

밀리미터파 탐색기 내 누설신호 상쇄기 및 적응형 알고리즘에 관한 연구

Leakage Signal Canceller and Adaptive Algorithm in Millimeter-Wave Seeker

박 지 안 · 송 성 찬

Ji An Park · Sung Chan Song

요 약

본 논문에서는 FMCW 레이더에서 강한 송신신호의 누설로 발생하는 문제들을 해결하기 위한 누설신호 상쇄기 및 상쇄기 내 탑재되는 적응형 알고리즘을 제안한다. 누설신호 상쇄기는 실시간으로 누설신호를 제거하는 적응형 구조이며, 제안하는 알고리즘은 현재 누설신호에 최적화된 예측 벡터 및 학습적응 계수를 산출하여 기존 알고리즘 대비 10 dB 이상의 상쇄효과를 보인다.

Abstract

A leakage canceller and adaptive algorithm for FMCW Radar is presented. Because a strong leakage signal causes various problems in the transceiver and digital processor, specific FMCW radars are in need of a leakage canceller. The leakage canceller has an adaptive structure and the algorithm calculates the prediction vector and learns the adaptive coefficient simultaneously. The proposed algorithm an improvement of 10 dB in the cancellation performance.

Key words: Leakage Cancellation, Millimeter-Wave Seeker, FMCW Radar, Adaptive Algorithm, Isolation

I. 서 론

레이더 시스템은 레이더의 운용환경, 물리적 크기, 표적의 종류와 특성 등을 고려하여 운용하는 파형, 송신출력 및 송수신 구조를 결정한다. 레이더 분야에서는 거리 해상도를 높이기 위하여 운용 주파수의 대역폭을 넓히고, 신호의 정확도와 운용거리를 확장하기 위하여 송신출력을 키우며, 표적의 종류를 다방면으로 분석하기 위해서 안테나의 개수를 늘리는 등 다양한 방향으로 연구가 진행되고 있다. 그러나 크기, 무게와 같은 레이더 시스템에

주어진 설계 조건 및 레이더의 운용환경에 의해 물리적, 전기적 설계의 제한이 존재한다^[1].

밀리미터파 탐색기의 경우, 통상적으로 미사일과 같은 움직이는 플랫폼에 장착되며, 동시에 소형화 및 경량화가 요구된다. 그로 인해 대부분의 탐색기는 안테나와 송수신기 사이에 신호의 방향을 정할 수 있는 순환기(circulator)를 추가하여 송신과 수신을 한 개의 안테나로 수행할 수 있도록 설계한다.

송신 전력 효율이 높고 근거리에서 안정적으로 거리와 각도를 측정할 수 있는 FMCW(Frequency Modulated Con-

한화시스템(Hanwha Systems)

· Manuscript received December 3, 2018 ; Revised December 29, 2018 ; Accepted January 9, 2019. (ID No. 20181203-123)

· Corresponding Author: Ji An Park (e-mail: jian.park@hanwha.com)

tinuous Wave)레이다는 송신과 수신을 동시에 수행하기 때문에 단일 안테나 구조인 탐색기에서 운용할 경우 다양한 문제가 발생할 수 있다.

안테나와 송수신기 사이에 위치한 순환기의 격리도(isolation) 성능이 이상적이지 않기 때문에 높은 송신 누설전력이 순환기를 통해 수신기로 입력된다. 이는 수신기의 동적영역(dynamic range)을 초과할 수 있으며, 수신기 내 증폭기가 포화되어 정상적인 수신신호를 증폭하지 못하거나, 나아가 수신기를 파괴하는 상황이 야기될 수 있다. 누설전력이 수신기의 동적 영역 내에 위치한 경우에도 신호처리가 누설신호를 근거리 표적으로 오인할 수 있는 문제가 존재한다^{[2],[3]}.

이러한 누설신호로 인한 문제를 제거하기 위해서는 수신기에 입력되기 전에 누설신호를 제거하는 방법이 가장 효과적이며, II 절과 III 절에서는 누설신호 상쇄기와 상쇄기에 탑재될 적응형 알고리즘을 다룬다.

II. 적응형 누설신호 상쇄기

누설신호 상쇄기는 크게 고정형 상쇄기와 적응형 상쇄기로 구분할 수 있다. 고정형 상쇄기는 송신신호를 180° 위상을 반전시켜 누설신호와 상쇄시키는 원리로써 구조가 간단하다는 장점과 상쇄성능이 낮은 단점이 있다. 적응형 상쇄기는 누설신호를 실시간으로 분석하여 상쇄신호를 그에 맞게 생성하며, 그에 따라 구조와 구현 난이도가 높지만 상쇄성능이 높은 장점이 있다.

밀리미터파 탐색기의 송신신호 주요 누설경로는 그림 1과 같이 순환기 누설, 안테나 입력 반사, 레이돔 반사경로로 구성된다. 세 곳의 누설 경로의 길이가 모두 다를 뿐만 아니라, 감쇠 크기도 다르기 때문에 수신기에는 서로 다른 3가지 크기와 주파수의 신호가 수신된다. 추가적으로 탐색기가 빔 조향 각도를 변화시키기에 따라 그림 1의 3번 누설 경로의 길이가 변화하여 수신기가 수신하는 누설신호는 실시간으로 변화한다.

본 논문에서는 효과적인 누설신호의 분석과 적응형 알고리즘의 효과를 극대화하기 위해 그림 2와 같은 국부신호 발생기(Local Oscillator: LO)를 포함하는 적응형 상쇄기 구조를 사용하였다^[4]. 본 상쇄기는 누설신호를 수신하여 주파수를 2번에 걸쳐 합성하며, 이는 표적신호는 배제

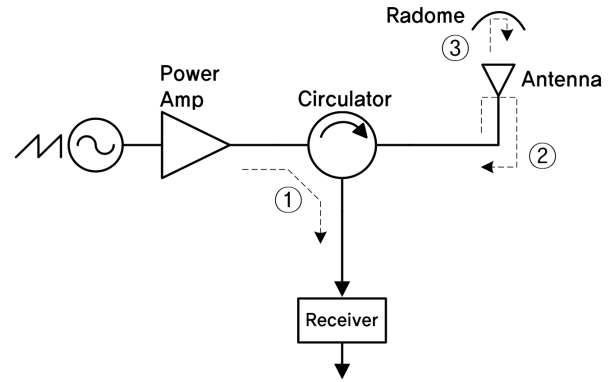


그림 1. 밀리미터파 탐색기의 누설신호 경로
Fig. 1. Path of leakage signal in millimeter-wave seeker.

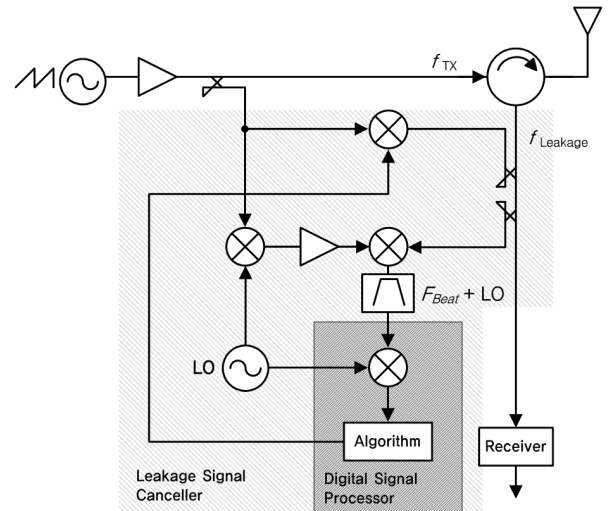


그림 2. 누설신호 상쇄기 블록 다이어그램
Fig. 2. Block diagram of leakage signal canceller.

함과 동시에 누설에 의해 발생한 신호를 추출하기 위한 구조이다. 디지털 신호처리는 적응형 알고리즘을 기반으로 복조신호를 계산 및 생성하며, 생성된 복조신호와 송신신호의 합성신호가 누설신호를 상쇄하게 된다. 상쇄가 되지 않은 나머지 오차는 다시 상쇄기로 수신되어 위동작을 반복한다.

누설신호는 송신신호와 매우 근접한 주파수에 위치하며, 그림 2 내 위치하는 국부신호 발생기는 누설신호의 낮은 주파수를 DC 신호와 격리시키는 역할을 수행한다. 디지털 신호처리 입력 전에 위치한 대역 통과 필터(band

pass filter)의 중심 주파수는 국부신호 발생기의 주파수와 동일하다. 식 (1)은 누설신호의 주파수, 누설신호의 비트(beat) 주파수, 대역 통과 필터 및 국부신호 발생기의 주파수 범위를 나타낸다. 누설신호의 주파수는 누설경로 길이에 따른 지연시간과 FMCW 신호의 주파수 기울기로 계산되며, 국부신호 발생기와 대역통과 필터의 중심 주파수가 동일하기 때문에 표적 신호를 배제하기 위해선 국부신호 주파수를 표적 비트 주파수의 1/2 보다 낮게 선정해야 한다.

$$\begin{aligned}
 t_{Leakage_Delay} &= \frac{L_{Leakage}}{c} \\
 f_{Leakage} &= f_{Tx} \pm \frac{L_{Leakage}}{c} \times \frac{Bandwidth}{T_{Sweep}} \\
 f_{Beat_Leakage} &= |f_{Leakage} - f_{Tx}| \\
 &= \frac{L_{Leakage}}{c} \times \frac{Bandwidth}{T_{SweepPulse}} \\
 &\text{where, } L_{Leakage} \leq 1m \\
 f_{Beat_Leakage} &< f_{LO_Center} < \frac{f_{Beat_Target}}{2} \\
 f_{BPF_Bandwidth} &> f_{Beat_Leakage}
 \end{aligned} \quad (1)$$

송신신호가 누설경로를 통과하여 누설신호 상쇄기에 수신되는 시간이 수 ns 인데 비하여 디지털 신호처리기는 Clock을 기준으로 상쇄신호의 계산 및 제어를 수행한다.

시간 축(time domain)에서 이러한 디지털 신호처리기의 동작은 실시간으로 변화하는 누설신호에 상대적으로 느리게 반응하는 것과 같으며, 누설신호 관점에서는 과거의 데이터를 기반으로 현재 누설신호를 상쇄시키는 동작과 같다. 결과적으로 시간 지연 현상은 누설신호 상쇄기의 상쇄 성능을 열화시킨다.

디지털 신호처리기에는 위와 같은 성능 열화를 극복하기 위해서 현재 측정된 오차를 학습하고 보상하는 적응형 알고리즘이 필요하다.

III. 누설신호 상쇄 알고리즘

디지털 신호처리에 탑재될 적응형 알고리즘은 지속적으로 오차를 학습하여 오차를 줄여나가야 함과 동시에 신호지연에 의한 상쇄성능 변화를 줄이기 위해 최소의 연산을 수행하여야 한다.

본 논문에서는 위 조건을 모두 충족하는 알고리즘 중 LMS(Least Mean Squares) 알고리즘을 선택하여 밀리미터파 탐색기에서 필요한 알고리즘으로 최적화하였다^[5]. 아래 식은 LMS 알고리즘 내 예측 벡터를 계산하는 식이다. $y(n)$ 은 출력데이터 $u(n)$ 은 입력 데이터이며, $e(n)$ 은 발생 오차 μ 는 알고리즘 학습적응 계수이다.

$$\begin{aligned}
 y(n) &= \hat{w}^H(n)u(n) \\
 \hat{w}(n+1) &= \hat{w}(n) + \mu e(n)u(n)
 \end{aligned} \quad (2)$$

위 식은 현재 입력과 현재 발생한 오차를 통해 다음 입력에 대한 예측 벡터를 계산하며, 예측 벡터의 누적과 더불어 학습적응 계수와 입력 $u(n)$ 으로 weight를 인가하여 오차를 줄여나가게 된다.

RF 시스템에서는 입력과 출력신호의 주파수가 ADC(Analog to Digital Converter)의 Clock보다 수십부터 수백 배 높기 때문에 그 둘의 오차만 디지털 수치로 확인할 수 있다. 그림 2와 같이 입력과 출력신호의 차는 아날로그 회로에서 생성되며, 남은 오차신호만 주파수를 낮게 변환하여 디지털 신호처리에서 수신한다. 이와 같은 이유로 본 논문에서 최적화한 알고리즘은 $u(n)$ 항목을 제거 후 예측 벡터를 계산하였으며, 누설신호 상쇄기의 입력신호는 탐색기가 만드는 일정한 세기의 신호이기 때문에 Weight 계수에 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다.

결과적으로 학습적응 계수 μ 가 예측 벡터의 성능 및 알고리즘의 성격을 결정할 것이다. 그림 3은 학습적응 계수를 일정한 수치로 유지한 상황에서 발생하는 오차 $e(n)$ 을 나타낸 그래프이다. 오른쪽에 위치한 그래프는 왼쪽 그래프를 확대한 것이며, 톱니바퀴를 그리는 이유는 디지털 신호처리기의 clock 내에서 오차가 점진적으로 증가하다 clock과 함께 복조신호가 갱신되어 오차가 다시 줄어들기 때문이다. 톱니바퀴의 그래프에서 낮은 피크(peak) 값은 예측 벡터를 갱신하였을 때의 오차임을 알 수 있으며, 학습적응 계수가 낮을 경우 예측 벡터를 갱신 후에도 에러가 남아있고, 학습적응 계수가 너무 높을 경우 과도하게 에러를 수정하여 오히려 에러 $e(n)$ 이 음수 값으로 가는 것을 볼 수 있다.

통상적으로 오차가 수렴함에 따라 LMS 알고리즘 내 학습적응 계수 μ 는 작아질수록 오차 $e(n)$ 이 더욱 줄어들

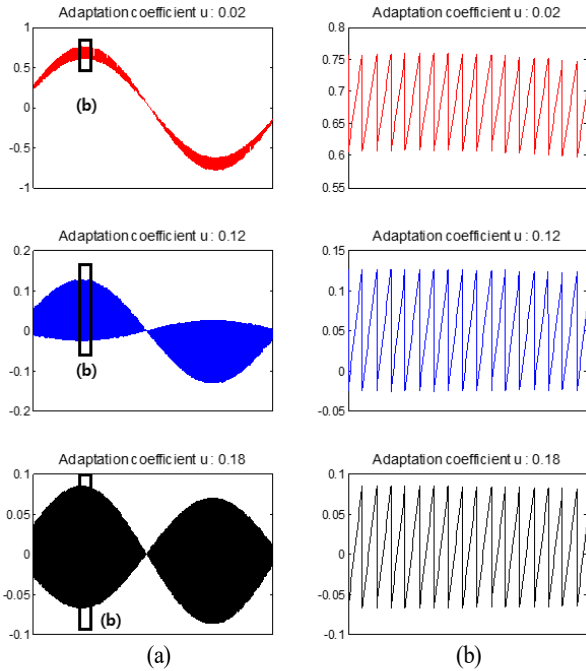


그림 3. (a) 고정된 학습적응 계수에 따른 발생 오차, (b) 그래프 확대 후

Fig. 3. (a) Error dispersion with fixed adaptation coefficients, (b) Graph zoom in.

기 때문에 학습적응 계수 μ 의 값을 점점 줄어들게 하는 기법을 많이 사용한다. 하지만 본 논문에서 다루는 시스템의 경우, 디지털 신호처리의 지연 때문에 일정 수준의 오차가 지속적으로 발생하여 학습적응 계수를 무조건적으로 수렴시키는 기법을 사용할 수 없다^[6].

본 논문에서는 이를 극복하고자 알고리즘 내 학습적응 계수를 feedback 및 계수 적응 단계를 추가하여 오차 $e(n)$ 과 함께 학습적응 계수 μ 를 동시에 최적화하였다.

학습적응 계수 μ 가 최적화가 완료되었을 시에는 예측 벡터를 갱신하여 오차를 수렴시키며, 계수 최적화가 부족할 시에는 예측 벡터를 유지함과 동시에 에러를 누적함으로써 계수 μ 를 최적화하는데 우선순위를 둔다. 그림 4는 제안하는 적응형 알고리즘의 순서도를 나타낸다.

그림 5는 제안하는 알고리즘을 운용함에 따른 학습적응 계수 μ 변화를 나타낸다. 계수의 초기값은 0.02로 설정하였고, 최적화가 진행됨에 따라 μ 가 약 0.1에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

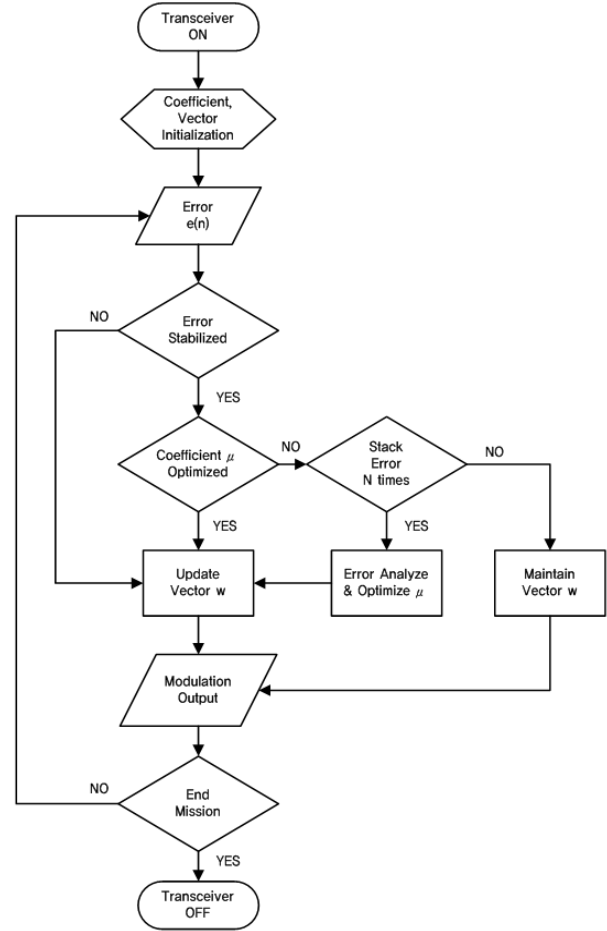


그림 4. 제안하는 적응형 알고리즘 순서도

Fig. 4. Proposed adaptive algorithm flowchart.

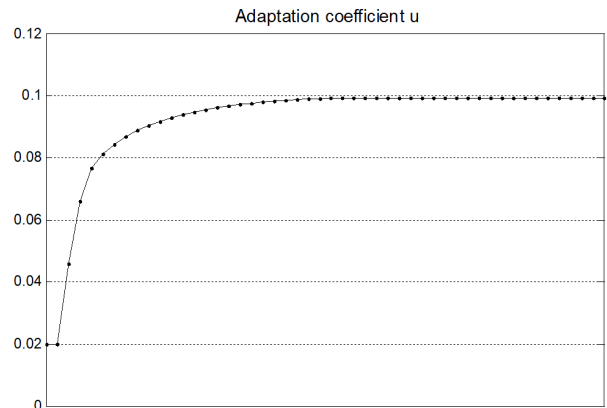


그림 5. 학습적응 계수 수렴 그래프

Fig. 5. Convergence of adaptation coefficient value.

위에서 최적화된 학습적응 계수 μ 의 값은 아날로그 회로의 증폭, 감쇄 변화, 디지털 신호처리 시간 지연의 증감 변화 등 전체 Feedback 루프에 영향을 줄 수 있는 요인들에 의하여 변화할 수 있기때문에 제안하는 알고리즘은 제작 오차 및 부품 변경과 같은 많은 오차 발생 요인으로부터 상쇄성능을 유지시키는 역할을 겸한다.

IV. 알고리즘 성능검증

본 논문에서는 제안하는 적응형 알고리즘의 성능검증을 위하여 밀리미터파 탐색기의 누설신호 환경 및 상쇄 알고리즘 M&S(Modeling & Simulation)를 수행하였다.

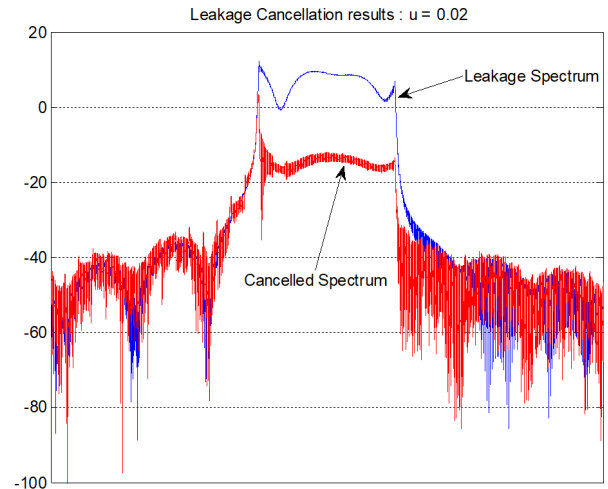
그림 1과 같은 누설신호 환경을 모델링하기 위해서 밀리미터파 신호 데이터에 다중누설에 의한 신호 지연시간을 개별적으로 인가하였다. 알고리즘이 오차에 적응하여 상쇄한다는 오차 적응성을 입증하기 위하여 1 m 이내 임의의 신호 지연길이 및 신호 세기를 인가하였으며, 각각의 지연길이 및 세기는 표 1과 같다.

가장 중요한 설계 파라미터(parameter)중에 하나인 디지털 신호처리의 clock 속도는 상용 ADC(Analog to Digital Converter) 및 신호처리 코어 Chip의 성능을 고려하여 100 MHz로 설정하였으며, 밀리미터파는 주파수가 상승하는 Up-Chirp 환경으로 시뮬레이션을 수행하였다.

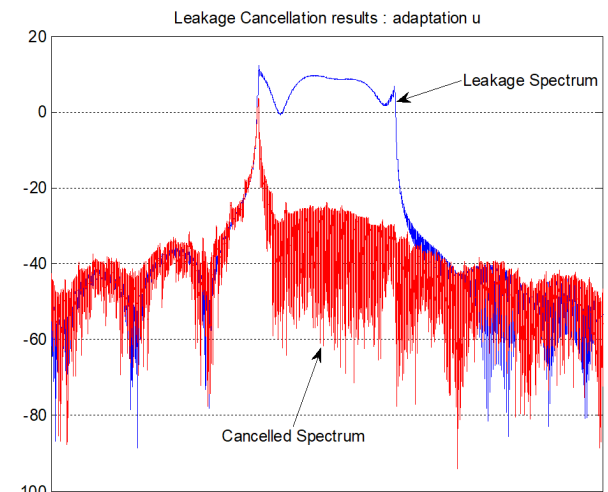
그림 6은 최종 누설신호 시뮬레이션의 주파수 스펙트럼 결과이다. 표 1의 누설선로의 조건에 따라 모사한 누설신호는 그림 6 그래프 내 상단에 위치한 누설 스펙트럼(leakage spectrum)이며, LMS 및 제안하는 알고리즘으로 상쇄한 최종 수신기 입력신호가 하단에 위치한 상쇄 후 스펙트럼(cancelled spectrum)이다. 누설 길이 차이에서 발생하는 누설신호끼리의 상쇄 현상 때문에 누설 스펙트럼이 평탄하지 않고 굴곡이 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 6의 상단 그래프는 학습적응 계수를 0.02로 설정한 LMS 알고리즘의 결과, 하단 그래프는 본 논문에서 제안한 적응형 알고리즘의 결과이다. 중심주파수의 피크(peak)값을 기준으로 약 12 dB 가량 성능개선이 있다.

두 그래프에서 동일하게 그래프의 왼편에서 상쇄 후 스펙트럼의 세기가 강한 것을 확인할 수 있다. 이는 초기 조건을 지닌 첫 번째 파형 송신 상황에서 초반 예측 벡터



(a) 고정된 학습적응 계수
(a) Fixed adaptation coefficient



(b) 알고리즘을 통한 학습적응 계수 최적화
(b) Optimize coefficient with proposed algorithm

그림 6. 누설/상쇄신호 주파수 스펙트럼 그래프
Fig. 6. Spectrum of leakage and cancelled signals.

표 1. 누설선로 길이 및 신호세기
Table 1. Path length and power of leakage signals.

Leakage path	Path length*	Signal power*
L1	0.85 m	8 dBm
L2	0.22 m	3 dBm
L3	0.33 m	5 dBm
* Random values to test the algorithm		

가 수렴하고 있는 구간이기 때문에 나타난 결과이며, 예측 벡터 및 학습적응 계수가 최적화된 후에는 초반 구간의 성능이 개선된다. 그림 7의 그래프는 송신파형 초반 구간의 성능 비교를 나타낸다. 성능비교 대상은 누설신호와 제안하는 알고리즘을 운용한 첫 번째 파형, 알고리즘 운용 후 계수가 최적화된 후 운용한 파형이다. 예측 벡터 및 학습적응 계수의 최적화가 시작되는 첫 번째 파형에서는 초반 감쇄 성능이 10 dB 이하이지만, 최적화 이후에는 감쇄 성능이 20 dB 이상인 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 표적신호의 비트 주파수에 따른 신호 감쇄 성능을 나타낸다. 그림 2 블록도 내 대역통과 필터가 신호

관점에서는 저역통과 필터로 동작하기 때문에 누설신호 감쇄기는 높은 주파수를 지닌 비트 주파수 즉, 먼 거리에 해당하는 표적 신호에 영향을 끼치지 않는다. 표적이 가까워짐에 따라 비트 주파수는 낮아지며, 누설신호 감쇄기에 영향을 받는다. 약 100 kHz 이상부터 비트 주파수 신호의 감쇄가 미약한 것을 확인할 수 있으며, 학습적응 계수가 변화함에 따라 그래프의 cut-off 주파수가 변화하기 때문에 최소 표적거리와 누설신호 감쇄 성능을 만족하는 학습적응 계수를 선정해야 할 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 FMCW 레이더에서 불가피하게 발생하는 송신신호 누설로 인한 문제들을 해결하고자 밀리미터파 탐색기에 최적화된 상쇄기 구조 및 상쇄기에 탑재하는 알고리즘을 제안하였다.

제안하는 알고리즘은 예측 벡터를 갱신하여 오차를 줄여나가며 오차를 갱신하는 학습적응 계수 또한 최적화를 수행한다. 이를 통해 기존 알고리즘 대비 10 dB 이상의 성능 개선효과를 M&S를 통하여 검증하였다. 본 논문에서 검증한 leakage modeling 및 알고리즘 최적화 방안은 후속 연구인 하드웨어 및 누설 상쇄 시스템 연구에 있어 핵심적인 선행연구로 사료된다.

References

- [1] G. W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, 2nd ed. Raleigh, NC, Scitech Publishing, 1998.
- [2] A. Stofberg, "IQ Reflected Power Canceller for an FMCW Radar," Doctoral dissertation, Stellenbosch University, 2014.
- [3] A. Melzer, A. Onic, and M. Huemer, "Self-adaptive short-range leakage canceler for automotive FMCW radar transceivers," in *2018 15th European Radar Conference(EuRAD)*, Madrid, Sep. 2018, pp. 26-29.
- [4] K. Lin, Y. Ethan, C. K. Pao, and Y. C. Shih, "A Ka-band FMCW radar front-end with adaptive leakage cancellation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 12, pp. 4041-4048, Dec. 2006.
- [5] S. J. Grant, J. K. Cavers, and P. A. Goud, "A DSP con-

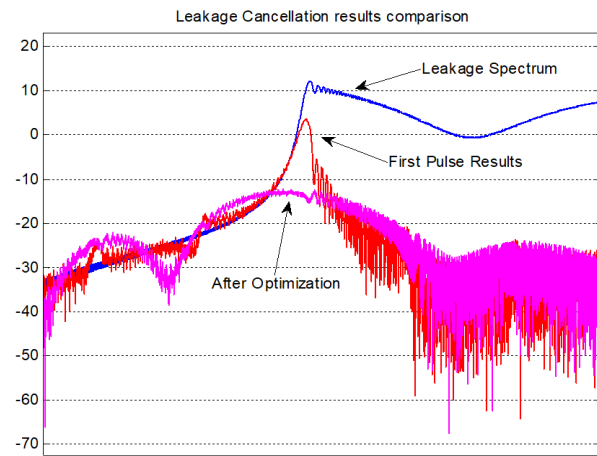


그림 7. 송신파형 초반 구간 누설 성능 비교 그래프
Fig. 7. Early phase leakage cancellation performances.

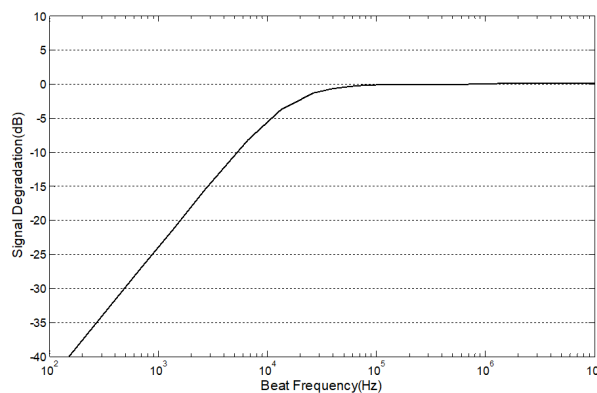


그림 8. 비트주파수에 따른 표적신호 감쇄 그래프
Fig. 8. Target signal degradation as per beat frequency.

trolled adaptive feedforward amplifier linearizer," in *Proceedings of ICUPC - 5th International Conference on Universal Personal Communications*, Cambridge, MA, 1996, vol. 2, pp. 788-792.

[6] K. R. Borisagar, *Design Analysis and Implementation of Quality Improvement Algorithm using Wavelet for Digital Hearing Aids*, Shri Jagdishprasad Jhabarmal Tibarewala University, 2014.

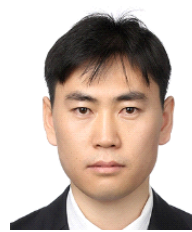
박 지 안 [한화시스템/선임연구원]



2014년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)
2016년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)
2015년 12월~현재: 한화시스템 선임연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 능동회로, RF 송수신기, 레이더 신호처리 기술 등

리 기술 등

송 성 찬 [한화시스템/수석연구원]



2001년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2003년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2002년 11월~2015년 6월: 삼성탈레스(주) 전문연구원
2015년 7월~현재: 한화시스템 수석연구원
[주 관심분야] 전자파 수치해석, RF 송수신기, 레이더 시스템 등

[주 관심분야] 전자파 수치해석, RF 송수신기, 레이더 시스템 등