

Fast WDM 시스템에서 적응형 배열을 이용한 누화의 감소와 레이저 주파수 편이의 보상

학생회원 김태선* 정회원 서철헌*

Crosstalk Reduction and Laser Frequency Drift Compensation in Fast WDM System Using Adaptive Array

Taeson Kim*, Chulhun Seo* *Regular Members*

요약

본 논문에서는 Fast WDM 시스템에서 선형 누화를 최소화하기 위하여 적응형 배열 알고리즘을 소개하고 있고 각 채널의 누화의 크기는 각 채널에 대해 고유 주파수가 할당되는 파일럿 톤을 이용하여 관찰하고 있다. 인접채널에 의한 누화 레벨은 파일럿 신호 파워의 크기에 의해 결정되어질 수 있고 각 채널의 광 전류에 가중치를 가하고 그 신호들을 합함으로써 선형 누화가 제거된다. 또한 파일럿 신호에 의해 레이저의 주파수 편이에 대한 보상이 이루어진다. 빠른 전송속도를 갖는 Fast WDM에서의 알고리즘의 처리속도의 문제는 일정한 몇 비트마다 표본화 처리를 함으로써 해결하고 있다.

ABSTRACT

In this paper, an adaptive array algorithm is presented to minimize linear crosstalk in fast WDM system and the crosstalk levels are monitored by using the pilot tone which is unique to each channel. The crosstalk levels of other adjacent channels can be determined by the power levels of pilot signal and the weighting and summing the photocurrent of channels can cancel the linear crosstalk. Also, it can compensate the drift of laser frequency using pilot tone as reference signal. The speed of algorithm processing reaches that of transmittance in fast WDM by sampling a bit per finite bits.

I. 서론

파장 분할 다중화(WDM) 방식을 사용한 시스템은 단일모드의 광섬유에 의해 제공되는 넓은 대역폭을 이용할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 WDM 시스템의 성능은 제한된 저지대역 특성을 갖는 통과 대역 여파기나 역다중화기에 의해 발생하는 선형 누화^[1]에 의해 제한을 받는다. 이는 채널의 수와 채널간의 간격 즉, 채널 용량에 제한을 주는 요인으로 작용하고 있다. 채널 용량의 향상을 위해 많은 연구자들은 선형 누화를 줄이기 위한 방법을 모색하고 있다. 이를 위해 보다 엄격한 성능 특성을

갖는 역다중화기나 여파기의 고안과 제작 기술에 초점을 맞추어 대부분의 연구들이 진행되고 있다^[2-4]. 그러나, 이러한 연구는 제작의 어려움과 고비용을 요하는 문제에 봉착하고 있다. 그래서 최근에는 이에 대한 대안책들이 제안되어지고 있다^[5-7].

본 논문에서는 패킷의 경로의 배정을 위해 제안된 사인파형태를 갖는 파일럿 신호^[8]를 사용하여 각 채널에 대한 누화와 잡음의 정도를 모니터링하고, 모니터링 정보를 바탕으로 검파기들에 의해 수신된 신호들에 대해 적응형 배열 알고리즘을 적용하여 구하여진 최적화된 가중치를 바탕으로 누화와 잡음이 최소화된 신호를 각 채널의 출력으로 얻게 된다.

* 송실대학교 정보통신공학과 (chulhun@wave.soongsil.ac.kr)

논문번호 : 98432-0903, 접수일자 : 1998년 9월 3일

* 이 논문은 과학재단 특정 기초 연구비 지원에 의한 결과임.

또한, 각 채널마다 다른 파장을 갖는 사인파로 부여된 파일럿 신호는 수신기측에서 기준신호로 사용되어, 광 섬유 자체에서 발생하는 오류와 대부분의 광 시스템에서 문제가 되는 주파수의 표동을 보상해주고 있다. 그러나, 이러한 알고리즘은 긴 처리시간을 요구하여 고속을 요구하는 Fast WDM 시스템에서 제한을 받고 있다. 이러한 제한으로 인해 각 배열마다 구성되어 있는 가중치 단자의 수를 줄여 계산량을 감소시키는 방법이 제안되었지만, 성능면에서는 다소 떨어지는 결과를 갖고 있다. 본 논문에서는 WDM 시스템은 유선환경으로 무선환경과 달리 주위 환경 변화에 따라 심한 변화를 갖지 않고, 외부에서의 물리적인 영향이 가해지지 않는다면 일정한 통신환경을 유지하는 특성을 이용하여, 수신신호를 일정한 개수의 비트마다 가중치를 갱신하는 표본화 방식을 제안하고 있다. 이러한 원리를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 WDM 시스템에서 발생하는 선형누화가 거의 제거되는 것과 함께 채널용량이 향상됨을 보여주고 있다. 또한 광원에서 발생하는 중심주파수의 표동에 대한 보상을 보여주고 있다.

II. 누화레벨의 모니터링

다중 채널을 갖는 WDM 시스템에서 패킷들의 경로 배정을 위해 파일럿 신호가 제안되어왔다. 파일럿 신호들은 서로 다른 주파수를 갖고 각 채널들에게 할당된다. 본 논문에서 이 파일럿 신호를 경로 배정을 위해서 뿐만 아니라 WDM 시스템에서 발생하는 선형 누화의 정도를 모니터링하고 선형누화를 최소화하는데 사용한다. 그림 1(a)는 송신단에 대한 블록도를 나타낸다. 각 채널의 데이터 신호는 각 채널을 특징지어주는 사인파형태의 파일럿 신호가 첨가되어 다중화기를 통하여 광 링크나 네트워크로 송신된다. 그림 1(b)는 i 번째 채널의 송신신호 스펙트럼으로 i 번째 채널의 데이터 신호, 각 채널에 할당된 파일럿 신호, 그리고 dc 바이어스 신호 스펙트럼으로 구성된다. 이때 사용되는 파일럿 신호는 파일럿 신호 스펙트럼과 데이터 신호 스펙트럼의 중첩을 막기위하여 데이터 신호의 스펙트럼이 갖는 주파수범위 밖의 주파수를 갖는 신호가 선택되어야 한다. 각 채널의 레이저에 대한 구동 전류는 바이어스 전류, 데이터 성분의 전류와 파일럿 신호 성분의 합으로 구성된다. 각 채널의 데이터 신호는 각 채널을 특징지어주는 사인파형태의 파일럿 신호에 의해

변조되어 다중화기를 통하여 광 링크나 네트워크로 송신된다.

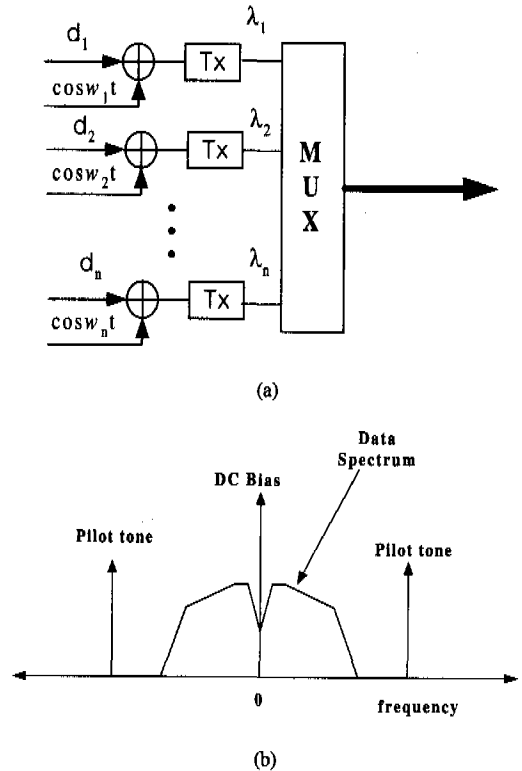


그림 1. (a) 파일럿 신호를 갖는 WDM 신호의 송신기, (b) 파일럿 신호와 데이터 신호로 구성된 임의의 채널의 스펙트럼.

그림 2(a)는 적응형 배열 알고리즘단을 포함하고 있는 격자를 기반으로 한 역다중화기를 사용한 WDM 수신단을 나타낸다. n 개의 채널과 검파기로 모델링된 WDM 수신 시스템에서의 검파단의 출력 (Z)은 $n \times 1$ 의 크기를 갖는 행렬로 다음과 같이 표현된다.

$$Z = G(S + P) + v \tag{1}$$

여기서 S 는 $n \times 1$ 의 크기를 갖는 벡터로 누화와 잡음을 갖지 않는 각 채널의 신호의 크기를 나타내고, P 는 각 채널에 할당된 파일럿 톤 신호를 나타내고, v 는 n 개의 검파기 각각의 내부에서 발생하는 잡음을 나타내는 벡터이다. G 는 $n \times n$ 크기를 갖는 행렬로 i 번째 검파기에 의해 검출되는 j 번째의 채널신호의 양을 나타내는 g_{ij} 의 원소들로 구성된 이득벡터

이다. 이득 벡터 \mathbf{G} 는 각 신호가 원하는 검파단에 검파되는 정도를 나타내는 이득 벡터 \mathbf{G}_d 와 원하지 않는 검파단에 검파되는 정도를 나타내는 \mathbf{G}_c 성분으로 나누어질 수 있다.

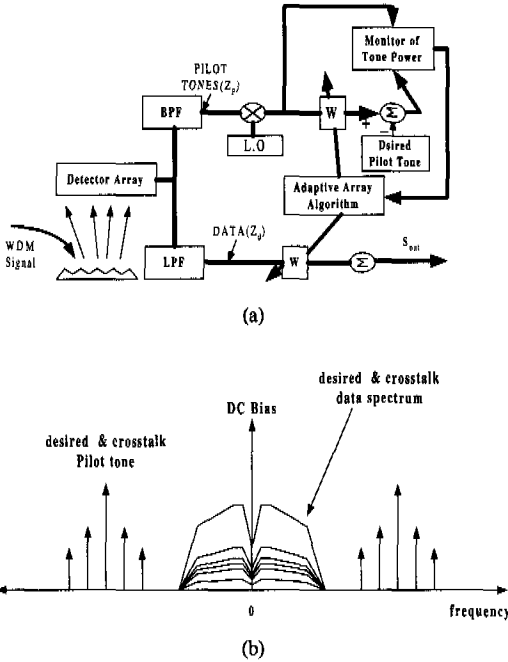


그림 2. (a) 격자에 기반을 둔 여파추출기를 사용한 WDM 수신기, (b) 누화신호를 포함하고 있는 임의의 검파기에 의해 수신된 신호의 스펙트럼.

그림 2(b)는 i 번째 채널의 수신신호의 스펙트럼으로 누화신호를 포함하고 있다. 이렇게 수신된 신호는 기저대역 통과 여파기와 저역 통과 여파기에 의해 파일럿 신호와 데이터 신호성분으로 분리된다. 여파기에 의해 분리된 파일럿 신호는 $\mathbf{Z}_p = \mathbf{G}\mathbf{P} + \mathbf{v}$ 와 같이 표현될 수 있다. 파일럿 신호는 각각 다른 주파수를 갖는 임펄스형태를 갖기 때문에 원하는 채널에 할당된 주파수의 정보를 사용하여 원하는 신호성분의 크기정보를 알 수 있다. 또한 원하지 않는 인접채널 신호의 성분, 즉 누화신호 성분도 파악할 수 있다. 즉 $\mathbf{P} = \mathbf{P}_c + \mathbf{P}_d$ 로 표현될 수 있다. 이렇게 파악된 신호의 성분들로부터 인접채널에 의해 발생하는 누화레벨을 파악할 수 있다. 즉 i 번째의 인접채널에 의해 k 번째 채널에 형성되는 전기적 신호의 누화 레벨은 다음과 같이 표현된다.

$$CT_{k,i} = \frac{(g_{ki}P_i)^2}{(g_{kk}P_k)^2} \quad (2)$$

여기서 g_{ki} 는 i 번째 신호가 k 번째 검파기에 검파된 신호를 나타낸다. 식 (2)의 누화레벨로부터 인접채널들에 의해 발생하는 k 번째 채널에 발생하는 전체 누화레벨은 각각의 인접채널들에서 발생하는 누화레벨의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$CT_{k,total} = \frac{(\sum_{i=1, i \neq k}^N g_{ki}P_i)^2}{(g_{kk}P_k)^2} \quad (3)$$

이렇게 구해진 누화레벨은 누화를 제거하기 위해 사용하는 가중치를 찾는 데 중요한 정보를 제공한다.

III. 적응형 배열 알고리즘을 이용한 누화의 최소화와 레이저 주파수 편이의 보상

그림 2(a)의 수신기에서 검파된 수신 신호열들은 원하지 않는 채널들의 신호 즉, 누화신호와 각 검파기 자체의 잡음을 포함하고 있다. 이 신호로부터 누화와 잡음을 최소화하고 최대의 신호대 누화와 잡음의 비(SCNR, signal to crosstalk plus noise ratio)를 갖도록 하기 위해서 적절한 가중치를 각 검파열에 가하여 원하는 신호 성분은 강화시키고 원하지 않는 신호는 상쇄시키는 원리를 이용한다. 이렇게 원하지 않는 신호들을 상쇄시키기 위해 각 검파단에 가해져야 하는 각 검파단의 가중치들은 적응형 배열 알고리즘을 이용하여 DSP와 같은 프로세서에 의해 구하여진다. 즉, 각 검파기에 의해 검파된 신호들을 조합하여 상호 보완 및 상쇄를 시켜 최대의 SCNR을 유지시키게 된다. 각 단의 가중치 탭은 승수기에 의해 구현될 수 있다. 이때 최대의 SCNR을 갖기 위한 최적의 가중치는 파일럿 신호의 정보로부터 구하여진다.

SCNR을 최대로 하는 가중치는 다음과 같은 수식적 원리로부터 구하여진다. 기저 대역 통과 여파기에 의해 분리된 파일럿 신호에 가중치가 가해진 출력신호의 크기는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S_{out} &= \mathbf{W}^T \mathbf{Z}_p \\ &= \mathbf{W}^T (\mathbf{G}_d \mathbf{P}_d + \mathbf{G}_c \mathbf{P}_c + \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{W} 는 출력 신호의 SCNR이 최대가 되게 하는 각 검파단의 가중치 행렬을 나타내고 이 신호는 원하는 신호, 누화 신호와 잡음 신호로 나뉘어진다. 이 신호로부터 기대되는 원하는 출력 신호의 파워, 누화 신호의 파워와 잡음 신호의 파워는 각각 식

5(a), (b), (c)로 표현될 수 있다.

$$P_d \approx \langle (W^T G_d P_d)^2 \rangle \\ \approx \langle P_d^2 \rangle > W^T G_d G_d^T W \quad (5)-(a)$$

$$P_c \approx \langle (W^T G_c P_c)^2 \rangle \\ = W^T G_c \langle P_c P_c^T \rangle G_c^T W \\ = W^T G_c R_{cc} G_c^T W \quad (5)-(b)$$

$$P_n \approx \langle (W^T v)^2 \rangle \\ = W^T W \sigma^2 \quad (5)-(c)$$

여기서 R_{cc} 는 파일럿 톤 신호의 누화성분의 상관계수로 $\langle P_c P_c^T \rangle$ 로 정의되며, σ 는 검파기의 온도잡음 계수를 나타낸다. 식 (5)로부터 원하는 신호대 누화, 잡음의 비인 SCNR은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$SCNR = \frac{\langle P_d^2 \rangle > W^T G_d G_d^T W}{W^T (G_c R_{cc} G_c^T + \sigma^2 I) W} \quad (6)$$

이렇게 구하여진 SCNR을 최대로 하는 가중치를 찾는 일반적인 방법은 수신단의 출력 파워와 원하는 신호 파워 차의 제곱(mean square error, MSE)을 이용하는 것이다. 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\langle e^2 \rangle \approx \langle (P_{out} - P_d)^2 \rangle \\ = W^T (G R_{pp} G^T + \sigma^2 I) W - 2W^T G R_{pd} + \langle P_d^2 \rangle \quad (7)$$

여기서 R_{pp} 는 파일럿 신호 성분들의 상관계수로 $\langle P P^T \rangle$ 로 정의되며 R_{pd} 는 누화성분을 포함한 파일럿 신호와 누화성분을 포함하지 않은 초기의 전송 파일럿 신호의 상관관계로 $\langle P P_d^T \rangle$ 를 나타낸다. 이를 최소화하는 가중치는 Wiener-Hopf 방정식에 의해 다음과 같이 구하여진다⁹⁾.

$$W_{MSE} = (G R_{pp} G^T + \sigma^2 I)^{-1} G R_{pd} \quad (8)$$

이 값을 환경 변화에 적응하도록 하기 위하여 사용하는 표준 LMS 알고리즘에 의해 다음과 같이 가중치가 갱신된다¹⁰⁾.

$$W_{new} = W_{old} - \mu e Z_p \\ (e = W_{old}^T Z_p - P_d) \quad (9)$$

여기서 μ 는 이러한 가중치의 갱신을 반복하는데

있어서 스텝 계수를 나타낸다. 수신단에서 파일럿 신호를 생성하여 이를 원하는 신호 P_d 로 사용하고 있다. 이로써 수신단에서 원하는 신호의 정보없이 알고리즘을 처리할 수 있게 된다. 즉 알고리즘을 블라인드하게 처리할 수 있게 된다.

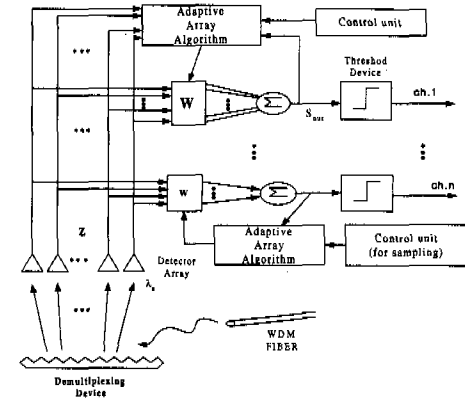


그림 3. 적응 배열 알고리즘의 표본화 처리를 이용한 WDM 수신기.

이렇게 구하여진 각 검파단의 최적의 가중치는 그림 3과 같이 각 검파단에 들어온 신호들에 가중치를 두어 원하는 신호는 강화시키고 원하지 않는 신호는 상쇄시키고 원하는 신호는 강화시키는 결과를 갖게 되어 각 검파단의 신호들을 합하면 SCNR이 최대가 되도록 하게 된다. 즉 각 검파단에 수신된 신호들에 대해 적절한 가중치를 가하여 조합함으로써 원하는 신호 즉 송신된 신호의 레벨을 복구하게 되는 것이다. 그러나 이러한 알고리즘의 처리속도는 Fast WDM 시스템의 신호의 전송속도에 미치지 못하는 문제점을 갖고 있다. 본 논문에서는 이러한 가중치를 이용한 누화의 최소화 원리에 의해 가중치를 일정 비트마다 갱신함으로써 통신환경에 적응하도록 하고 있다. WDM 시스템은 통신환경의 많은 변화를 갖지 않기 때문에 알고리즘 처리속도를 감안하여 이러한 가중치의 갱신을 수 비트마다 수행하는 것을 본 논문에서는 제안하고 있다.

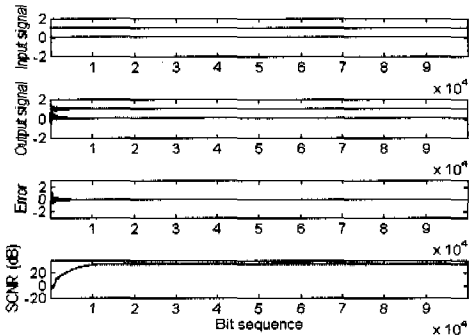
IV. 시뮬레이션

본 논문에서는 격자를 기반으로 한 역다중화기를 사용한 WDM 수신기를 모델로 하고, 식 (10)과 같이 초점으로부터 거리 x 에 따라 정규화된 광 신호

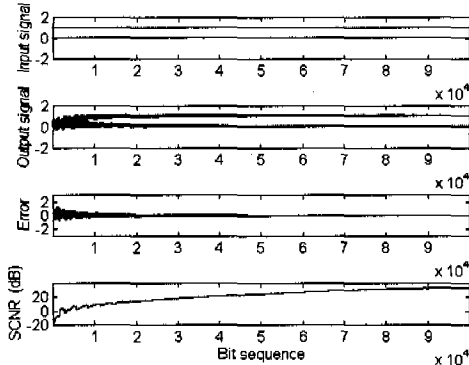
세기의 분포를 갖는 광신호로 시뮬레이션을 하였다.

$$i(x) = \exp[-(0.5887x)^2] + 10^{-5} \quad (10)$$

이렇게 정규화된 광신호는 1의 피크값을 갖고 2의 FWHM(Full Width Half Maximum)을 갖는다.



(a)



(b)

그림 4. 3.6(FWHM)의 채널간격을 갖는 20개의 채널로 구성된 신호를 온도잡음 계수가 $\sigma=10^{-2}$ 인 20개의 검파기로 구성된 수신기의 랜덤한 '1', '0'의 입력신호와 알고리즘을 적용한 출력신호, 입출력간의 오차, SCNR. (a) 10 비트마다 표본화 처리, (b) 100 비트마다 표본화 처리.

그림 4(a)는 3.6 (FWHM)의 채널간격을 갖는 20개의 채널로 구성된 신호를 온도잡음 계수가 $\sigma=10^{-2}$ 인 20개의 검파기로 수신하여 10 비트마다 표본 처리하여 적응형 배열 알고리즘을 적용하였을 때의 결과를 보여주고 있다. 랜덤한 '1', '0'의 디지털 신호를 송신하는 입력신호와 알고리즘을 적용한 출력신호, 입출력간의 오차, SCNR을 각각 나타내고 있다. 그림 4(b)는 100 비트마다 표본 처리하였을 경우의 결과를 보여주고 있다. 결과에서 보

듯이 변화가 심한 통신환경에서의 표본화 처리는 성능저하를 가져오지만 유선 통신환경을 갖는 WDM 시스템과 같이 통신환경의 변화가 적은 시스템에서는 알고리즘의 처리속도에 대한 대안책으로서의 충분한 성능을 보장받는 것을 볼 수 있다.

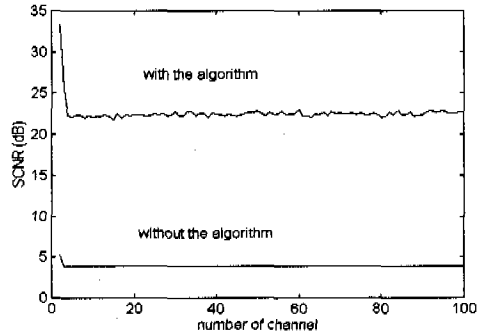


그림 5. 3.6 (FWHM)의 채널간격을 갖고 송신되는 채널수에 대한 수신단에서의 SCNR.

그림 5는 3.6 (FWHM)의 채널간격을 갖고 송신되는 채널수에 대한 $\sigma=10^{-2}$ 의 온도잡음 계수를 갖는 검파기열로 구성된 수신단에서의 SCNR을 나타낸다. 채널수가 어느 정도이상 증가하면 일정한 값에 수렴되는 것을 볼 수 있다. 이는 인접채널에 의한 누화가 전체 누화값에 대해 지배적이기 때문이다. 알고리즘을 사용함으로써 상당히 향상된 SCNR을 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 알고리즘을 사용하지 않았을 경우 SCNR이 약 4.8dB에 수렴하는 반면, 사용함으로써 약 22.4dB까지 향상된 것을 볼 수 있다.

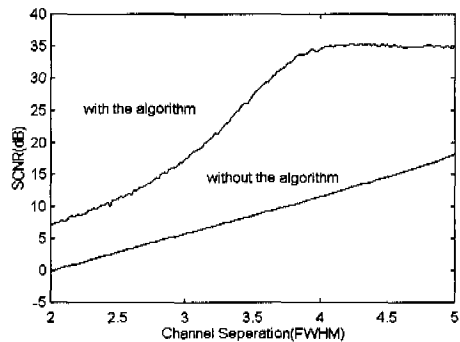


그림 6. 20개의 채널로 구성된 시스템에서 채널의 간격에 따른 SCNR

그림 6은 20개의 채널로 구성된 시스템에서 채널

의 간격에 따른 SCNR을 나타낸 그래프이다. 알고리즘을 사용함으로써 SCNR이 향상된 것을 볼 수 있다. 예를 들어 15dB의 시스템 성능을 요구하는 조건하에서 알고리즘을 사용함으로써 요구되는 채널 간격을 약 4.8(FWHM)에서 2.9(FWHM)으로 줄일 수 있으므로 약 1.7배의 채널용량을 향상시킬 수 있다. 이와 같이 알고리즘을 사용함으로써 채널용량을 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다.

그림 7은 광원의 주파수 편이정도에 따른 SCNR을 나타내고 있다. 이때 시스템은 3.6 (FWHM)의 간격을 갖는 10개의 채널로 구성된 시스템에 대한 SCNR로 알고리즘의 사용으로 주파수 편이에 대한 보상이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 3.6(FWHM)의 주파수 편이가 발생한 지점은 한 채널이 인접 채널로 겹치는 지점을 나타내고 이때 다소 성능이 저하되지만 그 지점을 지나면서 다시 보상되는 것을 볼 수 있다.

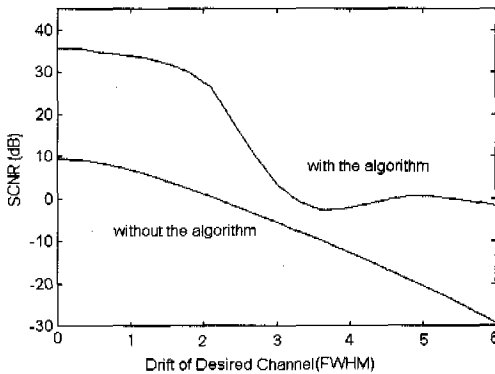


그림 7. 레이저 주파수 편이에 따른 출력 신호의 SCNR.

이러한 시뮬레이션을 통하여 적응형 배열 알고리즘을 이용함으로써 SCNR의 향상과 광원의 주파수 편이에 대한 보상이 이루어지는 것을 볼 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 WDM 시스템에서 발생하는 누화를 최소화하기 위하여 적응형 배열 알고리즘을 사용하였고, 이때 문제가 되는 알고리즘 처리 속도에 대한 대책으로 표본화 처리를 제안하였다. 또한 파일럿 신호를 사용하여 알고리즘을 블라인드하게 처리할 수 있도록 하였다.

본 논문에서 제안하고 있는 방법을 사용함으로써

SCNR이 향상되는 것과 동일한 성능을 요구하는 시스템에서 채널용량을 늘릴 수 있는 것을 시뮬레이션을 통하여 보여주고 있다. 또한 광원 레이저의 주파수 편이를 추적하여 보상하는 것을 보여주고 있다.

참고 문헌

- [1] A. M. Hill and D. B. Payne, "Linear crosstalk in wavelength division multiplexed optical fiber transmission systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 643-651, June 1985.
- [2] P. A. Kirkby, "Multichannel grating demultiplexer receivers for high density wavelength systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, pp. 208-211, 1990.
- [3] C. Dragone, C. A. Edwards, and R. C. Kistler, "Integrated optics $N \times N$ multiplexer on silicon," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, pp. 813-815, 1991.
- [4] J. B. D. Soole, *et al.*, "Monolithic InP/In-GaAs/InP grating spectrometer for the 1.48-1.56 μm wavelength range," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, pp. 1949-1951, 1991.
- [5] J. Salz, "Digital transmission over cross-coupled linear channels," *AT&T Tech. J.*, vol. 64, no. 6, pp. 1147-1159, July-Aug. 1985.
- [6] M. J. Minardi and M. A. Ingram, "Adaptive crosstalk cancellation in dense wavelength division multiplexed networks," *Electron. Lett.*, vol. 28, pp. 1621-1622, 1992.
- [7] 김태선, 서철현, "High speed WDM 시스템에서 적응 배열을 이용한 누화의 최소화," 한국통신학회논문지, vol. 23, no. 12, 1998.
- [8] L. J. Griffiths, "A Simple Adaptive Algorithm for Real-Time Processing in Antenna Arrays," *Proc. IEEE*, vol. 57, no. 10, Oct. 1969
- [9] Sidney P. Applebaum, "Adaptive Arrays," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-24, no.5, Sept. 1976.
- [10] J. E. Hudson, "Adaptive Array principles," Artech House, 1989.

김 태 선(Taesun Kim)
제23권 제12호 참조

학생회원

서 철 현(Chulhun Seo)
제23권 제1호 참조

정회원