

광원의 주파수 변조에 의한 임의의 가간섭 함수의 합성 시뮬레이션

Simulation of synthesis of arbitrary optical coherence function by frequency modulation

윤승철, 서민성, 박희갑
 전북대학교 물리기술학과
 amunra77@unitel.co.kr

광경로차에 따른 간섭 신호를 측정하여 공간상의 물리량 변화를 계측하는 간섭계의 가간섭도(degree of coherence)는 광원의 유한한 선폭으로 인해 광경로차가 커짐에 따라 단순히 감소하는 경향을 나타낸다. 특히 광원의 스펙트럼의 형태가 복잡해지는 경우, 광경로차에 대해 단조로이 감소하지 않고 복잡한 양상을 보인다. 광원의 가간섭도는 광원의 스펙트럼 형태와 밀접한 관련이 있다. 광원의 파워 스펙트럼과 가간섭 함수는 푸리에 변환 관계에 있으므로,^[1] 광원의 스펙트럼 구조를 알고 있다면 광원의 가간섭 함수를 구하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 광원의 스펙트럼에 따른 가간섭 함수의 형태를 수치 해석을 통해 계산하였다. 먼저 광원의 스펙트럼이 선폭이 매우 좁은 N개의 주파수 성분으로 구성되어 있다고 가정한다면, 광원의 전기장은 식(1)과 같이 각각의 주파수 성분에 대한 전기장의 합으로 표현할 수 있다. 광원으로부터 나온 빛을 둘로 나눈 후에 서로 다른 광경로차를 겪게 한 다음 서로 중첩시킬 경우, 검출된 빛의 세기는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \sum_{\ell=1}^N \vec{E}_{0\ell} \exp(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega_{\ell} t + \phi_{\ell}) \quad (1)$$

$$I(\tau) = \sum_{\ell=1}^N (I_{\ell 1} + I_{\ell 2}) + \sum_{\ell=1}^N 2\sqrt{I_{\ell 1} I_{\ell 2}} \cos(\omega_{\ell} \tau) \quad (2)$$

위의 식에서, $I_{\ell 1}$ 과 $I_{\ell 2}$ 는 경로 1과 2를 지나는 주파수 ω_{ℓ} 성분의 세기이며, τ 는 경로 1과 2사이의 시간 지연(time delay)을 나타낸다. 이때 ω_{ℓ} 를 $2\pi(\nu_0 + \nu_{\ell})$ 로 치환한 후 식(2)에 대입하여 정리하면 식(3)을 구할 수 있다.

$$I = \sum_{\ell=1}^N I_{\ell} + 2 \sum_{\ell=1}^N \sqrt{I_{\ell 1} I_{\ell 2}} \times \frac{1}{\sum_{\ell=1}^N I_{\ell}} \sqrt{\left[\sum_{\ell=1}^N I_{\ell} \cos(2\pi\nu_{\ell}\tau) \right]^2 + \left[\sum_{\ell=1}^N I_{\ell} \sin(2\pi\nu_{\ell}\tau) \right]^2} \cos(2\pi\nu_0\tau + \phi(\tau)) \quad (3)$$

$$|\chi(\tau)| = \frac{1}{\sum_{\ell=1}^N I_{\ell}} \sqrt{\left[\sum_{\ell=1}^N I_{\ell} \cos(2\pi\nu_{\ell}\tau) \right]^2 + \left[\sum_{\ell=1}^N I_{\ell} \sin(2\pi\nu_{\ell}\tau) \right]^2} \quad (4)$$

이때 I_{ℓ} 은 주파수 ω_{ℓ} 성분의 세기를 나타낸다. 광원의 가간섭도 $|\chi(\tau)|$ 는 식(4)로 주어지며, 각각의 cosine과 sine항은 스펙트럼의 중심 주파수 ν_0 에 대한 대칭성과 비대칭성을 나타낸다. 광원의 스펙트럼

모양에 따라 가간섭도는 단순히 감소하는 형태가 아닌 주기성을 가지고, 0과 1 사이의 값을 갖게 된다.

원하는 형태의 가간섭 함수를 합성하기 위해 필요한 출력 스펙트럼을 얻는 방법으로 레이저 다이오드의 주파수 변조를 들 수 있다.^[2] 그림 1은 이러한 레이저 다이오드의 주파수 변조를 통해 임의의 가간섭 함수를 합성하고, 이를 측정하는 실험 구성도를 나타낸다. 간섭계는 Mach-Zehnder 타입으로 경로차 z 에 대해 간섭 신호를 헤테로다인 방식으로 측정하면 가간섭 함수를 구할 수 있다.

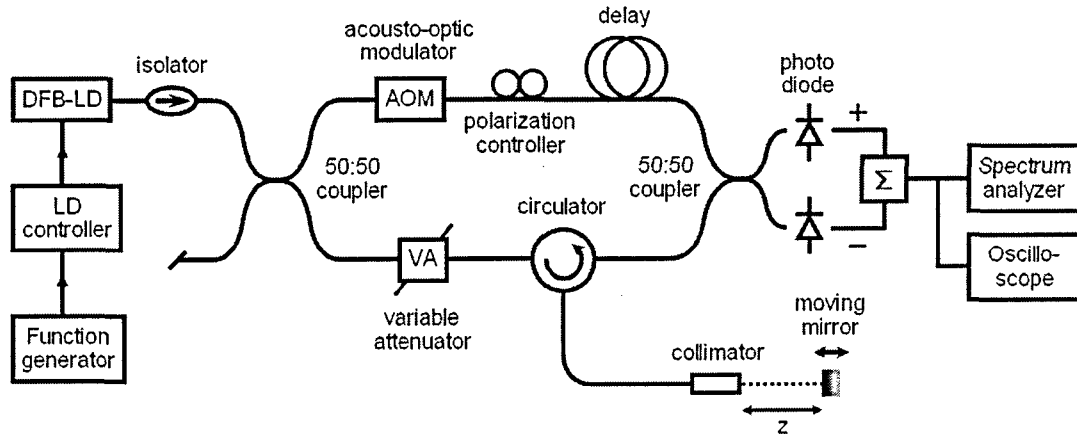


그림 1. 주파수 변조에 의한 임의의 가간섭 함수 합성과 측정을 위한 실험 구성도

주파수 변조를 통해 그림 2와 같이 중심 주파수 ν_0 에 대해 서로 대칭인 모양의 출력 스펙트럼을 갖는다고 가정하자. 수치 해석을 통해 그림 2와 같은 출력 스펙트럼을 갖는 광원의 가간섭도를 구한 후, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 특정 위치에서 가간섭도의 크기가 1이 되고 그 이외의 지점에서의 가간섭도는 상당히 작아짐을 알 수 있었다. 이때 주파수 성분의 피크가 증가하면 가간섭 함수는 주기적으로 반복되는 델타 함수의 형태를 띠게 된다. 이러한 가간섭 피크를 공간적으로 스캔하고 피크의 위치에서 간섭 신호를 측정할 경우, 특정 지점의 물리량의 정보를 구할 수 있으므로 분포형 광섬유 센서를 구축하는데 있어 매우 유망하다 할 수 있다.

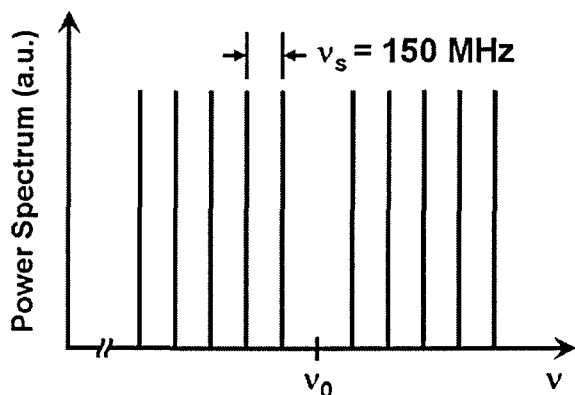


그림 2. 광원의 출력 스펙트럼

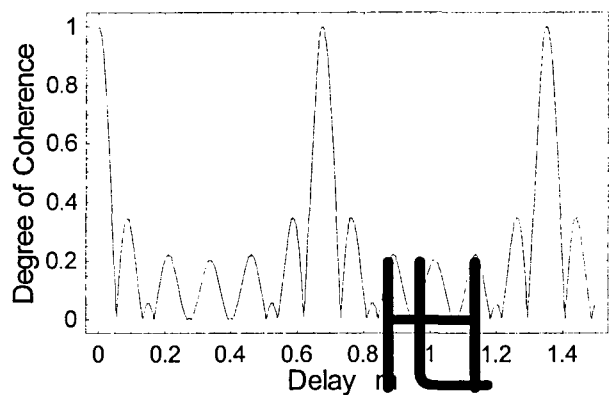


그림 3. 수치 해석에 의한 그림 2에 대한 가간섭도

1. Y. Ohtsuka, "Optical coherence effects on a fiber-sensing Fabry-Perot interferometer," *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 23, pp. 4316-4320, 1982.
2. K. Hotate, "Optical Coherence Domain Reflectometry by Synthesis of Coherence Function," *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, no. 10, pp. 1701-1710, 1993.