

광섬유라만증폭기의 이득과 잡음 스펙트럼 디자인 알고리즘 Gain and NF Spectrum Control Algorithm for FRA

박재형⁽¹⁾, 박종한⁽¹⁾, 김필한⁽²⁾, 박남규⁽¹⁾

서울대학교 전기컴퓨터공학부 광통신시스템연구실⁽¹⁾, Harvard Medical School⁽²⁾

jhpark@stargate.snu.ac.kr

다채널 광전송 시스템에서, 페널티는 보통 가장 성능이 나쁜 채널에 의해 결정된다. 이런 측면에서 증폭기의 디자인에 있어서 이득에서의 평탄화 뿐이 아니라 잡음지수에서의 평탄화도 중요하게 고려되어야 할 요소이다. 라만광섬유증폭기(FRA)의 경우에, 광섬유 손실과 신호-펌프 간의 상호작용에 의해서 최단파장의 신호가 가장 나쁜 잡음 특성을 가진다. 이를 해결하기 위해서, 양방향 펌핑^(1,2), 고차 펌핑, 시분할 펌핑 방법들^(3,4)과 사후이득경사 보정을 통한 보상 방법 등에 대한 연구들이 있어왔다.

이 논문에서는, 이득과 잡음 지수 두 가지 모두에 대한 디자인을 동시에 할 수 있는 정확하고 효율적인 방법을 제시하였다. 목표 이득 파형에 대해 우선 FRA를 디자인하고, NF 오차함수를 얻어내서 이를 되먹임으로 이용함으로써 라만광섬유증폭기의 이득과 잡음지수에 있어서 0.1dB이하의 정확도 내에서 수십 초 이내에 양방향 펌프의 값을 찾아내는 디자인 결과를 얻을 수 있었다.

일반적으로 두 개의 부분으로 나누어 생각할 수 있는 긴 길이의 분산형 양방향 펌핑 FRA에 대해서 생각해 보면, 두 연속된 전, 후방 펌핑 증폭기의 잡음 지수와 이득을 가지고, 전체 증폭기의 손실이 포함된 잡음지수를 나타낼 수 있고, 다음 식과 같이 표현된다.

$$\vec{NF}_{total} = \vec{NF}_{for} + \frac{\vec{NF}_{back} - 1}{\vec{G}_{for}} = \vec{NF}_{for} + \frac{\vec{NF}_{back} - 1}{\vec{G}_{total}} \cdot \vec{G}_{back} \quad (1)$$

여기서 \vec{NF} 와 \vec{G} 는 잡음지수와 이득 파형 벡터이다. 우선, 미리 정해놓은 목표 이득 값 \vec{G}_{total} 에 대해 잡음지수 \vec{NF}_{total} 을 구하기 위해 순방향/역방향 잡음지수(\vec{NF}_{for} , \vec{NF}_{back})와 역방향 이득(\vec{G}_{back})이 필요하다. 또한, \vec{G}_{total} 이 고정되어 있을 때, \vec{NF}_{total} 의 변화는 거의 \vec{G}_{back} 에 의해 결정된다는 사실이 중요하다: \vec{NF}_{for} 와 \vec{NF}_{back} 의 변화는 무시할만하다.

식 (1)을 주어진 목표 이득과 잡음 스펙트럼 (\vec{G}_{total}^{target} , $\vec{NF}_{total}^{target}$)에 대해 얻어진 목표 후방 이득 $\vec{G}_{back_dB}^{target}$ 에 대해 표현하고, 이 $\vec{G}_{back_dB}^{target}$ 을 결정하기 위해서, 이 시점에서는 미지수인 \vec{NF}_{for}^{target} 와 \vec{NF}_{back}^{target} 을 미리 정해놓은 증폭기에서의 이득과 잡음 지수를 이용해서 식을 변형한다. 그 후에 이로부터 목표 잡음지수 스펙트럼 $\vec{NF}_{total}^{target}$ 와 목표 이득 $\vec{G}_{total_dB}^{target}$ 을 만족시키기 위한 후방이득을 얻기 위한 피드백 파라미터로서 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta \vec{G}_{back_dB}^{(k)} = \vec{G}_{back_dB}^{target} - \vec{G}_{back_dB}^{(k)} \cong 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\vec{NF}_{total}^{target} - \vec{NF}_{for}^{(k)}}{\vec{NF}_{total}^{(k)} - \vec{NF}_{for}^{(k)}} \right) \quad (2)$$

여기서 $\vec{NF}_{total}^{target}$ 와 $\vec{NF}_{total}^{(k)}$ 사이에 펌프 재구성과정에서 오프셋이 생길 수 있기 때문에, 실제 구현에 있어서 목표 잡음 파형은 $\vec{NF}_{total}^{target} = avg(\vec{NF}_{total}^{(k)}) + tilt(\vec{NF}_{total}^{target})$ 와 같은 식을 사용해서 오프셋을 제거해 주었다. 게다가, $\vec{NF}_{for/back}^{target}$ 를 $\vec{NF}_{for/back}^{(k)}$ 로 근사화 하였으므로, 식(2)에서 만족할만한 수렴도를 보이는 최종 디자인 결과를 얻기 위해 반복계산 방법을 사용하였다.

위 이론의 실제 구현을 위해서, 기존에 발표한 이득 디자인 논문의 결과⁽⁵⁾에서 식을 변형을 하였다.

$$\vec{G}_{total_dB} = \vec{T}_{P_back} \cdot \vec{P}_{P_back} + \vec{T}_{P_for} \cdot \vec{P}_{P_for} + \vec{T}_S \cdot \vec{P}_S \quad (3)$$

\vec{G}_{total_dB} 는 이득 파형 벡터, \vec{P}_{P_back} , \vec{P}_{P_for} , \vec{P}_S 는 $M \times 1$ 순방향, $M \times 1$ 역방향, $N \times 1$ 신호 파워 벡터이다.

디자인 프로세스는 다음과 같다.

Step 0 : 라만 이득 $\vec{G}_{total_dB}^{target}$ 를 정하고, 후방 펌핑 라만증폭기의 이득 $\vec{G}_{P_back_dB}^{(0)}$ 를 결정한다. (예; $\vec{G}_{P_back_dB}^{(0)} = r \vec{G}_{total_dB}^{target}$ (r : 후방이득/전체이득의 비))

Step I : $\vec{P}_{P_for} = 0$ 일 때, \vec{P}_{P_back} 에 대해 식(3)을 풀면, $\vec{P}_{P_back}^{(n)} = (\vec{T}_{P_back}^{(n)})^{-1} \cdot (\vec{G}_{P_back_dB}^{(n)} - \vec{T}_S \cdot \vec{P}_S)$, for $\vec{P}_{P_for} = \vec{0}$ (4)

여기서 목표 후방이득 $\vec{G}_{P_back_dB}^{(0)}$ 를 만족하는 후방 펌프 파워 $\vec{P}_{P_back}^{(0)}$ 를 얻을 수 있고, 이 후방펌프와 식(3)을 가지고, $\vec{P}_{P_for}^{(0)}$ 를 얻을 수 있다. $\vec{P}_{P_for}^{(n)} = (\vec{T}_{P_for}^{(n)})^{-1} \cdot (\vec{G}_{total_dB}^{target} - \vec{T}_{P_back} \cdot \vec{P}_{P_back}^{(n)} - \vec{T}_S \cdot \vec{P}_S)$ (5)

결국, 최종 전체 목표 이득 파형 $\vec{G}_{total_dB}^{target}$ 를 만족하는 순방향 펌프파워 $\vec{P}_{P_for}^{(0)}$ 를 얻을 수 있다.

Step II : 얻어진 $\vec{P}_{P_for}^{(0)}$, $\vec{P}_{P_back}^{(0)}$ 와 신호 진행 파워 분포들을 이용해서, 라만증폭기의 잡음 값들을 계산할 수 있다. 식(2)에서 $\Delta \vec{G}_{back_dB}^{(0)}$ 를 가지고, 후방라만이득 $\vec{G}_{P_back_dB}^{(1)}$ 를 얻을 수 있다.

Step III : $\Delta \vec{G}_{back_dB}^{(n)}$ 가 만족할 만한 값으로 수렴할 때 까지 steps I, II를 반복한다.

알고리즘의 검증을 위해서 분산천이광섬유(DSF, 100km, 22dB 온/오프 이득)에 대한 수치해석적 분석을 수행하였다. 81개의 신호(-5dBm/ch, 1530~1594nm, 100GHz 간격)와 5nm 등간격의 펌프(1420~1495nm)를 사용하였다. 그림.1은 다양한 목표 잡음 모양들 (2dB +/-경사, 볼록/오목 잡음 파형)에 대한 초기 디자인 조건($r = \vec{G}_{back_dB}^{target} / \vec{G}_{total_dB}^{target} = 0.6$, 선)과 디자인 최종 단계(5번 반복 후)의 결과가 나타나 있다. 잡음과 이득 모두에 대해 0.1dB 이하의 정확도에서 잘 디자인 된 결과를 확인할 수 있고, 이 결과는 2GHz 컴퓨터로 수십초 이내에 디자인 되었다.

또한 제안된 알고리즘의 펌프-고갈 영역에서의 적용가능성을 확인하기 위해, 이산라만증폭기에 대해 적용해 보았다. 그림.2에서 10km의 분산보상광섬유(10km, 10dB이득, 온/오프 이득=16dB, -6dBm/ch)에 대한 디자인 결과를 볼 수 있다. 약간의 반복횟수의 증가만으로 이득과 잡음지수에서 0.05dB/0.01dB의 우수한 정확도를 가지는 디자인 결과를 확인할 수 있었다.

본 논문에서 FRA의 이득과 잡음지수를 독립적으로 디자인할 수 있는 효율적이고 빠른 디자인 방법을 제안하였다. 라만 광전송 선로에서 라만광증폭기의 최적화 디자인을 하는 데에 도움을 줄 수 있는 다양한 이득과 잡음지수 파형들에 대한 성공적인 디자인 결과를 보였다.

참고문헌

1. Y. Emori et al., "Broadband flat-gain and low-noise Raman amplifiers pumped by wavelength-multiplexed high-power laser diodes," Optical Fiber Technology, v.8, n.2, (2002)
2. X. Liu et al., "Optimizing gain profile and noise performance for distributed fiber Raman amplifiers," Optics Express, v.12, n.24, (2004)
3. Y. Hadjar et al., "Noise Figure Tilt Reduction in Ultrawide-Band WDM Through Second-Order Raman Amplification," IEEE Photon. Technol. Lett., v.16, n.4, (2004)
4. C.R.S. Fludger et al., "Ultra-broadband high performance distributed Raman amplifier employing pump modulation," Optical Fiber Communications Tech. Dig. Paper WB4, (2002)
5. Jaehyoung Park et al., "Closed integral form expansion of Raman equation for efficient gain optimization process," IEEE Photon. Technol. Lett., v.16, n.5, pp.1283-1285, (2004)

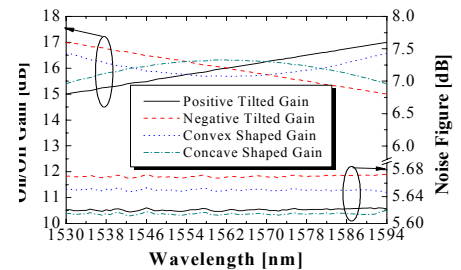
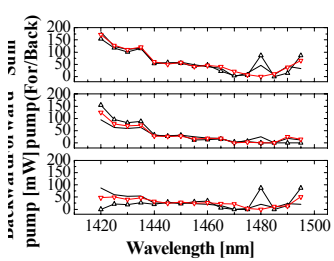
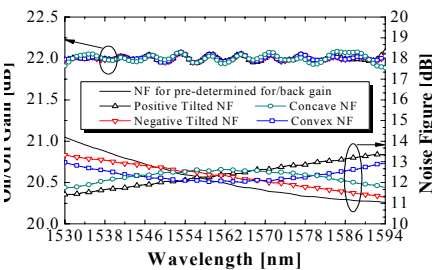


그림 1. 평탄이득에서 다양한 잡음지수 디자인과 펌프 파워(+/- tilt:△/▽)

그림 2. 평탄잡음지수 하에서의 다양한 모양의 라만 이득 디자인 결과