$

这种算法只需要一个相关器,结构简单,计算量大减小。它只能估计整个数据包时间间隔内Doppler扩展,要求这段时间内 Doppler 扩展不变或成线性变化。这种方法要求数据包的持续时间不能太长,因为时间间隔太长不能够保证 Doppler 扩展相对不变或线性变化;数据包的持续时间也不能太短,因为此时两个相关峰之间的距离就不能够很好地分辨伸缩的时间变化,估计精度降低。

4 实际数据处理分析

2007年12月,在浙江千岛湖试验场进行通信数据采集,发射、接收均是全向换能器,发射声源级为175dB,静态试验的态势见图4。信道测量信号由BT=75的LFM和频率 $f=15\text{kHz}\pm 50\text{Hz}$ 的CW信号组合构成,见图5。

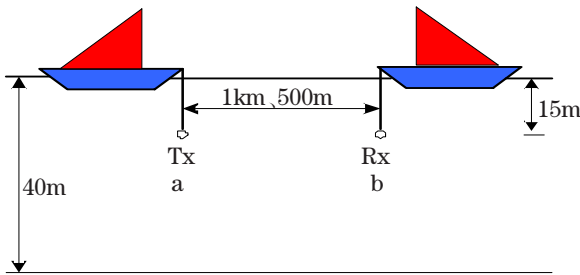


图4 实验装置布置图
Fig.4 Experimental arrangement

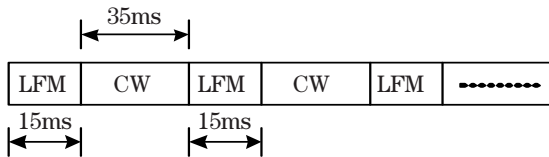
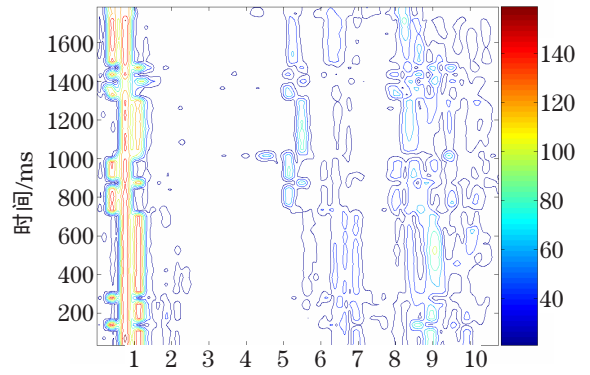


图5 信道测量信号

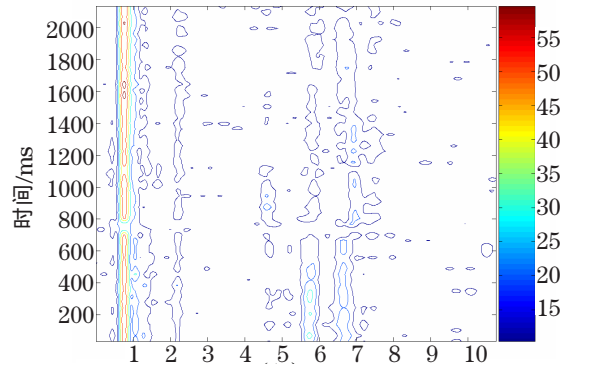
Fig.5 Measuring signals in transmission channel

在此试验中,船体随波浪、暗流的漂移产生相对运动,收发机的采样频率存在偏差,这样就可以产生Doppler扩展。实验a、b点对应通信距离分别为500m和1km。匹配相关处理周期重复的LFM,估计a、b两个试验地点随着时间变化的信道冲激响应,见图6。图7给出了a、b地点Doppler压缩因子的估计。近距离500m定点试验处周围反射强烈导致主径变化较快,而在1km定点试验处随着距离的增加多径衰减较快,并且主径清晰。

观察图6(a),信道的主径变化较快,且模糊,利用首尾 LFM 测量压缩量的方法受前后相邻的 LFM 主径到达时间的影响较大,所以该方法此时的估计



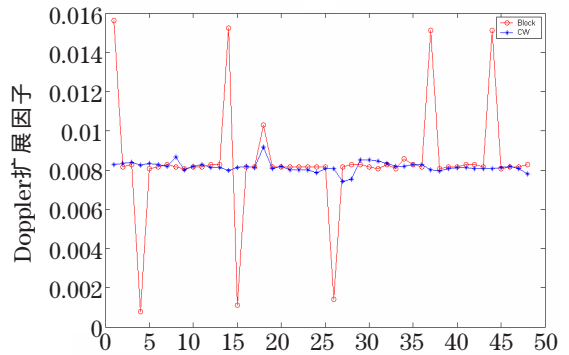
(a) 500m



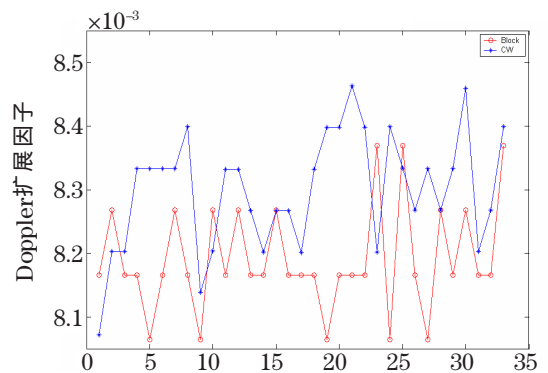
(b) 1000m

图6 信道冲激响应

Fig.6 Pulse response of transmission channel



(a) 500m



(b) 1000m

图7 Doppler 扩展因子的估计

Fig.7 Estimation of Doppler spreading factors

误差较大,图 7(a)验证了这一点。利用 CW 脉冲估计法在两地均显示出稳健性,受多径的影响较小。

5 结 论

本文先分析了两种常用的 Doppler 扩展的估计方法,然后通过试验的方法验证这两种的方法,以及它们的估计性能对比。对比 a、b 两地试验,验证测量伸缩量的块估计法在多径变化较快时估计性能较差,然而 CW 脉冲估计法不受多径的影响。在浅水水平信道通信时,信道多径的变化限制块估计法的应用。CW 脉冲估计法的缺点是要求积分

的时间较长,这样就相比块估计法浪费更多的时间,降低通信吞吐率。在设计通信系统时,要考虑信道的条件和系统性能来提出解决方案。

参 考 文 献

- [1] John Proakis, Digital Communication, McGraw-hill, 1989.
- [2] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声纳技术[M]. 哈尔滨工程大学出版社, 2000.
- [3] 邵枝晖, 王海斌, 吴立新, 张仁和. 基于 Zoom FFT 的反多普勒频移算法在水声通信中的应用[J]. 声学学报, 2005, **30**(5): 420-426.
- [4] Sharif B S, Neasham J A, Oliver R Hinton, Alan E Adams. A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communication[J]. IEEE Journal of Oceanographic Engineering Special Issue on Underwater Communication, 1999, **25**(1): 52-61.