

# 수동 소나 시스템에서 자체 잡음 제거

차일환, 윤대희, 박상덕, 이장식

## Self-noise Cancellation in the Passive Sonar System

I. W. Cha, D. H. Youn, S. T. Park, J. S. Lee

\* Dept. of Electronic Eng., Yonsei University

\*\* ADD ( Agency for Defence Development of KOREA )

### 요 약

본 논문은 견인선(tow-ship)에서 발생하는 자체 잡음을 제거하여 수중 신호처리 시스템에서 표적 탐지 ( target detection )와 표적 식별 ( target identification ) 등의 성능 향상을 위하여 표적 방향으로 형성된 빔의 출력을 원시 입력신호(primary input)로 사용하고 견인선 방향으로 형성된 빔의 출력을 참고 입력신호(reference input)로 사용한 적응 잡음 제거기(adaptive noise canceller)에 대해 연구하였다. 잡음 제거를 위해 사용되는 계수들은 LMS(Least Mean Square) 알고리즘을 이용하여 조정하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 TDL(Tapped-Delay Line) 구조와 LAT(LAT:ice) 구조를 갖는 적응 잡음 제거기 성능을 여러 가지 환경에서 비교, 관찰하였다. 두 알고리즘을 사용할 경우, 자체 잡음이 어떠한 형태로 나타내더라도 제거시킬 수 있음을 보여 주었으나 고유값 분포율(eigenvalue spread ratio)이 큰 경우에는 LMS-LAT가 LMS-TDL보다 수렴 속도뿐만 아니라 성능면에서도 우수함을 보였다.

### I. 서 론

지연-합(Delay-and-sum) 빔 형성기[1]를 사용한 수동 소나(passive sonar) 시스템에서 빔 형성기가 신호 대 잡음비(SNR) 향상 및 간섭 신호 제거를 위한 지향성 빔이 최적화 되더라도 견인선 자체 잡음(tow-ship self-noise)이 표적 신호에 남아있게 된다. 그림 1과 같이 부엽의 이득이 작더라도 표적 신호에 비해 견인선 자체 잡음이 상대적으로 강하기 때문에 표적 빔 형성기의 출력은 이 자체 잡음에 의해 영향을 받게 된다.

본 논문에서는 견인선 자체 잡음을 제거하기 위해 참고 빔을 이용한 한 채널(one channel) 적응 잡음 제거기를 사용하였다. 적응 잡음 제거기는 TDL 구조로 실현할 수 있고 필터 계수는 계산이 간단하고 효율적인 LMS(Least Mean Square) 알고리즘을 사용하여 구할 수 있다[2][3]. 그러나,

그 수렴 속도는 입력 신호의 자기 상관 행렬(autocorrelation matrix)의 고유값 분포율에 따르게 되는 단점을 갖고 있다[2]. 이러한 단점을 보완하기 위해서 직교화 성질을 갖는 LAT 구조를 사용하여 수렴 속도를 빠르게 할 수 있다 [2][3][4].

### II. 자체 잡음 제거

그림2와 같이 견인선에 의해  $\theta_0$  방향으로 조정된 선형 어레이가 견인되는 경우에 어레이는  $\theta_0$  방향에서 입사되는 표적 신호  $s(k)$  외에 견인선 자체에서 발생하는 신호  $n(k)$ 도  $\theta_0$ 의 각도로 항상 받아들여지게 된다. 이런 경우 비록 선형 어레이가  $\theta_0$  방향으로 주엽(main beam)이 조정되었다고 하더라도 부엽  $\theta_n$  방향에 대한 이득만큼 견인선 자체 신호  $n(k)$ 가 받아들여진다.

센서 출력에서 첨가 잡음을 고려하지 않으면  $m$  번째 센서의 출력  $x_m(k)$ 는 다음과 같다.

$$x_m(k) = s(k - m\delta(\theta_0)) + n(k - m\delta(\theta_n)), 0 \leq m \leq M-1 \quad (2-1)$$

여기서,  $\delta(\theta_0) = (d/c) \cos(\theta_0)$ ,  $0^\circ \leq \theta_0 \leq 180^\circ$   
 $\delta(\theta_n) = (d/c) \cos(\theta_n)$ ,  $0^\circ \leq \theta_n \leq 180^\circ$   
 $d$ 는 센서간의 거리,  $c$ 는 신호의 전파속도.

따라서, 지연-합 빔 형성기의 출력 신호  $y_j(k)$ 는 다음과 같다.

$$y_j(k) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m s(k - m\delta(\theta_0) + m\tau_j) + \sum_{m=0}^{M-1} a_m n(k - m\delta(\theta_n) + m\tau_j) \quad (2-2)$$

여기서,  $\tau_j = (d/c) \cos(\theta_j)$ ,  $0^\circ \leq \theta_j \leq 180^\circ$

$a_m$ 는 빔 형성기의 계수,  $0 \leq m \leq M-1$

본 연구는 국방 과학 연구소의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

만일, 표적 신호 방향  $\theta_s$  로 빔 형성기가 정확히 조정된 경우, 즉,  $\theta_j = \theta_s$  일 경우는  $\delta(\theta_s) = \tau_j$  이므로 식(2-2)는 다음과 같이 표현된다.

$$y_j(k) = s(k) \sum_{n=0}^{M-1} a_n \cdot \sum_{m=0}^{M-1} a_m n(k - m \delta(\theta_n) + m \tau_j) \quad (2-3)$$

여기서,  $A = \sum_{n=0}^{M-1} a_n$ ,  $\tilde{n}(k) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m n(k - m \delta(\theta_n) + m \tau_j)$

식(2-3)에서  $\tilde{n}(k)$  는  $\theta_s$  방향으로 조정된 빔 형성기의 출력에 내포된 자체 잡음 성분을 나타낸다. 만일 자체 잡음 신호  $n(k)$ 를 알 수 있다면 적응 잡음 제거기[2][6][7]를 사용하여  $\tilde{n}(k)$ 를 제거할 수 있다. 자체 잡음 신호  $n(k)$ 가 표적 신호 방향으로 조정된 빔 형성기의 출력  $y_j(k)$ 로부터 자체 잡음 성분  $\tilde{n}(k)$ 를 제거하는 적응 잡음 제거기를 그림 3에 보였다. 따라서  $y_j(k)$ 에 내포된 자체 잡음 성분  $n(k)$ 를 제거하는 문제는  $H_j(z)$ 를 추정하는 것과 같게 된다. 문제는 자체 잡음 성분  $\tilde{n}(k)$ 를 제거하기 위해 사용되는 자체 잡음 신호  $n(k)$ 를 어떻게 얻을 수 있는냐 하는 것이다. 이것은  $\theta_n$ 으로 빔 형성기를 조정하여  $n(k)$ 를 구하고 이렇게 얻어진  $n(k)$ 를 참고 입력  $r(k)$ 로 사용한다. 따라서 식(2-3)과 유사하게  $r(k)$ 는 다음과 같이 된다.

$$r(k) = \tilde{s}(k) + A n(k) \quad (2-4)$$

여기서,  $\tilde{s}(k) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m s(k - m \delta(\theta_s) + m \tau_n)$   
 $\delta(\theta_n) = \tau_n$

식(2-4)에서  $\tilde{s}(k)$ 는 식(2-3)의  $\tilde{n}(k)$ 가 생성되는 것과 마찬가지로  $\theta_n$ 으로 조정된 빔 형성기의 부엽 또는 두 신호  $s(k)$ 와  $n(k)$ 가 근접한 경우에 주엽의 넓은 빔 폭때문에 생성되는 성분이다. 따라서,  $r(k)$ 를 참고신호로 이용할 경우  $r(k)$ 에 내포된  $\tilde{s}(k)$ 는 표적 신호  $s(k)$ 와 상관 관계가 존재하므로  $y_j(k)$ 내의  $n(k)$ 뿐만 아니라  $s(k)$ 도 일부 제거되는 현상이 발생된다. 그러나, 만약  $s(k)$ 의 분산(variance:  $\sigma_s^2$ )이  $n(k)$ 의 분산  $\sigma_n^2$ 보다 매우 작은 경우, 즉,  $\sigma_s^2 \ll \sigma_n^2$  일때는  $\tilde{s}(k)$ 에 의해 발생하는 문제는 무시할 수 있다. 실제로, 표적이 자체 잡음 신호의 근원인 견인선보다는 훨씬 멀리 있을뿐만 아니라, 자체 잡음 방향으로 조정된 빔 형성기에 의해 감쇄되므로  $\sigma_s^2 \ll \sigma_n^2$ 의 가정은 유용하게되며 일부  $s(k)$ 가 제거되는 현상은 무시할 수 있다.

그림3에서 원시 입력에 받아들여진 자체 잡음 성분  $n(k)$ 는 자체 잡음 신호  $n(k)$ 가 전달 함수  $H_j(z)$ 인 필터를 통과해서 생성된 것으로 볼 수 있으므로 어레이를  $\theta_n$  방향으로 조정하여 얻어진 자체 잡음 신호  $n(k)$ 를 참고 신호로하여  $H_j(z)$ 를 추정하여  $\hat{H}_j(z) = H_j(z)$ 가 되도록 하면 자체 잡음 성분  $\tilde{n}(k)$ 를 제거할 수 있게 된다.

### III. 적응 잡음 제거기

신호의 통계적 특성을 이용하여 시스템의 최적 전달 함수를 구하는 대표적인 방법으로 Wiener filtering 방법이 있다[2][3][8]. 참고 입력  $x(k)$ 를 이용하여 원시 입력  $y(k)$ 를 추정할때, 입력 신호가 stationary 라고 가정하면, Wiener filtering의 문제는 평균 제곱 오차(mean-squared-error:MSE)  $E\{e^2(k)}$ 를 최소화하는 계수  $\beta$ 를 구하는 것이므로 최적 계수 벡터  $\beta_{opt}$ 은 평균 제곱 오차를  $\beta$ 에 대해 미분한 함수가 영이되는  $\beta$ 를 구하여 얻을 수 있다. 따라서, 최적 계수는 다음과 같이 된다.

$$\beta_{opt} = R^{-1}P \quad (3-1)$$

여기서  $R$ 는  $x(k)$ 의 autocorrelation matrix 이고,  $P$ 는  $x(k)$ 와  $y(k)$ 의 cross-correlation vector 이다.

식(3-1)로 주어지는 최적 계수 벡터는 주어진 참고 입력으로부터 추정해야 하는데 입력의 통계적 특성이 변하는 경우에는 최적 계수 벡터는 계속해서 조정되어야만 한다. 그 대표적인 적응 알고리즘이 LMS 알고리즘[2][3]이다.

Wiener 필터를 구성하는 방법은 여러가지가 있으나 가장 간단한 형태로서 TDL 필터 구조가 있으며, 필터 계수  $\beta$ 를 구할때 LMS 알고리즘을 이용한 경우를 LMS-TDL 필터라 한다. 그 구조는 그림4와 같으며 본 논문에서 사용한 계수  $h_m(k)$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$h_m(k+1) = h_m(k) + \frac{1-\beta}{\sigma_x^2(k)} e(k)x(k-m) \quad (3-2)$$

$$\sigma_x^2(k+1) = \beta \sigma_x^2(k) + (1-\beta) x^2(k) \quad (3-3)$$

LMS-TDL은 참고 입력 상관 행렬의 고유값 분포에 수렴 속도가 지배되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 직교화 과정을 실현시킨 방법중의 하나가 LAT 필터이다. 각 계수들을 조정할 때 LMS 알고리즘을 이용하여 구하는 것은 LMS-LAT 필터라 한다[9].  $n$ 번째 단계에서의 구조는 그림5와 같으며 사용한 계수는 다음과 같다.

$$a_n(k+1) = a_n(k) + \mu_n(k)[e_n(k)w_{n-1}(k) + e_{n-1}(k)w_n(k+1)] \quad (3-4)$$

$$\hat{a}_n(k+1) = \hat{a}_n(k) + \hat{\mu}_n(k)v_n(k)w_{n-1}(k+1) \quad (3-5)$$

$$\mu_n(k) = (1-\beta) / \sigma_n^2(k) \quad (3-6)$$

$$\hat{\mu}_n(k) = (1-\beta) / \hat{\sigma}_n^2(k) \quad (3-7)$$

$$\sigma_n^2(k) = \beta \sigma_n^2(k-1) + (1-\beta)[e_n^2(k) + w_n^2(k)] \quad (3-8)$$

$$\hat{\sigma}_n^2(k) = \beta \hat{\sigma}_n^2(k-1) + (1-\beta)v_n^2(k) \quad (3-9)$$

여기서,  $x(k) = e_0(k)$ ,  $w_0(k) = x(k-1)$

$$e_n(k) = e_{n-1}(k) - a_n(k)w_{n-1}(k)$$

$$w_n(k) = w_{n-1}(k-1) - a_n(k)e_{n-1}(k-1)$$

$$v_n(k) = v_{n-1}(k) - \hat{a}_n(k)w_{n-1}(k+1)$$

$$0 < \beta < 1, \quad 1 \leq n \leq N$$

LAT 구조는 각 단(stage)이 서로 독립적이므로 수렴속도는 참고 입력 상관 행렬의 고유값 분포에 무관하게되는 장점이 있다 [3][8].

#### IV. 컴퓨터 시뮬레이션

신호 방향으로 주엽이 정확히 조정된 이상적인 경우에 대해 LMS-TDL 필터의 성능과 LMS-LAT 필터 성능을 비교하였다. 또한 보다 실제적인 경우의 성능을 관찰하기 위해 대역제한된 백색잡음과 sine파가 존재하는 하는 경우를 가정하여 살펴 보았다.

백색잡음을 저역 차단 주파수(lower cutoff frequency)와 고역 차단 주파수(upper cutoff frequency)가 각각 200Hz, 400Hz인 8차 butterworth 필터에 표본화 주파수(sampling frequency)를 1.6 KHz로 하여 통과시킨 후, 지연-합 빔 형성기로 신호를 발생시켰다. 이때 빔 형성기의 계수  $a_n, 0 \leq n \leq 15$ , 는 Dolph - Chebyshev polinomial을 사용하였다.

표적 신호와 잡음 신호의 입사 방향이 빔 형성기의 표적 빔 방향과 참고 빔 방향에 일치할 때의 성능을 관찰하였다. 사용된 신호의 방향과 빔 형성기의 빔 방향은 다음과 같다.

	case 1	case 2
표적 신호 입사 방향	90°	51°
자체 잡음 신호 입사 방향	29°	29°
표적 빔 방향	90°	51°
참고 빔 방향	29°	29°

표적 빔의 출력은 적응 잡음 제거기의 원시 입력으로, 참고 빔의 출력은 참고 입력으로 했으며, 이때 표적 신호와 잡음 신호간에는 상관 관계가 없다고 가정하였다. 표적 신호와 잡음 신호간의 SNR을 -30dB, -40dB, -50 dB, -60 dB로 변화시켜가며 결과를 비교하였다. 사용된 신호의 SNR 은 다음과 같이 정의된다.

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \right)$$

여기서,  $\sigma_s^2$  은 표적 신호의 분산이며,  $\sigma_n^2$  은 잡음 신호의 분산이다.

LMS-TDL 적응 필터의 차수와 스무딩 파라미터를 case 1에서는  $N = 30$ 과  $\beta = 0.999985$ 로 고정시키고, case 2는  $N = 40$ 과  $\beta = 0.984375$ 로 고정시켰으며, LMS-LAT의 필터 차수와 스무딩 파라미터는 필터 차수는 TDL의 차수와 같고  $\beta$

= 0.999985로 고정하여 잡음 제거 과정을 수행하였다. 처리 결과를 그림 6, 7에 나타냈다. case 1의 경우에는 두 알고리즘 모두 자체 잡음을 잘 제거하였으며, 성능은 비슷한 결과를 얻었다. 그러나 case 2의 경우에는 LMS-LAT가 LMS-TDL보다 성능이 우수하였다.

case 1에 대역 제한된 백색 잡음과 sine파가 포함된 신호를 사용할 때, LMS-TDL과 LMS-LAT 적응 잡음제거기의 성능을 비교하였다. 표적 신호에 포함된 sine 파는 250, 300, 350 Hz 이며 잡음 신호에는 230, 280, 330, 380 Hz 가 포함되었다. 이때 신호의 파워는 sine파에 비해 0 dB의 비를 갖는다. Sine파가 포함된 표적 신호와 잡음 신호 간의 SNR이 -30 dB, -40 dB, -50 dB, -60 dB 일 때 각각에 대해 그림 8, 9에 결과를 나타냈다. 거의 모든 상황에서 자체 잡음을 제거하고 있음을 보여 주고 있다.

#### V. 결 론

본 논문에서는 견인 어레이에 수신되는 자체 잡음을 제거하기 위해 적응 잡음 제거기를 구성하였다. 잡음제거기는 LMS 알고리즘을 이용하여 계수를 조정해 나가며, single 채널 TDL과 LAT 구조를 갖는 적응 잡음 제거기를 구성하고 성능을 비교하였다. 구성된 적응 잡음 제거기는 두 개의 입력을 갖는데, 표적 방향으로 형성된 빔의 출력이 원시입력으로, 견인선 방향으로 형성된 빔의 출력이 참고입력으로 사용했다.

참고 빔을 이용하면 표적 방향의 빔에 포함된 자체 잡음이 어떠한 형태로 나타나더라도 제거시킬 수 있음을 보여 주었다. 일반적으로 LMS-LAT 적응 잡음 제거기가 LMS-TDL 잡음 제거기 보다 수렴속도가 빠르고 오차 신호(error)가 적음을 알 수 있었다. 앞으로의 과제는 견인선에서 발생하는 자체 잡음만을 수신할 수 있는 효율적인 참고 빔의 형성과 주변잡음에 대해 더욱 강한 적응 잡음 제거기의 개발에 대한 지속적인 연구가 필요하다 하겠다.

#### 참고 문헌

- [1] R.A.Mucci, "A Comparison of Efficient Beamforming Algorithms," IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Proc., vol.32, pp.548-558, June 1984.
- [2] B.Widrow and S.D.Sterns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, 1985.
- [3] D.H.Youn, A Class of Adaptive Methods for Estimating Coherence and Time Delay Functions, Ph.D. Thesis, Kansas State University, Manhattan, KS., 1982.

- [4] N. Ahmed and D.H. Youn, "On a Realization and Related Algorithm for Adaptive Prediction," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Proc., vol. 28, no. 5, pp. 493-397, Oct. 1980.
- [5] R.S. Elliott, *Antenna Theory and Design*, Prentice-Hall, Inc., 1981.
- [6] B. Widrow et al., "Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications," Proc. IEEE, vol. 63, no. 12, pp. 1692-1716, Dec. 1975.
- [7] L.J. Griffiths, "An Adaptive Lattice Structure for Noise-Cancelling Applications," Proc. ICASSP, Tulsa, OK., pp. 87-90, Apr. 1978.
- [8] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice-Hall, Inc., 1986.
- [9] D.F. Elliott, *Handbook of Digital Signal Processing*, Academic Press Inc., 1990.

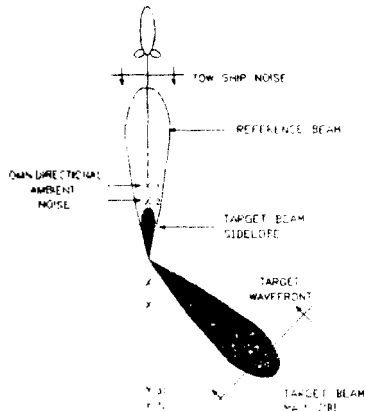


그림 1. 전인선 자체 잡음

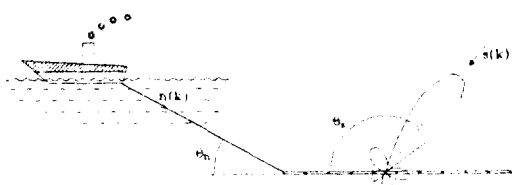


그림 2. 전인선과 전인 어레이

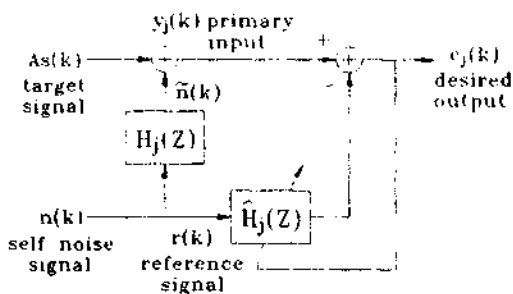


그림 3. 자체 잡음 제거 시스템의 블럭도

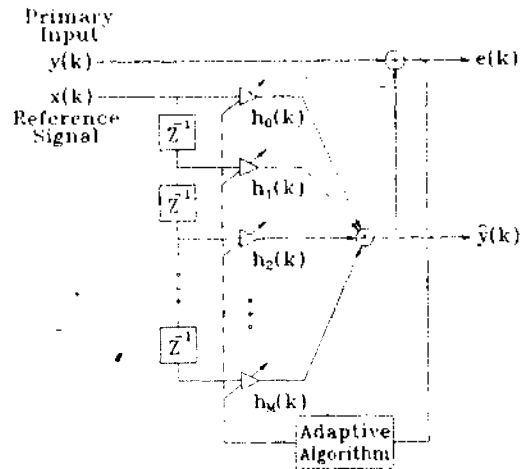


그림 4. 적응 TDL 필터

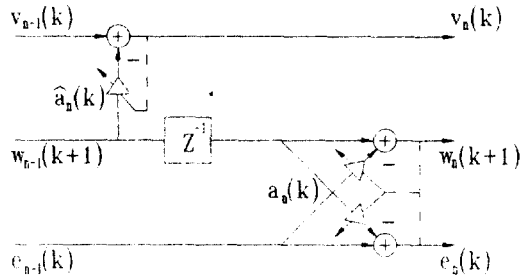


그림 5. 적응 LAT 필터

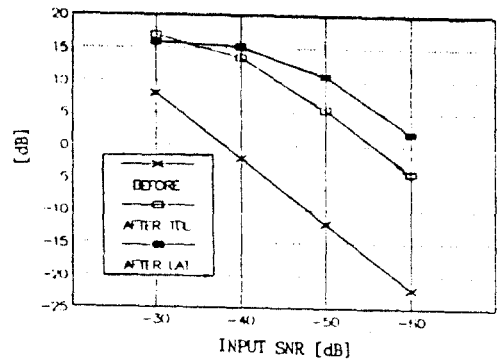


그림 6. LMS-TDL과 LMS-LAT의 SNR 비교 ( case 1 )

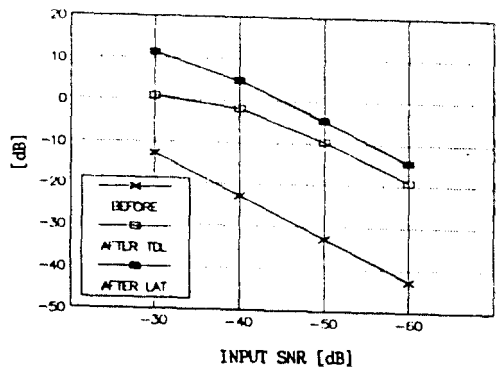


그림 7. LMS-TDL과 LMS-LAT의 SNR 비교 ( case 2 )

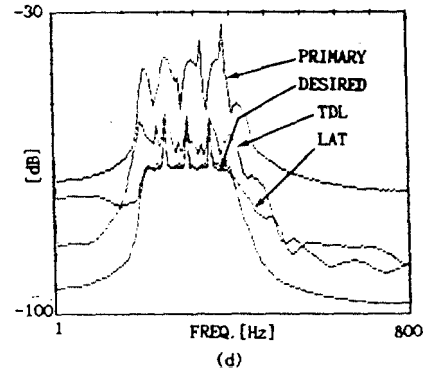
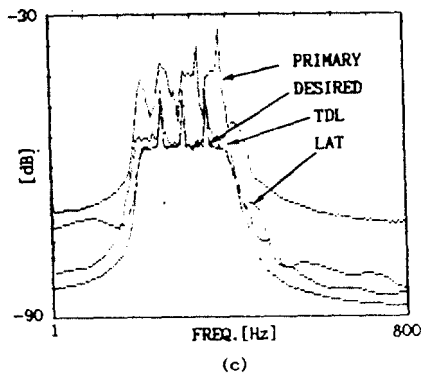
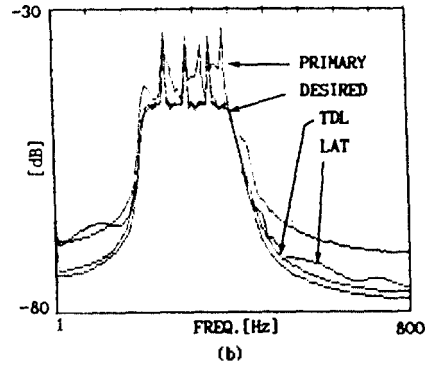
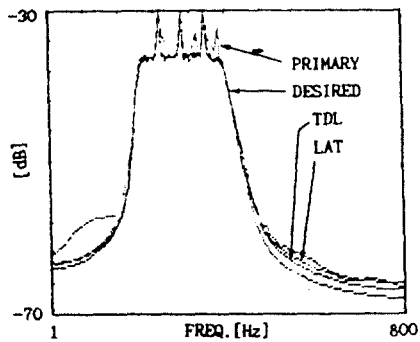


그림 8. 신호에 sine 파가 포함되었을 때의 전력 밀도 스펙트럼

- (a) SNR = -30 dB 인 경우의 전력 밀도 스펙트럼
- (b) SNR = -40 dB 인 경우의 전력 밀도 스펙트럼
- (c) SNR = -50 dB 인 경우의 전력 밀도 스펙트럼
- (d) SNR = -60 dB 인 경우의 전력 밀도 스펙트럼

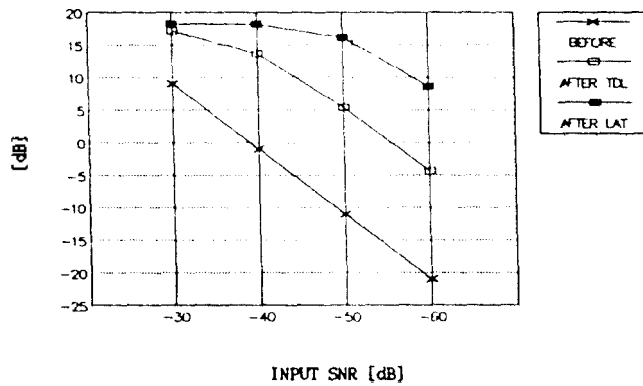


그림 9. 신호에 sine 파가 포함되었을 때의 SNR 비교