

엑세스 잡음 억압에 의한 광센서 네트워크에서의 동시 접속 가능한 광센서 수량의 증가

박 상 조*

Improvement of Number of Sensors Simultaneously Connected to Optical Sensor Network Using Frequency domain Optical CDMA with Excess Noise Suppression

Sang Jo Park *

요 약

주파수 영역 광 CDMA 방식에 의한 광센서 네트워크에서 접속 가능한 광센서의 수량을 증가시키기 위하여 이득 포화 증폭기를 사용하여 액세스 잡음을 억압한다. 시뮬레이션 분석을 통하여 제안 광센서 네트워크에서 광센서의 스위핑 주파수를 10MHz이하로 설정하고 이득 포화 증폭기의 이득을 증가시키면 액세스 잡음이 억압되고, 동시에 접속 가능한 광센서의 수가 종래의 방식에 비해 대폭으로 개선되는 것을 알 수 있다. 요구 SNR이 20dB이고 광센서의 스위핑 주파수가 10KHz일 경우 이득 포화 증폭기의 이득을 10dB로 설정하면 동시에 접속 가능한 광센서의 수가 종래의 방식에 비해 4배 이상으로 개선되는 것을 알 수 있다.

Abstract

I propose the excess noise suppressed optical sensor network using optical CDMA with gain saturated optical amplifier in order to increase number of sensors simultaneously connected to network. Simulation analyses confirm that the maximum number of sensors simultaneously connected to the optical sensor network can be largely increased by increasing the gain of gain saturated optical amplifier owing to the spression of access noises with the assignment of sweeping frequency of optical sensors within 10MHz. In the case of the requested SNR of 20dB and the sweeping frequency of 10KHz, the maximum number of sensors simultaneously connected to the optical sensor network can be increased four times as many as the conventional system.

▶ Keyword : PN 부호(PN sequence code), 광 센서 네트워크(Optical sensor network), 주파수 영역 광 CDMA(Frequency domain optical CDMA), 액세스 잡음(Acess noise), 간섭(Interference), 이득포화 증폭기(Gain Saturated Optical Amplifier)

• 제1저자 : 박상조

• 접수일 : 2007.11.23, 심사일 : 2007.11.27, 심사완료일 : 2007.12.15.

* 서원대학교 교수

1. 서론

CDMA(Code Division Multiple Access)에 의한 주파수 확산 방식은 부호에 의해 주파수 영역에서 확산 및 역확산을 수행하기 때문에 잡음에 강하고 보안성이 우수하기 때문에 무선통신분야에서는 널리 응용되고 있다 [1] -[3]. 광 네트워크 분야에서의 응용은 크게 시간 영역 CDMA 방식과 광주파수 영역에서 CDMA를 수행하는 광 주파수 영역 CDMA 방식이 연구 되고 있다. [4]-[6].

유비쿼터스를 실현하기 위한 광 네트워크에서 광 센서가 널리 응용되고 있다.[7][8]. 광 센서를 사용한 광 네트워크인 경우 전기 센서를 사용한 네트워크에 비해 전자파의 영향이 없고, 한 개의 광섬유에 여러 개의 광센서를 연결할 수 있으며, 광섬유의 저손실성과 광대역성이 뛰어나 장거리 신호 전송이 탁월하다는 장점이 있다.

PN (Pseudorandom Noise)를 사용하고 양극성 상관 수신기에서 센서간 간섭잡음을 완전히 제거할 수 있는 시간 영역 광 CDMA 방식을 사용한 광센서 네트워크가 제안되었다 [9]. 시간영역 광 CDMA 방식을 이용한 센서 네트워크는 광 주파수 영역 CDMA 방식에 비해 송신기 및 수신기 사이의 비트 동기 문제를 해결해야 한다. 그리고 광 지연기의 지연이 PN 부호의 칩폭보다 크게 되면 센서간 간섭잡음을 완전히 제거할 수 있으나, 광신호간 비트 잡음이 잡음전력을 지배하기

때문에 신호 전력 대 잡음 전력을 개선하기 위하여 광신호간 비트 잡음의 제거라는 문제점을 가지고 있다.

시간영역 광 CDMA 방식을 이용한 센서 네트워크의 단점을 해결하기 위하여 PN 부호를 사용하고 양극성 상관 수신기에서 센서간 간섭잡음을 완전히 제거할 수 있는 주파수 영역 광 CDMA 방식을 이용한 센서 네트워크를 제안하였다 [10]. 주파수 영역 광 CDMA 방식을 이용한 센서 네트워크에서는 광대역의 광원을 사용하고, FBG(fiber Bragg grating)와 AWG(arrayed waveguide)를 사용한 주파수 영역 광 CDMA 방식에서는 액세스 잡음이 잡음 전력을 지배하여 동시에 접속 가능한 센서의 수량이 제한되는 단점이 있다.

본 논문에서는 주파수 영역 광 CDMA 방식에 의한 광센서 네트워크에서 PN 부호와 평형 포토 다이오드를 사용하여 간섭잡음을 완전히 제거하고, 이득 포화 증폭기를 사용하여 잡음 전력을 지배하는 액세스 잡음을 억압하여 동시에 접속 가능한 광센서의 수량을 증가시키고자 한다.

II. 액세스 잡음 억압에 의한 주파수 영역 광CDMA 방식을 이용한 광센서 네트워크

액세스 잡음 억압에 의한 주파수 영역 광CDMA 방식을 이용한 광센서 네트워크의 구성도는 (그림 1)과 같다.

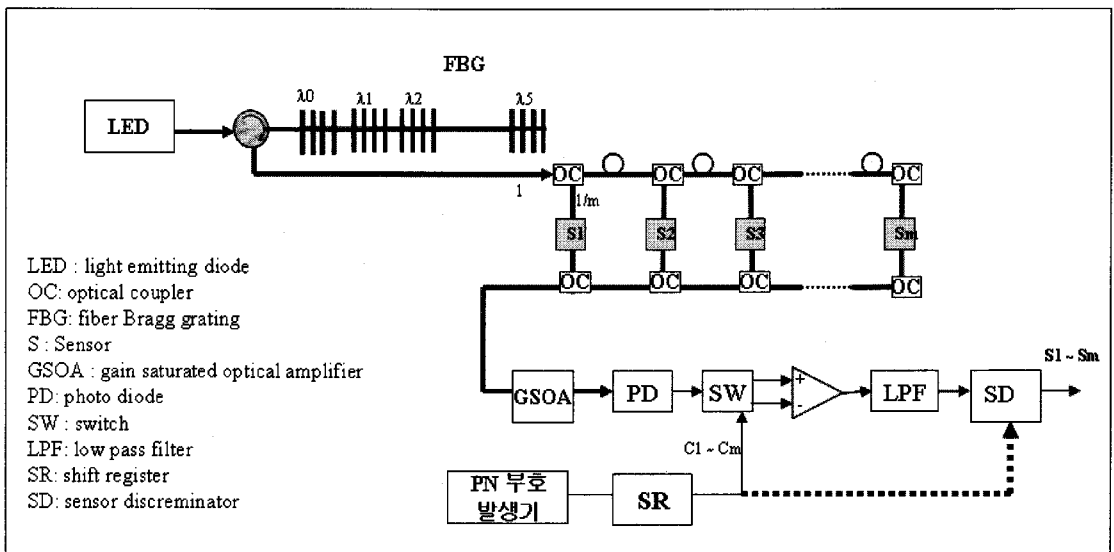


그림 1 액세스 잡음 억압에 의한 주파수 영역 광CDMA 방식을 이용한 광센서 네트워크의 구성도
Figure 1. configuration of optical sensor network using frequency domain optical CDMA by suppression of access noise

광원으로 수백 MHz의 선폭을 가진 LED를 사용하고, FBG 와 광서클레이터를 이용하여 광주파수 영역에서 PN 부호를 인코딩한다. 부호장이 7일 경우 '1'의 개수가 짝수가 되도록 (표 1)과 같이 한 개의 PN 부호 계열(1,1,1,0,0,1)를 생성하고, 한 칩씩 이동시켜 부호장 만큼 PN 부호를 생성한다. 그리고 PN 부호의 '1'에 대하여 FBG의 파장 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_5$ 를 그레이팅한다. 그리고 FBG에 반사되는 파장 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_5$ 이 광서클레이터를 통하여 광커플러(OC)에 전송된다. OC는 $(1-1/m) : (1/m)$ 의 광분기이며, 각 센서 사이에 있는 광 지연기는 지연시간이 PN 부호의 칩폭과 일치하도록 설정한다. 따라서 센서 S_1, S_2, \dots, S_m 로 입력되는 신호는 광 주파수영역에서 PN 부호에 의해 인코딩되어 지며, 광소자의 손실 전력을 무시하면 광서클레이터 출력 전력의 $1/m$ 이 된다. 잠음 전력을 지배하는 엑세스 잠음을 억압하기 위하여 이득 포화 증폭기[GSOA: gain saturated optical amplifier]를 삽입하였다. 센서에 대응하는 PN 부호가 '1' 일 경우 스위치(SW)의 상단으로, '0'일 경우 스위치(SW)의 하단으로 출력하여 감산기 및 저역통과필터(LPF)를 거친다. 다른 센서와의 간섭전력은 '1'의 개수가 짝수이고 [표 1]과 같이 한 개의 칩이 이동된 부호이기 때문에 감산기 및 저역통과필터(LPF)를 거치면 완전히 제거된다. 예를 들어 시프트레지스터의 부호가 C3일 경우, 광센서 중에서 S3을 제외한 광센서의 출력은 감산기 및 저역통과필터(LPF)에서 0이 되고, 광센서 S3의 출력만 검출된다. 따라서 PN 부호발생기의 출력을 시프트하면서 센서 판정기에서 동작하는 광센서의 출력을 검출할 수 있다.

표 1. 광센서에 대응하는 PN 부호
Table 1. PN codes corresponded to optical sensors

Sensor No.	PN Code	
1	1 1 1 0 0 1 0	PN code 1, C Shifted code From PN code 1 C'
2	1 1 0 0 1 0 1	
3	1 0 0 1 0 1 1	
4	0 0 1 0 1 1 1	
5	0 1 0 1 1 1 0	
6	1 0 1 1 1 0 0	
7	0 1 1 1 0 0 1	

III. 잠음 전력 분석 및 이득 포화 증폭기를 이용한 잠음 억압

j 번째 광 센서가 동작하여 광지연기를 거쳐 입력된 광

CDMA 신호는 다음과 같다.

$$os_j(t) = P_s \cdot c_j(t) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 P_s 는 송신 광전력의 피크치이다. j 번째 광센서가 동작하면, 광CDMA 신호 os_j 는 이득 포화 증폭기를 통과하여 포토 다이오드에서 전기신호로 검출된다. 그리고 아날로그 스위치에서 j 번째 광센서에 대응하는 PN 부호 $c_j(t)$ 로 디코딩하면 아날로그 스위치의 상측에서만 신호가 검파된다. LPF에 입력되는 신호는 다음과 같다.

$$i_{s_j} = i_1 - i_2 = \alpha P_r \sum_{k=1}^L c_j(k) \dots\dots\dots (2),$$

여기서 P_r 은 수신 광 전력의 피크치이고, α 과 L 은 각각 포토다이오드의 반응도와 PN 부호장이다. 수신 광 전력의 피크치는 다음과 같이 주어진다.

$$P_r = \frac{P_s \cdot G_{SOA}}{M} \dots\dots\dots (3),$$

여기서 M 과 G_{SOA} 는 각각 접속된 광센서 수와 이득 포화 증폭기의 이득이다. 따라서 LPF에 의하여 검출된 신호 전력성분은 다음과 같다.

$$S = i_s^2 = \left(\alpha P_r \frac{L+1}{2L} \right)^2 \dots\dots\dots (4).$$

j 번째외의 광센서가 동작하여 입력된 광CDMA 신호 $os_i (i=1, \dots, M, i \neq j)$ 는 SOA를 통과하여 포토 다이오드에서 전기 신호로 검출된다. 그리고 아날로그 스위치에서 j 번째 광센서에 대응하는 PN 부호 $c_j(t)$ 로 디코딩하면 아날로그 스위치의 상측과 하측에서 동시에 검파하게 된다. 검파된 상하측 아날로그 스위치간의 감산된 전류신호는 다음과 같다.

$$i_l = i_1 - i_2 = \alpha P_r \sum_{k=1}^L c_i(k) (c_j(k) - \overline{c_j(k)}) \dots\dots\dots (5).$$

아날로그 스위치의 상측과 하측으로 출력되어지는 칩의 개수가 항상 같기 때문에 상하측 아날로그 스위치간의 감소된 전류신호는 0이 되어, 간섭 전력성분은 다음과 같다.

$$I = \sum_{i=1, j \neq i}^M i_{iy}^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (6).$$

가산적 잡음의 전력성분은 상대강도잡음, 쇼트 잡음, 열 잡음, 자연방출광 대 신호공간 비트잡음 그리고 자연방출광 간 비트잡음 등으로 구성된다. 즉 가산적 잡음의 전력성분은 다음과 같이 주어진다.

$$N = N_{RIN} + N_{SHOT} + N_{TH} + N_{EX} + N_{SSP} + N_{SPSP} \dots\dots\dots (7).$$

상대강도잡음 N_{RIN} , 쇼트 잡음 N_{SHOT} , 열 잡음 N_{TH} , 자연방출광 대 신호공간 비트잡음 N_{SSP} 그리고 자연방출광 간 비트잡음 N_{SPSP} 는 각각 다음과 같이 주어진다. (11)-(13).

$$N_{RIN} = \xi_{RIN} \left(\alpha P_r \frac{L+1}{2L} \right)^2 B_w \quad \dots\dots\dots (8),$$

$$N_{SHOT} = 2e\alpha \left(P_r \frac{L+1}{2L} + MN_{sp} \right) B_w \quad \dots\dots\dots (9),$$

$$N_{TH} = \frac{8K_B T}{R_L} B_w \quad \dots\dots\dots (10),$$

$$N_{ssp} = 4\alpha^2 \left(P_r \frac{L+1}{2L} \right) MN_{sp} B_w \quad \dots\dots\dots (11),$$

$$N_{spsp} = 2\alpha^2 M^2 N_{sp}^2 B_w \quad \dots\dots\dots (12),$$

여기서 e , ξ_{RIN} , k_B , T , B_w , $\Delta\nu$ 그리고 W 은 각각 전하, 상대강도 잡음의 전력스펙트럼밀도, 볼츠만 상수, 부하저항, 잡음온도, 광센서의 스위핑 주파수, LED 선풍 그리고 광 필터의 대역폭이다.

자연방출광의 PSD(Power Spectral Density)는 다음

과 같이 주어진다 [17].

$$N_{sp} = \frac{\eta_{sp}}{\eta_a} \frac{10^{G_{SOA}/10} - 1}{10^{G_{SOA}/10}} h\nu \quad \dots\dots\dots (13),$$

여기서 η_{sp} , η_a , G_{SOA} [dB] 그리고 $h\nu$ 은 각각 SOA의 자연방출 계수, 양자효율, 이득 그리고 광자 에너지이다.

일반적으로 광대역의 광원을 사용한 광통신 시스템에서 액세스 잡음을 제거하는 방법으로 광학적으로 보상하는 피드 포워드 보상 기법 [14], 이득의 귀환 제어 방식[15] 및 이득 포화 증폭기 [16] 등을 사용하여 억압하는 방식이 제안되어 왔다.

이득 포화 증폭기의 입력 특성은 (그림 2)와 같이 나타낼 수 있으며, 포화영역을 이용하여 액세스 잡음을 억압하게 된다.

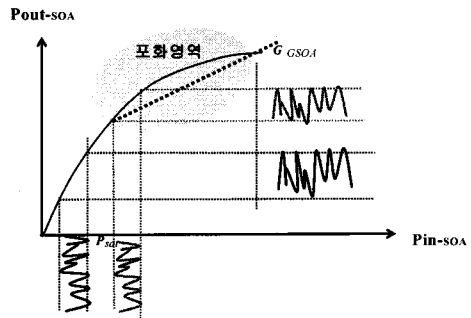


그림 2. 이득 포화 증폭기의 포화영역을 이용한 액세스 잡음의 억압
Figure 2. suppression of access noises by gain saturated optical amplifier

액세스 잡음 N_{EX} 은 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$N_{EX} = A_{EX} \times \left(\alpha P_r \frac{L+1}{2L} \right)^2 (M^2 + 1) \frac{2B_w}{\pi\Delta\nu} \quad \dots\dots\dots (14),$$

여기서 A_{EX} 는 이득 포화 증폭기의 포화영역을 이용한 액세스 잡음의 감쇄율로 다음과 같이 주어진다 [17].

$$A_{EX} = \frac{\left(\frac{P_{in-SOA}}{P_{sat}} \right)^2 + (2\pi B_w \tau_s)^2}{\left(\frac{P_{out-SOA}}{P_{sat}} \right)^2 + (2\pi B_w \tau_s)^2} \quad \dots\dots\dots (15),$$

여기서 P_{in_SOA} , P_{out_SOA} , P_{sat} 및 τ_s 는 각각 이득 포화 증폭기의 입력 전력, 출력 전력, 포화 전력 및 캐리어 수명시간을 나타낸다. 이득 포화 증폭기는 입출력 특성 곡선은 [그림 2]와 같이 비선형이나 이론적 분석을 위해 이득 포화 증폭기의 이득을 선형화하여 적용한다.

따라서 신호 대 잡음전력, SNR은 다음과 같이 나타낸다.

$$SNR = \frac{S}{N} \dots\dots\dots (16).$$

IV. 프로그램에 의한 시뮬레이션 분석

분석한 잡음 전력을 프로그램에 의한 시뮬레이션에 [표 2]의 변수를 사용하여 시뮬레이션 분석을 수행한다.

표 2. 시뮬레이션 분석에 사용한 변수
Table 2. parameters used simulation analysis

Responsivity of PD α	0.8 A/W
PSD of relative intensity noise $\frac{\sigma}{RIN}$	-152 dB/Hz
Load resistance R_L	1K Ω
Sweeping frequency of sensors B_w	10KHz
Noise temperature T	300 K
Optical filtering bandwidth W	1THz
Spontaneous emission factor of GSOA η_{sp}	2.0
Quantum efficiency of GSOA η_o	0.5
Saturation power of GSOA P_{sat}	5dBm
Gain of GSOA G_{GSOA}	5~15dB
Line width of LED $\Delta\nu$	100MHz
Optical transmitted power of LED P_r	0dBm
Carrier lifetime of GSOA	200ps

시뮬레이션에 사용된 주요 변수는 LED 반응도 0.8A/W, 수신 포토다이오드의 부하저항 1K 옴, 센서의 스위핑 주파수 100KHz, LED의 선폭 100MHz, LED의 송신 전력 0dBm, 그리고 GSOA의 캐리어 수명시간이 200ps이다.

[그림 3]은 주파수 영역 광 CDMA 방식에 의한 광센서 네트워크에서 간섭잡음을 완전히 제거하였으나 이득 포화 증폭기를 사용하지 않아 액세스 잡음이 억압되지 않았을 경우, 접속된 광센서와 SNR의 관계를 나타내고 있다.

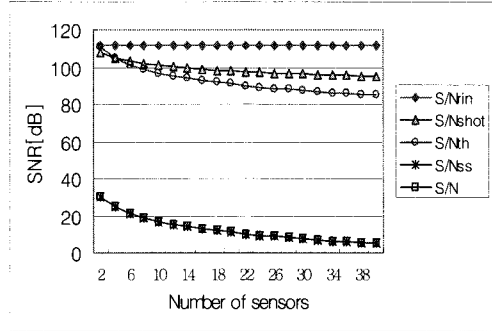


그림 3. 액세스 잡음이 억압되지 않았을 경우 광센서의 수와 SNR의 관계
Figure 3. relationship between the number of sensors and SNR without GSOA

잡음전력은 상대강도잡음 N_{RN} , 쇼트 잡음 N_{SHOT} , 열 잡음 N_{TH} , 자연방출광 대 신호공간 비트잡음 N_{SSP} , 자연 방출광간 비트잡음 N_{SPSP} 그리고 액세스 잡음 N_{EX} 으로 구성되는데, 액세스 잡음이 잡음 전력을 지배하는 것을 알 수 있다. 종래의 주파수 영역 광CDMA 방식에 의한 광센서 네트워크에서 요구 SNR이 20dB일 경우 동시에 접속 가능한 광센서의 수는 5개로 제한되는 것을 알 수 있다.

[그림 4]는 이득 포화 증폭기의 이득을 변화시키면서 포화영역을 이용한 액세스 잡음의 감쇄율과 센서의 스위핑 주파수와와의 관계를 나타내고 있다.

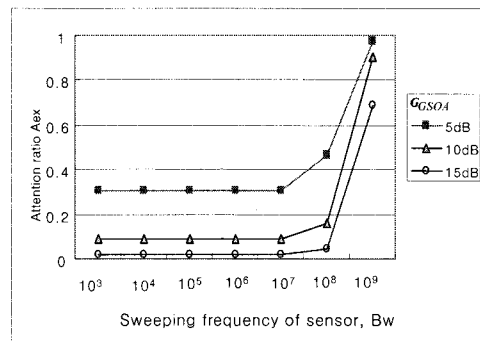


그림 4. 이득 포화 증폭기의 포화영역을 이용한 액세스 잡음의 감쇄율과 스위핑 주파수와의 관계
Figure 4. relationship between the access noise attenuation ratio and the sweeping frequency of sensors by gain saturated optical amplifier

캐리어 수명시간이 200ps이므로 광센서의 스위핑 주파수가 10MHz이하일 경우 액세스 잡음의 감쇄율이 일정하다는 것을 알 수 있다. 한편 광센서의 스위핑 주파수가

10MHz이상으로 증가하면 액세스 잡음의 감쇄율이 악화되어 효과적인 액세스 잡음전력의 억압이 어려워진다. 따라서 주파수 영역 광CDMA 방식에 의한 광센서 네트워크에서 광센서의 스위핑 주파수가 10MHz이하로 설정할 경우 이득 포화 증폭기의 이득을 증가시키면 액세스 잡음의 감쇄율이 작아져 액세스 잡음을 억압할 수 있다는 것을 알 수 있다.

[그림 5]는 이득 포화 증폭기의 이득을 변화시키면서 제안 네트워크에 접속된 광센서와 SNR의 관계를 나타내고 있다.

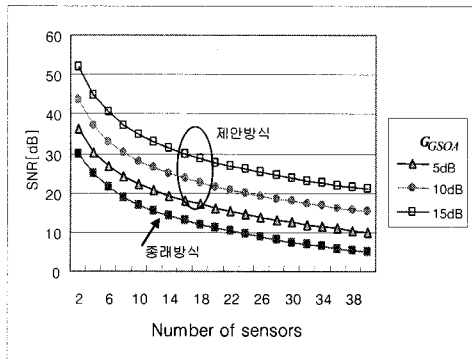


그림 5. 광센서 네트워크에 접속된 광센서와 SNR의 관계
Figure 5. relationship between the number of sensors and SNR

이득 포화 증폭기의 포화영역을 이용한 액세스 잡음의 억압으로 SNR이 향상된다. 네트워크에 접속된 센서의 수가 20일 경우 SOA의 이득이 5, 10, 15dB이면 SNR이 각각 6, 11, 27dB가 향상되는 것을 알 수 있다. 그리고 광센서 네트워크에서 요구 SNR이 20dB일 경우 이득 포화 증폭기의 이득을 10dB로 설정하면 동시에 접속 가능한 광센서의 수가 22개이고, 종래의 방식에 비해 4배 이상으로 개선되는 것을 알 수 있다.

[그림 6]은 광센서 네트워크의 요구 SNR이 20dB일 경우 광센서의 스위핑 주파수에 대하여 동시 접속 가능한 광센서의 수를 나타내고 있다.

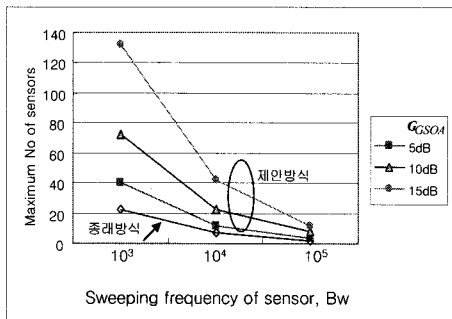


그림 6. 광센서의 스위핑 주파수에 대하여 동시 접속 가능한 센서의 수 (SNR이 20dB)

Figure 6. the maximum number of sensors simultaneously connected to network versus the sweeping frequency of sensors

광센서 네트워크에서 요구 SNR이 20dB일 경우 광센서의 스위핑 주파수가 10KHz일 경우 이득 포화 증폭기의 이득이 5, 10, 15dB이면 각각 12, 22, 42개의 광센서가 동시에 접속이 가능하다. 한편 종래의 방식인 경우 접속 가능한 광센서의 수는 6개로 제한되는 것을 알 수 있다.

V. 결론

광센서 네트워크에서 접속 가능한 광센서의 수량을 증가시키기 위하여 이득 포화 증폭기를 적용하여 잡음 전력을 지배하는 액세스 잡음을 억압하는 주파수 영역 광 CDMA 방식에 의한 광센서 네트워크를 제안하였다.

시뮬레이션 분석을 통하여 광센서의 스위핑 주파수가 10MHz이하로 설정할 경우 이득 포화 증폭기의 이득을 증가시키면 액세스 잡음의 감쇄율이 작아져 액세스 잡음을 억압할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

그리고 제안 광센서 네트워크에서 요구 SNR이 20dB이고 광센서의 스위핑 주파수가 10KHz일 경우 이득 포화 증폭기의 이득을 10dB로 설정하면 동시에 접속 가능한 광센서의 수가 종래의 방식에 비해 4배 이상으로 개선되는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] K. Kikuchi and Y. Takushima, "Spread spectrum in optical fiber communications", Tech. Report of IEICE,SS93-41, OCS94.71, pp1-6, March 1994.
- [2] G. Vannucci and S. Yang, "Experimental spreading and dispreading of the optical spectrum", IEEE Trans. Commun., vol.37, no.7, pp777-780, 1989.
- [3] K. Kitayama, H. Satobayashi and N. Wada, "Optical code division multiplexing(OCDM) and its application to photonics networks", IEICE Trans. On Fundam.,vol.82-A, no.12, 1999, pp.2616-2626.

- [4] S. J. Park, K. Tsukamoto and S. Komaki, "Proposal of direct optical switching CDMA for Cable-To-The-Air system and its performance analysis", IEICE Trans. On Commun., vol.81-B, no.6, 1998, pp.1188-1196.
- [5] F. Khaleigh and M. Kavehrad, "A new correlator receiver architecture for noncoherent optical CDMA networks with bipolar capacity", IEEE Trans. On Commun., vol.44, no.10, Oct. 1996, pp.1335-1339.
- [6] S. J. Park, B. Kim, C. Park, "Performance enhancement using the bipolar capacity of bipolar coded fiber Bragg gratings and balanced detection in the spectral encoded code-division-multiple-access systems", Optics Communications, vol.230, pp319-324, Feb., 2004.
- [7] 오세백, 김경찬, 김수현, 곽윤근, "초정밀 광학식 변위 측정을 위한 센서 구호 및 신호 처리 시스템", 한국정밀 공학회지, 1225-9071, 제18권8호, pp.40-47, 2001.
- [8] 신대정, 이승유, 김진영, "광 센서에 기반한 동하중의 측정 및 잡음 감소", 한국정보처리학회논문지C, 1598-2858, 제12C권4호, pp.519-524, 2005.
- [9] 박상조, 김봉규, "간접잡음을 억압한 양극성 수신기와 PN 부호에 의한 광 CDMA 방식을 사용한 센서 네트워크", 한국정보처리학회논문지:정보통신, 제14권-C권 pp311-316, 2006. 6.
- [10] 김봉규, 박상조, 박혁, 김광준, "부호분할 방식 광 센서 네트워크의 특성분석", Photonics conference, 2005.
- [11] K. Kikuchi and Y. Takushima, "Spread spectrum in optical fiber communications", Tech. Report of IEICE,SS93-41, OCS94.71, pp1-6, March 1994.
- [12] S. Park, K. Tsukamoto, and S. Komaki, "Polarity-reversing type photonic receiving scheme for optical CDMA signal in radio highway", IEICE Trans. Electron., vol. 81-C, no.3, pp462-467, 1998.
- [13] S. Park, B. Kim and B. Kim, "An OCDMA scheme to reduce multiple access interference and enhance performance for optical subscriber access networks", ETRI Journal, vol. 26, no. 1, pp13-20, Feb. 2004.
- [14] A.J. Keating, and D. D. Sampson, "Reduction of Excess Intensity Noise in Spectrum-Sliced Incoherent Light for WDM Applications", IEEE J. of Lightwave Tech., vol.15, no.1, pp53-61, 1997.
- [15] A. M. Yurek, H. F. Taylor, L. Goldberg, J. F. Weller, and A. Dandridge, "Quantum Noise in Superluminescent Diodes", IEEE J. of QE, vol.QE-22, no. 4, pp522-526, 1986.
- [16] P. Healey, P. Townsend, C. Ford, L. Johnston, P. Townley, I. Lealman, L. Rivers, S. Perrin and R. Moore, "Spectral slicing WDM-PON using wavelength-seeded reflective SOAs", Electron. Lett., vol.37, no. 19, pp1181-1182, 2001.
- [17] F. Koyama, et.al., International conference on Indium Phosphide and related materials 2000, p439.

저자소개



박상조

1983년 2월 서울대학교 제어계측공학과(학사)
 1985년 2월 서울대학교 대학원 제어계측공학과(공학석사)
 1999년 3월 일본 오사카대학 통신공학(공학박사)
 1984년~1991 삼성전자 종합연구소 선임연구원
 1995년~1996년 오사카대학 연구생
 1992년~2000년 한국전자통신연구원 선임연구원
 2003년~2006년 한국전자통신연구원 초빙책임연구원
 2007년 캐나다 빅토리아대학교(UVIC) 객원교수
 2000년~현재 서원대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수
 <관심분야> 광무선 액세스 네트워크, 광 CDMA 방식, 센서네트워크