

저역 통과 선로를 위한 최소 대역폭 선로부호 (A Minimum-Bandwidth Line Code for Low-Pass Channels)

金大榮*, 金在均**
(Dae Yeoung Kim and Jae Kyoon Kim)

要 約

Duobinary 선로부호를 수정하여 "0"의 길이가 제한된 최소 대역폭 선로부호를 설계하였다. 이 새로운 부호는 duobinary와는 달리 "0"의 길이가 제한되어 self-clocking 특성을 가지므로, 수신측의 원활한 동기 재생을 위한 송신측의 데이터 스크램블링이 필요없다. 또한, 눈폭(eye width)과 오관율(error rate) 특성도 duobinary에 버금하며, 전력스펙트럼도 그에 유사하여, optical fiber와 같은 저역통과특성의 선로에 적합하다.

Abstract

A new runlength-limited minimum-bandwidth line code is designed by modifying the duobinary code. Since the new code is runlength limited, the need for a data scrambling before transmission is eliminated. The eye width and the error probability of the new code are shown to be almost the same as those of the duobinary code. Also, the power spectral shape is scarcely changed, so that the new code is suitable for such low-pass channels as optical fibers.

1. 序 論

데이터 전송에 있어서 0, 1로 표시되는 원래의 2진 데이터 신호는, 직접 그대로는 송신에 부적합하여 적절히 부호화해야함이 보통인데, 이때 사용되는 부호를 선로부호라 한다.^[1~3] 예를 들어 대부분의 데이터 전송선로 또는 magnetic tape/disc들의 매체에서는 직류성분이 전혀 전송되지 않는 반면, 2진신호는 무작위 데이터의 경우 상당량의 직류성분을 포함하므로 위와 같은 선로에서는 그 직접 전송이 부적당하다. 이러한 이유때문에 일찌기 T1 반송시스템에서는 bipolar (BP) 선로부호를 사용하였다^[4] 이 부호는 여하한

입력데이터에 대해서도 그 평균전력에 직류성분이 없고 실질요구 대역폭도 무작위 2진 신호와 대동소이하다. 이 BP는 현존하는 수많은 선로부호중에서 가장 대표적인 부호로 꼽을 수 있으며, 대부분의 다른 부호들도 BP의 아류로 볼 수 있다.^[1~3, 5]

1963년 Lender는 BP의 부호화법칙을 수정하여 duobinary(DB)라는 중요한 선로부호를 발표하였다.^[6] 이 부호의 가장 두드러진 특징은 그 요구대역폭이 Nyquist가 발견한 최소치^[7] 곧 펄스전송률의 반이라는 점이다. $1/T$ 을 펄스전송률, B_N 을 Nyquist 대역폭이라 하면, DB의 대역폭은

$$B = B_N = 1/2T \tag{1}$$

이다. 2진 부호나 BP는 B_N 의 대역폭으로는 선로신호의 눈(eye)^[8]이 열리지 않아서 부호의 판독이 불가능하며, 실질요구 대역폭을 Nyquist 대역폭의 두배, 곧 $1/T$ 로 잡는 것이 보통이다.^[4, 8, 9] 이에 반해 DB

*正會員, 忠南大學校 工科大学 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Choong Nam Univ.)
**正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Electrical Eng., KAIST)
接受日字: 1983年 5月 16日

는 B_n 의 대역폭만으로도 눈이 약 0.667 T 정도의 큰 폭으로 열리며^[10] 전송속도의 변화에도 강하여, 개별 펄스모양은 그대로 두고 전송속도를 표준치의 143% 까지 올리도록 눈이 닫히지 않는다.^[6, 8, 10] 단, DB는 직류전력이 존재하여 교류접속선로에는 부적합하지만, 지금까지 많은 고속 QAM모뎀의 기본대역 선로부호로 사용되었으며^[11] 최근에는 광섬유에의 응용도 차츰 시도되고 있다.^[12, 13]

DB는 그의 많은 장점에도 불구하고 하나의 중요한 결점을 갖고 있다. 즉, 데이터 '1'에는 '+' 또는 '-' 펄스가 전송되고 데이터 '0'에는 아무런 펄스도 전송되지 않기 때문에, 데이터 '0'가 오래 계속되면 선로 신호에는 아무런 펄스도 나타나지 않아서 수신측에서 선로 신호로부터의 동기신호 추출이 불가능하다. 이 결점은 BP※도 갖고 있으며, 이를 보완하기 위해 보통 데이터를 전송전에 scramble 하지만,^[14] scrambling만으로는 이 현상을 완전히 방지할 수 없다. 선로 부호의 이런 결점을 "runlength가 제한되어 있지 않다"고 한다. 통상 3 내지 10으로 runlength가 제한된(RLL: runlength limited) 선로부호가 여럿 제안되었지만^[1-3, 15] 최소대역폭(MB: minimum bandwidth) 부호는 단 하나^[11]이며, 특히 저역통과선로용으로 직류전력을 갖지 않는 MB RLL 부호는 필자가 아는 한 아직 알려진 바 없다.

본 논문에서는 DB의 RLL이지 못한 결점을 보완하여, '0'의 runlength가 제한된 점을 제하고는 여타의 특성이 DB와 매우 유사한 MB RLL 부호를 제안하고자 한다. VDBr이라 이름 붙여진 이 선로부호는 눈의 크기, 오판률, 전력스펙트럼 등 모두 DB의 경우에 매우 근사함이 확인되었다.

RLL특성을 보충하기 위해 DB의 부호화법칙을 수정함에 있어서 기존의 MB특성을 잃지 않도록 하기 위한 이론적 기준이 필요하였는데, 이에 관한 사항을 II장에서 논한다. III장에서는 RLL특성을 보충하기 위한 구체적인 설계조건을 검토하고, 이에 근거하여 설계된 새 선로부호를 IV장에서 소개한다. V장에서는 새 선로부호의 특성을 전력스펙트럼, 눈모양(eye pattern), 오판률 등의 측면에서 알아보고, VI장에서 논문의 결론을 맺는다.

II. 최소대역폭(MB) 특성을 위한 조건

기저대역 데이터 전송 시스템(baseband data transmission system)은 그림 1과 같은 열개, 곧 부호기 F,

펄스성형기 $G(w)$, threshold 검출기와 복호기 F^{-1} 로 구성된다. 선로(channel)는 이상적(ideal) 선로를 가정하거나 $G(w)$ 에 포함된 것으로 간주한다.

원천데이터 $x_n \in \{0, 1\}$ 은 편이상 (2) 또는 (3) 식으로 표시할 수 있다.

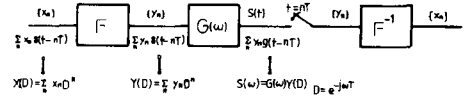


그림 1. 기저 대역 데이터 전송 시스템 열개도
Fig. 1. Block diagram of a baseband data transmission system.

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n \delta(t-nT) \tag{2}$$

$$X(D) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n D^n \tag{3}$$

여기에서 D는 지연소자이다.

$$D \triangleq e^{-jwT} \tag{4}$$

데이터 x_n 은 부호기 F에 의해 (5) 또는 (6) 식으로 표시되는 선로심볼 y_n 으로 치환된다.

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \delta(t-nT) \tag{5}$$

$$Y(D) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n D^n \tag{6}$$

일반적으로 y_n 의 레벨수는 임의의 다진 숫자일 수 있으나, 본 논문에서는 관심을 3진(ternary) 시스템에 국한한다.

곧,

$$y_n \in \{-1, 0, 1\} \tag{7}$$

$G(w)$ 는 각 구간의 펄스 $y_n \delta(t-nT)$ 를 대역제한하는 저역여파기인데, 우리의 관심은 MB 시스템에 있으므로 다음과 같은 이상적인 MB 펄스성형기를 생각한다.

$$G(w) = \begin{cases} T|w| \leq \pi/T \\ 0 \text{ 기타} \end{cases} \tag{8}$$

$G(w)$ 의 시간영역함수 $g(t)$ 는 다음과 같다.

$$g(t) = \text{sinc}(t/T) = \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T} \tag{9}$$

그러므로 송신부의 최종 출력 $s(t)$ 는 (5)와 (9)의 convolution, 곧

(※ 이 논문에서는 일관적으로 "precoded Bp" "precoded DB"를 논한다.)

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \frac{\sin[\pi(t-nT)/T]}{\pi(t-nT)/T}$$

$$= \frac{T}{\pi} \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^n y_n}{t-nT} \quad (10)$$

이 된다.

출력 y_n 은 부호기 F의 지배를 받으므로 동일한 입력군 $\{x_n\}$ 에 대해서도 부호기에 따라 (6)식의 $Y(D)$ 가 다르게 된다. 이때 주어진 부호기 F에 대한 $Y(D)$ 의 $D = -1$ 에서의 최대절대값을 ISV (ISI sum variation; ISI = intersymbol interference)라 부르기로 한다.^[16]

$$ISV \triangleq \max |y_n| \quad |Y(-1)| \quad (11)$$

$Y(-1)$ 의 부분합을 RIS (running ISI sum)이라 부르며,

$$RIS [I, J] \triangleq \sum_{n=1}^J (-1)^n y_n \quad (12)$$

ISV는 RIS의 최대 절대값에 해당한다.

$$ISV = \max_{I, J} |RIS [I, J]| \quad (13)$$

이렇게 정의된 새로운 시스템 parameter ISV를 이용하여 선로부호의 대역폭특성에 관해 다음과 같은 사실을 증명할 수 있다.^[16, 17] 즉 (8) 또는 (9)식을 이용한 MB 시스템에 있어서, 선로신호의 눈이 열리기 위한 충분조건은 ISV가 유한하다는 것이다.^[16, 17] 곧, ISV가 유한한 선로부호가 채택된 시스템은 (8)의 이상저역여파기를 이용해 Nyquist 대역폭으로 대역제한시켜도 선로신호의 눈이 열려 실용가능하다는 것이다.^[16, 17]

III. RLL MB 부호의 설계조건

II 장의 MB 선로부호의 조건에 유의하면 기존의 MB 특성을 해치지 않으면서도 DB의 '0' rulength를 제한할 수 있다. 곧, 입력에 연속되는 '0'의 길이가 예를 들어 $r+1$ 을 넘으면 이 '0'들을 '+' 또는 '-'의 심볼을 적어도 하나이상 포함하는 substitution pattern (SP)로 치환한다. 이렇게 하면, 수정된 선로부호에 있어서 '0'의 최대길이가 r 로 제한된다. 이때, MB특성을 잃지 않기 위해서는 ISV를 유한하게 유지해야 하는데, 이를 위해 다음과 같은 설계조건들을 마련할 수 있다.

1) 복호에 있어서 한 개의 오판이 계속해서 다수의 오판을 유발하는 것을 방지하기 위해^[15] 각 SP는 그 이전의 복호 결과에 무관하게 개별적으로 판별, 복호되도록 한다. 이를 위해서 매 SP안에 바로 이전 정상 펄스와

반대부호의 펄스를 앞 펄스와의 사이에 홀수개의 '0'를 두고 삽입한다. 이렇게 하면 이 삽입 펄스는 뒤에 논할 DB의 부호화 법칙을 명백히 위반하게 되어 복호시 즉시 쉽게 판별해 낼 수 있다. 이 펄스를 V(violation) 펄스라 명하고 SP가 삽입되어 있음을 나타내는 표시로 사용하기로 한다.

2) 위의 V펄스는 필연적으로 ISV를 원래 선로부호에서의 값보다 크게 한다. ISV가 작을수록 더 큰 눈폭이 보장되므로^[16, 17] 이 증가분이 최소가 되는 것이 바람직하다. V에 의한 ISV의 임의적인 증가를 상쇄해 주기 위해 하나 또는 그 이상의 보조 펄스를 사용하기로 하고 이를 B(normal DB) 펄스라 부르기로 한다.

3) 모든 SP의 끝은 반드시 '0'가 아닌 펄스라야 한다. 그 이유는 만일 SP의 뒷부분이 '0'라면, 이것은 뒤이어 오는 정상적인 '0'들과 합해져서 '0'의 설계 최대길이 r 이 초과될 수 있기 때문이다.

4) 한 SP에 있어서 V와 B를 합한 총 펄스의 수를 되도록 최소로 하여야 한다. 왜냐하면 이들 추가 펄스들은 필연적으로 시스템의 성능을 원래 수준 이하로 떨어뜨릴 것이므로 그 수가 적으면 적을수록 좋다.

IV. VDBr 선로부호의 구조

III 장의 설계조건을 바탕으로 DB부호를 수정해서 '0'의 연속길이가 r 로 제한되는 최소대역폭 선로부호를 설계하기로 한다. 우선 DB의 부호화법칙을 알아보기 위해 그림 2(a)에 보인 DB의 구성도를 검토하기로 한다. 입력의 2진데이터는 일단 반전되어

$$a_n = \bar{x}_n \oplus a_{n-1} \quad (14)$$

와 같이 선부호화(preceding)이 된다. a_n 은 이어

$$b_n = a_n - \frac{1}{2} \quad (15)$$

로 극성화된 후, 최종적으로

$$y_n = b_n + b_{n-1} \quad (16)$$

으로 부호화된다. 예를 들어, 입력 데이터

$$x_n = 010011010 \text{의 경우,}$$

$$\begin{aligned} x_n &= 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \bar{x}_n &= 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ a_n &= (0) & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{aligned} \quad (17)$$

$$2b_n = (-1) & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1$$

$$y_n = 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0$$

과 같다. 그림 2(a)는 선부호화 이전에 입력데이터를 반전시킨다는 점에서 일반적으로 알려진 DB의 구조^[8, 10]

와 다른데, 전자를 택함으로써 데이터 '0'에는 '0' 펄스가, 데이터 '1'에는 '±1' 펄스가 보내져 생각의 편의를 위한 자연스러운 대응관계가 되도록 하였다.

그림 2(a)와 (17)에 보인 DB의 상태도(입력 x_n , 출력 y_n)는 그림 2(b)와 같이 그릴 수 있다. 입력 '1'은 출력 '+' 또는 '-' 펄스로, 입력 '0'은 출력 '0'로 부호화되는데, 그림 2(b)에서는 입력데이터를 생략하고 간략하게 출력 펄스만을 표시하였다. '+' 또는 '-'의 두 펄스사이의 '0'가 짝수개이면 두 펄스는 같은 부호를, 홀수이면 다른 부호를 가짐을 유의할 필요가 있다.

그림 2(b)는 그 도식이 간략하기는 하지만 RIS의 변화를 밖으로 들어내 보이지는 못하고 있다. 그러나 그것을 그림 2(c)와 같이 펼치면 RIS의 변화가 들어난다. 예를 들어 위 (17)의 경우,

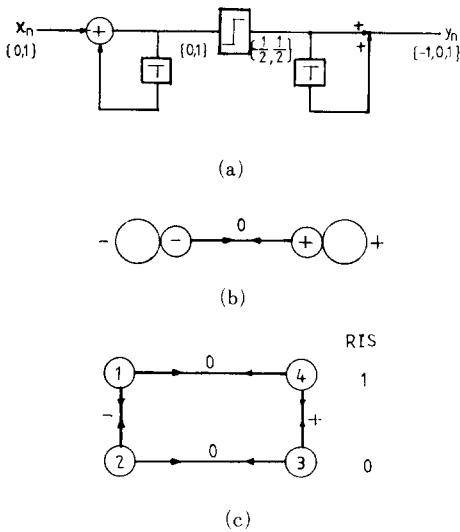


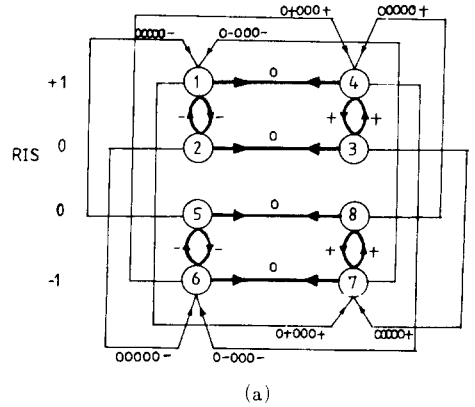
그림 2. DB : (a) 부호화기 (b) 접힌 상태도
(c) 펼쳐진 상태도
Fig. 2. DB : (a) Encoder (b) Folded state diagram
(c) Unfolded state diagram.

$$\begin{aligned}
 (-1)^n &= 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1 \\
 (-1)^n y_n &= 0 -1 0 0 1 -1 0 1 0 \\
 RIS &= \sum (-1)^n y_n \quad (18) \\
 &= (1) 1 0 0 0 1 0 0 1 1
 \end{aligned}$$

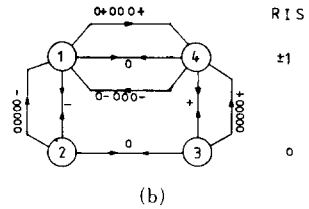
과 같다. 곧, DB에 있어서 RIS는 1, 0의 값만을 가지며, 따라서 그 변화폭에 해당하는 ISV는 1이다.

DB로부터 RLL MB 부호를 얻어 내기 위해 III장에 상술한 설계조건들을 그림 2에 도시된 DB에 적용하였다. 수 차례의 시행착오 끝에 임의의 '0' runlength

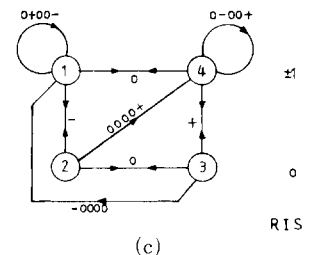
r에 적용되는 체계적인 부호화법칙을 정립할 수 있었으며, 이를 VDBr(Variation of DB for a runlength limit r)이라 이름지었다. 그중 r=5의 경우를 그림 3(a)에 보였다. 그림에서 굵은선은 정상 DB branch들이고, 가는선은 SP branch들이다.



(a) r = 5 펼쳐진 모양
(a) r = 5, unfolded.



(b) r = 5, 접힌 모양
(b) r = 5, folded.



(c) r = 4, 접힌 모양
(c) r = 4, folded.

그림 3. VDBr의 상태도
Fig. 3. State diagram of VDBr.

각 SP의 심볼들은 해당 SP branch의 화살표 방향으로 순서대로 보내진다. 그림 3(a)와 그림 2(c)의 비교로부터, VDBr은 상호 독립적인 DB 한쌍이

SP branch들을 통해 연결되어 있는 형태임을 알 수 있다. SP가 송신될 때마다 RIS는 그때까지 있었던 DB에서 허용하는 변화범위를 넘게되며, 이와 함께 부호화 state가 다른편 DB로 옮겨간다.

SP는 '00000V' 또는 '0B000V'의 형태를 취한다. 해당 SP 바로 앞의 펄스를 P라 할 때, 첫번째 형태에서는 V=P, 두번째 형태에서는 B=-P, V=B이다.

RIS는 윗 DB에서는 0, +1, 아랫 DB에서는 -1, 0 중의 한 값을 갖는다. 따라서 VDBr의 ISV는 2로서, DB로 부터의 증가분은 1이다.

그림 3(a)는 S1(State 1)과 S6, S2와 S5, S3와 S8, S4와 S7을 겹침으로써, 부호화법칙에 아무런 영향없이 그림 3(b)의 모양으로 간략화할 수 있다. 또한 r이 짝수인 경우의 VDBr은 그림 3(c)의 VDB 4와 같은 유형이 된다.

그림 4는 VDB5 부호화의 한 보기이다. 평상시 DB 법칙을 따라 부호화하고, 실선으로 묶어 표시한 바와 같은 여섯개의 연속된 '0'가 나타나면 'V' 또는 'B' 펄스를 삽입한다. 'V'는 III의 조건(1)에서와 같이 삽입펄스조합 SP를 즉시에 알아 보게 하기 위한 violation 펄스이다. 'V'와 그 이전 펄스사이에는 항상 3 또는 5개의 '0'가 있는데, 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 정상 DB에서는 이 경우 뒷 펄스는 앞 펄스와 반대 극성을 갖는다. 그런데 그림 4의 'V'는 앞 펄스와 같은 극성을 가지므로 수신측에서는 'V'를 그 발생 즉시 찾아낼 수 있다. 한편 'V'는 항상 SP의 마지막 펄스가 되기 때문에, 'V'를 포함해 이전 여섯 펄스가 SP에 해당하며, 이들을 모두 '0'로 호화한다. 'B'는 III장 조건(2)에 설명한대로 'V' 펄스를 반전시킴으로써 RIS(그림 4의 d)의 한 방향으로의 지나친 증가를 억제하기 위한 보조펄스이다.

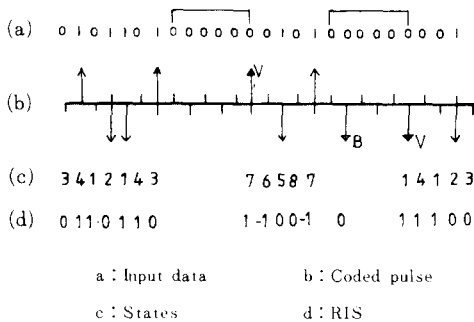


그림 4. VDB5 부호화의 보기
Fig. 4. A coding example of VDB5.

V. VDBr의 특성

1. 눈모양(eye pattern)

눈모양을 구하기 위해선 눈의 가장자리 선을 결정짓는 최악의 펄스조합을 찾아야 한다. VDBr은 3진 선로부호이므로 눈이 위 아래 2개 생기는데, 예를 들어 VDB5의 윗 눈의 오른쪽 윗선을 결정짓는 펄스조합은 그림 5(a)의 UR과 같다. 그림에서 굵은 선은 관심의 대상이 되는 구간, 즉 이 경우 눈의 오른쪽 부분을 나타낸다. 이 펄스 조합은 VDB5에서 가능한 조합중에서, 중심에 '+' 펄스를 두고 그 바른쪽 구간에서 여타 펄스들로 부터의 종합적 영향이 음으로 최대가 되는 조합이다. 마찬가지로, 그림 5(a)의 LR은 오른쪽 아랫선, 그림 5(b)의 UL은 왼쪽 윗선, LL은 왼쪽 아랫선을 결정하는 펄스 조합들이다.

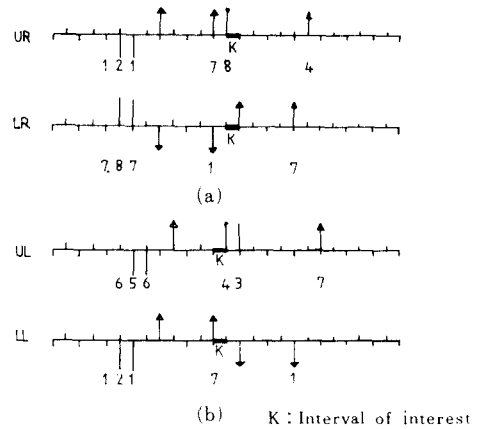


그림 5. 최악 펄스 조합
(a) 윗 눈 오른쪽 반 (b) 윗 눈 왼쪽 반
Fig. 5. Worst-case sequences for
(a) the right half,
(b) the left half of the upper eye.

그림 5의 각 펄스는 (9)식의 펄스모양을 가지므로, (10)식의 y_n 에 해당 펄스값을 넣으면 각 경계선의 식을 구할 수 있다. 곧,

$$x \leq t/T \tag{14}$$

라 놓으면, 그림 5의 최악 펄스조합에 의한 경계선들은 최대연속 '0'의 길이 r에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$UR(x, r) = \frac{\sin \pi x}{x} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{x-r-1} - \frac{1}{x+1} - \frac{1}{x+r} + \frac{1}{x+r+2} - \frac{1}{x+r+3} \right) \tag{15}$$

$$0 \leq x < \frac{1}{2}$$

$$LR(x, r) = \frac{\sin \pi x}{x} \left(-\frac{1}{x-1} - \frac{1}{x-r} + \frac{1}{x+1} + \frac{1}{x+r} - \frac{1}{x+r+2} + \frac{1}{x+r+3} \right)$$

$$0 \leq x < \frac{1}{2} \quad (16)$$

$$UL(x, r) = \frac{\sin \pi x}{x} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x-1} - \frac{1}{x-r-2} + \frac{1}{x+r-1} - \frac{1}{x+r+1} + \frac{1}{x+r+2} \right)$$

$$-\frac{1}{2} < x \leq 0 \quad (17)$$

$$LL(x, r) = \frac{\sin \pi x}{x} \left(\frac{1}{x-1} + \frac{1}{x-r} - \frac{1}{x+1} - \frac{1}{x+r} + \frac{1}{x+r+2} - \frac{1}{x+r+3} \right)$$

$$-\frac{1}{2} < x \leq 0 \quad (18)$$

아랫 눈에 대한 최악 펄스조합은 그림 5의 조합을 그대로 뒤집기만 하면 되며, 따라서 아랫 눈은 윗 눈의 뒤집힌 모양이다. 식 (15)-(18)과 두 눈의 대칭성을 이용하여 VDB5의 눈을 그리면 그림 6과 같다.

눈의 폭은 $UR(x_1, r) = LR(x_1, r)$, $UL(x_2, r) = LL(x_2, r)$ 의 두 근 x_1, x_2 로부터 $(x_1 + |x_2|)T$ 로 주어진다. 각 r 에 대해 이 눈폭을 구하면 표 1과 같다. r 이 최소값 4일 때에도 눈폭이 0.5T를 넘으며, r 이 증가함에 따라 원래의 선로부호 DB의 눈폭인 0.6667T^[10]에 수렴한다.

결국, 그림 6과 표 1의 결과는 (9)식의 MB 펄스를 이용한 VDBr 선로신호의 눈이 SP의 삼입에도 불구하고

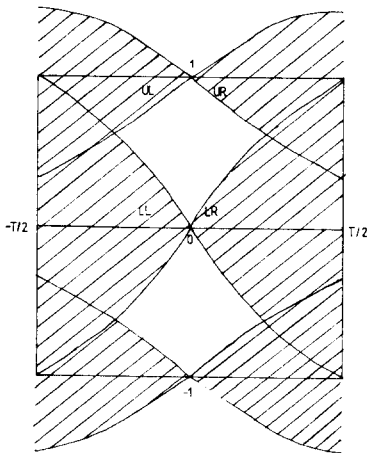


그림 6. VDB5의 눈모양
Fig. 6. Eye pattern of VDB5.

표 1. VDBr의 눈폭

Table 1. Eye width of VDBr.

r	눈폭(T)
4	5166
5	5417
6	5594
7	5726
8	5828
9	5910
10	5977
11	6033
12	6081
13	6122
14	6157
15	6188
⋮	⋮
⋮	⋮
∞	6667

고 충분히 넓게 열려 있음을 보여 주고 있다.

2. 전력 스펙트럼

VDBr의 최소 대역폭특성을 다른 각도에서 확인하기 위해 그의 전력스펙트럼을 구해 보았다. 계산은 Cariolaro^[18, 19]의 방법을 따랐으며, VDB5의 경우를 입력에서의 '0'의 확률 q 에 따라 그림 7에 보였다. $q=0.5$ 인 무작위 입력데이터에 대해선 예상대로 DB의 경우^[6, 10]와 매우 흡사하며, 모든 경우에 있어서 전력은 Nyquist 대역 $0 \leq f \leq 1/2T$ 에 국한됨을 확인할 수 있다.

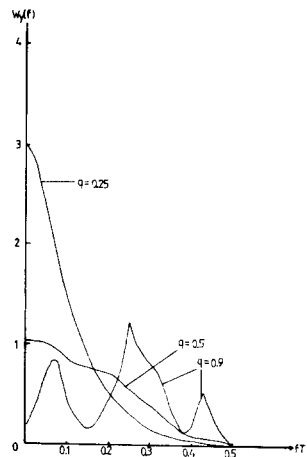


그림 7. VDB5의 전력 스펙트럼
Fig. 7. Power spectrum of VDB5.

3. 오판율

한 SP안에 오판된 심볼이 한 개이하라는 가정하에 VDB 5의 오판율은 근사적으로 다음과 같이 주어진다.^[17, 19]

$$P_e = \epsilon + \Delta\epsilon \quad (19)$$

ϵ = DB의 오판율

$$\approx \frac{2}{3\sqrt{2}\pi} \int_{d/\sigma}^{\infty} e^{-x^2/2} dx \quad (20)$$

$\Delta\epsilon$ = (SP 하나가 일어날 확률) × (SP내에서 하나의 오판심볼로 말미암아 추가로 오판되는 해당 SP내의 추가 오판심볼의 평균갯수)

$$\approx 0.161\epsilon - 0.644\epsilon^2 \quad (21)$$

(20)식에서 d 는 레벨간격, σ 는 잡음의 표준편차이다.^[10] 식(19)와 (20)을 함께 도사하면 그림 8과 같다. 결국 SP에 의한 오판율 손실은 매우 미소함을 알 수 있다.

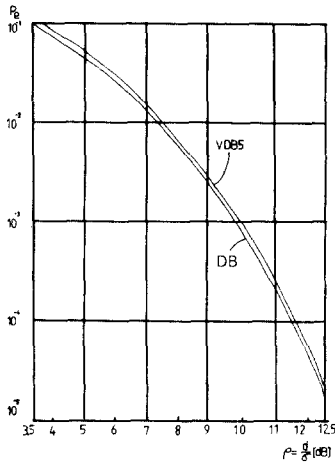


그림 8. VDB 5의 오판율
Fig. 8. Error probability of VDB 5.

VI. 結 論

최소 대역폭 특성을 위한 조건에 준하여 duobinary 부호의 '0'의 길이를 제한하는 새로운 최소 대역폭 선로부호를 설계하였다. 새 선로부호의 눈폭, 전력스펙트럼, 오판율 등의 특성이 duobinary의 경우와 대동소이함이 밝혀졌으며, 새 VDBr 선로부호가 duobinary를 사용하는 기존의 선로에 그대로 쓰일 수 있음을 보였다. 더구나 새 선로부호는 '0'의 길이가 제한되어 있어, 수신측의 동기재생을 돕기 위한 송신측의 데이터 스캐램블링 과정이 불필요하다.

특히 최근 duobinary 부호의 optical fiber에의 응용이 차츰 시도되고 있는 바,^[12, 13] 여기에서 제안된

VDBr의 같은 응용성도 검토해 보직하다.

參 考 文 獻

- [1] A Croisier, "Introduction to pseudoternary transmission codes," *IBM J. Res. Dev.*, vol. 14, pp. 354-367, July 1970.
- [2] 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.
- [3] N.Q. Duc and B.M. Smith, "Line coding for digital data transmission," *Australian Telecommun. Res.*, vol. 11, pp. 14-27, Feb. 1977.
- [4] M.R. Aaron, "PCM transmission in the exchange plant," *Bell System Tech. J.*, vol. 41, pp. 25-97, Jan. 1962.
- [5] M. Huneck, "PCM-koaxialkabel systeme-eine vergleichende Ubersicht," *Nachrichtentechnik Elektronik*, vol. 28, no. 6, pp. 231-235, 1978 (서독).
- [6] A. Lender, "The duobinary technique for high-speed data transmission," *IEEE Trans. Commun. Electron.*, vol. 82, pp. 214-218, May 1963.
- [7] H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory," *Trans. AIEE*, vol. 47, pp. 617-644, April 1928.
- [8] R.W. Lucky, J. Salz, and E.J. Weldon, Jr., *Principles of Data Communication*, McGraw-Hill NY, 1968.
- [9] W.R. Bennett and J.R. Davey, *Data Transmission*, McGraw-Hill NY, 1965.
- [10] P. Kabal and S. Pasupathy, "Partial-response signaling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-23, pp. 921-934, Sept. 1975.
- [11] A. Lender, "Correlative (partial-response) techniques and applications to digital radio systems," in K. Feher, *Digital Communications: Microwave Application*, Englewood Cliffs, Prentice Hall NJ, ch. 7. 1981.
- [12] 町田進, "Partial response optical fiber transmission systems," *IECE of Japan*, vol. E63, no. 10, pp. 1023, Oct. 1981.
- [13] M. Rocks, "Calculation of duobinary transmission systems with optical waveguides," *IEEE Trans. Commun.*, vol.

- COM-30, no. 11, pp. 2464-2470, Nov. 1982.
- [14] V.27 bis, 4800 bps Modem with automatic equalizer standardized for use on leased telephone type cuircuits, *CCITT, 6th Plenary Assembly*, vol. VIII, pp. 128-138, 1977.
- [15] P.A. Franazsek, "Sequence state methods for runlength limited coding," *IBM J. Res. Dev.*, vol. 14, pp. 376-383, July 1970.
- [16] 김대영, 김재균, "Nyquist율 펄스전송에 관한 연구," 82년도 통신 교환 마이크로파 및 전파전파연구회 합동발표회 논문집, pp. 13-17, Sep. 1982.
- [17] 김대영, 최소대역폭 펄스코드에 관한 연구, 공학박사 학위논문, 한국과학기술원, 서울, 2. 1983.
- [18] G.L. Cariolaro, G.L. Pierobon, and S.G. Pupolin, "Spectral analysis of variable-length coded digital signals," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-28, pp. 473-481, May 1982.
- [19] 현상균, 최소대역폭 펄스코드의 성능 측정 연구, 공학석사 학위논문, 한국과학기술원, 서울 2. 1983.