

論文 98-35S-10-2

Stateless 최소대역폭 2진 선로부호 MB46d의 설계

(Design of A Stateless Minimum-Bandwidth Binary Line Code MB46d)

李 東 日 * , 金 大 榮 *

(Dong Il Lee and Dae Young Kim)

요 약

최소대역폭 성질을 만족하고, 직류 성분을 지니고, 상태 독립적인 부호화 및 복호화가 가능한 2진 선로부호 MB46d를 BUDA 셀 기법을 응용하여 설계하였다. 설계된 선로부호 MB46d는 하나의 상태만 존재하므로 앞 상태에 무관하게 부호화할 수 있으며 데이터 메모리 용량이나 하드웨어가 간단하다. 또한, 최대 연속장이 8로 제한되어 있으므로, 수신 측에서 시각 정보를 많이 가져 자체 동기 기능을 가지며, 복호화 규칙이 매우 간단하며, 임펄스 응답 함수가 Raised cosine pulse인 시스템에서 최악의 경우에도 눈 모양이 크게 열려있으므로 어느 정도의 샘플링 지터가 존재하더라도 오류 없는 수신이 가능하다. 제안된 2진 선로부호 MB46d는 직류 성분 성질을 제한하지 않은 반면에 고주파 성분을 더욱 억압하여 캐리어 파일럿 삽입 시 데이터 스펙트럼과 파일럿 사이의 간섭을 최소화 할 수 있다는 장점도 가지고 있다.

Abstract

A binary line code, called MB46d, is designed by use of the BUDA(Binary Unit DSV and ASV) cell concept to retain the property of being runlength limited, DC free, and with a power spectral null at the Nyquist frequency. This new code is a stateless line code with a simple encoding and a decoding rule and enables efficient error monitoring. The power spectrum and the eye pattern of the new line code are simulated for a minimum-bandwidth digital transmission system where the sinc function is used as a basic pulse. The obtained power null at the Nyquist frequency is wide enough to enable easy band-limiting as well as secure insertion of a clock pilot where necessary. The eye is also substantially wide to tolerate a fair amount of timing jitter in the receiver.

I. 서 론

디지털 전송 시스템에서 데이터를 선로 상의 전송 신호로 표시함에 있어서, 전송 선로상의 신호 파형을 선로의 전달 특성에 맞추거나, 수신 측의 원활한 동기 재생을 위하여 원 데이터를 적절한 값의 디지털 심벌(symbol)로 변환하는 과정이 필요한데 이 과정을 선로부호화 한다고 하며, 이때의 변환 방법을 선로부호

(Line Code)라 한다^[1].

선로부호는 원 데이터를 그 내용에 상관없이 오차 없이 전달하는 기본적 전송 기능을 가지면서, 동시에 수신기가 정확한 시각에서 표본화할 수 있도록 전송 신호에 타이밍 정보를 삽입한다거나 전송 품질을 감지할 수 있는 기능도 가지고 있어야 하며, 대역폭과 전력 소모가 적은 전송 신호를 만들 수 있어야 한다.

그 동안 여러 가지의 선로부호가 사용되어 오면서 선로부호의 일반적 성질 즉, 무직류(DC free) 성분 성질, 최소대역폭(Minimum bandwidth) 성질, 유한 연속장(Runlength Limited:RLL) 성질 등에 관한 연

* 正會員, 忠南大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Chungnam Univ.)

接受日字: 1998年3月16日, 수정완료일: 1998年7月1日

구가 많은 진전을 보여 왔다.

전송 선로 중에 흔히 접하는 직류 혹은 저주파 성분을 전송할 수 없는 교류 접속형(AC-coupled) 선로로 데이터를 전송하기 위해서는 선로부호가 저주파 성분이 적고 직류 성분이 존재하지 않는 무직류 성분 성질을 가져야 한다. 선로부호의 무직류 성분 성질이 시스템 매개변수의 하나인 Digital sum variation (DSV)와 관련성이 있다는 사실이 정립되었다^[2].

디지털 가입자 전송에서와 같이 감쇄가 매우 심한 선로에서 고속의 전송을 가능하도록 하기 위하여 전송 펄스 파형이 sinc 함수가 되는 최소대역폭 전송 방식에서 눈모양이 크게 열리는 최소대역폭 성질이 선로부호의 또다른 시스템 매개변수인 Alternate sum variation (ASV)와 관련이 있다는 사실 즉, ASV가 유한하면 최소대역폭 성질이 보장된다는 사실이 정립되었다^{[3] [4] [9]}.

최근에는 BUDA(Binary Unit DSV and ASV) 개념을 적용하여 무직류 성분 성질 및 최소대역폭 성질을 모두 만족하는 2진 선로부호에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[5].

본 연구에서는 BUDA(Binary Unit DSV and ASV) 셀 설계 기법을 응용하여 저역 통과 채널(Low-pass channel)과 QAM 시스템 등에서의 파일럿 삽입에 적합하도록 최소대역폭 성질을 만족하면서, 나이퀴스트 주파수 근처의 스펙트럼을 더욱 억압하여 캐리어 파일럿 삽입 시 데이터 스펙트럼과 파일럿 사이의 간섭을 최소화 할 수 있으며, 직류 성분을 지니고 상태 독립적인 부호화 및 복호화가 가능한 2진 선로부호 MB46d를 설계한다.

본 논문은 먼저 제 II 장에서 선로부호의 시스템 매개변수인 DSV와 ASV의 성질에 대하여 간단히 설명하고, 이러한 성질을 이용하여 고안된 BUDA 셀 설계 기법에 대하여 설명한 뒤에, BUDA 개념에서 직류 성분을 가지며 최소대역폭 성질을 만족하는 선로부호를 설계하기 위한 새로운 설계 기법을 소개한다. 제 III 장에서는 BUDA 셀 개념을 응용하여 stateless 최소대역폭 2진 선로부호인 MB46d를 설계 규칙을 설명하고, 제 IV 장에서는 설계한 stateless 최소대역폭 2진 선로부호인 MB46d의 성능을 측정하기 위하여 전력 스펙트럼과 눈 모양을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 확인하였다. 그리고 제 V 장에서는 결론을 맺었다.

II. 전송 시스템 모델 및 BUDA 셀

1. 전송 시스템 모델

그림 1은 전형적인 기저대역(baseband) 디지털 전송 시스템의 모델을 나타낸 것으로서, 선로부호기, 송신필터, 전송 채널, 수신필터, 선로복호기로 구성된다. 입력데이터 시퀀스 $\{a_n\}$ 은 선로부호기에 의하여 심벌 시퀀스 $\{b_n\}$ 으로 변환되고 이것은 다시 송신필터 $H_t(\omega)$ 로 여파되어 전송된다. 전송신호 $X(t)$ 는 전송선로의 전달특성 $H_c(\omega)$ 에 의하여 감쇄되고, 가산성 잡음 $n(t)$ 와 합하여져서 수신된다. 수신기에서는 수신필터 $H_r(\omega)$ 로 신호대 잡음비를 증대시킨 후에 ISI가 없는 시점에서 그 값을 샘플링하고, 이것을 복호화하여 원천 데이터를 판독한다.

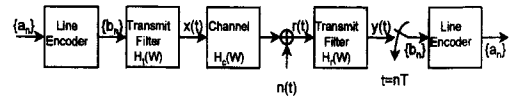


그림 1. 기저대역 디지털 전송 시스템
Fig. 1. Baseband digital transmission system.

송신필터의 임펄스 응답(Impulse Response) 함수를 $h_t(t)$, 선로에 대한 임펄스 응답함수를 $h_c(t)$, 수신필터의 임펄스 응답 함수를 $h_r(t)$ 라 하면 수신필터의 출력 $y(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n g(t - nT) + \zeta(t) \quad (1)$$

여기서 $g(t)$ 는 송신필터, 선로, 수신필터 모두에 대한 전체의 임펄스 응답 함수이며 $h_t(t)$, $h_c(t)$ 와 $h_r(t)$ 의 컨볼루션으로 구해진다. 따라서 이것의 주파수 전달특성을 $H_g(\omega)$ 라 하면

$$H_g(\omega) = H_t(\omega)H_c(\omega)H_r(\omega) \quad (2)$$

가 된다. 그리고 $\omega(t)$ 는 가산성 잡음 $n(t)$ 가 수신필터에 의해 여파된 신호이다. $y(t)$ 는 매 T 초 마다 표본화되고, 샘플 시퀀스 $\{b_n\}$ 이 복호화되어 원천 데이터 시퀀스 $\{a_n\}$ 이 판독된다.

이러한 모델에서 인접 심벌들간의 간섭인 ISI가 발생되지 않기 위해서는 기본 펄스 파형(basic pulse shape)인 $g(t)$ 가 샘플링 되는 시간에서 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다^[11].

$$g(nT) = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

이것을 나이퀴스트 제 1 기준(Nyquist first criterion)이라고 하며 주파수 영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} H_g(\omega - 2\pi k/T) = \begin{cases} T, & |\omega| < \pi/T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

이러한 조건을 만족하는 $g(t)$ 를 나이퀴스트 펄스라고 부르는데, 여러가지의 나이퀴스트 펄스들 중에서 가장 작은 대역폭을 가지는 경우는 $H_g(\omega)$ 가 이상적인 저역 통과 필터일 때로서,

$$H_g(\omega) = \begin{cases} T, & |\omega| \leq \pi/T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

이고, 이것에 대한 기본 펄스 파형 $g(t)$ 는 다음과 같은 sinc 함수이다.

$$g(t) = \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T} \quad (6)$$

이때의 전송 대역폭은 $1/2T$ [Hz]가 되며, 이러한 것을 최소대역폭 전송이라고 한다.

그런데, 최소대역폭 전송은 비록 그 정의에 의하여 ISI가 없는 전송을 가능케 하고 있지만, 무작위의 심벌 시퀀스를 전송하였을 때에는 샘플되는 신호 $y(t)$ 에 대한 눈 모양에서 눈의 좌우폭이 0이 된다. 즉, 정확한 샘플링 순간에서 조금만 벗어나더라도 무한대의 ISI가 존재하게 되므로 온전한 수신이 되기 위해서는 샘플링 신호에 지터가 완전히 배제 되어야 하는데, 이것은 사실상 불가능한 일이다. 따라서 최소대역폭 전송이 실용성을 갖기 위해서는 눈이 좌우로 열리어 있어서 어느 정도의 샘플링 지터가 존재하더라도 오류없는 수신이 가능하여야 한다. 그런데, 이러한 전송되는 심벌 시퀀스의 출력 형태를 제어하므로써 가능하다는 것이 알려져 있다^{[5] [7]}.

2. 시스템 매개변수

최소대역폭 선로부호의 설계를 위해 식(7)과 같이 정의된 Running Alternate digital Sum(RAS)의 최대 변화값인 Alternate Sum Variation(ASV)를 유한하게 하면 나이퀴스트 주파수($f_N=1/2T$)에서 전력

스펙트럼 영점이 존재하는 최소대역폭 성질이 보장될 수 있다^{[5] [7]}.

$$RAS \equiv \sum_{n=I}^J (-1)^n b_n \quad (7)$$

$$ASV \equiv \max_{I, J, \{b_n\}} \left| \sum_{n=I}^J (-1)^n b_n \right| \quad (8)$$

여기서, I, J는 $I < J$ 인 임의의 정수이고, b_n 은 선로부호의 출력 심벌 시퀀스이다.

그리고, 무직류 성분 성질을 갖는 선로부호의 설계를 위해 식(9)와 같이 정의된 Running Digital Sum(RDS)의 최대 변화값인 Digital Sum Variation(DSV)를 유한하게 하면 DC($f=0$)에서 어떠한 전력 성분도 갖지 않는 무직류 성분 성질이 보장될 수 있다^[2].

$$RDS \equiv \sum_{n=I}^J b_n \quad (9)$$

$$DSV \equiv \max_{I, J, \{b_n\}} \left| \sum_{n=I}^J b_n \right| \quad (10)$$

즉, DSV가 유한하여 RDS가 발산하지 않으면 출력 심벌 시퀀스는 DC에서 어떠한 전력 성분도 갖지 않으며(역도 성립), ASV가 유한하여 RAS가 발산하지 않으면 나이퀴스트 주파수에서 전력 스펙트럼이 0가 되며 또한 눈 모양이 열리게 된다^[4].

3. BUDA 셀과 그 응용

DSV와 ASV가 동시에 유한한 2진 선로부호를 설계하기 위하여 DSV 및 ASV가 각각 1로 유한한 BUDA(Binary Unit DSV and ASV) 셀을 도입한다^[5]. 2진 부호에서 논리 심벌 집합 {0,1}을 물리적 심벌 집합 $\{-1/2, 1/2\}$ 로 치환할 때, DSV 및 ASV가 1이 되는 심벌 시퀀스 '1100'에 대하여 살펴본다. 식 (10)의 ASV는 식 (9)로 정의된 RAS의 최대 변화값이다. 심벌 시퀀스 '1100'의 RAS는 그림 2와 같이 (0, -1/2, 0, 1/2, 0)으로 변화한다. 또한, 식 (12)의 DSV는 식 (11)로 정의된 RDS의 최대 변화값으로서, RDS를 계산하는 과정에서 구할 수 있다. 심벌 시퀀스 ($b_1 b_2 b_3 b_4 = 1100$)의 RDS는 그림 2와 같이 시퀀스의 순서가 진행됨에 따라 (0, 1/2, 1, 1/2, 0)으로 변화함을 알 수 있다.

그림 2로부터 심벌 시퀀스 '1100'의 DSV 및 ASV가 각각 1이 됨을 알 수 있다. 한편, RDS를 X

축으로 하고, RAS를 Y축으로 하여 RDS와 RAS 값의 변천 과정을 X-Y좌표계에 그려보면 그림 3과 같다.

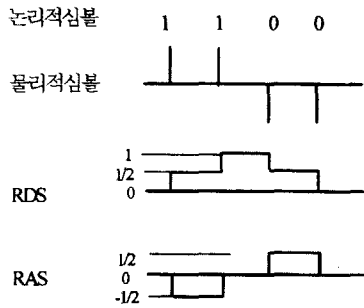
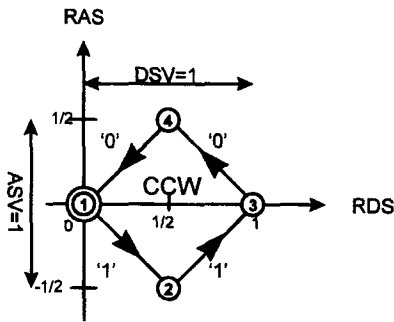
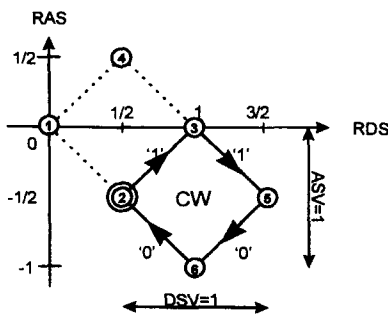


그림 2. 심볼시퀀스 '1100'의 (RDS,RAS)
Fig. 2. (RDS,RAS) of symbol sequence '1100'.

그림 3에 나타난 셀은 DSV 및 ASV가 각각 1이 되므로 이를 BUDA(Binary Unit DSV and ASV) 셀이라 한다. 그림 3(a)는 노드 1에서 반시계 방향 (Count Clockwise: CCW)으로 진행하므로 CCW BUDA 셀이라 하고, 그림 3(b)는 노드 2에서 시계 방향(Clockwise: CW)으로 진행하므로 CW BUDA 셀이라 한다.



(a) 노드 1에서 시작



(b) 노드 2에서 시작

그림 3. 심볼시퀀스 '1100'의 RDS 및 RAS 궤적
Fig. 3. Trajectory of symbol sequence '1100' by RDS & RAS.

유한 개의 BUDA 셀을 적절히 접속하여 BUDA 셀 스택을 만들어 설계하면, 그 선로부호는 DSV 및 ASV가 유한하게 되어 무직류 성분 성질 및 최소대역폭 성질을 갖게 된다.

BUDA 셀 스택의 각 노드는 독립적인 상태로 결정될 수 있으나, 본 연구에서는 직류 성분을 포함하는 최소대역폭 선로부호의 설계이므로, 이를 위해서는 DSV를 배제하고 ASV만을 유한하게 하면 된다. 따라서, 직류 성분을 포함하는 최소대역폭 선로부호는 경우에 따라 심벌 시퀀스에 포함된 직류 성분에 의해 DSV가 RDS축을 따라 무한대로 발산하게 되므로, 이를 RDS, RAS 평면에서 보면 RDS 축상에 무한 개의 상태가 존재하게 된다. 이는 실제로 무한 개의 상태 수를 가지게 되며, 결국 BUDA셀을 이용한 코드의 설계를 불가능하게 하므로 여기서 노드의 수를 유한 개로 줄일 수 있는 응용된 개념이 필요하게 된다.

선로부호가 직류 성분을 포함하는 경우에는 식 (10)의 정의에 의하여 DSV가 무한하게 확장될 수 있으므로, 이러한 개념을 RDS축을 따라 무한하게 확장하여 보면 DSV의 제한을 없앤, 즉 직류 성분을 제한하지 않는 부호의 설계에 응용할 수 있는 상태선 개념을 BUDA셀 설계 기법으로부터 응용할 수 있다.

즉, RDS축에 평행이고, RAS의 값을 절편으로 갖는 선을 상태선으로 가정하면, 상태선 수는 RAS의 절편 수 만큼 존재하고, ASV가 유한하게 설계된 선로부호에서는 RAS의 절편이 유한하므로 자연스럽게 유한한 상태선이 존재하게 되고, 단일 상태선 상에 존재하는 모든 노드를 하나의 상태로 간주할 수 있게 되어 노드의 과잉에 의한 설계의 어려움도 극복할 수 있다. 이를 그림 4에 도시하였다.

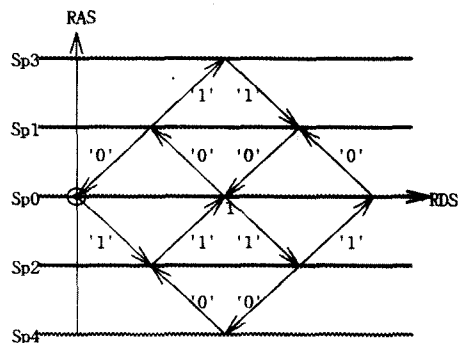


그림 4. 상태선 개념
Fig. 4. BUDA cell connection with possible state_line.

그림 2(a)에서 노트1을 시작점으로 하는 4비트 부호 '1100'과 노트3에서 시작하는 4비트 부호 '0011'의 궤적은 그 중점이 달라서 서로 다른 상태를 가지게 되나, 상태선의 개념을 도입하면 그림 4에서 보듯이 시작하는 상태선(Sp0)과 끝나는 상태선(Sp0)이 동일하므로 결국은 하나의 상태임을 알 수 있다.

이상의 개념을 이용하면 직류 성분을 포함하는 최소대역폭의 선로부호군의 설계가 가능하다.

III. Stateless 최소대역폭 2진 선로부호 MB46d의 설계

직류 성분을 포함하며 타이밍 신호를 위한 파일럿 톤의 주입이 용이하고 최소대역폭 성질을 만족하는 stateless 2진 선로부호 MB46d을 설계한다.

제안된 2진 선로부호 MB46d는 입력되는 2진 원천 데이터를 4비트씩 블록화하여 임의의 6비트의 심벌 시퀀스를 출력하는 (6,4) 블록 2진 선로부호이다. 그러므로 4비트의 입력 데이터에 대하여 6비트의 출력 심벌 시퀀스를 만들어야 하므로 임의의 한 상태에서 $2^4(16)$ 가지의 서로 다른 고유의 출력 심벌 시퀀스가 존재하여야 한다.

표 1. RAS=0인 출력 부호어
Table 1. Output codeword with RAS=0.

No.	Output codeword	RDS	RAS
1	000000	-3	0
2	000011	-1	
3	000110	-1	
4	001001	-1	
5	001100	-1	
6	010010	-1	
7	001111	-1	
8	011000	-1	
9	011110	1	
10	100001	-1	
11	100111	1	
12	110011	1	
13	101101	1	
14	110000	-1	
15	110110	1	
16	111001	1	
17	111100	1	
18	011011	1	
19	100100	-1	
20	111111	3	

먼저 6비트로 구성된 출력 심벌 시퀀스의 RDS 및 RAS 값을 정리한 후에, RAS 값이 0인 출력 심벌 시퀀스를 선택하여 정리하면 표 1과 같다.

유한연속장 성질을 만족하는 MB46d의 대응 규칙은, 표 1에서 RAS가 0인 심벌 시퀀스는 20개가 존재하므로, 이들을 16개의 입력에 대하여 다음과 같은 규칙을 적용하여 출력 심벌 시퀀스를 대응시킨다.

- 연속장의 수를 제한하기 위하여 '000000' 및 '111111'은 제외시킨다.
- 나이퀴스트 주파수에서 폭이 넓은 전력 스펙트럼을 얻기 위하여 입력 데이터에 대한 출력 심벌 시퀀스의 대응을 조절한다.
- 입력 데이터와 출력 심벌 시퀀스의 처음 4비트가 가능한 일치하도록 대응시킨다.

위의 대응 규칙에 따라 선택된 16개의 출력 심벌 시퀀스에 의해 만들어진 BUDA 셀 스택을 만들면 그림 5와 같이 1개의 상태선(Sp0)으로 4비트의 입력에 대한 6비트의 출력 심벌 시퀀스의 대응이 가능해진다.

MB46d 부호는 ASV가 3으로 유한하므로 최소대역폭 성질을 만족하면서 유한연속장 성질을 만족하며, 상태가 1개 뿐이므로 stateless 부호가 되어 상태의 수가 여러개인 부호에 비하여 상태를 판별하기 위한 과정이 생략되므로 처리 시간이 단축되어 고속 전송에 유리하다. 또 상태가 하나 뿐이므로 입력에 대응되는 출력 시퀀스를 복수로 기억할 필요가 없으므로 메모리 용량이 감소되고, codec 구현도 단순하다.

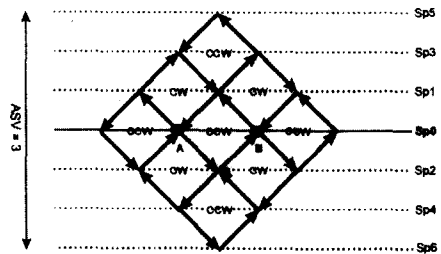


그림 5. MB46d의 BUDA 셀 스택
Fig. 5. BUDA cell stack of MB46d.

위에서 제시된 대응 규칙으로부터 설계된 MB46d의 부호책은 표 2와 같으며, 이의 상태 천이도는 그림 6과 같다.

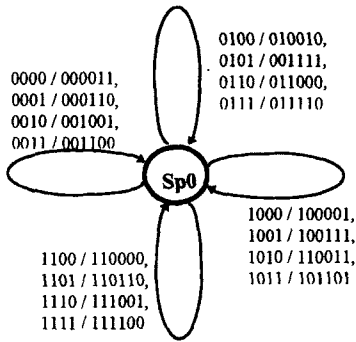


그림 6. MB46d의 상태 천이도
Fig. 6. State transition diagram of MB46d.

표 2. MB46d의 부호책
Table 2. Code book for MB46d.

u	Input word	Output codeword	Displacement
1	0000	000011	B→A
2	0001	000110	B→A
3	0010	001001	B→A
4	0011	001100	B→A
5	0100	010010	B→A
6	0101	001111	B→A
7	0110	011000	A→B
8	0001	011110	A→B
9	1000	100001	B→A
10	1001	100111	A→B
11	1011	110011	A→B
12	1011	101101	A→B
13	1100	110000	B→A
14	1101	110110	A→B
15	1110	111001	A→B
16	1111	111100	A→B

MB46d 부호는 ASV가 3으로 유한하므로 최소대역폭 성질을 만족하며, MB46d 부호는 심벌 시퀀스가 연속될 때 동일 심벌의 최대 길이가 8로 제한되므로 유한연속장 성질도 함께 만족한다.

수신 측에서 원천 데이터를 찾기 위하여 수신된 심벌 시퀀스를 6비트씩 블럭화하여 부호책에 따라 원천 데이터를 복원할 수 있으므로 부호책은 동시에 복호책도 된다. 그리고 상태의 수가 하나이므로 상태 독립적으로 부호화 및 복호화가 가능하며, 입력 데이터 4비트와 출력 심벌 시퀀스의 처음 4비트가 대부분 일치(14개 일치)하므로 하드웨어 구현이 간단하다.

IV. 성능 평가

선로부호의 성능이란 곧 선로부호의 사용 목적에 얼마만큼의 기능을 충족시키는지를 뜻하는 것이므로, 성능 판별의 관점은 선로부호의 응용 분야에 따라 다르다. 그러나, 통상 비교 분석되는 선로부호의 특성으로는 전송 신호의 주파수 특성, 전송 품질의 오류 특성, 수신 측에서의 표본화 시간 변화에 대한 민감도, 진폭 특성 및 선로 왜곡에 대한 민감도 등이 있다.

본 장에서는 MB46d 부호의 전력 스펙트럼과, MB46d 부호의 눈 모양을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

1. 전력 스펙트럼

선로부호의 주요 성능 평가 기준으로 전력 분포의 계산을 하게 되는데 이를 위하여 1974년 이탈리아인 Cariolaro가 개발한 블럭 부호에 대한 전력 스펙트럼 알고리즘^[6]을 적용한 프로그램으로 구하였다. 선로부호의 전력 스펙트럼은 입력 데이터가 '1'일 확률 P의 세 가지 값(P=0.25, 0.5, 0.75)에 대하여 계산하였다.

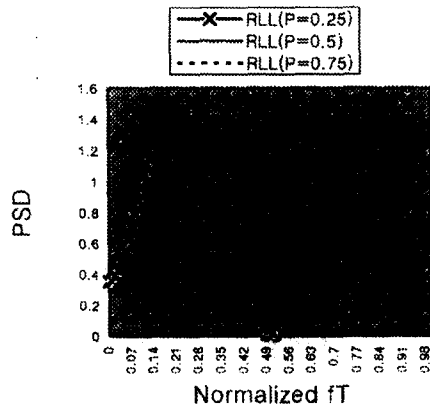


그림 7. MB46d의 전력 스펙트럼
Fig. 7. Power spectrum of MB46d.

그림 7은 MB46d의 전력 스펙트럼이다. MB46d 부호는 ASV=3으로 유한하므로 나이퀴스트 주파수 (fT=0.5)에서 스펙트럼이 0이 되는 것을 볼 수 있다. 그러나, DSV는 무한대이므로 fT=0에서 많은 양의 전력 분포를 가지고 있으며, fT=0.2에서 전력 분포의 극점을 가지고 있다. 입력 데이터가 '1'일 확률 P가 0.25인 경우와 0.75인 경우의 전력 분포가 거의 일치한다.

MB46d 부호는 직류 성분을 가지고 있으나, 고주파 성분을 더욱 억압하여 캐리어 파일럿 삽입 시 데이터 스펙트럼과 파일럿 사이의 간섭을 최소화 할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

2. 눈 모양

임펄스 응답 함수가 나이퀴스트 펄스인 시스템에 2진 펄스 시퀀스를 인가하면 그 출력은 $t=nT$ 에서는 2가지(-1/2 혹은 1/2)의 값만을 가진다. $t=nT-T/2$ 와 $t=nT+T/2$ 의 구간에 대해서 이 출력이 가질 수 있는 함수 값을 모두 함께 나타내어 보면, $t=nT$ 를 중심으로 1개의 눈 모양이 나타나는데 이것을 눈 모양(eye pattern)이라고 한다. 눈 모양은 특정한 샘플링 시간에 대한 잡음의 여유도, 표본화 시각의 변화에 대한 민감도 및 타이밍 오류에 의한 시스템의 민감도 등 시스템 성능에 관한 정보를 제공한다.

최소대역폭 시스템에서 임의의 ASV 값 및 임의의 신호레벨 차수에 대한 최악의 경우의 눈 모양을 구할 수 있으며 또한 그때의 신호레벨 시퀀스를 구할 수가 있다^[7]. 표 3은 신호레벨이 2차인 최소대역폭 시스템에서의 최악의 경우 눈의 하한 폭을 보여준다.

표 3. 최소대역폭 시스템의 최저 눈 폭
Table 3. Lower-bound eye widths for minimum-bandwidth systems.

ASV	Eye width
1	0.813
2	0.506
3	0.418
4	0.373
5	0.345
6	0.324
7	0.309
8	0.297
9	0.287
10	0.278
11	0.271
12	0.265
13	0.260
14	0.255
15	0.250

임펄스 응답 함수가 raised-cosine pulse인 시스템에서 MB46d 부호에 대한 눈 모양을 초과 대역폭의 지수(roll-off parameter) α 값에 따라 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과를 그림 8, 그림 9, 그림 10에

나타내었다. $\alpha = 1$ 인 경우에는 눈폭이 1에 가까우며, $\alpha = 0.5$ 인 경우 0.75이며, $\alpha = 0$ 인 경우는 0.430으로 측정되었다.

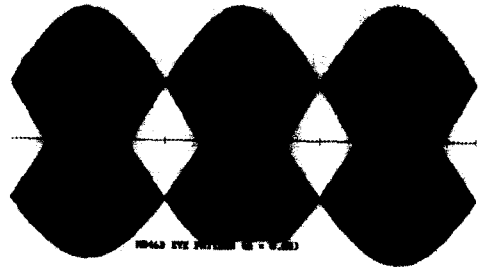


그림 8. $\alpha=0$ 인 경우 눈 모양
Fig. 8. Eye Pattern of MB46d with $\alpha=0.0$.

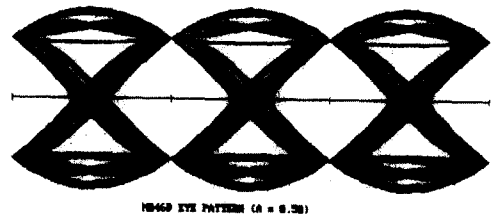


그림 9. $\alpha=0.5$ 인 경우 눈 모양
Fig. 9. Eye Pattern of MB46d with $\alpha=0.5$

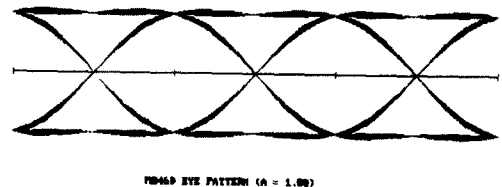


그림 10. $\alpha=1$ 인 경우 눈 모양
Fig. 10. Eye Pattern of MB46d with $\alpha=1.0$.

표 3에서 ASV가 3일 경우 이론적인 눈의 하한 폭이 0.418이고, ASV가 2일 경우 0.506이므로, ASV가 3인 MB46d 부호의 눈 폭 하한 폭 측정치가 0.430이므로 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서, MB46d는 어떠한 경우에도 눈이 크게 열려 있으므로 어느 정도의 샘플링 지터가 존재 하더라도 오류 없는 수신이 가능하다.

V. 결론

본 논문에서는 최소대역폭 성질을 만족하고, 직류

성분을 지니고, 오류 검출 능력이 우수하면서 상태 독립적인 부호화 및 복호화가 가능한 2진 선로부호 MB46d를 BUDA 셀 기법을 응용하여 설계하였다.

설계된 선로부호 MB46d는 하나의 상태만 존재하므로 앞 상태에 무관하게 부호화할 수 있으며 데이터 메모리 용량이나 하드웨어가 간단하다. 또한, 최대 연속장이 8로 제한되어 있으므로, 수신 측에서 시각 정보를 많이 가져 자체 동기 기능을 가지며, 오류 검출 능력이 좋고 복호화 규칙이 매우 간단하며, 임펄스 응답 함수가 Raised cosine pulse인 시스템에서 최악의 경우에도 눈 모양이 크게 열려있으므로 어느 정도의 샘플링 지터가 존재하더라도 오류 없는 수신 가능성이 보였다.

새로 제안된 2진 선로부호 MB46d는 최소대역폭 성질을 만족하므로 고속의 광전송 시스템에 응용 가능하며, 직류 성분 성질을 제한하지 않은 반면에 고주파 성분을 더욱 억압하여 캐리어 파일럿 삽입 시 데이터 스펙트럼과 파일럿 사이의 간섭을 최소화 할 수 있다는 장점을 가지고 있으므로, 디지털 마이크로파 및 이동 무선 시스템 등에서의 파일럿 삽입에도 효율적으로 응용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] H. Kobayashi, "A survey of coding schemes for transmission or recording of digital data," *IEEE Trans. Commun. Technol.*, vol.

COM-19, pp. 1087-1100, Dec. 1971.
[2] G .L. Pierobon, "Code for zero spectral density at zero frequency," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-30, no. 2, pp. 435-439, Mar. 1984.
[3] D. Y. Kim and J.-k.Kim, "A condition for stable minimum bandwidth line codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-33, no. 2, pp. 152-157, Feb. 1985.
[4] 백제인, "최소대역폭 전송에서의 개안 조건", *전자공학회 논문지* 제 27 권 제 9 호, pp. 11-16, 1990년 9월.
[5] 김정환, "최소대역폭 2진 선로부호의 설계 연구", *충남대학교 박사학위 논문*, 1992.
[6] G. L. Cariolaro and G. P. Tronca, "Spectra of Block Coded Digital Signals," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-22, no. 10, pp. 1555 - 1564, OCT. 1974.
[7] R.M. Brooks and A. Jessop, "Line coding for optical fibre systems," *INT. J. Electronics*, Vol. 55, No. 1, pp. 81-120, 1983.
[8] D. Y. Kim, "Lower-bound eye widths of Minimum-Bandwidth Systems," *IEEE Trans. On Commun.*, Vol. 43, No. 2/3/4, pp. 1235-1239, Feb./Mar./Apr. 1995.
[9] 김대영 외 3인, "최소대역폭 선로부호화에 관한 이론적 연구", *전자공학회 논문지* 제 27 권 제 5 호, pp. 656-665, 1990년 5월.

저 자 소 개



李 東 日(正會員)

1953년 9월 20일생. 1977년 3월 육군사관학교 전자공학과 졸업(공학사). 1988년 4월 미국 해군대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 현재 충남대학교 대학원 전자공학과 재중(박사과정). 1990년 7월 ~ 현재 육군본부 정보체계실 통신체계개발담당. 주관심분야는 전술통신망 체계설계, 무선/이동통신, 비화/정보이론



金 大 榮(正會員)

1952년 5월 28일생. 1975년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1977년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1983년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 현재 충남대학교 정보통신학과 교수