

基于信号相位匹配原理的广义相关时延估计*

孙进才 朱维杰 肖 卉 孙轶源 王慧慧

西北工业大学航海工程学院, 西安 710072

摘要 提出了一种利用信号相位匹配原理估计的线谱相位数据时延估计和广义相关时延估计相结合的时延估计方法, 导出了该方法的时延估计公式. 仿真和海上实航数据处理结果证明了该方法的正确性, 并表明方法具有算法简单, 稳健性好, 可估计非整数倍时延, 提高了低信噪比条件下的时延估计精度, 具有重要的工程应用前景.

关键词 信号相位匹配原理 广义相关 时延估计 线谱

时延估计是目标定位跟踪系统关键技术, 在声呐、雷达、地震、地球物理勘探, 生物医学等领域广泛应用^[1,2], 因此时延估计一直是信号处理的一个重要研究方向, 时延估计的基本方法是互相关法^[3], 但由于实际环境中环境噪声和各种干扰的影响, 相关法时延估计性能不能令人满意, 因此几十年来研究者通过各种不同的方法来改善时延估计的精度. 广义相关法根据不同最优准则^[4,5], 对输入信号进行加权处理, 提高了信噪比, 使相关峰变得更尖锐, 从而提高了时延估计性能, 但其性能依赖于信号和噪声的统计特性, 而实际情况下, 信号与噪声的统计特征是难以预测的, 因此广义相关法的时延估计性能随着信噪比的降低而迅速下降, 而且广义相关法只能估计整数倍时延. 基于自适应滤波的时延估计^[6,7], 基于小变换的时延估计^[8-10], 基于相位数据时延估计^[11,12]和基于高阶统计量的时延估计^[13-15]是近年来广义相关法时延估计的重要发展.

自适应滤波的时延估计也称为最小均方误差法, 它是采用最小均方误差准则下的 LMS 迭代算法^[6,7], 该算法简单, 运算量小, 它的缺点是滤波器的阶数不能太小, 否则无法确定真实时延值; 迭代步长不能过小, 否则收敛速度太慢, 另外该算法

只适用于估计整数倍时延值. 因此按照某种准则发展了一种约束类的自适应时延估计算法^[16-18], 它们能够估计非整数的时延值. 陈华伟等^[19]提出了一种二次加权频域自适应时延估计方法, 用频域相乘代替时域卷积降低了计算量, 同时免去迭代时的插值运算, 加快了收敛速度.

基于高阶统计量的时延估计方法是利用高阶统计量处理可有效抑制 Gauss 和非 Gauss 有色噪声的影响而提高信噪比, 在相关噪声条件下能获得比广义相关法更好的时延估计性能^[13-15, 20], 但利用高阶统计量的时延估计需要更长的数据长度和更大的计算量^[15].

基于小波变换的时延估计利用了小波变换信噪分离和多尺度分析的性质, 提高了时延估计精度, 但缺点是无法确定在哪一个尺度上能给出时延估计的真值.

基于相位数据的时延估计是利用的两路信号的互相关谱的相位来估计信号之间的延迟, 它的估计性能可接近广义相关法中最大似然估计, 而且避免了为提高相关法估计精度的插值运算.

本文提出一种利用信号相位匹配原理估计的两路信号中的“线谱”信号相位信息和广义相关法时延估计相结合的时延估计方法, 该方法不仅能估计

2004-05-14 收稿, 2004-07-20 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 60272077)、航空科学基金(批准号: 02F53030)和陕西省自然科学基金(批准号: 2002F17)资助项目

E-mail: jcsun@nwpu.edu.cn

非整数时延, 又能弥补低噪声情况下广义相关时延估计法估计稳健性差的不足.

1 确知频率信号的相位及时延估计

设由两个空间分开的传感器的接收信号的离散形式分别为

$$x_1(k) = s_1(k) + n_1(k), \quad (1)$$

$$x_2(k) = \alpha s_1(k - D) + n_2(k), \quad (2)$$

式中 $s_1(k)$ 是目标信号源发出的信号; $n_1(k)$ 和 $n_2(k)$ 分别表示加性随机噪声, D 为待估计的时间延迟, 也就是信号到达第一个传感器和第二个传感器的传播时间差, α 为比例系数.

实际目标信号, 如舰船辐射噪声, 直升机辐射噪声的频谱具有线谱和连续谱的形式, 通常情况下, 线谱强度比连续谱强度高 10—20 dB, 因此利用线谱信号的相位差就可以确定时延 D . 文献[21, 22]提出了利用信号相位匹配原理的正弦信号参数估计方法, 它可较精确地估计出低信噪比条件下的信号相位.

对传感器 1 的接收信号 $x_1(n)$, 依次取相隔时间为 τ ($\tau = 1/f_s$, f_s 为采样频率) 的 M 段长度为 N 的信号得

$$x_m(i) = s[i + (m - 1)] + n_1[i + (m - 1)], \quad (3)$$

其中 $i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, $m = 1, 2, \dots, M$, $s(i)$ 为单频正弦信号, $n(i)$ 为 Gauss 白噪声. 对式(3)作离散 Fourier 变换得

$$x_m(k) = S_1(k) W_N^{-(m-1)k} + N_m(k), \quad (4)$$

如果 FFT 的样本长度 N 远大于方程组数 M 那么方程(4)可以改写为^[20]

$$x_m(k) = S_1(k) W_N^{-(m-1)k} + N_m(k), \quad (5)$$

若已知信号线谱频率为 k_0 , 根据信号相位匹配原理^[21, 23], 用 $W_N^{(m-1)k}$ 乘(5)式两边, ($m = 1, 2, 3, \dots, M$) 当 $k = k_0$ 时方程(5)变为

$$X_m(k_0) W_N^{(m-1)k_0} = S_1(k_0) + N_m(k_0). \quad (6)$$

设 $X'_m(k_0) = X_m(k_0) W_N^{(m-1)k_0}$. 将(6)式右边的 $S_1(k_0)$ 移至左边, 然后求模的平方得(为简便, 省去括号中的 k_0)

$$\begin{aligned} |X'_m|^2 + |S_1|^2 - 2\text{Re}X'_m \text{Re}(S_1) - \\ 2\text{Im}(X'_m) \text{Im}(S_1) = |N_m|^2. \end{aligned} \quad (7)$$

用(7)式中 $m = 1$ 时的式两边依次减 $m = 2, 3, \dots, M$ 时式的两边得 $(M - 1)$ 个线性方程,

$$\begin{aligned} 2\text{Re}(X'_1 - X'_n) \text{Re}S_1 + 2\text{Im}(X'_1 - X'_n) \text{Im}S_1 = \\ (|X'_1|^2 - |X'_n|^2) + (|N_1|^2 - |N_n|^2), \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $n = 2, 3, 4, \dots, M$; Re 和 Im 分别表示取复数的实部与虚部.

因为对于噪声序列, N 个数据中最多有 M 个数据不同, 当 $N \gg M$ 时, (8)式右边第二项是小量, 但不为零, 因此方程(8)是一组超定方程, 我们用 $(M - 1)$ 个方程采用最小二乘的方法求解两个未知数 $\text{Re}S_1$ 和 $\text{Im}S_1$, 这样求解的期望信号 S_1 是均方误差最小意义下的解, 将方程(8)写成矩阵形式

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{S} = \mathbf{P} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (9)$$

式中

$$\mathbf{A} = 2 \cdot \begin{bmatrix} \text{Re}(X'_1 - X'_2) & \text{Im}(X'_1 - X'_2) \\ \text{Re}(X'_1 - X'_3) & \text{Im}(X'_1 - X'_3) \\ \vdots & \dots \\ \text{Re}(X'_1 - X'_M) & \text{Im}(X'_1 - X'_M) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \text{Re}S_1 \\ \text{Im}S_1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} |X_1|^2 - |X_2|^2 \dots |X_1|^2 - \\ |X_3|^2 \dots |X_1|^2 - |X_M|^2 \end{bmatrix}^T,$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} |N_1|^2 - |N_2|^2 \dots |N_1|^2 - \\ |N_3|^2 \dots |N_1|^2 - |N_M|^2 \end{bmatrix}^T,$$

那么期望信号 S_1 的最小二乘解为

$$S = A^+ P, \quad (10)$$

式中 A^+ 表示矩阵 A 的 Moore-Penrose 广义逆, T 表矩阵的转置. 由(10)式求得期望信号 S_1 后, 可求得线谱信号的相位为

$$\varphi_1(k_0) = \arctan \frac{\text{Im}S_1}{\text{Re}S_1} \quad (11)$$

同理, 由方程(11)可求得传感器 2 接收信号 $x_2(n)$ 线谱频率 k_0 的相位为

$$\varphi_2(k_0) = \arctan \frac{\text{Im}(\alpha S_1)}{\text{Re}(\alpha S_1)}, \quad (12)$$

由(11)和(12)式, 可求得时间延迟 D_1 ,

$$D_1 = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{2\pi f_c} \cdot f_s \quad (13)$$

式中 f_c 是线谱频率; f_s 是采样频率; D_1 的单位是采样周期 $\tau = 1/f_s$, 它是信号采样周期 f_s/f_c 内的时延估计.

由 FFT 变换性质可知, 分析获得的线谱, 实际是在带宽 $\Delta f = f_s/N$ 内的中心频率 $f_c = \Delta \cdot (n_c - 1)$, n_c 为线谱 f_c 的频点. 如果实际频率 $f_c \neq f_c$, 那么可以在附近频点按小于 Δf 的带宽搜索求得 f_c [20, 21].

2 大于信号采样周期 τ_s 时的时延估计

首先我们定义一个信号采样周期 $\tau_s = f_s/f_c$. 它的意义是当信号是平稳的(或短时平稳的), 那么频率为 f_c 的信号的周期可用采样周期 τ 表示, τ_s 即是 τ 的倍数(可以是整数或非整数). 因为信号的周期性, 因此利用(13)式的信号相位匹配原理估计的时延 $D \leq \tau_s$, 当 $D > \tau_s$ 时, 就不能估计出时延真值 D . 这时需要对时延真值作出预估, 我们采用广义相关时延估计方法预估出时延值为 D' , 那么可以计算出 $D > \tau_s$ 时的真实时延的信号采样周期数为

$$M'_\tau = (D_1 - D')f_c/f_s = (D_1 + D')/\tau_s, \quad (14)$$

其中, D_1 是(13)式估计的时延. 取 M'_τ 的整数倍 M_τ , 那么当 $D > \tau_s$ 时的时延 D 估计值为

$$D = \frac{2\pi M_\tau - (\varphi_2 - \varphi_1)}{2\pi} \tau_s, \quad (15)$$

(15)式是利用信号相位匹配原理参数估计的相位数据的时延估计和广义相关法时延估计相结合的时延估计公式.

由于在一个信号采样周期内, 对 D' 的估计可允许有 $\pm \tau_s/2$ 的偏差. 这样提高了时延估计的稳健性, 在下面的仿真中将给出本文方法的这一特点.

3 仿真及分析

仿真 1: 信噪比对时延估计的影响

首先, 利用单频信号和设已知预估延迟 D' 条件下, 利用(15)式进行时延估计, 验证公式的正确性以及估计精度与信噪比的关系. 信号模型为

$$x_i(t) = A_i \sin 2\pi f_c [t - D(i-1)] + n_i(t), \quad i = 1, 2. \quad (16)$$

仿真中 $f_c = 1000$ Hz; $A_1 = A_2$, 采样频率为 $f_s = 10000$ Hz; $D = 0.65(\tau)$ 和 $D = 80.45(\tau)$ 两种情况, 图 1(a)和(b)中分别给出了不同信噪比时, 100 次 D 估计的时延、偏差及方差, $n_i(t)$ 是由 matlab 产生的随机噪声, FFT 变换的数据长度 $N = 1024$, 信号相位估计时所取方程数 $M = 12$.

由图 1 可见, 时延估计的偏差和方差随信噪比的增加而减少并趋向于零. 当信噪比大于 -16 dB 时, (a)中非整数时延估计的方差小于 0.2000, 偏差小于 -0.0070 ; 而(b)中 $D > \tau_s$ 时, 方差小于 0.2300, 偏差小于 -0.0750 . 因此时延估计精度是令人满意的, 估计偏差可达到微秒的量级.

仿真 2: 数据长度 N 对时延估计的影响

图 2 给出了信噪比为 0 dB; $D = 60.75$, $f_c = 1000$ Hz, $f_s = 1000$ Hz 时, FFT 变换数据长度 N 不同(分辨率不同)时, 100 次 D 估计的时延、及其偏差和方差.

由图 2 可见, 时延估计误差随 N 的增加而减小, 这与文献[22]中分析的正弦信号参数估计的精

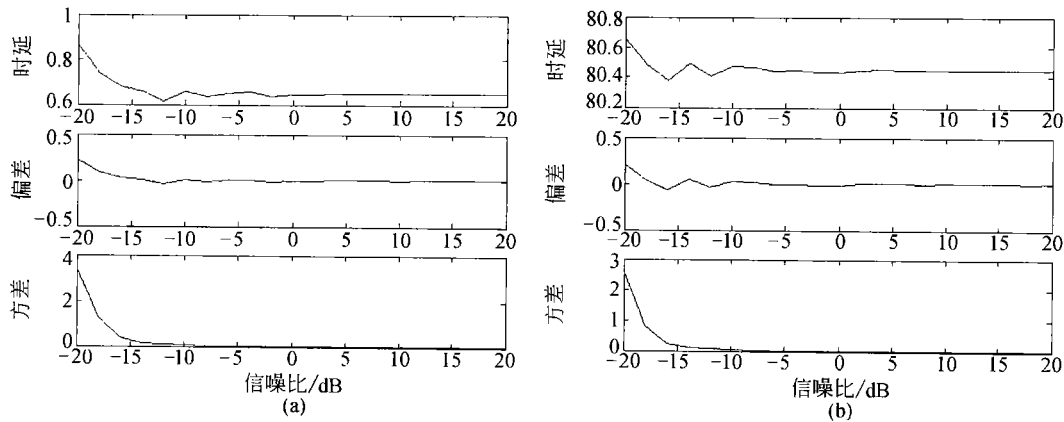


图1 时延估计与信噪比的关系

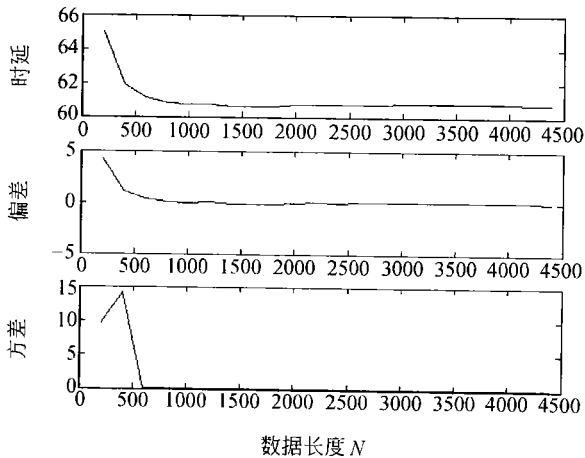
(a) $D = 0.65(\tau)$; (b) $D = 80.45(\tau)$ 

图2 时延估计误差与 N 的关系

度随 N 增加而提高的结论是一致的, 当 N 增加, 信号参数估计的精度提高, 但 N 增加, 时延估计的计算时间亦相应增加.

仿真3: 时延预估值 D' 对时延估计的影响

图3中(a)和(b)给出了 $D = 60.75$, 当预估值分别为 $D' = 60 - 4$ 和 $D' = 60 + 4$ 时的时延估计, 因为 $f_s = 10000$ Hz, $f_s = 1000$ Hz, 所以信号采样周期 $\tau_s = 10(\tau)$, 因此 D' 分别取 56 和 64, 以验证公式(15)的稳健性.

由图3可见, 即使时延预估值与真值整数偏离 -4 和 $+4$ ($< \tau_s/2$), 仍然能准确估计时延真值, 但是随着偏离值的增大, 准确估计时延的信噪比要增大. 只要预估值与时延真值偏差 $< \tau_s/2$, 当信噪比 $S/N > -16$ dB 时, 估计时延趋于时延真值, 说明

了本文方法的稳健性.

仿真4: 宽带信号的时延估计

根据本文提出的时延估计方法, 宽带信号的时延估计的步骤是:

(1) 由两路传感器接收信号, 利用广义相关法(本文使用 Wiener 加权的广义相关法)预估时延 D' ;
(2) 对一路传感器接收信号作 FFT 变换, 确定“线谱”频率 f_c ;

(3) 对确定频率 f_c , 确定两路传感器接收信号 f_c 的相位, 并有(13)式确定时延量 D_1 ;

(4) 由 D' 和 D_1 和公式(14)确定时延信号采样周期数 M_r ;

(5) 由式(15)计算实际时延 D .

仿真中, $x_1(k)$ 是实际船舶噪声, 信号采样频率 $f_s = 10000$ Hz. 根据 $x_1(k)$, 产生具有任意时延量的信号 $x_2(k - D)$. $n_1(k)$ 和 $n_2(k)$ 为随机噪声.

图4给出了时延真值为 75.52 时, 不同信噪比情况下, 100 次估计的时延平均值, 偏差和方差(图中用—表示). 并在图4中同时给出了广义相关法 100 次估计的时延平均值, 偏差和方差(图中用- * -表示), 作为两种方法的对比.

由图4可见, 本文方法时延估计性能优于广义相关法, 在高信噪比时, 由于广义相关法只能估计整数倍时延, 在高信噪比时尽管估计方差趋于零, 但总是存在一个固定的非整数部分时延偏差. 而本文方法可估计非整数倍时延, 因此偏差和方差随信噪比的增大而同时趋向于零.

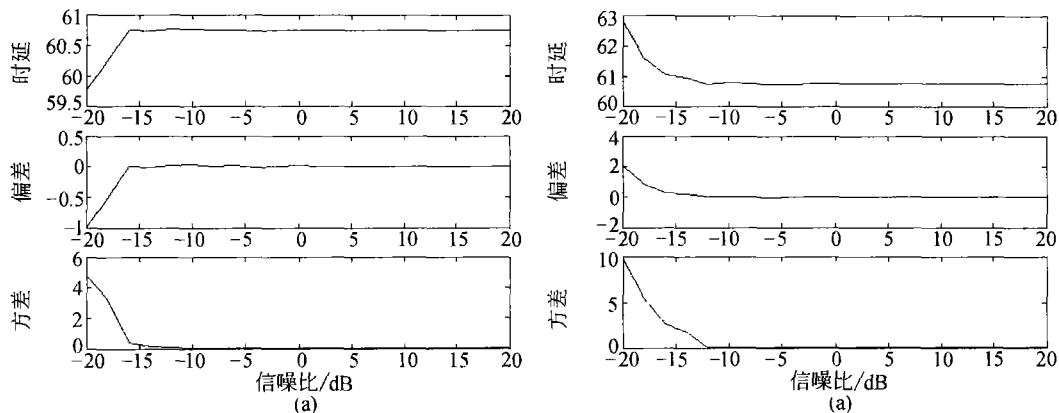


图3 预估时延 D' 对时延估计的影响

(a) $D' = 56$; (b) $D' = 64$

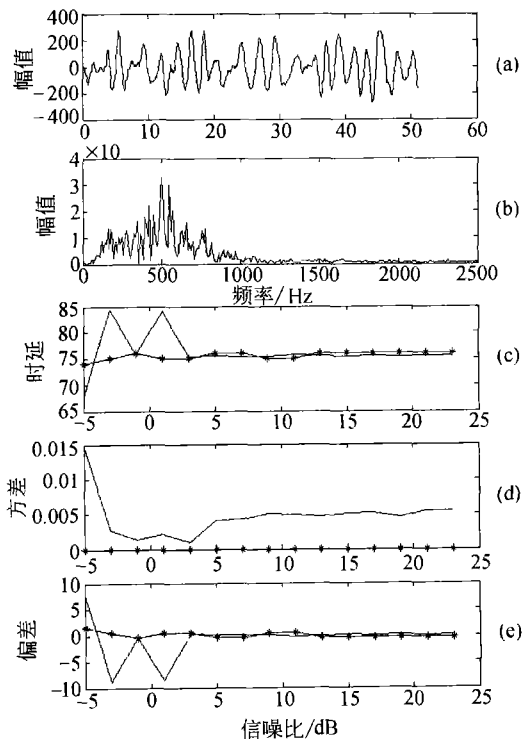


图4 宽带信号的时延估计

(a) 舰船信号; (b) 舰船信号谱; (c) 时延估计;
(d) 方差; (e) 偏差

4 海上实验数据处理

海上目标航行定向实验测量阵为8元线列阵, 阵元间距为0.5m. 目标艇为摩托艇, 沿着与阵法线夹角为 θ 方向作直线运动, 航速为14—18kn. 利用文献[24]的相位匹配原理的线谱定向方法和时延

估计方法(本文和广义相关时延估计方法)进行目标艇定向. 目标噪声数据采样频率 $f_s = 50000$ Hz, FFT数据长度为 $N = 8192$, 分辨率 Δf 约为6.1 Hz, 按照仿真2分析, $\Delta f = 10$ Hz, 可保证相位估计精度. 表1给出了一次采样的相邻阵元的时延估计及其平均方位估计, 同时给出了利用文献[24]估计方向. 搜索角度范围 $-90^\circ \sim 90^\circ$, 搜索角步长 $\Delta\theta = 1^\circ$. 因为目标运动方向角是与阵法线之间的夹角 θ , 因此由时延计算方位角的公式为

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{cD}{d}, \quad (17)$$

其中 c 为声速; d 为阵元间距; D 为估计时延.

$D_{i+1,i}$ ($i = 1, 2, 3 \dots 7$) 表示阵元 $i+1$ 与 i 之间的时延.

表2给出了0.1s内估计的平均时延及方向, 估计间隔为0.01s, 也就是估计10次后取平均.

利用文献[24]方法定向时的搜索角步长为 1° , 利用的线谱频率为122.0703Hz.

图5给出了信号波形、频谱、搜索指向性和方向搜索结果.

由表1和表2可见, 利用本文的时延估计方法确定的目标方向和利用文献[24]方法对目标定向结果是基本一致的, 偏差小于 1.5° , 而利用广义相关法估计时延计算的声源方向与文献[24]估计结果的偏差大于 7° . 因此实航数据处理结果也说明本文时延估计方法的有效性.

表1 目标方向估计(1次)

	时延(单位: $\tau = 1/f_c$)						方向($^\circ$)			
	D_{21}	D_{32}	D_{43}	D_{54}	D_{65}	D_{76}	D_{87}	本文时延估计	广义相关时延估计	文献[24]
广义相关法	-13.00	-14.00	-12.00	-13.00	-13.00	-12.00	-13.00	-40.76	-50.48	-44.00
本文方法	-9.56	-13.31	-13.12	-9.46	-9.47	-13.68	-7.57			

表2 目标方向估计(10次)

	时延(单位: $\tau = 1/f_c$)						方向($^\circ$)			
	D_{21}	D_{32}	D_{43}	D_{54}	D_{65}	D_{76}	D_{87}	本文时延估计	广义相关时延估计	文献[24]
广义相关法	-13.00	-13.80	-12.00	-13.00	-13.00	-12.00	-13.00	-41.72	-50.33	-43
本文方法	-9.15	-13.82	-11.84	-9.98	-10.42	-11.67	-10.75			

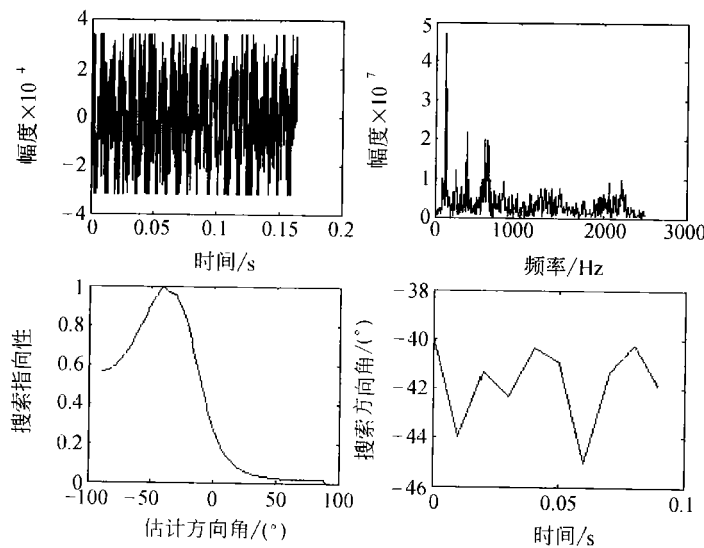


图5 实航目标信号及其方向估计

5 结论

本文提出的利用信号相位匹配原理的信号线谱相位数据的时延估计和广义相关法时延估计相结合的时延估计方法,具有下述优点:

- (1) 算法简单,物理意义明确,适合于工程应用;
- (2) 不仅可以估计整数倍的时延,而且可以估计非整数倍时延,因利用线谱相位数据,提高了低噪声情况下的时延估计精度;
- (3) 利用广义相关法进行时延预估计,允许存在 $\pm \tau_c/2$ 偏差,从而提高了时延估计的稳健性。

参 考 文 献

- 1 Chen T. Highlights of statistical signal and array processing. IEEE Signal Processing Magazine, 1998, 16(5): 21—64
- 2 Quazi A H. An overview on the time delay estimate in active and passive systems for target localization. IEEE Trans ASSP, 1981, 29(3): 527—533
- 3 Davenport W B, et al. Probability and Random Processes. New York: McGraw-Hill, 1970
- 4 Knapp C H, et al. The Generalized correlation method for estimation of time delay. IEEE Trans ASSP, 1976, 24(4): 320—326
- 5 Carter G C. Time delay estimation for passive sonar signal processing. IEEE Trans ASSP, 1981, 29(3): 463—470
- 6 Feintuch P L, et al. Time delay estimation using the LMS adaptive filter-dynamic behaviour. IEEE Trans ASSP, 1981, 29(3): 561—571
- 7 Youn D H, et al. On using the LMS algorithm for time delay estimation. IEEE Trans ASSP, 1982, 30(5): 789—801
- 8 Ching P C, et al. On wavelet denoising and its application to time delay estimation. IEEE Trans SP, 1999, 47(10): 2879—2882
- 9 Guerbi C, et al. Methods based on wavelets for time delay estimation of ultrasound signals. Electronics Circuits and Systems, IEEE International Conference on, 1998, 3: 113—116
- 10 行鸿彦, 刘照泉, 万明习. 基于小波变换的广义相关时延估计算

- 法. 声学学报, 2002, 27(1): 88—93
- 11 Piersol A G. Time delay estimation using phase data. IEEE Trans ASSP, 1981, 29(3): 471—477
- 12 赵真, 侯自强. 广义相位谱延时估计. 声学学报, 1985, 10(4): 201—209
- 13 Tugnail J K. On time delay estimation with unknown spatially correlated Gaussian noise using fourth-order cumulants and cross cumulants. IEEE Trans SP, 1991, 39(6): 1258—1267
- 14 Hinich M J, et al. Time delay estimation using cross bispectrum. IEEE Trans SP, 1992, 40(1): 106—113
- 15 黄清. 相关域双谱时延估计方法. 声学学报, 2003, 28(1): 57—60
- 16 Ching P C, et al. Adaptive time delay estimation with constraints. IEEE Trans ASSP, 1988, 36(4): 599—602
- 17 So H C, et al. A new algorithm for explicit adaptation of time delay. IEEE Trans SP, 1994, 42(7): 1816—1820
- 18 So H C, et al. Performance analysis of ETDGE—an efficient and unbiased TDOA estimator. IEEE Proc Radar Sonar Navigation, 1998, 145(6): 325—330
- 19 阵华伟, 赵俊渭, 等. 二次加权频域自适应时延估计算法与应用. 声学学报, 2003, 28(1): 61—65
- 20 Wu Y. Time delay estimation of non-Gaussian signal in unknown Gaussian noises using third-order cumulants. Electronics Letters, 2002, 38(16): 930—931
- 21 孙轶源, 朱维杰, 孙进才, 等. 利用信号相位匹配原理的正弦参数估计. 自然科学进展, 2001, 11(11): 1216—1220
- 22 孙进才, 朱维杰, 孙轶源, 等. 信号相位匹配原理的正弦信号参数的最小二乘估计. 自然科学进展, 2004, 14(10): 1204
- 23 孙进才, 朱维杰, 孙轶源. 利用三元阵的相干干扰抵消原理及仿真研究. 声学学报, 2001, 26(6): 537—544
- 24 孙进才, 朱维杰, 王惠刚, 等. 多子阵信号相位匹配原理的信号最小二乘解. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(4): 365—372

第六届东北亚纳米科学与技术国际研讨会在上海召开

为了促进亚洲地区纳米科技研究领域的交流与发展, 由国家自然科学基金委员会、韩国科学与工程基金委员会及日本学术振兴会共同举办的第六届东北亚纳米科学与技术国际研讨会, 于2004年5月7—9日在上海市复旦大学召开. 包括国家自然科学基金委员会副主任朱道本院士、中国科学院副院长白春礼院士、中国科技大学副校长侯建国院士等28名中方代表; 著名的固体物理学家 Zheong G. Khim 教授等27名韩方代表; 著名超分子化学家 Makoto Fujita 教授、著名高分子化学家 Takuzo Aida 等5名日本代表; 著名材料学家李述汤等4名香港代表; 第三世界科学院院长、著名材料化学家、印度科学院院士 C. N. Rao 教授等来自中国、日本、韩国、印度等国家和中国香港地区的60余名活跃在纳米科技领域并在国际相关领域享有盛名的科学家应邀出席了本次大会. 会议共进行了7个大会特邀报告和44个邀请报告, 报告内容以与会学者的最新前沿研究成果为主, 展现出纳米科技这一新兴领域丰富的创造力和年轻的生命力.

本次研讨会集中体现了当今纳米科技领域发展的3个重要趋势, 暨纳米材料的合成表征、纳米结构的物化性质表征、纳米器件的构筑和功能评估. 从基础研究的角度来看, 发现新的纳米结构, 并以这些纳米结构为基本模型, 建立新的理论体系, 研究新的物化性能已经是一个相当成熟的研究领域; 而从应用研究的角度来看, 纳米结构的器件化研究依然是该领域的最终需求.

(1) 纳米材料的合成、表征设计与制备: 目前纳米材料的合成研究已经不仅局限于零维或一维结构的控制合成, 实现这些结构单元的周期性组装, 并进一步服务于器件化研究, 已经成为该领域所面临的巨大挑战.

(2) 纳米结构的物化性质表征、组装与功能: 以纳米结构为模型, 进行一些光、电、磁性质研究, 不仅可以丰富少量原子聚集体的理论研究, 同样也是为构筑纳米器件提供基础理论依据, 筛选适合的结构单元.

(3) 纳米器件的构筑和功能评估, 纳米器件与纳米技术的应用: 以低级纳米结构为基本单元, 可以获得一些简单的纳米器件, 探索这些器件的光、电性能, 是利用纳米技术实现器件小型化的重要基础研究.

本次会议为与会学者提供了充分交流和探讨的空间, 展示了东北亚地区纳米科技研究的最高研究水平, 促进了东北亚地区纳米科技研究的发展.

(供稿: 张永涛 陈 荣)