

광기록 시스템을 위한 오류 정정 능력과 높은 부호율을 가지는 DC-free 다중모드 부호 설계

An Error Correcting High Rate DC-Free Multimode Code Design for Optical Storage Systems

이 준*, 우 중 채**

June Lee* , Choong-Chae Woo**

요 약

본 논문에서는 최소 패리티 검사 행렬로부터 생성된 생성행렬을 사용하여 에러 정정능력과 높은 부호율을 갖는 DC-free 다중 모드 부호를 구성하기 위한 새로운 부호화 기법을 제안 한다. 제안된 기법은 별개의 후보 부호워드들을 생성하기 위해 고속 생성행렬들을 이용한다. 복호 과정의 복잡도는 수신된 부호워드의 신드롬이 '0'인지 아닌지에 따라 결정된다. 만약 신드롬이 '0' 인 경우 복호는 수신된 부호워드의 잉여 비트들을 삭제하여 간단히 수행되고, '1'인 경우에는 합곱 (sum-product) 알고리즘으로 복호가 이루어진다. 제안된 기법은 DC 성분을 억압하면서도 낮은 비트 오류율을 가질 수 있다.

Abstract

This paper proposes a new coding technique for constructing error correcting high rate DC-free multimode code using a generator matrix generated from a sparse parity-check matrix. The scheme exploits high rate generator matrixes for producing distinct candidate codewords. The decoding complexity depends on whether the syndrome of the received codeword is zero or not. If the syndrome is zero, the decoding is simply performed by expurgating the redundant bits of the received codeword. Otherwise, the decoding is performed by a sum-product algorithm. The performance of the proposed scheme can achieve a reasonable DC-suppression and a low bit error rate.

Keywords : Optical Recording, DC-Free Multimode Codes and Sum-Product Algorithm

I. 서 론

디지털 기록시스템에서는 심볼간 간섭과 같은 채널 손실을 극복하고 특정 데이터 패턴에 의해 오류가 발생되지 않도록 하기 위해 변조 부호를 이용한다. 런 길이 제한 (RLL: run-length limited) 변조부호 [1] 로 불리는 변조 부호는 (d,k) 부호로도 표현된다. 여기서 d 는 이웃되는 '1' 사이에 허용되는 '0' 의 최소 개수를 나타내며, k 는 최대 개수를 나타낸다. 광 기록 시스템에서는 낮은 주파수의 성분이 거의 없는 DC-free RLL (DCRLL) 부호기가 디스크에 기록되어 있는 데이터와 트랙을 따라 도는 서보 시스템과의 상호작용을 줄이기 위해 필요하다. 참고 문헌 [1]~[7]에서 보듯이, DCRLL 부호를 설계하는 많은 방법들은 마이트에 기반한 짧은 부호워드 길이에 초점이 맞춰지고 있다. 데이터 기록 산업에서의 신호검출 기술은 높은 부호율에서 잘 동작하는 검출 기법필요로 하므로 광기록 시스템에서도 변조부호의 부호율을 높이는 것이 필요하다. 불행하게도 상기 조건을 만족하는

고용량 DCRLL 부호기는 유한 상태 머신의 상태수가 매우 많아 때문에 설계에 어려움이 있다[1][2][8]. 게다가 부호율이 증가하게 되면 DC 성분이 증가하게 되므로 높은 기록 밀도를 가지는 광 기록 시스템에서는 DC정보의 제어를 위해 다른 부호기가 필요하다.

요구되는 목적을 달성하기 위한 하나의 가능한 해법은 약한 제약 부호 (weakly constrained code)를 사용하는 것이다[1][9]. 약한 제약 부호는 특정 제약을 완벽히 보장하지 않는 부호로서 주어진 확률로 특정 제약을 위반하는 부호기이다. RLL 제한된 채널에서 d 제약이 위배될 경우 오류가 발생하지만 k 제약은 일반적으로 에러에 영향을 주지 않는다[1]. 만약 약한 d 제약에 의해 발생하는 오류를 보상할 수 있고, DC-free 특성을 가지는 부호기가 있다면 광 기록 시스템의 부호기로 선택될 수 있을 것이다. 이렇게 약한 제약으로 제공되는 자유도는 기록 시스템에서 채널용량을 증대시킬 수 있다.

최근 차세대 광 기록 시스템에서는 다중모드 부호기법이 주목을 받고 있다[1][8][10]. 이 코딩 기법은 DC-free 특징을 가지는 약한 제약 부호를 구성하는 한 가지 방법이다. DC-free 특징을 가지는 다중모드 코드를 효과적으로 설계하기 위해서는 두 가지

* LG전자 D&S 연구소

** 한서대학교 컴퓨터공학과

투고 일자 : 2010. 4. 23 수정 일자 : 2010. 7. 24

게재확정일자 : 2010. 7. 29

요소를 고려해야 한다. 하나는 스크램블러이고 다른 하나는 선택 기준이다. 스펙트럼 성능은 이 두 가지 요소에 크게 의존한다. DC-free 특성을 갖는 약한 제약 부호 설계를 위한 가장 좋은 다중모드 부호 기법 중 하나는 가이드드 스크램블링 (GS: guided scrambling) 기법이다. GS기법[10]은 약한 제약 다중모드 부호 설계를 위해 Fair 등에 의해 제안되었다. GS 기법은 신뢰할 만한 DC-억압을 이루지 못하는 기존의 다중모드 보호기법의 스크램블러를 보다 복잡한 스크램블러로 대체함으로써 기존의 단점을 극복하였다. GS기법은 선형 이동 궤환 레지스터 (linear shift feedback register)를 스크램블러로 이용하고, 서로 다른 후보 부호워드를 생성하기 위해 스텝을 늘린다. Immink 와 Patrovices는 DCRLLS기법으로 생성된 다중모드 부호의 스펙트럼 성능을 조사하였다. 그들의 실험과는 GS는 적은 오버헤드와 긴 부호워드 길이를 가지고 DC 억압을 달성할 수 있음을 보였다. 그러나 GS기법은 약한 d 제약으로부터 발행하는 에러 또는 LSFR로 인해 발생하는 에러의 전파를 보상하기 위한 에러정정능력이 없다. 그러므로 GS 다중모드 부호기법을 사용하기 위해서는 에러를 보상하기 위한 다른 부호기 기법이 필요하다.

선형 블록 코드는 생성행렬 G 또는 모든 부호워드 x 에 대해 $Hx=0$ 를 만족하는 패리티 검사 행렬 H 로 표현할 수 있다 [11]~[13]. 1962년 Gallager는 GL 부호에 적용된 낮은 밀도 패리티 검사 행렬(low-density (sparse) parity-check matrixes)에 관한 바이너리 부호를 제안했다. 여기서 낮은 밀도는 H 의 행과 열의 1의 개수가 블록 길이에 비해 작다는 것을 뜻한다. 행렬 H 는 다음 조건을 만족하는 비체계적 형태로 랜덤하게 구성된다 [12]. (1) H 의 각각의 행은 작은 가중치를 가지며 열당 가중치는 균일하다. 가중치는 행렬의 0이 아닌 요소의 개수를 의미한다. (2) 4 사이클의 구조를 제거하기 위해 임의의 두 행과의 내적은 1보다 크지 않다.

이런 부호들의 생성행렬 G 는 H 의 가우시안 소거로 체계적 또는 비체계적 형태로 생성된다. Gallager는 이들 부호들이 블록 길이가 증가함에 따라 합곱 알고리즘으로 사나의 채널용량에 근접한 성능을 달성할 수 있음을 보였다. 그러나 좋은 성능에도 불구하고 GL 부호는 복잡도로 인해 관심을 끌지 못했다. 이런 이유로 에러 정정할 수 있는 RLL 부호기를 설계는 낮은 부호율을 가지는 선형 블록 부호의 원리에 기반하고 있다[14][16]. 이런 기법은 최소 해밍 거리(hamming distance, d_{min})가 3또는 4로 매우 작기 때문에 기대되는 낮은 비트 오류율을 얻을 수 없다. 그리고 비록 복호 과정에서 합곱 알고리즘을 사용할지라도 최소 패리티 체크 행렬이 아니다. 높은 부호율과 에러 정정능력을 모두 가진 ECC/RLL부호를 구성하는 것은 어렵기에 최근 Mackey and Neal의 GL부호는 관심을 끌고 있다 [12].

본 논문에서는 높은 부호율과 에러 정정능력을 모두 가지는 DC-free 다중모드 부호를 구성하기 위해 높은 부호율의 선형 블록 코드의 생성행렬을 사용하는 새로운 다중모드 부호기 설계 기법을 제안한다. 제안된 기법은 에러 정정 할 수 있고 서로 다른 후보 부호워드를 생성하기 위해 LSFR대신 생성행렬을 사용한다. 큰 생성행렬은 최소 패리티 체크 행렬로부터 생성되며 간단한 복호를 위해 체계적 형태를 가진다. 루트 생성행렬 또한 열

과열 또는 행과행을 치환된다. 그런 후 원래의 생성행렬 G 의 치환 형태인 $L-1$ 생성 행렬이 원천 워드마다 서로 다른 후보 부호워드를 생성하기 위해 만들어진다. 결합된 ECC/RLL 부호와는 대조적으로 제안된 기법의 스펙트럼 성능은 GS와 같이 신뢰할만한 DC 억압을 가능케 한다. 신뢰할만한 DC억압과 높은 부호율 외에도 제안된 기법은 복호를 위해 합곱 알고리즘을 사용하기 때문에 높은 에러정정능력을 가진다. 복호 과정에서 만약 신드롬이 '0'이면 수신된 부호워드의 패리티 비트들을 제거함으로써 간단히 복호가 수행되고, 그렇지 않을 경우 최대 반복수를 가지는 합곱 알고리즘으로 복호가 수행된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안된 다중모드 부호 기법이 동작하는 과정을 자세히 기술한다. III장에서는 제안된 기법과 기존의 기법들 간의 성능의 차이를 컴퓨터 모의실험을 통해 비교한다. 마지막으로 IV장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 새로운 다중모드 부호화 기법

다중모드 부호에서는 각각의 소스 워드 X 가 선택 집합에서 L 개의 부호워드들 중 하나로 부호화 될 수 있다. L 개의 다른 생성행렬들은 선택 집합으로 구성된 L 개의 구분된 후보 부호워드를 생성한다. $L-1$ 개의 다른 생성행렬은 최소 패리티 체크 행렬의 가우시안 소거에 의해 만들어진 체계적 형태를 가지는 생성행렬의 행간 혹은 열간 치환에 의해 생성된다. 여기서 다른 생성행렬이 열간 행간 치환에 의해 생성되는 이유는 생성행렬의 각각의 열이 서로 선형 독립인 조건을 만족하기 때문이다. 다른 생성행렬이 G 행렬의 치환형태에 의해 생성되어야만 하는 이유는 제한된 조건하에서 생성된 H 행렬들이 서로 구분되지 않으므로 G 행렬들도 서로 구분되지 않기 때문이다. 서로 다른 후보 부호워드를 생성하는 것은 신뢰할 만한 DC 억압을 위해 필요하다. 부호기는 선택 집합에서 각각의 부호워드의 품질을 평가하고 최선의 부호워드를 선택하여 전송한다.

부호기는 원천 워드들을 서로 다른 부호워드들로 변환하는 간단한 과정과 후보 부호워드의 질을 평가하는 선택기준만 필요로 한다. 그림 1은 생성행렬을 사용한 오류 정정 기능을 갖는 DC-free 다중 모드 부호의 부호화 과정을 나타내었다. 그림 1에서 보듯이 $P_i(G)$ 는 $k \times n$ 크기를 가지는 G 행렬의 행간, 열간 치환을 통해 만들어진 i 번째 생성행렬을 의미한다. 여기서, $P_i(G)$ 는 G 이고 $i=1$ 인 경우를 제외한 $P_i(G)$ 는 체계적 형태를 가지지 않는 G 의 열(행) 치환 버전이다. 제안된 기법에서는, $P_i(G)$ 를 생성하기 위한 G 의 행과열 치환은 부호율이 낮은 경우 패리티 비트를 생산하는 G 의 행을 인터리빙하여 수행된다. 그 이유는 복호 과정에서 복호가 실패할 경우 인터리빙에 의해 발생하는 오류를 보호하기 위함이다. 제안된 기법의 부호화 과정은 다음 절차로 진행된다.

원천 워드 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 는 $L \times n$ 을 가지는 행렬 A 를 생성하기 위한 생성행렬에 의해 부호화 된다. 여기서 L 은

표 1. 제안된 기법과 GS 기법의 비교

Table 1. A comparison of the proposed and the GS schemes

	Proposed scheme	GS scheme
Scrambler	LDPC matrix	LSFR
Role of redundancy bits	DC-control plus error correction	DC-control
# of candidate codewords	Flexible	Inflexible
Code rate	Flexible	Inflexible
Decoding algorithm	Sum-product algorithm	Decscrambling
Error correction capability	Depends on codeword length	X
Error propagation	X	S_w+1
DC-suppression	Reliable	Reliable
Iterative decoding	O	X

야기되는 에러를 제어할 수 없는 단점이 있고, 또한 에러 하나당 S_w+1 의 오류 전파를 가진다는 단점이 있다. 여기서 S_w 는 스크램블러 다항식의 영이 아닌 계수의 개수를 말한다. 제안된 기법의 큰 장점은 복호 과정에서 합곱 알고리즘을 사용하기 때문에 낮은 비트 오류율을 달성할 수 있는 것이다. 또한 연결된 검출기와 반복 복호를 수행함으로써 보다 GS 기법과는 달리 우수한 BER 성능을 얻을 수 있다.

III. 모의 실험 결과

컴퓨터 모의실험에서 구분된 후보 부호워드를 생성하기 위한 생성행렬들은 G 행렬의 행과행 치환과 후보 부호워드의 DC 영향을 평가하는데 가장 좋은 방법으로 알려진 MSW (Minimum squared weight) 조건에 의해 만들어진다. MSW 조건은 부호워드들 중 RDS (Running digital sum)의 최소 분산을 가지는 부호워드를 선택하고 전송한다. 부호율이 낮을 경우, G 행렬의 행과행 치환은 G 의 행 사이에서 원천 워드에 오류가 없을 경우 복호 실패로 발생하는 인터리빙 오류들을 보호하기 위한 패리티 비트들을 생성함으로써 이루어진다. 스펙트럼 성능은 패리티와 원천 비트들을 생성하는 G 의 행 사이에 어떤 치환을 사용했는지에 따라 비교하였다. 부가 백색 가우시안 잡음 (AWGN: additive white Gaussian noise) 채널환경에서 서로 다른 행과행 치환을 가지는 두 개의 기법간의 복호 성능을 신호 대 잡음 비 (SNR: signal to noise ratio)가 변할 때 복호 실패 개수를 나타냄으로써 비교하였다. 그 이유는 원천 워드의 오류 없이 복호 실패가 빈번하게 나타나는 경우에 복호 에러들의 개수는 치환 방법에 따라 달라지기 때문이다. 부호율이 높을 경우 G 행렬의 행과행 치환은 G 의 행 사이에서 패리티 비트들과 원천비트들을 생성함으로써 수행된다. 스펙트럼 성능과 오류 정정 능력은 GS 기법과 부호화되지 않는 경우와 비교할만한 한 성능을 가진다. 그리고 RLL 또는 weakly RLL 부호기는 제안된 알고리즘에 의해 설계될

수 있음을 보였다. 부호워드의 길이가 긴 경우, 부호율 R 은 1000/2000, 1500/2000 그리고 1992/1998로 고정하였고 생성행렬들의 개수 L 은 64로 고정하였다. 생성행렬들은 G 의 패리티 행 사이에서 혹은 G 의 패리티 행과 원천 행 사이에서의 치환에 의해 생성된다. G 에 해당하는 패리티 검사 행렬의 MCW(mean column weight)는 3이다. 부호워드의 길이가 작을 경우 제안된 기법과 GS기법의 후보 부호워드들의 길이 L 은 16과 64로 하였다. G 의 패리티 검사 행렬의 MCW는 부호율이 낮을 때의 경우와 동일하다. GS 기법을 위한 스크램블러 다항식의 차수와 가중치 w 는 14와 9이다. 따라서 GS기법의 최대 에러 전파 개수는 10이다. 두 개의 다중모드 부호들의 부호율은 1.75의 상대적 덧붙임(relative redundancy)을 가지는 224/228 ($L=16$)와 336/342 ($L=64$)이다. 상대적 덧붙임은 $r/(k+r)$ 로 정의되는 부호워드에 포함된 잉여비트들의 비율이다. 제안된 기법은 행과행 치환의 개수가 매우 크기 때문에 GS 기법과는 다르게 후보 부호워드들의 개수를 조정할 수 있다. 물론 만약 복호 실패가 빈번하게 발생한다면 신뢰할만한 DC억압을 달성하는 대신 많은 복호 오류(인터리빙 오류)들이 발생할 수 있다. 합곱 알고리즘의 최대 반복회수는 50으로 하였다.

그림 3은 부호율 R 이 각각 1000/2000, 1500/2000, 1992/1998 일 때, MSW 기준을 가지는 제안된 기법의 스펙트럼 성능을 보였다. 여기서 $R=1000/2000$ 에서 생성행렬은 G 의 패리티 행들을 치환함으로써 생성되고 $R=1500/2000$ 과 $R=1992/1998$ 에서 생성행렬은 G 의 패리티 행과 원천 행들을 인터리빙함으로써 생성된다. 그림 3에서 X-축(주파수 축)은 정규화된 주파수의 dB($=-10\log_{10}(f_c)$, $f_c=f/f_s$, f_s :샘플링 주파수)값을 나타낸다. 이 내용을 본 논문에 삽입하였습니다. 그림 3에서 보듯이 서로 다른 행과 행 치환으로 설계된 제안된 기법과 GS기법은 부호

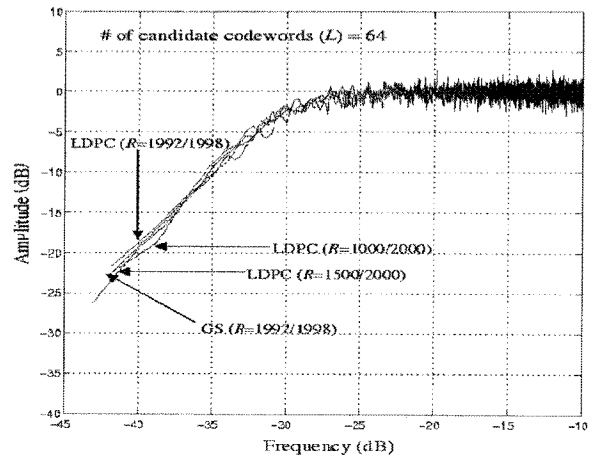


그림 3. 제안된 기법의 스펙트럼 성능
Fig.3. The spectral performance of the proposed schemes

워드 길이가 클 경우 부호율과 관계없이 유사한 스펙트럼 성능을 보임을 알 수 있다. 하지만 광 기록 시스템에서 주요한 주파수 ($f_c = 10^4$)에서는 만족할만한 스펙트럼 성능을 얻을 수 없다. 그림 4에서는 SNR변화에 따른 비트오율 성능을 나타내었다.

제안된 기법은 GS기법의 최대 성능으로 볼 수 있는 부호화되지 않은 경우와 비교하여 BER= 10^{-5} 에서 1.5~8dB 성능 이득이 있다. 여기서, uncoded bound는 GS 기법의 성능을 나타낸다. 이러한 놀랄만한 BER 성능은 합곱 알고리즘에 기인한다. 그림 5은 부호율이 각각 $R=224/228$ 과 $R=336/342$ 일 경우 제안된 기법의 스펙트럼 성능을 나타내었다. 그림 5으로부터 제안된 기법으로 생성된 다중모드 부호는 광 기록 시스템에서 부호율에 관계없이 신뢰할만한 DC 억압을 보여주면서도 GS알고리즘으로 설계된 다중모드 부호와 비교할만한 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

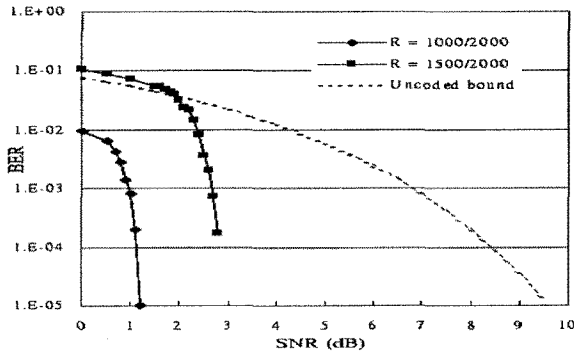


그림 4. 부호워드 길이가 클 때 제안된 기법의 BER 성능

Fig.4. The BER performance of the proposed schemes when codeword length is large

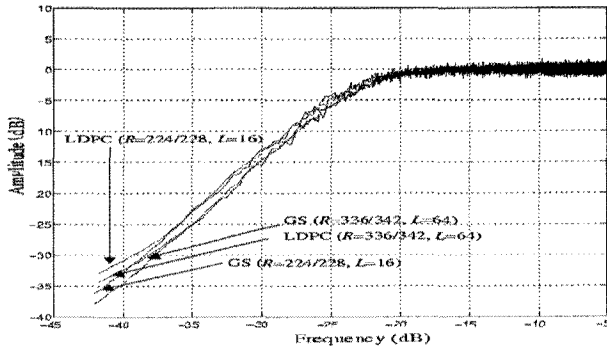


그림 5. 제안된 기법의 스펙트럼 성능

Fig. 5. The spectral performance of the proposed schemes 이 사실로 제안된 기법은 GS 기법과 마찬가지로 서로 다른 후보 부호워드를 생성하고 만약 부호워드의 길이가 과도하게 크지 않다면 쉽게 DC-free 부호를 설계할 수 있음을 알 수 있다.

그림 6은 복호를 위해 합곱 알고리즘을 사용하는 제안된 기법의 오류 정정 능력 (BER 성능)을 보였다. 그림 6에서 제안된 기법은 BER= 10^{-5} 에서 부호화 되지 않은 경우 대비 약 2.5dB 성능개선이 있음을 확인하였다. 그림 4에서 보다 그림 6에서 부호화 이득이 작게 나타나는 주된 이유는 그림 6의 부호율이 높고, 그것의 부호워드의 길이가 매우 작기 때문이다. 부호 길이는 LDPC 부호의 BER성능을 결정하는 가장 중요한 요인 중 하나이다. 여기서 LDPC 부호의 최소거리의 부호워드의 길이가 증가함에 따라 급속히 증가함을 알 수 있다.

그림 7은 제안된 기법에 의해 생성된 연속열에 포함된 런 길이를

의 분포를 나타낸다. 연속열의 길이는 약 2,300,000 비트이고 부호율 R 은 각각 336/342, 1500/2000이다. 실험 결과로 제안된 알고리즘은 부호율과 부호워드 길이에 관계없이 RLL 또는

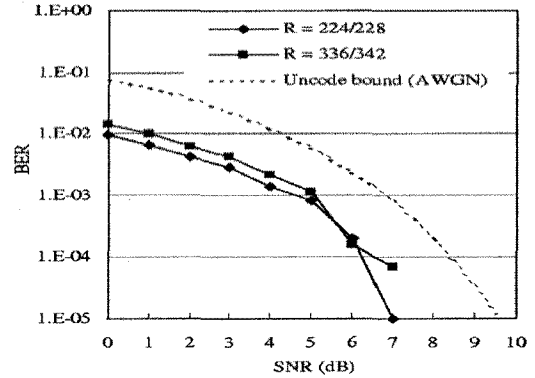


그림 6. 제안된 기법의 BER 성능

Fig.6. The BER performance of the proposed schemes

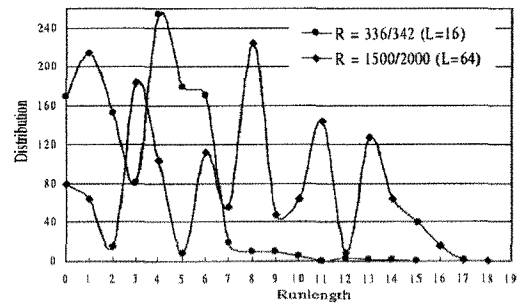


그림 7. 제안된 기법에 의해 생성된 연속열의 런 길이 분포

Fig. 7. The runlength distribution of

sequence generated by the proposed scheme

weakly RLL 부호로 설계될 수 있음을 알 수 있다. 그리고 제안된 알고리즘은 부호워드의 길이가 작을 때 엄격한 제한으로 부호를 구성할 수 있음을 확인하였다. 부호율 $R=336/342$ 일 경우 RLL(0, 14) 또는 weakly RLL (0, 7, $P=10^{-3}$)을 구성할 수 있고, 부호율 $R=1500/2000$ 일 경우 RLL(0, 17) 또는 weakly RLL(0, 16, $P=7 \times 10^{-3}$)을 구성할 수 있다. Weakly RLL 부호의 k -제약은 주어진 확률 P 가 변함에 따라 다양할 수 있다. 그러므로 제안된 기법은 클럭 복원을 보장할 수 있다.

모의실험 결과들로부터 알 수 있듯이 부호율과 DC-억압은 상충관계를 가진다. 또한 GS기법과는 달리 제안된 기법을 이용할 경우 약한 제약에 의한 오류들을 보상할 수 있으며 부호율이 매우 크지 않다면 DC-free부호를 쉽게 설계할 수 있다. 결과적으로 제안된 다중모드 부호화 기법과 합곱 알고리즘의 조합은 (1) 효율적 DC제어 (2) 높은 부호율 (3) 높은 에러 정정능력 (4) 클럭 복원 능력의 보장을 가능케 한다.

IV. 결론

본 논문에서는 최소 패리티 체크 행렬로 생성된 생성행렬을 이용한 에러 정정 능력을 가진 높은 부호율의 DC-free 다중모

드 부호기를 구성하는 새로운 부호 기법을 제안하였다. 이 기법은 후보 부호워드들을 생성하기 위해 높은 부호율의 생성행열들을 이용한다. 후보 부호워드들을 생성하기 위한 생성행열은 근 생성행열의 열과열 또는 행과행 치환에 의해 생성된다. 제안된 기법의 스펙트럼 성능은 광 기록 시스템에서 요구하는 성능을 만족하며, 멀티 모드 코딩 기법으로서 가장 우수하다고 알려진 GS 기법의 스펙트럼 성능과 견줄만하다. 이 사실은 치환에 의해 생성된 생성행열들은 GS기법 처럼 구별되는 후보 부호워드들을 생성할 수 있는 유용한 특징을 소유함을 암시한다. 제안한 방법은 LDPC 코드를 이용하여 구현하기 때문에 복잡도는 높지만 (반복) 복호를 통해 우수한 에러 정정 능력을 갖는 반면, GS 기법은 구현은 간단하지만 에러 정정 능력을 소유하지 못하며, 선형 귀환레지스터를 사용하기 때문에 복호 과정에서 에러 전파를 야기한다. 따라서, GS기법은 채널 잡음과 Weakly d -구속에 의해 야기되는 에러를 제어 할 수 없는 반면, 제안한 방법은 에러를 제어할 수 있기 때문에 보다 신뢰할 수 시스템을 구성할 수 있다, 또한, 제안한 방법은 GS기법과 비교에 코드율이 높아 보다 고용량을 달성할 수 있다. 결론적으로, 제안한 방법은 고용량 차세대 광 기록 시스템을 위한 코딩 기법으로 대두 될 수 있을 거라 생각한다.

참 고 문 헌

[1]K. A. S. Immink, Codes for Mass Data Storage Systems, Shannon Foundation Publishers, Netherlands, 1990.
 [2]K. A. S. Immink, "A survey of codes for optical disk recording," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 19, no. 4, pp. 756-764, April 2001.
 [3]K. A. S. Immink and W. Y. H. Wilson, "A comparison of two schemes for generating DC-free RLL sequences," International Symposium on Information Theory, pp. 352, June 2000.
 [4]W. Coene, "Combi-codes for DC-free runlength-limited coding," IEEE Trans. on Consumer Electronics, vol. 46, no. 4, pp. 1082-1087, Nov. 2000.
 [5]G. L. Pierobon, "Codes for zero spectral density at zero frequency," IEEE Trans. on Inform. Theory, vol. 30, no. 2, pp. 435-439, March 1984.
 [6]K. A. S. Immink, "EFMPlus: the coding format of the multimedia compact disc," IEEE Trans. on Consumer Electronics, vol. 41, no. 3, pp. 491 - 497, Aug. 1995.
 [7]D. E. Knuth, "Efficient balanced codes," IEEE Trans. on Inform. Theory, vol. 32, no. 1, pp. 51-53, Jan. 1986.
 [8]K. A. S. Immink and L. Patrovices, "Performance assessment of DC-free multimode codes," IEEE Trans. on Communications, vol. 45, no. 3, pp. 293-299, March 1997.
 [9]K. A. S. Immink, "Weakly constrained codes," IEE Electronics Letters, vol. 33, no. 23, pp. 1943-1944, Nov. 1997.

[10]I. J. Fair, Q. Wang and V. K. Bhargava, "Polynomial for guided scrambling line codes," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 13, no.3, pp. 449-509, April 1995.
 [11]S. Lin and D. J. Costello, Error Control Coding: Fundamentals and Applications, Prentice-Hall, 1983.
 [12]D. J. C. Mackay and R. M. Neal, "Near Shannon limit performance of low density parity check codes," IEE Electronics Letters, vol. 33, no. 6, pp. 457-458, Mar. 1997.
 [13]Z. Wu, Coding and iterative detection for magnetic recording channels, Kluwer Academic Publishers, 2000.
 [14]P. Lee and J. K. Wolf, "Combined error correction/modulation codes," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 23, pp. 3681-3683, Sept. 1987.
 [15]J. Lee and V. K. Madisetti, "Error correcting run-length limited codes for magnetic recording," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 31, pp. 3084-3086, Nov. 1995.
 [16]A. Patapoutian and P. V. Kumar, "The (d, k) subcode of a linear block code," IEEE Trans. on Information Theory, vol. 38, pp. 1375-1382, July 1992.



이 준 (June Lee)

1998년 2월 동국대 전자공학과 (공학사)
 2000년 3월 동국대 전자공학과 (공학석사)
 2003년 2월 동국대 전자공학과 (공학박사)
 2003년 3월 ~ 2006년 2월 삼성종합기술원 책임연구원

2007년 1월 ~ 현재 LG전자 D&S연구소 선임연구원
 ※주관심분야 : 디지털신호처리, 채널코딩, 저장기록장치



우 중재 (Choong-Chae Woo)

2000년 2월 순천대 전자공학과 (공학사)
 2002년 2월 연세대 전기전자공학과(공학석사)
 2007년 2월 연세대 전기전자공학과(공학박사)
 2007년 9월 ~ 2009년 2월 삼성전자
 정보통신총괄 책임연구원

2009년 2월 ~ 현재 한서대학교 전자컴퓨터통신학과 교수
 ※주관심분야 : 이동통신, 디지털신호처리, 저장기록장치