SS-OCT용 고 주파수분해능 저비용 정현파 발생기

이주찬 · 엄진섭⁺

Low Cost Signal Generator with Frequency High-Resolution for SS-OCT

Juchan Lee and Jinseob Eom⁺

Abstract

In this paper, the low price signal generator with capability of frequency high-resolution and variable sync pulse has implemented. It fulfils well the requirements for SS-OCT of the frequency resolution less than 1Hz, frequency stability of $\leq \pm 0.5\text{Hz}/10\text{ min}$ and variable sync pulse output timing. Through its performance test applied to wavelength swept laser, 120 nm sweeping range and 10 mW average optical power were obtained. This shows that the realized sine-wave generator can replace the commercial high cost and high performance signal generators employed by current SS-OCT systems.

Keywords : SS-OCT, Signal generator, Wavelength swept laser

1. 서론

인간의 생명연장의 꿈을 실현 가능하게 하는 기술이 발전되어가고 있으며 이를 실현 가능하게 만드는 것 중의 하나가 영상의료진단 기술이다. 최근 영상의료진단기술은 날로 발전하여 각 분야에서 더욱 뛰어난 분해능을 가진 장비가 속속 개발되어가고 있다. 그 중 광 코히어런스 토모그래피(OCT : Optical Coherence Tomography)는 수 μm 이하의 분해능으로 생체조직의 표피단면 이미지를 얻는 기술이며 앞으로 안과, 피부과, 내과, 심장내과, 치과 등에서 진단에 필요한 영상을 획득하기 위하여 널리 사용될 예정이다[1-3].

파장 스위핑 레이저를 사용하는 OCT를 SS-OCT(Swept Source-OCT)라고 한다. 최근에는 고화질 및 고속 영상획득을 장점으로 가지는 SS-OCT 기술이 더 많은 각광을 받고 있다[4].

SS-OCT 시스템의 성능을 결정하는 가장 중요한 구성요소는 광원에 해당하는 파장 스위핑 레이저(wavelength swept laser)이다. 레이저의 고속 광대역 파장 스위핑 특성이 SS-OCT의 고화질 및 고속영상 성능을 좌우한다고 하여도 과언이 아니다[5-7]. 그런데

레이저의 이러한 고속 광대역 파장 스위핑 특성은 레이저의 구성부품인 광 필터의 동작 성능에 크게 의존하며 이는 다시 광 필터에 인가되는 정현파형의 주파수 분해능 및 안정도에 좌우된다고 할 수 있다. 일반적으로 SS-OCT 시스템에서 광 필터를 구동시키는 정현파 발생기는 주파수 분해능($\leq 1\text{ Hz}$) 및 안정도($\leq \pm 0.5\text{ Hz}/10\text{ min}$)가 좋아야 하며[8], 발진파형의 왜곡이 작아야 하고, 발진주파수의 온도계수가 낮아야 한다.

본 실험실에서는 고가의 고정밀 고성능 파형발생기(약 1000만원대)를 구입하여 위에서 언급된 정현파 요구사항을 만족시켜왔다. 그러나 앞으로는 매우 저렴하면서도 SS-OCT 시스템에 무리 없이 사용할 수 있는 최적 성능의 정현파 발생기를 설계·제작하여 기존의 고가 파형발생기를 대체하고자 한다.

본 논문에서는 저가형 정현파 발생기를 구현하여 광 필터에 55.029 kHz 및 1.3 V_{p-p}, +5 V DC offset을 가지는 정현파형을 장시간 안정적으로 공급하였다. 그리고 이로부터 55.029 kHz의 스위핑 속도 및 120 nm의 파장 스위핑 범위, 10 mW의 광 출력을 가지는 고속 광대역 파장 스위핑 레이저를 성공적으로 구현하였다.

또한 위의 정현파형으로부터 위치 가변 가능한 동기 펄스를 생성하여 SS-OCT의 보정용 기준신호 및 간섭신호를 획득하기 위한 동기신호로 사용하였다.

2. 시스템구성

2.1 파장 스위핑 레이저 구성 및 동작원리

강원대학교 IT대학 전자공학과 (Department of Electronics Engineering, The School of Information Technology, Kangwon National University)

⁺Corresponding author : jeom@kangwon.ac.kr

(Received : Dec. 3, 2012, Revised : Jan. 19, 2013, Accepted : Jan. 21, 2013)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

본 실험실에서 구현된 SS-OCT 시스템의 전체 구성도는 Fig. 1과 같다. 이를 기능별로 구분하면, 광섬유 링 공진기 구조를 가지는 FDML (Frequency Domain Mode Locked) 방식 파장 스위핑 레이저, 샘플로부터 간섭신호를 얻기 위한 간섭계 구조[9], 보정(recalibration)용 기준 신호를 얻기 위한 빗살무늬 광 필터(comb filter) 모듈[10], 그리고 간섭신호 데이터 수집 및 영상 표시를 위한 신호처리부로 구분된다. 앞에서 언급한 것처럼 Fig. 1의 상단 왼쪽에 보이는 FDML 방식 파장 스위핑 레이저는 SS-OCT 시스템의 성능을 결정하는 매우 중요한 부분이다. 이는 중심파장 1310 nm를 가지는 SOA (Semiconductor Optical Amplifier), 광 아이솔레이터, 1×2 광 커플러, 광섬유 지연선, 광 필터(FFP-TF, Fiber Fabry Perot-Tunable Filter), 편광조절기(PC : Polarization Controller), 광 아이솔레이터 등이 링 형태로 연결된 구조를 가진다. 그리고 위의 광 필터를 구동하기 위하여 정현파 발생기의 정현파가 광 필터에 인가된다.

Fig. 1. Schematic diagram of SS-OCT.

위의 레이저 구성에 사용된 광 필터는 페브리-페롯 간섭계 구조를 가진다. 간섭계의 한쪽에 부착된 압전소자 (PZT: Piezoelectric Transducer)에 정현파 전압을 인가하면 간섭계의 내부 공진간격이 정현파와 동일한 주기로 변화되어 광 필터 투과파장이 주기적으로 가변(sweeping)된다. 즉 정현파 한 주기당 장파장에서 단파장으로 그리고 다시 단파장에서 장파장으로(또는 이의 역으로) 2번의 스위핑이 얻어진다. PZT는 유도성 리액턴스(reactance) 성분으로 인하여 특정 공진주파수를 가지며, 이 공진주파수에서는 낮은 전압을 인가하여도 큰 변위를 얻을 수 있다.

본 논문에서 사용된 광 필터(FFP-TF)는 FSR (Free Spectral Range) 160 nm, Finesse 600, 삽입손실 2.5 dB, -20~ 50 V의 인가전압 범위를 가지며, 이의 공진주파수를 측정한 결과 55,029 kHz를 나타내었다. 따라서 정현파 발생기를 이용하여 광 필터에 정

현파를 인가할 때 주파수 55,029 kHz를 안정되게 유지하는 것이 매우 중요하다.

55,029 kHz로 파장이 왕복 스위핑되는 FDML 방식 파장 스위핑 레이저를 구성하기 위해서는 SOA로부터 방출된 빛이 링 레이저를 1회전하는데 소요되는 시간이 $\frac{1}{55,029 \text{ kHz}} = 18.17 \mu\text{s}$, 또는 이의 정수배가 되어야 한다. 따라서 FDML 방식 링 레이저에서는 주어진 시간지연이 발생할 수 있도록 링 내부에 계산된 길이의 광섬유 지연선을 삽입하여야 한다. 이때 빛이 광섬유 링 공진기를 순회하는 동안 발생하는 분산(dispersion)을 최소화 하기 위하여 광섬유 지연선으로서 분산유지 광섬유를 사용하는 것이 권장된다. 그러나 본 논문에서는 일반 보급형인 SMF-28e 광섬유를 사용하였다. 만일 링 공진기가 모두 광섬유로 구성되어 있다고 가정하면 링 공진기의 전체 길이는 식 (1)과 같이 주어진다[11].

$$L_{\text{fiber}} = \frac{c}{n} T_{\text{sweep}} \quad (1)$$

$$= \left(\frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.46} \right) \times 18.17 \mu\text{s} = 3.733 \text{ km}$$

2.2 저가형 정현파 발생기 회로 구성

Fig. 2는 본 논문에서 구현된 저가형 정현파 발생기의 구성을 보여준다. 주파수 세팅 데이터 발생부 & 펄스발생부를 ATmega128 AVR로 구현하였으며, 정현파 신호 발생부, 가산 및 증폭부, 고전류 출력 구동부, 가변 비교 회로부등으로 구성된다. 이를 통하여 발진 주파수를 높은 분해능(0.1 Hz)으로 조절할 수 있으며 아울러 동기 출력 펄스의 생성 시점을 가변하는 것이 가능하다.

Fig. 2. Block diagram of low cost sine-wave generator.

본 실험에서 정현파 발생기는 FFP-TF의 공진주파수인 55,029 kHz를 제공하여야 한다. 이를 위하여 ATmega128 마이크로 컨트롤러로부터 55,029 kHz 주파수 세팅 데이터를 출력시켜 이를 AD9832 파형발생 칩으로 전달한다. 이를 받은 AD9832는 55,029 kHz 안정된 정현파형을 발생시킨다. 이 파형은 후단에 놓인 DC offset 가산회로 및 고전류 출력 구동회로를 통하여 FFP-TF의

PZT를 공진주파수로 구동시킨다. 이제 각 구성부를 좀 더 자세하게 살펴보고자 한다.

2.2.1 주파수 세팅 데이터 발생부

주파수 세팅 데이터 발생부는 ATmega128 마이크로 컨트롤러 및 보조회로를 포함하는 AVR 보드이다. ATmega128 프로그래밍을 통하여 PZT의 공진주파수 55.029 kHz에 해당하는 데이터신호(SDATA)와 클럭신호(SCLK) 및 프레임 동기신호(FSYNC)를 SPI 직렬통신으로 출력시킨다. 주파수의 변경은 프로그래밍의 수정을 통하여 쉽게 이루어질 수 있다.

2.2.2 사인파 신호 발생부

사인파 신호 발생부는 ANALOG DEVICES사의 AD9832 파형 발생 칩을 사용하여 설계하였고 출력주파수의 안정도를 향상시키기 위하여 TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator)가 적용된 25 MHz 수정발진기를 사용하였다. AD9832는 10-bit DAC를 내장하고 있으며 sine look-up table에서 선택된 파형값을 출력한다. 주파수 세팅은 일렬로 들어오는 SDATA 입력을 SCLK과 FSYNC를 통하여 읽어 들임으로써 이루어진다. AD9832의 출력주파수 f 는 다음과 같이 결정된다.

$$f = \text{FREQ} \cdot \left(\frac{f_{\text{MCLK}}}{2^{32}} \right) \quad (2)$$

여기서 FREQ는 $0 < \text{FREQ} < 2^{32}$ 으로 주어지는 정수이고, f_{MCLK} 는 AD9832 내장 DAC의 동작주파수이다. 위에서 언급된 SDATA는 FREQ의 2진수이다.

2.2.3 가산 및 증폭부

가산 및 증폭회로 구성을 위하여 HITACHI사의 HA17741/PS를 이용하였다.

가산회로는 $-1 \sim 1$ V DC offset 입력과 AD9832 출력 정현파를 더하게 되며 DC offset 입력부의 저항값을 조정하여 DC offset 출력값을 조절할 수 있다. DC offset 값은 온도에 따른 파장 스위핑 레이저의 스위핑 중심 파장 변화를 재 세팅하기 위하여 사용된다. 온도에 따른 FFP-TF의 PZT 특성 변화는 궁극적으로 스위핑 중심 파장을 변동시키는데 원래의 위치로 중심 파장을 이동시키기 위하여 DC offset 값의 조정이 필요하다. 다음 단의 증폭기는 정현파와 DC offset 값을 최종적으로 확정하기 위한 반전 증폭단이다.

2.2.4 고전류 출력 구동부

고전류 출력 구동부는 높은 전류를 출력할 수 있는 LM6588을 이용하여 구성하였다. 공진주파수에서 FFP-TF의 PZT는 낮은 저항값을 가지며 이때는 PZT에 작은 전압이 인가되어도 변이가 크게 나타난다. 고전류 출력 구동부는 전압 폴로워 구조를 가지므로 출력 임피던스가 작으며 따라서 출력전압의 대부분이 PZT에 인가될 수 있고 이는 PZT의 변이를 증가시킨다. 그러나 공진주파수에서 PZT의 낮은 저항값은 많은 전류를 요구한다. LM6588은 이러한 많은 전류를 공급할 수 있는 고전류 출력 OP-AMP이다. 실험에서는 PZT에 $1.3V_{p-p}$ 의 전압이 인가될 때 약 70 mA의 전류가 흐르며 약 120 nm의 파장 스위핑이 얻어진다.

2.2.5 가변 비교 회로부

가변 비교 회로부 구성을 위하여 MOTOROLA사의 LM311를 이용하였다. LM311의 입력단에는 AD9832에서 출력된 정현파 전압(순시치 $0 \sim 1.65$ V) 및 이와는 별도로 얻어진 기준 비교전압이 인가된다. 기준 비교전압은 가변저항을 사용하여 조절할 수 있으며 이를 통하여 비교기에서 출력되는 펄스의 시작 시점을 가변시킬 수 있다. 즉 출력되는 정현파의 어떤 정해진 시점에서 펄스가 생성되도록 조절이 가능하다.

2.2.6 펄스 발생부

비교기로부터 출력되는 펄스는 ATmega128 마이크로 컨트롤러의 GPIO 입력으로 인가된다. 만일 입력 전압이 주어진 값에 도달하고 이것이 펄스의 rising edge (또는 falling edge)인 것으로 파악되면 바로 인터럽트 루틴으로 들어가 미리 정해진 기간에 해당하는 동기 신호 펄스를 출력하도록 프로그래밍 하였다. 출력된 동기 신호 펄스는 comb filter 모듈로부터 출력되는 보정용 기준 신호를 획득하기 위한 시작 신호로 사용되고 또한 간섭계로부터 출력되는 간섭 신호를 획득하기 위한 시작 신호로 사용된다.

3. 실험 결과 및 검토

ATmega128로 구성된 AVR보드와 AD9832, 여러 기능의 OP AMPs, 수정발진기 등을 이용하여 Fig. 2의 구성도에 보여진 저가형 정현파 발생기를 제작하였으며 이를 Fig. 3에 보였다.

Fig. 4는 제작된 저가형 정현파 발생기를 작동시킨 후 주파수가 운터와 오실로스코프를 사용하여 출력 주파수 및 파형을 측정한 결과이다. 주파수카운터에 나타난 출력주파수는 오랜 시간동안 0.1 Hz 자리까지 변동이 없었다. 또한 오실로스코프를 사용하여 측정한 출력 파형 및 동기 신호도 왜곡이 없는 정현파와 펄스임이 확인되었다. 이는 제작된 정현파 발생기가 SS-OCT의 파장 스위핑 레이저에 사용되던 기존의 고가 상용 고정밀 파형발생기를 충분히 대체할

수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 3. Realized low cost signal generator.

Fig. 4. Measured output frequency and waveforms of low cost signal generator.

제작된 정현파 발생기를 사용하여 파장 스위핑 레이저의 성능을 측정하였다. Fig. 5에 보여진 정현파형은 파장 스위핑 레이저의 FFP-TF에 인가되고 전류 출력 구동부의 출력파형을 보여준다. 또 다른 파형은 파장 스위핑 레이저의 광 출력이 SS-OCT (Fig. 1)의 comb filter를 통과한 후의 출력파형으로 레이저의 파장이 스위핑 되고 있음을 보여주는 그림이다.

Fig. 6은 파장 스위핑 레이저 출력 광의 스펙트럼을 보여준다. 약 120 nm의 파장 스위핑이 얻어짐을 확인하였다. 이때 광 파워 미터를 사용하여 측정한 평균 광출력은 약 10 mW이었다. 이와 같은 고속 광대역 스위핑 특성을 지니는 FDML 파장 스위핑 링 레이저 기술은 기존의 분광학 장치의 광원으로 응용 개발될 수 있을 것으로 사료된다[12].

Fig. 5. Waveforms of low cost sine-wave generator applied to FFP-TP and output from comb filter.

Fig. 6. Sweeping spectrum of FDML wavelength swept ring laser using realized low cost signal generator.

4. 결론

본 논문에서는 SS-OCT에 사용되어오던 고가의 고정밀 파형발생기를 대체할 수 있는 매우 저렴한 정현파 발생기를 설계 및 제작하였다. 이 정현파 발생기는 0.1 Hz 단위까지 변동 없이 FFP-TF의 공진주파수인 55.029 kHz를 오랜 시간동안 잘 유지하였고 임의의 시점에서 데이터 획득에 필요한 동기 신호 펄스를 잘 생성하였다. 이는 FDML 방식 파장 스위핑 레이저에서 요구되는 정현파 발생기의 주파수 분해능(≤ 1 Hz) 및 안정도($\leq \pm 0.5$ Hz/10 min)를 잘 만족한다. 제작된 정현파 발생기를 파장 스위핑 레이저에 인가하여 약 120 nm의 파장 스위핑과 약 10 mW의 평균 광 출력을 얻었다. 약간의 소스코드 수정을 통해 주파수 및 동기신호를 조절할 수 있으므로 다른 제품 개발 시 유연하게 개발할 수 있는 호환성도 갖추고 있다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청의 출연금으로 수행한 산학연 공동기술개발사업의 연구결과입니다.

REFERENCES

- [1] M. Brezinski, MD, PhD, "Optical coherence tomography, principles and applications". *OP Institute of Physics*, 2003.
- [2] D. Huang and J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography", *Science*, Vol. 254, pp. 1178-1181, 1991.
- [3] Y. K. Kim, "A study on time-domain optical coherence tomography(OCT) based on piezoelectric transducer optical delay line", PhD dissertation, Kyung Hee University, 2011.
- [4] Y. Yasuno, V. D. Madjarova, and S. Makita, "Three-dimensional and high-speed swept-source optical coherence tomography for in vivo investigation of human anterior eye segments", *Opt. Express*, Vol. 13, pp. 10652-10664, 2005 .
- [5] R. Leitgeb, C. K. Hitzenberger, and A. F. Fercher, "Performance of Fourier domain vs. time domain optical coherence tomography", *Opt. Express*, Vol. 11, pp. 889-894, 2003.
- [6] M. A. Choma, M. V. Sarunic, C. Yang, and J. Izatt, "Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography", *Opt. Express*, Vol. 11, pp. 2183-2189, 2003.
- [7] H. S. Kim, M. Y. Namgoong, J. R. Lee, and J. S. Eom, "Realization of swept source-optical coherence tomography system using loop mirror within reference arm", *Conference on Optoelectronics & Optical Communications(COOC) 2007*, Vol. 14, pp. 402-403, 2007.
- [8] R. Huber, M. Wojtkowski, K. Taira, J. G. Fujimoto, and K. Hsu, "Amplified, frequency swept lasers for frequency domain reflectometry and OCT imaging : design and scaling principles," *Opt. Express*, Vol. 13, pp. 3513-3528, 2005.
- [9] Eugene Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, 1987.
- [10] A. G. Podoleanu, "Unbalanced versus balanced operation in an optical coherence tomography system", *Appl. Opt.*, Vol. 39, pp. 173-182, 2000.
- [11] J. S. Eom, "Realization of swept source-optical coherence tomography using FDML laser", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 20, No. 1, pp. 46-52, 2011.
- [12] W. J. Yoo, I. Y. Heo, D. h. Cho, K. W. Jang, J. K. Seo, B. S. Lee, Y. H. Cho, J. H. Moon, and B. G. Park, "Fiber-optic sensor, optical fiber, optical sensor, pH sensor, phenol red", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 18, No. 5, pp. 365-371, 2009.