

DC-억압을 위한 (2,15) RLL 코드 및 코딩 기법

준회원 이주현*, 정회원 이재진*, 홍유표*

(2,15) RLL Code and Coding Format for DC-suppression

Joo Hyun Lee* Associate Member, Jaejin Lee*, Youpyo Hong* Regular Members

요약

본 논문에서는 DC-제거 가능한 (2,15) 런-길이 제한(RLL) 코드와 이 코드를 이용한 고밀도 광 기록을 위한 고 효율의 성능을 나타내는 코딩 방법을 제안한다. 이 방법은 8/16의 코드율을 갖는 기존의 EFMPlus 코드와 비교하여 k -구속 조건이 다른 런-길이 파라미터를 가지고 있으나 EFM 코드에 비해 최소 6%에서 최대 10% 이상 높은 정보 밀도를 갖고 있어 고밀도 광 기록 시스템에 적용이 가능하다. 모의 실험을 통해, 코드율이 8/16에서는 EFMPlus 코드와 거의 유사한 성능을 보임을 확인했다.

ABSTRACT

In this paper, DC-free RLL code with (2,15)-constraint and the high-efficiency coding scheme for high-density optical recording based on the new code are presented. The k -constraint of the code is 15 while the k -constraint of the EFMPlus is 10. However the information density of the coding is 6%~10% higher than that of the EFM code. The scheme therefore can be applied to the high-density optical recording. We proved that the performance of the coding method where the code rate is 8/16 is similar to one of the EFMPlus code.

I. 서론

변조 코드(modulation codes)는 입력 데이터 시퀀스를 일정한 제한 조건을 갖는 시퀀스로 변환시킨다. 이러한 구속은 채널을 통해 전송되는 시퀀스를 채널에 맞게 최적화시켜 결과적으로 더 높은 밀도를 갖게 한다. 런-길이 제한 (RLL) 코드는 인접 심볼 간섭을 제거하고 타이밍 복구가 가능하다는 장점으로 인해 광 기록 시스템에서 사용되고 있다. 또한, 왜곡이 없는 기록을 위해서는 DC-제거가 가능한(DC-free) 코드의 사용이 필요하다. DC-제거가 가능한 코드를 사용해야 하는 이유는 정보 신호를 디스크 잡음으로부터 분리시키고 서보 시스템으로부터의 간섭을 피해야 하기 때문이다^[1]. 현재 광 기록 시스템에 적용되고 있는 RLL 코드의 예로는 EFM^[2] 및 EFMPlus^[3] 코드가 있다. EFMPlus 코드는

DC-제거가 가능하다. 다시 말하면, 이 코드는 저주파수 성분이 거의 존재하지 않는다. EFM 및 EFMPlus 코드는 $d=2, k=10$ 인 RLL 구속 조건을 갖는다. EFM 코드는 코드율이 8/17이고, 하나의 코드 테이블을 이용한다. 8비트의 입력 데이터는 14비트의 코드워드로 변환된다. 이때, 연속적인 채널 시퀀스는 DC-제어를 위한 3비트의 머징 비트에 의해 연결된다. 반면에, EFMPlus 코드는 코드율이 8/16이고, 4-상태(state)를 가지고 있다. 이중 대체 테이블(substitution table)은 DC-제어를 위해 사용된다. 기록 밀도가 높아짐에 따라, 데이터 저장 시스템에서의 기록 및 재생에 대한 신뢰도를 증가시키기 위한 새로운 코드의 개발은 필수적이다.

본 논문에서는 코드율이 8/15인 새로운 (2,15) RLL 코드 및 이러한 코드를 이용한 DC-제거가 가능한 코딩 기법을 제안한다. 이 방법은 EFM 코드에 비해 최소 6%에서 최대 10%, EFMPlus 코드에

* 동국대학교 전자공학과

논문번호: 010152-0626, 접수일자: 2001년 6월 26일

※ 본 연구는 한국과학재단 산학협력연구(2000-30200-005-1) 지원으로 수행되었음.

비해서는 3.7%까지 코드율을 향상시킬 수 있어 고밀도 광 기록 시스템에 적용이 가능하다. 특히, 코드율이 EFMPPlus 코드와 동일한 경우에는 매우 유사한 성능을 나타냄을 모의 실험을 통해 입증하였다.

II. 새로운 (2, 15) RLL 코드의 구성

새롭게 개발한 코드율이 8/15인 (2,15) RLL 변조 코드의 구성은 표 1과 같다. 가능한 코드의 수는 k -구속 조건과는 상관없이 d -구속 조건을 만족시키면서 길이가 15비트인 코드의 개수를 의미하며, 이때 총 개수는 406개이다. 사용한 코드의 수는 k -구속 조건까지 고려하여 실제로 구성한 코드의 개수를 의미한다(330개). 이것을 각 코드의 특성에 맞게 총 1024개로 할당하여 입력 4-상태의 코드 테이블(look-up table)을 형성한다.

본 코드의 설계에 있어 기본 윤곽은 코드워드를 연결하였을 때에도 런-길이 제한 조건을 만족시키도록 하기 위해 코드워드의 앞단(leading edge)과 끝단(trailing edge)에서의 '0'의 개수에 따라 다음과 같이 구분하여 조사하였다. 첫째로, 코드워드 앞단의 경우 $d=2$ 인 점을 고려하여 '0'이 세 개 이상인 경우, 2개인 경우, 1개인 경우 및 1로 시작하는 경

우로 나누어서 조사하였다. 끝단의 경우에도 연속적인 '0'의 개수를 고려하여 3가지(-00,-10,-01)로 분류하여 총 12가지로 나누어 조사하였다. 그 결과, d -구속 조건을 만족하는 코드의 수는 '000'과 '100'으로 시작할 때 129개, '0100'으로 시작할 때 88개, 그리고 '00100'으로 시작하는 코드의 수는 60개로 서 총 406개가 된다.

이 중에서 코드워드를 연결했을 때, k -구속 조건을 만족시킬 수 있도록 하기 위해 코드 앞단의 연속적인 '0'의 개수가 최대 8개, 끝단의 연속적인 '0'의 개수가 최대 7개까지만 존재하는 코드만을 선택하였다. 이때, 코드 내부의 디지털 합 변위(digital sum variation, DSV)를 유한하게 하기 위해 런-디지털 합(running digital sum, RDS)의 범위는 -9에서 +9가 되도록 하였다. 이것은 본 논문에서 제안한 새로운 인코딩 방법을 수행할 때 코드 끝단에서의 RDS(word-end RDS, WRDS) 값만을 이용하였을 경우에도 우수한 성능이 나올 수 있도록 하기 위해 고려하였다.

이와 같은 방법으로 선택한 코드의 수는 총 330개이다. 여기서 각 코드 앞단의 연속적인 '0'의 개수가 2개 이상인 경우('000' 또는 '00100')는 상태-1(state-1) 또는 상태-4(state-4)로 정의하고, '100'로

표 1. 코드의 구성

코드의 앞단 (leading edge)	코드의 끝단 (trailing edge)	가능한 코드 수	사용한 코드 수	할당된 코드 수	비 고
000-	-00*	60	48	190	코드 앞단의 연속적인 0의 개수는 최대 8개까지 허용
	-0010	28	25	75	
	-001	41	35	70	
소 계		129	108	335	
100-	-00*	60	37	148	
	-0010	28	16	48	
	-001	41	30	60	
소 계		129	83	256	
0100-	-00*	41	37	148	
	-0010	19	18	54	
	-001	28	27	54	
소 계		88	82	256	
00100-	-00*	28	25	100	
	-0010	13	13	39	
	-001	19	19	38	
소 계		60	57	177	
총 계		406	330	1024	1024/4=256

* 코드 끝단의 연속적인 0의 개수는 최대 7개까지 허용

표 2. R=8/15인 (2, 15) 코드 변환 테이블(look-up table)의 일부

입력	상태 1		상태 2		상태 3		상태 4	
	코드워드	다음상태	코드워드	다음상태	코드워드	다음상태	코드워드	다음상태
0	000100100001000	1	100001000010000	1	010000000000100	1	001000000000100	1
1	000100100001000	2	100001000010000	2	010000000000100	2	001000000000100	2
2	000100100001000	3	100001000010000	3	010000000000100	3	001000000000100	3
3	000100100001000	4	100001000010000	4	010000000000100	4	001000000000100	4
4	000100100010001	1	100000010000010	1	010000000010010	1	001000000000010	1
5	000100100010001	4	100000010000010	3	010000000010010	3	001000000000010	3

시작하는 경우에는 상태-2(state-2), 그리고 '0100'으로 시작하는 경우에는 상태-3(state-3)으로 정의하였다. 이로 인해, 각 코드 끝단이 '00'으로 끝나는 경우에는 다음 상태로 (1, 2, 3, 4)-상태를 모두 선택 가능하도록 하고, '10'으로 끝나는 경우에는 (1, 3, 4)-상태를 선택하고, 마지막으로 '01'로 끝나는 경우에는 (1, 4)-상태만을 선택할 수 있도록 하였다.

이렇게 새롭게 개발된 변조 코드는 각 상태마다 256개의 코드워드가 할당되어 바이트 단위의 인코딩이 가능한 코드율 R이 8/15로 이루어진 (2,15) 슬라이딩-블록 코드(sliding-block code)를 형성한다. 4개의 상태로 이루어진 이 코드는 표 2와 같은 변환 테이블을 갖고 있고, 결과적으로 다음과 같은 특성을 갖는다.

- 상태 1과 4로 들어가는 모든 코드워드는 제한이 없다.
- 상태 2로 들어가는 코드워드는 끝단(trailing edge)에서 '0'이 최소 2개 이상이다.
- 상태 3으로 들어가는 코드워드는 끝단에서 '0'이 최소 1개 이상이다.
- 입력 1바이트에 대한 에러 전달(error propagation)은 2바이트이다.

이러한 (2,15) 코드를 이용하여 디코딩을 수행할 경우, 에러 전달이 2바이트이기 때문에 현재 코드워드에 해당하는 입력 바이트를 얻기 위해서는 다음 코드워드(next codeword)를 통해 현재 코드워드의 다음 상태(next state)를 결정해야 한다. 다시 말하면, 표 3에 나타낸 것과 같이 다음 코드워드의 조건에 따라 현재 코드워드의 다음 상태를 결정하여 현재 코드워드 및 다음 상태가 일치하는 입력 값을 출력해야 한다. 이때, 다음 코드워드의 고려해야 할 비트의 수가 7비트 이상인 코드는 단 2개만 존재한다.

III. (2, 15) 코드를 이용한 변조 코딩

본 절에서는 새롭게 개발한 (2,15) RLL 코드를 이용하여 특정 바이트의 입력 데이터에 대한 코드 시퀀스 사이에 머징 비트를 첨가하여 DC-제어를 하는 변조 코딩 방법을 제안한다.

데이터 인코딩 방법은 입력 디지털 데이터를 특정 바이트를 단위로 하는 블록으로 묶는 단계와, 상기 입력 데이터 블록의 각 바이트를 코드 변환 테이블을 이용해서 변조 코딩하는 단계, 그리고 이와 같이 변조 코딩된 블록 단위의 입력 데이터에 대하여 블록 단위로 머징 비트를 할당하는 단계로 이루어

표 3. 디코딩을 수행할 경우 현재 코드워드의 다음 상태(next state) 결정 방법

다음 코드워드의 조건	현재 코드의 다음 상태	비 고
$x_{14}(\text{MSB}) = 1$	2	
$x_{13} = 1$	3	
$x_{12} = 1$ $\overline{x_{14}} \cdot \overline{x_{12}} \cdot x_1 = 1$ $\overline{x_{13}} \cdot x_{10} \cdot \overline{x_7} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_0} = 1$ $\overline{x_{14}} \cdot x_{11} \cdot \overline{x_8} \cdot \overline{x_7} \cdot \overline{x_6} \cdot \overline{x_5} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_3} \cdot x_0 = 1$	4	해당 코드 : 000010010000000 해당 코드 : 000100000000001
그 외	1	

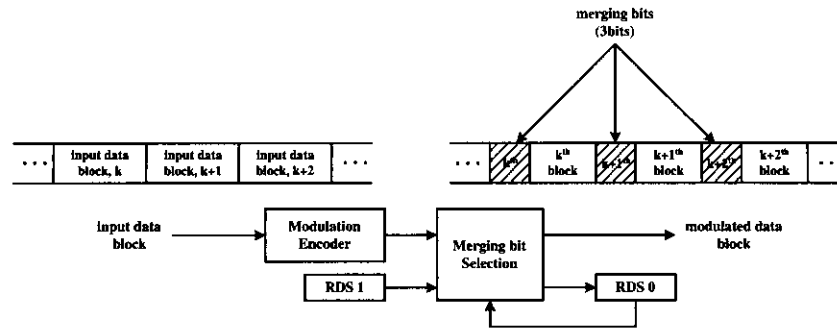


그림 1. 데이터 인코딩 방법에 대한 블록도

어지는 특징을 갖고 있다. 이에 대한 블록도를 그림 1에 나타내었다.

m 바이트를 한 개의 입력 데이터 블록으로 정의한 후, 입력 데이터 블록의 각 바이트는 변조 인코더에 입력되어 8/15 변환 테이블을 이용해서 15비트 길이의 코드워드로 인코딩 된다. 인코딩을 수행한 코드 시퀀스는 $m \times 15$ 비트의 길이를 갖는 데이터 블록(k 번째 블록)을 형성한다.

입력 데이터 블록의 각 바이트를 인코딩하는 것과 동시에, k 번째 블록이 갖는 RDS1을 생성한다. 이와 같은 k 번째 블록의 RDS1과 $k-1$ 번째 블록의 RDS0를 비교해서 머징 비트 선택부(merging bit selection part)에서 머징 비트가 선택되도록 한다. 즉, RDS1과 RDS0을 비교해서 k 번째 블록이 생성되었을 때, RDS 값이 최소가 되면서 런-길이 제한 조건을 위반하지 않도록 머징 비트를 000, 001, 010, 100 중에서 선택하여 채널로 전송한다. 여기서 데이터 블록은 코드율과 DC-억압 능력을 고려하였을 때, 3바이트에서 7바이트 이내의 단위로 가능함을 모의 실험을 통해 입증하였다. 디코딩 과정은 위

의 인코딩 과정을 역으로 진행하면 된다. 이때, 에러 전달(=2)로 인해 해당 블록의 마지막 코드워드는 그 다음 블록을 수신한 후에 디코딩 과정을 수행한다.

IV. 실험 결과

본 모의 실험에서는 새롭게 개발한 $R=8/15$ 인 (2,15) 코드에 대한 변조 코딩 방법에 대해 코드율과 DC-제어 성능을 모두 고려하였을 때, 가장 대표적인 EFMPPlus 코드와의 성능 차이 정도를 비교하여 그림 2에 나타내었고 또한 입력 블록 단위를 3바이트에서 7바이트까지 변화시켜 이에 대한 저주파수에서의 파워 스펙트럼(power spectral density, PSD)을 그림 3에 나타내었다. 이때, DC-제어를 위한 RDS 계산 방식은 각 코드 시퀀스 끝단에서의 RDS만을 고려하는 WRDS (word-end RDS) 기준을 적용하였다.

먼저 그림 2에서 보는바와 같이 3바이트의 입력 블록에 대해 인코딩을 한 결과, EFMPPlus 코드와 마찬가지로 $f_c = 10^{-4}$ 에서 약 -31dB의 성능을 보인

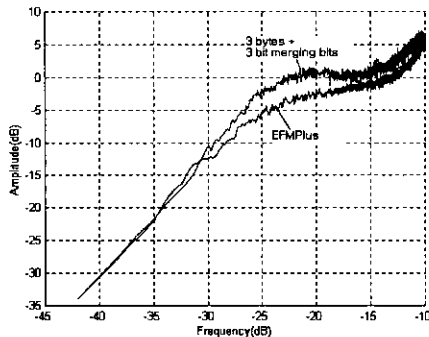


그림 2. EFMPPlus 코드 & 3 바이트 블록의 입력에 대한 PSD

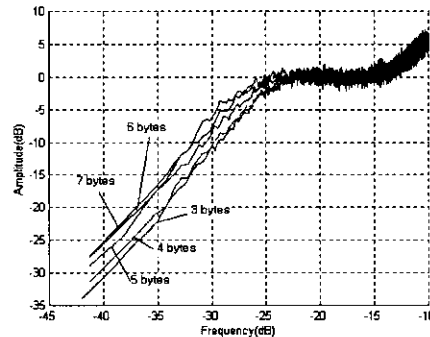


그림 3. 입력 블록 단위의 변화에 따른 PSD

다. 이 경우, 실제 코드율이 8/16으로써 EFMPlus 코드와 동일한 코드율을 갖는다.

동일한 3비트의 머징 비트를 입력 블록의 크기를 증가시켜 코드율을 향상시켰을 경우, 4바이트에서 7바이트의 입력 블록 각각에 대해서 약 -29dB에서 -25dB까지의 성능을 보였다. 7바이트의 입력 블록을 사용할 경우, EFMPlus 코드에 비해서는 약 3.7%까지 코드율을 향상시킬 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 고밀도 광 기록 시스템을 위한 $R=8/15$ 인 새로운 (2,15) RLL 코드에 대해 기술하였고, 이에 대한 코딩 방법에 대하여 모의 실험을 통해 성능을 분석하였다. 모의 실험 결과를 토대로 본 논문에서 적용한 코드 및 코딩 방법은 현재 광 기록 시스템에서 요구되는 DC-억압 능력을 만족함과 동시에 코드율을 높여 입력 데이터의 블록 단위를 최대 약 6~7 바이트까지 증가시켜 고밀도의 정보 기록을 할 수가 있음을 입증하였다.

본 코딩 기법은 새롭게 개발된 코드가 자체적으로 (d, k) -구속 조건을 만족하는 특징으로 인해 다수의 입력 바이트를 하나의 블록으로 지정할 수가 있다. 이로 인해, 매우 향상된 코드율을 나타낼 수 있다. 또한, 인코더의 출력에 대한 성능 분석을 통해 현재 광 기록 시스템에 적용하고 있는 기존의 변조 코드와 비교하여 우수한 성능을 나타냄을 보였다. 논문 [4]에서는 이러한 (2,15) 코드에 대해 VHDL로 구현하였다.

참고 문헌

- [1] Wim Coene, "Combi-codes for DC-free runlength-limited coding," *IEEE Trans. Cons. Electr.*, vol. 46, pp.1082-1087, 2000.
- [2] K.A.S. Immink and H. Ogawa, "Method for encoding binary data," US Patent 4,501,000, 1985.
- [3] K.A.S. Immink, "EFMPlus : the coding format of the multimedia compact disc," *IEEE Trans. Cons. Electr.*, vol. 41, pp.491-497, 1995.
- [4] 권인수, 이주현, 이재진, "고밀도 광 기록 시스템을 위한 새로운 변조 코드에 대한 VHDL 구현," 한국통신학회 논문지, vol. 26, no. 10, 2001년 10월.

이 주 현(Joohyun Lee)

준회원



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

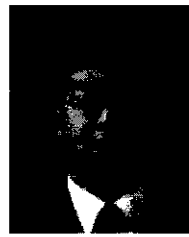
1995년 1월~1995년 12월 : Georgia Tech. 연구원

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

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

홍 유 표(Youpyo Hong)

정회원



1991년 2월 : 연세대학교
전기공학과 학사
1993년 5월 : University of
Southern California
전기공학과 석사
1998년 8월 : University of
Southern California
컴퓨터공학과 박사

1998년 7월~1999년 2월 : Synopsys, Hillsboro,
Senior Engineer

1999년 3월~현재 : 동국대학교 전자공학과 조교수