

RF 통신을 이용한 무선 Lock-in Amplifier 제작

Design of Wireless Lock-in Amplifier using RF Transmission System

박 현 수*, 이 향 범
(Hyun-Soo Park, Hyang-Beom Lee)

Abstract : System을 통해 출력되는 신호를 측정할 때 정확한 측정을 방해하는 요소로 잡음이 있다. 이런 신호 측정의 방해 요소인 잡음을 제거 하는 방법 중의 하나로 Lock-in Amp(LIA)가 사용되고 있다. 본 논문에서는 잡음 신호의 제거를 위해 사용 하는 LIA를 제작 하고 특성을 파악 하였으며 RF통신을 이용하여 무선 형태로 제작 하였다. 현재 상용화된 LIA는 프로브를 통한 유선으로 측정신호의 입력을 받게 되지만 본 논문에서 제작된 LIA는 무선신호 형태로 입력 하게 된다. RF통신의 캐리어 주파수는 447.9[MHz]로 Digital GMSK 변복조방식을 이용하였다. LIA의 제작은 Dual Phase Sensitive Detector를 사용하였으며, 주요 구성요소인 Phase Locked Loop, Phase Shifter, Phase Sensitive Detector, Low Pass Filter등의 구조와 특성을 조사하였다.

Keywords: RF, Wireless, GMSK, LIA, Phase Shifter

I. 서론

측정하고자 하는 신호에 잡음이 포함되는 경우 원하는 신호의 검출은 매우 어렵게 된다. 따라서 원하는 신호의 검출을 위해 잡음을 제거 하는 장치가 필요하게 되는데 이런 측정 장치 중의 하나로 Lock-in Amp(LIA)를 들 수 있다. 일반적으로 미세 AC전압신호를 검출하는데 쓰이는 System의 출력 신호 주기적인 경우, 외부의 교류 신호원을 측정물에 가해 얻어지는 응답 신호이다. 예를 들면 임피던스를 측정하기 위해서는 측정물에 전류를 흘리고 전압강하를 측정하여 임피던스로 환산하는데, 이때 역기전력이나 주변 잡음의 영향을 받게 된다. 이와 같은 경우에는 측정물에 신호원으로부터 교류전류를 흘리고 신호원과 동기화 한 교류 성분의 전압강하를 LIA로 측정함으로써, 잡음의 영향을 받지 않는 임피던스 측정이 가능하다. 이와 같이 응답이 잡음에 비해 작거나 다른 원인으로 인해 큰 잡음이 포함되어 있는 경우, 원신호원과 주파수가 동일한 기준 신호를 얻을 수 있으면 LIA를 측정에 사용할 수 있게 된다. 본 논문에서는 잡음을 제거 하여 원신호를 측정할 수 있는 모듈을 제작하고 사용의 편리와 휴대성의 위하여 RF모듈을 연동하여 무선 형태로 제작 하였다.

LIA는 헤테로다인 기술을 이용한 제품으로 측정신호와 참조신호를 Phase Sensitive Detector (PSD)에서 동기화된 신호를 통해 결과를 출력하게 된다. 현재 상용화된 LIA는 프로브를 통하여 측정신호를 입력 받게 되지만 본 논문에서 제작된 LIA는 측정신호를 무선으로 입력 받게 된다. 참조신호의 경우, 상용장비에서는 프로브를 통하여 입력 받는 방법과 내부 발진 회로를 이용하는 방법 모두 사용 가능 하나, 제작된 LIA는 RF통신으로 참조신호를 입력 받을 경우 캐리어 주파수에 의한 참조신호 자체에 잡음이 포함 될 수 있어서 내부 발진회로를 통하여 입력 받게 된다. RF통신의 주파수 대역폭은 447.9[MHz]로 Digital Gaussian Filter Minimum Shift Keying (GMSK) 변복조방식을 이용하였다. 또한 Frequency Shift Key-

ing (FSK) 모뎀의 경우 전송 속도가 1200[bps]를 많이 사용하고 있지만, GMSK모뎀의 경우 보다 점유대역을 좁게 설계할 수 있어서 전송속도를 9600[bps] 정도 까지 사용할 수 있다 [1].

LIA의 제작은 Dual Phase Sensitive Detector를 사용하였으며, 주요 구성요소인 Phase Shifter, PSD, Low Pass Filter(LPF)등의 구조와 특성을 파악하였다. 또한, 제작에서 PSD는 Linear Technology사의 Capacitor Building Block인 LTC1043을 사용하였다. LIA의 동작 주파수 값은 23[kHz] ~ 1[MHz] 을 기본으로 하였으며, LIA에서 출력된 결과값은 신호의 크기와 위상으로 나타나고 이를 LCD(Liquid Crystal Display)를 통해 시연할 수 있도록 제작 하였다

II. GMSK 송수신기 & 내부 발진회로

2.1. GMSK 송수신기

디지털 변복조 방식은 아날로그 변복조방식인 Amplitude Modulation (AM), Pulse Modulation (PM), Frequency Modulation (FM), 방식과 마찬가지로 크게 Amplitude Shift Keying (ASK), Phase Shift Keying (PSK), FSK 방식으로 나눌 수 있다[2]. 이동통신용으로 사용할 디지털 변조방식에서는 변조시 정진폭 특성을 갖고, 대역폭 제한을 효과적으로 행할 수 있는 협대역 FSK 방식의 일종인 GMSK 및 Tamed Frequency Modulation (TFM) 방식이 사용되고 있다. 변조 지수가 0.5인 이진 디지털 FM방식의 Minimum Shift keying (MSK)는 정진폭 특성 및 비교적 좁은 대역폭을 갖는다[3]. 그러나 MSK는 변조된 신호의 위상은 연속적으로 변하지만 비트 천이 시간에서 주파수는 불연속적인 값을 갖는다. 이와 같은 주파수의 불연속성은 변조기의 전력 스펙트럼을 확산 시키므로 비트 천이시간에 발생하는 주파수의 불연속성을 감소시키기 위한 Pre-modulation Low Pass Filter MSK가 연구 되었다. 이와 같이 가우시안 저역 필터 (Gaussian Low Pass Filter)를 사용하여 위상이 연속적이고 비트 천이시간에도 주파수가 연속적으로 변하도록 한 것이 Gaussian Filter Minimum Shift Keying (GMSK)이다[4]. 가우시안 저역 필터를 사용함으로써 변조기의 전력 스펙트럼은 가우시안 필터의 대역폭에 대응한 협대역화를 이

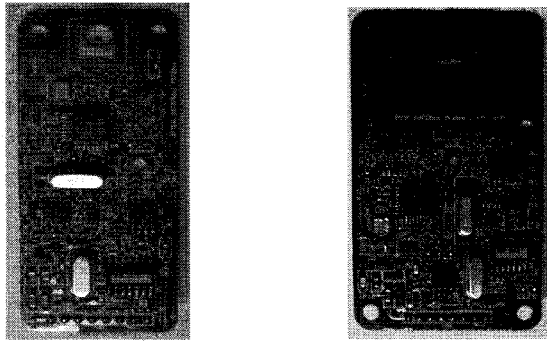
* 책임저자(Corresponding Author)

박현수, 이향범 숭실대학교 전기공학과

(zssampak@ssu.ac.kr hyang@ssu.ac.kr)

를 수 있다. 본 논문에서 사용한 GMSK 모뎀은 EM Tech 사의 'GMSK UHF 송수신기(447.9MHz)'를 사용하였다.

그림 1은 본 논문에서 사용한 GMSK Modem 모듈이다.



a. WGM-447XS9

b. WGM-44XA9

그림 1. GMSK UHF 송수신기.

Fig. 1. The GMSK UHF Transceiver.

GMSK UHF 송수신기의 주요 특징은 Scrambler & Descrambler 기능, GMSK Modem 기능, Digital Data Slicer 기능을 내장하고 있다.

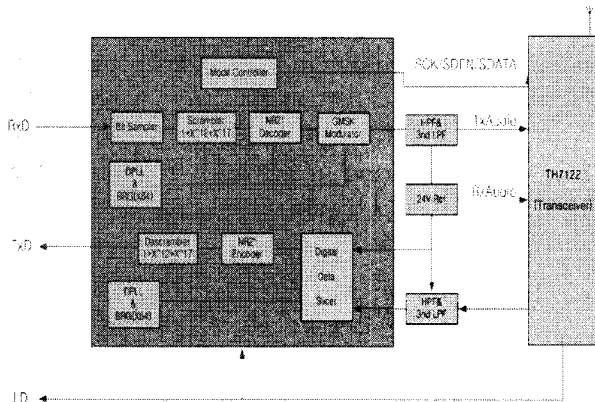


그림 2. 송수신기의 블록도

Fig. 2. The Block Diagram of Transceiver

2.2. 내부 발진회로

상용 LIA의 경우 참조신호를 외부에서 프로브를 통해 입력 할 뿐 아니라 내부 발진회로를 통해 입력이 가능하다. 하지만 본 논문에서 제작 하는 LIA의 경우 RF 무선 통신을 이용하기 때문에 참조신호를 무선으로 입력 받을 경우 캐리어 주파수에 의한 참조신호 자체에 잡음이 생길 수 있다. 따라서 본 논문에서는 LIA내부 발진회로를 통한 참조신호의 입력 방법을 선택하였다.

발진기는 대부분의 경우 빈브리지 발진기를 사용하지만 주파수 안전도가 높은 수정 진동자를 사용한 수정 발진기를 사용하는 경우도 있다. 본 논문에서는 넓은 범위의 주파수가변이 용이하고 비교적 왜곡레벨이 낮은 빈 브리지 발진기를 선정하였다

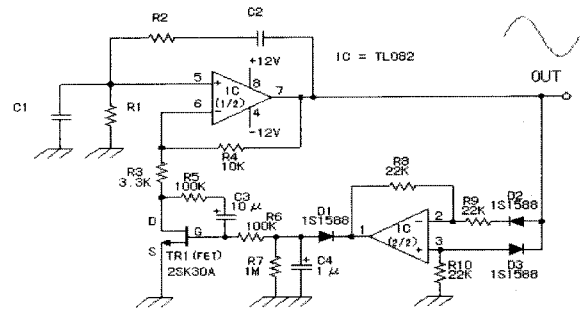


그림 3. FET를 사용한 AGC형 빈-브리지 발진 회로

Fig. 3. Type AGC Wien bridge oscillators using FET

그림 3은 발진회로의 부궤환 루프에 R3와 FET의 Drain-Source 사이의 저항을 사용한 AGC(Automatic Gain Control) 방식의 빈 브리지 발진 회로를 나타낸 것이다. 발진 출력 V_{out} 을 전과 정류 회로에서 음의 직류전압이 가해짐으로써, 연산 증폭기의 증폭도를 제어할 수 있다. 즉 발진기의 출력전압이 증가하면 FET의 음의 Gate 전압도 증가하므로 FET의 D-S 사이 저항값도 커지게 된다. 따라서 증폭기의 이득이 감소되어 발진기 출력전압의 증대를 제한한다. R5 와 C3 에 의해 FET의 주파수 특성이 약간 개선되며 이와 같은 동작은 발진기의 동작을 안정하게 하고, 왜곡이 없는 양질의 사인파를 만들기 때문에 AGC형 빈 브리지 발진 회로라고 한다. 빈 브릿지 회로에서 주파수를 결정하는 브릿지 회로의 저항과 커패시터의 값은 발진주파수 구하는 공식으로 구할 수 있다. 주파수는 저항 R1와 R2, 커패시터 C1, C2로 구한다.

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

식 1로부터 $C=C1=C2=680[pF]$ 와 $R=R1=R2=[10k\Omega]$ (가변저항) 이라는 수치를 얻었다. 그리고 가변저항을 조정함으로써 23[kHz] ~ 1[MHz]의 주파수 폭을 변화 시킬 수 있었다.

제작된 회로를 통한 오실로스코프로 측정된 결과는 그림 4와 같다.

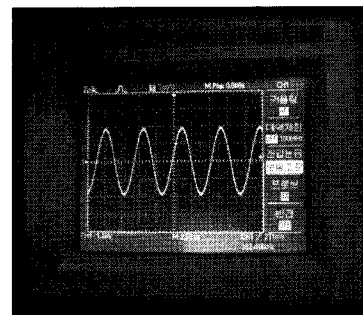


그림 4. 제작된 발진회로의 출력

Fig. 4. The oscillator's Output

그림 4에서는 실제 제작된 발진기에서 출력된 전압 파형이다. 결과치를 보면 파형이 깨끗하게 만들어졌음을 확인할 수 있다.

III. Lock-in Amplifier 의 원리

Lock-in Amplifier(LIA)란 잡음의 제거를 위해 특정 주파수 성분을 검출하여 출력으로 나타내는 장치이다. LIA의 블록도는 그림 5와 같다.

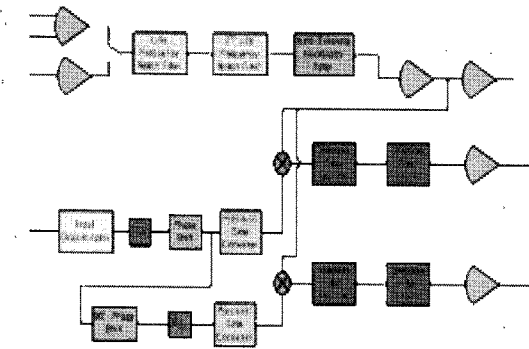


그림 5. LIA의 블록도
Fig. 5. Block Diagram of LIA

일반적인 DC출력신호는 수치해석을 위해 디지털신호의 형태를 검출하는 장비 또는 디지털신호를 소통할 수 있는 컴퓨터 연결프로그램을 필요로 하게 된다. 특히 정류기의 경우 LIA에서의 PSD(Phase Sensitive Detector)는 AC-DC 변환기로 기기의 가장 중요한 부분이다. LIA의 사용을 위해서는 잡음 신호가 포함된 원신호에서 사용자가 원하는 신호의 주파수를 알아야 한다. 참조신호는 측정신호로 연결된 발진기에서 신호를 입력 받으면 안 된다. 그 이유는 측정신호로 연결된 발진기에서 참조신호를 입력 받으면 주파수가 완전히 동일하기 때문에 입력신호와 참조신호 사이에 위상차가 발생하지 않기 때문이다[5]. 또한 입력 되는 참조신호 크기는 LIA마다 허용 전압과 전류의 크기가 정해져 있는데, 본 논문에서 제작된 LIA의 최대 참조신호 크기는 0.3[V]이며 이는 PSD 소자로 사용된 LTC1043의 특성에 의해 결정된 수치이다. 결국 입력하는 참조신호는 측정신호와 주파수가 같은 신호가 되어야 하며 LIA의 Phase Sensitive Detector에 의해 측정신호와 동기화 된다.

3.1. 측정신호 채널

측정신호 채널에서는 잡음이 섞인 측정신호가 PSD로 입력되기 전에 필터링 작업이 이루어진다. 필터의 종류는 Band Pass Filter, Notch Filter, Low Pass Filter, High Pass Filter 가있다. 이 필터들의 목적은 잡음을 지닌 신호가 PSD로 입력되어 참조신호와 동기화 되기 이전에 측정신호의 참조신호와 주파수가 같지 않은 성분들을 먼저 제거 하기 위함이다. 측정신호 채널에서 이러한 필터들을 통해서 일차적으로 감소된 잡음이 포함된 신호는 PSD로 입력되어 참조신호와 동기화 된다.

3.2. Phase Shifter

LIA의 구성 요소 중 Phase Shift는 참조신호의 위상을 이동시켜 주는 회로이다. 만약 측정신호와 참조신호의 위상이 90° 가 차이가 난다면 LIA의 출력신호는 0이 된다. 이것을 식으로 표현하면 식 2 ~ 5와 같이 나타낼 수 있다.

PSD Out Put

$$= A \cos \theta_{sig} \times B \cos \theta_{ref} \tag{2}$$

$$= \frac{1}{2} AB \{ \cos(\theta_{sig} + \theta_{ref}) + \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) \}$$

$$\Gamma \left[\frac{1}{2} AB \{ \cos(\theta_{sig} + \theta_{ref}) + \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) \} \right] \tag{3}$$

$$a_0 = \frac{AB}{2T} \int_0^T \{ \cos(\theta_{sig} + \theta_{ref}) + \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) \} d\theta$$

$$if) \theta_{sig} \approx \theta_{ref}$$

$$\cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) \approx 1$$

$$\therefore a_0 = \frac{AB}{2T} \int_0^T \{ \cos(\theta_{sig} + \theta_{ref}) + 1 \} d\theta = \frac{AB}{2} \tag{4}$$

$$if) \theta_{sig} \approx \theta_{ref} + 90^\circ$$

$$\cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) \approx 1$$

$$\therefore a_0 = \frac{AB}{2T} \int_0^T \{ \cos(\theta_{sig} + \theta_{ref}) + 0 \} d\theta = 0 \tag{5}$$

LIA의 출력 신호는 특정 주파수 성분의 교류성분을 DC성분의 크기와 위상으로만 나타낸다. 식 5에서 볼 수 있듯이 측정신호와 참조신호의 위상차가 90° 가 되는 경우 LIA의 출력 크기는 0이 된다. 하지만 LIA의 출력은 측정신호와 참조신호가 90° 위상차가 날 경우에도 크기가 출력되어야 하므로 위상 조정이 필요하고 이를 위해서 Phase Shifter가 필요하다. 측정신호와 참조신호의 위상 차이 만큼 LIA의 위상 출력으로 나타나게 된다.

3.3. Phase Sensitive Detector

PSD는 LIA의 중심기능을 담당하는 부분으로 이것은 복조기 또는 Mixer라 칭하며 PSD의 동작은 측정신호와 참조신호 두 가지의 신호를 곱하는 것이다.

그림 6과 그림 7은 측정신호와 참조신호의 위상차에 따른 PSD출력을 나타낸 것이다. PSD의 출력은 측정신호와 참조신호간 위상 차이가 0°, 180° 의 경우 최대가 되며 90°, 270° 의 위상 차이가 날 경우 최소가 된다.

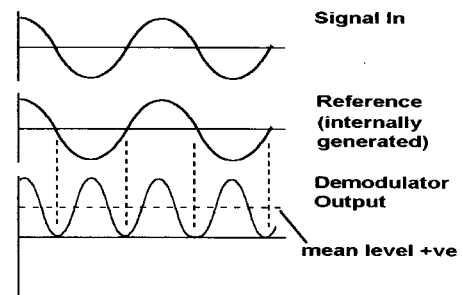


그림 6. 측정신호와 참조신호의 위상이 일치 할 경우의 입력

Fig. 6. The input when 0 degrees difference has phase of Desired Signal and the Reference Signal

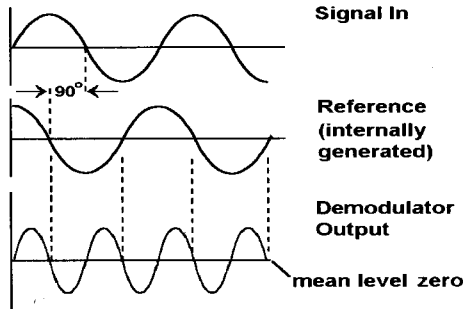


그림 7. 측정신호와 참조신호의 위상이 90° 차이 일 경우의 입력

Fig. 7. The input when 90 degrees difference has phase of Desired Signal and the Reference Signal

그림 6은 측정신호와 참조신호의 위상이 동일 할 경우 PSD를 통해 나오는 결과를 그래프로 나타낸 것이다[5]. 동위상의 측정신호와 참조신호를 PSD에 입력하여 나타난 결과 신호는 그림 6과 같이 주파수는 2배로 증가하며 주파수 크기의 평균값의 크기만큼 DC레벨을 출력한다. 이 신호를 LPF에 입력할 경우 LPF의 출력은 일정한 크기의 DC레벨 만이 남게 되고 이 결과값이 LIA의 출력의 크기가 된다. 그림 7은 그림 6과 비슷한 결과로서 측정신호와 참조신호의 위상차가 90° 차이 나는 입력을 주었을 때의 PSD의 작용이다[5]. 이 경우에도 PSD 출력 신호가 참조신호 주파수의 두 배가 됨을 알 수 있으나 PSD 출력신호가 정현파의 성격을 띠게 되며 이런 경우에는 평균값이 0이므로 LIA의 출력 값이 0[V]로 의미 없는 동작이 된다. 따라서 위상이 90° 차이 나는 경우에는 참조신호의 위상을 변화시켜 측정신호의 위상과 같게 만들어 주어야 한다. 즉, 스위치 소자를 통해 DC값을 출력하기 위해서는 측정신호와 참조신호의 위상이 같아야 한다.

IV. Lock-in Amplifier 의 제작

그림 8는 LIA의 순서도 이다. 측정신호와 참조신호는 각각 다른 포트를 통해 입력되어 PSD를 통과한 후 LPF를 통해 DC성분의 크기를 출력한다.

4.1. Phase Shifter

본 논문에서 제작된 LIA는 Dual PSD의 형태이다. Dual PSD의 장점은 Phase Shifter의 제작이 간편해 진다. 그 이유는 Dual PSD의 Phase Shifter의 경우 고정 90°의 위상 변화만 발생 시키면 되기 때문이다. 위의 3.2절에서 설명했던 것은 Single PSD의 경우로 Phase Shifter는 참조신호의 위상을 이동시켜 측정신호와 참조신호의 90° 위상차가 되고, 크기가 0이 되는 경우를 방지 하였지만 Dual PSD의 경우는 위상을 이동시키지 않아도 PSD의 출력이 0이 되지 않는다[6]. Dual PSD의 출력을 크기와 위상을 수식적으로 나타내면 식 6 및 식 7로 표현할 수 있다.

$$Magnitude = \sqrt{D_2^2 + D_1^2} \quad (6)$$

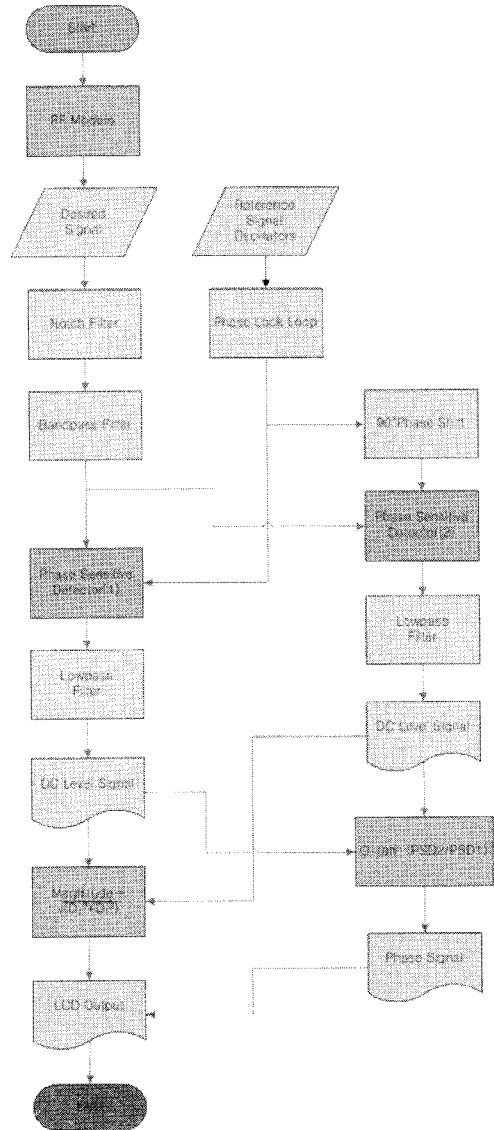


그림 8. LIA의 순서도

Fig. 8. The Flowchart of LIA

$$Phase = \tan^{-1} \left(\frac{D_2}{D_1} \right) \times \frac{180}{\pi} [deg] \quad (7)$$

$$\begin{cases} D_1 = \text{Out put of PSD 1} \\ D_2 = \text{Out put of PSD 2} \end{cases}$$

그림 8의 LIA Flow Chart와 식 6 과 식 7에서 나타나듯이 측정신호와 참조신호의 위상차가 90° 가 되는 경우 PSD₁의 출력은 0이 되지만 PSD₂의 출력은 참조신호의 위상을 90° 변화시킨 신호가 PSD₂로 입력되기 때문에 PSD₂의 출력의 크기는 최대가 된다. 결국 LIA의 크기 출력은 D₂가 되고 위상은 $\tan^{-1} \frac{D_2}{0} = \tan^{-1}(\infty)$ 가 되어 측정신호와 참조신호의 위상차 90°를 출력하게 된다. 출력되는 값은 Micro Controller Unit(MCU)를 통해 계산된 후 LCD 창을 통해 보여진다.

그림 9는 R과 C로 구성된 아날로그 적분기이다[7]. 참조신호는 사인파 이고 비반전 단자로 입력이 입력된 참조신호는 적분기 통과 후 사인파에서 90° 위상이 바뀐 코사인파로 출력된다.

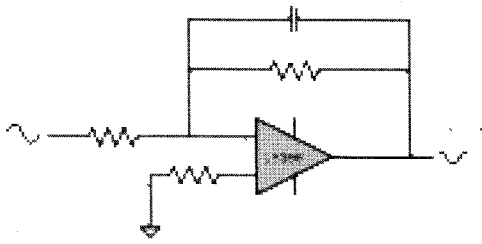


그림 9. 90° Phase Shifter
Fig. 9. 90° Phase Shifter

4.2. Phase Sensitive Detector

LIA에 사용되는 주파수 변환은 곱셈으로 한다. 하지만 일반 아날로그 곱셈 회로는 직선성이나 온도 안정도에 문제가 있기 때문에 실제 LIA에서는 스위칭 소자를 이용하여 주파수 동기화를 실시한다. 본 논문에서 사용된 스위칭 소자는 Liner Technology 사의 LTC1043을 사용하였다. LTC1043은 Instrumentation Switched Capacitor Building Block 소자로 5[MHz]의 클럭 까지 동작한다.

4.3. 전치증폭기

전치증폭기란 신호원의 레벨이 낮아서 그대로 주 증폭기의 입력으로 할 수가 없을 때 그 출력을 적당한 수준까지 올리기 위한 증폭기이다. 전치증폭기는 안테나와 수신기구 또는 마이크로폰과 증폭기를 접속하는 경우 신호 대 잡음비를

저하시키지 않고 적당한 입출력 임피던스를 제공하면서 신호 처리가 쉬울 정도까지 신호 레벨을 높이는 작용을 한다. LIA의 구성 요소 중 전치증폭기를 LT1007로 구성하여 보았다. 그림 10은 LIA의 전치증폭기 회로도를 보여준다.

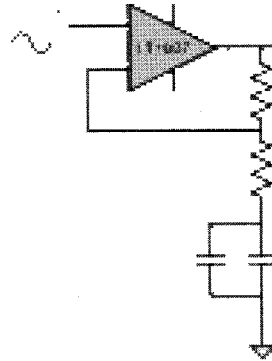


그림 10. 전치증폭기 회로도
Fig. 10. The Schematic of Pre-Amplifier

4.4. Schematic of LIA

그림 11은 완성된 LIA의 회로이다. RF모뎀과 연결되는 D/A Converter는 LIA 앞쪽의 Transformer로 연결되며 Transformer의 공진 작용을 통하여 Voltage Comparator로 신호가 전달된다. 회로도의 출력부분에 LTC1050과 LTC1062로 구성된 부분은 DC Accurate 10th Order Max Lowpass Filter이다. LIA의 출력은 PSD의 출력에서 정현 주파수와 고주파 성분을 제외한 DC로 출력 되기 때문에 좋은 성능을 갖는 LPF가 필요하다.

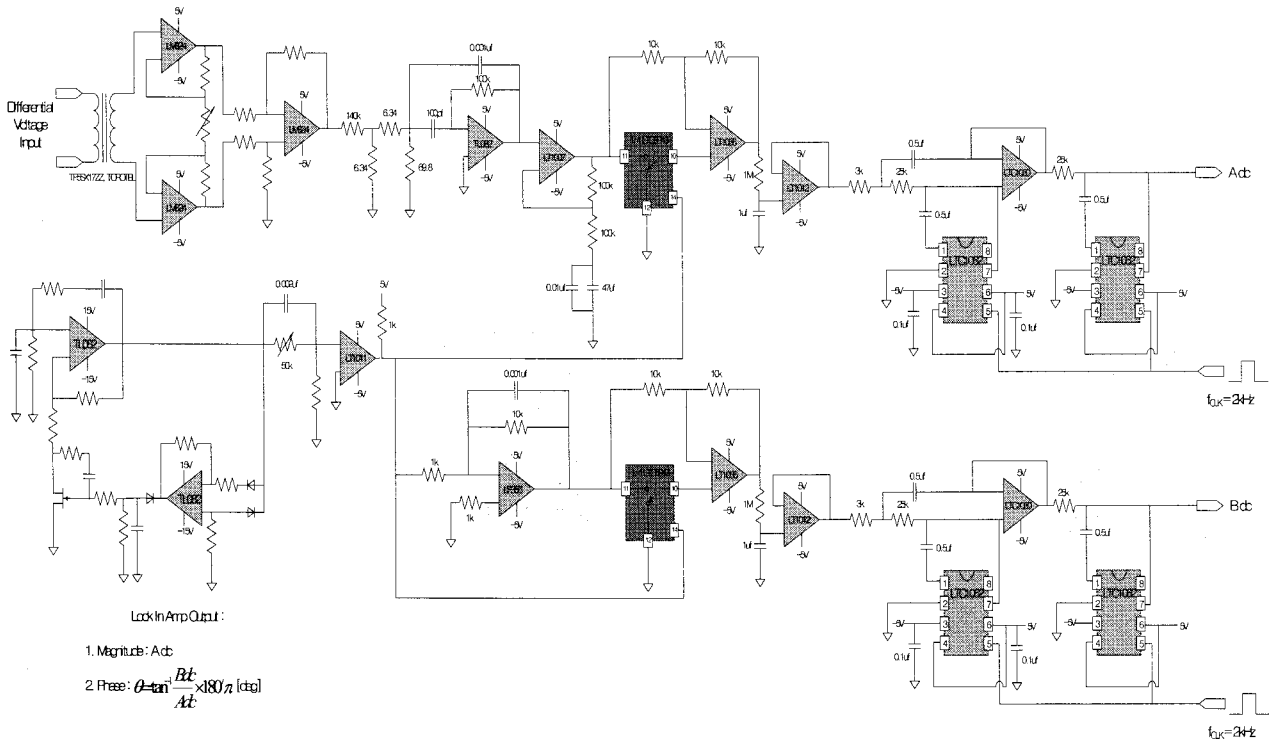


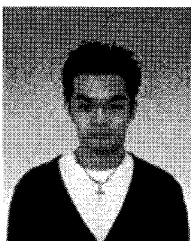
그림 11. LIA 회로도
Fig. 11. The Schematic of LIA

V. 결론

본 논문에서 측정하고자 하는 신호에 많은 잡음이 포함된 System에서 신호의 검출에 사용되는 Lock-in Amp(LIA)에 대하여 설계 및 특성을 직접 제작을 통해서 고찰하였다. 제작을 통해 알게 된 LIA의 특성은 출력이 잡음에 비해 작거나 다른 원인으로 인해 큰 잡음이 포함되어 있는 경우, 얻고자 하는 출력신호의 주파수만 알고 있다면 잡음이 제거된 신호의 크기와 위상을 출력을 통해 알 수 있었다. 제작에 있어서 실제 넓은 범위의 주파수 대역에서 사용되는 LIA를 제작하고자 하였으나 여러 주파수에 동작하는 PLL의 가변 Capacitor의 특성 문제와 참조신호 발전기에서 주파수가 높아질수록 신호의 크기가 작아지는 Trade off 현상이 발생하였다. 그에 따라 PSD에 입력되는 참조신호의 크기가 변화하면서 LIA의 출력의 신뢰도가 떨어지는 문제가 발생하였다. 또한 RF Modem과의 연결 시 D/A & A/D Convertor의 캐리어주파수에 의한 입력 신호의 불안정으로 유선 연결 시 보다 오차율이 높아졌다. 제작된 LIA를 상용 제품과의 결과 비교 시 전압 크기의 경우 4.01[mV]로 상용 장비와의 오차율이 14.5[%] 정도 차이가 나며 위상 값의 경우 71.3° 로 오차율은 7.3[%] 정도를 보였다.

참고문헌

- [1] EM Tech, "GMSK UHF transceiver (447.9MHz) Operation Guide Version 1.0, 2008.
- [2] 임명섭, 박정훈, 박한규, "Discriminator 복조방식을 이용한 GMSK디지털 무선 모뎀의 구현,"韓國通信學會論文誌 '89-2 vol. 14 No. 1.
- [3] S. Pasupathy, "Minimum Shift Keying: A spectrally efficient modulation", IEEE Commun. Soc. Magazine, vol. 19. Ppp.12-22, July, 1979.;
- [4] F. de Jager and C.B Dekker, "Tamed frequency Modulation : A novel method to achieve spectrum economy in digital transmission", IEEE Trans. Commun., vol. Com-26, pp.534-542, May, 1978.
- [5] PerkinElmer Inst., "Model 7280 DSP Lock-in Amp Manual"
- [6] PerkinElmer Inst., "What is a Lock-in Amplifier?", Technical Note, TN 1000
- [7] Texas Instruments, "Op Amps For Everyone", Advanced Analog Products, Ron Mancini, Editor in Chief, 2002



박 현 수
 2003년~현재 숭실대학교 전기공학부 재학
 관심분야: 비파괴검사, 전자장 수치 해석



이 향 범
 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업
 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)
 1995년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사)
 1995년 기초전력공학공동연구소 선임 연구원
 1998년~현재 숭실대학교 전기공학부교수
 관심분야: 전기기기, 비파괴검사, 전자장 수치해석 및 설계, 전자기 센서 설계 및 개발