

Improved Conventional Beamforming for Vector Sensor Array

Hua Han, Qijun Liu, Zhizhong Li

Navy Submarine Academy, Qingdao Shandong
Email: lqjbox@163.com

Received: Mar. 25th, 2017; accepted: Apr. 8th, 2017; published: Apr. 12th, 2017

Abstract

In order to detect low signal ratio underwater targets, we studied conventional beamforming for vector sensor array and analyzed nearest conventional time delay method, rectangular window sinc function interpolated method, and FFT phase-shifting method through theory and simulation. The results showed that rectangular window sinc function interpolated method and FFT phase-shifting method could improve the coherence degree between signals receive by vector sensor array. Their capability was better than nearest conventional time delay method. An improved beamforming technique for vector hydrophone array based on FFT was developed. The flow chart of this algorithm was given. The simulation result showed that though sinc-VCBF had better capability, its calculation speed was slower. VFFTABF calculation speed was faster than sinc-VCBF and VCBF, and had almost the same capability with sinc-VCBF.

Keywords

Vector Sensor Array, Conventional Beamforming, Adaptive, Phase-Shifting

一种改进的矢量阵常规波束形成方法研究

韩 华, 刘启军, 李智忠

海军潜艇学院, 山东 青岛
Email: lqjbox@163.com

收稿日期: 2017年3月25日; 录用日期: 2017年4月8日; 发布日期: 2017年4月12日

摘 要

为了更好的探测低信噪比目标, 我们研究了矢量阵的常规波束形成, 理论和仿真分析了常规时延方法最

近邻法、矩形窗sinc函数插值法以及FFT相移法对信号的影响,结果表明矩形窗sinc函数插值法以及FFT相移法对信号进行时延补偿可以提高矢量阵接收信号之间的相关度,性能优于最近邻法。我们给出了频域分子带相移的矢量阵常规波束形成算法以及实现流程,并进行了仿真分析,比较了利用三种延时方法所到的矢量阵波束形成结果,虽然sinc-VCBF有较好性能,但是运算速度较慢,而VFFTABF比sinc-VCBF和最近邻VCBF执行速度更快,且性能与sinc-VCBF相当。

关键词

矢量阵, 常规波束形成, 精确时延, 相移

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

对于低信噪比目标的检测,目前最常用也最直接有效的方法就是采用大的水听器阵列来测量声场多点的声压值,通过空间滤波获得空间增益,从而提高检测性能。随着频率的不断降低,声压水听器阵列在保持一定增益、束宽的条件下,阵列孔径越来越大。矢量传感器的出现,给解决此类问题提供了可能[1][2]。

矢量传感器由声压水听器和质点振速水听器复合而成,可以共点、同步、独立地测量声场的声压标量和质点振速矢量的各正交分量[3]。单个矢量水听器在小尺度下具有与频率无关的偶极子指向性,适用于(甚)低频信号的测量和检测。由于相干源声场中声压和振速(三个分量)是完全相干的,而各向同性噪声场中声压和振速是相互独立的,因此矢量水听器的独立维数增大到4,对于与声压水听器阵相同水听器数的矢量阵来说,独立阵元数是声压水听器的4倍。另外,矢量阵可以消除常规线阵的左右舷模糊[4],在发现距离上对目标进行左右舷分辨。因此,矢量阵对于弱目标检测和参数估计具有重要意义。

在被动测向系统中,需要尽可能准确地从阵列接收信号中提取目标信息,这时需要对阵列接收到的信号采用某种加权组合,从而得到目标信号的估计,这种对阵列信号进行加权组合的过程,称为波束形成。对于分布于空间不同位置的多个水听器所构成的阵列,根据平面波信号到达各个传感器之间存在的传播时延,进行时延补偿后再相加输出的波束形成方法(CBF)具有良好的稳健性,并已被证明为单目标情况下均匀噪声场中的最佳空域匹配滤波器[5]。基于时域信号傅里叶变换的特点,本文给出将宽带信号时域时延转换到频域分子带相移的算法,实现信号的精确时延,并比较了最近邻法时延方法、sinc函数插值方法以及FFT相移法三种时延方法的性能以及三种方法的波束形成结果。

2. 声矢量传感器阵列信号模型

声矢量传感器可以分为二维和三维矢量传感器,利用声矢量传感器可以同时拾取声场某一点处的声压和振速信息,以二维矢量传感器为例定义波达方向为 $\theta \in [0, 2\pi]$,在远场条件下,振速分量只是声压传播方向的余弦加权,它们的波形、相位都相同,是完全相关的[6]。

以二维声矢量传感器为例,各分量的关系可简单表示为

$$\begin{aligned} p(t) &= x(t) \\ v_x(t) &= x(t)\cos\theta \\ v_y(t) &= x(t)\sin\theta \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $x(t)$ 为目标信号, θ 为目标方位, $p(t)$ 、 $v_x(t)$ 和 $v_y(t)$ 为声压振速信号。考虑环境噪声的影响, 二维声矢量传感器的输出可表示为[7]

$$\begin{aligned} s(t) &= [p(t) + n_p(t), v_x(t) + n_x(t), v_y(t) + n_y(t)]^T \\ &= [1, \cos \theta, \sin \theta]^T x(t) + [n_p(t), n_x(t), n_y(t)]^T \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $n_p(t)$ 、 $n_x(t)$ 和 $n_y(t)$ 为各相应通道的噪声, 零均值、空间不相关。

M 个矢量传感器均匀布放在 x 轴上, 矢量传感器的方向与 x 轴正方向一致, 阵元间距 d , 空间中有 p 个宽带信号源, 信源波达方向为 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p\}$, 第 m 个阵元的输出为

$$y_m(t) = \sum_{i=1}^P a_m(\theta_i) \otimes a(\theta_i) x_i(t) + n_m(t) \quad (3)$$

其中 $a(\theta_i) = [1, \cos \theta_i, \sin \theta_i]^T$,

$$n_m(t) = [n_{pm}(t), n_{xm}(t), n_{ym}(t)]^T$$

按照常规时延波束形成, 对每个阵元输出信号插入时延 $\tau_m(\theta_i) = md \cos \theta_i / c$, $m = 1, \dots, M-1$, 是第 i 个信号源到达第 m 号阵元相对于参考阵元的时间延迟, 它只和目标信号所处的方位有关。则延时后的输出为

$$y_m(t) = \sum_{i=1}^P a_m(\theta_i) \otimes a(\theta_i) x_i(t - \tau_m(\theta_i)) + n_m(t - \tau_m(\theta_i)) \quad (4)$$

3. 改进矢量阵波束形成

根据前面对矢量阵信号模型和精确时延的分析, 我们将傅里叶变换应用于矢量阵宽带波束形成之中, 其主要流程可以整理如下: 在阵列信号处理中, 阵元之间信号的时延精度直接影响着信号处理性能[8]。在传统数字式声纳系统中, 多路通道时延是利用数字延迟线实现[9], 它是采样间隔整数倍的时延, 将采样之后离散化的数字信号送到一个移位寄存器中, 该移位寄存器的驱动周期正好等于信号采样周期 T_s 。抽头延迟线的长度等于形成波束所需要的最大延迟时间, 然后在某一抽头把信号读出来。在驱动信号的驱动下, 每一周期内信号朝前移动一位, 周而复始, 得到延迟的时间序列数字信号。而实际的信号延迟时间量不是采样间隔的整数倍, 因此引入一定的时延误差。线性插值法、sinc函数插值法、拉格朗日插值法和Farrow滤波器法等分数时延方法可以消除时延误差的影响, 但该方法是基于时域实数信号的处理, 它可以采用分数时延滤波器的形式实现, 但带来了设备的庞大负担; 在数字信号处理中, 通常的做法是运用数字卷积滤波, 这带来运算量的庞大增加[10]。

1) 常规时延方法

一般来说, 延时节数可以用最接近整数的原则来确定, 这是一种最近邻法的取舍。假定我们想延时 τ , 那么具体的延时节数:

$$L = \text{int}(\tau/T_s) \quad (5)$$

$\text{int}(\bullet)$ 表示四舍五入取整运算, 这种运算确保延时补偿的误差在 $[-T_s/2, T_s/2]$ 内分布。

2) sinc 函数插值法

对一个连续时间信号 $x(t)$ 可以任意延时 τ 之后得到 $y(t)$, 即

$$y(t) = x(t - \tau) \quad (6)$$

经过傅里叶变换得到其频域形式为:

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - \tau) e^{-j\omega t} dt = e^{-j\omega\tau} X(\omega) \quad (7)$$

将信号进行耐奎斯特采样定理下的采样周期 T_s 的离散化, 可以得到:

$$\begin{aligned} y(n) &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k) \text{sinc}(n - D - k) \\ &= x(n) * \text{sinc}(n - D) = x(n) * h(n) \end{aligned} \quad (8)$$

从上面的推导可以看出, 对信号进行延时等价于将信号送入一个特殊的滤波器处理, 该滤波器可以对信号进行分数时延, 从而对宽带信号的精确时延成为可能。具有 $h(n) = \text{sinc}(n - D)$ 特性的滤波器称之为分数时延滤波器。

3) FFT 相移

由傅立叶变换的时间移位性质, 对于 $x(n)$ 和 $x(n + m)$, $x(n)$ 对应的傅里叶级数为 $X(k)$, 那么 $X_1(k) = W_N^{-km} X(k)$, 其中 $W_N = \exp(-j2\pi/N)$ 可将(4)式表达为频域离散化形式, 即

$$\begin{aligned} Y_m(f_k) &= \sum_{i=1}^P a_m(\theta_i) \otimes a(\theta_i) X_i(f_k) \cdot \exp(-j2\pi f_k \tau_m(\theta_i)) \\ &\quad + N_m(f_k) \cdot \exp(j2\pi f_k \tau_m(\theta_i)) \end{aligned} \quad (9)$$

上式即为阵元信号的频域形式, 我们发现可以将信号时域的时延在频域通过相移的方式来实现, 即插入相移因子 $\exp(j2\pi f_k \tau_m(\theta_i))$ 补偿角度引起的各路通道信号不一致, 称这种方法为VFFTABF, 由于在该算法实现中可以采用FFT, 可以大大降低运算量。

4. VFFTABF 算法流程

根据前面对矢量阵信号模型和精确时延的分析, 我们将傅里叶变换应用到矢量阵宽带波束形成之中, 其主要流程可以整理如下(图1):

- 1) 对3M路离散化实信号进行滤波处理;
- 2) 将滤波后的3M路离散化声压振速信号的一次N点长度的快拍数据做FFT处理;
- 3) 将信号的正频乘以相移因子消除时延的影响 $\exp(j2\pi f_k \tau_m(\theta_i))$;
- 4) 进行波束形成。

5. 实验仿真

5.1. 时延补偿对信号的影响

下面通过仿真产生两路宽带线性调频信号实验分析验证常规时延方法(最近邻法)、矩形加窗sinc函数插值时延方法以及FFT相移方法对信号的影响。线性调频信号与各种环境噪声相关性小, 具有容易检测的特点。其数学表达形式为:

$$x_i(n) = A_i \cos \left\{ 2\pi \left(f_0 [n - D(i-1)] + \frac{1}{2} K [n - D(i-1)]^2 \right) \right\} \quad (10)$$

式中, A_i 是线性调频信号的幅值, f_0 和 K 分别是其初始频率和调频斜率, 且有 $K = B/T$, B 为信号带宽, T 为截取信号的时间长度。

为了判断经时延处理之后两个信号是否在时间上完全一致, 我们选取两个信号之间的相关系数来衡量, 相关系数可以用如下公式表示:

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N \left\{ \left(x_i(n) - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_i(m) \right) \left(x_j(n) - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_j(m) \right) \right\}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \left(x_i(n) - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_i(m) \right)^2 \cdot \sum_{n=1}^N \left(x_j(n) - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_j(m) \right)^2}} \quad (11)$$

从上式可以知道，如果两个信号完全一致，则 $\rho=1$ ；若两个信号存在时延误差，则有 $\rho < 1$ ，且信号之间的时延误差越小则相关系数 ρ 越大。

固定两个信号之间的时延真实值为 $D = 4.45$ ，分别利用常规时延方法(最近邻法)，矩形加窗sinc函数插值法、FFT相移法对信号进行时延处理。由于 $f_0 = 1 \text{ kHz}$ ， $B = 1 \text{ kHz}$ ，取 $f_s \in [4, 8] \text{ kHz}$ ，针对不同采样率的情况，我们对信号采用不同的时延方法进行处理，求解两路信号求相关系数，进行信号相关性的比对。

从图 2 中我们发现，利用常规时延方法(最近邻法)进行信号时延补偿的信号相关性最差，矩形加窗 sinc 函数插值法与 FFT 相移法的相关性都非常好，其相关系数达到 0.9996，性能相当。随着采样率的提高，常规时延方法(最近邻法)对信号进行时延补偿后，两路信号之间的相关性逐渐提高。

设置两个信号之间的时延真实值为 $D \in [4.5, 6.0]$ ，选取线性调频信号， $f_0 = 1 \text{ kHz}$ ， $B = 1 \text{ kHz}$ ，信号采样率为 $f_s = 6 \text{ kHz}$ 。

从图 3 中我们发现，矩形加窗 sinc 函数插值法与 FFT 相移法进行信号时延补偿的信号相关性最好，相关系数可达到 0.9996，其在图中的相关系数曲线出现了重叠。常规时延方法对信号进行时延补偿后的相关性与时延的大小有关。

5.2. 改进常规波束形成仿真

考虑 16 阵元矢量波束形成，信号频率为 500 Hz，单次快拍长度 2048 点，采样率 4000 Hz。假设信号与加性噪声互不相关，加性噪声均为高斯白噪声，阵列孔径在信号中心频率对应波长 λ 范围内，入射信号方位角为 230 度。分别仿真计算了 VCBF (最近邻时延)、sinc-VCBF (矩形窗 sinc 函数插值时延)与 VFFTABF (FFT 相移时延)三种波束形成方法，仿真结果如图 4 至图 7 所示。

从仿真结果图 4、图 5 可以知道，矢量阵波束形成具有分辨左右舷的能力。对比图 4、图 5 和图 6 可以看出 VCBF 产生了比较多的伪峰，并且波束形成图不平滑，而 sinc-VCBF 结果较为平滑。图 7 表明矩形加窗 sinc 函数插值法和 FFT 相移法的处理效果优于 VCBF，具有更低的旁瓣级，sinc-VCBF 与 VFFTABF 相比性能基本相当。

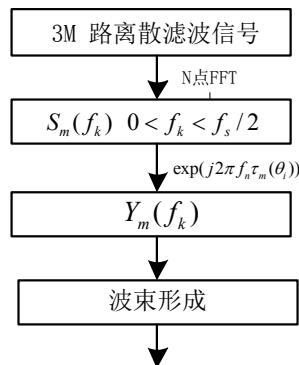


Figure 1. The algorithm flow of vector array conventional beamforming based on fourier transform

图1. 基于傅里叶变换的矢量阵常规波束形成算法流程

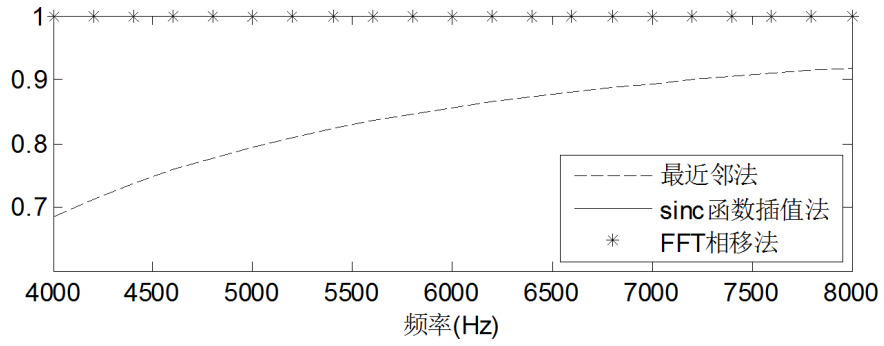


Figure 2. Different time delay method on different sampling rate
图2. 不同采样率下各时延方法性能对比

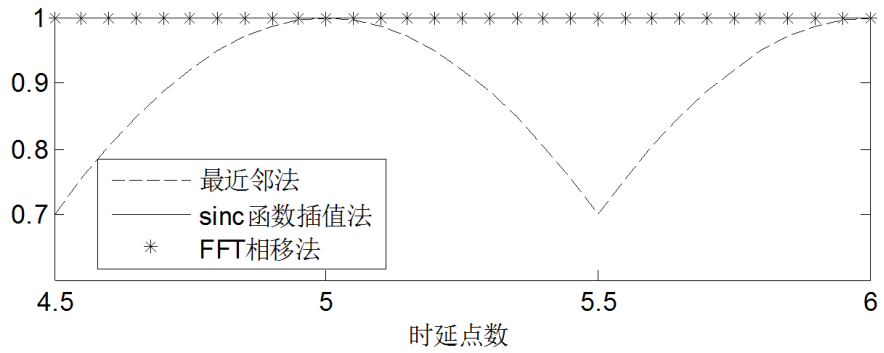


Figure 3. The algorithm flow of vector array conventional beamforming based on Fourier transform
图3. 不同时延下各时延方法性能对比

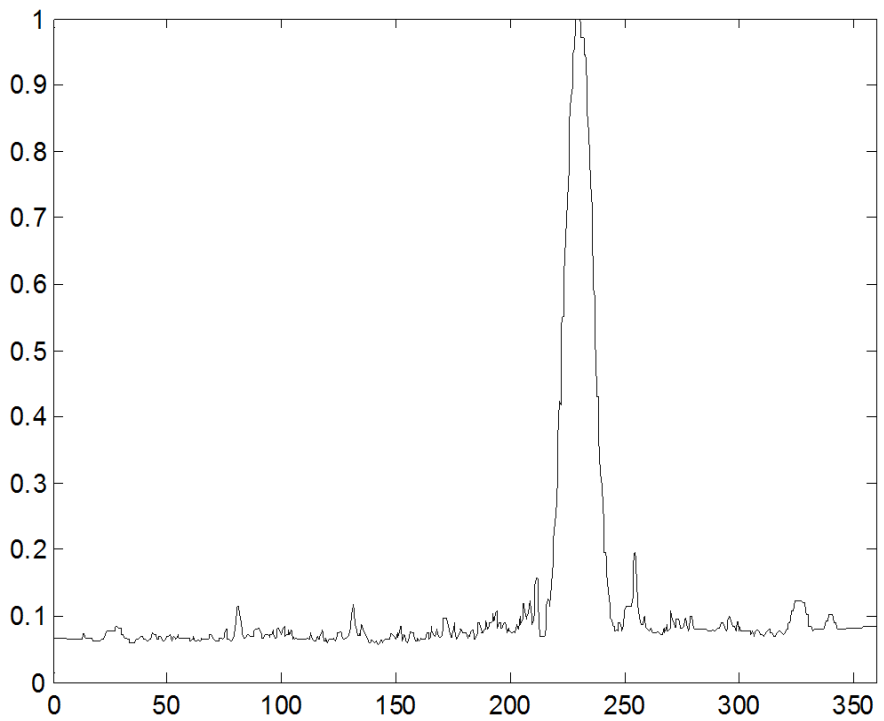


Figure 4. The result of VCBF
图4. VCBF结果

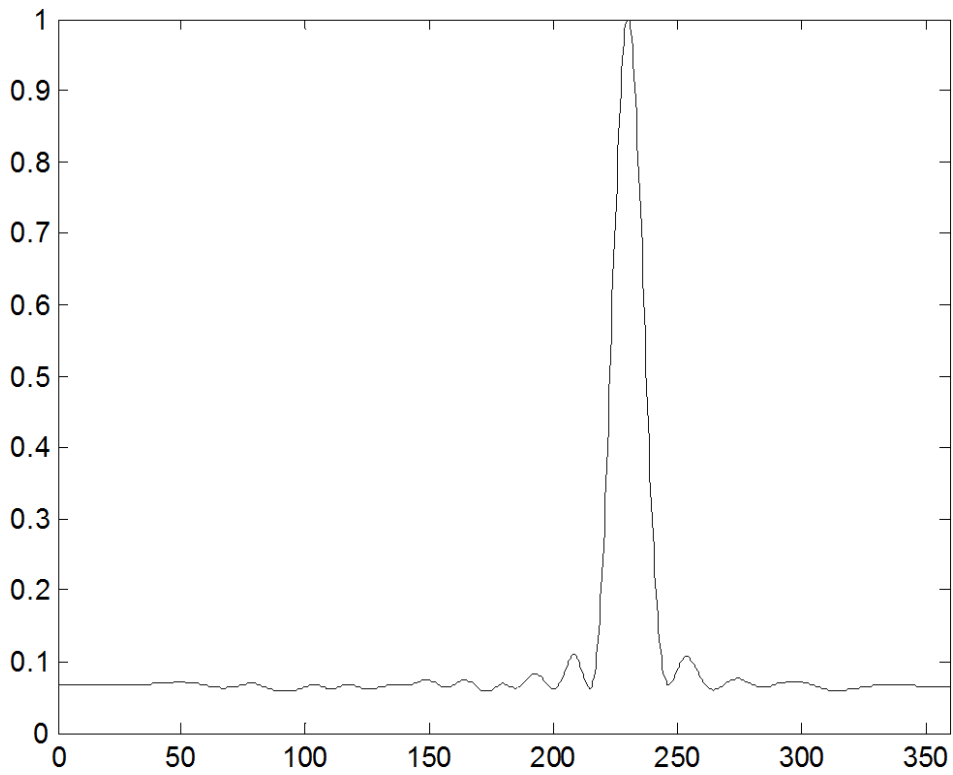


Figure 5. The result of sinc-VCBF
图5. Sinc-VCBF结果

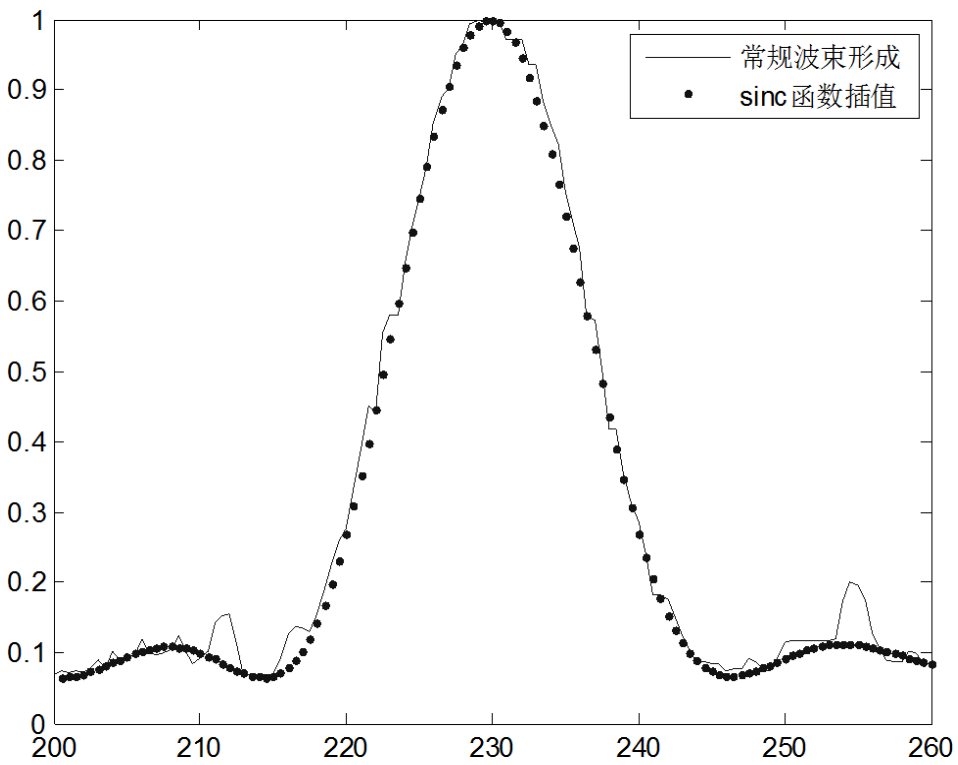


Figure 6. The result comparison of sinc-VCBF and VCBF
图6. VCBF与sinc-VCBF结果对比

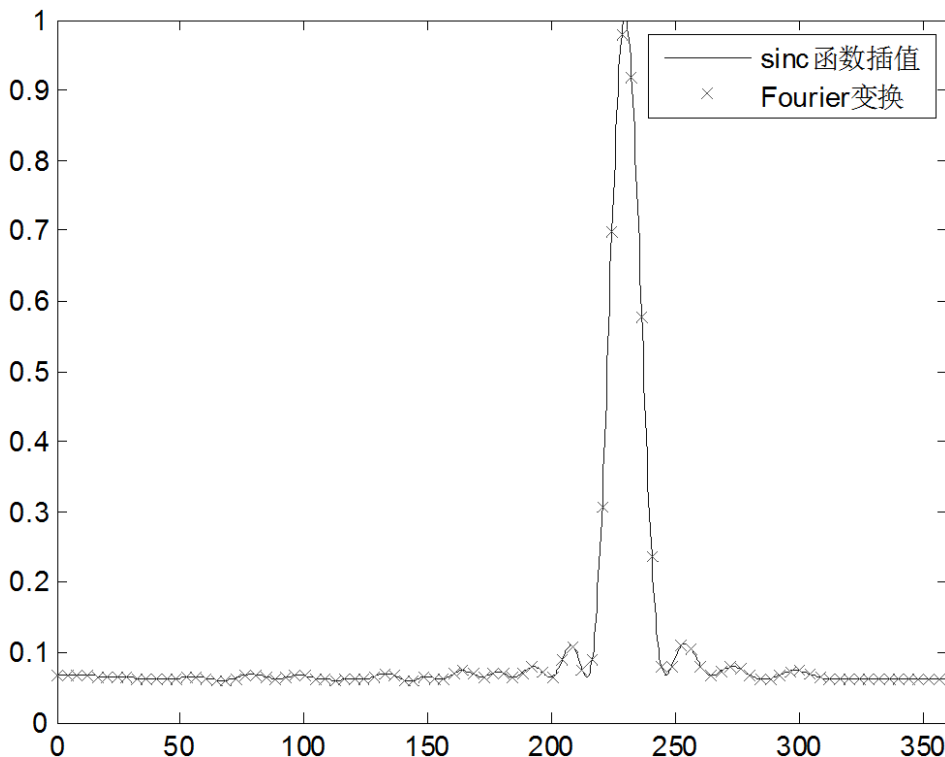


Figure 7. The result comparison of sinc-VCBF and VFFTABF
图7. VFFTABF与sinc-VCBF结果对比

Table 1. Comparison of algorithm processing time
表1. 算法处理时间对比

方法	VCBF	sinc-VCBF	VFFTABF
用时(秒)	59.58	135.97	47.48

5.3. 运算量对比

运算采用的台式机处理器为 Inter(R) Core(TM)2 i7-4770, 处理频率 3.40 GHz, 内存 4.00 GB。运算所用软件为 Matlab R2012a, 运算时间通过 Matlab 软件中的 CPU Time 获得。经过 100 次蒙特卡洛实验, 每次处理的点数, 即一次快拍长度为 2048 点, 每次完成 100 次波束形成。所需用的平均时间如表 1 所示。

从中可以发现, VFFTABF 方法执行速度最快并且性能优于 VCBF。

6. 结论

通过理论和仿真分析了常规时延方法最近邻法、矩形窗 sinc 函数插值法以及 FFT 相移法对阵列接收信号的影响, 矩形窗 sinc 函数插值法以及 FFT 相移法对信号进行时延补偿可以提高信号之间的相关度, 性能优于最近邻法。同时给出了频域分子带相移的矢量阵常规波束形成算法, 以及实现流程, 利用三种延时方法的矢量阵波束形成仿真结果可以看出, 虽然 sinc-VCBF 有较好性能, 但是运算速度较慢, 而 VFFTABF 比 sinc-VCBF 和 VCBF 执行速度更快, 且性能较优, 更利于工程实现。

参考文献 (References)

[1] 孙贵青, 张春华, 黄海宁, 李启虎. 声矢量传感器线阵的左右舷分辨[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7):

848-588.

- [2] 田坦, 齐娜, 孙大军. 矢量水听器阵波束域 MVDR 方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(3): 295-298.
- [3] 王绪虎, 陈键峰, 韩晶, 金勇. 单个压差式矢量水听器 MVDR 波束形成的优化研究[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 434-439.
- [4] 周伟, 惠俊英. 基于声矢量自适应干扰抵消的逆波束形成[J]. 兵工学报, 2010, 31(9): 1188-1192.
- [5] 杨秀庭, 孙贵青, 陈新华, 李启虎. 矢量水听器阵列 MVDR 波束形成器的性能研究[J]. 应用声学, 2007, 26(1): 8-15
- [6] 惠俊英, 刘宏, 余华兵, 范敏毅. 声压振速联合信息处理及物理基础初探[J]. 声学学报, 2000, 25(4): 303-307.
- [7] 陈阳, 惠俊英. 声矢量阵导向最小方法波束形成算法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(11): 1199-1204.
- [8] 张小飞, 汪飞, 徐大专, 等. 阵列信号处理的理论和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [9] 李启虎. 声纳信号处理引论[M]. 北京: 海军出版社, 2000.
- [10] 许忠良, 杨威武, 李智忠, 等. 基于分数时延的 TAMVDR 宽带波束形成方法[J]. 信号处理, 2012, 28(12A): 52-56.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jisp@hanspub.org