

# 진폭 변조 거리 측정 시스템에 적용 가능한 개선된 위상 추정 기법

정회원 김 대 중\*, 오 택 환\*\*, 종신회원 황 선 영\*

## An Improved Phase Estimation Method for AM Range Measurement System

Dae-Joong Kim\*, Taek-Hwan Oh\*\* *Regular Members*, Sun-Young Hwang\* *Lifelong Member*

### 요 약

본 논문에서는 진폭 변조 거리 측정 시스템에 적용 가능한 개선된 위상 추정 기법을 제안한다. 기존 위상 측정 방법은 이동 목표물의 도플러 천이에 의해 위상 측정 오차가 발생한다. 제안된 위상 추정 기법은 도플러 천이에 대해 적응 도플러 보정(Adaptive Doppler Correction)을 사용하여 위상 추정 오차를 보정하므로 거리 측정 정확도를 향상시킬 수 있다. 모의실험 결과 도플러 주파수 천이 보정은 기존 방식보다 94.7% 향상된 성능을 보이며, 거리 측정 정확도는 50%로 향상되었다. 음향 수조에서는 오차가 7.7cm로 추정되어 해양 환경에서 음파를 이용하여 거리 추정에도 적용 가능함을 확인하였다.

**Key Words** : ADC, Phase Estimation, Distance Estimation

### ABSTRACT

This paper proposes an improved phase estimation method for AM(Amplitude Modulation) range measurement system. The previous phase estimation method induces errors by Doppler shift of a moving target. The proposed method compensates phase estimation error through the ADC(Adaptive Doppler Correction) to take the Doppler shift, thus can improve distance measurement accuracy. When compared with the previous method through simulation results, the Doppler shift compensation and accuracy are improved by 94.7% and 50%, respectively. Target distance error in an acoustic tank is estimated to be 7.7cm, which confirms that the proposed method can be used to estimate the distance in the marine environment.

### I. 서 론

현재 적용되고 있는 비접촉식 거리 측정 시스템은 초음파, 레이저, 음향센서 및 전자파를 이용하여 의료 분야, 수중 해양 환경 등에서 정확한 거리를 측정해야 하는 곳에서 사용되고 있다. 일반적인 거리 측정 방식은 펄스 신호를 이용하여 목표물에 반사

된 송수신 펄스 신호의 시간차(Time of Flight)를 측정하여 거리를 측정하는 방식과 주파수를 스융하여 송수신 신호 간의 주파수 차를 측정하는 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 방식, 반송파를 진폭 변조(Amplitude Modulation)시켜 송수신 신호의 위상차를 측정하는 진폭 변조 방식이 있다<sup>[1-6]</sup>. 시간차와 FMCW 방법은 장거리 측정

※ 본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의해 수행되었습니다. (#2011-0005093).

\* 서강대학교 전자공학과 CAD & ES 연구실(hwang@sogang.ac.kr) (° : 교신저자)

\*\* LIG넥스원(주) Maritime연구소

논문번호 : KICS2012-04-213, 접수일자 : 2012년 4월 23일, 최종논문접수일자 : 2012년 5월 30일

이 가능하고 거리 측정 정확도가 높지만, 거리 측정 정확도를 높이기 위해서는 시스템에 복잡해지는 단점이 있다<sup>4-6</sup>. 위상차를 이용한 진폭 변조 방식은 반송파 신호의 한주기 이상의 파장에 해당되는 거리에 있는 목표물을 측정할 수 없는 단점이 있지만 주파수 대역폭과 무관하게 시스템을 구성할 수 있고 진폭 변조를 통해 측정 거리 및 정확도를 높일 수 있다<sup>6</sup>. 진폭 변조 방식에서 송수신 신호의 위상차를 정확하게 추정하는 것은 거리 측정 정확도를 높이기 위해 매우 중요한 파라메타가 된다.

기존 연구된 위상 측정 기법은 영교차(Zero Crossing)를 이용한 기법, FFT(Fast Fourier Transform)를 이용한 기법 및 LSM(Least Square Method)을 이용한 기법들이 제안되었다. 영교차를 이용한 기법<sup>8,9</sup>은 회로 구성이 간단하지만, 입력 신호에 잡음과 고조파 성분에 의해 왜곡이 일어났을 경우 측정 오차가 발생한다<sup>9,10</sup>. 잡음과 고조파 성분으로 인한 측정 오차를 개선한 위상 측정 방법은 FFT와 LSM을 이용한 기법이 있다. FFT를 이용한 방법<sup>12</sup>은 잡음과 고조파 제거에 높은 성능을 보이지만, 한주기 신호가 반드시 필요하여 데이터 갱신 주기가 빠른 제어를 필요로 하는 시스템에 적용하기 어렵다. LSM을 이용한 기법<sup>10,11</sup>은 입력신호의 일부분에 대한 샘플링 데이터를 획득하여도 위상의 측정이 가능하며, 0.01Hz 이하의 저주파 정현파 신호의 위상과 크기를 측정할 경우에 연산 시간을 줄일 수 있다<sup>10</sup>. LSM 기법은 송수신 신호의 주파수가 동일할 경우, 고조파 성분 제거에 우수한 성능을 나타내지만, 도플러 천이(Doppler Shift)가 발생되었을 경우에는 위상 측정 오차가 발생하는 문제점이 있다. 도플러 천이는 이동 목표물과 거리 측정 시스템의 상대 속도에 의해 발생하는 주파수 오차를 의미한다. 따라서 정확한 위상 측정에 따른 거리 정확도를 향상시키기 위해 도플러 천이는 반드시 고려되어야 한다. 도플러 주파수는 관측자와 목표물간의 상대속도와 상대방위각 등에 따라 결정되므로 도플러 신호를 획득하여 도플러 신호의 순간 주파수를 시간에 따라 분석하면 도플러 천이를 얻을 수 있다<sup>16</sup>. 도플러 주파수를 추정하는 방법은 ZCR(Zero Crossing Rate)을 이용한 방법<sup>14</sup>과 STFT(Short Time Fourier Transform)을 이용한 방법<sup>15</sup>이 있다. ZCR을 이용한 방법은 수신 신호의 포락선(envelope)이 영점을 교차하는 비율을 통해 도플러를 추정하는 기법이다. 이와 같은 방법은 신호대잡음비(Signal to Noise Rate)에 취약하고 다중 경로

가 존재하는 환경에서 성능이 저하된다<sup>14</sup>. STFT는 수신 신호에 창 함수(Window Function)를 적용하고 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하여 처리 속도가 빠르지만, 창 함수가 고정되어 주파수가 급격하게 변하는 환경에서는 많은 오차가 발생한다<sup>16</sup>.

본 논문에서는 진폭 변조를 이용하여 목표물의 거리 측정 시 위상 추정 정확도를 높이기 위해 이동하는 목표물에 의해 발생하는 도플러 천이를 보정한 위상 추정 기법을 제안한다. 제안된 위상 추정 방법은 SA(Simulated Annealing) 알고리즘을 적용한 적응 도플러 보정 기법을 사용하여 이동 목표물에 의해 발생하는 도플러 천이를 보정하고, 주변 환경에 의해 발생된 고조파 성분의 왜곡을 최소화하고 처리 속도를 고려하여 일부 수신 데이터를 통해 위상 추정이 가능한 LSM 기법을 사용한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 진폭 변조 방식의 거리 측정 방법과 기존에 연구된 위상 측정 방식, 도플러 천이 추정 방식에 대해 설명하고, 3절에서는 진폭 변조 방식에 적용 가능한 제안된 도플러 천이 및 위상 추정 기법에 대해 기술한다. 4절에서는 제안한 기법에 대한 성능을 모의실험과 음향 수조 실험 결과로 제시하며, 마지막으로 5절에서 결론 및 추후과제를 기술한다.

## II. 관련 연구

본 절에서는 일반적인 진폭 변조 방식의 거리 측정에 대한 기법을 소개하고, 거리 측정을 위해 기존에 연구된 위상차 측정 기법을 기술한다. 그리고 도플러 천이를 보정하기 위해 이동하는 목표물에 의해 발생하는 도플러 천이를 추정하는 기법에 대해 기술한다.

### 2.1. 거리 측정 기법

진폭 변조 방식의 거리 측정 시스템에서는 그림1과 같이 송수신부와 동일한 거리  $L$  만큼 떨어진 목표물을 향해 파장이  $\lambda$  인 정현파 신호를 목표물에 송신하면, 목표물에 의해 신호가 왕복하여 수신된다. 따라서 거리  $2L$  만큼 떨어진 목표물과의 거리는 파장의 정수배  $m\lambda$ 와 한파장 미만의 신호  $\Delta\lambda$ 의 합이 되며, 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 여기서  $m$ 은 정수인 진동수이다.

$$2L = m\lambda + \Delta\lambda \quad (1)$$

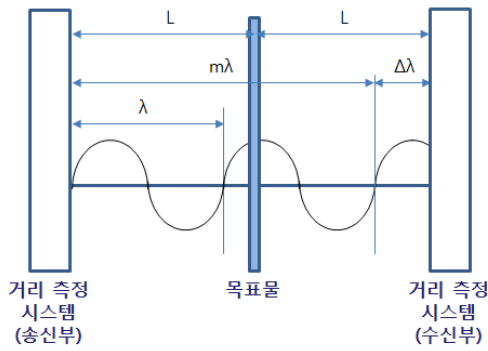


그림 1. 위상차를 이용한 거리 측정 방법.  
Fig. 1. Distance measurement method using a phase estimation.

거리 측정 시스템에서 진동수  $m$ 은 실제로 측정할 수 없기 때문에 목표물과의 측정 거리를 고려하여 진동수  $m=0$ 이 되도록 장파장의 신호를 적용하면 식(1)은 식(2)로 표현 가능하다.

$$L = \frac{\Delta\lambda}{2} \quad (2)$$

거리 측정 시스템에서 측정 가능한 송수신 신호의 위상차  $\phi_{diff}$ 를 이용하여 한파장 미만의 신호  $\Delta\lambda$ 는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\lambda = \left(\frac{\phi_{diff}}{2\pi}\right) \times \lambda \quad (3)$$

식(3)에서와 같이 진폭 변조 방식의 거리 측정 시스템에서 거리 측정 정확도는 위상차 검출의 정밀도에 따라 결정되므로, 정확한 위상차 검출은 거리 측정 정확도를 향상시킬 수 있다.

### 2.2. 위상 추정 기법

송수신 신호의 위상차를 측정하기 위한 기존에 제안된 연구 결과는 영교차, FFT, LSM을 이용한 기법들이 있다. 영교차를 이용한 위상 추정 기법 [8-9]은 입력된 송수신 정현파와 신호를 구형파로 변환하고 두 구형파의 중심 시간 차이를 측정하여 위상차를 산출한다. 영교차를 이용한 기법은 구성이 간단하지만 입력 신호에 주변 장애물이나 벽, 바다 등에 의한 고조파 성분이 포함되었을 경우 오차가 발생되며, 구형파의 중심점을 이용하므로 반드시 한 주기 이상의 신호가 필요하여 실시간 처리가 필요한 시스템에 적용하기 어렵다[9-11]. FFT를 이용한 기법[12]은 다양한 부하 조건에 따라 발생하는 고조

파 성분을 제거하기 위해 정현파와 신호가 주기 동안 평균을 하면 0이 되는 특성을 이용한다. 입력되는 수신신호와  $\sin$ 과  $\cos$  두 기준 신호를 곱하고 한 주기 동안 적분을 이용하여 평균하면 위상차  $\phi_{diff}$ 에 대한  $\sin$ ,  $\cos$  신호 성분만 남게 되어 잡음이 제거된다. FFT를 이용한 위상 추정 방법은 고조파 성분 제거에 높은 성능을 갖지만 반드시 한 주기 동안 신호의 평균이 필요하므로 실시간 처리 시스템에 적용하기 어렵기 때문에 부가적인 하드웨어 자원을 이용하여 처리 속도를 개선해야 한다. 또한 목표물의 이동에 의한 도플러 천이가 발생할 경우 수신 신호의 주파수 성분이 왜곡되므로 송수신 신호의 주기가 일치하지 않아 위상 측정 오차가 발생할 수 있다. LSM을 이용한 위상 추정 기법[10-11]은 송수신 신호의 지승오차 합을 LSM에 의해 입력신호의 크기와 위상으로 각각 편미분하여 최소가 되는 값을 이용하여 측정한다. 구현이 간단하고 연산 처리 속도가 빠른 LSM을 이용하므로 입력 신호에 백색 잡음이 추가되었을 경우 측정 오차를 줄일 수 있고 한 주기 전체를 측정하지 않고 일부만 측정하여 위상을 구할 수 있는 장점이 있다. 하지만 목표물의 이동에 의한 도플러 천이가 발생할 경우 수신 신호의 주파수 성분이 왜곡되므로 위상 측정 오차가 발생하는 문제점이 있다.

### 2.3. STFT를 이용한 도플러 천이 추정 기법

STFT(Short Time Fourier Transform)는 신호 주파수에 왜곡이 발생한 경우 FFT를 이용하면 시간에 따른 신호 해석이 어렵게 되는 문제점을 보완하기 위해 Gabor에 의해 제안된 방법으로 식(4)와 같다. 여기서  $S[i]$ 는 분석하고자 하는 신호,  $g[i-k]$ 는 창 함수,  $L$ 은 창 함수의 샘플링 개수이다.

$$STFT(t, w) = \sum_{i=0}^{L-1} s[i] \cdot g[i-k] \cdot e^{-jwi} \quad (4)$$

STFT는 창의 크기에 따라 시간 및 주파수 영역의 해상도가 결정되며, 시간 및 주파수의 모든 영역에서 동일한 창을 가지므로 주파수가 급격하게 변하는 신호에 대해 오차가 발생하는 문제점이 있다<sup>[16]</sup>.

## III. 제안된 위상 추정 기법

본 절에서는 제안된 진폭 변조 방식에서 적용 가능한 개선된 위상 추정 기법을 설명한다. 진폭 변조

를 이용한 거리 측정 방식에서 거리 측정 정확도를 높이기 위해 정확한 위상 추정에는 반드시 필요하다. 기존 연구된 위상 추정 기법은 이동 물체에 의한 도플러 천이가 발생하게 되면 측정 오차가 발생한다. 제안한 위상 추정 기법은 적응 도플러 보정 기법을 사용하여 도플러 천이를 보정하여 위상 및 거리를 측정하므로 거리 측정 정확도를 향상시킬 수 있다. 그림 2는 제안된 위상 추정 기법의 전체 과정을 나타낸다.

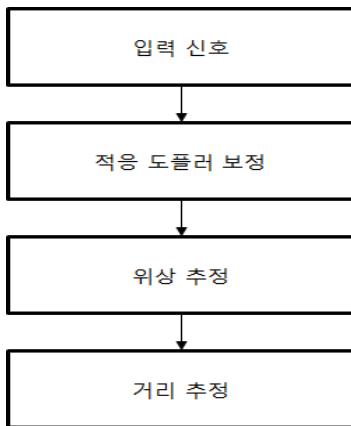


그림 2. 제안된 기법의 전체 과정.  
Fig. 2. Process of the proposed method.

3.1. 적응 도플러 보정

도플러 천이는 거리 측정 환경에서 측정하고자 하는 이동 목표물 속도에 따라 항상 변화하는 특성이 있다. 본 논문에서는 거리 측정 환경과 이동 목표물에 의해 변화되는 도플러 천이를 추정하기 위해 SA(Simulated Annealing) 알고리즘<sup>[20-21]</sup>을 이용한 적응 도플러 보정을 적용한다. SA 알고리즘은 예측 할 수 없는 환경에서 국소 최적값(local optima)에 빠질 수 있는 오류를 방지하고, 전역 최적값(global optima)을 구하기 위한 알고리즘으로 다양한 최적화 문제에 적용되고 있다. 그림 3은 제안된 적응 도플러 보정의 처리 과정을 보인다.

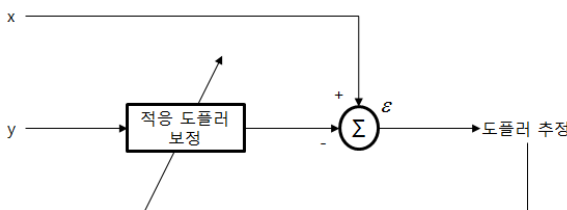


그림 3. 도플러 천이를 보정하기 위해 제안된 적응 도플러 보정 처리 과정  
Fig. 3. Process of the proposed ADC method for estimating the Doppler shift.

제안된 기법에서는 입력 신호  $x$ 와 동기 신호  $y$ 의 상관계수  $r_{xy}$ 를 이용하여 비용함수(Cost Function)를 정의하고, 시스템 상태를 변화시키면서 새로 제시된 비용함수  $New\_cost$ 을 계산하여 기존 비용 함수  $Current\_cost$ 와 비교한다. 입력 신호는 측정 물체에 반사되어 입력된 주변 환경 소음, 고조파 성분과 이동 목표물에 의한 도플러 천이가 포함된 노이즈 성분 그리고 주파수 보상을 위한 동기 신호가 혼합된 신호이다. 동기 신호는 입력 신호에서 잡음과 목표물에 의해 반사된 신호를 구분하고 도플러 천이를 보정하기 위한 신호이다. 따라서 도플러 천이가 정확하게 보정될 경우 상관계수  $r_{xy}$ 는 1로써 최대가 된다<sup>[19]</sup>. 이에 따라 비용함수는  $0 \leq f_{cost} \leq 1$  구간에 존재하게 되고 정확한 도플러 천이가 추정될 경우 0의 값을 갖는다. 비용함수의 정의는 식(5)과 같고, 상관계수  $r_{xy}$ 는 식(6)과 같다.

$$f_{cost} = \min[(1 - r_{xy})^2], \quad 0 \leq f_{cost} \leq 1 \quad (5)$$

$$r_{xy}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n-l), l=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6)$$

최적화 단계에서는 두 비용함수 값의 차이를 그 시점에서의 온도 제어 변수인  $T$ 의 함수로 평가하여, 선택 여부를 결정하는 과정으로 정의된다. 즉,  $Current\_cost - New\_cost < 0$ 이면 새로 제시된 해는 항상 선택되며  $Current\_cost - New\_cost > 0$ 이면 0과 1 사이에서 난수(Random Number)를 발생시키고, 식(7)의 값이 발생시킨 난수보다 작으면 다음 상태를 현재의 상태로 받아들이는 것은 거부된다. 랜덤하게 생성된 난수를 이용하므로, 확률적으로 전이가 일어날 수 있도록 허용되기 때문에 전역 최적값을 선택할 수 있다<sup>[20]</sup>.

$$p = \exp\left(\frac{Current\_cost - New\_cost}{T}\right) \quad (7)$$

본 논문에서 적용된 SA 알고리즘을 이용한 적응 도플러 보정 기법을 요약하면 표 1과 같다.

3.2. 위상 및 거리 추정

제안된 적응 도플러 보정 기법을 이용하여 이동 물체에 의한 도플러 천이를 보정하고, LSM 기법을 이용하여 위상차를 추정하고 최종적으로 식(2)에 의해 거리 측정 시스템과 목표물과의 거리를 추정한다.

표 1. 제안된 SA 알고리즘을 이용한 적응 도플러 보정 기법  
Table 1. The proposed adaptive doppler shift compensation method using SA algorithm.

```

Initialization(Current_solution, Temperature)
Calculation of the Current_Cost
Loop
  New_State
  Calculation of the new_Cost
  if Δ(Current_cost - New_Cost) ≤ 0 then
    Current_State = New_State
  else
    if p > Random (0, 1)
      then
        //Accept
        Current_State = New_State
      else
        //Reject
  Decrease the temperature

Exit When Stop_Criterion
End Loop
    
```

LSM을 이용한 위상 추정 기법<sup>10)</sup>은 연산량이 적고 신호의 일부만 입력되어도 위상 추정이 가능하기 때문에 실시간 처리가 필요한 임베디드 시스템에 적용 가능하다. LSM을 이용한 위상 추정 기법에서 위상이  $\theta$ 이고 진폭이  $V_m$ 인 기준 신호에 대해 한주기 동안  $N$ 번 샘플링한 기준 신호와 실제 입력된 수신 신호를  $V_r(n)$ 이라 할 때, 수신 신호와 기준 신호의 자승오차 합  $\delta$ 는 식(8)과 같다. 여기서  $K$ 는 실제 측정된 샘플링 데이터 수이다.

$$\delta = \sum_{n=0}^{K-1} \{ V_r(n) - V_m \sin(\frac{2\pi}{N}n + \theta) \}^2, \quad (8)$$

$n = 0, 1, 2, \dots, K-1$

LSM에 의해  $\delta$ 를 크기와 위상으로 편미분한 값이 최소가 될 때 수신 신호로부터 크기와 위상을 구할 수 있으므로 식(9)를 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial \delta}{\partial V_m} = \frac{\partial \delta}{\partial \theta} = 0 \quad (9)$$

식(9)에서  $V_m$ 과  $\theta$ 으로 편미분하여 정리하고, 양변에  $\frac{\cos 2\theta}{\sin 2\theta}$ 를 곱하면 송신 신호와 수신 신호의 위상  $\theta$ 는 식(10)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{AK - AC - BD}{BK + BC - AD} \right) + [1 - \text{sgn}(BK + BC - AD)] \frac{\pi}{2}$$

단,  $-\pi \leq \theta \leq \pi$

여기서  $A, B, C, D$ 는 식(11) ~ 식(14) 같다.

$$A = \sum_{n=0}^{K-1} V_r(n) \cos(\frac{2\pi}{N}n) \quad (11)$$

$$B = \sum_{n=0}^{K-1} V_r(n) \sin(\frac{2\pi}{N}n) \quad (12)$$

$$C = \sin \frac{2\pi}{N} K [\cot \frac{2\pi}{N} \cos \frac{2\pi}{N} K + \sin \frac{2\pi}{N} K] \quad (13)$$

$$D = \sin \frac{2\pi}{N} K [\cot \frac{2\pi}{N} \sin \frac{2\pi}{N} K - \cos \frac{2\pi}{N} K] \quad (14)$$

#### IV. 실험 결과

본 절에서는 제안된 위상 추정 기법에 대한 모의 실험과 음향 수조 실험 결과를 기술한다. 모의실험을 이용하여 도플러 천이가 위상 오차를 발생시키는 것을 확인하고, STFT 방법과 제안한 SA 알고리즘을 이용한 도플러 추정 결과와 거리 추정 오차를 비교한다. 제안한 기법의 실 환경 적용 가능성을 확인하기 위해 음향 수조를 이용한 결과를 기술한다.

##### 4.1. 도플러 천이에 따른 위상 측정 오차 확인 결과

도플러 천이에 따라 위상 측정 오차가 발생하는지 확인하기 위해 송신 신호의 주파수를 120kHz로 하였으며, 입력 신호 모의 시 목표물의 이동 속도와 방위에 대한 도플러 천이는 0부터 800Hz까지 50Hz 간격으로 증가시키면서 모의실험을 수행하였다. 위상 추정은 LSM 기법을 이용하여 위상을 추정하여 결과를 확인하였다. 도플러 천이가 0 ~ 200Hz 변화에 대해 위상 오차는 작은 변화를 나타내고, 200 ~ 350Hz 구간에서는 도플러 변이에 따라 위상 오차가 큰 경향을 나타낸다. 350Hz 이후에는 위상 오차 변동 폭은 작아짐을 알 수 있다. 최대 위상 오차는 약 180°이며, 이 때 도플러 천이 값은 800Hz이다. 모의 실험 결과를 통해 도플러 천이에 따라 위상 추정 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 그림 4는 도플러 천이의 변화에 따라 위상 오차를 보인다.

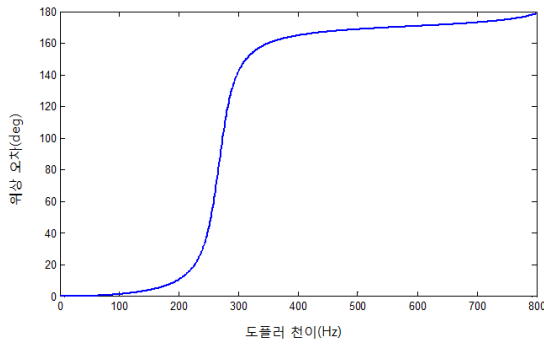


그림 4. 도플러 천이에 의한 위상 오차 모의실험 결과.  
Fig. 4. Simulation results of phase error due to doppler shift.

#### 4.2. 도플러 추정 결과

STFT와 제안한 SA 알고리즘을 이용한 적응 도플러 추정 기법의 성능을 비교하기 위해 모의실험을 수행하였다. 송신 신호 주파수를 120kHz로 하고 이동 목표물에 의한 도플러 천이는 50Hz 간격으로 증가하여 추정 결과를 확인하였다. 이 때 거리 측정 시스템은 고정되어 있고, 목표물이 이동한다고 가정하였다. STFT 기법에 대한 최대 오차는 도플러 천이가 0Hz에서 -5.8Hz로 추정되어 최대 5.8Hz의 오차가 발생하였으며, 평균 0.95Hz의 오차가 발생하였다. 제안된 기법에서는 100, 200 ~ 500, 600, 800Hz에서 0.1Hz의 오차가 발생하였으며, 평균 0.05Hz의 오차가 발생하였다. 모의실험 결과 제안된 기법으로 도플러를 추정하였을 경우 STFT 기법보다 평균 94.7%의 높은 성능을 보인다. 표 2는 50Hz 간격에 따른 STFT 기법과 제안된 기법으로 도플러 천이를 추정한 결과를 나타낸다.

#### 4.3. 거리 추정 결과

도플러 천이가 포함된 입력 신호에 대해 STFT를 이용한 기법과 제안된 적응 도플러 보정 기법을 적용하여 거리 측정 정확도를 확인한다. 거리 측정 시스템과 목표물과의 거리는 1.8m로 가정하였으며, 송신 신호의 주파수 120kHz에 대해 도플러 천이가 50Hz 간격으로 발생할 경우 거리 측정 오차를 확인한다. 이 때 사용된 위상 추정은 LSM 기법을 적용하였으며, 거리 측정 시스템은 고정되어 있고, 목표물이 이동한다고 가정하였다. 그림 5는 도플러 천이에 따라 STFT 방식과 제안된 방식의 거리를 추정 오차를 보인다. 그림 5(a)의 STFT 기법과 제안된 기법에 대한 거리 추정 오차에서 STFT 기법은 도플러 천이가 350Hz일 때 3.7mm으로 최대 오차가 발생하였고, 평균 1.4mm의 오차가 발생하였다.

표 2. STFT와 SA 알고리즘을 이용한 적응 도플러 추정 결과 비교

Table 2. Comparison of STFT and SA algorithm in estimating doppler shift.

| 도플러 천이(Hz)<br>(A) | STFT 기법(Hz)<br>(B) | 제안된 기법(Hz)<br>(C) | STFT 기법 오차<br>(A-B) | 제안된 기법 오차<br>(A-C) |
|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| 0                 | 5.8                | 0.0               | -5.8                | 0.0                |
| 50                | 45.6               | 50.0              | 4.4                 | 0.0                |
| 100               | 97.1               | 99.9              | 2.9                 | 0.1                |
| 150               | 148.6              | 150.0             | 1.4                 | 0.0                |
| 200               | 200.1              | 199.9             | -0.1                | 0.1                |
| 250               | 251.6              | 249.9             | -1.6                | 0.1                |
| 300               | 300.2              | 299.9             | -0.2                | 0.1                |
| 350               | 348.9              | 349.9             | 1.1                 | 0.1                |
| 400               | 397.5              | 399.9             | 2.5                 | 0.1                |
| 450               | 446.2              | 449.9             | 3.8                 | 0.1                |
| 500               | 494.8              | 499.9             | 5.2                 | 0.1                |
| 550               | 546.3              | 550.0             | 3.7                 | 0.0                |
| 600               | 597.8              | 599.9             | 2.2                 | 0.1                |
| 650               | 649.3              | 650.0             | 0.7                 | 0.0                |
| 700               | 700.8              | 700.0             | -0.8                | 0.0                |
| 750               | 752.3              | 750.0             | -2.3                | 0.0                |
| 800               | 800.9              | 799.9             | -0.9                | 0.1                |
| 평균                |                    |                   | 0.95                | 0.05               |

제안된 기법은 일부 구간에서 STFT 보다 오차가 크게 발생하였지만, 전 구간에서 오차 변동이 작으며 250Hz와 750Hz에서 최대 1.0mm 오차가 발생하였다. 전 구간에서 오차 평균은 0.7mm이다. 그림 5(b)는 거리 추정 오차의 차이를 확인하기 위해 STFT 기법의 거리 추정 오차에서 제안된 기법의 거리 추정 오차를 뺀 결과이며, 제안된 기법이 STFT 기법보다 평균 50% 우수한 성능을 보인다.

#### 4.4. 음향 수조 시험 결과

제안된 위상 측정 방법의 실 환경 적용 가능성 분석을 위해 음향 수조 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 수조는 가로 5m, 세로 5m 및 수심 5m인 음향 수조로 벽면에 의한 다중 반사 신호의 영향을 최소화하기 위해 기하학적 비대칭 구조로 설계되었다. 이와 같은 구조는 수신 신호에서 목표물 반사 신호와 인접한 경계면에 의한 다중 반사 신호를 구분하는데 큰 도움을 준다. 그림 6은 음향 수조의 구조와 시험에 사용된 계측기 및 센서 위치에 대한 구성도이다. 음향 수조 시험에서는 목표물과 송신기(transducers) 사이의 거리를 약 1.8m로 유지하였으며, 송신 신호와 목표물 반사 신호 수신을 위해 청음기(hydrophone)를 송신기 부근에 설치하여 운용하였다.

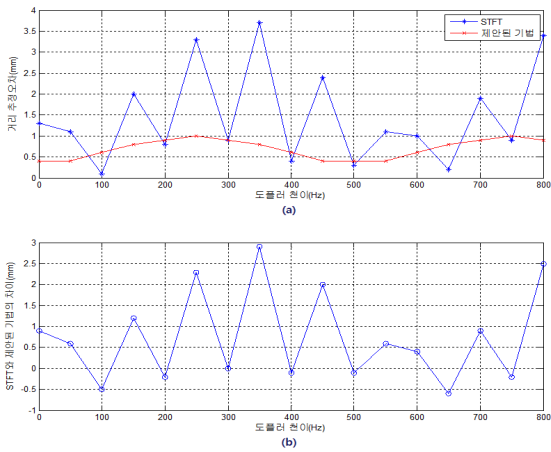


그림 5. 도플러 천이에 따른 STFT 방식과 제안된 방식의 거리 측정 오차 비교 (a) 도플러 천이에 따른 STFT 기법과 제안된 기법의 거리 추정 오차, (b) STFT 기법과 제안된 기법의 차이.  
 Fig. 5. Comparison of STFT and the proposed method in estimating distance, (a) estimation error of STFT and the proposed method, (b) the result subtract STFT from the proposed method.

수신신호 샘플링 주파수는 3MHz이며, 수온은 약 19.1°C, 수중 음파 전달 속도 1452.0m/sec로 관측되었다. 시험을 위해 생성된 송신 신호는 반송파 주파수 120kHz 정현파 신호를 100Hz 신호에 변조하여 1msec 길이의 신호이다. 이 때 변조신호 파장은 14.42m이다.

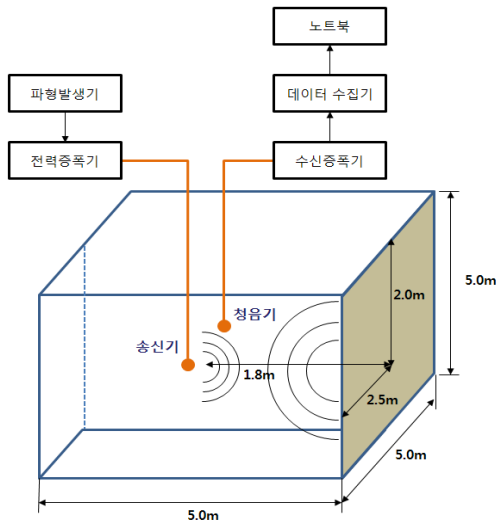


그림 6. 음향 수조 시험 구성도  
 Fig. 6. Experimentation concept in an acoustic tank

송신 신호는 파형발생기를 통해 생성되고 전력증폭기를 거쳐 신호가 증폭된다. 증폭된 신호는 송신기를 통해 전기적인 신호가 음향 신호로 변환되어 목표물에 송신된다. 목표물에 의해 반사된 신호는

청음기를 통해 음향 신호가 전기적 신호로 변환되고, 수신증폭기를 통해 신호가 증폭되어 데이터 수집기 및 노트북을 통해 수신 데이터가 저장된다. 전력증폭기 및 수신증폭기는 좋은 신호대잡음비를 유지하기 위해 사용하였다. 수신신호에서 목표물까지의 거리와 수중 음파 전달 속도를 통해 추정된 목표물 반사 신호는 약 2 ~ 3.5msec 부근 신호이며, 3.5msec 이후의 신호는 수조 벽이나 수면, 바닥 등의 다중경로(multipath)를 통해 수신된 신호이다. 그림 7은 청음기에 수신된 목표물의 반사 신호를 측정한 결과이다.

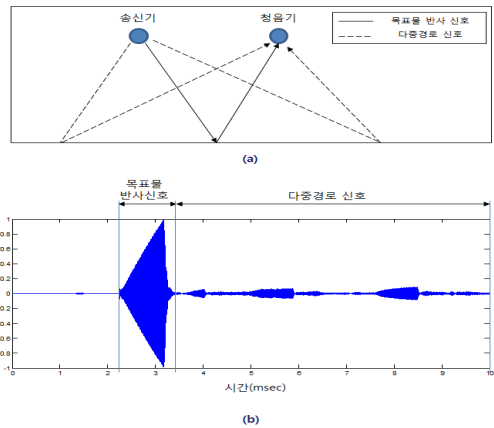


그림 7. 목표물에 의한 반사신호 (a) 음향 수조에서 목표물에 의해 직접 반사되는 신호와 바다, 벽면 등의 다중 경로를 통해 수신된 신호의 예시, (b) 청음기를 통해 실제 수신된 신호  
 Fig. 7. Reflected signal from a target, (a) diagram with directed and multipath signal from a target, (b) received signal through a hydrophone.

실험을 통해 획득된 신호와 제안된 위상 추정 방법으로부터 추정된 목표물과의 거리는 약 1.877m로서, 약 0.077m의 오차가 발생하였다. 이와 같은 오차는 송신기와 청음기 설치 시 발생한 목표물과의 거리 오차로 인한 것으로 판단된다.

### V. 결론

본 논문에서는 진폭 변조 방식의 거리 측정 시스템에서 이동 목표물의 거리 측정 시 발생할 수 있는 위상 추정 오차를 개선하기 위하여 적응 도플러 보정 기법을 통한 위상 추정 기법을 제시하였다. 제안된 기법은 SA 알고리즘으로 이동 목표물에 의한 도플러 천이를 추정하고, 고조파 성분의 왜곡을 최소화하고 처리 속도를 고려한 LSM 위상 추정 기법을 적용하여 위상을 추정하였다. 모의실험 결과

STFT 방법보다 도플러 추정 성능은 평균 94.7%로 기존 방식보다 높은 성능을 보이며, 1.8m 거리에 있는 목표물에 대해 거리 측정 정확도는 기존 방식과 비교하여 50%로 향상되었다. 또한 모의실험과 동일하게 1.8m 거리의 목표물에 대해 음향 수조 시험을 수행할 결과 약 7.7cm의 거리 추정 오차가 발생됨을 확인하였다. 모의실험과 음향 수조 시험을 통해 제안된 방법은 도플러 천이 보정 및 위상 추정 성능이 우수하여 정밀 거리 추정에 적용 가능하고, 수중 해양 환경에서 음파를 사용한 거리 추정에도 적용 가능성을 확인하였다. 추후 과제로 실시간 처리가 가능하도록 연산량을 개선하고 임베디드 환경에 적합한 전체 시스템 설계에 대한 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

- [1] A. Kilpela, R. Pennala, and J. Kostamovaara, "Precise Pulsed Time-of Flight Laser Range Finder for Industrial Distance Measurements", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 72, No. 4, pp. 2197-2202, April 2001.
- [2] E. Hyun, and J. Lee, "Method to Improve Range and Velocity Error Using De-interleaving and Frequency Interpolation for Automotive FMCW Radars", *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, Vol. 2, No. 2, June 2009.
- [3] H. Rohling, and M. Meinecke, "Waveform Design Principles for Automotive Radar Systems", in *Proc. CIE International Conference on Radar*, Beijing, China, pp. 1-4, Oct 2001.
- [4] S. Poujouly, B. Journet, and D. Placko, "Digital Laser Range Finder : Phase-Shift Estimation by Undersampling Technique", in *Proc. IEEE 25th Annual Conference*, California, USA, Vol. 3, pp. 1312-1317, Nov 1999.
- [5] Bee-Jay Park, Chung-Woo Lee, Chung-Choo Chung, Jae-Hyuk Sho, and Sang-Jin Ong, "Implementation of High-Resolution Laser Distance Measurement System using Phase-Shift Method", *2004 Conference on Information and Control Systems*, Vol. 2004, No. 11, pp. 589-591, Nov 2004.
- [6] Hyoung-Woo Noh, Jeong-Ho Park, Il-Heung Kang, Mun-Gak Choi, and Kang-Wook Kim, "The Phase Difference Measurement Module Development for Amplitude Modulated Range Measurement System", *KIEES Journal*, Vol. 22, No. 2, pp. 182-190, Feb 2011.
- [7] S. Nejad, "Comparison of TOF, FMCW and Phase-Shift Laser Range-Finding Methods by Simulation and Measurement", *Quarterly Journal of Technology & Education*, Vol. 1, No. 1, Autumn 2006.
- [8] K. Ibrahim, and M. Abdul-Karim, "A Novel Digital Phase Meter", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-36, pp. 711-716, Sept 1987.
- [9] S. Mahmud, "Error Analysis of Digital Phase Measurement of Distorted Waves", *IEEE Trans. Instrumentation and Meas.*, Vol. 38, pp. 6-9, Feb 1989.
- [10] Young-Suk Song, Jae-Chul Kim, In-Kyu Choi, and Jong-Sik Park, "An Advanced Phase Angle Measurement Algorithm And Error Analysis", *IEEK Journal*, Vol. 41, No. 3, pp. 25-32, May 2004.
- [11] R. Micheletti, "Phase Angle Measurement Between Two Sinusoidal Signals", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 40, No. 1, pp. 40-42, Feb 1991.
- [12] Kang-Ryul Ryu, Jong-Pil Lee, Tae-Jin Kim, Dong-Wook Yoo, Eui-Ho Song and Byung-Duk Min, "A Method of PLL(Phase-Locked Loop) using FFT", *KIPE Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 206-212, June 2008.
- [13] S. Mahmud, "High Precision Phase Measurement Using Adaptive Sampling", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 38, No. 5, pp. 954-960, Oct. 1989.
- [14] Kook-Hyun Nam, "Doppler Frequency Estimation for Mobile OFDM System", A master's dissertation, Kwangwoon, 2009.
- [15] P. Welch, "The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms", *IEEE Trans. Audio*



and *Electroacoustics*, Vol. AU-15, No. 2, pp. 70-73, June 1967.

- [16] Joong-Tak Son, Seung-Houn Lee, and Kil-Houm Park, "Instantaneous Frequency Estimation of Doppler Signal using Wavelet Transform", *IEEK Journal*, Vol. 42, No. 3, pp. 99-106, May 2005.
- [17] W. Kuang, and A. Morris, "Using Short-Time Fourier Transform and Wavelet Packet Filter Banks for Improved Frequency Measurement in a Doppler Robot Tracking System", *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, Vol. 51, No. 3, pp. 440-444, June 2002.
- [18] Y. Zhang, Z. Guo, W. Wang, S. He, T. Lee, M. Loew, "A Comparison of The Wavelet and Short-Time Fourier Transforms for Doppler spectral analysis", *Medical Engineering & Physics*, Vol. 25, Issue 7, pp. 547-557, Sep 2003.
- [19] J. Proakis, and D. Manolakis, *Digital Signal Processing*, 3rd Edition, Prentic Hall, pp. 118-133, 1996.
- [20] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680, May 1983.
- [21] P. J. M. van Laarhoven, and E. H. L. Aarts, "Simulated Annealing: Theory and Applications", *Kluwer Academic Publishers*, pp. 7-15, May 1987.

김대중 (Dae-Joong Kim)

정회원



1996년 2월 금오공과대학교  
전자 학사  
1995년~현재 LIG넥스원(주)  
수석연구원  
2010년~현재 서강대학교 전자  
공학과 CAD & ES 연구실  
석사 과정

<관심분야> Real time Embedded system

오택환 (Taek-Hwan Oh)

정회원



2000년 2월 한양대학교  
지구해양과학과 학사  
2002년 2월 한양대학교  
지구해양과학과 이학석사  
2006년 2월 한양대학교  
지구해양과학과 이학박사  
2006년~현재 LIG넥스원(주)  
수석연구원

<관심분야> 수중음향학, 해양음향도모그래피,  
Geoacoustic Inversion

황선영 (Sun-Young Hwang)

중신회원



1976년 2월 서울대학교  
전자공학과 학사  
1978년 2월 한국과학원 전기  
및 전자공학과 공학석사  
1986년 10월 미국  
Stanford 대학 전자공학 박사  
1976년~1981년 삼성반도체(주)  
연구원, 팀장

1986~1989년 Stanford 대학 Center for Integrated System 연구소 책임연구원 및 Fairchild Semiconductor Palo Alto Research Center 기술자문  
1989~1992년 삼성전자(주) 반도체 기술 자문  
1989년 3월~현재 서강대학교 전자공학과 교수  
<관심분야> SoC 설계 및 framework 구성, CAD 시스템, Computer Architecture 및 DSP System Design 등