

Measurement of weak magnetic signals using high- T_C SQUID magnetometers in magnetically disturbed environment

I. S. Kim, K. K. Yu, Y. K. Park

Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

High- T_C SQUID 자력계를 이용한 자기잡음 환경에서의 미세자기신호 측정 및 분석

김인선*, 유권규, 박용기

Abstract

The single layer direct-coupled YBCO SQUID magnetometers have been fabricated and characterized for the purpose of the measurement of weak magnetic signals in unshielded environment. Two types of magnetometers have been designed and fabricated using 10 mm \times 10 mm substrates. We could operate the conventional 3-mm-wide solid pickup loop magnetometers more stably than the 12-parallel-line pickup loop magnetometers in laboratory environment. We developed a first-order electronic gradiometer system using the SQUID sensors with axial displacement of 80 mm without any mechanical alignment of magnetometers. The system with a software filter using calculation of discrete Fourier transform could record clearly weak pulse signal of 100 pT in a magnetically disturbed environment.

Keywords : SQUID, High- T_C , YBa₂Cu₃O₇ thin film, Magnetocardiogram

I. 서론

초전도 양자간섭장치 (Superconducting Quantum Interference Devices : SQUID)는 인체의 심장에서 나오는 자기장이나, 물질의 결함부분에서 나타나는 와전류에 의한 국소 자기장 등, 여러 가지 미세한 자기 신호를 측정할 수 있는 자기 센서이다. 이는 인간이 개발한 센서 중에서 가장 감도가 우수한 소자로써 지구자기장보다 10 억분의 1 만큼 작은 신호를 감지할 수 있는 능력이 있다. 이러한 초전도양자간섭소자의 고감도특성을 이용하는 많은 응용 분야가 제안되고 있다. 그 중에서 심자도(Magnetocardiogram :

MCG)와 같은 생체자기 측정은 SQUID 의 가장 유망한 응용 분야 중의 하나이다. 이러한 심자도는 일반적인 심전도(Electrocardiogram : ECG)의 대안으로써 활용될 뿐만 아니라, 비접촉식 방법으로 cardio-imaging 분석이 가능하므로 보다 정밀한 진단이 가능한 장점이 있다[1]. 최근에는 고가의 자기차폐실(Magnetically shielded room : MSR)이 필요 없는 다중채널 심자도 측정장치가 상용화되어 임상진단에 활용할 단계에 이르렀다[2]. 고온 초전도 SQUID 는 장치유지를 위한 저비용, 쉬운 조작, 장비를 휴대할 수 있는 등의 좋은 장점을 가지고 있으나, 저온 초전도 SQUID 와 비교할 때 성능과 신뢰성에서 다소 뒤지는 단점이 있다. 최근의 고온 초전도 SQUID 개발을 위한 대부분의 연구는

*Corresponding author. e-mail : inskim@kriss.re.kr

높은 주변 자기장 환경에서 안정적인 동작을 위한 것으로 자력계의 설계·제작방법[3],[4], 단일층 2 차 미분계[5],[6]와 신호처리분야[7]-[9] 등에 집중되고 있다.

본 논문에서는 고온초전도 SQUID 자력계 제작과 일반 실험실에서 동작하는 전자식 1차 미분계의 개발에 대해 기술하고, 디지털 신호 처리 방법을 소개한다. 또한 외부 자기장 하에서 미세자기신호를 측정하고 그 결과에 대하여 토의하였다.

II. 실험방법

직접결합형 YBCO 고온초전도 SQUID 자력계를 접합각도가 30° 이고 크기가 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 인 STO(100) 복결정 (bicrystal) 기판을 사용하여 제작하였다. 접합각 30° 인 STO 복결정 기판은 최적 변수 $\beta = 2LI_C/\Phi_0 \approx 1$ 과 높은 변조전압을 가지는 우수한 고온 SQUID 제작을 위해 일반적으로 사용된다[10]. 접합각 30° 인 STO 복결정 기판의 높은 $I_C R_N$ 과 변조전압은 주변환경 자기장 하에서 SQUID의 Flux Locked Loop(FLL)동작에 유리한 전형적인 장점이 있다. 직접결합형 자력계를 washer inductance가 90 pH , 검출코일의 선폭이 3 mm , 외부 면적이 $8.8 \text{ mm} \times 8.8 \text{ mm}$ 가 되게 설계하였다. 조셉슨 접합의 선폭은 $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 이고 SQUID slit은 $4 \text{ }\mu\text{m}$ 로 하였다. 본 실험에서는 두 가지 형태의 자력계를 설계·제작하였다. 하나는 선폭 3 mm 인 solid type 검출 코일 형태이고, 다른 형태는 선폭 3 mm 검출 코일을 선폭 $50 \text{ }\mu\text{m}$ 를 가지는 12개의 선을 등 간격으로 분리하여 병렬로 배치한 형태이다. 이러한 기하학적인 구성에서 얇은 선들은 차폐 전류에 의해 발생된 자속 유입을 막기 위해 검출코일에서 자속 댐(flux dam) 역할도 하게 된다. 일반적으로 결정 경계 접합을 이용하는 SQUID의 상대적으로 큰 저주파 잡음은 주로 YBCO 결정 경계에서 구속된 와류 자속의 열적 거동에 의한 것으로 설명되고 있다. 초전도체로의 자속 유입은 초전도체 선폭을 줄임으로써 제거할 수 있다고 보고되고 있다[11],[12]. 자속 유입의 threshold field는 $B_T = (\pi\Phi_0)/(4w^2)$ 로 주어지며, 여기서 w 와 Φ_0 는 각각

최대 선폭과 자속 양자를 나타낸다. $1/f$ 잡음을 줄이기 위한 다른 방법으로 자속 댐이라 일컬어지는 방법이 사용된다[13]. 자속 댐은 검출 코일에서의 순환 전류를 제한하는데 이용되며, 이는 큰 순환 전류에서 기인한 $1/f$ 잡음을 방지한다.

소자는 STO기판에 Pulse Laser Deposition (PLD)법으로 YBCO 박막을 증착하고, 표준적인 포토리소크라피와 Ar 이온 식각을 통하여 제작하였다. 산소 분위기에서 열처리한 후 습기 흡착에 의한 초전도 박막의 특성 저하를 막기 위하여 실온에서 얇은 STO 박막을 증착하였다. 제작된 자력계는 Printed Circuit Board (PCB)상에 배치한 후 wire bonding을 하고 외경 20 mm 의 아크릴 뚜껑으로 밀봉하였다. 측정 probe의 리드선은 rf 고주파 차폐를 위해 얇은 구리판을 지나가게 하였다. 전자식 미분계는 두개의 SQUID를 이용하여 측정으로 baseline 간격을 30 mm 에서 80 mm 까지 변화시키며 배치하였다.

소자의 특성과 미세 자기 신호 측정을 위하여 FLL SQUID controller [14], [15]가 사용되었다. 고온 초전도 SQUID 특성과 미세 자기 신호 특성 측정은 자기 차폐실(MSR), 준 자기 차폐실(weak-MSR)과 자기차폐가 되지않는 일반적인 실험실에서 수행되었다. 준 자기 차폐실의 전력선 주파수에 대한 자기장 강도는 일반적인 실험실에 비해 약 1/3정도 였다.

III. 결과 및 논의

A. 소자의 특성

YBCO 박막의 두께가 140 nm , 조셉슨 접합의 선폭을 $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 가 되게 제작한 고온 SQUID는 정상저항 R_N 과 접합 임계전류 I_C 등 30° 복결정 접합 변수의 전형적인 값을 나타내었다. 이렇게 제작한 고온 초전도 SQUID 자력계의 자기 차폐실에서 측정된 white noise는 $30 \text{ fT/Hz}^{1/2} - 500 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 정도의 광범위한 값을 나타내었다. Table 1은 자기 차폐실에서 측정된 우수한 SQUID의 전형적인 특성을 나타낸 것이다. 직경 40 cm 의 Helmholtz coil을 이용하여 자력계의 자장감도(B/Φ_0)를 측정하였는데, parallel-

line type의 SQUID는 solid type의 검출코일을 가진 자력계보다 20 % 정도 높은 값을 보였다. 자장잡음 $B_N = \Phi_N/A_{eff}$ 로 표현되므로 parallel type 검출코일을 가진 SQUID의 경우 검출코일의 유효면적이 감소함으로 인해 자장잡음이 증가한 것으로 보인다. 여기서 Φ_N 은 자력계의 자속잡음을 나타낸다. Solid type SQUID 자력계의 경우 외부 dc 자기장을 순차적으로 22 μ T까지 변화시키며 10 Hz에서 측정된 저주파 자장잡음은

Table 1. SQUID 자력계의 전형적인 특성

SQUID type	I_C (μ A)	R_N (Ω)	ΔV (μ V)	B/Φ_0 (PT)	White noise ($fT/Hz^{1/2}$)
Solid loop			40	5100	35
Parallel-line loop	20	8	60	6200	70

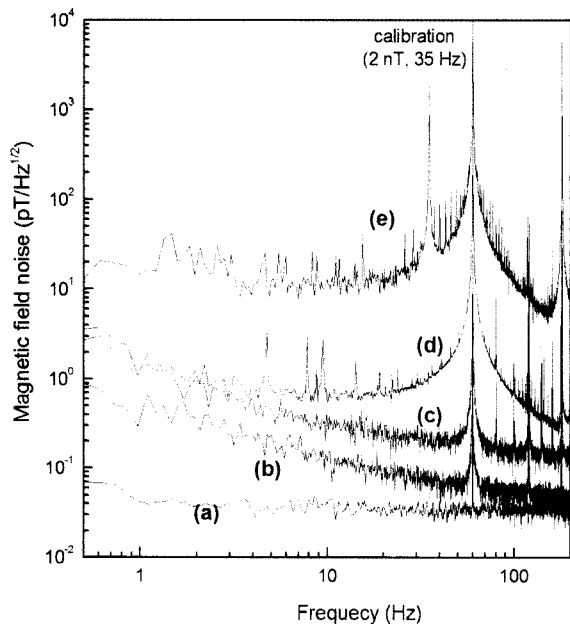


Fig. 1. Magnetic field noise spectra of the solid pickup loop magnetometer, (a) measured in MSR with ac bias, (b) measured in MSR, (c) electronic gradiometer signal measured in weak-MSR, measured in weak-MSR (d) and unshielded laboratory environment (e). The calibration peak was obtained by applying 35 Hz ac magnetic field by a Helmholtz-coil. FLL electronics was operated in dc bias mode otherwise denoted.

특별한 변화를 보이지 않았다. 그러나 parallel type 검출코일을 가진 SQUID 자력계는 큰 외부 순간 자장에 노출될 경우 매우 불안정한 FLL동작을 하였으며, 안정화되기 위한 시간도 많이 소요되었다. 이는 자속 댐을 통한 자속 유입은 열적 거동으로 이루어지며, 이러한 자속 유입이 완료되기 위해서는 매우 긴 시간이 소요되는 것으로 해석되고 있다.

본 연구에서의 parallel type은 설계 예상치보다 다소 나쁜 특성을 보였는데, 소자의 성능 향상을 위해서는 순환 전류의 효과적인 감소[16]와 최적화된 선 분배[3]를 통해 이루어질 수 있을 것이다. 이에 따른 설계 최적화를 현재 진행 중이다. 선폭 3 mm인 solid type의 검출코일을 가진 SQUID 자력계는 각기 다른 자기 환경에서 매우 안정적인 FLL동작 특성을 보였다. Fig. 1은 소자의 자장 잡음 분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 1 Hz에서의 자장 잡음은 자기 차폐실(MSR), 준 자기 차폐실(weak MSR)과 자기 차폐가 되지 않는 일반 실험실에서 각각 0.45 $pT/Hz^{1/2}$, 1.5 $pT/Hz^{1/2}$, 12 $pT/Hz^{1/2}$ 로 나타났다. 지자장에 대해 z-축으로 정렬된 SQUID 자력계를 이용하여 측정된 전력선 주파수 잡음은 준 자기 차폐실과 일반 실험실에서 약 0.7 nT와 11 nT로 나타났다.

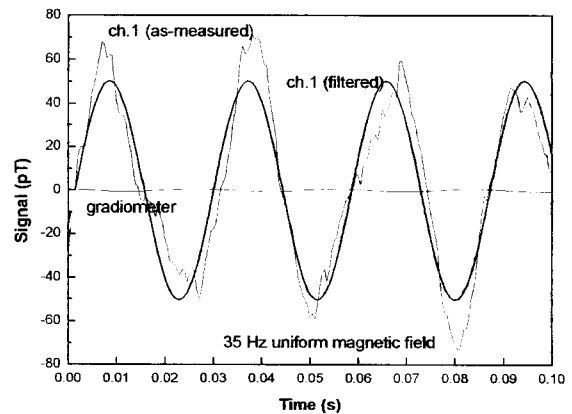


Fig. 2. Measured data of magnetic field of 100 pT_{p-p} at 35 Hz generated by a 35 cm Helmholtz coil in MSR. As-measured data show distorted waveform due to the residual magnetic noise in MSR, where as software-filtered data show very clear sinusoidal waveform. Gradiometer signal exhibit balance of ≥ 50 without mechanical alignment of SQUID sensor

B. Electronic Gradiometer 와 신호처리

Solid type의 검출코일을 가진 SQUID 자력계는 일반적인 실험실에서 장시간 동안 매우 안정적인 FLL 동작을 하였다. 이러한 직접결합형 자력계 두 개를 축상으로 30 mm - 80 mm 떨어지게 배치하여 baseline이 30 mm - 80 mm가 되는 전자식 1차 미분계를 제작하였다. 이런 구조에서 두 자력계의 평행도를 잘 조절하면 balancing factor를 약 20,000정도까지 향상시킬 수 있다[3]. 그러나 기계적 조율장치가 복잡해지며 tuning에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 다중채널 장치의 개발을 고려하여 기계적 조율장치를 사용하지 않았다. 자기 차폐실(MSR)에서 전자식 미분계를 이용하여 측정된 대표적인 결과를 그림 2에 나타내었다. 직경 40 cm의 Helmholtz coil을 이용하여 주파수 35 Hz, 자장 100 pT를 형성할 경우 SQUID 자력계의 응답특성은 자기 차폐실 내의 잔류 자기 잡음으로 인해 매우 왜곡된 파형을 나타냄을 알 수 있다. 소프트웨어 필터를 거친 데이터는 매우 깨끗한 정현파를 나타내었다. 전자식 미분계의 출력으로부터 구한 balancing factor는 50이상이었다. 자기 차폐가 되지않는 일반 실험실에서 balancing factor는 주로 인접한 전력원에 의해 발생하는 큰 gradient field 분포에 의해 3-10정도의 범위로 측정되었다. Fig. 1(c)는 미분계의 잡음 특성을 나타내었다. Fig. 1(d)에서 보인 단일채널 자력계의 신호와 비교할 때 잡음특성의 특별한 변화를 관찰할 수 없으나, 단일 채널 자력계에서 주파수 4.7 Hz, 8.8 Hz, 9.3 Hz에서 나타나는 잡음 peak가 전자식 미분계에서는 제거됨을 Fig. 1(c)에서 확인할 수 있다. 이러한 각각의 주파수에 따른 자기 잡음은 멀리 떨어진 냉방공조기의 모터 등에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 측정된 신호 데이터는 VEE PRO 및 내장된 수학 함수 기능을 이용하여 개발한 소프트웨어 필터를 거쳐 신호를 처리하고, 분석하였다. 저역통과 필터, 고역통과 필터, 대역제거 필터 등의 각 소프트웨어 필터는 Fourier transform 계산에 의해 수행하였다. 측정 데이터는 주파수 영역에 따른 크기값으로 계산하고, 불필요한 주파수에 대한 데이터는 제거한 후, 역 Fourier transform을 사용함으로써 파형 데이터로 복원하였다.

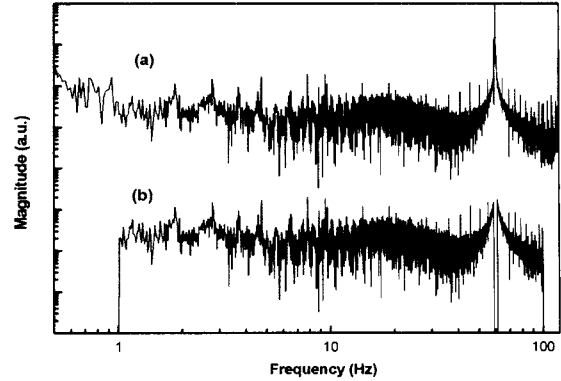


Fig. 3. Typical spectra obtained using SQUID magnetometer, (a) as-measured, (b) software-filtered with HPF at 1 Hz, LPF at 100 Hz, and 60 Hz band reject filter.

Fig. 3은 1 Hz이상의 주파수를 통과시키는 고역통과 필터와 100 Hz 이하만 통과시키는 저역통과 필터 그리고 대역폭 2 Hz인 60 Hz 대역제거 필터로 구성된 소프트웨어 필터의 전형적인 파형 스펙트럼을 보여준다. 이러한 결과는 중요한 정보의 손실 없이 필터의 매우 깨끗한 cutting edge를 보여주는 것이다.

C. 미세자기신호의 측정

자기 차폐실이 없는 일반환경에서 극미세 자기신호를 측정하여 보았다. 전자식 미분계의 배치는 두 SQUID 센서간의 거리, 즉 baseline을 30 mm에서 80 mm까지 변화시켰는데, 30-40 mm의 비교적 짧은 baseline에서는 비교적 가까운 거리의 자기잡음 발생원으로부터 발생하는 gradient field를 감쇄시키는 balancing factor가 약 10정도였다. 그러나 신호-대-잡음비(S/N)의 현저한 손실을 나타내었다. 80 mm의 긴 baseline으로 이루어진 미분계는 전원자기잡음으로부터 측정된 balancing factor는 약 3-5로 나빠졌으나 S/N는 10% 미만의 손실을 나타내었다.

본 연구에서 개발한 전자식 SQUID 미분계를 이용하여 아날로그 손목시계의 펄스모터를 신호발생원으로 미세자기신호를 측정하고, 그 특성을 평가하여 보았다. SQUID 자력계와 신호원 간의 거리를 약 30 cm로 하여 검출신호의 크기가 약 100 pT가 되도록 하여 실험실 환경에서 측정하였다. 실험에서는 3-축 Helmholtz coil을 이용하여 60 Hz 전원의 자기잡음이 약

1/3정도 줄어든 환경을 만들어 측정하였다. Fig. 4에서 그 결과를 나타내었다. 단일채널 SQUID 자력계로 측정한 전원 주파수 및 이것의 harmonics 그리고 냉방공조기에 의한 약 5 Hz 성분이 혼합되어 약 10 nT_{p-p}의 진폭으로 나타나고 있다. 앞에서 기술한 소프트웨어 필터를 사용하여 60 Hz notch 필터가 포함된 1 Hz - 100 Hz 의 대역통과 필터 처리하였는데, 그 결과를 Fig. 4에 실선으로 나타내었다. SQUID 자력계를

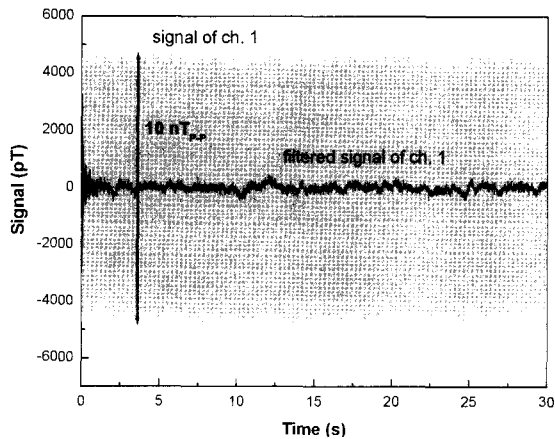


Fig. 4. Measured data of weak magnetic signal from a watch recorded by the first channel SQUID magnetometer of the electronic gradiometer in a weak-MSR. Gray scale is as measured signal with environmental peak amplitude of 10 nT. Black solid line is the result of software-filtered signal, in which clear beats of heart could be observed.

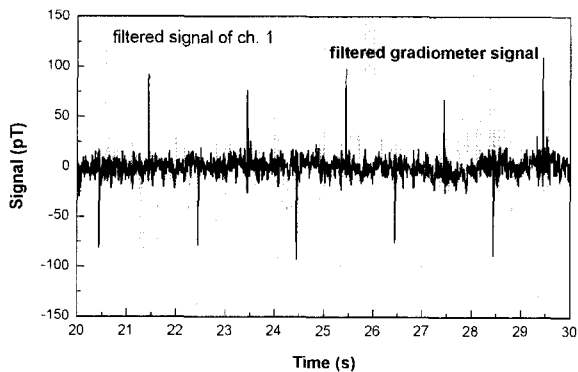


Fig. 5. Parts of real time pulse signal from a watch. Gray scal line : Signal recorded by the SQUID magnetometer. Black solid line : Signal of the electronic gradiometer. Measurement bandwidth was 99 Hz with 60 Hz notch filter.

이용한 신호처리 결과만으로는 100 pT 크기의 신호측정이 어려움을 알 수 있다. 그림 5에서는 두개의 SQUID 자력계를 이용한 전자식 1차 미분계로 검출한 출력신호 파형을 나타내었다. 이러한 신호처리 과정을 거친 데이터는 펄스폭이 매우 좁은 1 Hz 주기의 펄스모터 파형을 깨끗하게 검출할 수 있음을 나타내고 있다. 실시간 측정과정에서 나타난 SQUID 미분계 신호의 잡음은 약 20 pT이었다.

IV. 결론

개발된 외부 자기잡음 환경에서 심자도 신호와 같은 극미세 자기신호를 측정하기 위하여 결합각이 30°인 STO(100) 복결정 기판에 YBCO 단일층 직접결합형 SQUID 자력계를 제작하고, 그 특성을 알아보기 위해 두 가지 형태의 자력계를 설계·제작하였다. 자기 차폐가 되지않는 일반 실험실에서 전형적인 선폭 3 mm인 solid type의 검출코일을 가진 자력계가 12개의 얇은 선을 parallel type으로 검출코일을 형성한 자력계보다 더 안정적인 FLL동작을 하였다. 또한 두개의 SQUID 자력계를 축상 간격이 80 mm가 되게 전자식 미분계를 제작하였는데, 이것으로 측정한 신호를 디지털 신호처리를 하여 100 pT 크기의 미세 펄스자기 신호를 깨끗한 파형으로 검출할 수 있었다.

본 연구에서 개발한 전자식 고온초전도 SQUID 미분계에 있어서, 센서에 미치는 전원 주파수 자기잡음을 줄여줄 수 있는 자장 보정 기술의 성능을 조금 더 향상시킨다면 일반 실험실 환경에서도 실시간 심자도 파형의 측정이 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] V. Pizzella, S. D. Penna, C. D. Gratta, and G. L. Roman, "SQUID systems for biomagnetic imaging," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 14, pp. R79-R114, (2001).
- [2] <http://www.cardiomag.com>: <http://www.squid.de>: <http://cryoton.webzone.ru>
- [3] F. Ludwig, A. B. M. Jansman, D. Drung, M. O.

- Lindstroem, S. Bechstein, J. Beyrer, J. Flokstra, T. Schurig, "Optimization of direct-coupled high- T_C SQUID magnetometers for operation in magnetically unshielded environment," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11, pp. 1315-1318, (2001).
- [4] K. Enpuku, A. Nakahodo, M. Hotta, S. Hijiya, D. Tokimizu, D. Kuroda, "Properties of a flux dam inserted in the pickup coil of a high- T_C superconducting quantum interference device magnetometer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, pp. 4013-4018, (2001).
- [5] V. Schultze, R. Ijsselsteijn, A. Chwala, N. Oukhanski, V. Zakosarenko, and H-G Meyer, "HTS SQUID gradiometer for application without shielding," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 120-125, (2001).
- [6] K. Yokosawa, A. Tsukamoto, T. Miyashita, A. Kandori, D. Suzuki, K. Tsukada and K. Takagi, "A signal-to-noise chart for designing planar high- T_C SQUID gradiometers for magnetocardiographs," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 136-140, (2002).
- [7] A. Link, P. Endt, M. Oeff, L. Trahms, "Variability of the QRS signal in high-resolution electrocardiograms and magnetocardiograms," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 48, pp. 133-142, (2001).
- [8] P. J. M., R. H. Koch, "Magnetic background noise cancellation in real-world environments," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, pp. 1529-1533, (2000).
- [9] S. Kuriki, A. Hayashi, T. Washio, M. Fujita, "Active compensation in combination with weak passive shielding for magnetocardiographic measurements," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 73, pp. 440-445, (2002).
- [10] T. Minotani, S. Kawakami, T. Kiss, Y. Kuroki, and K. Enpuku, "High performance dc superconducting quantum interference device utilizing a bicrystal junction with a 30° misorientation angle," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 36, pp. L1092-1095, (1997).
- [11] E. Dantsker, S. Tanaka, P. A. Nilsson, R. Kleiner, J. Clarke, "Reduction of 1/f noise in high- T_C dc superconducting quantum interference devices cooled in an ambient magnetic field," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, pp. 4099-4101, (1996).
- [12] E. Dantsker, S. Tanaka, J. Clarke, "SQUIDs with slots and holes: Low 1/f noise in an ambient magnetic field," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, pp. 2037-2039, (1997).
- [13] R. H. Koch, J. Z. Sun, V. Foglietta, W. J. Gallagher, "Flux dam, a method to reduce extra low frequency noise when a superconducting magnetometer is exposed to a magnetic field," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 67, pp. 709-711, (1995).
- [14] I. S. Kim, J. M. Kim, H. R. Lim, Y. K. Park, "Development of a high- T_C gradiometer system," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11, pp. 1399-1362, (2001).
- [15] SQUID FLL controller STL model DSE32; <http://www.stl-gmbh.de>
- [16] K. Enpuku, D. Tokimizu, D. Kuroda, S. Hijiya, "Thermally-activated flux entry into a pickup coil through a flux dam in high T_C SQUID magnetometers," *IEICE Trans. Electron*, vol. E85-C, pp. 681-686, (2002).