

통신정보용 광대역 저잡음 증폭단 설계 및 구현

고민호*

Design and Fabrication of wideband low-noise amplification stage for COMINT

Min-Ho Go*

요약

본 논문에서는 광대역 (400 MHz~2000 MHz) 2단 증폭단을 설계, 제작 및 측정하였다. 제안한 증폭단은 새로운 구조의 이득제어 방식을 적용하여 고이득, 저잡음지수 및 높은 선형성 특성을 구현하였다. 증폭단은 공통 에미터 구조의 초단 증폭기 및 캐스코드 구조의 가변이득 증폭기. 입력신호의 크기를 감지하는 전력감지회로로 구성하였다. 제안한 증폭단은 설계 대역에서 전체이득 29 dB~37 dB, 잡음지수 1.5 dB을 나타내었고, 강전계 입력 조건에서 전력감지회로에서 발생하는 제어전압 2.0V인 조건에서 3차 상호변조 왜곡 신호의 크기는 측정 장비의 잡음레벨 보다 낮은 특성을 나타내어 높은 선형성 특성을 나타내었다.

ABSTRACT

In this paper, wideband two-stage amplification stage was designed, fabricated and evaluated. The proposed amplification stage with a novel gain control method have a high gain, low noise and high linearity performance. It is consisted of common emitter amplifier as the first stage, cascode gain control amplifier as second stage and power detector which sense the received signal strength. The proposed amplification stage shows a total gain of 29 dB~37 dB, noise figure of 1.5 dB at operating band and high linearity performance as the IMD (third intermodulation distortion) level is below the noise level of the measurement equipment at the control voltage 2.0 V generated from power detector under the strong electric field condition.

키워드

EW, COMINT, wideband, amplification stage, gain control
전자전, 통신정보, 광대역, 증폭단, 이득제어

1. 서론

상대국이 사용하는 주파수 스펙트럼을 결정하고 역이용하여 무력화시키는 동시에 우군 전력을 보호하는 수단으로 전자기 스펙트럼을 사용하는 제반 군사활동을 전자전, 즉 EW(Electronic Warfare)로 정의하고 특히 감청을 목적으로 통신의 내용을 분석하여 수집하는 통신정보를 코민트(COMINT : Communication

Intelligence)라 한다[1]. 통신정보 수집을 위해서는 HF 대역에서 마이크로웨이브 대역에서 동작하는 광대역 수신기에 관한 연구가 요구되고 있다.

수신기의 초단에 위치하는 저잡음 증폭기는 수신기 성능에 영향을 미치는 주요한 블록으로 안테나로 입력되는 미약한 신호를 원하는 만큼 증폭할 수 있어야 하며, 자체적으로 발생하는 잡음을 최소화하고, 또한 강전계 신호에 의한 왜곡이 발생하지 않도록 알아야

* 삼성탈레스 전자전센터(minho0423.go@samsung.com)

접수일자 : 2012. 01. 18

심사(수정)일자 : 2012. 03. 19

게재확정일자 : 2012. 04. 07

한다.

본 논문에서는 광대역 (400 MHz~2000 MHz)에서 저잡음, 고이득 및 선형성 특성을 만족하는 전력감지 회로를 이용한 이득제어 증폭단을 제안하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 제안한 증폭단 구성과 버짓설계에 대해 논하였고, 3장과 4장에서는 증폭단 설계 및 측정 결과에 대해서 설명하였고 마지막으로 연구 결과를 정리하였다.

II. 증폭단 구성 및 버짓설계

수신기의 첫 단계에 위치한 증폭단은 약전계 신호는 잡음 없이 증폭시킬 수 있어야 하며, 강전계 신호는 낮은 소모 전력으로 왜곡 없이 증폭시킬 수 있도록 설계되어야 한다. 즉 초단 증폭단은 저잡음, 고이득, 고선형성 및 낮은 전력 소모 특성을 가져야 한다[2].

본 논문에서는 그림 1처럼 광대역에서 저잡음과 고이득 특성을 구현하기 위해 공통 에미터 구조의 초단 증폭기와 이득제어가 가능한 캐스코드 구조의 가변이득 증폭기를 종속 연결하여 2단 증폭단으로 구성하였다. 초단 증폭기는 광대역에서 낮은 잡음지수와 적절한 이득 특성을 갖도록 하였고, 가변이득 증폭기는 인가되는 제어 전압에 따라서 이득이 가변되도록 하여 강전계 신호 조건에서 선형적인 동작이 가능하도록 하였다. 전력 감지회로는 혼합기 출력 신호의 크기를 검출하여 가변이득 증폭기의 이득을 제어하기 위한 제어전압을 발생시켜준다.

기준에 사용되는 이득제어 방법으로는 출력 크기를 감지하여 신호크기에 따른 전압으로 변환 후 마이크로프로세서 내부에 있는 비교기를 이용하여 이득을 제어하는 방식으로 전류 소모량이 많은 검출기를 사용해야 하며, 이득제어 응답시간이 길다는 단점이 있다. 다른 방법으로는 이득제어 응답시간을 줄이기 위해 검출기에서 출력되는 전압값을 비교기를 사용하여 이득을 제어하는 방식이다. 하지만 연산증폭기를 사용해서 비교기를 구성하기 때문에 회로의 크기가 커지고 전류 소모량이 증가하는 단점을 갖는다.

본 논문에서는 기준전압이 없이 입력되는 신호의 크기에 따라서 제어전압을 발생시키는 전력 감지회로를 적용하여 전류 소모량이 작으며, 기준전압이 필요

없기 때문에 회로 구성이 간단하다.

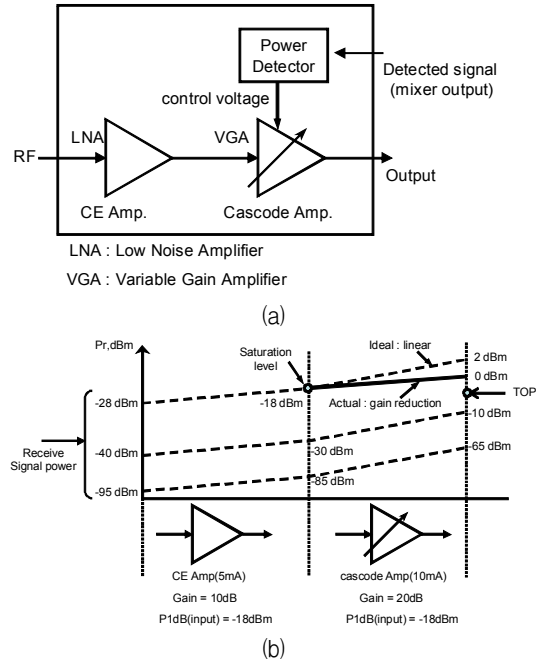


그림 1. 제안 증폭단 구성 (a) 블록도, (b) 버짓설계
Fig. 1 Proposed amplification stage (a) block diagram, (b) budget design

III. 증폭단 설계

3.1 공통 에미터 증폭기 설계

수신기의 전체 잡음지수는 초단 증폭기의 잡음지수와 이득에 의해서 결정된다. 일반적으로 최소 잡음지수와 최대 이득을 동시에 만족시킬 수 없기 때문에 적절한 절충이 필요하다[3].

본 논문에서는 낮은 잡음지수와 적절한 이득 특성을 낼 수 있도록 5mA의 컬렉터 전류를 선택하였고 능동소자의 전류-전압 곡선에서부터 $V_{CE} = 2.0V$, $I_{BB} = 16\mu A$ 로 동작점을 선택했으며, 온도 변화에 안정적인 전압분배 바이어스 회로를 사용하였다. 광대역에서 원하는 특성을 구현하기 위해 부궤환 회로[2]를 적용하여 설계 대역에서 이득은 13 dB 이상, 잡음지수는 1.1 dB 이하의 특성을 나타내었고, 병렬 궤환 회로에 의해서 이득 및 잡음 특성은 저하되지만 전체 설계 대역에서 평탄한 이득 및 잡음지수 특성을 구현

할 수 있다. 입출력 반사 손실 특성은 병렬 케환 회로의 케환 소자를 최적화하여 전체 대역 내에서 입력 반사손실 S_{11} 은 -20 dB 이하, 출력 반사손실 S_{22} 는 -10 dB 이하의 특성을 갖도록 하였고, 0 dBm 이상의 IIP3 특성을 갖도록 하였다. 그림 2는 공통 에미터 증폭기의 회로도도를 나타내었다.

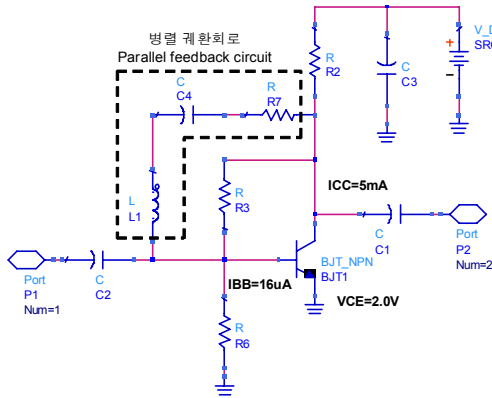


그림 2. 공통 에미터 증폭기 회로도
Fig. 2 Common emitter amplifier circuit diagram

3.2 가변이득 증폭기 설계

가변이득 증폭기는 캐스코드 구조로 구현하였으며, 입력 신호 레벨이 증가함에 따라서 증폭기 이득이 감소하도록 하여 강전계 조건에서 수신기의 선형성 특성을 만족하도록 하였다. 그림 3은 설계한 가변이득 증폭기의 회로도도를 나타내었다. 제어전압이 인가됨에 따라 입력 트랜지스터 Q_1 의 동작 영역을 포화영역에서 선형 영역으로 변화시켜 증폭기 이득을 조절하였다[4]. 두 트랜지스터 Q_1 와 Q_2 는 모두 포화영역에서 동작하도록 하였고, 초단 이후에 증속 연결되기 때문에 잡음지수 특성보다는 이득 및 선형성 특성을 주요 설계 목표로 결정하였다. 제어전압에 의해서 트랜지스터 Q_1 의 동작점이 바뀌게 되므로 입력과 출력 정합 특성에 변화가 발생한다. 입력 정합회로는 초단 증폭기의 출력 임피던스와 동일한 임피던스 값을 갖도록 설계하였으며, 출력 정합회로는 일정한 출력 정합특성을 갖도록 공통 콜렉터 구조의 버퍼 증폭기를 사용하였다[5]. 설계된 가변이득 증폭기의 이득은 17 dB~ 20 dB이고, 제어전압에 따라 최대 이득에서의 3차 상호

변조 왜곡 특성보다 -50 dB 이상의 개선효과를 갖도록 하였다.

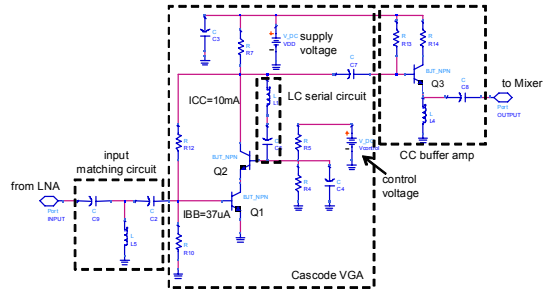


그림 3. 가변이득 증폭기 회로도
Fig. 3 Gain control amplifier circuit diagram

3.3 전력감지기 설계

전력 감지회로의 입력은 혼합기 출력단의 대역통과필터 출력단과 연결되며, 전력 감지회로의 출력은 가변이득 증폭기의 전원단과 연결한다. 입력 신호가 증가하면 대역통과필터 출력에서의 신호 크기도 증가하기 때문에 임의의 임계값 이상으로 신호의 크기가 증가되는 경우 전력 감지회로의 출력 전압이 감소하기 때문에 가변이득 증폭기의 이득을 감소시키게 된다[6]. 그림 4는 설계된 전력 감지회로의 구성도를 나타내었다. 임계값인 -10 dBm 이상의 신호가 입력되는 경우 출력 제어전압이 감소하도록 하였고, 특성 곡선은 0.16 V/dB 특성을 갖도록 설계하였다.

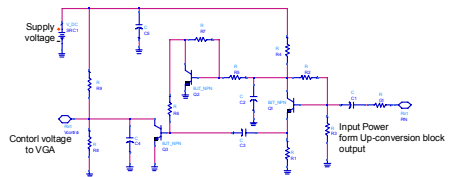


그림 4. 전력감지기 회로도
Fig. 4 Power detector circuit diagram

V. 제작 및 성능 평가

본 논문에서 제안하는 광대역 저잡음 증폭단의 성능을 검증하기 위해 비유전율 4.6, 기판 두께 1.0 mm 에폭시 기판을 사용하여 그림 5와 같이 저잡음 증폭

단을 제작하였다. 공통 에미터 구조의 초단 증폭기와 캐스코드 구조의 가변이득 증폭기를 독립적으로 측정하기 위해 초단 증폭기의 출력에 측정 단자를 삽입하였다.

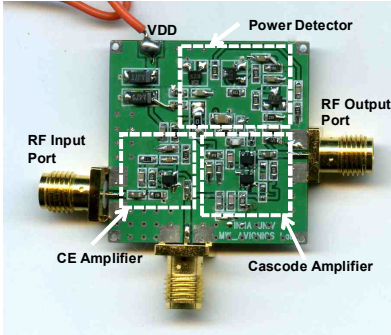
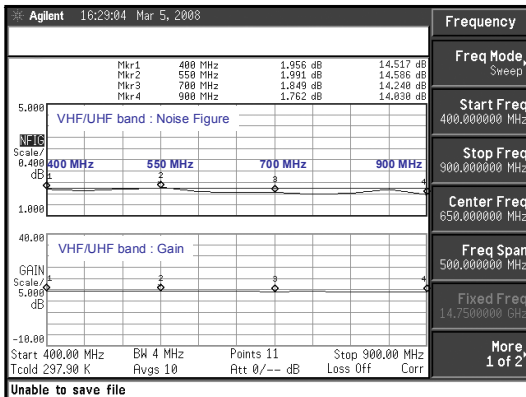


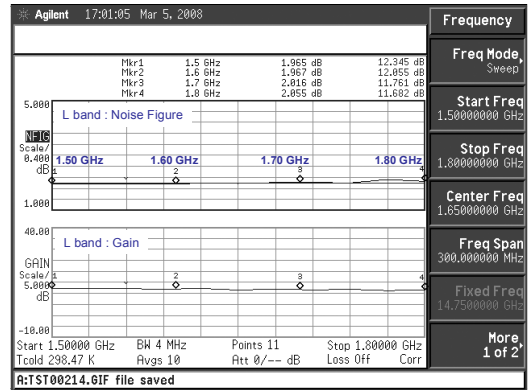
그림 5. 제작한 증폭단의 실물도

Fig. 5 Photograph of the fabricated two-stage amplifier stage

그림 6은 초단 증폭기의 이득 및 잡음지수 특성을 나타내었다. 그림 6(a)는 VHF/UHF 대역에서 잡음지수 결과를 나타낸 것으로 커넥터 및 측정 케이블에 의한 손실값 0.5 dB를 고려하면, 1.5 dB 이하의 잡음지수 특성과 14 dB 이득 특성을 갖는다. L 대역 또한 그림 6(b)처럼 1.5 dB 이하의 잡음지수 특성과 12 dB 이득 특성으로 설계값과 동일한 결과를 나타내고 있다.



(a)



(b)

그림 6. 초단 증폭기의 잡음지수 및 이득 특성

(a) VHF/UHF 대역, (b) L 대역

Fig. 6 The NF & Gain characteristic of the first-stage amplifier

(a) VHF/UHF band, (b) L band

그림 7은 초단 증폭기의 동작 주파수에 따른 IIP3 특성을 나타낸 것으로 설계 대역에서 최소 0 dBm, 최대 3.0 dBm의 특성을 나타내고 있다. 두 채널간의 간격은 8 MHz로 하였고, 입력 신호의 크기는 1dB 압축점보다 낮은 -30 dBm으로 설정하여 측정하였다.

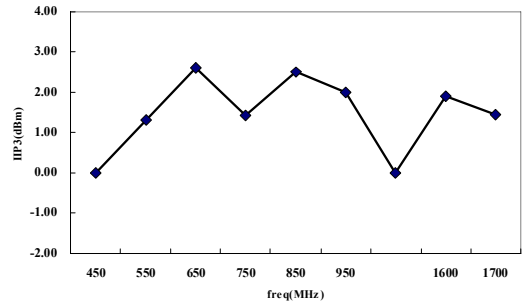
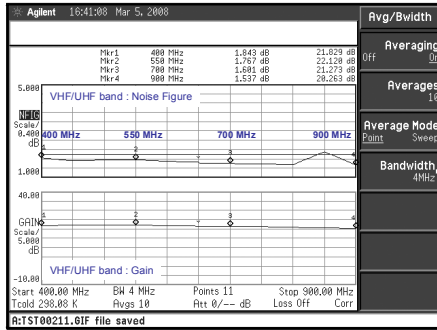


그림 7. 초단 증폭기의 IIP3 특성

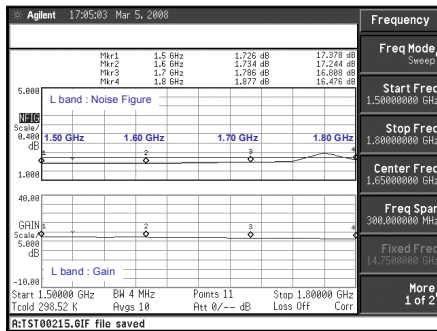
Fig. 7 The IIP3 characteristic of the first-stage amplifier

가변이득 증폭기의 최대 이득 조건에서 이득 및 잡음지수 특성을 실험하였다. 최소 이득 조건은 강전계 신호가 입력되는 경우 동작하기 때문에 잡음지수 특성이 수신기 성능에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 그림 8(a) 처럼 VHF/UHF 대역에서 잡음지수는 1.8 dB 특성을 나타내고 있지만, 입력 및 출력 단자에 사용된 커넥터 및 측정 케이블 손실 0.5 dB를 고려하면,

설계 결과와 유사한 1.5 dB 이하의 잡음지수 특성과 21 dB 이득 특성을 갖는다. L 대역에서는 그림 8(b)처럼 1.5 dB 이하의 잡음지수 특성 및 17 dB 이득 특성을 나타내고 있다.



(a)



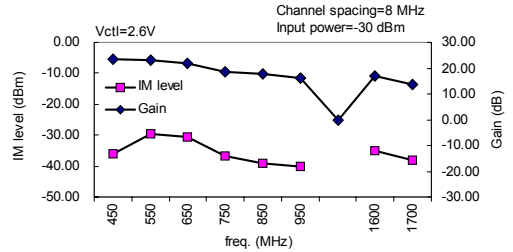
(b)

그림 8. 가변이득 증폭기의 잡음지수 및 이득 특성
(a) VHF/UHF 대역, (b) L 대역
Fig. 8 The NF&gain characteristic of the variable gain amplifier
(a) VHF/UHF band, (b) L band

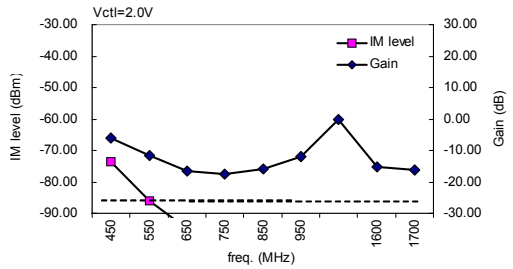
1 dB 압축점보다 낮은 -30 dBm 크기를 갖는 8 MHz 채널 간격의 2-톤 신호를 인가한 후 제어전압에 따른 3차 상호변조 특성을 실험하여 가변이득 증폭기의 선형성 특성을 확인하였다. 그림 9에서 보듯이 제어전압의 감소에 따라 이득이 감소되어 2.2V 이하에서 가변이득 증폭기는 감쇄기처럼 동작하기 때문에 3차 상호변조 왜곡 성분의 크기가 측정 장비인 스펙트럼 분석기의 고유 잡음레벨 보다 작아진다. 즉, 강전계 신호 조건에서 제어전압을 감소시켜주면, 포화에 의한 왜곡 특성을 개선시킬 수 있다.

가변이득 증폭기의 제어전압은 부교조파 혼합기의

출력 크기를 감지하여신호 크기에 반비례하는 직류 전압을 발생하는 전력 감지회로에 의해서 인가된다.



(a)



(b)

그림 9. 제어전압에 따른 이득 및 3차 IMD 특성
(a) 2.6V인 경우, (b) 2.0V인 경우
Fig. 9 The gain and third-order IMD characteristic by control voltage in variable gain amplifier
(a) Vct=2.6V, (b) Vct=2.0V

표 1은 제작한 2단 증폭단의 공통 에미터 구조의 초단 증폭기 및 캐스코드 구조의 가변이득 증폭기의 측정 결과를 정리하였다.

표 1. 증폭단 측정 결과

Table 1. Measurement result of the amplifier stage

	규격	VHF/UHF	L 대역
		측정값	측정값
초단 증폭기	Gain(dB)	13~15	12
	NF(dB)	1.5	1.4
	IIP3(dBm)	> 0.0	> 0.0
가변이득 증폭기	Gain(dB)	20~22	17
	NF(dB)	1.5	1.5
	IIP3(dBm) @ min.gain	-	-
	Gain Range @ΔV=0.4V	35	32

VI. 결론

본 논문에서는 광대역 (400 MHz~2000 MHz) 2단 증폭단을 제안하였다. 제안한 증폭단은 공통 에미터 구조의 초단 증폭기, 캐스코드 구조의 가변이득 증폭기 및 전력감지회로로 구성하였다.

초단 증폭기 및 가변이득 증폭기는 설계 대역에서 14 dB~21dB 이득 특성을 나타내었고 잡음지수는 1.5 dB 특성을 나타내고 있지만, 온도, 소자 및 기판 에칭과 같은 변수를 고려한다면 추가적인 회로 수정이 필요하다고 판단된다.

강전계 입력 조건 -30 dBm에서 측정된 초단 증폭기의 IIP3 특성은 0.0 dBm 이상의 설계 사양을 만족하고 있으며, 가변이득 증폭기의 IIP3 특성은 제어전압 2.0V인 조건에서 3차 상호변조 왜곡 신호의 크기가 측정 장비인 스펙트럼 분석기의 잡음레벨 보다 낮아 측정하지 못하였다. 이는 가변이득 증폭기가 강전계 조건이상에서도 왜곡을 발생하지 않고 선형적인 동작을 하고 있음을 의미하다.

가변이득 증폭기의 이득 변화량은 제어전압 0.4V 변화에 대해 VHF/UHF 대역에서는 35 dB 이상, L 대역에서 32 dB 이상의 특성을 갖는다. VHF/UHF 대역보다 L 대역에서 3 dB 낮은 이득 변화량을 나타내고 있으며 이는 높은 동작 주파수에서는 능동소자 및 수동 소자의 기생 성분에 의한 영향으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 김진영, 김은철, 이종명, "군 통신에서의 재밍 (Jamming) 기술", 한국통신학회지, 26권, 3호, pp.32-40, 2009.
- [2] 고민호, 표승철, 박효달, "광대역 RF 전단부 구조에 관한 연구", 한국전자통신학회논문지, 4권, 3호, pp.183-189, 2009.
- [3] Tr. T. HA, Solid-State Microwave Amplifier Design, John Wiley & Sons Inc., 1981.
- [4] 고민호, 신현식, 박효달, "디지털지상파 및 다중 표준 수신을 위한 RF 모듈설계", 한국전자통신학회논문지, 1권, 1호, pp.8-19, 2006.
- [5] F. Iturbide-Sanchez et al., "Comparison of different high-linear LNA structure for PCS applications using SiGe HBT and Low bias voltage," Electronics letters, Vol. 38, No. 12,

June 2002.

- [6] 고민호, 박효달, "이득제어회로 및 이를 이용한 증폭기," 출원번호 10-2007-0090329, 2007.

저자 소개

고민호(Min-Ho Go)



2003년 08월 LG이노텍 선임연구원

2009년 02월 인하대학교 전자공학과 (공학박사)

2010년 2월 인하대학교 차세대항공 전자통신인력양성사업단 연구원

2010년 7월~현재 삼성탈레스 전자전센터 전문연구원

※ 관심분야 : 통신 시스템, RFIC/MMIC, 레이더 설계