

SNR 향상을 위한 OCT topology의 설계

박 양 하*, 정 태 호, 오 상 기, 김 요 희
 한국전기연구원 정보·광응용연구그룹

Optical coherence tomography topology design for SNR improvement

Yang-Ha Park, Tae-Ho Jung, Sang-Gi OH, Yoo-Hee Kim
 Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - Basically, OCT use the interference effect of Michelson interferometer. The receiver noise of interferometer is a important fact to improve the system performance. To improve the system performance for high resolution image processing, we design a interferometer topology adding the attenuator to the reference arm. In this paper, we design the receiver noise parameter and computer simulation. In this results, SNR of the new topology system is improved 5dB compare to standard interferometer.

source의 center wavenumber이고, Δl 은 reference와 sample간의 거리 차를 나타낸다. detector에서 직류성분을 제거하면 I_s 의 간섭현상은 다음의 식으로 주어진다.

$$I_s = 2\rho\sqrt{P_r P_s} \cos(k_0 \Delta l) \quad (2)$$

1. 서 론

최근 광을 이용한 새로운 의료 진단기기의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 가장 대표적인 것이 Optical Coherence Tomography(OCT)이다. OCT는 optical coherence domain tomography (OCDR)에 기반을 둔 기술로서 SLD의 low coherence 특성을 이용하여 optical reflection의 측정에 의해서 biological tissue의 내부 구조를 비침습적, 비접촉적인 방법으로 횡단면 영상화(cross-sectional imaging)를 하는 것이다.

OCT는 기본적으로 Michelson interferometer의 간섭 현상을 이용하는 것이다. 그에 따라 간섭계의 잡음은 미세한 신호를 영상화하는 OCT 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 기존의 Michelson interferometer의 잡음에 대한 performance를 분석하였으며, 시스템의 SNR을 향상시키기 위한 방법으로 reference arm에 attenuator를 추가하여 시스템의 performance를 향상시켰다.

2. 간섭의 원리 및 잡음 특성 분석

OCT 시스템은 low coherence 특성을 가지는 SLD를 사용한다. 여기서 광은 beam-splitter에서 나누어진다. 광의 한 부분은 reference mirror로 가고, 나머지는 측정할 sample로 간다. sample과 reference mirror로부터 반사된 광은 다시 beam-splitter를 지나가서 detector에 모아 지게 된다. 그림 1.에서 보듯이 OCT에서 SLD는 reference field P_r 과 sample field P_s 로 나누어진다. sample로부터 back-scattering후에 P_r 은 detector에서 합해진다. OCT의 수신단에서의 photocurrent는 일반적으로 다음과 같이 주어진다.

$$I_d = \rho(P_r + P_s + P_x + 2\sqrt{P_r P_s} \cos(k_0 \Delta l)) \quad (1)$$

여기서 ρ 는 detector responsivity, P_r 은 reference로부터 반사된 optical power, P_s 는 sample로부터 반사된 coherent optical power, P_x 는 sample로부터 반사된 incoherent optical power를 나타낸다. 또한 k_0 는 optical

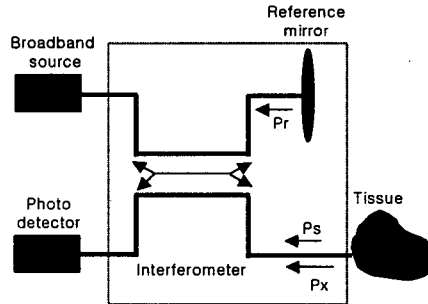


그림 1. Michelson interferometer의 topology 구성도

Michelson interferometer의 SNR은 다음의 식으로 주어진다.

$$SNR = \langle I_s^2 \rangle / \sigma_i^2 \quad (3)$$

interferometer의 photocurrent noise variance는 σ_i^2 으로 주어진다. 여기서 receiver noise는 σ_{re}^2 이며, shot noise는 σ_{sh}^2 , excess noise는 σ_{ex}^2 로 주어진다. 수신단의 photocurrent 잡음은 thermal noise가 주를 이루며 다음의 식으로 나타내어진다.

$$\sigma_{re}^2 = 4 k_B T B / R_{eff} \quad (4)$$

여기서 k_B 는 Boltzman 상수, T 는 온도, B 는 detection bandwidth, R_{eff} 는 effective load resistance를 나타낸다. σ_{re}^2 는 noise equivalent photocurrent density를 나타내며, 본 논문에서의 σ_{re}^2 은 $(2qA/\sqrt{Hz})^2 B$ 로 하였다. shot noise는 monochromatic light source로부터의 photon의 random arrival를 나타내며, 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma_{sh}^2 = 2q I_{dc} B \quad (5)$$

여기서 q 는 electronic charge, I_{dc} 는 mean detector photocurrent를 나타낸다. excess photon noise는 broadband, incoherent light source로부터 photon의

random arrival은 Bose-Einstein process에 따르며, 다음의 식으로 주어진다.

$$\sigma_{ex}^2 = (1 + V^2) I_{dc}^2 B / \Delta\nu \quad (6)$$

여기서 V 는 polarization, $\Delta\nu$ 는 source의 effective linewidth를 나타낸다. $\Delta\nu$ 를 Gaussian power spectral density라 하면, $\Delta\nu = \sqrt{\pi/2 \ln(2)} c \Delta\lambda_{FWHM} / \lambda_0^2$ 으로 주어지고, 여기서 $\Delta\lambda_{FWHM}$ 은 full-width half-maximum wavelength bandwidth, λ_0 는 center wavelength를 나타낸다. 여기서 dc photocurrent는 다음과 같이 주어진다.

$$I_{dc} \equiv \langle I_d \rangle = \rho (P_r + P_s) \quad (7)$$

여기서 $\langle \rangle$ 은 평균값을 나타낸다. unbalanced system의 single detector에 대하여, photocurrent variance는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_i^2 = \sigma_{re}^2 + \sigma_{sh}^2 + \sigma_{ex}^2 \quad (8)$$

식(2)로부터 single detector에서의 mean-square signal photocurrent는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\langle I_s^2 \rangle = 2 \rho^2 P_r P_s \quad (9)$$

따라서 SNR은 최종적으로 다음과 같이 주어진다.

$$SNR = \frac{2 \rho^2 P_r P_s}{4 K_B T B / \text{Reff} + 2q I_{dc} B + (1 + V^2) I_{dc}^2 B / \Delta\nu} \quad (10)$$

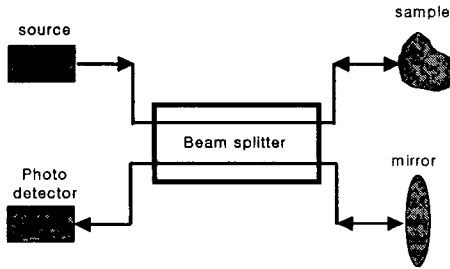


그림 2. standard Michelson interferometer의 topology

그림 2.에서 보면 일반적인 standard Michelson interferometer의 P_r , P_s , P_x 는 다음의 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} P_r &= P_0 R_r / 4 \\ P_s &= P_0 R_s / 4 \\ P_x &= P_0 R_x / 4 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 P_0 는 optical source의 출력, R_r 은 reference의 power reflectivity, R_s 는 sample의 coherent backscattering power reflectivity, R_x 는 sample의 incoherent backscattering power reflectivity를 각각 나타낸다.

3. SNR 향상을 위한 새로운 topology의 제안

Interferometer의 SNR을 높이기 위한 방법의 하나로 optical circulator, unbalanced fiber coupler, balanced heterodyne receiver 등을 추가할 수 있으나, 이 방법은 구성이 복잡하고, 실현하는데 어려움이 뒤따른다. 따라서 본 논문에서는 reference arm의 intensity noise를 감소 시킴으로서 reflection sensitivity를 향상시키는 방법을 제시하였다. 따라서 본 논문에서는 그림 3.과 같이 reference arm에 3dB attenuator를 추가한 새로운 topology를 설계하였다. 그림 3.의 topology에 대한 P_r , P_s , P_x 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_r &= P_0 R_r d^2 / 4 \\ P_s &= P_0 R_s / 4 \\ P_x &= P_0 R_x / 4 \end{aligned} \quad (11)$$

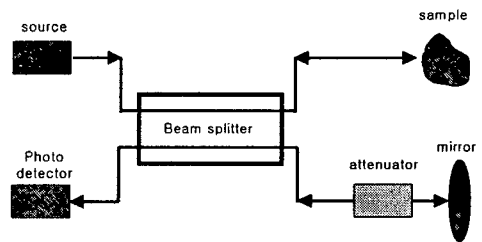


그림 3. reference mirror에 attenuator를 추가한 Michelson interferometer의 topology

4. 모의실험 및 결과 토의

본 논문에서는 standard Michelson interferometer와 attenuator를 추가한 interferometer에 대하여 SNR에 대한 모의실험을 하였다. 실험 조건으로 $R_s=1$, $R_r=0.1$, $R_x=0.00023$ 으로 하였고, $\rho=0.95$, receiver noise 전류는 $2pA/\sqrt{Hz}$ 로 하였다. SLD의 출력은 20mW, 파장은 1300nm, linewidth=50nm, BW=1MHz로 설정하였으며, $\Delta\nu=50 \times 10^{-9}$, attenuator는 3dB(=0.5)로 하였다.

그림 4.는 기존의 standard Michelson interferometer에 대한 모의실험 결과를 나타내었다. 모의실험은 unbalanced interferometer의 beam-splitter의 coupler splitting ratio에 따른 SNR의 변화의 관계를 나타내었으며, 그 결과 0.2~0.9까지는 SNR이 일정함을 알 수가 있었다.

그림 5.의 reference arm에 attenuator를 추가한 topology의 SNR은 89dB로 나타내었다.

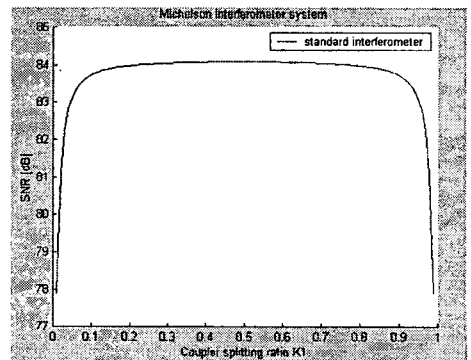


그림 4. standard interferometer의 coupling splitting ratio와 SNR

따라서 reference arm에 attenuator를 추가하여 intensity noise를 감소시킨 방식이 약 5dB의 SNR의 향상을 가져왔으며, 이는 전체적인 OCT 시스템의 해상도의 향상을 가져올 것으로 예상이 된다.

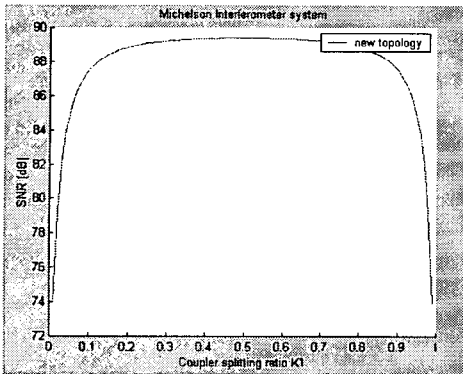


그림 5. reference arm에 attenuator를 추가한 interferometer의 coupling splitting ratio와 SNR

따라서 본 논문에서 제시한 attenuator를 추가하여 SNR을 향상한 방법은 optical circulator, balanced detector를 추가한 방법보다 시스템의 구성을 간단하게 하고, SNR을 5dB정도 향상된 새로운 topology를 설계하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 OCT 제작에 있어서 중요한 부분을 차지하는 interferometer의 SNR 성능 향상에 대하여 논의하였다. 기본적인 standard Michelson interferometer의 잡음 특성에 대한 모의실험을 하였으며, 또한 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 attenuator를 추가한 새로운 topology를 제시하였다. 그 결과 약 5dB의 SNR 향상을 가져왔다. 또한 계속적으로 성능 향상을 위한 OCT 시스템의 제작을 하고 있으며, 추 후 제작된 시스템에 의한 성능 비교를 할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Andrew M. Rollins, Joseph A. Izatt "SNR analysis of conventional and optimal fiber-optic low-coherence interferometer topologies", Proceedings of SPIE, Vol.3915, p60-67, 2000
- [2] W.V. Sorin, D.M. Baney, "A simple intensity noise reduction technique for optical low-coherence reflectometry", IEEE Photonics technology letters, Vol.4, No 12, 1404-1406, 1992
- [3] Lars Thrane, "OCT: modeling & applications", Riso lab, May 2001
- [4] Fujimoto, "OCT of the human retina", Arch Ophthalmol, vol 113, Mar 1995