

2차 고조파 최소화를 위한 광대역 중간주파수신기 개발

Development of a Wide-Band Intermediate Frequency Receiver to Minimize the Second Harmonic Signal

서미희* · 김현주* · 김소수* · 김영곤**

Mihui Seo* · Hyun-ju Kim* · Sosu Kim* · Young-Gon Kim**

요 약

본 논문에서는 S대역 입력주파수, 출력 중심주파수 200 MHz, 신호 대역폭 160 MHz의 8채널 광대역 중간주파수신기를 개발하였다. 개발된 중간주파수신기의 측정결과, 최종단 증폭기의 비선형 특성에 의해 대역폭 내에 출력 중심주파수 이외의 불요파가 확인되었다. 그에 따라 최종단 증폭기를 차동증폭기로 변경하고, 중간주파수신기 회로를 수정하여 2차 고조파 신호를 최소화하였다. 개선된 중간주파수신기는 이득 33 dB, OP1 dB 15.8 dBm 이상, OIP3 25.7 dBm 이상의 성능을 가진다. -10 dBm 출력전력 기준으로 2차 고조파의 억압량은 -83.30 dBc~ -72.19 dBc로 시스템 요구규격인 -70 dBc 이하를 만족하였다.

Abstract

In this study, an eight-channel wide-band intermediate frequency (IF) receiver with an S-band input frequency, an output frequency of 200 MHz, and a signal bandwidth of 160 MHz was developed. The performance measurement results of the IF receiver showed that the fundamental signal and the second harmonic signal were involved in the bandwidth of the IF receiver output. This was caused by the nonlinearity characteristics of the final stage amplifier. Therefore, the final stage amplifier was changed to a differential amplifier, and the circuit of the IF receiver was modified to reduce the second harmonic signal. After improvement, an IF receiver with a gain of 33 dB, Output 1 dB Gain Compression Point(OP1dB) of > 15.8 dBm, 3rd Output Intercept Point(OIP3) of > 25.7 dBm was developed. The second harmonic suppressions were in the range of -83.30 dBc to -75.19 dBc when the fundamental signal output power was -10 dBm. This result satisfied the requirement of the system for the second harmonic suppression that was lower than -70 dBc.

Key words: Wide-Band, Intermediate Frequency Receiver, 2nd Harmonic Reduction, Differential Amplifier

I. 서 론

RF 레이다 시스템에서 중간주파수신기는 중간주파수

로 하향변환된 표적 신호를 신호처리가 처리할 수 있는 주파수인 기저 대역으로 낮추는 역할을 한다. 이 때, 중간주파수신기는 신호의 세기는 증폭시키면서 표적 신

「이 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.」

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

** (주)LIG넥스원(LIG Nex1 Corporation)

· Manuscript received September 17, 2021 ; Revised October 18, 2021 ; Accepted November 25, 2021. (ID No. 20210917-080)

· Corresponding Author: Mihui Seo (e-mail: seomihui@add.re.kr)

호 이외의 불요파를 최소화하여 레이다 시스템의 SNR 성능을 확보할 수 있도록 해야 한다.

반면, 수신기에서 사용되는 증폭기, 혼합기 등의 비선형 소자의 영향으로 출력신호인 IF신호 이외의 불요파는 불가피하다. 따라서 본 레이다 시스템에서는 두 개 이상의 신호(f_1, f_2)가 입력될 때, 신호의 입력전력이 증가함에 따라 그 크기가 급격히 증가하는 $2 \cdot f_2 - f_1, 2 \cdot f_1 - f_2$ 와 같은 혼변조 성분을 규격으로 관리하며, 중간주파수신기 개발 시 동적영역을 최대한 확보하면서 혼변조 성분을 최소화하기 위해 OIP3(output third order intercept point)를 최대화 할 수 있는 소자를 선정한다^[1].

한편, 디지털 신호처리 중에는 IF신호를 입력신호로 하는 신호처리기의 클럭주파수가 입력주파수의 2배보다 낮으면 원신호와 원신호의 이미지 신호 겹침현상(aliasing)이 발생하여 불요파가 생성된다. 따라서 이를 방지하기 위해 표본화 정리(Nyquist-Shannon sampling theorem)에 따라 신호처리기의 클럭주파수를 입력신호 최대 주파수의 두 배 이상으로 설정한다^[2].

본 논문에서는 W대역 소형 레이다 시스템의 요구사항에 따라 출력 IF 중심주파수가 200 MHz, 대역폭이 160 MHz인 중간주파수신기를 개발하였다. 신호처리기에서는 중간주파수신기 최대 출력 주파수 280 MHz를 고려하여 두 배 이상인 600 MHz를 클럭주파수(F_c)로 정하였다. 그럼에도 불구하고 중간주파수신기와 신호처리기 연동시험 결과, IF 대역내에서 불요파가 측정되었다. 또한, 해당 불요파는 IF신호의 2차 고조파 혹은 2차 고조파의 이미지인 것으로 분석되었다. 그에 따라 본 논문에서는 IF신호의 2차 고조파에 의한 불요파를 최소화하기 위해 광대역 중간주파수신기를 그림 1(a) 구조에서 그림 1(b)로 개선하고, 그 성능을 확인하였다.

II. 광대역 중간주파수신기의 불요파 분석

본 논문에서 개발된 8채널 광대역 중간주파수신기는 대역폭이 160 MHz인 S대역 신호를 주파수하향 변환하여 중심주파수(IF_c)가 200 MHz, 대역폭이 160 MHz인 IF신호를 신호처리기로 전달한다. 필터링을 위해 출력단에는 1 dB 대역폭 160 MHz 이상, 3 dB 대역폭 225 MHz±18 MHz

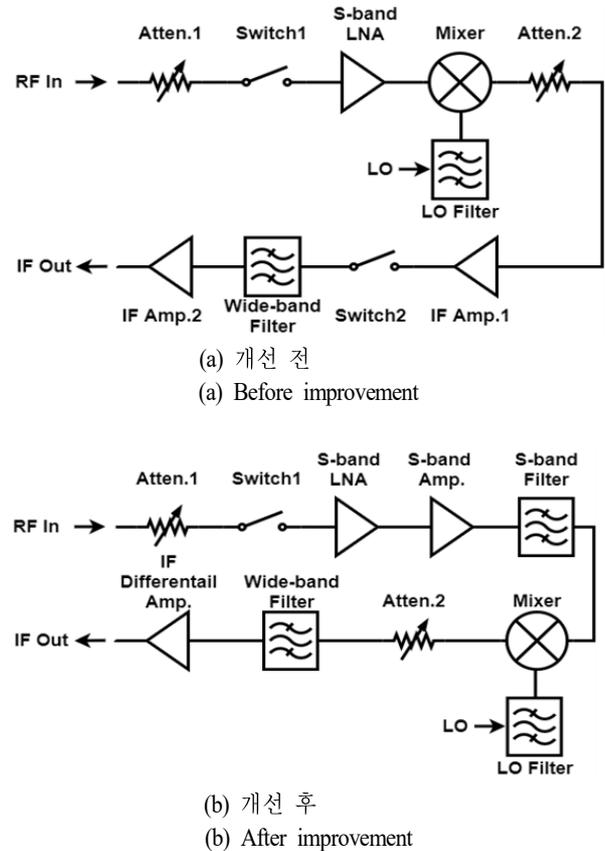


그림 1. 광대역 중간주파수신기 블록도
Fig. 1. Block diagram of the wide-band intermediate frequency receiver.

의 광대역필터를 사용하였다.
개발된 중간주파수신기는 W대역 소형 레이다 시스템에 적용되며, 그 형상은 그림 2와 같다. 성능 측정결과, 이득 36 dB, 출력단 1 dB 압축점 OP1 dB 10 dBm 이상, OIP3 27 dBm 이상의 성능을 만족하였다. 그림 1(a)는 중간주파수신기 한 채널에 대한 블록도이다. W대역 소형 레이다 시스템은 하나의 안테나를 통해 송수신을 하는 구조이므로 송신구간에서 수신기로 송신전력에서 순환기의 격리도만큼 낮아진 송신 누설전력이 인가된다. 그에 따라 중간주파수신기의 스위치 1, 2 및 혼합기의 국부발진신호 경로 스위치는 송신구간에서 감쇠모드 동작을 통해 수신기 출력 신호를 열잡음으로 유지하는 역할을 한다. 감쇠기는 큰 전력의 표적 신호에 의해 수신기가 포화되는 것을 방지한다. 본 시스템에서는 IF 출력전력 0 dBm을 기준

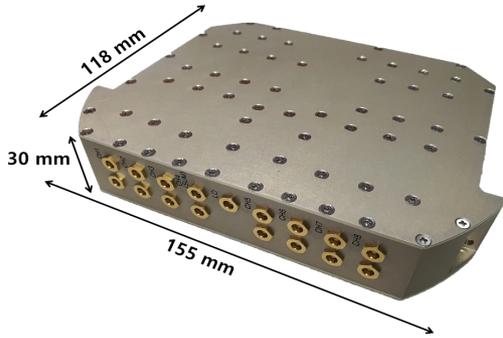


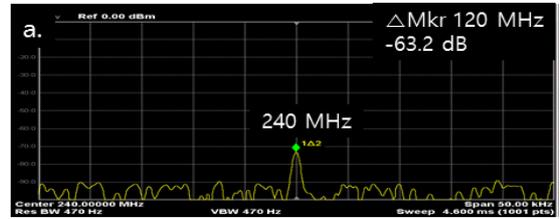
그림 2. 광대역 중간주파수신기
Fig. 2. Wide-band intermediate frequency receiver.

으로 감쇠기를 제어하여 최대 출력전력을 유지한다.

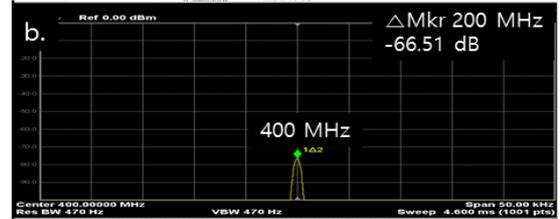
개발된 중간주파수신기와 신호처리기 연동시험 결과, 0 dBm의 IF신호가 출력될 때 약 -40 dBc의 2차 고조파가 같이 출력됨을 확인하였다. 마찬가지로 중간주파수신기 단독 시험 결과, 그림 3과 같이 IF신호의 전력이 -10 dBm이고, 주파수가 각각 120 MHz, 200 MHz, 280 MHz로 출력될 때, 2차 고조파 신호의 출력전력은 IF 원신호 대비 각각 -63.2 dBc, -66.51 dBc, -64.39 dBc로 측정되었다. 2차 고조파 진폭은 원신호 진폭의 제곱에 비례하므로^[3], 중간주파수신기 단독시험에서 연동시험보다 IF 원신호가 -10 dB 낮을 때, 2차 고조파가 약 -20 dB 낮은 것은 두 시험 결과가 동일한 현상에 의한 것임을 보여준다.

그림 3과 같이 400 MHz, 560 MHz 주파수에서 광대역 필터의 S_{21} 이 -19.5 dB, -43.8 dB(그림 4)임에도 불구하고, 광대역필터 대역 내의 신호인 240 MHz와 출력 전력이 유사함을 확인하였다. 광대역필터 대역 밖의 신호에서 감쇠효과가 거의 없으므로 중간주파수신기에서 발생된 2차 고조파는 광대역필터 이후 소자인 IF 증폭기²의 영향이 큰 것으로 판단된다.

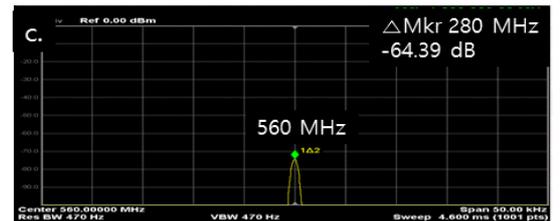
IF신호 중 상대적으로 주파수가 낮은 신호들의 2차 고조파는 그림 5와 같이 광대역필터 대역폭 내에서 발생한다. 본 시스템에서는 신호처리 시, Chebyshev 70 dB 원도우를 사용하여 FFT를 수행한다. 따라서 특정 전력 이상의 IF신호와 함께 출력되는 -70 dBc 이상의 2차 고조파는 표적으로 인식되는 문제를 야기시킨다. 개발된 중간주파수신기에서는 IF신호가 116.8 MHz~156.4 MHz 범위이면 2차 고조파가 광대역필터 대역폭 내에 존재한다.



(a) 120 MHz



(b) 200 MHz



(c) 280 MHz

그림 3. -10 dBm 출력 전력의 원신호 주파수에 따른 2차 고조파 억압량 측정결과(개선 전)

Fig. 3. Measurement result of the 2nd harmonic suppression according to the IF fundamental signal frequency (before improvement, IF $P_{out} = -10$ dBm).

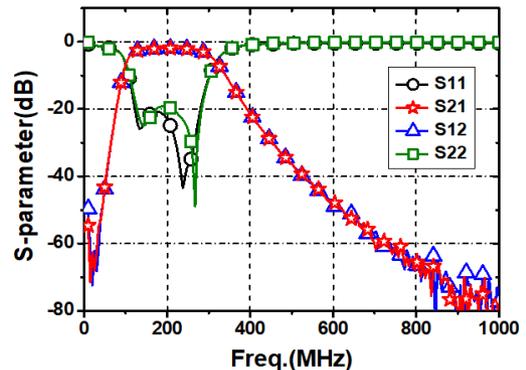


그림 4. 광대역필터의 S-parameter 측정값
Fig. 4. S-parameter measurement result of wide-band bandpass filter.

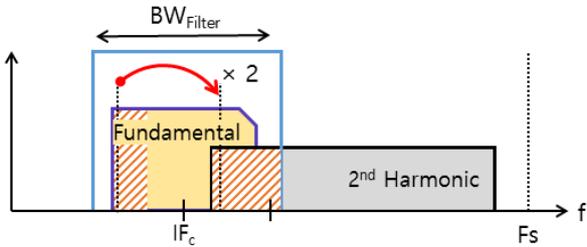


그림 5. 광대역필터 대역폭 내 존재하는 2차 고조파
 Fig. 5. 2nd harmonic signal within the bandwidth of the wide-band bandpass filter.

위의 문제 해결을 위해 2차 고조파가 광대역필터 대역폭 내로 들어가지 않도록 중간주파수신기의 입/출력 신호 및 광대역필터의 대역폭을 줄이는 방안을 고려하였다. 광대역필터 대역폭을 130 MHz, 신호 대역폭을 112 MHz로 줄인 상황을 모사해 연동시험을 수행하였다. 그 결과, 필터 대역폭 내에 2차 고조파가 없음에도 불구하고, 앞선 연동시험 결과와 유사한 준위의 불요파가 발생되었다. 본 현상은 신호처리 중 발생하는 이미지 신호로 설명할 수 있다. F_s 가 600 MHz인 본 시스템에서는 신호처리 시 $F_s/2$ 인 300 MHz를 중심으로 거울대칭의 이미지 신호가 발생한다. 그에 따라 그림 6과 같이 335 MHz~435 MHz 범위의 2차 고조파의 이미지 신호는 원신호와 겹쳐져 광대역필터 대역폭 내에서 출력된다. 따라서 신호처리기에서 출력되는 2차 고조파 이미지 신호를 최소화하기 위해서는 수신기의 광대역 필터가 335 MHz 이상 주파수를 -70 dBc 이하로 감쇠시킬 수 있어야 한다.

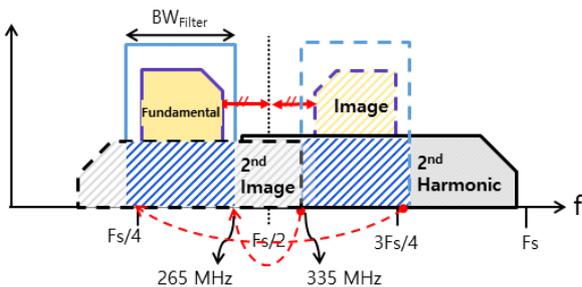


그림 6. 광대역필터 대역폭 내 존재하는 2차 고조파 이미지 신호
 Fig. 6. Image signal of 2nd harmonic signal within the bandwidth of the wide-band bandpass filter.

III. 광대역 중간주파수신기의 불요파 최소화 설계

신호처리 시, 중간주파수신기 2차 고조파의 겹침 현상을 없애기 위해서는 F_s 를 현재 조건에 비해 더 높게 설정하는 것이 이상적이나, 연산량 증가로 신호처리기 개발에 어려움이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 중간주파수신기 출력단의 하드웨어 구성을 수정하여 2차 고조파 전력을 최소화하도록 성능을 개선하였다. Chebyshev 70 dB 원도우를 고려하여, 원신호 대비 2차 고조파가 -70 dBc 이하가 되도록 중간주파수신기를 그림 2(b)와 같이 개선하였다. 앞서 언급한 바와 같이 입/출력신호와 광대역필터 대역폭을 줄이고, 광대역필터의 감쇠특성을 개선하여 2차 고조파를 감쇠시키는 방안도 고려 가능하다. 그러나 필터 특성을 개선하면 현재 사용 중인 필터에 비해 크기가 증가하므로 크기 재원이 한정적인 본 중간주파수신기에서는 적용이 어렵다. 또한, IF신호 대역폭 감소는 W밴드 소형 레이다 시스템의 표적탐지 성능저하를 초래하므로 IF신호의 대역폭을 유지하며 중간주파수신기를 개선하였다.

개선 후, IF신호의 출력전력 기준은 -10 dBm 으로 기존의 0 dBm보다 낮다. 2차 고조파 진폭이 원신호 진폭의 제곱에 비례함을 적용하면, -10 dBm 전력의 IF신호에 대해 -70 dBc(SNR=70 dB)의 2차 고조파 억압량 성능을 가지는 중간주파수신기는 0 dBm 전력의 IF신호에 대해서 -50 dBc(SNR=50 dB)의 2차 고조파를 출력하게 된다. 따라서 2차 고조파에 대한 시스템의 SNR 성능을 높이기 위해 IF 출력전력 기준을 수정하였다. IF신호의 기준전력이 -10 dBm으로 변화하면서 시스템의 동적영역이 감소되나, 밀리미터파 수신기를 포함한 수신부의 열잡음 -80 dBm이하에 대해 70 dB 이상의 SNR성능을 만족하므로 허용 가능한 수준으로 판단되었다.

중간주파수신기 수정을 위해 2차 고조파의 주된 원인으로 판단되는 IF 증폭기2를 짝수 고조파 제거에 유리한 차동증폭기로 변경하였다^{4)[5]}. 선정된 차동증폭기는 Analog Devices사의 LTC6432-15로 240 MHz 출력 신호에서 이득 15.8 dB, OP1dB 22.6 dBm, OIP3 45 dB, 잡음지수 3.4 dB의 성능을 가진다. 기존에 사용된 Qorvo사의 저잡음 증폭기인 TQP3M9028과 대부분의 성능이 유사하나, 잡음지수가 1.8 dB 높아진다. 하지만 해당 소자는 중간주파수신기

의 출력단에 위치하므로 수신기 전체 잡음지수에 미치는 영향은 미비하다. 실험적으로 차동증폭기의 입력신호인 신호발생기 신호의 2차 고조파를 대역통과 필터를 통해 70 dBc 이상 감쇠시키고 측정된 차동증폭기 2차 고조파 억압량은 -80.45 dBc이다. 따라서 해당 차동증폭기는 광대역 중간주파수신기 최종단의 증폭기로 활용하기에 적합하다. 반면에 차동증폭기 앞단에 필터가 없는 경우에는 2차 고조파 억압량이 -65.6 dBc로 측정되었다. 따라서 IF경로에서 발생하는 2차 고조파를 최소화하여 차동증폭기로 입력되어야 한다.

한편, 차동증폭기의 소모전류는 +5 V 입력전력을 기준으로 기존 IF증폭기2 소모전류인 90 mA에 비해 2배 큰 180 mA이다. 그에 따라 8채널 모두 증폭기를 변경하면서 중간주파수신기의 소모전류가 약 1 A, 소모 전력은 약 5 W 증가하였다.

차동증폭기 앞단의 IF경로에서 2차 고조파를 감소시키기 위해 광대역필터 전단의 증폭기를 제거하고, S대역 경로의 LNA 후단에 증폭기를 추가하였다. 또한, 혼합기 전단에 S대역의 대역통과 필터를 추가하여 혼합기에 입력되는 RF 신호의 2차 고조파를 최소화하였다. 사용된 혼합기는 Analog Device 사의 LTC5567로 300 MHz~6 GHz 영역의 넓은 주파수 범위에서 사용 가능하다. 따라서 RF와 LO의 원신호뿐만 아니라, 2차 고조파가 혼합기에 인가되면 IF의 2차 고조파가 출력되므로, RF 입력단의 2차 고조파를 최소화하기 위해 혼합기 앞단의 S대역 통과 필터가 필요하다. 추가된 S대역 필터는 Mini circuit사의 BFCN-3491+로 3 dB 통과대역은 2,790 MHz~4,370 MHz이며, 6 GHz 이상의 주파수에 대한 감쇠량은 30 dB 이상이다. 참고로 LO 신호는 LO 중심주파수에서 100 MHz 떨어진 주파수에 대한 격리도가 50 dB 이상인 대역 통과 필터를 통과한다. 혼합기 단품 시험 결과, 원신호의 출력전력이 -10 dBm, 0 dBm, $+5$ dBm일 때, 2차 고조파 억압량은 -75.5 dBc, -70 dBc, -54.6 dBc로 측정되었다. 측정시, RF 및 국부발진신호의 2차 고조파 성분은 원신호 대비 -90 dBc 이하로 억압되어 혼합기로 입력되었다.

중간주파수신기 수정을 위해 추가된 소자들 및 별론 구조의 차동증폭기로 인해 중간주파수신기의 공간에 제약이 발생하여, 그림 1(a)의 스위치 2를 제거하였다. 이는

시스템 구성에 따라 중간주파수신기 전단에 연결되는 밀리미터파 수신기의 스위치 감쇠모드를 통해 송신누설전력이 충분히 억압됨을 확인한 결과이다. 그림 1(b)는 개선된 중간주파수신기 블록도이다.

개선 후 중간주파수신기는 그림 7과 같이 이득 33 dB, OP1dB 15.8 dBm 이상, OIP3 25.7 dBm 이상의 성능을 확보하였다. 개선 전 중간주파수신기의 성능에 비해 이득이 3 dB 감소하였으나, 설계 시 전체 수신기 이득에 충분한 마진을 포함하였으므로, 시스템에 미치는 영향성은 적다. 개선 후 -10 dBm 출력전력에 대한 2차 고조파 출력전력 측정값은 그림 8과 같이 -70 dBc 이하를 만족한다.

특히 광대역필터 대역 밖의 400 MHz, 560 MHz에서는 필터의 감쇠성능이 추가되어 약 80 dBc 가량 2차 고조파가 제거되었다. 그림 3에서 필터 통과 여부에 관계없이 감쇠량이 2 dB 이내로 유사했던 것과는 다른 결과이다. 이는 중간주파수신기 개선 후, 차동증폭기에서 출력되는 2차 고조파 세기가 작아져 최종 출력되는 2차 고조파의 세기에 미치는 영향이 미비해졌음을 의미한다. 다만, 차동증폭기의 2차 고조파 억압량은 앞서 기술한 바와 같이 -80 dBc 정도로 한계가 있으므로 주파수에 따른 2차 고조파의 출력전력 차이는 그림 4의 광대역필터 S_{21} 성능에는 차이보다 작다. 추가적으로 그림 8 결과를 통해 광대역필터 대역폭 안의 2차 고조파(240 MHz) 역시 IF 경로상의 증폭기를 제거하고, 혼합기 전단에 S대역 필터를 추가한 결과, 그 준위가 낮아졌음을 확인하였다.

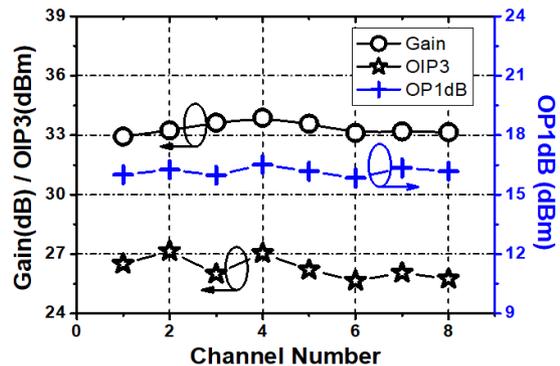


그림 7. 개선 후 중간주파수신기 채널별 성능 측정값
Fig. 7. Performance measurement result for each channel of the intermediate receiver after improvement.

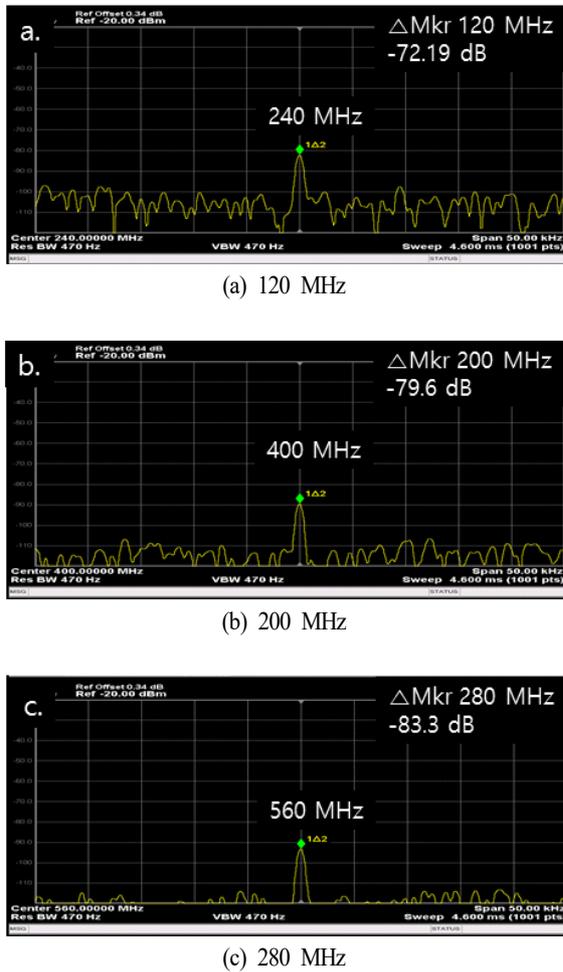


그림 8. -10 dBm 출력 전력의 원신호 주파수에 따른 2차 고조파 억압량 측정결과(개선 후)
 Fig. 8. Measurement result of the 2nd harmonic suppression according to the IF fundamental signal frequency (after improvement, IF $P_{out} = -10$ dBm).

또한, IF 출력전력 기준값을 -10 dBm으로 변경하면서 측정된 OIP3를 반영한 혼변조 신호도 -71 dBc 이하가 되므로, 개선 후 2차 고조파 및 혼변조에 의한 불요파 성능이 향상되었음을 알 수 있다. 반면, 개선 전 중간주파수 신기의 OIP3는 약 27 dBm이므로 0 dBm 출력전력에 대해 혼변조 억압량은 -54 dBc이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 S대역 입력주파수, 출력 중심주파수

200 MHz, 신호 대역폭 160 MHz의 8채널 광대역 중간주파수신기를 개발하였다. 신호처리기와 연동시험 결과, 광대역필터 3 dB 대역폭인 225 MHz 내에 IF신호의 2차 고조파가 확인되었으며, 이를 최소화하기 위해 중간주파수신기를 개선하였다. 2차 고조파의 주 원인인 최종단의 IF 증폭기2를 차동증폭기로 변경하였으며, IF경로 초단의 IF 증폭기1를 제거하고, 혼합기 전단에 이득 확보를 위한 S대역 증폭기와 RF 2차 고조파 차단을 위한 S대역 필터를 배치하였다.

개선 전 -10 dBm의 IF 출력전력에 대한 2차 고조파 억압량은 -66.51 dBc~ -63.2 dBc 였으나, 개선 후에는 -83.30 dBc~ -72.19 dBc로 향상되었다. 또한, 개발된 중간주파수신기의 OIP3가 25.75 dBm 이상이므로 -10 dBm의 IF 출력전력에 대한 혼변조 신호는 -71 dBc 이하가 된다. 신호처리에 -10 dBm의 신호가 입력될 경우, 2차 고조파 및 혼변조 신호는 -70 dBc 이하이므로 FFT 처리 이후 해당 불요파는 제거된다. 따라서 개발된 중간주파수신기는 W대역 소형 레이다 시스템의 SNR 성능향상에 기여할 것으로 기대된다.

References

- [1] J. M. Golio, *RF and Microwave Handbook-RF and Microwave Applications and Systems*, 2nd ed. Boca Raton, FL, CRC, pp. 27.3-27.7, 2008.
- [2] M. Burns, G. W. Roberts, and F. J. Taenzler, *An Introduction to Mixed-Signal IC Test and Measurement*, Oxford, Oxford University Press, pp. 255-258, 2012.
- [3] J. B. Y. Tsui, *Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications*, Raleigh, NC, SciTech, p. 7, 2005.
- [4] J. H. Yoon, "Input balun design method for CMOS differential LNA," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 5, pp. 366-372, May 2017.
- [5] A. Y. Patil, S. B. Patil, "Suppression analysis of differential amplifier," *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, vol. 6, no. 6, pp. 45-51, Aug. 2013.

서 미 희 [국방과학연구소/선임연구원]



<https://orcid.org/0000-0003-3441-0190>
2006년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학사)
2013년 2월: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
2013년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 초고주파 송수신기 개발

김 소 수 [국방과학연구소/책임연구원]



<https://orcid.org/0000-0002-1110-7896>
1993년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2014년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)

1996년 1월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 초고주파 소형레이다 시스템

김 현 주 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6699-5720>



2006년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학 (공학사)
2008년 2월: 광주과학기술원 정보통신공학부 (공학석사)
2013년 2월: 광주과학기술원 정보통신공학부 (공학박사)
2013년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리

김 영 곤 [(주)LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0969-8068>



2006년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)
2008년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2013년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
2013년 2월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원

[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 마이크로파 송수신기