

基于两次谱分析的时延估计方法研究

张卫平^{1,2†} 张合² 王伟策¹ 刘强¹ 方向¹

(1 解放军理工大学工程兵工程学院 南京 210007)

(2 南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要 时延估计是目标定位跟踪系统的关键技术之一,在水声、雷达、声探测等领域广泛应用。时延估计的基本方法是互相关法和相位谱法。互相关法时延估计分辨率与信号带宽近似成反比,因此很难估计多目标时延。相位谱时延估计只能估计单目标时延,并且存在相位解绕问题。本文提出了两次谱分析时延估计方法,即将互功率谱函数再次进行谱估计,二次谱峰值位置间距即为时延估计,这种方法既能够估计单目标时延,又能够估计多目标时延,并且不用相位解绕。仿真计算验证了两次谱时延估计方法的可行性。

关键词 时延估计, 快速傅立叶变换, 功率谱

Time delay estimation by two times spectral analysis

ZHANG Wei-Ping^{1,2} ZHANG He² WANG Wei-Ce¹ LIU Qiang¹
FANG Xiang¹

(1 *Engineering Institute of Engineering Corps, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007*)

(2 *College of Mechanical Engineering, Nanjing Uni. of Sci. & Tech., Nanjing 210094*)

Abstract Time delay estimation is one of the key techniques on target location and tracking, which widely apply in sonar, radar, acoustic detection etc. Two fundamental methods for time delay estimation are the correlation method and the phase method. The resolution of the correlation method is approximately inversely proportional to the signal bandwidth and so the correlation method can hardly estimate time delay of multi-target. The phase method can only be used to estimate time delay of single target with problem of unwrap phase. A method of time delay estimation by two times spectral analysis, where the time delay is the time interval between peaks of spectrum of the cross power spectral density, is proposed in the paper. It can be used to estimate time delay of

2006-09-01 收稿; 2007-04-04 定稿

作者简介: 张卫平(1973-),男,湖北沙市人,讲师,博士后,研究方向:被动声探测。

张合(1957-),男,教授,博士生导师。

王伟策(1941-),男,教授,本科,博士生导师。

刘强(1973-),男,讲师,博士。

方向(1966-),男,教授,博士生导师。

† 通讯联系人 E-mail: zhangwpsy@163.com

not only single target but also multi-target without unwrap. It's validated by simulation.

Key words Estimation of time delay of arrival, FFT, Power spectrum

1 引言

时延估计是目标定位跟踪系统的关键技术之一,在水声、雷达、声探测等领域广泛应用。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和相位谱法。但由于实际环境中环境噪声和各种干扰的影响,互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。广义互相关法^[1]根据不同最优准则,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,但广义互相关法时延估计分辨率与信号带宽近似成反比,因此很难估计多目标时延。由于功率谱与相关函数互为傅立叶变换,因此,在时间域由相关函数得到的时延信息,同样可以在频域由功率谱的相位谱得到。也就是说,信号之间的相似性,既可以用相关函数比较,也可以用功率谱比较。广义相位谱时延估计^[2,3]针对信号功率谱不够平坦时的时延估计精度下降问题,采取对相位谱的回归直线进行加权平均,从而使时延估计更为精确。但广义相位谱时延估计只能估计单目标时延,并且存在相位解绕问题。

本文提出了两次谱分析时延估计方法,即将互功率谱函数再次进行谱估计,二次谱峰值位置间距即为时延估计。下面将证明,这种方法既能够估计单目标时延,又能够估计多目标时延,并且不用相位解绕。

2 时延估计信号模型

设两个空间分开的传感器接收到的信号分别为

$$x_1(t) = \sum_{m=1}^M s_m(t) + n_1(t) \quad (1)$$

$$x_2(t) = \sum_{m=1}^M a_m s_m(t - D_m) + n_2(t) \quad (2)$$

式中 M 为目标数, $s_m(t)$ 表示第 m 个目标信号, a_m 表示信号衰减系数, D_m 表示时间延迟, $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 分别表示加性噪声。假定 $s_m(t)$ 、 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 均为高斯分布零均值的平稳随机信号,且互不相关。我们的任务是从两个传感器接收到的信号中估计时间延迟即时延 D_m 。

3 时延估计

3.1 时延估计原理

设两传感器接收信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的互功率谱为

$$P_{x_1 x_2}(f) = \sum_{m=1}^M P_{s_m}(f) e^{-j2\pi f D_m} \quad (3)$$

$P_{s_m}(f)$ 为第 m 个目标信号自功率谱。很明显 $P_{s_m}(f) \geq 0$, 所以 $P_{s_m}(f)$ 的傅立叶变换的模在 0 点取极大值

$$|F_{s_m}(g)| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} P_{s_m}(f) e^{-j2\pi f g} df \right| \leq F_{s_m}(0) \quad (4)$$

(3) 式的傅立叶变换为

$$F_{x_1 x_2}(g) = \sum_{m=1}^M F_{s_m}(g) * \delta(g - D_m) \quad (5)$$

从 (5) 式可以看出,时延估计为互功率谱傅立叶变换谱峰,不同时延值对应于二次谱的不同谱峰,所以两次谱分析不但可以估计单目标时延,而且可以估计多目标时延。

3.2 互功率谱 + FFT 时延估计

两传感器接收的信号经放大、滤波、采样、量化后得到离散信号 $x_1(n)$, $x_2(n)$, 假设采样时间 T 足够小,不会引起混叠。采用重叠段的 Welch 方法估计互功率谱^[4]。这一方法把现

有数据 $x_1(n), x_2(n)$, $n \leq N-1$, 分成长度为 L 的 K 个重叠数据段,

$$\begin{aligned} x_{1i}(n) &= x_1(iE+n)w(n) \\ x_{2i}(n) &= x_2(iE+n)w(n) \end{aligned} \quad n \leq L-1, i \leq K-1 \quad (6)$$

E 是偏移长度, $w(n)$ 是长度为 L 的数据窗, 当 $E = L/2$ 为 50% 重叠. 互功率谱估计为

$$\hat{P}_{x_1x_2}(k) = \frac{1}{KL} \sum_{i=0}^{K-1} \left[\sum_{n=0}^{L-1} x_{1i}(n) e^{-j2\pi kn/N} \right] \times \left[\sum_{n=0}^{L-1} x_{2i}(n) e^{-j2\pi kn/N} \right]^* \quad (7)$$

其中, $k < N-1, N > L$. Welch 互谱估计窗函数选择、谱泄漏、偏差等问题可参看相关文献 [4], 此处不再赘述.

由于受目标运动和传输介质扰动影响, 传感器接收的信号是非平稳信号, 但在一定的时间内或 N 取得不是很大时, 接收的信号可以看成平稳信号; 同时受硬件和实时计算限制, 也决定 N 不能取得太大. 在实际应用中, 传感器之间的距离 l 事先是知道的, 所以可以根据声速 c , 预先确定时延值范围 $0 \leq D_m \leq l/c$. l 一

般不大, 所以时延值较小, 因此序列 $\hat{P}_{x_1x_2}(k)$ 一般只包含几个或不到一个周期的信号, 因此为了获得较好的二次谱谱峰估计, 可以采用补零 FFT^[4]、ZoomFFT、CZT^[5] 等细化谱分析方法.

如果采用补零 FFT 变换, 则时延估计为

$$\begin{cases} \hat{D} = NT \frac{k'}{N'}, & k' < N'/2 \\ \hat{D} = -NT \frac{(N' - k')}{N'}, & k' > N'/2 \end{cases} \quad (8)$$

k' 为谱峰位置, N' 为补零后互功率谱序列 $\hat{P}_{x_1x_2}(k)$ 的长度. 从 (8) 式可以看出时延估计的精度为

$$|\Delta D| < \frac{1}{2} \frac{N}{N'} T \quad (9)$$

3.3 互功率谱 + MUSIC 时延估计

多目标同样可以采用 Welch 方法估计互功率谱, 但由于 FFT 二次谱估计分辨率低, 不能分辨较近时延值对应的谱峰, 需采用高分辨率 MUSIC 伪谱^[4] 二次谱估计方法.

由互功率谱序列 $\hat{P}_{x_1x_2}(k)$ 构成 $N \times N''$ 数据矩阵

$$X = \begin{pmatrix} \hat{P}_{x_1x_2}(0) & \hat{P}_{x_1x_2}(1) & \cdots & \hat{P}_{x_1x_2}(N''-1) \\ \hat{P}_{x_1x_2}(1) & \hat{P}_{x_1x_2}(2) & \cdots & \hat{P}_{x_1x_2}(N'') \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{P}_{x_1x_2}(n) & \hat{P}_{x_1x_2}(n+1) & \cdots & \hat{P}_{x_1x_2}(n+N''-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{P}_{x_1x_2}(N-2) & \hat{P}_{x_1x_2}(N-1) & \cdots & \hat{P}_{x_1x_2}(N+N''-3) \\ \hat{P}_{x_1x_2}(N-1) & \hat{P}_{x_1x_2}(N) & \cdots & \hat{P}_{x_1x_2}(N+N''-2) \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中 $M < N'' < N$.

相关矩阵的估计为

$$\hat{R}_P = \frac{1}{N} X^H X \quad (11)$$

\hat{R}_P 的 $N'' - M$ 个 N'' 维噪声特征向量为 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \cdots, \mathbf{v}_{N''-M}$, 则互功率谱序列 $\hat{P}_{x_1x_2}(k)''$ 的 MUSIC 伪谱估计为

$$P_{MUSIC}(t) = \frac{1}{\left| \sum_{m=1}^{N''-M} \mathbf{v}^H \mathbf{a}(t) \right|} \quad (12)$$

其中

$$\mathbf{a}(t) = \left(1 \cdots e^{-j2\pi \frac{m}{N'} t} \cdots e^{j2\pi \frac{(N''-M-1)}{N'} t} \right)^T$$

时延估计即为 $P_{MUSIC}(t)$ 伪谱的 M 个谱峰位置估计.

4 仿真计算

为验证所提出的两次谱时延估计方法的有效性，对单目标声源采用了互功率谱+FFT 时延谱估计和互功率谱+MUSIC 时延谱估计的方法；对多目标采用了互功率谱+MUSIC 时延谱估计的方法，进行仿真计算。

4.1 单目标时延估计

单目标声源的功率谱密度函数采用 AR(2) 模型 $P_s = \frac{1}{1 - 1.3\Omega + 0.9\Omega^2}$ ，理论时延 $D = 3T$ ，SNR=10 dB，数据长度 $N = 1024$ ， $w(n)$ 取 1024 点 Hamming 窗， $E = 512$ ，Welch 互功率谱估计如图 1。 $N' = 1024$ ，FFT 时延谱估计如图 2。 $N'' = 36$ ，MUSIC 时延谱估计如图 3。从图 2 和图 3 中可以看出，时延谱在 $3T$ 处

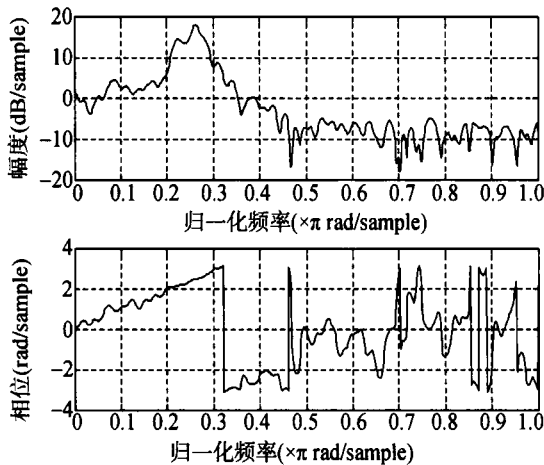


图 1 单目标 Welch 互功率谱

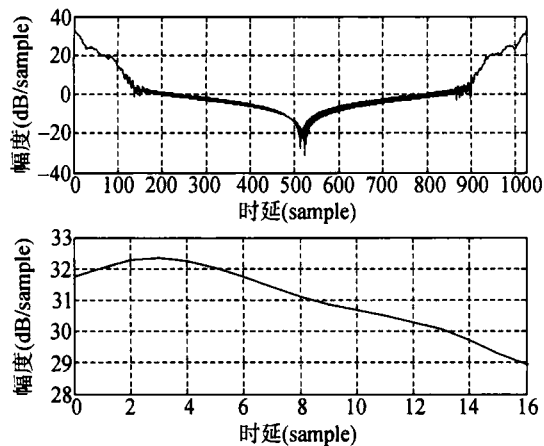


图 2 FFT 时延谱估计

取峰值，MUSIC 时延谱比 FFT 时延谱谱峰尖锐，因此 MUSIC 时延谱有较高的分辨率。

除 SNR 外，其它条件不变，每 SNR 仿真计算 100 次，互功率谱+MUSIC 法时延估计的偏和方差与信噪比的关系如图 4。从图中看出 MUSIC 时延谱时延估计是有偏估计；随着信噪比增大，时延估计标准差减小。

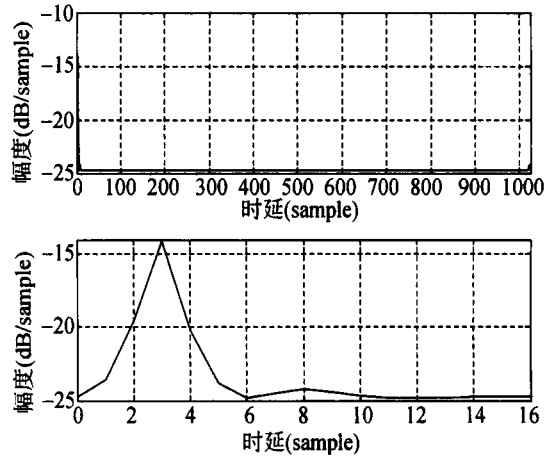


图 3 MUSIC 时延谱估计

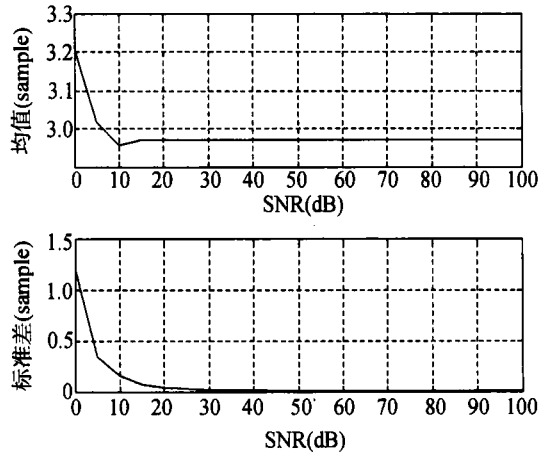


图 4 时延谱估计的偏和标准差与信噪比关系

4.2 多目标时延估计

多目标采用 3 个声源，目标 1、2 具有相同的功率谱密度函数，均采用 AR(2) 模型 $P_{s_{1,2}} = \frac{1}{1 - 1.3\Omega + 0.6\Omega^2}$ ，目标 3 采用 AR(2) 模型 $P_{s_3} = \frac{1}{1 - 0.3\Omega + 0.5\Omega^2}$ ，理论时延 $D_1 = 2T$ 、 $D_2 = 9T$ 、 $D_3 = 15T$ ，SNR=15dB，数

据长度 $N = 1024$, $w(n)$ 取 1024 点 Hamming 窗, $E = 512$. Welch 互功率谱估计如图 5. $N'' = 36$, MUSIC 时延谱估计如图 6, 从图中可以看出 MUSIC 时延谱能够分辨出 3 个时延值 $D_1 = 2T$ 、 $D_2 = 9T$ 、 $D_3 = 15T$; FFT 时延谱能分辨出 3 个时延值, 但其时延估计偏差较大, 其谱峰也较多; 广义互相关法 (GCF) 不能有效区分 3 个时延值.

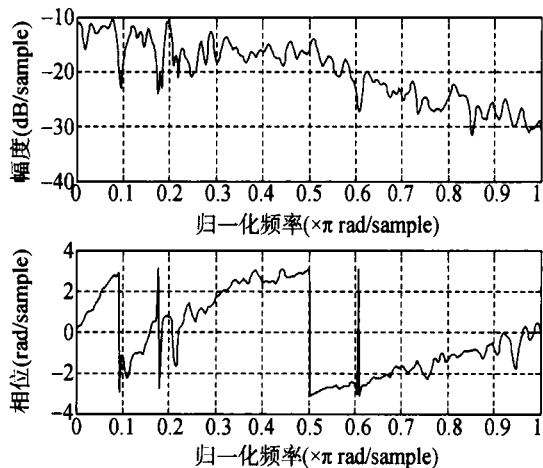


图 5 3 目标 Welch 互功率谱

5 结论

从仿真计算结果可以看出, 两次谱分析时延估计方法, 即将互功率谱函数再次进行谱估计, 二次谱峰值位置即为时延估计, 是高分辨率时延估计方法. 这种方法既能够估计单目标

时延, 又能够估计多目标时延, 并且不用相位解绕.

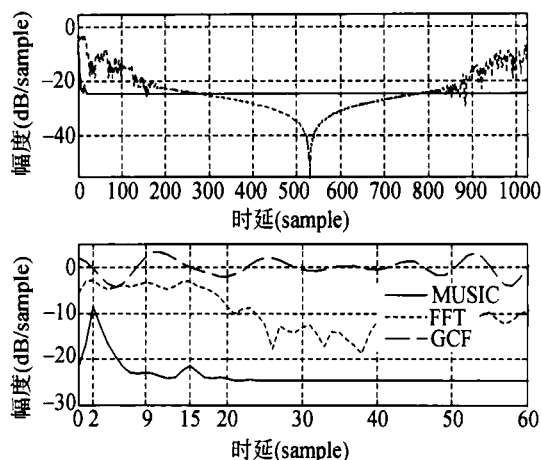


图 6 MUSIC 和 FFT 时延谱与 GCF 时延估计

参 考 文 献

- [1] Knapp C H, Carter G C. The generalized correlation method for estimation of time delay. IEEE Trans. ASSP, 1976, 24(4): 320-327.
- [2] 赵真, 候自强. 广义相位谱延时估计. 声学学报, 1985, 10(4): 202-205.
- [3] 陈华伟, 赵俊渭, 蔡宗义. 一种改进的直升机声测被动定向算法. 兵工学报, 2001, 22(4): 204-507.
- [4] Dimitris G. Manolakis, Vinay kK. Ingle, Stephen M. Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing. McGraw-Hill, 2000: 195-209, 227-232.
- [5] 罗利春. 无线电侦察信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社, 2003: 23-29.