마이크로파 주파수 하향 변환기에서의 대역 평탄도 개선을 위한 여파기 집적형 단일 평형 다이오드 혼합기 설계

Design of Single Balanced Diode Mixer with Filter for Improving Band Flatness in Microwave Frequency Down Converter

유 승 갑 · 황 인 호 · 한 석 균*

Seung-Kab Ryu · In-Ho Hwang · Seok-Kyun Han*

요 약

본 논문에서는 유럽형 점 대 점 마이크로파 고정 통신에 이용되는 주파수 하향 변환기 설계에 있어, 평탄도 개선 측면에서 접근한 단일 평형 주파수 혼합기의 설계 및 제작 결과에 대해 소개하도록 한다. 일반적인 주파수 하향 변환기의 구성에서 주파수 혼합기에 연결되는 RF 필터 등의 여파기 임피던스 특성이 RF 대역에서만 유지되고 LO 대역에서는 그 특성이 달라져 LO 구동 전력이 혼합기 다이오드에 불규칙하게 인가됨에 따라 대역 평탄도 특성이 악화된다. 이에 대해 본 논문에서는 영상 대역 제거 필터 및 LO 고조파 필터를 혼합기 내에 집적하고 여파기와 혼합기 포트 간 전기적 길이를 이용하여, 평탄도 특성에 대한 여파기의 영향을 최소로 한 여파기 집적형 주파수 혼합기를 설계하였다. 제작된 주파수 혼합기는 RF 대역 21.2~22.6 GHz, LO 대역 19.32~20.72 GHz, IF 대역 1.88 GHz+/−50 MHz의 주파수 재원을 가지며, LO 구동 전력 10 dBm에서 영상 대역 제거 필터를 포함한 변환 손실이 8.5 dB, 대역평탄도 2 dB, 입력 P1dB 8 dBm, 입력 IIP3 15 dBm의 특성을 보였다. RF, LO 및 IF 포트의 반사 손실은 각각 −12 dB, −10 dB, −5 dB의 특성을 보였다. LO/RF, LO/IF 격리도는 각각 20 dB, 50 dB로 측정되었다.

Abstract

In this paper, we introduce design and implementation results of the single balanced diode mixer for European point-to-point microwave radio in order to improve flatness performance. When a resonator such as RF filter is integrated with a mixer, impedance characteristic of 50 ohm is maintained only in RF band, not in LO band resulting deterioration of flatness performance because of LO power variation on the diode. In the paper, we suggest a design method of mixer integrated with image rejection filter and LO harmonic filter to have a better performance of flatness using embedding electrical length between filter and mixer's port. Frequency specification of fabricated mixer is 21.2~22.6 GHz for RF, 19.32~20.7 GHz for LO and 1.88 GHz+/−50 MHz for IF, respectively. Measured results show conversion loss of 8.5 dB, flatness of 2 dB, input P1dB of 8 dBm, IIP3 of 15 dBm under LO power level of 10 dBm. Return losses of RF, LO and IF port are under −12 dB, −10 dB and −5 dB, respectively. Isolations of LO/RF and LO/IF are 20 dB and 50 dB, respectively.

Key words : Diode Mixer, Electrical Length, Filter, Band Flatness

Ⅰ. 서 론

주파수 혼합기는 공간을 매개로 전달하는 통신에

한국전자통신연구원 부설 국가보안기술연구소(National Security Research Institute, ETRI)
*한국정보통신대학교(Information and Communication University)
· 논 문 번 호 : 20061012-127
· 수정완료일자 : 2006년 12월 27일

있어 매우 중요한 역할을 담당한다. 주파수 하향 변환기 또는 수신기를 설계함에 있어 영상 신호로 인한 잡음 특성이 열화되는 것을 방지하기 위해 일반적으로 그림 1과 같이 영상 대역 제거 필터를 저잡음 증폭기와 주파수 혼합기 사이에 배치한다. 또한 주파수 혼합기의 주파수 하향 변환 기능에 필요한 국부 발진 신호(local oscillator)의 경우, 신호 발생기 기본 출력 주파수 외에 고조파가 생성되고, 생성된 고조파가 혼합기에 유기되면 다이오드나 트랜지스터의 비선형 특성으로 인해 원치 않는 혼변조 신호 및 스퓨리어스 신호를 생성하게 된다. 이에 대한 대응책으로 국부 발진 출력 단에 LO 고조파 필터를 그림 1과 같이 배치하게 된다. 그러나 이러한 여파기 구조가 주파수 혼합기의 입력 포트에 연결될 때, RF와 LO 포트에 사용된 필터 공진부의 임피던스 특성이 동일하지 않으므로 RF 및 LO 포트 임피던스에 영향을 주게 된다. 영상 대역 제거 필터의 경우, RF 대역에서만 50 ohm 특성을 유지하고, LO 대역에서는 그 특성이 달라 LO 포트 임피던스에 영향을 주게 되고, 이로 인해 주파수 혼합기로 입력되는 LO 구동 전력의 전력 전달 특성이 주파수마다 다르게 되며, 혼합기의 변환 손실 특성이 동작 주파수 대역 내에서 평탄하게 유지되지 않게 된다. 다시 말하면, IF가 있는 주파수 하향 변환기에서 LO 주파수 대역은 RF 주파수 대역과 IF 주파수만큼 차이가 나며, LO 주파수 대역에서 주파수 혼합기의 RF 포트 임피던스는 영상 대역 제거 필터 임피던스로 인해 50 ohm 특성을 갖지 못하게 된다.

이로 인해 주파수 혼합기로 전달된 LO 구동 전력이 RF 포트 또는 다이오드로부터 반사되고, 반사된 신호가 다시 LO 입력 신호와 중첩되어 일정한 전력

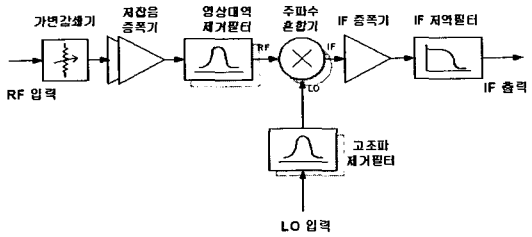

그림 1. 주파수 하향 변환기 기본 블록 구조도
Fig. 1. Basic block architecture of frequency down converter.

으로 다이오드를 구동할 수 없게 된다.

본 논문에서는 그림 1의 주파수 하향 변환기에서 RF 포트 및 LO 포트에 위치하는 서로 다른 주파수 대역의 여파기를 주파수 혼합기의 회로 일부로 고려하여 설계하였으며, 각 필터와 혼합기의 포트 사이의 전기적 길이를 대역 평탄도 개선의 변수로 활용하여 그 영향 및 최적 값을 시뮬레이션을 통해 확인하고, 제작 및 측정을 통해 이를 검증하도록 한다. 논문의 2장에서는 주파수 하향 변환기에서의 변환 손실 평탄도에 대해 여파기 및 혼합기 포트 사이의 전기적 길이가 그 특성에 어떤 영향을 미치는지 분석하고, 영상 대역 제거 필터 및 LO 고조파 필터를 포함하는 K-band 주파수 혼합기의 설계에 대해 기술하도록 한다. 3장과 4장에서는 설계, 제작 및 측정을 통해 평탄도 특성을 포함한 주파수 혼합기의 성능을 검증하고, 마지막으로 5장에서는 결론을 소개하도록 한다.

Ⅱ. 여파기와 혼합기의 전기적 길이에 따른 대역 평탄도 영향 분석

그림 1과 같은 주파수 하향 변환기 설계에서, 입력과 출력의 주파수 성분이 변하지 않는 가변 감쇄기, 저잡음 증폭기, 필터 및 IF 증폭기 등은 해당 대역에서 평탄도 특성이 우수하면 하향 변환기에 적용해도 대역 평탄도 특성에 큰 영향을 주지 않는다. 반면에 주파수 혼합기와 같이 RF, LO 및 IF 포트의 주파수에 따른 임피던스 정합 특성이 다른 경우, 주파수 혼합기 자체의 변환 손실 특성은 우수하더라도 RF 필터 및 LO 필터의 주파수 응답 특성이 서로 달라 변환 손실에 대한 대역 평탄도 특성에 영향을 주게 된다. 이것은 혼합기의 변환 손실이 최소화 되고, LO 구동 전력에 대한 환경적 영향에 민감하지 않도록 LO 포트 정합을 잘 하더라도, RF 대역의 주파수 특성이 다른 필터가 연결되는 경우, LO 포트 임피던스에 영향을 미치게 되어 의도했던 평탄도 특성과는 다른 결과를 얻게 되는 것이다.

이에 따라 수신기 또는 하향 변환기 설계 시 혼합기의 구성은 영상 대역 제거 필터 및 LO 고조파 필터, IF 저주파 필터 등의 영향을 설계 단계에서 고려해야 한다. 그림 2는 영상 대역 제거 필터 및 LO 고

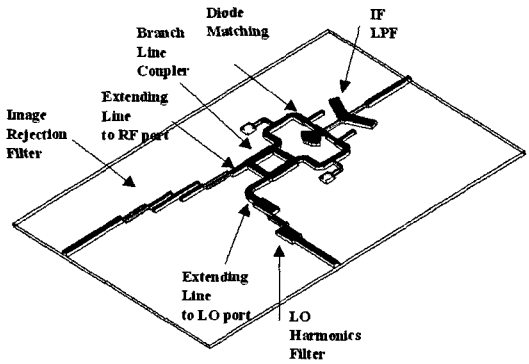

그림 2. 영상 대역 제거 필터 및 LO 고조파 필터와 결합된 주파수 혼합기 구조

Fig. 2. Structure of frequency mixer with image rejection filter and LO harmonic filter.

표 1. K-band 주파수 혼합기 설계 사양 및 측정 결과 요약

Table 1. Summary of design specification of frequency mixer and measured results.

Parameters	Specifications	Measured results
RF Frequency	21.2~ 22.6 GHz	21.2~ 22.6 GHz
LO Frequency	19.32~ 20.72 GHz	19.32~ 20.72 GHz
IF Frequency	1.88 GHz +/- 50 MHz	1.88 GHz +/- 50 MHz
LO Power Level	10 dBm typ.	10 dBm +/- 2 dBm
Conversion Loss	10 dB typ.	8.5 dB typ
Band Flatness	< 2 dB	2 dB max
IIP3	> 12 dBm	15 dBm
Input P1dB	> 5 dBm	8 dBm
Noise Figure	< 10 dB	8.5 dB
Image Rejection	> 15 dB	20 dB
Harmonic/ Spurious Level	< -30 dBm	< -40 dBm
LO/RF Isolation	> 15 dB	20 dB
LO/IF Isolation	> 20 dB	50 dB
RF/IF Isolation	> 30 dB	40 dB
VSWR @ RF port	< -10 dB	-12 dB
VSWR @ LO port	< -10 dB	-10 dB
VSWR @ IF Port	< -10 dB	-5 dB

조파 필터를 포함한 주파수 혼합기의 구조를 나타낸다. 영상 대역 제거 필터와 주파수 혼합기의 RF 포트 사이의 "Extending Line"은 여파기와 혼합기 각 포트 사이의 전기적 길이를 나타내며, 혼합기의 대역 평탄도 특성에 관여하는 변수이다.

90도 커플러의 광대역 임피던스 정합 특성은 LO 구동 전력과 RF 신호 전력을 쇼트키 다이오드까지 최대로 전달될 수 있도록 하지만, RF 포트 영상 대역 제거 필터의 임피던스 정합 특성은 RF 대역에 국한되므로 혼합기 내에 공급된 LO 전력은 RF 포트에서 종단 특성을 갖지 못한 채, LO 공급 전력과 상관되어 다이오드 구동 전력 레벨을 흔들리게 만든다. 그림 3과 그림 4는 RF 대역 21.2~22.6 GHz, LO 대역 19.32~20.72 GHz, IF 대역 1.88 GHz의 사양을 갖는 유럽

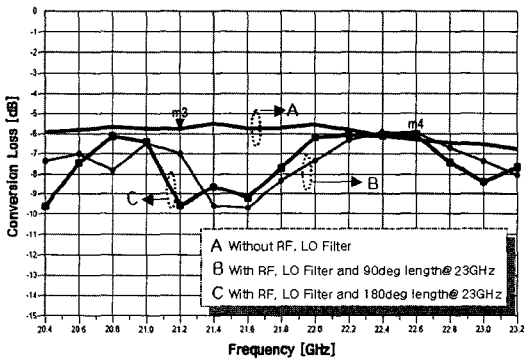

그림 3. 여파기와 혼합기 입력 포트 사이의 전기적 길이에 따른 대역 평탄도 특성 모의 시험 결과

Fig. 3. Simulation results of flatness for extending line length between resonator and mixer port.

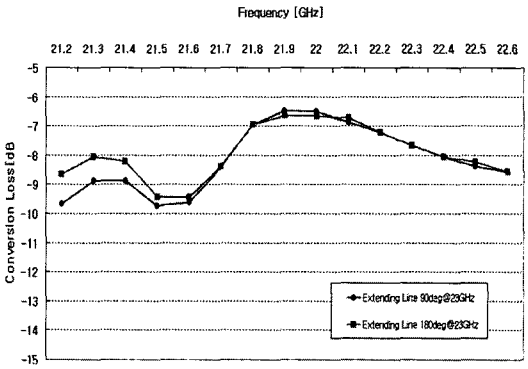

그림 4. 여파기와 혼합기 입력 포트 사이의 전기적 길이에 따른 대역 평탄도 특성 측정 결과

Fig. 4. Measured results of flatness for extending line length between resonator and mixer port.

형 microwave radio에 적용하기 위한 주파수 혼합기의 모의 시험 및 측정 결과를 나타낸다. 유전율 3.38, 두께 8 mil의 Rogers사 RO4003 기판을 이용하여 그림 2의 구조로 혼합기를 설계하고, 여파기와 커플러 사이의 전기적 길이는 23 GHz 기준 90도, 180도로 하였다. 제시한 결과에서 알 수 있듯이 여파기가 집적되기 전의 대역 평탄도 특성은 모의 시험 기준 0.5 dB의 성능을 보이나, 여파기의 주파수 특성을 고려하지 않을 경우, 대역 평탄도는 3 dB 이상으로 열화될 수 있음을 나타내고 있다. 만약 혼합기 종류와 평탄도와의 관계 부분에서 RF/LO의 격리도를 크게 구현할 수 있는 경우, LO의 fluctuation을 줄일 수 있을 것으로 예측되지만, 입력 측 hybrid coupler를 rat-Race 또는 lange 커플러 등으로 구현을 하더라도 50 ohm 상태에서 유지되는 격리도는 포트 임피던스가 해당 주파수에서 변동되면 격리도 특성은 보장이 되지 않아, 단순히 격리도 개선이 평탄도 개선에 직접적으로 영향을 주지 못한다. 또한 20 GHz 대역에서의 physical dimension 자체가 작아 10 dBm 이상의 LO 구동 전력에 대해 3~40 dB 이상의 격리도를 갖도록 제작하는 것은 구현상에 어려움이 있다. 이러한 점을 감안하여 혼합기와 여파기 사이의 최적 거리를 모의 시험을 통해 선행 계산하여 K-band 여파기 집적형 주파수 혼합기를 설계하였다.

Ⅲ. 여파기 집적형 주파수 혼합기 설계

유럽형 저속 데이터 전송용 K-band 지상 무선 중계기에 사용되는 주파수 하향 변환기 설계 사양을 기준으로 표 1의 주파수 혼합기 설계 사양을 도출하였다. 주파수 혼합기의 설계 과정은 그림 2의 구성 블록을 개별적으로 설계하고 설계된 블록을 집적하는 순서로 한다. 주파수 혼합기에 사용된 다이오드는 Alpha사의 DMK-2790 쇼트키 다이오드를 사용하였으며, 기판은 Rogers사의 RO-4003 8 mil을 이용하였다. 그림 5는 영상 대역 제거 필터의 설계 및 측정 결과를 나타내며, 동일한 필터 샘플 3개를 측정한 결과이다. 제작 오차로 인해 영상 주파수 대역에서의 억압도가 다소 차이를 갖고 있지만 평균 20 dB의 억압도를 갖는다. 그림에 표시한 바와 같이 LO 대역에서 임피던스 정합 특성은 유지가 되지 않음을 확인할 수 있다. LO 고조파 필터는 1/4 파장 트랜스포머로 구현하여 RF 및 LO 대역을 모두 포함하도록 설계되었다. 다이오드 정합회로 설계 시 RF 대역과 LO 대역을 단일 스터브 방법으로 광대역 정합을 하는데 제약이 있는 경우, RF 대역보다는 LO 대역에 정합도를 높임으로써 다이오드에서 반사되어 혼합기 내에 잔존하는 LO 구동 전력을 최소화 하는 것이 대역 평탄도 특성을 개선시킬 수 있다. LO의 구동 전력은 설계 사양 10 dBm에서 입력 P1dB 특성과 IIP3 특성을 만족하도록 설계하였고, LO 구동 전력이 다이오드에 인가되면서 발생하는 DC 전력을 바이패스 시킬 수 있도록 RF 및 LO 대역에 대해 큰 임피던스 특성을 갖는 1/4 파장 선로와 Via 홀을 이용해 단락 선로를 구현하여 다이오드 정합 회로와의 접점부에서 "Open" 회로로 동작하도록 설계하였다.

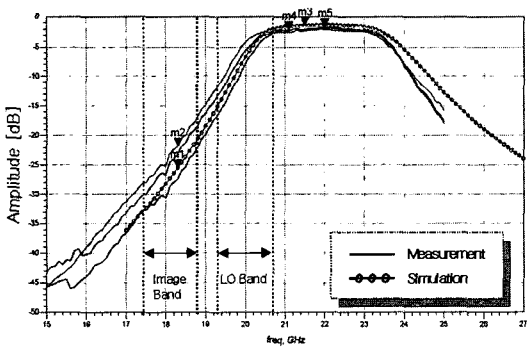

그림 5. 영상 대역 제거 필터의 네트워크(S_{21}) 응답 특성

Fig. 5. Network response(S_{21}) of image rejection filter.

평형 다이오드 접점부의 radial stub는 LO 주파수 대역에 대해 "Short" 특성을 갖도록 하여 IF 포트로의 LO 전력 누설을 최소화 하도록 하였다. 또한 저역 통과 필터를 통해 IF로 변환 신호가 전달됨으로써 LO/IF 고립도 특성을 개선시키는 효과가 있다. 구현된 LPF는 3 dB cut-off 주파수가 2 GHz의 특성을 갖는다. RF 포트의 영상 대역 제거 필터와 LO 고조파 필터의 영향을 최소화시켜 설계한 주파수 혼합기를 검증하기 위해, 필터 여파기가 있는 회로와 없는 회로 두 가지를 설계 제작하였다. 그림 6은 RF 및 LO 여파기와 혼합기 포트 사이의 길이를 모두 50 mil로 하였을 때, 여파기 유무에 따른 변환 손실을 나타낸다.

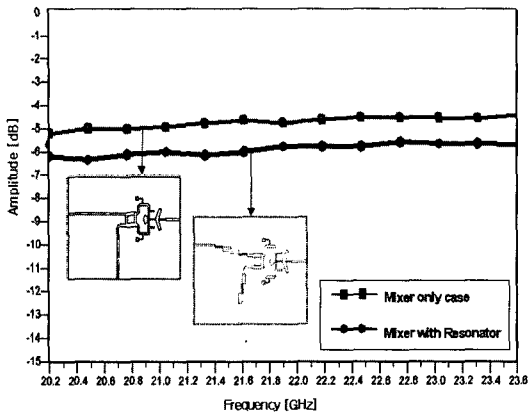

그림 6. 여파기 유무에 따른 주파수 혼합기 평탄도 특성 모의 시험 결과

Fig. 6. Simulation results of flatness of mixer with/ without resonator.

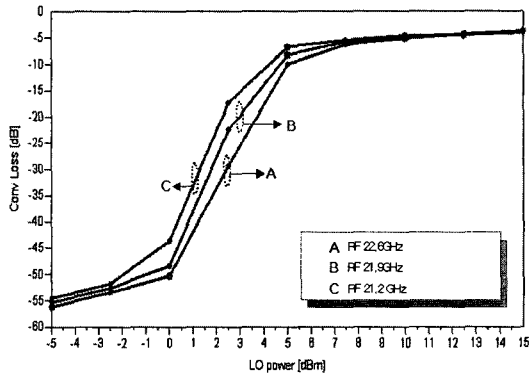

그림 7. LO 전력에 따른 변환 손실 특성 모의 시험 결과

Fig. 7. Simulation results of conversion loss due to LO power.

영상 대역 제거 필터의 삽입 손실만큼 손실 값이 증가하였을 뿐 대역 평탄도 특성은 그대로 유지하는 결과를 보이고 있다.

LO 구동 전력 10 dBm 조건에서 모의 시험하였으며, LO 전력에 대한 변환 손실 특성은 그림 7에 나타내었다. 주파수 하향 변환기의 동작 온도 특성을 감안할 때, LO 전력은 10 dBm을 기준으로 최대 +/ −2 dB의 전력 변화가 있어도 하향 변환기의 변환 손실에 대한 안정성을 보장하도록 8~12 dBm 전력에 대해 변환 손실 값을 유지할 수 있도록 설계하였다.

Ⅳ. 여파기 집적형 주파수 혼합기 제작 및 검증

그림 8은 제작한 여파기 집적형 주파수 혼합기를 나타낸다. 혼합기의 RF 포트 및 LO 포트에 연결되는 각 여파기의 연결 길이는 50 mil로 동일하며, 쇼트키 다이오드 DMK2790은 에폭시를 이용하여 접합하였다. 그림 9는 제작된 혼합기 2종에 대한 대역 평탄도 특성을 나타낸 것이다. LO 전력 10 dBm을 인가하였을 때, 영상 대역 제거 필터 및 LO 고조파 필터가 없는 경우, 변환 손실 6 dB의 측정 결과를 보였으며, 여파기들을 포함할 경우, 영상 대역 제거 필터 손실을 포함한 8.5 dB의 변환 손실 결과를 보였다.

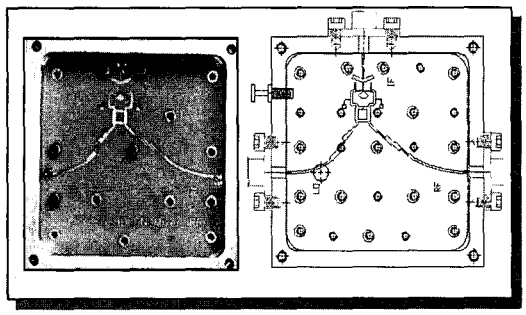

그림 8. 영상 대역 제거 필터 및 LO 고조파 필터를 집적한 주파수 혼합기 제작 사진

Fig. 8. The picture of fabricated mixer integrating with image rejection filter and LO harmonic filter.

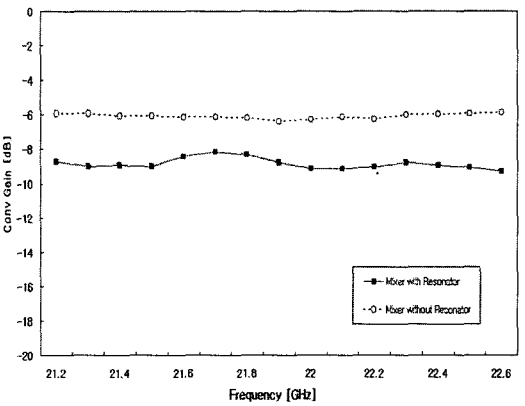

그림 9. 여파기 유무에 따른 주파수 혼합기 평탄도 특성 측정 결과(LO 전력 10 dBm)

Fig. 9. Measured results of flatness of mixer with/ without resonator(LO power 10 dBm).

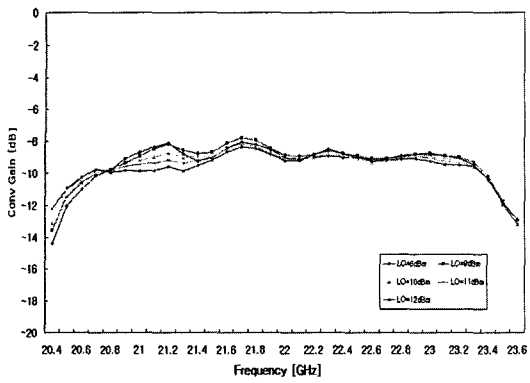

그림 10. 여파기 집적형 주파수 혼합기 평탄도 특성 측정 결과(LO 전력 8~12 dBm)

Fig. 10. Measured results of flatness of mixer with resonator(LO power 8~12 dBm).

21.2~21.8 GHz 사이 응답 특성에서 여파기 삽입에 따라 평탄도 특성이 다소 출렁거리는 현상이 발생했으나, 전체적인 특성 곡선은 설계 값과 유사한 결과를 나타내었다. 변환 손실량이 설계 값보다 큰 것은 그림 8의 시험용 지그에 대한 동축선 커넥터-마이크로스트립 변환부에 대해 손실 보정을 하지 않은 것과 영상 대역 제거 필터 성능이 그림 5에 나타낸 것과 같이, 설계 값보다 다소 큰 손실을 갖은데 원인이 있다. 동작 환경 상의 온도 특성을 감안한 LO 전력 변화에 대한 변환 손실 변화량은 그림 10에 나타내었다. 20.8 GHz 미만과 23.2 GHz 이상에서 변환 손실이 급격이 커지는 것은 그림 5의 영상 대역 제거 필터의 통과 대역 응답 특성으로 인한 것이다. 필터의 응답 특성과 동일하게 주파수 혼합기 특성 역시 대역폭 2.4 GHz에서 평탄한 변환 손실 값을 보이며, LO 인가 전력 10 dBm을 기준으로 +/-2 dBm 편차로 전력이 공급되더라도 관심 대역 내 변환 손실은 21.2~21.8 GHz에서 최대 2 dB, 21.8~22.6 GHz에서는 최대 0.5 dB 편차를 벗어나지 않는다. 이는 그림 7의 LO 전력 포화점 모의 시험 결과에서도 잘 나타난다. 21.2~21.8 GHz 부분에서 변환 손실 편차가 큰 것은 그림 5의 필터 응답 특성에서 보인 바와 같이 낮은 주파수로 갈수록 임피던스 부정합 특성이 커지는 것과 연관지어 분석될 수 있다. 그 외 주파수 혼합기의 성능 사양인 잡음 지수, 입력 측 전력 포화점 및 3차 혼변조 왜곡점, 스퓨리어스 및 각 포트 정재파비에 대한 측정 결과는 표 1에 요약하였다. 표 1에서 IF VSWR 특성이 RF 및 LO 포트에 비해 다소 안 좋은 특성을 보이는 것은 하향 변환기 전체를 고려할 때 혼합기 후단에 3 dB의 고정 감쇄기가 있어 IF의 정합도가 크게 요구되지 않아 혼합기 설계 단계에서 별도의 IF 정합 회로를 구현하지 않은데 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 마이크로파 주파수 하향 변환기 내에 적용되는 주파수 혼합기를 설계할 때, 저잡음 증폭기 전/후단에 삽입되는 영상 대역 제거 필터와 국부 발진부 고조파 필터의 서로 다른 임피던스 정합 특성으로 인해, 주파수 혼합기의 대역 평탄도 특성이 변하게 된다는 것을 검증하는 여파기 집적형 주파수 혼합기의 설계 및 측정 결과를 제시하였다. 이는 혼합기 자체 평탄도 특성만을 고려하고 여파기에 의해 열화되는 평탄도 특성을 사전에 고려하지 않을 경우, 예측된 평탄도와 다른 결과를 얻을 수 있음을 의미한다. 논문에서는 이에 대한 대책으로 혼합기 설계 시, 각 공진부를 포함하는 여파기 집적형 주파수 혼합기 형태로 설계하는 방법을 제시하였으며, 공진부와 혼합기의 각 포트 사이의 전기적 길이를 최적화함으로써 평탄도를 개선할 수 있음을 보였다. 제작된 혼합기는 여파기 및 혼합기 포트 사이 전기적 길이를 50 mil로 할 때, 영상 대역 제거 필터의 삽입 손실을 포함한 변환 손실 8.5 dB, 평탄도 특성 2 dB 이하의 결과를 보였으며, 혼합기 각 포트에 여파기가 없을 때의 경우와 비교할 때 대역 내 평탄도 특성을 유지하는 특성을 보였다.

참 고 문 헌

[1] A. Gustafsson, "A fully integrated radar receiver front end including an active tunable band pass filter and an image rejection mixer", *APMC2000*, pp. 99-102, 2000.

[2] Yew Hui Liew, "RF and IF ports matching circuit synthesis for a simultaneous conjugate-matched mixer using quasi-linear analysis", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 50, no. 9, pp. 2056-2062, Sep. 2002.

[3] S. A. Maas, *Microwave Mixers*, Artech House, Norwood, MA, 1986.

유 승 갑

1999년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2001년 8월: 광주과학기술원(GIST) 기전공학과 (공학석사)
2001년 8월~2004 2월: Millitron Inc. R&D Research Staff
2004년 2월~현재: 한국전자통신연구원 부설 국가보안기술연구소 연구원
[주 관심분야] 밀리미터파 통신, 광대역 수신기, Mixed-Signal Integrated Circuit

황 인 호

1980년 2월: 한양대학교 전파 및 통신공학과 (공학사)
1982년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)
1986년 2월~2000년 1월: 국방과학연구소 선임연구원
1992년 3월~1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 통신공학과 (공학박사)
2000년 2월~현재: 한국전자통신연구원 부설 국가보안기술연구소 책임연구원 팀장
[주 관심분야] 정보보호, 이동통신, 통신신호처리, EMI/EMC

한 석 균

1994년 2월: 광주대학교 전자공학과
1997년 2월: 목포대학교 전자공학과 (공학석사)
2004년 2월: 목포대학교 전자공학과 (공학박사)
2004년 2월~현재: 한국정보통신대학교 연구교수
[주 관심분야] RFIC, 마이크로파 능동 회로