

Noise Characteristics of Readout Electronics for 64-Channel DROS Magnetocardiography System

J. M. Kim^{*,a}, K. D. Kim^a, Y. H. Lee^a, K. K. Yu^a, K. W. Kim^a, H. C. Kwon^a, Ichiro Sasada^b

^a Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

^b Department of Applied Science for Electronics and Materials, Kyushu University, Fukuoka, Japan

Received 19 August 2005

64채널 DROS 심자도 시스템을 위한 검출 회로의 잡음 특성

김진목^{*,a}, 김기담^a, 이용호^a, 유권규^a, 김기웅^a, 권혁찬^a, Ichiro Sasada^b

Abstract

We have developed control electronics to operate flux-locked loop (FLL), and analog signal filters to process FLL outputs for 64-channel Double Relaxation Oscillation SQUID (DROS) magnetocardiography (MCG) system. Control electronics consisting of a preamplifier, an integrator, and a feedback, is compact and low-cost due to larger swing voltage and flux-to-voltage transfer coefficients of DROS than those of dc SQUIDs. Analog signal filter (ASF) serially chained with a high-pass filter having a cut-off frequency of 0.1 Hz, an amplifier having a gain of 100, a low-pass filter of 100 Hz, and a notch filter of 60 Hz makes FLL output suitable for MCG. The noise of a preamplifier in FLL control electronics is 7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz, 1.5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 100 Hz that contributes 6 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz, 1.3 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 100 Hz in readout electronics, and the noise of ASF electronics is 150 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ equivalent to 0.13 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ within the range of 1~100 Hz. When DROSs are connected to readout electronics inside a magnetically shielded room, the noise of 64-channel DROS system is 10 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz, 5 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 100 Hz on the average, low enough to measure human MCG.

Keywords : SQUID, DROS, Flux-locked loop, magnetocardiography, MCG

I. 서론

초전도양자간섭장치 (Superconducting Quantum

Interference Device, SQUID)는 미세한 자장을 측정하기 적합하며 생체자기, 특히 인체의 심자도와 뇌자도를 측정하여 심장에 관련한 질병을 진단하거나 뇌 질환과 기능을 분석하는 장치로 많이 활용하고 있다 [1]. 많은 채널을 동시에 필요로 하는 심자도나 뇌자도 시스템에서 SQUID

*Corresponding author. Fax : +82 42 868 5237

e-mail : jmkim@kriss.re.kr

구동 회로는 SQUID에 영향을 주지 않게 낮은 잡음을 갖고 시스템의 소비 전력을 적게 갖는 간단한 회로를 요구한다 [2,3]. 이중이완발진 SQUID (Double Relaxation Oscillation SQUID, DROS)는 자속에 대한 출력 전압이 크고 자속-전압 전달계수가 일반 dc SQUID에 비해 10배 정도 큰 값을 가지므로 이를 검출할 수 있는 회로를 간단히 할 수 있는 장점을 가진다 [4,5]. 저잡음 연산증폭기 LT1128로 만든 전단증폭기와 이를 포함하는 Flux-locked loop (FLL) 회로를 구성하여 구동회로를 만들고, 심자도 분석에 맞도록 필터를 제작하여 64 채널 DROS 출력 신호를 간단한 검출 회로로 처리할 수 있도록 하였다.

II. 검출회로

Flux-locked loop (FLL) 구동회로

외부 자속의 변화에 따라 자속양자($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb)마다 반복적으로 나타나는 SQUID 출력을 선형적으로 검출하기 위하여 FLL 회로를 구성한다. Fig. 1은 FLL 회로를 보이고 있으며 전단증폭기, 적분기, 피드백으로 구성된다.

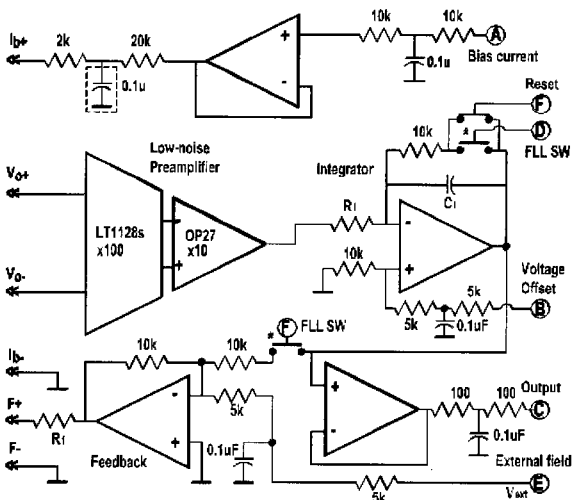


Fig. 1. Schematic circuit of flux-locked loop electronics consisted of a preamplifier, an integrator, and a feedback circuit.

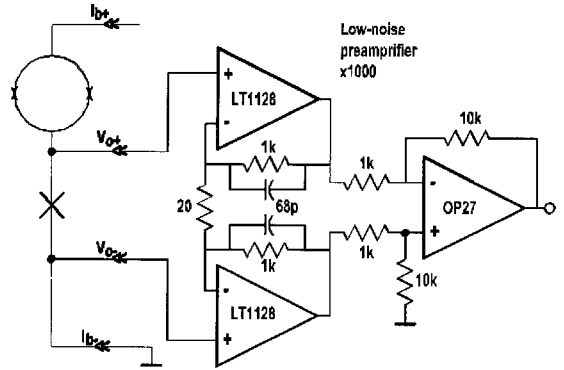


Fig. 2. Schematic circuit of a preamplifier having a gain of 1000, composed of 2 LT1128s and an OP27.

전단증폭기는 SQUID 출력신호를 증폭하며 Linear Technology사의 연산증폭기 LT1128 두개와 OP27 하나로 차동 계장 (instrumentation) 증폭기를 구성한다. 입력전압잡음 $1.1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ kHz}$, Gain-Bandwidth 13 MHz를 갖는 LT1128을 써서 신호를 각각 100배 증폭한 뒤 OP27로 만든 차동증폭기로 다시 10배 증폭하여 신호를 처리한다. 전단증폭기는 증폭율 1000, 입력전압잡음 $1.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ kHz}$, 대역폭 100 kHz를 갖는다. Fig. 2에서 전단증폭기가 DROS와 연결된 모습을 보인다 [6].

적분기는 외부 자속에 반응하는 SQUID 출력을 모아 되먹임 회로와 SQUID 되먹임 코일을 통해 자속으로 SQUID에 내보내는 역할을 한다. 적분기에 모인 전압은 외부 자속에 비례한 값을 가지며 SQUID에 자속을 전달할 때 외부 자속의 크기와 같지만 방향이 반대 방향으로 전달되어 SQUID에서 외부 자속과 완전히 상쇄한다. 그러므로 FLL 상태에서 외부 자속은 SQUID에서 항상 상쇄되어 없어지고 이에 비례한 값만이 적분기에 남아 있어 적분기 출력을 알면 외부 자속 크기를 알게 된다. 연산증폭기에 저항과 캐패시터를 써서 one pole 적분기를 구성한다. 적분상수 t_1 는 저항 R_1 과 캐패시터 C_1 로 결정되어 $t_1 = R_1 C_1$ 로 표시되고 Fig. 1 회로에서 $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 1 \text{ nF}$ 일 때 $t_1 = 10^{-5} \text{ s}$ 를 갖는다. 스위치 FLL SW로 적분기를 작동하며 캐패시터 C_1 와 저항 $10 \text{ k}\Omega$ 이 연결될 때

반전 증폭기로 작동하여 FLL을 구성하지 못하고 단순히 외부 자속 변화에 따라 반복하는 SQUID 출력을 볼 수 있다. 저항이 끊어지고 캐패시터만 연결될 때 적분기로 작동하며 출력은 되먹임 회로와 연결하여 FLL을 구성한다. 적분기의 오프셋 전압 조절기는 SQUID 출력이나 전단증폭기에서 발생한 오프셋 전압을 제거하기 위하여 사용한다.

되먹임 회로는 적분기 출력을 SQUID에 전달하는 역할을 하며 연산증폭기로 반전 가산기를 만들어 신호를 전달한다. 되먹임 회로의 출력은 되먹임 저항 R_f 를 거쳐 SQUID의 되먹임 코일로 연결되어 전류로 흐른다. 되먹임 저항 R_f , 적분기 출력값이 V_{FLL} 일 때 SQUID에 전달되는 되먹임 자속 Φ_f 는 $\Phi_f = M_f(V_{FLL}/R_f)$ 로 표시되며 여기에서 M_f 는 SQUID와 되먹임 코일간의 상호 인덕턴스 값이다. 회로에서 $R_f = 11 \text{ k}\Omega$ 이고 $M_f = 20 \text{ pH}$ 일 때 적분기 출력 전압 1 V는 약 $0.8\Phi_0$ 를 나타낸다. 되먹임 회로는 적분기 스위치가 작동하면 적분기 출력과 연결돼 SQUID에 자속을 전달하여 FLL을 구성하고, 적분기가 단순히 증폭기로 작동할 때 되먹임 회로와 적분기는 연결되지 않는다. 되먹임 회로의 또 다른 입력단에 외부 전압을 연결하면 전압은 전류로 변환하여 SQUID에 자속으로 전달된다. 외부 전압 V_{ext} 가 인가될 때 SQUID에 전달하는 자속 Φ_{ext} 는 $\Phi_{ext} = M_f(V_{ext}/R_f)$ 로 표시되고 1 V를 움직일 때 $0.8\Phi_0$ 가 SQUID에 전달된다. 자속 조절용 외부 전압 V_{ext} 는 최적 FLL

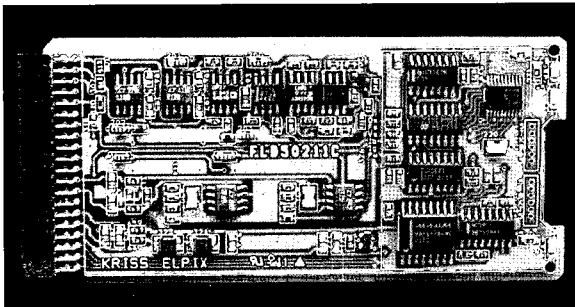


Fig. 3. Photo of flux-locked loop (FLL) electronics assembled with digital interface electronics on the PCB of 45 mm × 95 mm.

지점을 찾거나 SQUID의 상태를 점검할 때 사용된다.

Fig. 3에서 제작된 1채널용 FLL회로를 보이고 있다. 왼쪽 부분에 FLL 회로가 위치하고 오른쪽 부분은 FLL 회로에서 필요한 전압조절과 스위치를 조정하는 디지털 인터페이스 부분이다. 알루미늄으로 만들어진 FLL module box에 16개의 FLL 회로를 장착하여 외부의 전기적 잡음을 차폐하며 4개의 FLL module box로 64 채널 FLL 구동회로를 구성한다.

Analog Signal Filter (ASF)

FLL 출력을 생체자기신호 측정에 알맞게 처리하기 위해 필터회로를 구성한다. ASF는 고역통과필터, 신호증폭기, 저역통과필터, 60 Hz 제거 필터로 이루고 신호증폭기의 증폭율은 100 배를 갖는다. Fig. 4는 ASF 회로를 보이고 있으며 각 필터 회로에서 발생하는 오프셋 전압을 없애기 위해 전압 오프셋 조절기를 포함한다.

고역통과필터는 연산증폭기를 이용한 2차 능동 필터로 0.1 Hz의 cut-off 주파수를 가진다.

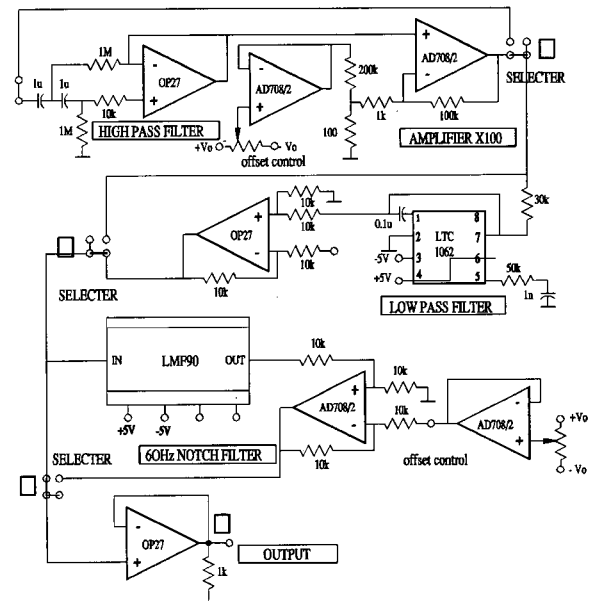


Fig. 4. Schematic circuit of analog signal filter (ASF) consisted of a high-pass filter, an amplifier, a low-pass filter, and 60 Hz notch filter.

고역통과필터를 지난 신호는 연산증폭기로 만든 비반전 증폭기를 써서 100배 증폭된다. 고역통과필터에서 발생하는 오프셋 전압은 증폭기에서 100배 증폭되어 크게 나타나므로 이를 없애기 위해 고역통과필터를 구성하는 연산증폭기의 오프셋 단자를 이용하여 외부에서 쉽게 오프셋 전압을 조절한다.

저역통과 필터는 5차 Butterworth 필터인 LTC1062 (Linear Technology)로 구성하며 100 Hz의 cut-off 주파수를 갖고 작동주파수 영역에서 잡음은 $100 \mu\text{V}_{\text{rms}}$ 를 갖는다 [7].

60 Hz 제거 필터는 4차 Elliptic notch 필터 LMF90 (National Semiconductors)으로 구성되고 3.579545 MHz 수정진동자로 중심 주파수 f_0 를 결정하며 중심주파수 $f_0 = 60 \text{ Hz}$ 에서 제거율 약 40 dB, 제거 대역폭 $0.127f_0$ 를 갖고 출력 잡음은 약 $300 \mu\text{V}_{\text{rms}}$ 이다 [8]. 4 채널의 ASF 회로는 하나의 PCB에 조립되며 16개 PCB로 64 채널 ASF를 구성한다.

III. 회로의 잡음 특성

64채널 구동회로와 ASF를 모두 연결한 뒤 발생하는 잡음을 측정하여 검출 회로가 심자도 측정에 적합한지 알아보았다.

구동회로 잡음은 SQUID 출력 전압을 검출하는 전단증폭기로 결정되므로 SQUID를 연결하지 않은 상태에서 적분기를 작동하지 않고 증폭기만으로 사용하여 전단증폭기의 잡음을 측정한다 [2]. FLL 회로의 전단증폭기 입력 전압 잡음을 신호분석기 HP35670A로 측정하고 이를 Fig. 5에서 보이고 있으며 1 Hz에서 $7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 100 Hz에서 $1.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 를 나타낸다. 이러한 잡음 크기는 자속-전압 전달계수가 $1 \text{ mV}/\Phi_0$ 정도인 DROS와 전단증폭기를 연결할 경우 약 $6 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ Hz}$, $1.3 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 100 \text{ Hz}$ 의 자속 잡음을 갖는 것과 같다 [5].

자기차폐실안에서 FLL 회로에 DROS를 연결하고 잡음을 측정하여 Fig. 6에서 보이고 있다. DROS는 자속-전압 전달계수 $1 \text{ mV}/\Phi_0$ 인 1차

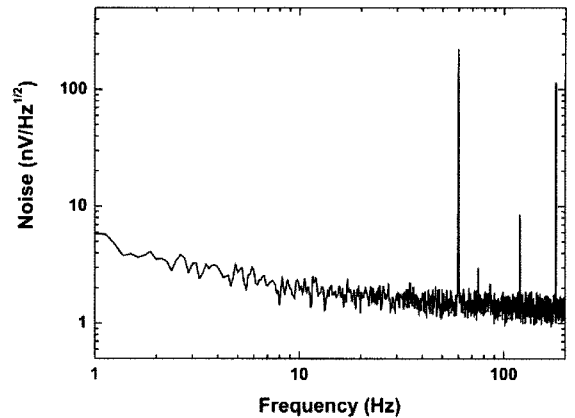


Fig. 5. Noise spectrum of a preamplifier in flux-locked loop electronics, averaged 16 times: $7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ Hz}$, $1.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} @ 100 \text{ Hz}$.

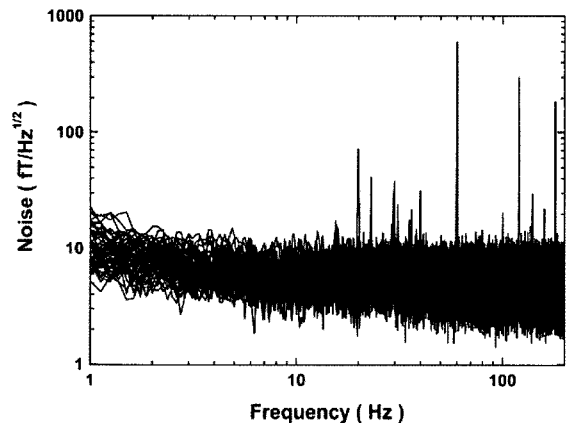


Fig. 6. Noise spectra of 64-channel FLL electronics connected to DROS gradiometers with a typical flux-to-voltage transfer coefficient of $1 \text{ mV}/\Phi_0$ inside a magnetically shielded room; $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ Hz}$, $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 100 \text{ Hz}$ on the average.

미분계를 연결하고 64 채널을 동시에 작동하여 FLL 출력을 측정한다. 64 채널 FLL 출력 잡음은 1 Hz에서 $6\sim 20 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 100 Hz에서 $3\sim 10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 를 갖고 평균적으로 $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ Hz}$, $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 100 \text{ Hz}$ 를 갖는다.

ASF의 잡음을 측정하기 위해 64 채널 ASF의 입력단을 모두 접지한 뒤 신호분석기 HP35670A로 잡음을 측정하였다. Fig. 7은 0.1 Hz 고역통과 필터, 100배 증폭기, 100 Hz 저역통과필터, 60 Hz 제거필터를 거친 64 채널 ASF의 잡음 스펙트

럼을 보이고 있다. 1 Hz에서 $50 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$, 60 Hz에서 $150 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 잡음을 나타나는데 자속으로 $0.04 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz, $0.13 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 60 Hz에 해당한다. 이러한 잡음 크기는 FLL 구동회로 잡음과 비교할 때 무시되는 크기이고 MCG 측정에 거의 영향을 미치지 않는다. 1 Hz 부근의 잡음 증가는 고역통과필터로 인해 발생하고 60 Hz 잡음은 노치 필터로 인해 증가한다.

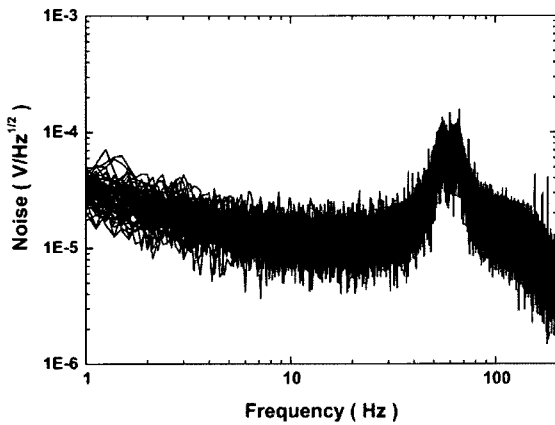


Fig. 7. Noise spectra of 64-channel ASF electronics when the inputs of ASF electronics are connected to a ground; lower than $150 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ or $0.13 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ within 1~100 Hz.

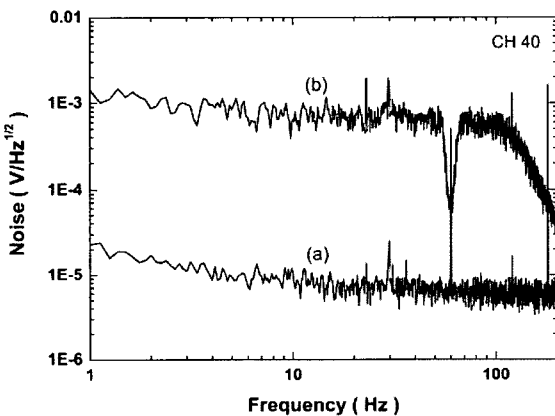


Fig. 8. Noise spectra of FLL and ASF outputs when DROS is connected to readout electronics, and operating inside a magnetically shielded room, (a) FLL output spectrum; $10 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ is equivalent to $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, (b) ASF output spectrum; $1 \text{ mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ is equivalent to $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$.

자기차폐실 안에서 64 채널 FLL 구동회로를 모두 DROS와 연결한 뒤 작동시키고 FLL 출력을 자기차폐실 밖에 있는 64 채널 ASF에 연결한다. 64 채널 중 한 채널의 FLL 출력과 ASF 출력을 신호분석기로 잡음을 측정하여 Fig. 8에서 보이고 있다. (a)는 FLL 출력으로 1 Hz에서 $20 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$, 100 Hz에서 $6 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 잡음을 갖고 60 Hz 잡음은 $500 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 를 가지며, 자속으로 표시하면 $17 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz, $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 100 Hz, $420 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 60 Hz로 나타난다. 필터를 거치고 100배 증폭한 ASF 출력(b)는 1 Hz에서 $1.3 \text{ mV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 100 Hz에서 $600 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 잡음을 갖고 60 Hz 잡음은 $50 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 가지며, 자속으로 표시하면 $11 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz, $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 100 Hz, $0.4 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 60 Hz로 나타난다.

IV. 결론

높은 자속-전압 전달계수를 갖는 DROS의 출력신호를 검출하고 FLL 작동을 위해 연산증폭기 LT1128을 써서 전단증폭기를 만들고 이를 써서 FLL 구동회로를 구성하였다. FLL 구동회로의 잡음을 결정하는 전단증폭기는 $7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz, $1.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 100 Hz의 잡음을 갖는데 자속 잡음으로 $6 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz, $1.3 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 100 Hz 을 나타낸다. 64 채널 DROS와 연결한 경우 평균적으로 자속 잡음 $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz, $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 100 Hz를 가져 MCG 측정용으로 쉽게 활용할 수 있다. MCG 측정을 위해 0.1 Hz 고역통과필터, 100배 증폭기, 100 Hz 저역통과필터, 60 Hz 제거필터로 구성된 64 채널 아날로그 신호 필터는 1~100 Hz 영역에서 $0.13 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 잡음을 갖고, DROS를 연결한 FLL 출력을 통과시킬 때 자속 잡음은 $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz, $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 100 Hz로 유지하며 0.1 Hz 이하 100 Hz 이상의 잡음 신호를 제거하고 60 Hz 잡음도 $1 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이하로 충분히 제거하여 쉽게 MCG 신호를 측정한다.

References

- [1] H. Nowak, "Biomagnetic Instrumentation," in *Magnetism in Medicine*, eds. W. Andra and H. Nowak, Berlin: Wiley-VCH, pp. 88-135, 1998.
- [2] D. Drung. "Advanced SQUID readout electronics," in *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Application*, eds. H. Weinstock, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, pp. 63-116, 1996.
- [3] R. P. Welty and J. M. Martinis, "Two-stage integrated SQUID amplifier with series array output," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 3, pp. 2605-2608, 1993.
- [4] D. J. Adelerhof, H. Nijstad, F. Flokstra, and H. Rogalla, "(Double) relaxation oscillation SQUIDS with high flux-to-voltage transfer: Simulations and experiments", *J. Appl. Phys.*, vol. 76, pp. 3875-3886, 1994.
- [5] Y. H. Lee, H. C. Kwon, J. M. Kim, Y. K. Park, and J. C. Park, "Double relaxation oscillation SQUID with high flux-to-voltage transfer and its application to a biomagnetic multichannel system", *J. Kor. Phys. Soc.*, vol. 32, pp. 600-605, 1998.
- [6] Linear Technology Datasheet, "LT1028/LT1128 Ultralow Noise Precision High Speed Op Amps", 1992.
- [7] Linear Technology Datasheet, "LTC1062 5th Order Lowpass Filter", 1994.
- [8] National Semiconductor Databook, "LMF90 4th-Order Elliptic Notch Filter", 1995.