
FM-CW 레이더에서의 간섭 제거에 관한 연구

이종길* · 이창기**

A Study on Interference Cancellation in a FM-CW Radar

Jonggil Lee* · Changki Lee**

이 논문은 인천대학교 2011년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

요 약

FM-CW 레이더는 높은 송수신 격리도 유지를 위하여 송신 안테나와 수신 안테나를 분리하여 사용할 수 있다. 그러나 송수신 안테나를 분리하여 설치하더라도 이러한 방식은 송신 안테나에서의 강력한 방사전력이 수신 안테나 측에 유입될 수 있다는 심각한 문제점을 내포하고 있다. 송신 단에서 유입되는 강력한 간섭 신호는 목표물에 의하여 반사되는 미약한 수신 신호들의 탐지 및 분석에 심각한 장애를 유발할 수 있을 뿐만 아니라 수신 단에서의 배경 잡음 정도를 크게 높임으로서 시스템의 성능을 현저히 열화시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 수신 단에서의 강력한 간섭 신호 및 배경 잡음들을 송신 단으로부터 얻을 수 있는 참조 신호들을 이용하여 적절히 상쇄할 수 있는 방법을 제안하였으며 그 결과들을 분석하고 고찰하였다.

ABSTRACT

Two separate antennas are usually adopted in high performance radar systems to achieve the high degree of isolation since the transmission and reception of signals cannot be separated in time. However, even though two spatially separated antennas are installed in the system, strong signals from a transmission antenna can cause the serious interference problem in a receiving antenna. These strong interference signals from the transmission antenna can cause serious problems in detection and analysis of much weaker echo signals which are reflected by small targets. Also the increased level of background noise power due to interference can cause the serious degradation of the system performance. Therefore, in this paper, the proper cancellation method is suggested and results are shown and analyzed for removal of strong interference and background noise power.

키워드

FM-CW 레이더, 수신 간섭, 비트 신호, 송신 파형

Key word

FM-CW radar, Receiver interference, Beat signal, Transmission waveform

* 정회원 : 인천대학교 정보통신공학과 (교신저자, jnglee@incheon.ac.kr)

접수일자 : 2012. 04. 10

** 준회원 : 인천대학교 정보통신공학과 석사과정

심사완료일자 : 2012. 05. 03

I. 서 론

레이더는 군에서의 전략적인 중요성 때문에 주로 군용 시스템으로 개발되어졌으나 최근에 와서 항공기 충돌방지 및 자동차용 레이더 센서 등에 활용할 수 있는 비교적 간단하면서도 저렴하게 개발할 수 있는 FM-CW 레이더에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1][2]. 이러한 FM-CW 레이더에서의 송신 파형은 시간에 따라 주파수 변조된 신호를 연속적으로 방사하는 형태이므로 상대적으로 저 전력의 신호로 매우 높은 에너지를 내보낼 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 저 전력 파형은 상대적으로 인접한 주파수 영역의 무선 시스템에 대한 영향을 최소화 할 수 있을 뿐만 아니라 신호의 노출 가능성(Low probability of interception)도 현저히 줄어들게 된다. 따라서 민수용뿐만 아니라 군용으로도 이러한 소형의 고성능 레이더 개발에 관한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다[3][4].

그러나 이러한 FM-CW 방식에서의 문제점은 연속적인 파형의 사용으로 유효전력의 효율성은 현저히 좋아지지만 송신과 수신 시점이 공존하기 때문에 상대적으로 강력하게 방사되는 송신신호가 수신 단에 심각한 간섭을 일으킬 수 있다. 따라서 높은 레이더 성능이 요구될수록 안테나 간에 요구되는 격리도(isolation)는 매우 높아지게 된다. 그러나 공간상으로 인접한 안테나간의 격리도를 추가적으로 높이는 것은 안테나의 방사특성에 따라 다르긴 하지만 매우 어려울 뿐만 아니라 일정한 한계를 가지게 된다.

따라서 이러한 강력한 간섭현상을 효과적으로 억제하기 위해서는 송신단의 안테나를 통하여 방사되는 송신신호 및 배경잡음의 특성을 참조하여 수신 단에 유입되는 간섭 신호 및 배경잡음을 최대한 제거하여야만 한다. 여기서 유의할 점은 미약한 목표물 신호의 탐지를 위하여 수신 안테나로 유입되는 송신 방사전력 간섭을 제거하는 것도 필요하지만 더 심각한 문제는 시스템 대역폭의 전체 대역에 걸쳐서 발생하는 배경잡음 레벨의 급격한 상승이다. 이러한 전 대역에 걸친 배경잡음 정도의 증가는 직접적으로 시스템의 SNR을 심각하게 저하시키게 되며 이에 따른 시스템의 탐지 성능 및 추출정보의 정확도 등은 현저하게 열화될 수 있다.

그러므로 본 논문에서는 송신 단에서의 방사신호에 의한 간섭 현상 뿐만 아니라 강력한 배경잡음의 유입으로 인한 시스템의 성능 열화 현상 등을 방지하기 위하여 간섭신호 및 배경잡음을 동시에 상쇄할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 이러한 방식은 배경잡음의 참조 특성이 보존되는 수신단의 RF 주파수 영역에서 실시간으로 이루어져야만 하기 때문에 일반적으로 아날로그 방식의 상쇄를 이용하는 것이 보다 효과적이다. 따라서 분석을 위하여 전형적인 FM-CW 레이더에서의 잡음 및 신호 파형을 모의 발생 시켰으며 이러한 송신단의 참조신호를 이용하여 수신 단에서 미약한 반사 신호를 압도하는 간섭 및 배경 잡음 등을 아날로그 회로 구현 방식으로 제거하였다. 아울러 아날로그 회로 구현 시 위상 및 이득 오차에 따른 상쇄 정도의 차이 및 그 영향을 모의실험을 통하여 분석하고 고찰하였다.

II. FM-CW 레이더에서의 간섭 영향

일반적으로 많이 활용되고 있는 선형적인 주파수 변조를 하는 경우 레이더에서의 송신 파형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_t = \begin{cases} A_t \exp \left[j2\pi \left(f_0 t + \frac{F_m}{2} t^2 \right) \right], & 0 \leq t \leq T \\ A_t \exp \left[j2\pi \left\{ (f_0 + TF_m)t - \frac{F_m}{2} t^2 \right\} \right], & T \leq t \leq 2T \end{cases} \quad (1)$$

A_t 는 송신파형의 진폭을 f_0 는 변조 시작 주파수를 F_m 은 시간에 따른 주파수 변조율을 각각 나타낸다. 변조되는 시간 간격을 T 로 설정하면 전체 스위핑 대역(sweeping bandwidth)은 TF_m 으로 표시된다. 고정된 목표물이 아닌 이동 목표물인 경우 도플러 천이에 의한 비트 주파수 차이를 분리하여 거리 및 속도 정보를 추출하여야 하므로 변조 구간별로 두 개의 서로 다른 변화율을 갖는 방식으로 변조하거나 또는 식 (1)에서 표시한 것처럼 기울기 즉 변화율의 부호를 반대로 하여 각각의 구간별로 상향 및 하향 변조를 하게 된다 [5][6].

그러므로 목표물의 거리 및 속도에 따라 변화한 비트 스펙트럼 및 주파수 추정을 하게 되며 이러한 추정 값이 각각의 상 하향 변조구간에서 매우 정확하게 얻어질 수 있어야만 한다. 그러나 서론부에서 언급한 것처럼 상대적으로 강력한 송신 전력이 일부라도 수신 단으로 유입되는 경우 간섭전력이 미약한 반사파 신호전력을 압도하는 상황이 자주 발생할 수 있다. 또한 배경잡음전력의 증가는 시스템의 동적영역(dynamic range)을 현저하게 줄임으로서 반사파 신호가 매우 약한 경우 즉 RCS(radar cross section)가 작게 나타나는 목표물에서의 신호전력은 배경잡음에 의해 가려지게 된다. 다음 장에서 이러한 간섭전력을 상쇄하기 위한 방법들을 설명하고 문제점들을 고찰하여 보았다.

III. 간섭 및 잡음 제거 방법

간섭 현상만을 상쇄하기 위해서는 비트 주파수 대역 간섭신호를 기준으로 디지털 방식으로 제거하는 것보다 효율적일 것이다[7]. 그러나 간섭으로 인한 강력한 배경잡음의 증가는 상쇄가 불가능하게 된다. 왜냐하면 디지털 기준 신호를 얻는 과정에서 이미 배경잡음의 특성이 달라졌기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 그림 1에서 표시한 것처럼 아날로그 방식의 상쇄 기법을 제안하였다.

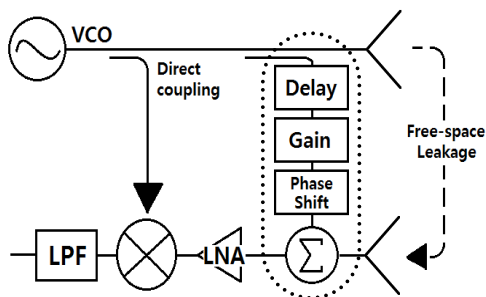


그림 1. FM-CW 레이더에서 간섭 상쇄에 대한 블록도
Fig. 1 Block diagram of interference cancellation scheme in a FM-CW radar.

그림 1의 점선 부분은 간섭 및 배경잡음을 실시간으로 제거하는 방법을 간단한 블록도로 나타내었다. 블록도에서 보는 것처럼 송신 안테나로 방사되기 직전의 송신 단 출력을 일부 궤환 시키고 안테나의 이격된 거리만큼 시간 지연을 준다.

그리고 간섭의 크기 정도에 따라 이득을 적절히 조절한다면 수신 단으로 들어오는 간섭과 동일한 형태의 참조 신호를 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 참조 신호의 위상을 180도 편이 시킴으로써 실제로 자유 공간에서 들어오는 간섭과 합하게 되면 간섭 및 배경 잡음을 상쇄시킬 수 있다.

IV. 결과 분석 및 고찰

FM-CW 레이더에서의 간섭 현상을 최대한 억제하기 위해서는 앞장에서 설명한 것처럼 시간 지연 및 이득, 180도 위상 편이의 정확한 조정 과정을 거쳐야 한다. 그러나 송신 단으로부터 일부 추출된 기준신호는 일반적으로 매우 넓은 스윙핑 주파수 대역을 가지므로 이득 및 180도 위상 편이를 정확하게 맞춘다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 실질적으로 발생할 수 있는 오차를 감안한 간섭 및 배경 잡음 제거에 관한 성능정도를 분석해 볼 필요가 있다.

우선 분석을 위하여 레이더 신호 파형을 가우시안 배경 잡음을 포함하여 모의 발생 시켰다. 여기서 분리된 송신 안테나와 수신 안테나는 비교적 짧은 거리에서 고정된 상태로 사용하기 때문에 전파가 자유 공간에서 전달되는 지연 시간은 정확히 맞출 수 있는 것으로 가정하였다.

즉, FM-CW 레이더의 동작 주파수를 24 GHz로 설정하고 1 ms 동안 100 MHz 대역에 걸쳐서 상향 및 하향 변조가 반복되는 삼각파 형태의 선형변조 방식을 사용하였다. 이득 오차와 위상 편이 오차의 범위를 표 1과 같이 설정하였으며 전 주파수 대역에서 동일한 정도의 오차가 발생하는 것으로 가정하였다.

표 1을 이용한 결과 그림 2에서 보면 이득 및 위상 오차가 거의 없을 때에는 매우 높은 상쇄 정도를 보인다는 것을 알 수 있으며 이득 오차가 0.5 dB로 상대적으로 큰 경우에는 위상 편이 오차에 따른 상쇄 정도가 거의 변화

가 없다.

표 1. 간섭 제거 성능 분석을 위한 파라미터
Table. 1 Parameters for performance analysis of interference cancellation

Simulation parameters	Value
Normalized interference power	0 dB
Carrier frequency	24 GHz
Sweep bandwidth	100 MHz
Up & down sweep interval	1 ms
Range of gain error	0.01 ~ 0.5 dB
Range of phase shift error	0.01 ~ 1.5°

그러나 위상 편이 오차가 1.5° 일 때는 이득 오차에 따라 간섭 제거 정도는 약 10 dB 정도 차이가 있음을 확인할 수 있다. 또한 배경 잡음에 대한 제거 정도는 간섭 신호와 마찬가지로 상쇄 정도가 그림 2의 그래프와 거의 동일하게 나타날 것이다.

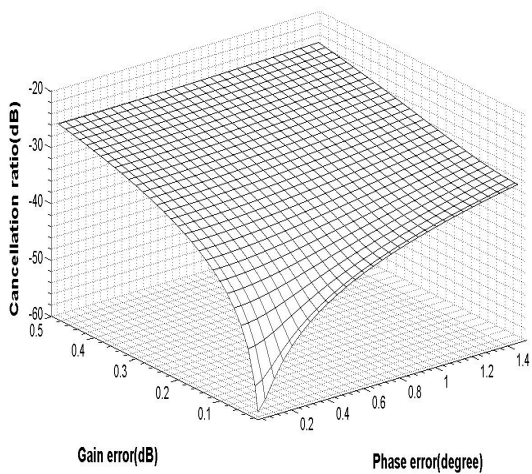
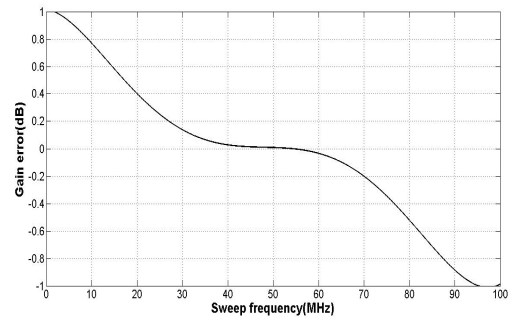


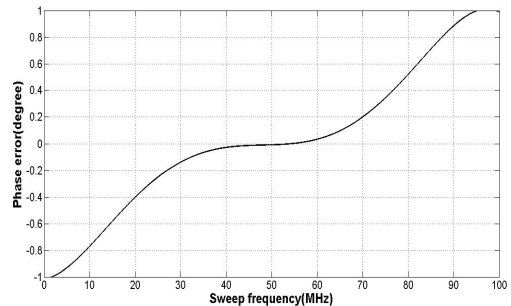
그림 2. 스위핑 주파수 전 대역에서 동일한 이득 및 위상 오차를 가지는 경우의 간섭 상쇄 정도
Fig. 2 Interference cancellation ratio assuming equal gain and phase error for the sweeping bandwidth

그러나 그림 2와 같이 이득 및 위상 편이 오차가 주파수에 따라 일정하게 발생한다는 것은 최악의 경우이다. 대부분의 부품 특성들을 살펴보면 사용 주파수의 중심

지점을 기준으로 양 끝으로 갈수록 오차율이 다소 증가하는 형태의 특성을 보이게 된다. 이러한 점을 고려하여 주파수에 따라 이득 및 위상 오차가 다르게 나타나는 경우를 가정하여 모의 구현을 수행하였다. 여기서 참고 및 결과 그림들에서의 스위핑 대역은 편의상 시작 변조 주파수를 제거한, 즉 0 부터 시작되는 스위핑 주파수로 표시하였다.



(a)



(b)

그림 3. 주파수에 따른 오차
(a) 이득 오차, (b) 위상 오차

Fig. 3 Gain and phase error for the sweeping bandwidth (a) Gain error, (b) Phase error

그림 3에서 보는 것과 같이 주파수의 중간 지점을 기준으로 대역 내에서 양 끝으로 갈수록 주파수에 따른 오차가 다소 크게 나타나는 형태로 이득 및 위상 편이 오차가 일어나는 것을 가정하여 보았다.

FM-CW 발생 신호의 특성상 거의 전 대역에 걸친 균일한 신호전력 스펙트럼을 보이기 때문에 오차에 따른 간섭의 제거 정도나 잡음의 제거 성능 정도는 전체적으로는 거의 같게 나타난다.

따라서 간섭신호 제거에 대한 성능 정도만을 나타내었다. 그림 4에 이를 표시하였으며 주파수에 변화에 따라 다른 오차정도를 보이는 경우의 간섭신호에 대한 상쇄 정도를 나타낸다.

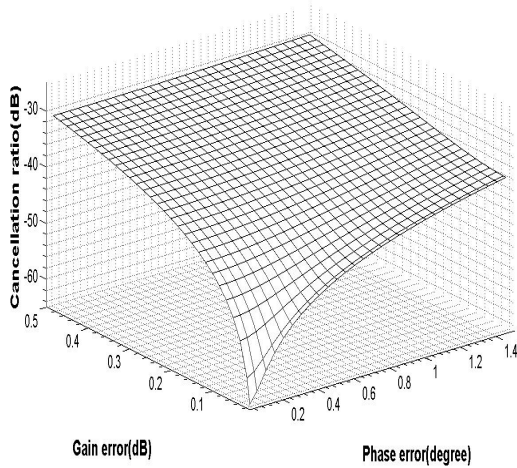


그림 4. 주파수에 따른 오차 변화를 고려한 경우의 간섭 상쇄 정도

Fig. 4 Interference cancellation ratio considering the frequency dependent gain and phase error

그림 4에서 보는 것처럼 전체적인 상쇄 형태는 비슷하게 나타나지만 5 dB 정도 제거 성능이 더 좋아진 것을 볼 수 있다.

이제 이러한 결과를 바탕으로 레이다에서의 간섭 및 배경 잡음 제거가 반사 신호 탐지에 어떠한 영향을 미치는지 구체적으로 고찰하고자 한다. 우선 FM-CW 레이다에서 심각한 성능 문제를 야기할 수 있는 간섭 및 배경 잡음이 존재하는 상황을 두 가지의 대표적인 경우로 설정하여 보았다.

첫째는 이동 목표물에 의해 반사, 산란되어 되돌아오는 신호가 도플러 천이에 의해서 누설 간섭전력에 의하여 가려지는 경우이고, 둘째는 배경 잡음의 급격한 증가로 인하여 목표물의 미약한 수신 신호가 잡음전력 레벨 이하로 내려가게 되는 경우이다.

첫 번째 경우에 대한 모의 구현 파라미터를 표 2에 나타내었다.

표 2. 비트 스펙트럼 영역에서 미약한 수신 신호가 강력한 간섭전력 인근에 존재하는 경우의 모의 구현 파라미터

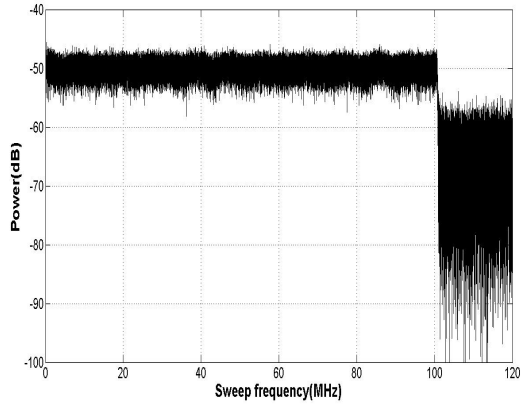
Table. 2 Simulation parameters for the case of very weak echo signal which is located near the strong interference in the bit spectrum domain

Simulation parameters	Value
Normalized interference power	0 dB
Echo signal to interference power ratio	-30 dB
Interference to noise power ratio	-10 dB
Carrier frequency	24 GHz
Sweep bandwidth	100 MHz
Up & down sweep interval	1 ms
Range of target	90 m
Velocity of target	300 m/s

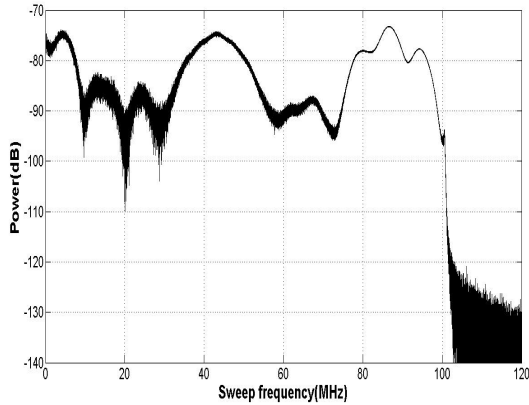
이득 오차가 0.1 dB 범위 내에 있고 0.5° 정도 범위내의 위상 오차가 있다고 가정하면 그림 4에서 보는 바와 같이 대략 42 dB 정도의 간섭 및 배경 잡음 제거를 기대할 수 있다.

그림 5는 믹서를 통과하기 전인 100 MHz 스위프 대역에서의 상쇄 전과 상쇄 후의 수신신호 전력 스펙트럼을 비교하여 보았다. 그림 5 (b)의 그래프는 간섭 및 배경 잡음 전력이 42 dB 정도 제거된 경우의 그래프이다. 배경 잡음 전력 및 간섭 전력이 전체적으로 많이 낮아졌다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 믹서를 통과한 이후의 비트 주파수 영역에서 본다면 보다 확연히 그 차이를 알 수 있다.

그림 6에서는 간섭 및 잡음 제거 기법을 적용하지 하지 않은 경우와 적용한 경우의 비트 주파수 영역에서의 전력 스펙트럼을 나타낸다. 그림 6 (a)에서 볼 수 있는 것처럼 강력한 간섭 전력 때문에 인근에 위치한 미약한 반사 신호를 탐지하는 것이 불가능하다. (b)는 간섭 및 배경 잡음이 42 dB 정도 제거되었을 때의 비트 스펙트럼을 나타낸다. 결과에서 볼 수 있는 것처럼 목표물에 의한 미약한 반사 신호의 탐지 및 비트 주파수 추정이 가능하다는 것을 알 수 있다.



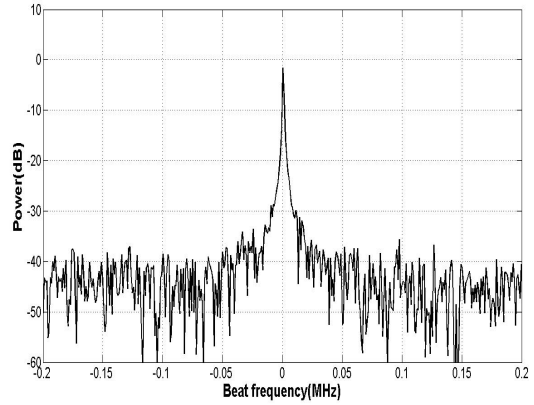
(a)



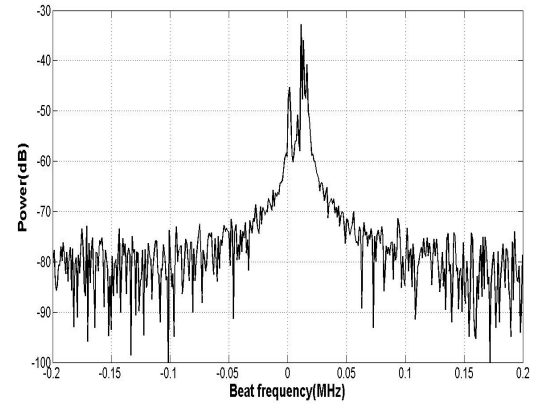
(b)

그림 5. 믹서 전단에서의 전력 스펙트럼 비교
 (a) 간섭 및 잡음전력이 증가한 수신 전력 스펙트럼
 (b) 간섭 및 잡음 상쇄 이후의 수신 전력 스펙트럼
 Fig. 5 Power spectrum comparison before the mixing stage (a) Received power spectrum including interference and increased background noise (b) Received power spectrum after interference and noise cancellation

이제 미약한 수신 신호가 증가된 배경 잡음 전력 수준 아래에 위치하는 경우를 표 3과 같은 파라미터 값들을 이용하여 모의 구현하였다.



(a)



(b)

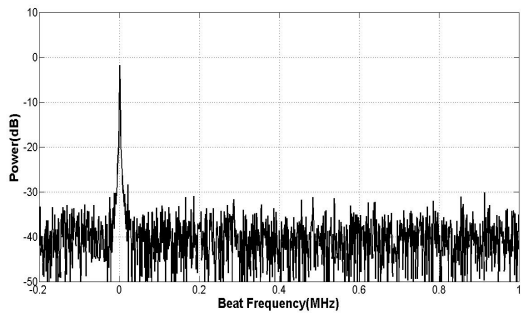
그림 6. 비트 스펙트럼 비교
 (a) 간섭 및 배경잡음이 증가한 비트 스펙트럼
 (b) 간섭 및 잡음 상쇄 이후의 비트 스펙트럼
 Fig. 6 Beat spectrum comparison (a) Beat spectrum with interference and increased background noise (b) Beat spectrum after cancellation

여기서는 위상 오차는 0.5° 정도 범위 이내이며 이득 오차를 0.05 dB 이내라고 가정하였다. 이러한 경우 결과 그림 7은 비트 주파수 영역에서 상쇄 전후를 비교한 결과 그래프이다. 그림 7(a)에서 확인할 수 있는 것처럼 간섭 및 배경 잡음이 제거되지 않은 경우를 보면 수신 신호의 비트 주파수가 간섭 주파수와는 상당히 떨어져 있는 경우에도 높아진 배경 잡음 때문에 미약한 신호의 탐지가 불가능하다는 것을 알 수 있다.

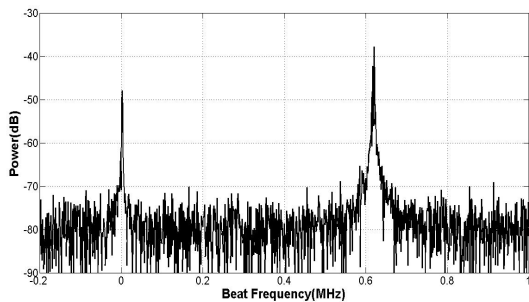
표 3. 수신신호가 잡음전력 수준 아래인 경우의 모의구현 파라미터

Table. 3 Simulation parameters for the case of the lower echo signal than the noise power level

Simulation Parameters	Value
Normalized interference power	0 dB
Echo signal to interference power ratio	-30 dB
Interference to noise power ratio	-5 dB
Carrier frequency	24 GHz
Sweep bandwidth	100 MHz
Up & Down sweep interval	1 ms
Range of target	1 km
Velocity of target	300 m/s



(a)



(b)

그림 7. 비트 주파수 영역에서의 파워 스펙트럼 비교

(a) 배경잡음 및 간섭이 증가한 비트 스펙트럼

(b) 배경잡음 및 간섭 상쇄 이후의 비트 스펙트럼

Fig. 7 Power spectrum comparison in beat frequency domain (a) Beat spectrum with increased background noise and interference (b) Beat spectrum after cancellation

그러나 간섭 및 배경 잡음이 45 dB 정도 제거된 그림 7 (b)의 결과 그림을 살펴보면 간섭뿐만 아니라 특히 비트 주파수 대역에서 전체 배경 잡음의 수준이 낮아진 것을 확인할 수 있다. 따라서 수신 신호의 탐지 및 정보추출이 가능하다.

V. 결론

FM-CW 레이더 시스템에서는 송신 단에서의 강력한 방사 신호가 수신 단으로 누설될 수 있기 때문에 심각한 간섭 현상이 일어날 수 있다. 이러한 간섭현상으로 인하여 간섭 전력 뿐만 아니라 배경잡음 전력 수준도 크게 높아지는 문제가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 높아진 배경잡음과 간섭을 동시에 상쇄시킬 수 있는 믹서 전단에서의 아날로그적인 제거 방법을 제안하였다. 또한 이러한 아날로그적인 제거 방법에서의 이득 및 위상 조정에 대한 오차가 제거 성능에 미치는 영향 등을 분석하였다.

모의실험을 통한 결과 그림들로부터 알 수 있는 것처럼 비트 스펙트럼영역에서의 간섭 주파수만을 제거하는데 유용한 디지털 방법과 달리 높아진 배경잡음과 간섭전력을 동시에 제거할 수 있는 아날로그적인 방법을 적용하면 시스템의 성능을 크게 개선시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

특히 RCS가 작은 목표물에서의 미약한 수신 신호 탐지 및 정보추출을 위해서는 강력한 배경잡음을 적절히 제거하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법을 적용한다면 잡음과 간섭 현상 모두를 적절하게 제거함으로써 매우 작은 RCS를 갖는 고속 이동 목표물의 탐지, 거리 및 속도정보 추출에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] K. Pourvoyeur et al., "A highly modular 77-GHz FMCW radar sensor prototype for multi target tracking applications", *Proceedings of the 38th European Microwave Conference*, pp. 1612-1615, October 2008.

- [2] A. Tessmann et al., "Compact single-chip W-band FMCW radar modules for commercial applications", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, pp. 2995-3001, vol. 50, no.12, 2002.
- [3] G. L. Charvat and L. C. Kempel, "Synthetic aperture radar imaging using a unique approach to frequency-modulated continuous-wave radar design", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, pp. 171-177, vol. 48, no. 1, 2006.
- [4] K. Pourvoyeur et al., "Ramp sequence analysis to resolve multi target scenarios for a 77-GHz FMCW radar sensor", *Proceedings of 11th International Conference on Information Fusion*, pp. 1-7, July 2008.
- [5] I. V. Komarov and S. M. Smolskiy, *Fundamentals of short-range FM radar*, Artech House, 2003.
- [6] A. Meta et al., "Signal processing for FMCW SAR", *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, pp. 3519-3532, vol. 45, no. 11, 2007.
- [7] B. Widrow et al., "Adaptive noise cancelling: principles and applications", *Proc. of the IEEE*, pp. 1692-1716, vol. 63, no. 12, 1975.
- [8] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, McGraw-Hill, 3rd ed. 2001.



이창기(Changki Lee)

2011년 2월 인천대학교
정보통신공학과 학사
2011년 3월~현재 인천대학교
정보통신공학과
석사과정

※ 관심분야: 레이더신호처리, 통신시스템

저자소개



이종길(Jonggil Lee)

1982년 2월 연세대학교
전자공학과 (공학사)
1985년 1월 미국 Case Western
Reserve University,
Electrical Eng. (M.S.)

1990년 5월 미국 Clemson University, Electrical Eng.
(Ph.D.)

1991년 1월 ~ 1993년 2월 삼성전자 특수연구소
1993년 3월 ~ 현재 인천대학교 정보통신공학과 교수
※ 관심분야: 무선통신, 레이더신호처리, 레이더시스템