

CSRZ 신호의 클럭 성분을 이용한 색분산 감시법에서 송수신단 대역폭의 영향 분석

김성만*

Bandwidth Effect on the Dispersion Monitoring of CSRZ Signal Based on Clock Component

Sung-Man Kim*

요 약

광통신 시스템에서는 제한된 대역폭에서 최상의 성능을 얻기 위해 다양한 신호형태가 사용되고 있다. 그 중에서도 CSRZ (carrier-suppressed return-to-zero) 신호는 스펙트럼 효율이 높으면서도 색분산에 대해 비교적 강인한 특성을 지니고 있어 많이 사용되고 있다. 우리는 이러한 CSRZ 신호의 중요성을 파악하고, 이전의 연구에서 CSRZ 신호의 클럭 (clock) 성분을 이용하여 색분산을 감시하는 방법을 제시한 바가 있다. 하지만, 클럭 성분을 이용하여 색분산을 감시하는 방법은 송수신단의 대역폭에 의해 그 영향을 받을 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 CSRZ 신호에서 송수신단의 대역폭이 클럭 성분을 이용한 색분산 감시법에 미치는 영향을 분석하고, 송수신단의 대역폭이 변하더라도 그 성능이 유지될 수 있는 강인한 클럭 추출법을 제시한다.

ABSTRACT

In optical fiber communications, several newly-developed signal formats are used to obtain the best performance within limited spectral bandwidth. CSRZ (carrier-suppressed return-to-zero) format is one of the new signal formats, which has better spectral efficiency and better robustness to dispersion than RZ (return-to-zero) format. Thus it is widely used for demonstrating high-speed optical communication systems. In an earlier research, we proposed a clock-extraction method of CSRZ signal to monitor chromatic dispersion. However, the clock-frequency component extracted by the clock-extraction method can be affected by the bandwidth of a transmitter or a receiver. Therefore, in this paper, we investigate the effect of bandwidth on the chromatic dispersion monitoring of CSRZ signal based on clock-frequency component. As a result, we propose a couple of robust clock-extraction methods to monitor chromatic dispersion in CSRZ signal.

키워드

CSRZ(carrier-suppressed return-to-zero), Chromatic Dispersion Monitoring, Clock-frequency Component, Bandwidth
CSRZ(carrier-suppressed return-to-zero), 색분산 감시, 클럭 주파수 성분, 대역폭

* 교신저자(corresponding author) : 경성대학교 전자공학과(sungman@ks.ac.kr).
접수일자 : 2013. 6. 28

심사(수정)일자 : 2013. 08. 23

게재 확정일자 : 2013. 09. 23

1. 서 론

채널당 수십 Gb/s 이상의 전송속도를 가지는 광통신 시스템에서는 광신호에 누적되는 색분산 (Dispersion)의 영향을 실시간으로 감시하고 이를 보상하는 일이 중요하다[1-3]. 이를 위하여 지금까지 색분산을 감시하기 위한 다양한 방법들이 연구되어 왔다[4-8]. 그 중에서도 광신호의 클럭(clock) 주파수 성분을 이용한 방법[8]은 광신호의 데이터 속도에 해당하는 주파수 성분(보통 클럭 주파수라고 지칭됨)을 추출하여 이것의 크기로 색분산을 감시하는 방법으로, 송신단에서 별도의 부가적인 변조가 필요없고 수신단에서 클럭 성분만 추출하면 되는 장점을 가지고 있다.

우리는 클럭 성분을 이용한 색분산 감시법의 중요성을 파악하고, 시뮬레이션 연구를 통해 광통신에서 널리 사용되는 NRZ(non return-to-zero) 신호형태에서 색분산 감시에 적합한 클럭 추출법을 제시한 바가 있다[9]. 추후에는 이에 대한 이론적인 수식을 유도하고, 실험결과도 보여 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성을 검증한 바가 있다[10]. 또한, 추가적인 연구를 통하여 편광모드분산 (PMD, polarization-mode dispersion)이 클럭 성분을 이용한 색분산 감시방법에 미치는 영향을 분석하기도 하였다[11].

한편, 클럭 성분을 이용한 색분산 감시방법은 신호 형태에 따라 다른 결과를 보일 수 있기 때문에, 우리는 광통신에서 새롭게 등장한 CSRZ (carrier-suppressed return-to-zero)신호형태에 대해서도 클럭 성분을 이용한 색분산 감시방법을 연구하고, 색분산 감시에 가장 적합한 클럭 추출법을 제시한 바가 있다[12].

하지만, 클럭 성분을 이용한 색분산 감시방법은 송/수신단의 대역폭에 따라 그 특징이 달라질 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 CSRZ 신호형태에 대하여 송/수신단의 대역폭이 클럭 성분을 이용한 색분산 감시방법에 미치는 영향을 분석하고, 대역폭의 변화에 강한 클럭 추출법을 제시하고자 한다.

II. CSRZ 신호의 클럭 추출법

CSRZ 신호의 클럭 추출과정을 그림 1에 나타내었다[12]. 그림 1에서 나타내었듯이 CSRZ 신호의 클럭

추출법은 3 가지 단계로 구성되어 있다. 첫 번째 과정은 스펙트럼 처리과정(spectrum processing)으로, 수신된 광신호의 스펙트럼을 주파수에 따라 상쇄/보강 간섭을 하는 과정이다. 이 과정은 수신신호 $r(t)$ 를 그대로 통과시키는 방법, $r(t)$ 와 이를 반 비트만큼 지연시킨 신호 $r(t-T/2)$ 를 빼는 $r(t) - r(t-T/2)$ 방법, 그리고 수신신호와 반 비트만큼 지연시킨 신호를 더하는 $r(t) + r(t-T/2)$ 방법 등 총 세 가지 방법이 있다 (여기에서 T 는 한 비트에 해당하는 시간을 뜻한다). 이러한 세 가지 스펙트럼 처리 방법에 따른 보강/상쇄 효과를 그림 2에 나타내었다.

클럭 추출법의 두 번째 과정은 비선형 처리과정 (nonlinear processing)으로서 스펙트럼 성분들 사이의 비팅(beatting)을 유도하여 클럭 주파수 성분을 만들어 내는 과정이다. 이는 스펙트럼 처리과정을 거친 신호 x 를 그대로 통과시키는 방법, 이를 제곱하는 x^2 방법, 다이오드 함수 $D(x)$ (0 이상인 부분만 잘라내는 함수)를 통과시키는 방법, 역다이오드 함수 $RD(x)$ (0 이하인 부분만 잘라내는 함수)를 통과시키는 방법 등 총 4 가지를 고려하였다.

클럭 추출법의 마지막 과정은 협대역 필터(BPF, band-pass filter)로서 전송하는 디지털 광신호의 비트 전송속도(bit rate)에 해당하는 주파수인 클럭 주파수 성분만 추출하는 과정이다. 본 논문에서는 이러한 세 가지 단계를 가진 총 10 가지의 클럭 추출법을 고려하였으며, 이를 표 1에 정리하였다. 표 1에서 10 가지의 클럭 추출법을 각각 M1에서 M10까지의 기호로 표기하였다. 예를 들어, M5로 표기된 방법은 $r(t) - r(t-T/2)$ 의 스펙트럼 처리과정을 거치고, x^2 의 비선형 처리과정을 거친 방법이다.

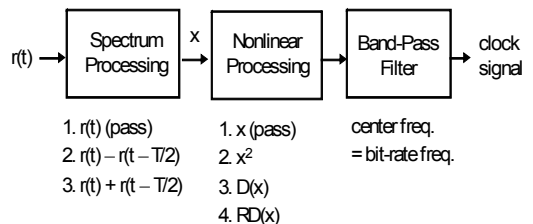


그림 1. CSRZ 신호의 클럭 추출과정
Fig. 1 Clock-extraction step of CSRZ signal

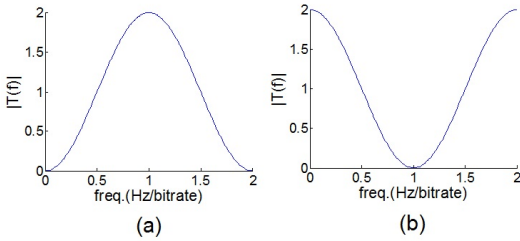


그림 2. 스펙트럼 프로세싱 과정의 효과
 (a) $r(t) - r(t-T/2)$ 및 (b) $r(t) + r(t-T/2)$
 Fig. 2 Effect of the spectrum processing
 (a) $r(t) - r(t-T/2)$ and (b) $r(t) + r(t-T/2)$

표 1. CSRZ 신호의 클럭 추출법
 Table 1. Clock-extraction method of CSRZ signal

Spectrum Processing	Nonlinear Processing	Mark
$r(t)$	X	M1
	X^2	M2
	D(x)	M3
	RD(x)	M4
$r(t) - r(t-T/2)$	X^2	M5
	D(x)	M6
	RD(x)	M7
$r(t) + r(t-T/2)$	X^2	M8
	D(x)	M9
	RD(x)	M10

III. 색분산 감시법의 정의

그림 3은 누적된 색분산에 따라 광신호의 아이페널티(eye-opening penalty, EOP)와 클럭 주파수 성분의 크기를 나타낸 그래프이다. 참고로, 아이페널티란 송수신단에서 신호의 눈열림(eye opening)과 수신단에서의 신호의 눈열림 사이의 상대적인 차이를 dB로 표현한 값이다[12]. 그림에서 보이듯이 일반적으로 색분산이 누적될수록 광신호의 성능이 떨어져서 광신호의 아이페널티가 증가하는 것을 알 수 있으며, 클럭 주파수 성분의 크기는 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 경우에 색분산을 최적으로 보상하기 위해서는 클럭 주파수 성

분의 크기가 최대가 되도록 보상해 주면 된다.

이렇게 클럭 성분을 이용하여 색분산을 감시하는 방법의 성능을 평가하기 위해 색분산 감시방법의 [감시범위]와 [감시감도]를 정의할 수 있다. 색분산의 감시범위란, 클럭 주파수 성분의 크기와 색분산이 1:1 함수가 되는 범위를 뜻하며, 실질적으로 이 범위를 벗어나게 되면 클럭 주파수 성분으로 색분산을 더 이상 감시할 수 없게 된다. 당연히 이 감시범위가 넓을수록 더 좋은 방법이다. 또한, 색분산 감시의 감시감도란, 색분산을 클럭 주파수 성분으로 감시함에 있어서 클럭 주파수 성분의 변화 기울기를 뜻하는 것으로서, 이 기울기가 클수록 색분산을 좀 더 민감하게 감시할 수 있다. 즉, 클럭 성분의 잡음성분을 고려하면, 잡음성분보다 큰 변화가 있을 때에 색분산의 변화를 감지할 수 있으므로, 이 값이 클수록 동일 잡음에 대해 색분산을 더욱 정밀하게 감시할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 이러한 기준을 가지고 색분산 감시방법을 평가하기로 한다. 또한, 여기에 덧붙여서 송/수신단 대역폭 변화에 대해서도 그 영향이 둔감한 클럭 추출법을 선택할 것이다.

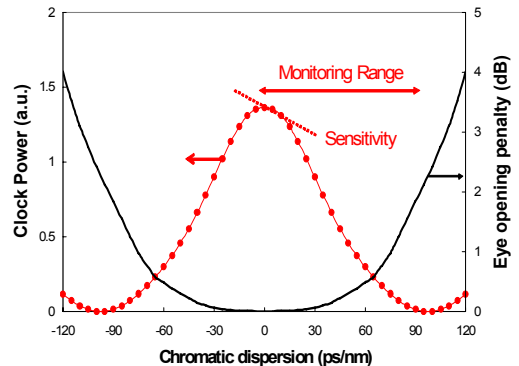


그림 3. 색분산 감시범위와 감시감도의 정의
 Fig. 3 Definition of monitoring range and sensitivity of dispersion monitoring

IV. 송수신단 대역폭 변화에 따른 효과

본 절에서는 표1에서 나타낸 총 10 가지 클럭 추출법에 대해 송/수신단의 대역폭을 변화시켜가면서 색분산의 감시범위와 감시감도를 조사해 보고자 한다.

그림 4(a)는 클럭 추출법 M1에 대해 송신단의 대역폭을 전송속도의 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 배로 변화시켜가면서 색분산에 따른 클럭 성분의 크기를 나타낸 그래프이다. 그림 4(b)는 클럭 추출법 M1에 대해 수신단의 대역폭을 전송속도의 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 배로 변화시켜가면서 색분산에 따른 클럭 성분의 크기를 나타낸 그래프이다. 본 논문에서 고려한 대역폭의 변화량은 실제 시스템이 가질 수 있는 송/수신단의 대역폭의 변화를 고려한 것이다. 송신단의 대역폭을 변화시켰을 때에는 수신단의 대역폭을 전송속도의 0.75 배로 고정시켰고, 수신단의 대역폭을 변화시킬 때에는 송신단의 대역폭을 전송속도의 1.0 배로 고정시켰다. 본 시뮬레이션에서 광신호의 전송속도는 40 Gb/s 를 가정하였다.

마찬가지로 그림 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 은 각각 클럭 추출법 M2, M3, M4, M5/M8, M6, M7, M9/M10 에 대해 송/수신단의 대역폭을 그림 4의 경우와 동일하게 변화시키면서 클럭 성분의 변화를 나타낸 그래프이다. 참고로, M5 와 M8 은 동일한 결과를 나타내고, M9 와 M10 도 동일한 결과를 나타낸다. 따라서, 두 가지 방법을 묶어서 각각 M5/M8 와 M9/M10 로 표기하였다.

그림 4에서 그림 11까지 나타난 모든 결과를 정리하고, 색분산 감시의 감시범위, 감시감도, 대역폭 변화에 따른 강인성 등 세 가지 기준을 바탕으로 색분산 감시의 성능을 정리하여 표 2 에 나타내었다. 표 2에서 알 수 있듯이 색분산 감시의 감시범위, 감시감도, 대역폭 변화에 따른 강인성 등을 모두 종합하면, CSRZ 신호의 색분산 감시를 위해서 클럭 추출법 M5/M8 및 M9/M10 이 적당하다는 것을 알 수 있다.

부가적으로 설명하면, 클럭 추출법 M4 및 M7 은 송/수신단 대역폭 변화에 따라 클럭 주파수 성분의 특징이 심하게 변하여 색분산 감시에 적합하지 않음을 알 수 있다.

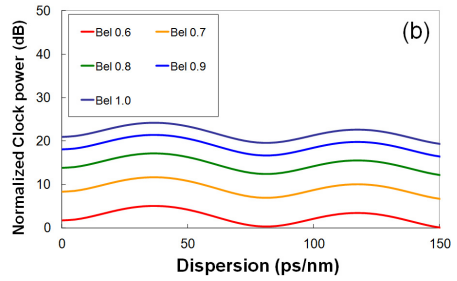
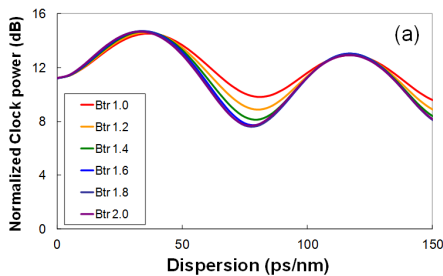


그림 4. 클럭 추출법 M1에 대한 대역폭의 효과 (a) 송신단 대역폭 변화 (b) 수신단 대역폭 변화
Fig. 4 Bandwidth effect on M1 (a) transmitter bandwidth (b) receiver bandwidth

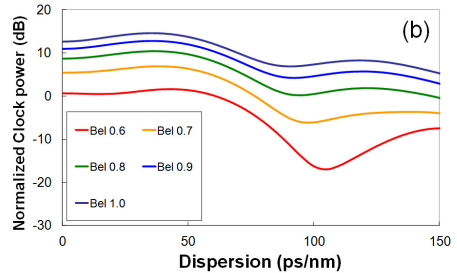
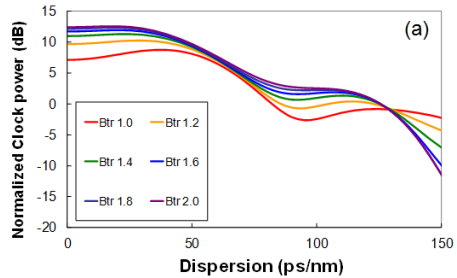
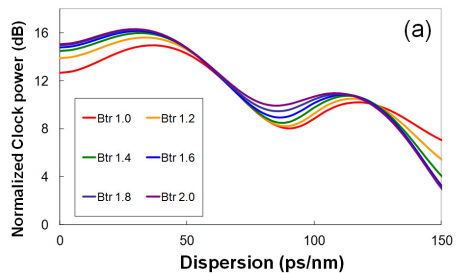


그림 5. 클럭 추출법 M2에 대한 대역폭의 효과 (a) 송신단 대역폭 변화 (b) 수신단 대역폭 변화
Fig. 5 Bandwidth effect on M2 (a) transmitter bandwidth (b) receiver bandwidth



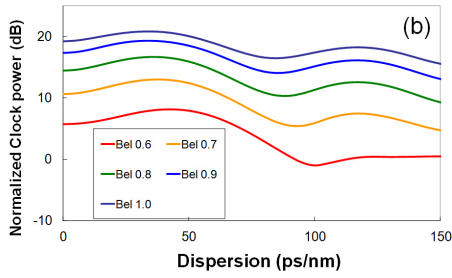


그림 6. 클럭 추출법 M3에 대한 대역폭의 효과
(a) 송신단 대역폭 변화 (b) 수신단 대역폭 변화
Fig. 6 Bandwidth effect on M3
(a) transmitter bandwidth (b) receiver bandwidth

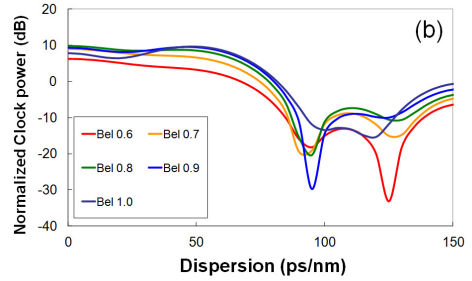


그림 8. 클럭 추출법 M5/M8에 대한 대역폭의 효과
(a) 송신단 대역폭 변화 (b) 수신단 대역폭 변화
Fig. 8 Bandwidth effect on M5/M8
(a) transmitter bandwidth (b) receiver bandwidth

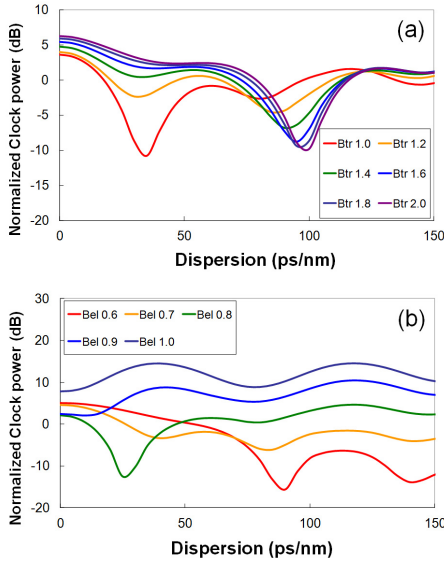


그림 7. 클럭 추출법 M4에 대한 대역폭의 효과
(a) 송신단 대역폭 변화 (b) 수신단 대역폭 변화
Fig. 7 Bandwidth effect on M4
(a) transmitter bandwidth (b) receiver bandwidth

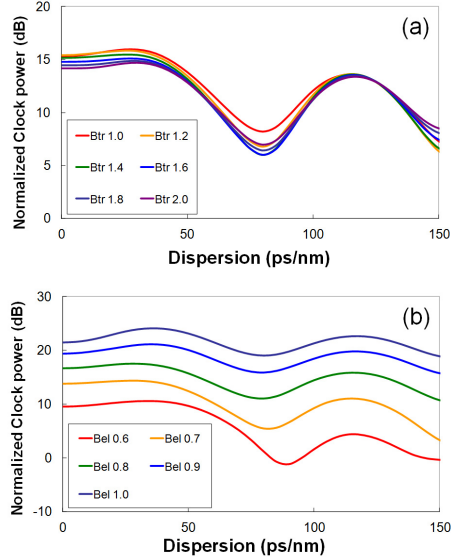
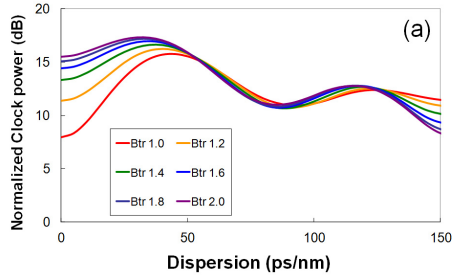
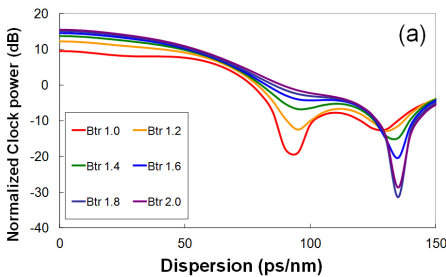


그림 9. 클럭 추출법 M6에 대한 대역폭의 효과
(a) 송신단 대역폭 변화 (b) 수신단 대역폭 변화
Fig. 9 Bandwidth effect on M6
(a) transmitter bandwidth (b) receiver bandwidth



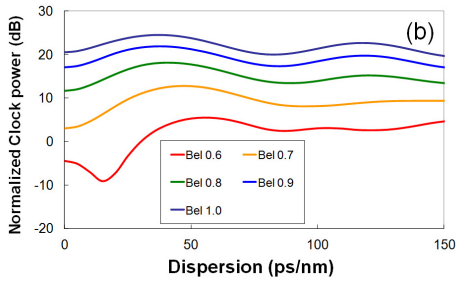


그림 10. 클럭 추출법 M7에 대한 대역폭의 효과
(a) 송신단 대역폭 변화 (b) 수신단 대역폭 변화
Fig. 10 Bandwidth effect on M7
(a) transmitter bandwidth (b) receiver bandwidth

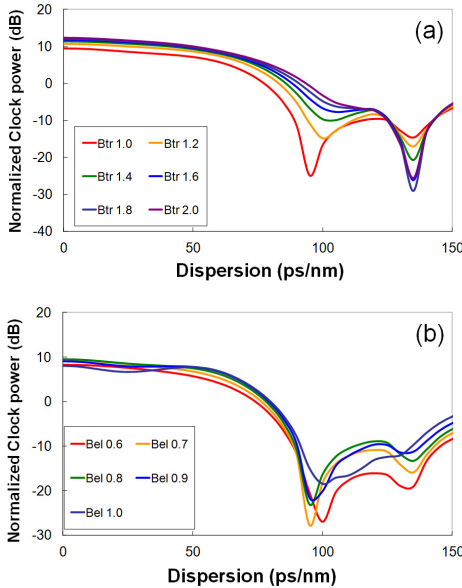


그림 11. 클럭 추출법 M9/M10 에 대한 대역폭의 효과
(a) 송신단 대역폭 변화 (b) 수신단 대역폭 변화
Fig. 11 Bandwidth effect on M9/M10
(a) transmitter bandwidth (b) receiver bandwidth

표 2. 클럭 추출법의 색분산 감시능력 비교
Table 2. Dispersion monitoring performance of clock-extraction methods

CE Method	Monitoring Range (ps/nm)	CFC slope (dB/10 ps ? nm)	BW robustness	Total Evaluation
M1	± 35 (x)	0.67	Good	X
M2	± 35 (x)	0.23	Good	X
M3	± 35 (x)	0.45	Good	X

M4	± 35 (x)	1.07	Bad (x)	X
M5/M8	± 95	0.33	Medium	O
M6	± 25 (x)	0.18	Good	X
M7	± 45	1.43	Bad (x)	X
M9/M10	± 95	0.19	Medium	O

V. 결론

본 논문에서는 CSRZ 신호를 사용하는 광통신 시스템에서 송/수신단의 대역폭 변화가 클럭 성분을 이용한 색분산 감시방법에 미치는 영향을 살펴보았다. 그리고, 그 결과로 CSRZ 신호의 색분산 감시를 위해 가장 적합한 클럭 추출법을 제시하였다. 이를 위해서 우리는 색분산 감시의 감시범위, 감시감도, 대역폭 변화에 따른 강인함 등을 고려하였다.

본 논문에서는 CSRZ 신호의 클럭 추출법으로 스펙트럼 처리과정, 비선형 처리과정, 협대역 필터로 구성된 총 10 가지의 방법을 제시하였으며, 그 중에서 M5/M8 로 명명된 클럭 추출법과 M9/M10 으로 명명된 클럭 추출법이 CSRZ 신호의 색분산을 감시하는데 가장 좋은 것으로 판명되었다. 이 클럭 추출법들은 40 Gb/s 의 전송속도에서 ±95 ps/nm 의 색분산 감시범위를 보이고, 0.33 dB/10ps*nm (M5/M8) 및 0.19 dB/10ps*nm (M9/M10) 의 색분산 감시감도를 보이고, 송/수신단 대역폭의 변화에 대해서는 중간정도의 강인성을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2013학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] Sung-Man Kim, "Analysis of the optimum optical signal power and the longest transmission length in nonlinear optical transmission systems", The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 7, No. 3, pp. 567-571, 2012.
- [2] Jae-jin Jung, Young-sun Lee, and Hyun-sik

- Shin, "A Study on Forward Error Correction of Long-Distance Submarine Optical Communication Systems", The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 3, No. 3, pp. 170-176, 2008.
- [3] Jae-duck Yoo, Hong-tae Park, Hyun-sik Shin, Chun-suk Kim, and Yun-ho Shin, "Design for Dispersion Map in Submarine Optical Network", The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 1, No. 1, pp. 56-62, 2006.
- [4] Trung D. Vo, Bill Corcoran, Jochen Schroder, Mark D. Pelusi, Dan-Xia Xu, Adam Densmore, Rubin Ma, Siegfried Janz, David J. Moss, Senior Member, and Benjamin J. Eggleton, "Silicon-Chip-Based Real-Time Dispersion Monitoring for 640 Gbit/s DPSK Signals", J. Lightwave Technol., Vol. 29, No. 12, pp. 1790-1796, 2011.
- [5] S. M. Reza, Motaghian Nezam, Ting Luo, John E. McGeehan, and Alan E. Willner, "Enhancing the monitoring range and sensitivity in CSRZ chromatic dispersion monitors using a dispersion-biased RF clock tone", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 16, No. 5, pp. 1391-1393, 2004.
- [6] Gianmarco Rossi, Timothy E. Dimmick, and Daniel J. Blumenthal, "Optical performance monitoring in reconfigurable WDM optical networks using subcarrier multiplexing", J. Lightwave Technol., Vol. 18, No. 12, pp. 1639-1648, 2000.
- [7] Vitor Ribeiro, Liliana Costa, Antonio Teixeira, Rogerio Nogueira, and Mario Lima, "Chromatic-Dispersion-Monitoring Scheme Using a Mach-Zehnder Interferometer and Q-Factor Calculation", J. Opt. Commun. Netw., Vol. 2, No. 1, pp. 10-19, 2010.
- [8] Z. Pan, Q. Yu, Y. Xie, S.A. Havstad, A. E. Willner, D. S. Starodubov, and J. Feinberg, "Chromatic dispersion monitoring and automated compensation for NRZ and RZ data using clock regeneration and fading without adding signaling", in Proc. Optical Fiber Communication Conference 2001 (OFC2001), Anaheim, USA, Paper WH5, 2001.
- [9] Sung-Man Kim and Chang-Hee Lee, "The Efficient Clock-Extraction Methods of NRZ Signal for Chromatic Dispersion Monitoring", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 17, No. 5, pp. 1100-1102, 2005.
- [10] Sung-Man Kim, "Experimental Demonstration and Analytic Derivation of Chromatic Dispersion Monitoring Technique Based on Clock-frequency Component", The Journal of the Optical Society of Korea, Vol. 16, No. 3, pp. 215-220, 2012.
- [11] Sung-Man Kim, "PMD Effect on the Clock-Based Optimum Dispersion Compensation Monitoring Technique", Journal of the Optical Society of Korea, Vol. 13, No. 1, pp. 112-115, 2009.
- [12] Sung-Man Kim and Jai-Young Park, "Chromatic Dispersion Monitoring of CSRZ signal for Optimum Compensation using Extracted Clock-Frequency Component", ETRI Journal, Vol. 30, No. 3, pp. 461-468, 2008.

저자 소개



김성만(Sung-Man Kim)

1999년 KAIST 전기및전자공학과 공학사

2001년 KAIST 전기및전자공학과 공학석사

2006년 KAIST 전기및전자공학과 공학박사

2006년~2009년 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원

2009년~현재 경성대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 광통신, LED 무선 광통신, 이동통신, 광에너지 전송

