

고밀도 광 기록 장치를 위한 변조 코드의 새로운 직류 성분 제거 방법

준회원 이주현*, 정회원 이재진*

New DC-suppression Method of Modulation Codes for High Density Optical Recording Systems

Joohyun Lee* Associate Member, Jaejin Lee* Regular Members

요 약

제어 비트를 통한 직류 성분 제거 방법으로 주로 코드워드 끝단에서의 WRDS(word-end running digital sum) 기준을 적용하고 있다. WRDS 기준에 의한 직류 성분 제거 방법은 계산 및 구현이 쉬운 반면에 제어 비트 및 코드워드의 길이가 길어질수록 성능이 저하되는 단점이 있다. 복잡도가 높은 대신 최적의 성능을 갖는 방법으로 MSW(mean-square weight) 기준이 있다. 본 논문에서는 MPRDS(minimum peak RDS)라는 고밀도 광 기록 저장 장치를 위한 변조 코드의 새로운 직류 성분 제거 방법을 제안하였다. 이 방법은 계산 및 구현상의 복잡도가 MSW 기준에 비해 현저하게 낮으면서도 제어 비트 및 코드워드의 길이가 증가하더라도 MSW 기준에 의한 성능에 근접함을 입증하였다.

ABSTRACT

For eliminating DC component, the optical recording systems generally exploit WRDS (word-end running digital sum) criterion. However, its performance is degraded if the lengths of the control bits and codewords are increased. Another criterion is MSW (mean-square weight) method. Whereas MSW criterion has the complexity, this has optimal performance. In this paper, we have proposed a new dc-component suppression method (MPRDS, minimum peak RDS) of the modulation codes for high density optical recording system. This method requires less complexity than MSW's, and the performance is near to MSW's even if the lengths of the control bits and codewords are increased.

I. 서론

기록 저장 매체의 기록 밀도가 높아짐에 따라 이에 따른 데이터 손실이 없도록 하기 위해 RLL 코드를 사용한다. 또한, 데이터 트랙으로부터 쉽게 정보를 추적 및 추출이 가능하도록 하기 위해서는 데이터의 직류 성분이 거의 소멸되어야 한다. 따라서, 광 기록을 위한 변조 코드를 설계할 경우, 기록 매체의 특성에 따른 비트 에러율(bit error rate, BER) 및 직류 성분이 충분히 제거 가능하도록 해야 한다.

주파수 0에서 파워 스펙트럼(power spectral density, PSD)이 소멸되기 위해서는 코드의 런-디지털 합(running digital sum, RDS)을 제어해야 한다^[1]. 다시 말하면, 한 시퀀스의 파워 스펙트럼이 DC에서 0이 되는데 필요충분조건은 디지털 합 변위(digital sum variation, DSV)가 유한해야 하는 것이다.

DSV를 유한하도록 하기 위한 방법으로는 직류 성분 제거 가능한 런-길이 제한(DC-free run-length, DCRL) 코드로 설계하는 방법과 코드 시퀀스 사

* 동국대학교 전자공학과
논문번호: 010153-0626, 접수일자: 2001년 6월 26일

이에 제어 비트를 삽입하여 제어하는 방법이 있다. 전자의 경우처럼 코드 자체로 직류 성분이 제거 가능한 경우는 극히 드물기 때문에 현재 후자의 경우를 이용하는 경우가 대부분이다.

본 논문에서는 입력 데이터 레벨(source data level) 또는 인코딩된 레벨(encoded level)에서 제어 비트를 삽입하여 선택 가능한 여러 시퀀스 중에서 직류 성분을 제거할 수 있는 MPRDS (minimum peak RDS) 방법을 제안하였다. 이 새로운 방법은 제어 비트 및 코드 시퀀스의 길이가 증가할수록 성능 저하를 가져오는 기존의 WRDS 방법과는 달리 최적의 성능을 나타내는 MSW 기준에 근접하는 성능을 나타냄을 모의 실험을 통해 입증하였다.

II. RLL 및 DC-free 코드 정의

기록 저장 매체에서 요구하는 제한 조건들은 RLL 코드를 이용하면 만족시킬 수 있다. RLL 시퀀스는 (d, k) 시퀀스로 표현하는데, 2개의 '1' 사이에 최소한 d 개의 '0'이 있어야 하고, k 개까지만 허용함을 의미한다^[2]. 일반적으로 (d, k) 시퀀스는 채널에 바로 입력되지 않고, 프리코딩(precoding)을 한 후 전송된다. 즉, (d, k) 시퀀스의 현재 비트를 δ_i 라 할 경우, NRZI 부호기의 출력 β_i 는 식 (1)과 같다.

$$\beta_i = \delta_i \oplus \beta_{i-1} \tag{1}$$

본 논문에서는 표 1과 같은 코드율이 2/3인 (1,7) RLL 코드에 대한 코드 표(look-up table)를 사용하여 모의 실험을 하였다. 참고로, 본 논문에서 이용한 코드 이외에 다른 코드를 사용해도 제안한 방법에 대해 실험을 하는 데에 영향을 거의 미치지 않기 때문에 임의로 표 1과 같은 룩업 테이블(look-up table)을 이용하여 인코딩을 하였다.

주파수 0에서 PSD가 소멸되기 위해서는 코드의 RDS 값을 제어해야 한다. 임의의 시퀀스에 대한 연속적인 RDS 값은 코드 시퀀스의 스펙트럼이 저주파수단에서 사라지는 것에 대해 분석하는 데에 중요한 역할을 하며, 비트 시퀀스를 (a_0, a_1, \dots, a_i) , $a_i \in \{-1, +1\}$ 라 할 경우, RDS는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$RDS_i = \sum_{i=0}^n a_i \tag{2}$$

표 1. 코드율 2/3인 (1,7) RLL 코드

입력	상태 1		상태 2		상태 3		상태 4	
	코드 워드	다음 상태	코드 워드	다음 상태	코드 워드	다음 상태	코드 워드	다음 상태
0	010	1	100	1	000	1	010	1
1	010	2	100	2	000	2	010	2
2	010	3	101	3	001	3	010	3
3	100	3	101	4	001	4	000	3

$$Y_i = 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0$$

$$X_i = -1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1$$

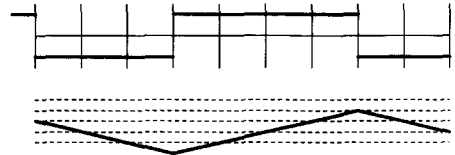


그림 1. 코드 시퀀스 변화에 따른 RDS 변화.

그림 1은 누적되는 심볼들에 의한 RDS 값의 변화에 대해 표현하고 있다.

임의의 시퀀스에 대한 RDS 값의 총 변화량을 디지털 합 변위(digital sum variation, DSV)라 하며, RDS의 최소값 및 최대값이 각각 N_1, N_2 라 할 경우 다음과 같이 표기한다.

$$N = N_2 - N_1 + 1 \tag{3}$$

이때, Pierobon^[3]은 인코딩된 시퀀스에 대한 PSD가 유한한 RDS 값을 갖는 인코더일 경우에만 주파수 0에서 소멸한다는 것을 입증했다.

III. DC-제어(DC-control) 방법

인코더에서 제어 비트 삽입을 통한 직류 성분 제거 방법으로는 두 가지가 있다. 즉, 하나는 입력 데이터 레벨에서의 제어 비트를 삽입하여 제어하는 방법이고, 또다른 하나는 인코딩된 레벨에서 선택 가능한 제어 비트를 부가하여 저주파수에서 파워를 줄일 수 있도록 한다. 이때, 인코딩된 레벨에서 삽입할 경우에는 (d, k) -구속(constraint) 조건에 의해 해당될 수 없는 제어 비트가 존재하게 된다.

본 논문에서는 선택 가능한 시퀀스의 수가 많은 경우 중 보다 효율적인 직류 성분 제어 방법을 분

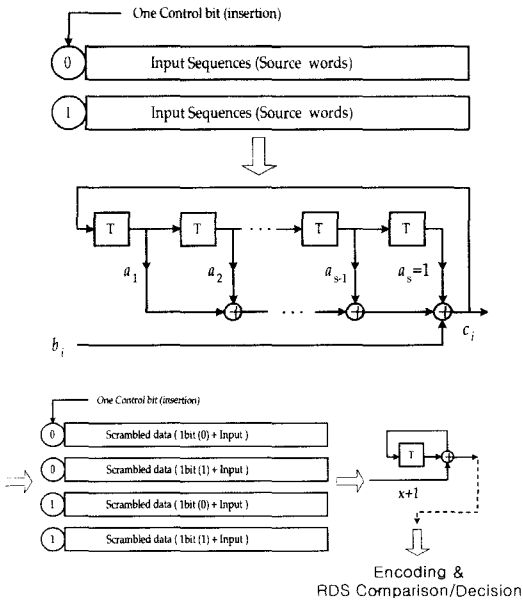


그림 2. 2비트의 제어 비트를 삽입한 경우의 Guided Scrambling 변조 인코딩 방법

석 및 제안하기 위해 입력 데이터 레벨에서 Guided Scrambling 변조 코딩 방법을 적용하여 제어 비트와 코드워드와의 비율은 동일하게 유지시키면서 제어 비트의 수를 증가시키는 방식으로 성능을 분석하였다²⁾.

그림 2에서는 2비트의 제어 비트를 삽입한 경우의 Guided Scrambling 변조 인코딩 방법의 예를 나타냈고, 이에 대해 간략히 요약하면 다음과 같다.

전체 삽입할 제어 비트의 수를 r 이라 할 경우, 먼저 일정 길이의 입력 시퀀스 앞에 $r-1$ 개의 제어 비트를 붙여 $L'=2^{r-1}$ 가지의 서로 다른 시퀀스를 형성시킨다. 이러한 데이터 시퀀스를 그림 2와 같은 스크램블러(scrambler)에 통과시킨다. 본 논문에서는 다항식 x^2+x+1 을 적용하였다. 이를 통해 생성된 시퀀스 앞에 다시 각각 0과 1을 덧붙인 후, 다시 다항식 $x+1$ 을 갖는 스크램블러를 통과시켜 총 $L=2^r$ 가지의 서로 다른 시퀀스를 발생시키도록 한다. 이렇게 형성된 서로 다른 데이터 시퀀스를 각각 인코딩하여 그 중에서 저주파수 성분을 억제시킬 수 있는 가장 좋은 코드 시퀀스를 선택하여 채널로 전송한다. 디코딩 과정은 위의 과정의 역으로 진행된다.

이들 중 가장 좋은 코드워드는 최소의 DSV 값을 갖는 것으로 선택해야 하는데, 가장 간단한 방법으로는 각 인코딩된 시퀀스의 끝단에서의 RDS 값을 비교하여 결정하는 WRDS(word-end RDS) 방법이

있다. 그러나, 이러한 방법은 계산 및 구현이 가장 간단한 장점이 있는 반면에 제어 비트와 코드 시퀀스의 길이가 증가하면서 한번에 계산해야할 시퀀스의 길이가 길어짐에 따라 성능이 급격하게 떨어져 DC 성분 제어를 할 수 없게 되는 단점이 있다.

DC 성분 제어를 위해 잘 알려진 또다른 방법으로는 코드 시퀀스의 각 비트 위치에서 RDS 값을 제공하면서 해당 시퀀스의 마지막 비트까지 모두 합산하여 가장 작은 값을 갖는 시퀀스를 선택하는 MSW(minimum squared weight) 기준이 있다. 이 기준은 현재 가장 최적의 성능을 나타내는 방법으로 알려져 있으나, 계산 및 구현상의 복잡도가 매우 높은 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 유한한 RDS 값을 갖는 경우에 DC-제어가 가능하다³⁾는 점을 유의함과 동시에 실제 광 기록 시스템에 적용이 가능하도록 계산의 복잡도를 줄이면서도 성능이 MSW와 거의 유사한 MPRDS 방법을 제안하였다. 기본 방법에 대한 순서도는 그림 3과 같고, 그림 4에 예를 나타내었다. 이 새로 제안한 방법에 대해 기술하면 다음과 같다.

먼저 입력받은 L 개의 사용자 정보 블록에 대해 코드워드로 변환하여 시퀀스를 형성한다. 그런 다음, MSW 방식의 경우 각 비트 단위로 RDS의 제공값을 계산하여 최소값을 갖는 시퀀스를 선택하는 반

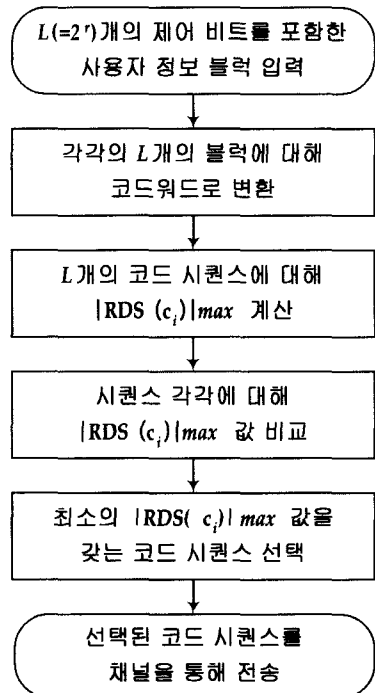


그림 3. 제안된 MPRDS 방법에 대한 순서도

면에, MPRDS 방법은 계산의 복잡도를 최대한 줄이기 위해 각 시퀀스 내부에서 RDS의 절대값이 가장 큰 값을 기억시킨다. 이때, 그림 3과 4에서 i번째 코드 시퀀스 내부의 절대값이 가장 큰 RDS를 $|RDS(c_i)|_{max}$ 라 표기하였다. 이러한 해당 시퀀스 각각의 $|RDS(c_i)|_{max}$ 값을 비교하여 가장 작은 값을 갖는 시퀀스를 선택하여 전송시키면 DC 성분의 제거가 가능하게 된다. 이때, 선택될 수 있는 시퀀스가 유일하지 않고, 두 개 이상인 경우 임의로 선택(randomly selected)한다.

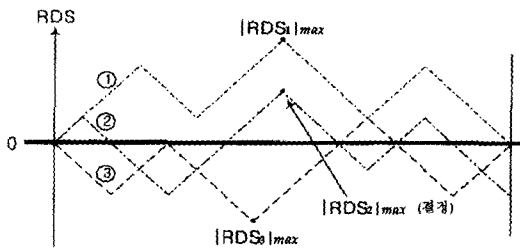


그림 4. MPRDS 방법을 적용한 예

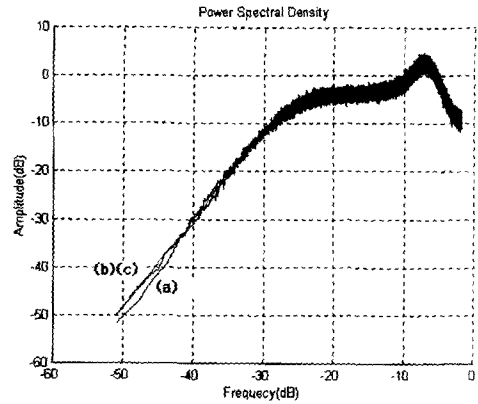
IV. 실험 결과

본 실험에서는 새롭게 제안한 직류 성분 제거 방법과 기존의 WRDS 및 MSW 방법을 서로 비교하여 제어 비트 및 코드 시퀀스의 길이가 증가할수록 새롭게 제안한 방법이 WRDS와 달리 현저하게 우수한 성능이 나타남을 그림 5에서 보였다. 또한, 이 방법은 최적의 성능을 보이고 있는 MSW 방법에 의한 변조 인코딩 방법에 거의 근접한다는 것을 보이기 위해 그림 5에 같이 나타내었다.

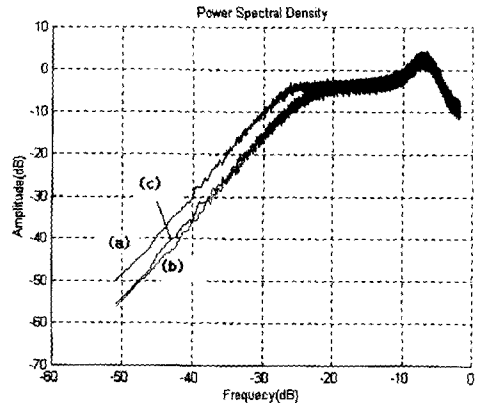
제어 비트와 입력 데이터 비트 사이의 비율은 1:56으로 하였고, 제어 비트의 수가 증가할수록 WRDS와의 차이점이 발생하는 것을 보이기 위해 2비트, 4비트, 8비트의 제어 비트를 부가하여 모의 실험을 하였다. 또한, 모의 실험을 위한 입력 비트 수로 10^7 비트를 발생시켰다.

이와 같은 모의 실험 결과, 제어 비트의 수가 적을 경우에는 WRDS 방법과 MSW 및 본 논문에서 제안한 방법이 거의 성능 차이가 없으나, 제어 비트의 수가 증가하면서 코드 시퀀스의 길이가 증가하더라도 MSW 및 제안한 방법은 직류 성분의 제거가 가능한 반면에 WRDS 방법을 사용한 경우에는 직류 성분의 제어 정도가 현저하게 떨어짐을 볼 수 있다. 예를 들어, 그림 5의 (3)에서 MSW 방법 및

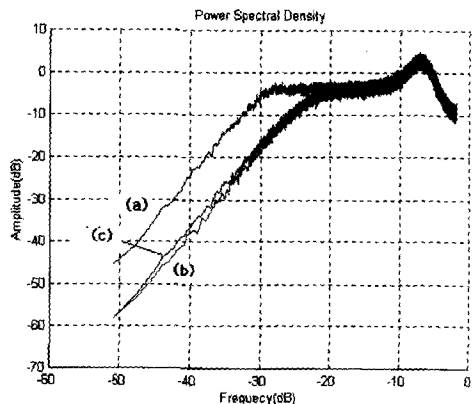
제안한 방법과 WRDS 방법을 이용한 인코딩 결과, 약 10dB 이상의 성능 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.



(1) 2비트의 제어 비트를 삽입한 경우



(2) 4비트의 제어 비트를 삽입한 경우



(3) 8비트의 제어 비트를 삽입한 경우

그림 5. DC-제어 방법에 따른 비교
(a) WRDS (b) MSW (c) MPRDS 방법

따라서, 본 논문에서 제안한 방법은 MSW와 비교하여 계산 및 구현상 복잡도가 매우 간단함에도 불구하고 거의 유사한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 다시 말해서, 제어 비트와 코드 시퀀스간에 동일한 비율을 갖는다고 할지라도 MSW 및 새롭게 제안한 방법은 시퀀스의 길이가 증가할수록 성능이 향상됨을 보이는 것과 달리 WRDS 방법은 오히려 성능의 저하가 발생함을 모의 실험을 통해 입증하였다.

이렇게 MSW 방법 및 제안한 방법과 WRDS 방법이 크게 차이가 나는 원인은 WRDS 방법이 단지 계산되어지는 시퀀스의 끝단에서의 RDS만을 고려하기 때문에 시퀀스 내부에서 큰 값을 갖는 경우가 발생되더라도 직접적인 제어를 할 수 없는 것과 달리 이 두 가지 방법은 각 시퀀스 내부에서의 변화 정도까지 고려하고 있기 때문에 직류 성분을 제거하는 데에 있어 더 효율적이다.

IV. 결론

본 논문에서 제안한 새로운 직류 성분 제거 방법은 입력 데이터 레벨 뿐만 아니라, 인코딩된 레벨에서도 적용이 가능하며, 특히, 제어 비트 및 한번에 계산되어질 코드 시퀀스의 비트 수가 증가하더라도 최적의 성능을 나타냄을 보였다. 또한, 구현이 가장 쉬운 WRDS 방법과 비교하여 상대적으로 구현상의 복잡도가 높지 않으면서 MSW 방법에 거의 근접하는 성능을 보이는 것을 모의실험을 통해 입증하였다.

따라서, 본 논문에서 제안한 방법은 제어 비트 및 한번에 전송되어야 할 데이터 시퀀스의 길이가 증가할수록 보다 효율적인 직류 성분 제어 방법으로 실제 고밀도 광 기록 및 저장 시스템에 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

[1] Richard B. Wells, "Applied Coding and Information Theory for Engineers," Prentice Hall, 1999.
 [2] Kees A. Schouhamer Immink, "Codes for Mass Data Storage Systems," Shannon Foundation Pub., 1999
 [3] G.L. Pierobon, "Codes for zero spectral density at zero frequency," *IEEE Trans.*

Inform. Theory, vol. IT-30, no. 2, pp. 435-439, March 1984.

[4] Paul H. Siegel and Jack K. Wolf, "Modulation and coding for information storage," *IEEE Communications Magazine*, pp. 68-85, Dec. 1991.

이 주 현(Joohyun Lee)

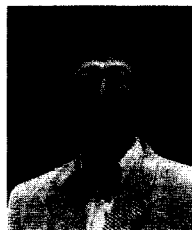
준회원



2000년 2월 : 동국대학교
전자공학과 학사
2000년 3월 ~ 현재 : 동국대학교
전자공학과 석사과정
<주관심 분야> 변조코드, 검출
기법 연구

이 재 진(Jaejin Lee)

정회원



1983년 2월 : 연세대학교
전자공학과 학사
1984년 12월 : U. of Michigan,
Dept. of EECS 석사
1994년 12월 : Georgia Tech.
Sch. of ECE 박사

1995년 1월 ~ 1995년 12월 : Georgia Tech. 연구원

1995년 1월 ~ 1997년 2월 : 현대전자 정보통신
연구소 책임연구원

1997년 3월 ~ 현재 : 동국대학교 전자공학과 조교수
<주관심 분야> 통신 이론, 비밀 통신, 기록저장 시스템