

2차원적 음원추적에 관한 연구 II

문성배* · 전승환**

A Study on 2-Dimensional Sound Source Tracking System II

Serng-Bae Moon · Seung-Hwan Jun***

〈목 차〉

Abstract

1. 서론

2. 음원위치 측정원리

2.1 쌍곡선 측정원리

3. 기적음의 도달시간차 계측원리

3.1 도달시간차 계측 개요

3.2 도달시간차 측정원리

3.2.1 상호상관분석법

3.2.2 차분법

4. 실험계의 구성 및 실험방법

4.1 실험계의 구성

4.2 실험방법

4.3 실험결과

4.3.1 방위계측

4.3.2 거리계측

5. 결론

참고문헌

Abstract

The whistle is a very important information source for the safety navigation under foggy weather. But navigator has no concern about this, because it must be achieved by human hearing sense and considered as a vague signal. If the range and relative bearing of signal source can be detected automatically, it would be very useful system for preventing marine casualties making a lot of economic loss and environment pollution.

Before the algorithm of 2-dimensional sound source tracking system was reported.

This paper describes the method that can obtain the time lag between three signals and the theory of cross-correlation analysis and subtraction method for calculating the time lag by using the digital signal data sequences. And a series of experiments were carried out for various position of sound source in the range from 200cm to 530cm.

As a result, we have recognized that sound source tracking system is possible to the sea field with improvement of position error.

* 정회원, 한국해양대학교 대학원

** 정회원, 한국해양대학교 해사수송과학부

1. 서 론

선박이 농무중을 항해할 때, 항해자는 접근하는 상대선박의 기적음을 가청할 수 있어도, 그 기적음 취명선박에 대한 정보의 애매모호성 때문에, 다른 수단을 통해 수집된 정보에만 의존하고 있는 실정이다. 결국, 선박에 첨단장비가 탑재됨에도 불구하고, 높은 선박충돌사고율이 발생하고 있고, 이로 인해 경제적, 환경적으로 막대한 피해가 발생하고 있다. 본 연구에서는 기적음원의 상대위치를 자동적으로 검출할 수 있는 시스템을 개발하고자 하는 것으로, 선박 기적음을 인간의 청각이 아닌 Microphone 센서를 통해 수신하여 신호처리함으로써, 음원의 2차원적 위치를 검출하는 알고리즘을 제안하였고, 기적음원의 위치검출 원리와 계측오차의 종류 및 그에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 보고한 바 있다.¹⁾

본 논문에서는 기적음원의 위치측정 원리로서 앞서 제안한 삼각함수법 이외의 쌍곡선 원리를 본 음원추적 시스템에 적용하여 두 기법의 적정성을 비교하였다. 또한, 음원의 위치를 다양하게 바꾸면서 본 시스템을 통하여 음원의 방위와 거리를 측정하고, 그 결과에 관하여 고찰 및 검토를 하였다.

2. 음원위치 측정원리

타선박이 발신하는 기적음을 어떤 일정한 형태로 배치되어 있는 3개의 마이크로폰 센서를 통하여 수신할 때, 각 센서의 배열, 간격 등의 제요소에 따라 수신음에 도달시간차(Time Delay)가 발생하게 된다. 이 도달시간차를 이용하여, 수신부에 대한 기적음원의 상대위치를 측정하는 것이 기본적인 알고리즘으로서, 이러한 측정원리로서 삼각함수 측정원리와 쌍곡선 측정원리가 있다. 본 논문에서는

쌍곡선 측정원리와 삼각함수 측정원리와의 차이점에 관하여 논하기로 한다.

2.1 쌍곡선 측정원리

기적의 발신음이 3개의 센서에 시간차를 가지고 도달할 때, 이 도달시간차를 거리차 Δl 로 환산하면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta l_{ij} = c \cdot \tau_{ij} \quad [m] \quad i, j = 1, 2, 3 \dots\dots (1)$$

단, τ_{ij} 는 두 센서사이의 도달시간차 [sec]

따라서, 기적음원은 두 센서를 초점으로 하고, 초점으로부터 거리차가 일정한 궤적(軌跡)인 쌍곡선의 어느 한 점에 존재하게 된다. 본 3-Sensor System이 가지는 3쌍의 궤적인 쌍곡선들의 교점을 기적음원의 위치로 간주하는 것이 쌍곡선 측정법의 기본원리로서, 쌍곡선의 방정식과 Cartesian좌표계를 이용한다. 여기서, 연산식을 간단히 하기 위해서 기준센서인 M_2 를 Cartesian좌표계의 원점으로 정했을 때, 3쌍의 쌍곡선 방정식은 식(2)와 같다.

$$\sqrt{(x_s - L_1)^2 + y_s^2} - \sqrt{x_s^2 + y_s^2} = \Delta l_{12} \dots (2a)$$

$$\sqrt{x_s^2 + y_s^2} - \sqrt{(x_s - L_2)^2 + y_s^2} = \Delta l_{23} \dots (2b)$$

$$\sqrt{(x_s - L_1)^2 + y_s^2} - \sqrt{(x_s - L_2)^2 + y_s^2} = \Delta l_{13} \dots\dots\dots (2c)$$

그리고, 음원의 위치인 쌍곡선의 교점은 두 개의 방정식으로도 결정할 수 있기 때문에, 식(2a)와 식(2b)를 음원 위치검출의 기본식으로 하였다. 그리고, 연산식을 간단히 하기 위하여 $L_1 = L_2 = L$ 로 두고, 두 식을 정리하면 쌍곡선의 교점좌표를 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

따라서, 기준센서 M_2 로부터 음원까지의 거리와 상대방위를 식(4)와 식(5)로 측정할 수 있다.

$$x_s = \frac{2\Delta l_{12}^2 \Delta l_{23}^2 - L^2 (\Delta l_{12}^2 + \Delta l_{23}^2)}{2L (\Delta l_{12}^2 - \Delta l_{23}^2)} \pm \frac{\sqrt{[L^2 (\Delta l_{12}^2 + \Delta l_{23}^2) - \Delta l_{12}^2 \Delta l_{23}^2]^2 - (\Delta l_{12}^2 - \Delta l_{23}^2)^2 (L^4 - \Delta l_{12}^2 \Delta l_{23}^2)}}{2L (\Delta l_{12}^2 - \Delta l_{23}^2)} \dots (3a)$$

$$y_s = \pm \frac{\sqrt{(L^2 - \Delta l_{12}^2) [4x_s^2 - 4Lx_s + (L^2 - \Delta l_{12}^2)]}}{2\Delta l_{12}} \dots\dots\dots (3b)$$

$$R_2 = (x_s^2 + y_s^2)^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

$$B_2 = \tan^{-1}\left(\frac{y_s}{x_s}\right) \dots\dots\dots (5)$$

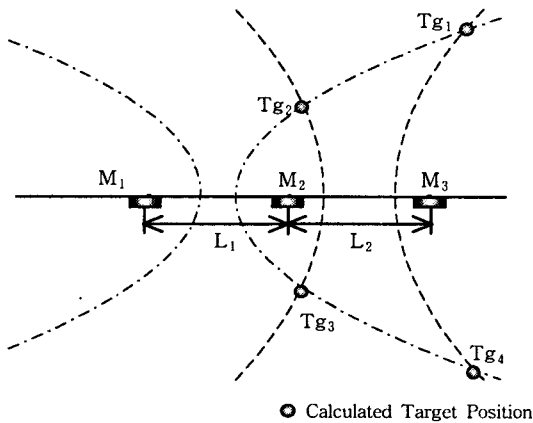


Fig.1 Estimation of Source Position using Hyperbola

Fig. 1은 3개의 센서와 음원이 평면에서 이루는 쌍곡선의 관계를 나타낸 것이다. M₁, M₂, M₃은 센서로서 쌍곡선의 초점이고, L₁과 L₂는 센서간의 간격이다. 또한, Tg₁, Tg₂, Tg₃ 및 Tg₄는 식(3)의 연산을 통하여 구한 두 쌍곡선방정식의 교점이다. 여기서, 4개의 교점중에서 음원의 진위치는 관측대역과 수신되는 신호음의 도달순서 따라서 결정하도록 하였다.

삼각함수법은 음원의 방위를 연산하기 위해서는 먼저 거리를 연산하는데 이 값은 방위연산에 필요한 인자로서 연산되어야만 하고, 쌍곡선 원리는 식(3)과 같이 방위와 거리가 독립적으로 연산되기 때문에 거리측정의 결과가 방위측정에 영향을 주지 않는다.

그러나, 도달시간차 측정에 오차가 내포될 경우, 쌍곡선 측정원리는 위치측정의 정확도에 있어서 더 많은 영향을 받게 된다. 또한, 이 원리는 신호음 도달순서의 결정 및 연산량이 커지는 등의 단점이 있다. 쌍곡선 원리는 센서를 일직선이 아닌 삼각형으로 배치하여 적용하였을 때 삼각함수법보다 효과적

이었다. 본 논문에서는 기본 알고리즘의 구축을 위한 기초실험에 센서를 일직선으로 배열하여 삼각함수 원리를 적용하였고, 그 결과를 검토하였다.

3. 기적음의 도달시간차 측정원리

3.1 도달시간차 측정개요

기적음원의 위치검출에 있어서 기적음의 정확한 도달시간차를 측정하는 것은 중요한 문제이다. 본 실험에서는 각 채널의 전체 파형으로부터 Fig.2와 같이 관측시간의 결정과 도달시간차를 연산하도록 하였다.

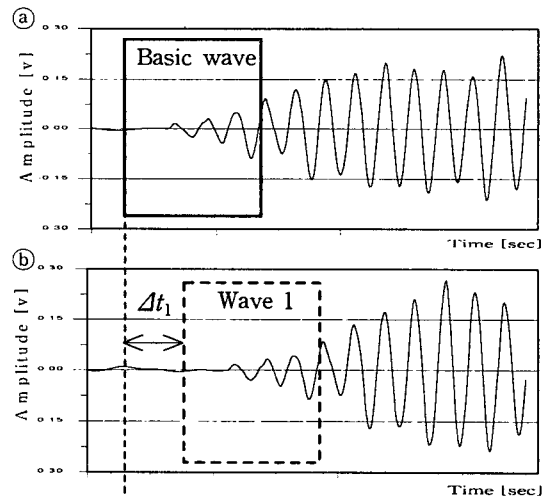


Fig. 2 Detection of Time Delay

Fig. 2에서 ①,②는 실제의 마이크로폰 센서를 통해 수신된 신호음의 파형을 나타낸 것이다. 먼저, ① 파형의 가운데로부터 기적음이 취명되기 시작하는 부분(굵은 윤곽선)을 기본파형²⁾으로 하고, 이것을 ②의 파형위에 중첩시킨다. 이 때 기본파형을 시간축상에서 조금씩 전이(轉移)시켜서 가장 근사한 부분(파형1)을 탐지하고, 전이한 양을 시간으로 환산하므로써 두 신호 사이의 도달시간차를 측정하도록 하였다.

3.2 도달시간차 측정원리

Fig. 2에서는 단순히 도달시간차를 측정하는 원리를 나타낸 것이고, 실제로는 컴퓨터 연산을 통하여 정확히 측정하여야 한다. 이 연산법으로 본 논문에서는 상호상관분석법^{3)~4)}과 차분법에 관하여 논하기로 한다.

3.2.1 상호상관분석법(Cross-correlation analysis method)
 기적음원이 두 마이크로폰 센서 M₁과 M₂사이에 도달시간차 τ 를 가지고 수신되었을 때, 두 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_1(t) = s_1(t) + n_1(t) \dots\dots\dots (6)$$

$$x_2(t) = s_2(t + \tau) + n_2(t) \dots\dots\dots (7)$$

식(6)과 식(7)에서 $s_1(t)$, $s_2(t)$, $n_1(t)$ 및 $n_2(t)$ 는 시계열의 값으로, 수신신호인 $s_1(t)$ 와 $s_2(t)$ 는 잡음 성분인 $n_1(t)$, $n_2(t)$ 와 상관이 없다고 할 때, 두 신호의 상호상관함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{x_1x_2}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t+\tau)] \dots\dots\dots (8)$$

식(8)에서 E는 기대치(expectation)를 나타내는 것이고, 이 기대치가 최대로 되는 τ 에서 두 신호는 상관이 가장 크게 되는 것이다. 결국, τ 가 두 신호의 도달시간차가 되는 것이다.

신호의 관측시간은 유한한 범위 T에서 관측되고, 두 신호열의 상관정도는 상호상관계수를 통하여 나타낸다. 따라서, 정규화된 상호상관계수의 정의는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{x_1x_2}(\tau) = \frac{\overline{x_1(t)x_2(t+\tau)}}{\sqrt{\overline{x_1^2}}\sqrt{\overline{x_2^2}}} = \frac{R_{x_1x_2}(\tau)}{\sqrt{R_{x_1}(0)R_{x_2}(0)}} \dots\dots (9)$$

마이크로폰 센서를 통해서 수신된 기적음은 A/D 변환기를 통해 디지털값인 수치군으로 컴퓨터의 메모리에 저장된다. 따라서, N 개의 수치군으로 형성된 기적음의 두 데이터 시퀀스 사이의 상호상관계수는 식(10)과 같다.

$$C_{x_1x_2}(j) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x_1(n)x_2(n+j)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} [x_1(n)]^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} [x_2(n)]^2}} \dots\dots\dots (10)$$

식(10)에서 수치군 $x_2(n)$ 는 왼쪽으로 j 만큼 쉬프트한 것을 나타낸 것이다. 따라서, 두 신호의 상관도가 가장 높은 쉬프트양인 j를 구하고, 이것을 다음의 식(11)와 같이 시간으로 환산하므로써, 두 수신된 신호음의 도달시간차 τ_{12} 를 구할 수 있다.

$$\tau_{12}[\text{sec}] = j/f[\text{Hz}] \dots\dots\dots (11)$$

단, f는 샘플링주파수

3.2.2 차분법(Subtraction method)

두 개의 신호음이 N 개의 수치군인 $x_1(n)$ 및 $x_2(n)$ 일 때, 어느 한 수치군을 왼쪽 또는 오른쪽으로 1 래그씩 쉬프트하면서, 두 수치군의 신호값의 차이를 구하고, 그 절대치를 모두 합하여 두 음파형의 상관정도를 수치로 표시하는 기법인 차분법은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{x_1x_2}(j) = \sum_{n=0}^{N-1} |x_1(n) - x_2(n+j)| \dots\dots\dots (12)$$

단, j = 0, 1, 2, ..., p, ...

식(12)에서 $x_2(n)$ 수치군을 1 래그씩 왼쪽으로 이동시키면 차분계수 S의 값은 변하게 되고, 어느 쉬프트점 j에서 이 값은 최소가 된다.

따라서, 이 점에서 두 신호는 가장 근사하게 일치하게 되는 것이고, 이 쉬프트한 양 j를 식(11)에 의해서 시간으로 환산하면, 신호 x_1 과 x_2 사이의 도달시간차 τ_{12} 를 얻을 수 있다.

차분법은 연산량이 적다는 장점이 있지만, 3채널에서 출력되는 파형의 형태에 따라 정확도가 나빠지는 현상을 보였다. 그러나, 상호상관분석법은 파형들이 상이하더라도 정도가 높기에 본 논문에서는 이 측정법을 적용하였다.

4. 실험계의 구성 및 실험결과

4.1 실험계의 구성

기적음원 위치측정의 실제측계 및 기본 알고리즘의 개발을 위하여 본 실험계는 약 6×5 m²의 실내의 실험실에서 음원과 계측계의 상대운동은 없는 것을 기초로 실험하였다.

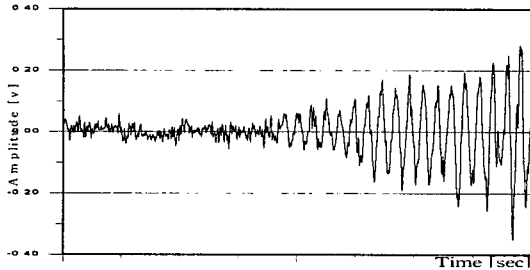


Fig. 3 Reproduced Whistle Signal by Cassette Recorder

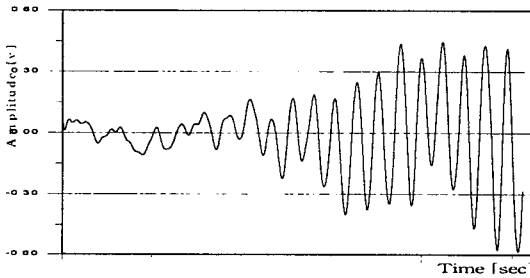


Fig. 4 Filtered Whistle Signal

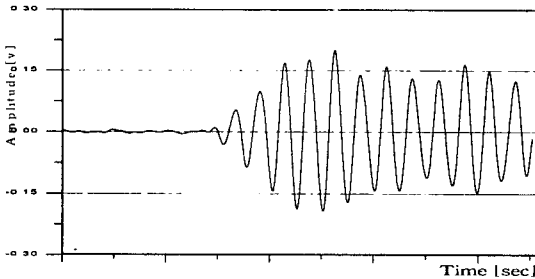


Fig. 5 Audio Generator Signal

Fig. 3은 한국해양대학교 실습선 ‘한나라호’에서 취명된 기적음 파형을 나타낸 것이다. 그러나, 실험 여건상 실제의 기적음을 이용할 수 없기 때문에, 기적음을 기적으로부터 약 10m 전방에서 녹음한 후, 실험실에서 재생시켜 수신한 파형이다. 이 기적신호의 발신 주파수는 131Hz이고, 음압레벨은 138dB(1/3옥타브밴드)이다. 또한, Fig.4는 Fig.3 파형을 대역통과필터로 필터링한 신호이다. 기적음이 존재하는 부분과 존재하지 않는 부분을 쉽게 구분할 수 있지만, 여러 소음이 혼재하기 때문에 기적

음이 시작되는 부분의 구별은 쉽지 않을 뿐만 아니라, 기적음의 도달시간차에도 많은 오차가 포함되었다. 따라서, 본 실험에서는 Fig.5와 같이 기적음과 유사한 형태로 발신되는 Audio Generator의 신호음을 이용하였다. 또한, 본 3-sensor시스템에서는 3개의 센싱 신호에 대한 H/W 및 S/W의 특성을 일치시켜 각각 구성하였다. 본 논문에서 설립한 시스템의 계통은 크게 센싱부, 하드웨어 신호처리부, 소프트웨어 신호처리부 및 연산표시부의 4단계로 나뉘어 지고, 세부적인 실계측계 및 신호처리계는 Fig. 6과 같다.

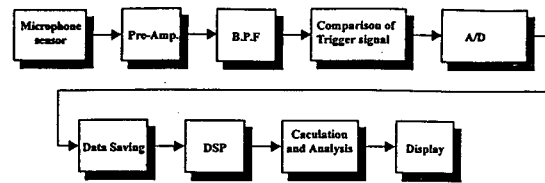


Fig. 6 Diagram of Signal Processing

4.2 실험방법

본 실험에서는 신호음 발신부와 센싱부는 138cm의 높이를 유지하도록 하였고, 센서들은 일직선상에서 같은 간격 50cm로 배치하였다. 또한, 신호음은 200Hz로 설정하였고, A/D변환기의 샘플링 주파수는 50.51kHz로 하였다. 그리고, 중간센서로부터 음원까지의 거리와 방위는 랜덤하게 설정하였다. 거리는 2.0m, 3.8m, 5.3m의 3단계로 확대하였고, 그 이상의 거리는 실험실의 공간적 제약으로 생략하였다. 또한, 방위는 각 거리에서 $10^\circ \pm 5^\circ$ 간격으로 $0^\circ \sim 180^\circ$ 의 범위에서 설정하였는데, $180^\circ \sim 360^\circ$ 의 범위는 센싱부의 후면에 있기 때문에 본 실험에서는 고려하여 않았다. 실험은 같은 음원위치에서 12번 측정하여, 음원의 위치를 검출하도록 하였다.

4.3 실험결과

4.3.1 방위계측

Fig.7은 본 실험의 한 예로서, 기준센서로부터 음원까지의 거리가 2.0m인 경우의 방위검출 결과이다. 가로축은 측정시의 음원의 진방위를 나타내

고, 세로축은 검출된 음원의 방위와 진방위의 측정 오차를 나타낸다.

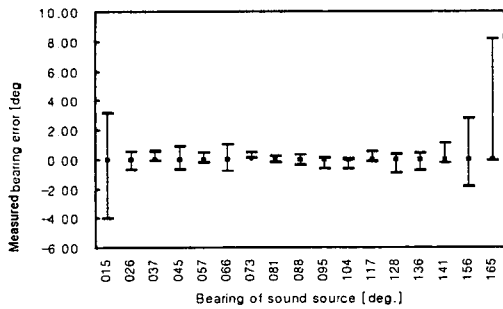


Fig. 7 Deviation of Bearing Measurement

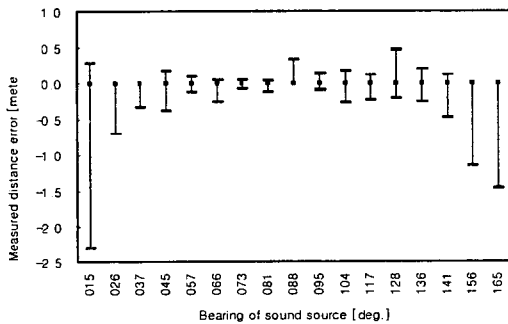


Fig. 8 Deviation of Distance Measurement

음원의 방위가 040° ~140°의 범위에서는 측정오차가 ±1.0° 이내인 경우가 대부분이고, 약 80%정도가 ±0.5° 이내로 측정되었다. 또한, 음원의 방위 측정에 발생하는 오차의 양은 음원의 위치가 센서 배열선에 접근할 수록 커지는 것을 알 수 있다. 이것은, 도달시간차 측정오차량이 같더라도 음원의 위치가 센서 배열선에 접근할수록 방위에 미치는 영향은 커지기 때문으로, 삼각함수법과 쌍곡선법 모두에서 발생하는 것이고, 선박에 탑재된 쌍곡선 항법방식의 선위측정 장비에서 주국과 종국이 이루는 기선에 선박이 근접할 수록 선위측정에 많은 오차가 포함되는 것과 같은 원리이다. 또한, 전 논문¹⁾에서 보고한 시뮬레이션에서도 음원의 방위가 센서 배열선에 접근할수록 방위변화가 커지는 추세와 같은 추이를 나타냈다.

4.3.2 거리계측

Fig. 8은 Fig. 7에서의 거리 측정오차를 나타낸 것이다. 가로축은 측정방위이고, 세로축은 측정된 거리와 진거리와의 오차량이다. 도달시간차를 이용한 음원까지의 거리측정은 방위측정에 비하여 정확도가 다소 떨어지는 편이다. 그것은, 같은 도달 시간차의 오차량이라도 방위측정에 미치는 영향보다는 거리측정에 미치는 영향이 훨씬 크기 때문이다. 이것은 전 논문¹⁾의 시뮬레이션과 같은 추이를 보이고 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 기적음원의 2차원적 위치검출의 가능성을 검증하기 위하여 실제측계를 구성하여 실험을 하였다. 본 실험에서는 센서를 일직선으로 배열하여 삼각함수 측정원리와 상호상관분석법을 적용하여 음원의 위치를 랜덤하게 변화시키면서 음원의 위치를 측정하였고, 발신음의 도달시간차를 이용한 음원의 위치검출의 가능성을 입증하였다.

앞으로의 연구과제로서, 센서배열선에 가까운 음원의 위치를 정확하게 측정할 수 있는 센서의 공간 배치법과 쌍곡선법의 적용에 관한 검토, 정확한 도달시간차의 측정을 위한 신호처리기법의 개발, 신호음과 소음의 주파수 분석 및 이를 근거로 한 계측장치의 보완과 현장실험을 통한 본 시스템의 정량적 평가 등의 문제가 남아있다.

참고문헌

- 1) 문성배, 전승환, "2차원적 음원추적에 관한 연구", 한국항해학회, 제20권 제4호, p71-80, 1996
- 2) 田中正吾, "センサダイナミクスを考慮した知的音響應用計測システム", 計測と制御, 第36卷 第7号, p476-479, 1997
- 3) C.Koppermann, "A signal model for cross-correlation flowmeters to analyse systematic measurement errors", Measurement, vol2, p.129-133, 1984
- 4) Emmanuel C. Ifeakor, "Digital signal processing", Addison-Wesley, 1993