

Ku 밴드 수신단을 위한 저잡음 증폭기 및 주파수 혼합기 설계

논 문
61-2-11

Design of LNA and Mixer for Ku-band Receiver

최혁재* · 고재형** · 김군태** · 이제광* · 김형석†

(Hyuk-Jae Choi · Jae-Hyeong Ko · Koon-Tae Kim · Je-Kwang Lee · Hyeong-Seok Kim)

Abstract - The Ministry of Information-Communication assigned 18~19GHz frequency band for communication of cabins and platform to link between subway/train and it's station. In this paper, we propose wireless transmission devices which are 2 stage hybrid low noise amplifier of 18GHz band and mixer for 18GHz as well to apply for RF receiver. We designed LNA to be noise matched its 1st stage and gain matched for 2nd stage and mixer using 180° hybrid coupler to suppress the spurious signal. The transistors of 18 GHz LNA and mixer are NE3210S01 of NEC and KMB-N51-1, respectively. As the result of simulation, we get 19.92dB gain and 2.06dB noise figure with LNA and 8.61dB conversion loss with mixer.

Key Words : Low noise amplifier, 18GHz, Noise matching, Gain matching, Diode mixer, Coupler

1. 서 론

최근 대도시의 교통난 해소를 위해 정부에서는 더 많은 대중교통의 이용을 장려하고 있다. 그러나 지하철 이용 승객이 증가함에 따라 지하철 화재 사고나 승객 추락사고 등과 같은 안전사고에 더욱 노출되어 된다. 특히 출, 퇴근 시간대에 많은 승객들이 지하철을 이용하면서 승강장과 객실은 많은 유동인구가 협소한 공간에 밀집해 있기 때문에 작은 안전사고부터 대형사고까지 이를 빠르게 대처할 수 있는 모니터링 시스템이 필요하다.

따라서 기관실 및 역사에서 모니터를 통해 승강장과 객실 상황을 한눈에 파악하여 신속히 대처 할 수 있는 영상전송 장치가 필요하다. 과거에는 영상 전송을 위한 유선 통신 장치가 주를 이루고 있었으며, 이는 지하라는 장소적인 제한과 고품질을 위한 비디오 케이블, 고가의 공사비 등의 예산적인 문제를 동반하고 있고 아날로그 기반의 통신 방식으로 저화질의 품질을 제공함으로써 경제적, 품질적으로 비효율적인 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 무선 통신망을 이용한 영상 및 화상을 통한 모니터링 통신 시스템이 개발 되고 있다.

하지만 2.4GHz 대역의 WLAN기반의 시스템은 범용 주파수 대역을 사용하기 때문에 다른 무선통신 시스템에 대한 주파수 간섭에 취약하고 근거리 통신망(100m 이내)을 지원하기 때문에 지하철 역사 간의 구간에서는 통신이 제한되었

다. 이를 위해 정보통신부에서는 지하철 및 열차 화상전송을 위해 18.86~19.92GHz 및 19.20~19.26GHz의 주파수 대역을 '안전 및 공공 목적을 위한 지하철(철도 포함)의 무선영상 전송장치'용으로 사용하기로 결정하였다[1]. 이는 기존의 WLAN에서 있던 주파수 간섭 및 단거리 통신에 대한 단점을 극복하고 장거리 통신이 가능하고 무선영상통신 뿐만 아니라 다양한 부가 서비스 제공이 가능할 것으로 사료된다.

본 논문에서는 열차/지하철의 객실 또는 승강장을 감시하기 위한 무선영상전송장치를 제안하고 영상전송을 위한 RF 모듈에 적용 가능한 18GHz 대역의 저잡음 증폭기 및 주파수 혼합기를 설계하였다. 제안한 RF 수신 증계기는 고이득 특성이 가져야 하며 이를 위해 설계한 18GHz 대역의 저잡음 증폭기는 잡음을 최소화 하며 이득을 최대화하기 위해 2단 하이브리드 증폭기 구조로 설계하였다.

또한, 주파수 혼합기는 10GHz 대역 이상에서 인접 주파수의 불필요한 신호에 대한 억제력을 위해 스푸리어스 특성에 강하도록 연구 및 설계하였다. 3dB 커플러를 이용하여 주파수 혼합기에 들어가는 국부발진기 신호의 위상을 180°차로 입력하여 불요파 특성을 향상하였다. 이는 지하철 무선 영상 시스템에서 다수 채널에서 수신되는 영상신호 간의 간섭에 강한 특성을 갖는다. 또한, 초고주파 대역에서도 구현이 간단하고 선형특성이 우수한 수동소자 방식으로 설계하였다.

2. 본 론

본 논문에서 제안한 지하철/열차 무선 영상전송시스템의 수신에 사용될 수 있는 고이득 증계기의 제시 방안은 표 1과 같다. 지하철/열차 무선영상전송장치는 그림 1과 같이 승강장과 각 객실 내에 부착된 CCTV 영상 및 데이터를 RF

* 준 회 원 : 중앙대학교 전자전기공학부 석사
** 정 회 원 : 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정
† 교신저자, 시니어회원 : 중앙대학교 전자전기공학부 교수
E-mail : kimcaf2@cau.ac.kr
접수일자 : 2011년 10월 22일
최종완료 : 2011년 11월 25일

통신을 통해 15Mbps 속도의 신호를 ADC(Analog to Digital Converter)를 이용해 변조하여 송수신하는 구조이다. 이를 이용해 기관실 및 역사 상황실에서 실시간으로 사고여부를 감시하고 사전에 안전대책을 마련하는 것이다. 또한, 굽은 선로, 인접 역사를 고려하여 전 구간 지속적인 통신이 가능하도록 여러 채널을 사용하여 지속적인 통신이 가능하도록 한다[2]. 이를 위해 본 논문에서는 지하철/역사 무선영상전송을 위한 시스템에 적용할 수 있는 저잡음 증폭기 및 주파수 혼합기를 제안하였다.

표 1 제안한 RF 수신 모듈의 기본 방안

Table 1 Propose of RF Receiver Module

용도	지하철/열차 무선영상전송장치
중심 주파수	18GHz
점유 주파수 폭	10MHz 이내
출력	100mW 이하

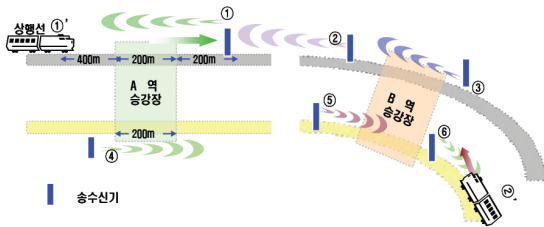


그림 1 지하철/열차 무선영상전송을 위한 시스템 구성도

Fig. 1 System of Wireless Image Transmission for Subway/Train

2-1 저잡음 증폭기

저잡음 증폭기는 2단 공통 소스 구조를 적용하였다. 그림 2는 여러 증폭기가 다단으로 연결 될 경우 이득과 잡음 지수를 나타내기 위한 블럭도이다.

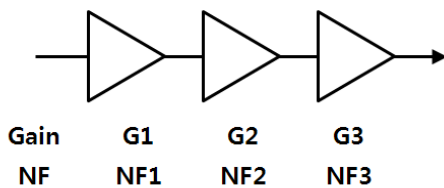


그림 2 다단 증폭기 블럭도

Fig. 2 Circuit of Multistage Amplifier

저잡음 증폭기를 다단으로 설계할 경우 중요하게 고려해야 할 항목 중에 하나가 잡음지수와 이득이다. 식 1과 식 2는 다단 증폭기일 경우 최종 단에서 출력되는 잡음지수와 이득을 나타낸 수식이다.

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots \quad (1)$$

$$Gain = G_1 + G_2 + G_3 + \dots \quad (2)$$

위의 수식을 보면 다단 증폭기의 경우 이득의 총 합이 출력 이득이지만, 잡음 특성을 나타내는 잡음 지수는 가장 첫 번째 단의 잡음지수는 그대로 합해지면서 두 번째 단부터는 앞 단의 이득으로 나누어져 합해지는 것을 알 수 있다. 즉, 이득은 다단의 경우 총 합으로 출력되기 때문에 많은 증폭기를 연결하면 목표치를 충분히 만족하도록 설계할 수 있지만, 잡음 지수는 가장 첫 번째 단 증폭기의 잡음 지수가 전체 증폭기의 성능을 좌우한다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 2단 공통소스 증폭기를 구성하였으며, 식 1,2에서 볼 수 있듯이 잡음 지수를 향상시키면서 이득을 최대화하기 위해 첫 번째 단계에서는 이득보다는 잡음특성의 향상시키기 위해 중점을 두어 설계하였고, 두 번째 단계에서는 이득을 향상시키기 위해 설계하였다.

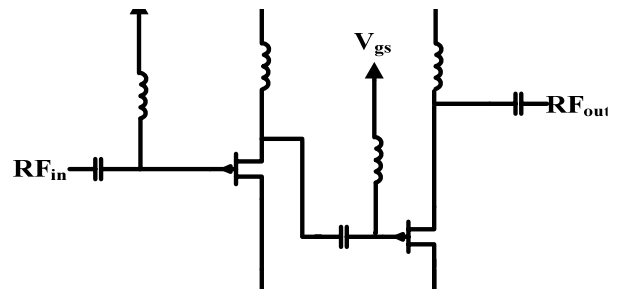


그림 3 2단 저잡음 증폭기의 회로도

Fig. 3 Circuit of 2-stage LNA

설계한 2단 저잡음 증폭기는 첫 번째 단계에서는 잡음지수를 최소화하기 위해 일반적으로 RF 회로에서 사용하는 50Ω 임피던스 매칭이 아닌 잡음 지수 매칭을 하여 잡음 지수 특성을 향상시켰다. 반대로 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계 설계 목표에서 부족한 이득을 더욱 증폭하기 위해 이득 매칭을 하여 첫 번째 단계에서 부족한 이득을 증폭하여 이득을 향상시켰다[3][4][5]. 또한, 높은 주파수 특성상 적용하기 어려운 R, L, C 소자대신 마이크로스트립 라인을 활용하여 설계하였다. 트랜지스터는 18GHz 대역에서 충분한 이득과 잡음 특성을 만족하는 NEC社의 NE3210S01을 사용하였으며, NEC社에서는 ADS Tool과 연동하는 소자 Library를 제공한다.

2-1-1 전송선로 저잡음 증폭기의 설계 방법

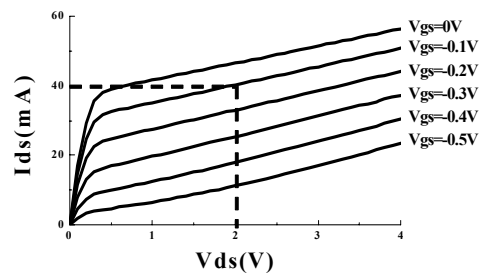


그림 4 설계한 Bias에서 트랜지스터 동작 상태

Fig. 4 Transistor Active Stage in Bias Point

저잡음 증폭기를 설계하기 위해서 먼저 트랜지스터가 증폭기로서 동작하는 포화 영역에서 최대 이득과 최소 잡음 지수를 갖도록 동작점 및 안정도를 확인한다. 식 3은 안정도를 판하는 수식이다.

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\nabla|^2}{2|S_{12}S_{21}|} \quad (3)$$

$K > 1$: unconditionally stable
 $|K| < 1$: potentially unstable

본 논문에서는 $V_{gs} = -0.1V$, $V_{dd} = 2V$ 로 하여 40mA의 전류가 흐르도록 설계하였고, 그림 4에서 보듯이 트랜지스터가 포화 영역에서 동작함을 알 수 있었다. 안정도의 모의실험 결과를 식 3에 적용한 결과 1.25로 1보다 큰 값을 가짐으로써 회로가 안정적으로 동작함을 확인하였다. 표 2는 본 논문에서 설계하기 위한 저잡음 증폭기의 설계 목표이다.

표 2 저잡음 증폭기의 설계 목표

Table 2 Design Targets of LNA

항목	단위	설계목표
Center Frequency	GHz	18
Gain	dB	15
NF	dB	3

2-1-2 잡음지수 매칭과 이득 매칭

다단 증폭기의 경우 위의 수식에서 알 수 있듯이 첫 번째 단은 잡음지수가 두 번째 단은 이득이 중요하다. 그러므로 본 논문에서는 첫 번째 단의 공통소스 증폭기는 잡음지수를 고려하여 잡음지수 매칭을 하였고, 두 번째 단은 이득을 최대화하기 위해 이득 매칭을 하였다. 그림 5는 스미스 차트에서의 잡음지수 매칭과 이득 매칭을 한 결과이다.

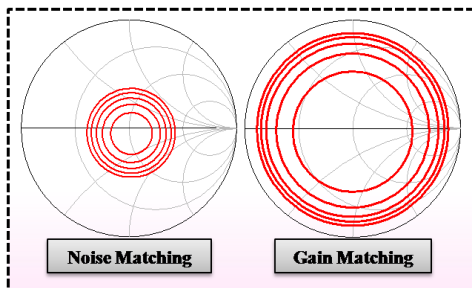


그림 5 이득 매칭과 잡음지수 매칭
 Fig. 5 Noise Matching and Gain Matching

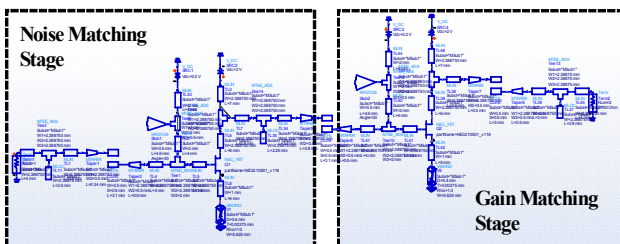


그림 6 설계한 2단 캐스케이드 저잡음 증폭기
 Fig. 6 Designed 2-stage Cascade LNA

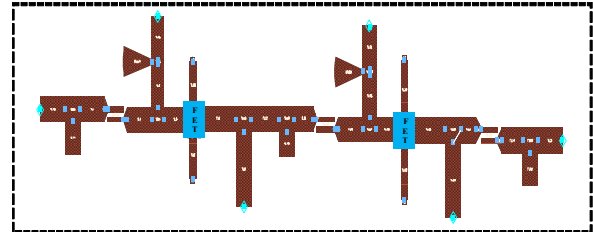


그림 7 설계한 저잡음 증폭기의 레이아웃
 Fig. 7 Layout of Designed LNA

그림 6, 7은 설계된 2단 구조 저잡음 증폭기 및 그 레이아웃이다. 제작에 사용할 기판은 Duroid 5870을 사용할 예정이며 유전율은 2.33이다. 실제 제작하여 검증하여 모의실험 결과를 검증할 필요가 있다고 사료된다.

모의실험 결과 그림 8과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이득은 19.92dB이고 잡음 지수는 2.06dB이다. 표 3는 설계 목표와 모의실험 결과를 비교 한 것이다.

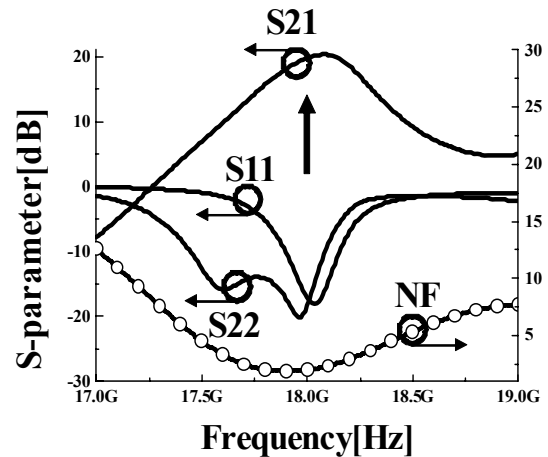


그림 8 저잡음 증폭기의 S-parameter 및 잡음지수 모의실험 결과
 Fig. 8 S-parameter and Noise Figure of LNA

표 3을 통해 목표 주파수에서 이득과 잡음지수가 만족하고, 입출력 반사손실 또한 -15dB이하의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

표 3 설계 목표와 모의실험 결과 비교

Table 3 Comparing with Design Target and Simulation Results

항목	단위	설계 목표	모의실험 결과
Center Frequency	GHz	18	18
S21(Gain)	dB	15	19.76
S11	dB	-15	-17.57
S22	dB	-15	-19.63
S12(Isolation)	dB	-20	-31.24
NF	dB	3	2.03

2-2 주파수 혼합기

주파수 혼합기는 사용 되는 소자에 따라 변환 이득을 갖는 능동 주파수 혼합기와 변환 손실을 갖는 수동 주파수 혼

합기로 구분할 수 있다. 능동 주파수 혼합기의 경우 별도의 직류전원이 필요하기 때문에 구현이 상대적으로 복잡하고 발진과 같은 추가적인 문제를 해결하여야 한다. 이에 비해 수동 주파수 혼합기는 별도의 직류전원이 필요하지 않으므로 구현이 간단하며 설계의 유연성 확보에 용이하다. 주파수 혼합기는 또한 구조에 따라 단일 구조, 단일 평형구조 및 이중 평형구조로 나눌 수 있다. 평형구조는 입력과 출력에 영향을 주는 공통된 잡음을 없앨 수 있어 공통-모드 효과를 줄일 수 있는 장점을 가진다. 또한, 고주파에서 더욱 중요시 되는 기생회로효과등을 제거하고, 동작범위를 증가시키는 장점이 있다[6][7]. 따라서 본 연구에서는 마이크로 스트립 선로를 이용한 180°하이브리드 3dB 결합기와 쇼트키 다이오드를 이용하여 18GHz에서 동작하는 호모다인 수신기에 적용 가능한 단일 평형 수동 주파수 혼합기를 설계하였다.

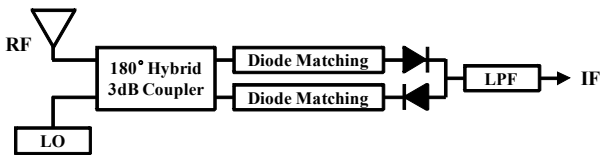


그림 9 단일 평형 수동 주파수 혼합기
Fig. 9 Singled balanced mixer

그림 9는 단일 평형 수동 주파수 혼합기의 기본 구조를 나타내었다. 쇼트키 다이오드는 잡음 지수가 낮고 고속 동작이 우수한 Kodenshi사의 KMB-N56-1를 사용하였으며 설계에 필요한 파라미터는 추출하는 방법대신 제조사에서 제공한 것을 이용하였다. 회로제작에 사용된 기판은 ROGERS사의 RO4003C이다.

2-2-1 180° 3dB 결합기 설계

그림 10은 본 연구에서 수행할 180°하이브리드의 결합선로 구조이다.

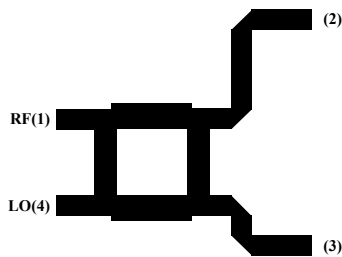


그림 10 180°하이브리드 결합기
Fig. 10 180° Hybrid Coupler

180°하이브리드 결합기는 90° 하이브리드의 형태를 기준으로 하여 (2)번 포트에 전기적 길이 90°를 연장하여 설계하였다. 국부발진 신호는 180°하이브리드 결합기를 통해 (2)번 포트와 (3)번 포트에 180°의 위상차를 갖고 공급되는 반면, RF신호는 동 위상으로 공급됨으로서 RF와 국부발진기의 주파수가 거의 차이 나지 않을 때, 우수한 RF/국부발진 격리도를 이룰 수 있다. 그리고 (2),(3)번 포트에 연결되는 다이오드의 방향과 국부발진기 신호의 180°위상차로 인해 국부발진기의 짝수 고조파 성분의 제거가 가능하며, IF 단에

서는 국부발진기 전압이 0이 됨으로서 IF/국부발진 격리도를 높일 수 있다. (2)번 포트와 (3)번 포트에서 동위상인 RF 신호는 국부발진기전력을 통해 구동된 다이오드를 통해 IF 신호로 더해지지만, 국부발진기신호에 부가된 잡음은 다이오드 양단에서 180°위상차로 인해 제거된다. 그림 11은 설계한 결합기의 RF 신호와 국부발진 신호 및 2,3번 포트 간 격리도를 나타내고 있으며, 그림 12, 13은 각 포트에서의 RF 신호와 국부발진 신호의 위상차를 나타내고 있다.

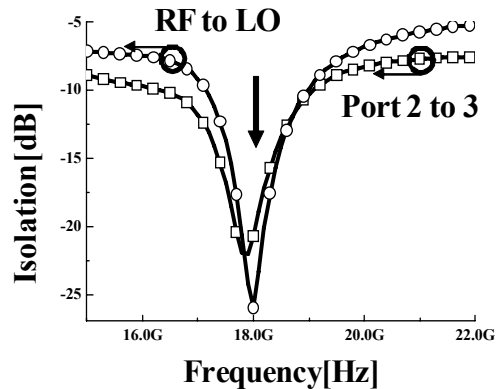


그림 11 하이브리드 결합기의 RF 부와 국부 발진기의 격리도
Fig. 11 Isolation of RF/LO with Hybrid coupler

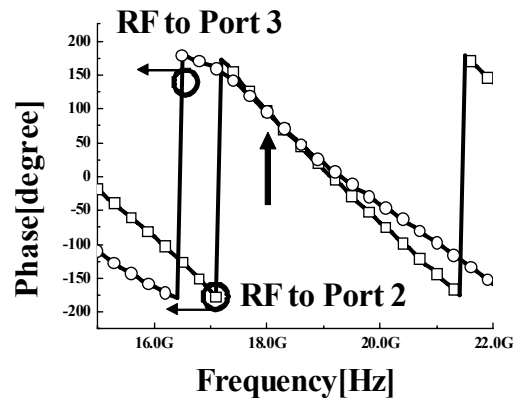


그림 12 설계된 하이브리드 결합기의 위상차
Fig. 12 Phase difference of Designed hybrid coupler

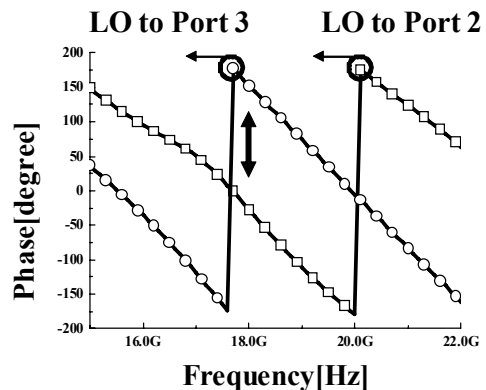


그림 13 설계된 하이브리드 결합기의 위상차
Fig. 13 Phase difference of Designed hybrid coupler

그림 11을 통해 목포 주파수에서 20dB 이상의 격리도를 가짐을 확인할 수 있으며, 그림 12, 13을 통하여 RF 신호가 경우 1°이내의 위상차를 가지며 국부발진 신호 또한 1°의 오차를 가지고 180° 위상차를 가지는 것을 알 수 있다.

2-2-2 주파수 혼합기 설계

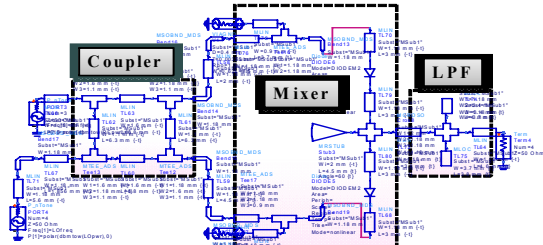


그림 14 설계된 주파수 혼합기의 회로도
Fig. 14 Schematic of designed LNA

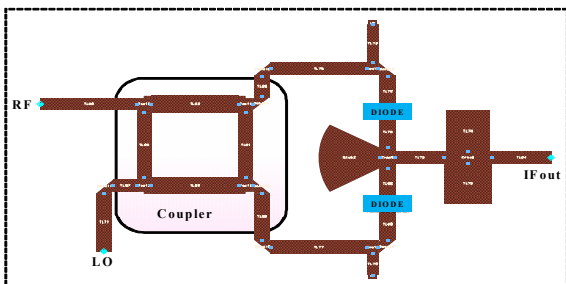


그림 15 설계된 주파수 혼합기의 레이아웃
Fig. 15 Layout of designed LNA

그림 14, 15는 커플러와 다이오드를 사용한 주파수 혼합기의 회로도 및 레이아웃이다. 모의실험 결과 그림 16과 같이 국부발진기의 신호가 18GHz, 7dBm 이고 RF 신호는 국부발진신호±1MHz으로 1MHz에서 IF 신호가 나오게 된다. -20dBm입력신호가 들어갔을 때 출력 스펙트럼을 나타낸 것이다. 1MHz에서 출력신호의 세기는 -31.812dBm으로 설계된 주파수 혼합기는 -11.812dB의 변환손실을 갖는 것을 알 수 있다. 3dB 주파수 결합기를 통과면서 3dB의 손실을 감안하면 결합기를 제외한 주파수 혼합기만의 변환손실은 8.812dB이 되며 향후 개선을 통하여 주파수 혼합기의 성능 개선이 가능하다고 사료된다.

그림 17은 18GHz에서 주파수 혼합기의 선형성을 나타내는 IIP3점으로서 20dBm이상의 선형적 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

표 4는 통해 설계된 주파수 혼합기의 모의실험 결과를 정리하였다.

모의실험 결과 1MHz의 출력 주파수에서 12dB의 변환손실을 가지며 20dBm이상의 입력 신호 동작이 가능하였다. 이를 통해 설계된 주파수 혼합기가 18GHz 수신단에 활용될 수 있음을 알 수 있다.

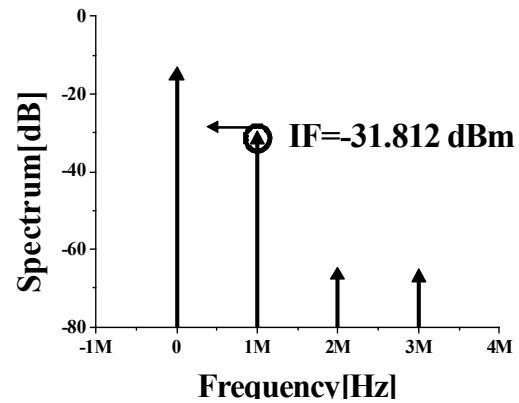


그림 16 설계된 주파수 혼합기의 출력 스펙트럼
Fig. 16 Output Spectrum of Designed mixer

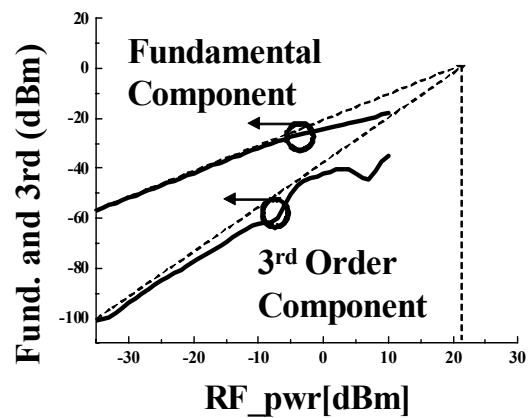


그림 17 설계된 주파수 혼합기의 선형성
Fig. 17 Linearity of Designed mixer

표 4 주파수 혼합기의 모의실험 결과

Table 4 Simulation Results of Designed mixer

항목	단위	설계목표
IF Frequency [MHz]	MHz	1
Conversion Loss [dB]	dB	11.812
IIP3 [dBm]	dBm	21

3. 결 론

본 연구는 열차/지하철의 객실 감시 또는 승강장 감시 장치에 사용되는 통신장치의 개발에 있어 기존 통신 장치와의 간섭을 최소화하고 통신의 안정성을 향상시킬 수 있도록 하기 위하여 상용 주파수가 아닌 전용 주파수를 할당하였다. 이에 RF 통신을 하기 위한 무선 송수신부의 장비 개발이 필요한데 본 논문에서는 수신부에 적용할 수 있는 18GHz대역의 저잡음 증폭기와 주파수 혼합기를 설계하였다. 많은 용량의 데이터(많은 채널의 모니터링 영상)를 처리해야 하면서 실시간 감시를 위한 양질의 모니터링 영상을 출력해야 하기 때문에 RF 잡음 특성과 고조파특성에 대해 고려할 필요가 있다.

저잡음 증폭기는 2단 증폭기로 설계하였으며 첫 번째 단은 잡음지수를 최소화하기 위해 잡음 매칭을 하였고 두 번째 단은 이득 매칭을 하여 설계하였다. 그 결과 이득(S21)은

약 19dB이고, 잡음지수는 약 2dB를 갖는다. 또한, 180° 하이브리드 결합기를 주파수 혼합기의 입력단에 연결하여 입력 포트간의 격리도를 향상 시키고, 입력 신호를 균일하게 분배 시켰다. 180°하이브리드 결합기와 쇼트키 다이오드를 이용하여 18GHz에서 동작하는 단일 평형 다이오드 주파수 혼합기를 설계하였다. RF 신호가 18GHz, 국부발진기 신호가 17.999GHz로 출력 신호가 1MHz로 변환하여 출력한다. 그 결과 RF Power가 -20dBm, 국부발진기 power가 7dBm이 입력되었을 때 IF 출력 Power는 약 -31.2dBm으로 약 12dB의 변환손실을 가지며, 주파수 혼합기의 선형성을 판단하는 IIP3는 21dBm의 결과를 확인하였다.

본 논문에서 설계한 잡음 특성 개선한 저잡음 증폭기와 스푸리어스 특성을 개선한 주파수 혼합기를 통해 지하철 영상 감시를 위하여 잡음을 최소화하고 타 신호에 영향을 적게 받으며 양질의 모니터링 RF 수신부에 적용 할 수 있을 것으로 사료된다.

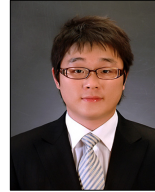
참 고 문 헌

- [1] 정통부 공정보 자료, '지하철 무선영상전송용 주파수 분배방안', 2007
- [2] 김인복, 김태규 " 지하철 무선 영상전송용 19GHz 중계기 설계" , 마이크로파 및 전파전파 학술대회 논문집, 제 33권, 제 1호, pp. 166, 2010년 6월
- [3] 안동식, 장동필 "23GHz대 2단 저잡음 증폭기의 제작기술에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 제8권, 제1호, pp. 52-60, 1997년 02월
- [4] A. Sayag1, S. Levin2, D. Regev2, D. Zfira2, S.Shapira2, D. Goren3 and D. Ritter, "A 25 GHz 3.3 dB NF Low Noise Amplifier based upon Slow Wave Transmission Lines and the 0.18 μm CMOS Technology," IEEE RFIC 2008
- [5] Milton Feng et al., "Ka-Band Monolithic Low Noise Amplifier Using Direct Ion-Implanted GaAs MESFET's," IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 5. no. 5, pp.156 - 158, 1995.
- [6] Stephen A. Maas, Fellow, IEEE, and Kwo Wei Chang, "A Broadband, Planar, Doubly Balanced Monolithic Ka-Band Diode Mixe", IEEE Trans. on microwave theory and techniques, Vol. 41, NO. 12, DECEMBER 1993.
- [7] Stephen A. Maas, "A GaAs MESFET BALANCED MIXER WITH VERY LOW INTERMODULATION", 1987 IEEE MTT-S Digest

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(2010T100100605) 주관으로 수행된 과제임.

저 자 소 개



최혁재 (李濟廣)

2009년 서울산업대학교 전자정보공학과 공학사
 2010년 중앙대학교 전자전기공학부 공학석사
 [주 관심분야] RFIC 회로 설계, RFID 시스템 연구



고재형 (高在亨)

2004년 중앙대학교 전자전기공학부 공학사
 2008년 중앙대학교 전자전기공학부 공학석사
 2008년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정
 [주 관심분야] 최적 설계 및 강건 설계 기법 연구, 마이크로파 회로 설계, 안테나 설계



김군태 (金君泰)

2008년 서경대학교 정보통신공학 공학사
 2010년 중앙대학교 전자전기공학부 공학석사
 2010년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정
 [주 관심분야] 초고주파 부품 설계, 최적 설계, 마이크로파 수동 소자 설계



이제광 (李濟廣)

2010년 중앙대학교 전자전기공학부 공학사
 2010년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사 과정
 [주 관심분야] 하이브리드 회로 및 수동 소자 설계



김형석 (金炯碩)

1985년 서울대학교 전기공학 공학사
 1987년 서울대학교 전기공학 공학 석사
 1990년 서울대학교 전기공학 공학 박사
 1990~2002 순천향대학교 정보기술공학부 부교수
 1997~1998 R.P.I 미국 방문교수
 2002~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수
 [주 관심분야] 전자장 및 수치해석, RF 및 마이크로웨이브 소자 해석 설계, RFID 시스템 연구, SoC 응용회로, 전력 IT