

全相位频谱校正技术在水声通信中的应用研究

孙向前¹, 李晴^{2,3}, 范展^{2,3}

(1. 广东湛江 91388 部队, 广东湛江 524022; 2. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001;
3. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 多普勒效应是影响水下移动通信性能的主要因素, 准确估计多普勒频移对提高通信系统可靠性具有重要意义。在进行离散频谱分析时, 时域非整周期截断会造成频域能量的泄漏, 导致频谱估计精度降低。全相位频谱分析具有良好的抑制频谱泄漏特性及相位不变性。仿真验证了全相位频谱校正技术相对于传统频谱校正技术在估计性能上的优势, 并在此基础上探讨了全相位频谱校正技术在水声通信中的应用。采用全相位频谱校正技术进行多普勒频移估计, 进而进行多普勒补偿以降低通信系统误码率。仿真结果表明, 全相位频谱校正技术能够实现高精度多普勒频移估计, 从而提高水下移动通信系统的可靠性。

关键词: 全相位频谱分析; 全相位频谱校正; 水声通信; 多普勒

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-02-0127-07

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.02.005

Research on the application of all-phase spectrum correction technique in underwater acoustic communication

SUN Xiang-qian¹, LI Qing^{2,3}, FAN Zhan^{2,3}

(1. Unit 91388, The People's Liberation Army of China, Zhanjiang 524022, Guangdong, China;

2. Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: The Doppler effect is a main factor influencing the performance of underwater mobile communication, so it's important to effectively estimate the frequency shift for the improvement of the system reliability. Resulting from non-inter-period sampling in time domain, the leakage error of discrete spectrum analysis leads to reducing accuracy of spectrum estimation. The satisfactory characteristics of all-phase spectrum analysis are lower spectrum leakage level and non-phase shift. Simulation experiments prove that all-phase spectrum correction technique has the advantage in precision over traditional methods. Furthermore, the application of all-phase spectrum correction in underwater acoustic communication is studied. The technique is adopted for Doppler estimation and compensation to reduce the error rate of system. Simulation results show that adopting all-phase spectrum correction for high frequency estimation accuracy improves the reliability of underwater mobile communication system.

Key words: all-phase spectrum analysis; all-phase spectrum correction; underwater acoustic communication; Doppler

0 引言

快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)显著减小了离散傅里叶变换的运算量, 被广泛应用于雷达、声呐等信号处理领域。在工程实际中进行FFT频谱分析时, 受到器件处理样本长度的限制, 需要先将连续信号离散化、截断并周期延拓。时域非整周期截断在频域表现为能量的泄露, 导致离散

频谱频率、幅值和相位估计精度降低。

离散频谱分析的误差校正及高精度频谱估计成为近几十年内现代信号处理的研究方向之一。Offelli C.等人研究了加窗函数对多频率信号参数估计的影响^[1]。Santamria I.等人对包括内插FFT在内的几种频率估计方法进行了对比^[2]。张强等人研究了双频率模型的频谱校正形式及性能^[3]。目前国内有关频谱校正技术的研究重点落在单频率谐波信号或者频率间隔较大的多频率信号的离散频谱校正上。典型的方法有比值法^[4]、能量重心法^[5]和相位差法^[6]。这几种方法首先对截断后周期延拓的信号进行FFT分析, 再对得到的离散频谱进行校正, 其精度受频谱泄露程度的影响较大, 本文称之为传统频谱校正方法。在图像处理领域, 常用重叠方式

收稿日期: 2014-03-06; 修回日期: 2014-06-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279043, 61201411); 国家“863计划”资助项目(2013AA09A503)

作者简介: 孙向前(1968—), 男, 河南安阳人, 高级工程师, 研究方向为水声测控总体技术。

通讯作者: 李晴, E-mail: liqing_heu@163.com

来改善由图像分块导致的边界“方块效应”。Malvar提出的双正交重叠变换在图像压缩中得到广泛应用^[7]。全相位数据预处理起源于王兆华对图像处理中的重叠数字滤波的研究,主要用来解决信号非整周期截断的问题。预处理考虑包含某样点的所有可能的数据截断情况,即进行最大程度的重叠处理,最终输出这些处理结果的有机综合。至今这种方法的应用已经由二维的图像处理领域扩展到了更普遍的一维信号处理领域,并形成了全相位快速傅里叶变换(all-phase FFT, apFFT)频谱分析、全相位频谱校正^[8]和全相位滤波等理论及方法。apFFT 具有非常优良的抑制谱泄露性能以及相位不变性^[9],因而全相位频谱校正受泄露的影响比传统方法小,相位也不需要校正;在频谱泄露严重、谱线间干扰较大等情况下比传统方法更具优势,具有广泛应用前景。

水声通信中的多普勒频移是由收发平台之间的相对运动或信道中水的流动引起的。相对速度与声速之比可称为多普勒频移因子。由于水中声速比空中电磁波波速约小了 10^5 倍,水声移动通信中多普勒频移因子远大于无线电通信。而水声通信中常用的信号处理方法对于多普勒导致的信号频谱扩展、频率偏移等畸变适应性较差,从而导致系统可靠性急剧下降^[10]。工程实际中通常先估计多普勒频移因子,再根据频移因子进行多普勒补偿^[11]。其中高精度估计频移因子成为降低通信误码率的关键。而频谱校正技术能够高精度测频,所以本文采用全相位频谱校正技术来提高多普勒频移因子估计的精度,进而提高水声通信系统的性能。

1 全相位频谱校正原理及性能分析

1.1 全相位频谱分析

全相位 FFT(apFFT)频谱分析是指对经过全相位预处理后的数据再进行 FFT 频谱分析^[12]。全相位数据预处理将长度为 $(2N-1)$ 的数据向量 $\mathbf{x}$ 映射为长度为 N 的数据向量 $\mathbf{x}_1$, 且 $\mathbf{x}_1$ 是 $\mathbf{x}$ 中包含其中心点的长度为 N 的所有分段序列的叠加。设 $x(n)$ 为单频复指数信号,

$$x(n) = A \exp[j(\omega_0 n + \phi_0)] = A \exp[j(2\pi m n / N + \phi_0)] \quad (1)$$

其中: A 为信号振幅; ω_0 为数字频率,是角频率间隔 $2\pi/N$ 的 m 倍; ϕ_0 为信号初相位。该信号的传统 FFT 归一化频谱为

$$X(k) = \frac{A \sin[\pi(k-m)]}{N \sin[\pi(k-m)/N]} \exp[j(\phi_0 - (N-1)(k-m)\pi/N)] \quad (2)$$

apFFT 频谱为

$$Y(k) = \frac{A}{N^2} \frac{\sin^2[\pi(k-m)]}{\sin^2[\pi(k-m)/N]} \exp(j\phi_0) \quad (3)$$

由式(2)和(3)可见,信号 $x(n)$ 的 apFFT 振幅谱幅值与传统 FFT 振幅谱幅值的平方成正比,则旁谱线相对于主谱线的比值也按平方关系衰减,从而较好地抑制了旁谱泄露;另外,apFFT 谱的相位值均为样本中心点的理论相位值 ϕ_0 , 与 $(k-m)$ 无关,即具有相位不变性。

1.2 全相位频谱校正

全相位频谱校正是指对 apFFT 谱分析结果进行谱线频率、幅度和相位补偿修正,通常先估计出主谱线和真实谱线间的归一化频率误差:

$$\Delta k = m - k_0, \Delta k \in (-0.5, 0.5] \quad (4)$$

式中, m 和 k_0 分别为主谱线和真实谱线位置,进而得到校正后的频率:

$$f_0 = (m - \Delta k) \Delta f \quad (5)$$

其中, Δf 为频率分辨率。全相位频谱校正^[8]主要包括两类方法,第一类是只将传统方法中的 FFT 分析用 apFFT 分析替换,基本校正思路不变,如全相位能量重心法、全相位比值法、全相位时移相位差法;第二类是利用 FFT 分析和 apFFT 分析的相似性来校正,如 FFT/apFFT 综合相位差法。

1.2.1 全相位能量重心法

全相位能量重心法利用对称窗函数的离散谱能量重心在零点或零点附近这一特性对频率进行校正。设单频率谐波信号 FFT 谱分析得到的离散频谱的主谱线位置为 m , 幅度谱值、功率谱值分别为 X_m 、 G_m , apFFT 谱对应幅值为 Y_m , 且有

$$G_m = |X_m|^2 = A Y_m \quad (6)$$

则依据离散功率谱线的能量重心位置是信号真实频率的理论位置,可得该信号频率校正公式:

$$f_0 = k_0 \Delta f = \frac{\sum_{i=-n}^n (m+i) G_{m+i}}{\sum_{i=-n}^n G_{m+i}} \Delta f \quad (7)$$

由帕赛瓦尔定理可得幅度校正公式为

$$A = \sqrt{K_t \sum_{i=-n}^n G_{m+i}} \quad (8)$$

其中, K_t 为能量恢复系数,实际中 n 常取 1 或 2,即只用窗谱主瓣内的三或五根谱线进行计算,给校正结果带来理论误差。当 n 一定时,由于 apFFT 分析能良好抑制频谱泄露,把信号的能量集中在主谱线附近,故可以获得比传统能量重心法更高的频率校正精度。

1.2.2 全相位比值法

全相位比值法先将 apFFT 振幅谱线归一化, 再求主谱线和最大旁谱线幅值的比值, 记为 v :

$$v = \frac{|Y_m|}{\max(|Y_{m-1}|, |Y_{m+1}|)} \quad (9)$$

进而求频率误差 Δk :

$$\Delta k = g(v) = \frac{2-v}{v+1} \quad (10)$$

将式(10)代入式(5)可得校正后频率。幅度校正公式为

$$A = \frac{|Y_m|}{W_1^2(\Delta k)} \quad (11)$$

其中, $W_1(\Delta k)$ 为 Δk 处归一化窗函数的频谱值。对于全相位能量重心法和全相位比值法, 从 apFFT 谱中直接读取主谱线的相位值即可作为信号初相位估值, 无需校正, 且精度较高。

1.2.3 全相位时移相位差法

全相位时移相位差法基于 apFFT 谱分析的线性性质和相位不变性, 利用输入离散信号的两段序列 apFFT 谱分析得到的对应主谱线的相位差进行校正。取采样数据中两段存在延时 N 的长为 $(2N-1)$ 的样本分别进行 apFFT, 取对应主谱线的相位值分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 , 则由相位差 $\Delta\phi$ 可得频率校正值为

$$f_0 = k_0 \Delta f = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \Delta f = \frac{\phi_1 - \phi_2}{2\pi} \Delta f \quad (12)$$

幅度校正值可由式(11)求得。具体流程如图 1 所示。图 1 中, $\omega' = 2\pi m / N - (\phi_1 - \phi_2) / N$ 为主谱线上的频偏估值。

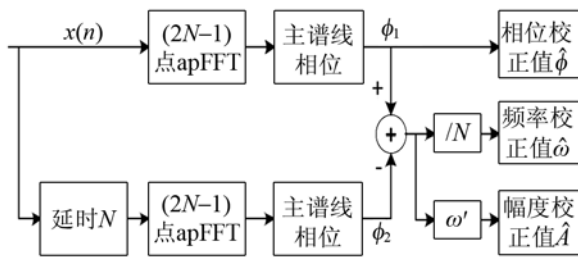


图 1 全相位时移相位差法频谱校正流程

Fig.1 Flowchart for spectrum correction of all-phase time-shift difference

相比传统相位差法, 全相位时移相位差法的相位估计与频偏无关, 直接取对应相位谱值即可, 计算量减小; 另外, 由于频谱泄漏得到良好抑制, 当信号包含多频成分时, 估计精度受谱线间干扰影响较小。

1.2.4 FFT/apFFT 综合相位差法

FFT/apFFT 综合相位差法利用了两种谱分析的主谱线信息^[13]。首先对一段信号分别做 FFT 和

apFFT 分析, 得到对应主谱线的相位值, 分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 , 其差值与频率误差成正比, 比例系数为群延时 τ , 则频率误差为

$$\Delta k = \frac{\Delta\phi}{\tau} \frac{N}{2\pi} = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\pi} \frac{N}{N-1} \quad (13)$$

将式(13)代入式(5)可得校正后频率; 取 apFFT 主谱线的相位值即为信号初相位; 由式(6)可得幅度校正公式为

$$A = \frac{|X_m|^2}{Y_m} \quad (14)$$

1.3 性能仿真分析

1.2 节推导了几种典型的全相位频谱校正技术的计算公式, 并传统频谱校正技术进行理论上的对比。下面将通过仿真实验对这两类校正方法的性能进行综合比较分析。

仿真采用的信号为多频率分量复合正弦序列 $s(n)$ 和噪声 $\xi(n)$ 叠加所得的信号 $x(n)$:

$$x(n) = \sum_{i=0}^3 A_i \cos\left(\frac{2\pi k_i n}{N} + \frac{\phi_i \pi}{180}\right) + \xi(n) \quad (15)$$

其中, $n \in [-N+1, 2N-1]$, 各参数理论值设置如下: 幅度 A_i 均为 2 V; 频率 k_i 分别为 50.0、120.346、125.4、245.5453 Hz; 相位 ϕ_i 分别为 30.3°、80.8°、120°、240.24°。采样频率 f_s 为 4096 Hz, 谱分析点数 N 为 4096, 即频率分辨率 Δf 为 1。容易发现 $s(n)$ 中除第一个分量外其余分量的频率误差 Δk 均不为 0, 即存在不同程度的频谱泄漏; 第二个和第三个分量的主谱线距离较近, 受频谱泄漏的影响, 附近谱线较密集, 谱线间干扰较大。 $\xi(n)$ 是均值为 0、方差为 σ^2 的高斯白噪声。当 σ 取 0.50 和 0.89 时, 信噪比(SNR)分别为 15 dB 和 10 dB。在这两种信噪比下分别采用全相位频谱校正和传统频谱校正方法估计信号 $x(n)$ 各分量的参数, 并对结果做 1000 次统计得到各种方法的校正均方根误差如表 1 所示。表中方法 1~7 分别为能量重心法、比值法、相位差法、全相位能量重心法、全相位比值法、全相位时移相位差法、FFT/apFFT 综合相位差法。

由表 1 可见, 各种方法的校正精度均受频率误差 Δk 及频谱密集程度的影响。由于 apFFT 分析可以良好地抑制频谱泄漏, 因此全相位校正方法受到频谱泄漏的影响较小。对于后三个分量的频率校正, 第一类全相位校正方法(表 1 中方法 4、5、6)相比对应的传统校正方法(表 1 中方法 1、2、3)精度均有所提高, 最多提高四个量级。FFT/apFFT 综合相位差法(方法 7)频率校正精度高于传统相位差法(方法 3), 略低于全相位时移相位差法(方法 6), 这与其所采用的 apFFT 分析次数少于全相位时移相

表 1 不同信噪比下几种频谱校正方法校正均方根误差
Table 1 RMS errors of different spectrum corrections for different SNRs

方法	频率误差/Hz		幅度误差/V		相位误差/(°)	
	15 dB	10 dB	15 dB	10 dB	15 dB	10 dB
1	0.005	0.011	0.015	0.027	1.053	2.111
	0.715	2.022	0.016	0.030	5.758	16.11
	6.057	28.28	0.015	0.030	8.254	32.31
	6.015	28.21	0.015	0.028	6.128	28.62
2	0.007	0.003	0.014	0.024	1.343	1.092
	0.530	5.856	0.014	0.028	4.336	15.08
	5.402	24.98	0.015	0.028	6.909	28.29
	5.376	25.55	0.014	0.028	5.486	26.00
3	0.001	0.003	0.014	0.024	0.588	1.092
	0.530	5.856	0.015	0.028	4.155	15.08
	7.621	24.98	0.016	0.028	8.643	28.29
	7.602	25.55	0.015	0.028	7.635	26.01
4	0.009	0.016	0.028	0.046	0.345	0.607
	0.014	0.023	0.024	0.045	0.392	0.681
	0.014	0.026	0.023	0.043	0.396	0.699
	0.016	0.027	0.024	0.044	0.413	0.770
5	0.007	0.013	0.012	0.021	0.349	0.607
	0.003	0.253	0.013	0.025	0.381	2.110
	0.003	0.253	0.013	0.024	0.428	2.084
	0.003	0.005	0.014	0.026	0.438	0.808
6	0.001	0.002	0.011	0.020	0.338	0.595
	0.001	0.003	0.013	0.025	0.380	0.681
	0.002	0.003	0.014	0.026	0.415	0.719
	0.002	0.003	0.015	0.029	0.444	0.787
7	0.002	0.004	0.027	0.047	0.335	0.587
	0.003	0.005	0.020	0.038	0.382	0.670
	0.003	0.006	0.017	0.032	0.432	0.735
	0.003	0.006	0.015	0.028	0.440	0.797

位差法而多于传统相位差法相符。信噪比由 15 dB 降到 10 dB 时, 全相位方法频率校正精度下降并不明显, 相位校正精度相比传统方法至少提高一个数量级。以上分析表明, 全相位方法的抗噪声性能和对存在频谱泄漏的信号分量校正精度比传统方法均有所提高。

2 基于全相位频谱校正技术的水声通信系统仿真研究

2.1 水声通信系统设计

根据上述的理论推导与仿真验证, 相比于传统频谱校正技术, 基于全相位频谱分析的全相位频谱校正技术受到频谱泄漏的影响更小, 在提高频率估计精度上更有优势。因此, 考虑将全相位频谱校正技术应用于水下移动通信系统中, 利用其频率估计精度高的性能对接收信号的多普勒进行估计, 从而采取相应的补偿措施, 以提高通信系统可靠性。

与无线电通信相比, 水声通信系统的工作环境更为恶劣。发射机发射的声波在复杂结构的水声通信信道中传输, 主要产生能量的衰减及波形的畸变。声信号传播损失主要由几何扩展损失和介质吸收损失构成, 即

$$TL=20\lg r+\alpha r \quad (16)$$

其中, r 为通信距离, 单位: m; α 为海水吸收系数, 单位: dB/m, 常用的经验公式为

$$\alpha=0.036 f^{3/2}(\text{dB/km}) \quad (17)$$

式(17)中, f 为信号频率, 单位: kHz。可见, 海水吸收损失近似与声波频率成正比。

声信号能量的衰减主要影响水声通信系统的通信距离。由于水声信道具有多径特性, 信号经信道传输在接收端会产生时间扩展及频率选择性衰落。另一方面, 当收发平台存在相对运动时, 接收信号受多普勒效应的影响会产生频率的偏移及时域的伸缩。这些因素都会导致信号波形的畸变, 从而影响通信系统的可靠性。

由以上分析, 仿真条件及系统参数设置如下: 系统通信距离为 5 km, 信道冲击响应如图 2 所示, 采用带限高斯白噪声。接收机相对发射机的运动速度为 v_0 , 且 v_0 不超过 40 kn, 即在 ± 20 m/s(相向运动时取正, 相背运动时取负)范围内。设计二进制频移键控水声数字通信系统, 数据码元信息采用频率为 10 kHz 和 10.15 kHz 的两个单频脉冲作为载波; 用于多普勒频移修正的导频同步信号, 采用频率为 6 kHz 的 CW 脉冲; 采样频率为 51.2 kHz; 同步脉冲及码元信号脉宽分别为 15 ms 和 20 ms, 对应的带滤波器的阶数均为 128, 3 dB 带宽分别为 600 Hz 和 100 Hz。

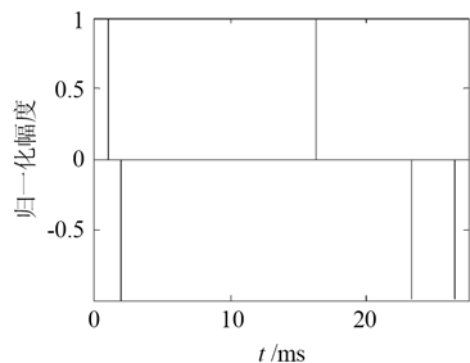


图 2 水声信道冲击响应

Fig.2 The impulse response of underwater acoustic channel

接收端处理流程如图 3 所示。

主要步骤如下:

(1) 采用全相位频谱校正技术对接收数据中的导频信号进行频率估计;

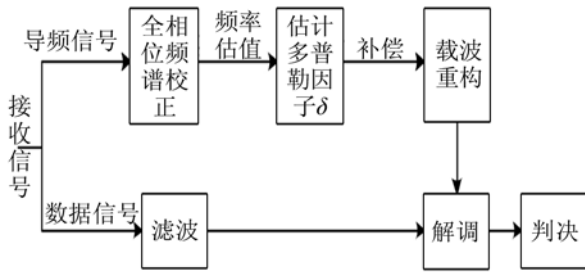


图3 基于全相位频谱校正技术的水声通信系统处理流程

Fig.3 Underwater acoustic communication system based on all-phase spectrum correction technique

(2) 由导频信号的频率估值及其发射频率估算多普勒频移因子；

设发射的导频信号频率为 f_0 ，通过全相位频谱校正技术估计得到的频率为 f_1 ，声速为 c ，则

$$f_1 = f_0(1 + \frac{v_0}{c}) = f_0(1 + \delta) \quad (18)$$

从而估计得到多普勒频移因子 δ 为

$$\delta = \frac{f_1}{f_0} - 1 \quad (19)$$

(3) 根据多普勒频移因子重构本地载波，进而对接收的数据信号进行解调及判决。

2.2 水声通信系统性能分析

由1.3节的仿真实验可知，全相位时移相位差法有较高的频率估计精度，因此下面主要以该方法为例进行系统性能分析，并以频谱校正前的传统FFT分析作为参考。设谱分析点数为 $N=256$ ，则传统方法采用数据点数为 N ，校正方法采用数据点数为 $(3N-1)$ 。

当 v_0 为 15 m/s 时，多普勒频移因子 δ 理论值为 0.01。进行 1000 次 Monte Carlo 实验，并统计得到校正前后 δ 的估计均方根误差随信噪比变化的曲线如图4所示。

由图4可见，当 SNR 在 0~10 dB 范围内，校正

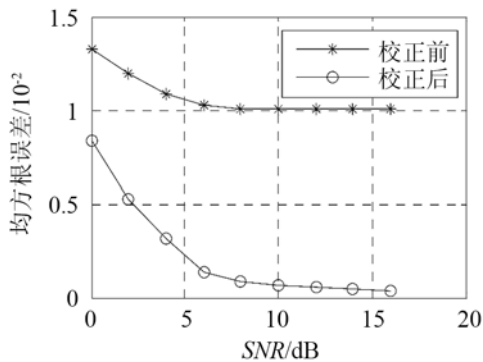


图4 校正前后多普勒频移因子估计误差

Fig.4 Estimating error of Doppler frequency-shift factor before and after spectrum correction

前后的估计均方根误差均随 SNR 的增大而降低，且校正后降低速率更大；SNR 大于 10 dB 时，校正前后误差均趋于稳定，校正前误差趋于 0.01，而校正后误差趋于零。

当 v_0 在 ± 20 m/s 范围内变化时， δ 在 ± 0.0133 范围内。多普勒频移后导频信号的归一化频率误差 Δk 随 v_0 的变化曲线如图5所示。SNR=10 dB 时，校正前后 δ 的估计均方根误差随 v_0 变化曲线如图6所示。

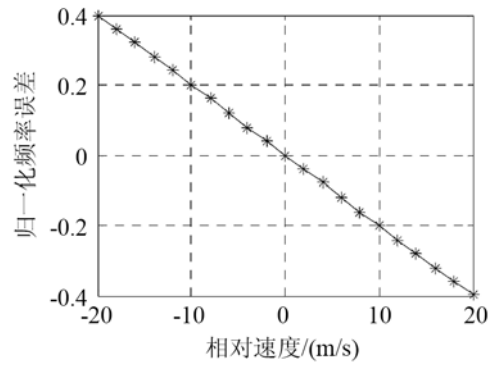


图5 频率误差随速度的变化

Fig.5 Frequency error versus velocity

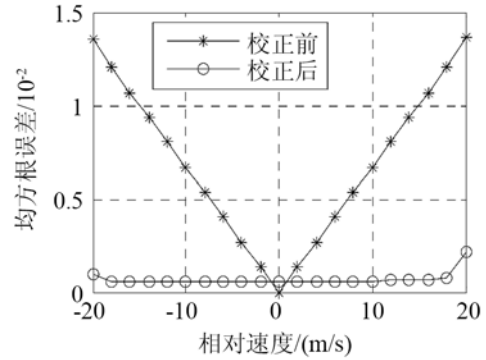


图6 校正前后频移因子估计误差随速度的变化

Fig.6 Estimating error of frequency-shift factor versus velocity before and after spectrum correction

由图5、6可见，随着相对速率的增大， $|\Delta k|$ 增大，频谱泄漏越严重，导致校正前 δ 的估计均方根误差也越大，最大可达 0.013。而全相位频谱校正技术受频谱泄漏影响较小，因此校正后 δ 的估计均方根误差并无明显变化，不超过 0.003。

综合以上两组结果可见，校正后 δ 的估计精度普遍高于校正前，且不会随着相对速率的增大发生显著变化。但是，当频谱分析的长度相同时，全相位频谱校正方法比传统 FFT 需要更多的数据点，且需要对频率进行校正，因此运算量更大。

下面分别对 v_0 为 15 m/s 和 10 m/s 时，校正前后系统误码率 P_e 进行 10000 次统计得到图7。这两个速度下，数据码元的载波多普勒频移分别约为

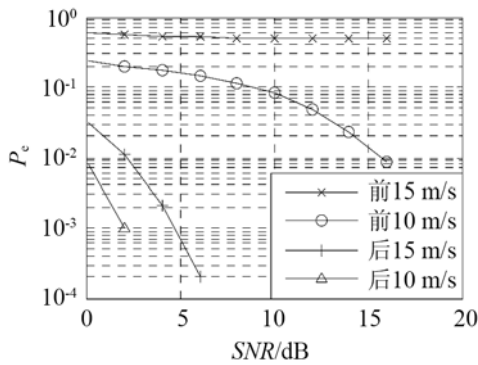


图 7 校正前后两速度下的通信误码率

Fig.7 Error rates of the system at different speeds before and after spectrum correction

100 Hz 和 67 Hz, 而两个载频间隔仅为 150 Hz, 多普勒频移对系统误码率影响较大。图 7 中, 校正前 v_0 为 15 m/s 时系统已不能正常工作, v_0 为 10 m/s 时, 误码率高于 10^{-2} 量级; 而校正后系统误码率显著下降, SNR 高于 6 dB 时, 误码率低于 10^{-4} 量级。

最后, 统计 v_0 为 15 m/s 时采用不同频谱校正技术的系统误码率 P_e , 如图 8 所示, 对应的误码率数值见表 2。图表中的数字 1~7 的意义与表 1 中一致。

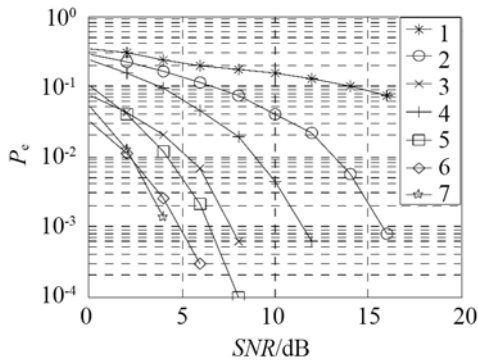


图 8 不同频谱校正技术对应通信误码率图

Fig.8 Error rates of the system based on different spectrum corrections

表 2 不同信噪比下采用各频谱校正技术的系统误码率

Table 2 Error rate for different SNRs based on different spectrum correction

SNR/dB	$P_e/\%$						
	1	2	3	4	5	6	7
0	35.1	28.3	7.51	24.2	10.1	3.03	4.97
2	29.5	22.1	4.18	15.6	4.08	1.12	1.25
4	24.1	16.1	1.99	9.67	1.15	0.25	0.14
6	19.7	11.4	0.69	4.54	0.21	0.03	0
8	17.6	7.47	0.06	1.90	0.01	0	0
10	15.4	3.98	0	0.43	0	0	0
12	13.1	2.15	0	0.06	0	0	0
14	10.1	0.55	0	0	0	0	0
16	7.15	0.08	0	0	0	0	0

综合图 8、表 1 及表 2 可见, 当 v_0 相同时, 系统误码率主要受频谱校正技术的频率估计精度影

响。采用第一类全相位校正方法(方法 4、5、6)的系统误码率相对采用传统校正方法(方法 1、2、3)的系统误码率均明显降低; SNR 低于 2.5 dB 时, FFT/apFFT 综合相位差法(方法 7)对应的系统误码率介于传统相位差法(方法 3)和全相位时移相位差法(方法 6)之间; 而 SNR 高于 2.5 dB 时, 其误码率甚至低于全相位时移相位差法。

通过上述分析可见, 全相位频谱校正技术对于降低水声移动通信系统误码率具有重要意义。实际应用中, 如果信噪比较低, 且对误码率要求很高, 可以采用全相位时移相位差法; FFT/apFFT 综合相位差法的运算复杂度高于传统相位差法, 低于全相位时移相位差法, 且估计性能接近全相位时移相位差法, 适用于需要综合考虑通信速率和误码率、且信噪比较高的条件。

3 总 结

本文从理论和仿真的角度, 对全相位频谱校正技术进行了综合性能分析, 并在此基础上研究了该技术在水声通信中的应用。

仿真结果表明, 与传统频谱校正技术相比, 全相位频谱校正技术受频谱泄漏影响小, 频率估计精度高。

在水声移动通信系统中, 采用全相位频谱校正技术进行多普勒频移估计可以提高估计精度, 从而降低系统误码率。全相位频谱校正技术在改善水声通信系统性能上具有重要的理论意义和应用价值。

参 考 文 献

- [1] Offelli C, Petri D. The Influence of Windowing on the Accuracy of Multifrequency Signal Parameter Estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1992, 41(2): 256-261.
- [2] Santamria I, Pantaleon C, Ibanez J. A Comparative Study of High-accuracy Frequency Estimation Methods[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(5): 819-834.
- [3] 张强, 张频, 陈奎孚. 对两个频率相近成分作频谱校正的非迭代形式研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(10): 24-28.
ZHANG Qiang, ZHANG Pin, CHEN Kuifu. Non- iterative spectrum correction for signals with closely spaced frequency components[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(10): 24-28.
- [4] 朱磊, 董亮, 孙振龙, 等. 离散频谱梯形窗幅度比值校正法的频率估计[J]. 电视技术, 2011, 35(11): 102-104.
ZHU Lei, DONG Liang, SUN Zhenlong, et al. Discrete Spectral Amplitude Ratio Correction Method with Trapezoidal Window of Frequency Estimation[J]. Video Engineering, 2011, 35(11): 102-104.
- [5] 丁康, 郑春松, 杨志坚. 离散频谱能量重心法频率校正精度分析及改进[J]. 机械工程学报, 2010, 46(5): 43-48.
DING Kang, ZHENG Chunsong, YANG Zhijian. Frequency Estimation Accuracy Analysis and Improvement of Energy Barycenter Correction Method for Discrete Spectrum[J]. Journal of Me-

- chanical Engineering, 2010, **46**(5): 43-48.
- [6] 胡文彪, 夏立, 向东阳, 等. 一种改进的基于相位差法的频谱校正方法[J]. 振动与冲击, 2012, **31**(1): 162-166.
HU Wenbiao, XIA Li, XIANG Dongyang, et al. An improved frequency spectrum correction method based on phase difference correction method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, **31**(1): 162-166.
- [7] Malvar H S. Biorthogonal and Nonuniform Lapped Transforms for Transform Coding with Reduced Blocking and Ringing Artifacts[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, **46**(4): 1043-1053.
- [8] 王兆华, 黄翔东. 数字信号全相位谱分析与滤波技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
WANG Zhaohua, HUANG Xiangdong. Digital Signal All-phase Spectrum Analysis and Filtering[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [9] 黄翔东, 王兆华, 罗蓬, 等. 全相位 FFT 密集谱识别与校正[J]. 电子学报, 2011, **39**(1): 172-177.
HUANG Xiangdong, WANG Zhaohua, LUO Peng, et al. Discrimination and Correction for Dense All-phase FFT Spectrums[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, **39**(1): 172-177.
- [10] 许天增, 许鹭芬. 水声数字通信[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
XU Tianzeng, XU Lufen. Underwater Acoustic Digital Communication[M]. Beijing: China Ocean Press, 2010.
- [11] Kenneth A. Perrine, Karl F. Nieman, Terry L. Henderson, et al. Doppler Estimation and Correction for Shallow Underwater Acoustic Communications[C]// Proceedings of ASILOMAR 2010. Pacific Grove, CA, USA: 2010. 746 - 750.
- [12] 贾方秀, 丁振良, 袁峰, 等. 基于全相位快速傅里叶变换谱分析的激光动态目标实时测距系统[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2928-2934.
JIA Fangxiu, DING Zhenliang, YUAN Feng, et al. Real-Time Laser Range Finding System for Moving Target Based on All-Phase Fourier Transform Spectrum Analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2010, **30**(10): 2928-2934.
- [13] 黄翔东, 王兆华. 基于全相位频谱分析的相位差频谱校正法[J]. 电子与信息学报, 2008, **30**(2): 293-297.
HUANG Xiangdong, WANG Zhaohua. Phase Difference Correcting Spectrum Method Based on All-phase Spectrum Analysis[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, **30**(2): 293-297.

中国声学学会功率超声分会关于召开 2015 年全国功率超声学术会议的通知(第一轮)

经中国声学学会功率超声分会委员会研究决定, 于 2015 年 10 月中下旬在浙江省杭州市召开“2015 年全国功率超声学术会议”。协办单位为杭州成功超声设备有限公司和中国计量学院。会议的主要内容是:

1. 回顾近年来国内外功率超声学科发展动态, 进行学术交流。
2. 对本行业的应用新技术和新产品进行推介。

会议向全国从事功率超声研究、功率超声元器件和整机生产制造、功率超声设备使用的单位和个人征集下列方向的论文:

- 目前国内外功率超声领域研究动态;
- 功率超声的新设备、新工艺、新应用;
- 功率超声系统的设计、测试和评价方法;
- 其他有关功率超声的问题。

我们特邀请您/贵单位向会议积极投稿并参加会议。参加会议者请于 2015 年 6 月 10 日前用电子邮件发回回执, 以便发送第二轮通知。投稿者请于 2015 年 9 月 10 日前将论文全文用电子邮件附件的形式发送至会议秘书处。来稿请采用 A4 版面, 格式与《声学技术》版面格式相同。所有录用论文都将安排大会发言、收入会议论文集, 并酌致稿酬。

会议秘书暨联系人: 陕西师范大学应用声学研究所 王成会

通讯地址: 陕西师范大学长安校区致知楼 应用声学研究所 710119

联系电话: 13571895568; E-mail: wangld001@snnu.edu.cn

除邮件通知以外, 我们还将在中国功率超声网(www.cnglcs.com.cn 或 www.cnglcs.com)更新关于会议的最新消息, 请您登陆查看。

中国声学学会功率超声分会