

# 최소대역폭 선로부호의 전력 스펙트럼에 관한 연구

## (A Study on the Power Spectra of Minimum-Bandwidth Line Codes)

玄 相 均\*, 金 在 均\*

(Sang Kyoon Hyun and Jae Kyoon Kim)

### 要 約

연속되는 동일한 심벌(symbol)의 길이가 제한되어 있는 최소 대역폭 선로부호들의 전력 스펙트럼을 입력 데이터의 "0" 확률에 따라 구하였다. 이는 G. L. Cariolaro의 알고리즘을 컴퓨터 프로그램으로 구현함으로써 가능하였고, 이를 이용하여 지금까지 알려져 있는 VDB5, VDB6, TIB5, VMDB5, RMD35, DRMD35, RMD45, RMD33의 전력 스펙트럼을 구하고 그 특성을 비교하였다. 또한 눈폭의 크기와 전력스펙트럼사이의 일반적인 상관성에 대해 고찰 하였다.

### Abstract

The power spectral densities of run-length-limited (RLL) minimum-bandwidth (MB) line codes are obtained for some values of the zero probability of input data. They can be obtained by implementing a computer program for the G.L. Cariolaro's algorithm. Using the program we calculate the power spectra of the known RLL MB line codes, such as VDB5, VDB6, TIB5, VMDB5, RMD35, DRMD35, RMD45, and RMD33, and compare the characteristics of them. Specially, the relationship between eye widths and power spectra is analyzed.

### I. 서 론

디지털 데이터 전송 또는 기록(recording)에 있어서 전송선로 또는 기록매체의 특성에 따라 그 성능을 향상시키기 위한 방안의 하나로 선로부호에 대한 연구가 진행되어 왔다. 특히 근래에 이론상 최소한의 대역폭인 나이퀴스트(Nyquist) 대역폭을 갖는 많은

선로부호가 고안되고 그 성능이 평가되어 왔다.<sup>(1,2,3,4,5)</sup> 이러한 성능평가의 관점은 주로 눈폭(eye width)에 집중되었고 이에 따라 그 우열이 비교되었다. 한편 선로부호의 성능을 나타내는 것으로는 여러가지가 있을 수 있는데,<sup>(6)</sup> 그 가운데에서 입력 데이터의 통계 특성에 따른 전력스펙트럼은 전송선로 또는 기록매체의 주파수 특성과의 적합성 여부를 나타내는 것으로 매우 중요하다고 할 수 있다.

일반적으로 선로부호의 전력스펙트럼은 이산성분(discrete component)과 연속성분(continuous com-

\*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: 1989年 3月 8日

ponent)으로 구성되어 있다. 이 중에서 이산성분이 존재하면 대부분의 경우 수신신호로부터 시각(timing) 정보 추출시 지터(jitter)를 증가시키는 원인이 되므로 가능한 한 이산성분이 발생하지 않도록 선로부호를 설계할 필요가 있다. 연속성분의 경우 입력 데이터의 "0" 확률에 따라 그 분포가 달라지며, 이것은 선로특성에 대한 적합성, 다른 선로와의 간섭, 시각 정보추출등에 영향을 줄 수 있으므로, "0" 확률에 따른 전력분포에 대한 연구가 필요하다.

한편 런길이제한(run-length-limited; RLL) 선로부호의 전력스펙트럼을 계산하는 알고리즘은 우선 출력데이터의 자기상관함수(autocorrelation function)를 구한 다음 이것의 푸리에(Fourier)변환 또는 z-변환을 구하는 과정이라고 할 수 있다. 그런데 RLL 선로부호는 대체로 비선형이므로 그 전력스펙트럼을 얻기가 용이하지 않으며, 따라서 개별적 또는 일반적인 선로부호에 대해 적용할 수 있는 알고리즘에 관한 여러가지 연구가 있어왔다.<sup>1,7,8,9</sup>

그 한가지 방법은, 한 선로 부호에 대해서 완전한 신호흐름도(signal-flow graph)를 그리고 이것으로부터 전력밀도를 구하는 방식이다.<sup>17,18</sup> 이것은 우선 선로부호마다 완전한 신호흐름도를 그려야 하기 때문에 부호화 규칙이 조금만 바뀌어도 처음부터 해석을 새로 해야 하고, 더구나 부호화 알고리즘이 복잡해지면 신호흐름도를 작성하고 상태(states)의 수를 줄이는 것등이 매우 복잡해진다. 따라서 이 방법은 다양한 RLL 최소대역폭(minimum-bandwidth; MB) 선로부호의 전력스펙트럼 계산에는 그다지 좋은 접근 방식이 아닌 것으로 생각된다.

다른 한 방법으로는, 본래의 선형부호에 대한 상태천이도(state-transition diagram)에 대체패턴(substitution pattern)의 상태천이만을 추가한 기본적인 상태천이도를 작성하면 그 전력스펙트럼을 구할 수 있는 알고리즘이 연구되었다.<sup>9</sup> 이것은 다양한 RLL MB 선로부호의 전력스펙트럼을 계산하는데 매우 편리하지만 복잡한 행렬(matrix) 연산을 필요로 하기 때문에 이를 컴퓨터 프로그램으로 구현하는데는 정확한 확인 과정이 요구된다.

본 논문에서는 일반적인 RLL 선로부호의 전력스펙트럼을 계산하기 위한 G. L. Cariolaro의 알고리즘<sup>19</sup>을 분석하고 이를 컴퓨터 프로그램으로 구현하여 그 정확성을 확인한 다음, 이를 이용하여 지금까지 알려진 런길이가 제한된 최소대역폭 선로부호들의 전력스펙트럼을 구하고 이들의 특성을 비교연구하였다. 특히 눈폭(eye width)의 크기와 전력스펙트럼사이의 일반적인 상관성에 대해 고찰하였다.

## II. 전력스펙트럼 계산 알고리즘의 구현과 확인

### 1. 전력스펙트럼 계산 알고리즘 분석과 구현

일반적인 RLL 선로부호의 전력스펙트럼 계산은, 원래의 선형 선로부호의 상태 천이도에 동일한 출력심벌(symbol)의 길이를 제한하기 위한 대체패턴을 부가시킨 상태 천이도를 작성하는 것에서 시작한다. 이때 RLL 선로부호는 유한상태 연속장치(finite-state sequential machine)로 볼 수 있기 때문에 다음과 같이 표현될 수 있다.<sup>9</sup>

$$S_{m+1} = g(S_m, A_m) \quad (1)$$

$$B_m = h(S_m, A_m) \quad (2)$$

여기서  $A_m$ 은 입력 원천어(input sourceword),  $S_m$ 은 현재상태(present state),  $S_{m+1}$ 은 다음상태(next state),  $g$ 는 상태천이함수(state-transition function),  $B_m$ 은 출력 부호어(output codeword),  $h$ 는 출력함수(output function)이다. 따라서 RLL 선로부호는 이로부터 구한 상태천이행렬집합(state-transition matrix set)  $\{E_i \mid 1 \leq i \leq I\}$ 와 출력행렬집합(output matrix set)  $\{\beta_u \mid 1 \leq u \leq K\}$ 에 의해 완전히 표현될 수 있다. 여기서  $I$ 는 상태의 수,  $K$ 는  $A_m$ 이 가질 수 있는 부호어 집합(codeword set)의 원소의 수이다. 앞서 언급했듯이 RLL 선로부호의 전력스펙트럼  $W(f)$ 는 이산성분  $W_d(f)$ 와 연속성분  $W_c(f)$ 로 구성되고 다음과 같이 표현된다.<sup>9</sup>

$$W(f) = W_d(f) + W_c(f) \quad (3)$$

$$W_d(f) = \frac{1}{\lambda_0 L^2} \left| \sum_{\lambda \in A} V_\lambda(z_m) m'_\lambda \right|^2 \quad (4)$$

$$W_c(f) = W_b(z) \Big|_{z = e^{j2\pi f T}} \quad (5)$$

$$W_b(z) = \frac{1}{L^2} \sum_{\lambda, \mu \in A} V_\lambda(z) W_{\lambda\mu}(z^{\lambda_0}) V'_\mu(z^{-1}) \quad (6)$$

$$W_{\lambda\mu}(z) = R_{\lambda\mu}(0) + K'_\lambda X(z) J_\mu z^{-\lambda/\lambda_0} + J'_\lambda X'(z^{-1}) K_\mu z^{\mu/\lambda_0} - \frac{1}{L} m'_\lambda m_\mu \sum_{l=1-\lambda/\lambda_0}^{\mu/\lambda_0-1} z^l \quad (7)$$

앞의 식들을 계산하기 위한 관련식과 심벌들의 의미를 정리하면 다음과 같다.

$$m_\lambda = \tilde{\pi} J_\lambda = \tilde{\pi} \sum_{u \in U_\lambda} q_u \beta_u \quad (8)$$

$$J_\lambda = \sum_{u \in U_\lambda} q_u \beta_u \quad (9)$$

$$K_\lambda = \sum_{u \in U_\lambda} q_u E'_u \tilde{D} \beta_u \quad (10)$$

$$R_{\lambda\mu}(0) = \begin{cases} \sum_{u \in U_\lambda} q_u \beta_u^0 \tilde{D} \beta_u & \text{if } \lambda = \mu \\ 0 & \text{if } \lambda \neq \mu \end{cases} \quad (11)$$

$$X(z) = [I - \sum_{\lambda \in A} H_\lambda z^{-\lambda/\lambda_0}]^{-1} - \frac{1}{(1-z^{-1})L} \Pi_\infty \quad (12)$$

$$H_\lambda = \sum_{u \in U_\lambda} q_u E_u \quad (13)$$

$$\Pi = \sum_{u=1}^k q_u E_u \quad (14)$$

$$\tilde{\pi} = [\tilde{\pi}_1, \tilde{\pi}_2, \dots, \tilde{\pi}_1] \\ = \text{상태 확률 행렬 (state probabilities matrix)}^{(9),(10)} \quad (15)$$

$$\Pi_\infty = \mathbf{1}_l \tilde{\pi}, \mathbf{1}_l = I \text{개의 } 1 \text{로 된 컬럼 벡터} \\ \text{(column vector)} \quad (16)$$

$$\tilde{D} = \text{diagonal} \{ \tilde{\pi}_1, \dots, \tilde{\pi}_1 \} \quad (17)$$

$$z_m = \exp(j2\pi f_m T)$$

$$f_m = m(\lambda_0 T)^{-1}$$

$$V_\lambda(z) = [z, z^2, \dots, z^\lambda]$$

$\lambda_0$  = 부호어 (codeword) 길이의 최대공약수

T = 심벌주기 (symbol period)

$\Lambda$  = 부호어 길이의 집합

L = 평균 부호어 길이

$U_\lambda$  = 부호어 길이가  $\lambda$ 인 집합

$q_u (u=1, \dots, K)$  = 원천어 (sourceword) 확률

앞서의 계산식을 보면 선로부호에 고유한 입력으로는 상태천이 행렬 집합인  $\{E_i | 1 \leq i \leq I\}$ 와 출력 행렬 집합인  $\{\beta_u | 1 \leq u \leq K\}$ 로 충분함을 알 수 있다. 그런데 식(4), (8), (9)를 보면 출력행렬 집합  $\{\beta_u | 1 \leq u \leq K\}$ 의 각각의  $\beta_u$ 에 대해 같은 위치의 펄스 극성이 균형을 갖도록 설계하면  $m_\lambda$ 는 항상 공행렬 (null matrix)이 되므로 이산성분이 없어지게 된다. 본 논문에서 고찰하는 RLL MB 선로부호는 모두 이 조건을 만족시키고 있어 이산성분은 없게 되므로, 앞으로는 연속성분에 대해서만 논하기로 한다.

한편 본 논문에서는 앞서 언급한 알고리즘을 컴퓨터 프로그램으로 구현하였으며(앞으로 MBPOW라 부름), 이 프로그램에서 전력 스펙트럼의 계산 과정은 다음과 같다. 여기서  $q$ 는 입력데이터가 "0"일 확률이고,  $q_u (u=1, \dots, K)$ 는 원천어 (sourceword) 확률이다.

## 2. 프로그램의 정확성 확인

### (1) RDBn 부호의 고안과 확인

지금까지 고안된 RLL MB 선로부호는 대부분 상태천이행렬이 대각선에 대해 비대칭이고 상태의 수

가 많기 때문에,<sup>(2),(4),(5)</sup> 연속성분  $W_b(z)$ 에 대한 수식을 유도해 내기는 매우 복잡하다. 따라서 여기에서는 상

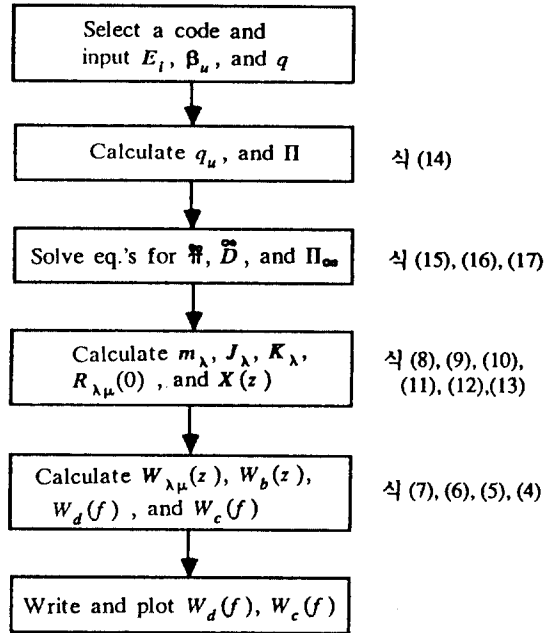


그림 1. MBPOW 프로그램의 논리적 설계도  
Fig. 1. Logical design of MBPOW program.

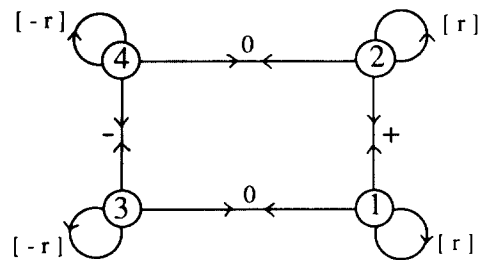


그림 2. RDBn 부호의 상태천이도  
Fig. 2. State transition diagram of RDBn.

대천이행렬이 대칭인 RDBn(revised duobinary codes with n zeros substitution)이란 RLL MB 부호를 고안하여 이것의 연속성분  $W_b(z)$ 를 수식으로 유도하고, 이것과 구현한 프로그램 MBPOW에 의한 결과를 비교하였다. 그림 2는 RDBn의 상태 천이도이다. 여기서  $[r]$ 은 n개의 "0"가 연속해서 입력될 때의 대

체패턴(substitution pattern)이고,  $[-r]$ 은 그 극성(polarity)을 반대로 한 대체패턴이다. 이 경우 이산 성분은 항상 영(zero)이 되고, 연속성분  $W_b(z)$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
 W_b(z) = & (1-q) \cdot \operatorname{Re} \left\{ \frac{1+z}{1-z(1-2q)} \right\} + \\
 & q^n \frac{1-q}{1-q^n} \{ | \alpha(z) |^2 + \\
 & 2 \cdot \operatorname{Re} \left[ \frac{(1-q^n)(1+qz)\alpha(z) +}{(1-q^n z^n)(1-z(1-2q))} \right. \\
 & \left. \frac{z^{n+1}(1-q)(1-q^n z^n)\alpha^*(z) +}{(1-q^n z^n)(1-z(1-2q))} \right\} \\
 & \left. \frac{q^n z^n (1+qz) | \alpha(z) |^2}{(1-q^n z^n)(1-z(1-2q))} \right\} \quad (18)
 \end{aligned}$$

여기서  $\operatorname{Re}(y)$ 는  $y$ 의 실수부,  $\alpha(z) = [z^1, z^2, \dots, z^n]$   $[r']$ ,  $[r']$ 은  $[r]$ 의 전치행렬(transpose),  $q$ 는 입력데이터가 "0"일 확률,  $\alpha^*(z)$ 는  $\alpha(z)$ 의 공액복소수(complex conjugate)이다. 식(18)에서 첫째항은 원래의 DB(duobinary) 부호<sup>[6,11]</sup>의 전력성분을, 둘째항은 대체패턴에 의해 추가되는 전력성분을 각각 나타 내고 있다. 일례로서  $n=6$ 일때 대체패턴으로  $[r] = [+0+ +0+]$ 를 선택하면 RDB6은 DSV(digital sum variation)<sup>[1]</sup>는 무한대, ISV(intersymbol-interference sum variation)<sup>[1]</sup>는 3, 눈폭은 0.555(T)가 되는 RLL MB 선로부호가 된다. 이 경우 식(18)은 구현된 프로그램 MBPOW에 RDB6의 상태천이 행렬집합과 출력 행렬집합을 입력시켜 얻은 전력스펙트럼과 일치하였으며 MBPOW에 의한 것을 나타내면 그림3과 같다.

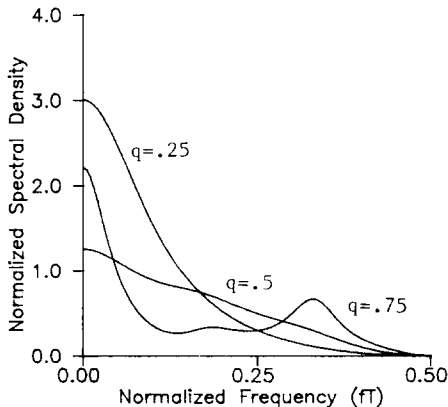


그림 3. RDB6의 전력스펙트럼  
Fig. 3. Power spectrum of RDB6.

여기서 가로축은 정규화된 주파수(ft)를, 세로축은 원래의 DB(duobinary) 부호에서  $q=0.5$ 일때  $ft=0$ 에서의 전력성분이 1이 되도록 정규화했을 때의 전력밀도를 각각 나타낸다.

(2) B nZS 부호의 전력스펙트럼 비교에 의한 확인  
BnZS(bipolar codes with n zeros substitution) 부호<sup>[7]</sup>에서  $n=6$ 이고 대체패턴이  $[r] = [0-+0+-]$ 일 경우의 연속성분에 대한 수식(참고문헌[9]의 식(40))과 MBPOW에 B6ZS의 상태천이 행렬집합과 출력 행렬집합을 입력시켜 얻은 전력스펙트럼을 비교하여 이들이 서로 일치함을 확인하였다. MBPOW에 의한 것을 나타내면 그림 4와 같다.

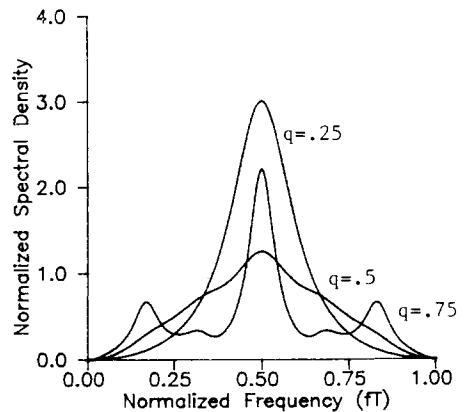


그림 4. MBPOW에 의한 B6ZS의 전력스펙트럼  
Fig. 4. Power spectrum of B6ZS by MBPOW.

### III. RLL MB 선로부호의 전력스펙트럼

지금까지 고안되어진 "0"길이 제한된 최소대역폭 선로부호는 대부분 상태의 수가 많거나 상태천이 행렬이 비대칭적이어서 그 전력스펙트럼을 수식으로 유도해내기가 어렵기 때문에, 앞서 확인된 MBPOW 프로그램으로 계산하고 그 특성을 연구하였다.

그림5,6,7은 대체패턴이 없는 본래의 BP(bipolar) 부호,<sup>[6,13]</sup> DB(duobinary) 부호,<sup>[6,11]</sup> MDB(modified duobinary) 부호<sup>[6,12,14]</sup>의 전력스펙트럼을 각각 나타낸다. 그림 8은 VDBr(variant of the duobinary code for a run-length limit r) 부호<sup>[2,3,4]</sup>중 "0"의 길이만을 제한시켰을 경우의 VDB5와 VDB6, 그림 9는 TIBr(transparent interleaved bipolar code with the

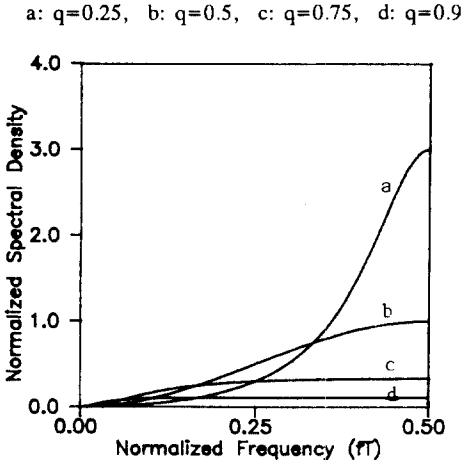


그림 5. BP (bipolar) 부호의 전력스펙트럼  
Fig. 5. Power spectra of the BP code.

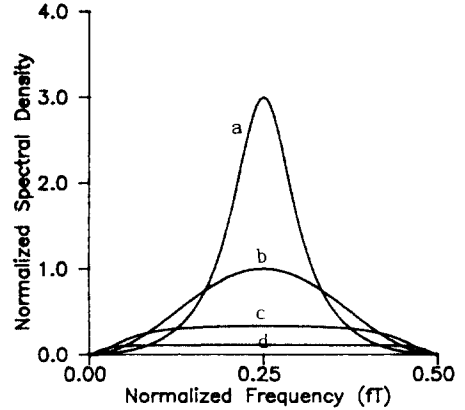


그림 7. MDB(modified duobinary)부호의 전력스펙트럼  
Fig. 7. Power spectra of the MDB code.

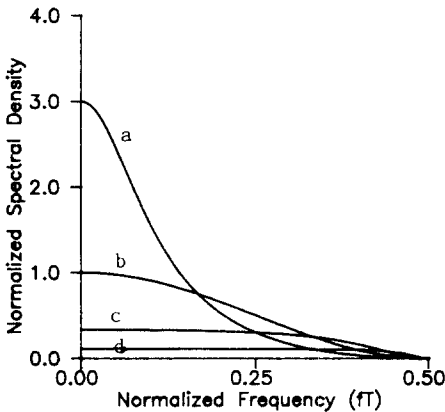
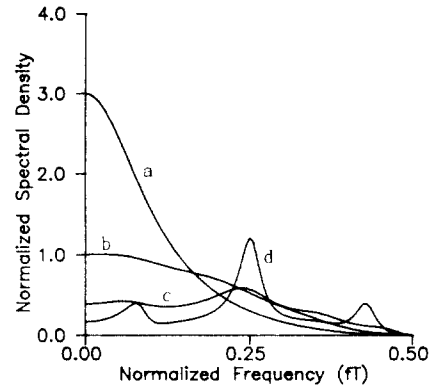
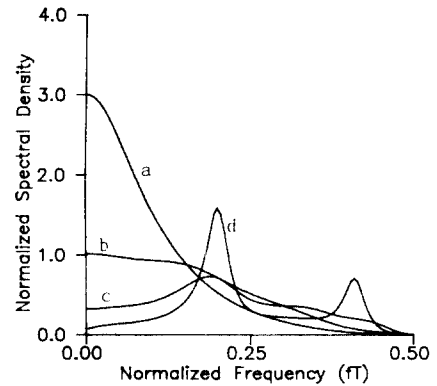


그림 6. DB (duobinary) 부호의 전력스펙트럼  
Fig. 6. Power spectra of the DB code.



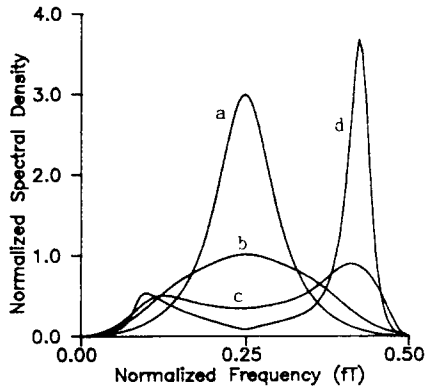
(a) VDB5



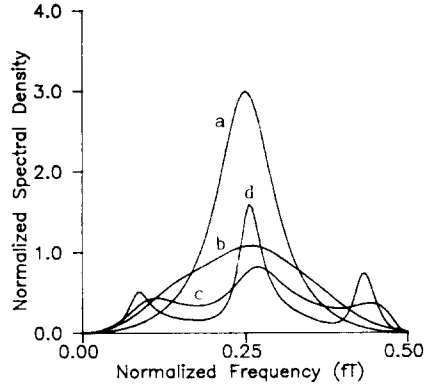
(b) VDB6

그림 8. VDB5와 VDB6의 전력스펙트럼  
Fig. 8. Power spectra of VDB5 and VDB6.

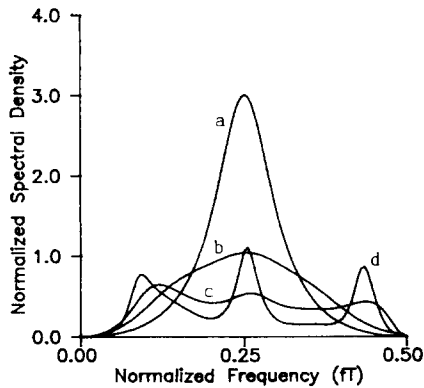
maximum “0” run-length of  $r$  부호<sup>112</sup> 중 TIB 5와 VMDBr (variation of the modified duobinary code with the maximum “0” run-length of  $r$  부호<sup>2,41</sup>) 가운데 VMDB5, 그림 10은 RMDmr (run-length-limited modified duobinary codes with the maximum  $m$  pulses in a substitution pattern and with the maximum “0” run-length of  $r$  부호<sup>5</sup>)와 DRMDmr (dual codes of RMDmr) 부호<sup>5</sup> 중 RMD35와 DRMD35, 그림 11은 RMD45와 RMD33의 전력스펙트럼을 각각 나타낸다. 여기서  $q$ 는 입력데이터가 “0”일 확률을 가리킨다.



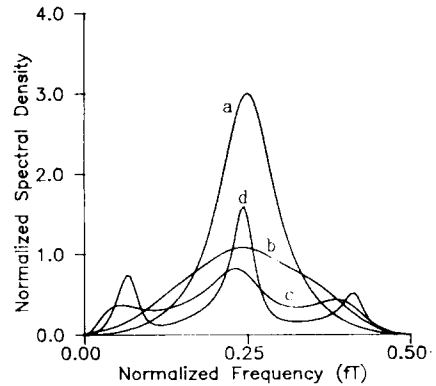
(a) TIB5



(a) RMD35



(b) VMDB5



(b) DRMD35

그림 9. TIB5와 VMDB5의 전력스펙트럼  
Fig. 9. Power spectra of TIB5 and VMDB5.

그림 10. RMD35와 DRMD35의 전력스펙트럼  
Fig. 10. Power spectra of RMD35 and DRMD35.

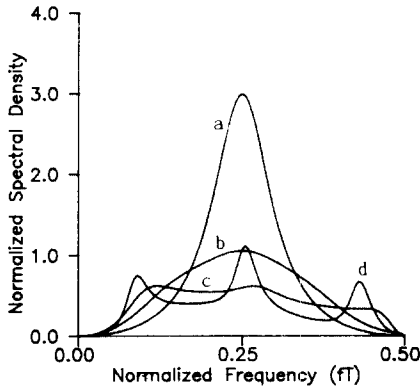
한편 연속되는  $n$ 개의 "0" 데이터가 입력될 확률은  $q^n$ 이므로,  $q$ 가 작을수록 또  $n$ 이 클수록 대체패턴에 의한 영향은 감소한다. 예를들어  $q=0.5$ 일때 대체패턴의 발생확률은 VDB5가 0.0312, VDB6가 0.0156으로 매우 작다. 따라서  $q$ 가 0.5이하일 경우 두 부호는 거의 같은 전력분포를 보이게 되고,  $q$ 가 커질수록 대체패턴에 의한 영향이 지배적으로 된다. 그림 8을 보면  $q$ 가 0.9일때 VDB5의 경우  $ft=0.2$ 와 0.4 근방에 전력이 집중되는 반면, VDB6의 경우에는  $ft=0.25$  근방에 집중됨을 알 수 있다. 이로써 VDB6가 VDB5보다 대체패턴이 더 균형있게 출력된다는 것을 알 수 있다.

그림 9, 10, 11에서 대체되는 "0"의 길이가 4인 RMD33을 제외하고는  $q$ 가 0.5이하에서는 원래의 MDB(modified duobinary) 부호<sup>[6,12,14]</sup>와 거의 같은 전력스

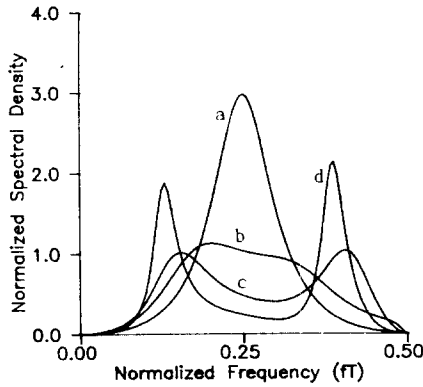
펙트럼 모양을 볼 수 있다. 또  $q$ 가 1에 가까워질수록 대체패턴의 영향이 커지는데 TIB5와 RMD33을 제외하고는 모두 대역의 중심부에 전력이 집중됨을 알 수 있다. 이것은 TIB5와 RMD33의 경우 대체패턴의 조합이 바람직스럽지 못하다는 것을 나타낸다.

또한 그림 10에서 RMD35와 DRMD35는 대역의 중심인  $ft=0.25$ 를 대칭축으로 하여 전력스펙트럼의 모양이 서로 대칭임을 보여 주고 있다. 이것은 DSV(digital sum variation)<sup>[11]</sup>와 ISV(intersymbol-interference sum variation)<sup>[14]</sup>의 대칭성에 관한 이전의 연구<sup>[5]</sup>와 아울러 이 부호들이 전력스펙트럼의 견지에서 대칭성을 갖고 있음을 나타낸다.

한편 이 부호들의 전력스펙트럼에 대해서  $q=0.5$ 일 경우의 실험적 측정결과<sup>[6,9]</sup>는 본 논문에서 구한 것과 대체로 그 모양이 일치함을 알 수 있다.



(a) RMD45



(b) RMD33

그림 11. RMD45와 RMD33의 전력스펙트럼  
Fig. 11. Power spectra of RMD45 and RMD33.

IV. 전력스펙트럼과 눈폭과의 관련성

여기에서는 전력스펙트럼과 눈폭의 크기가 어떤 상관관계를 갖고 있는가를 알아 보고자 한다. 우선 관심있는 몇가지 부분반응(partial response) 선로부호에 대해, DSV, ISV, 눈폭(나이퀴스트 대역폭을 갖는 이상적인 저역필터로 펄스성형을 했을 경우)을 정리하면 다음의 표 1 과 같다.<sup>[2,3,4,5]</sup>

- 1) BP (bipolar) 부호<sup>[6,13]</sup>
- 2) DB (duobinary) 부호<sup>[6,11]</sup>
- 3) MDB (modified duobinary) 부호<sup>[6,12,14]</sup>
- 4) VDB5와 VDB6<sup>[2]</sup>의 경우는 "0"의 길이만을 제한시킨 것으로 참고문헌<sup>[3,4]</sup>의 VDB4와 VDB5에 각각 해당함

표 1. 주요 부분반응 선로부호의 파라메타  
Table 1. Some parameters of partial-response line codes.

Code	DSV	ISV	Eye width(T)
1-D <sup>[1]</sup>	1	∞	0.
1+D <sup>[2]</sup>	∞	1	0.667
1-D <sup>[2,3]</sup>	2	2	0.357
VDB5 <sup>[4]</sup>	∞	2	0.517
VDB6 <sup>[4]</sup>	∞	2	0.542
TIB5	2	4	0.276
VMDB5	2	4	0.282
RMD35	2	4	0.298
DRMD35	4	2	0.369
RMD45	2	4	0.305
RMD33	2	4	0.276

표 1 과 앞에서 구한 전력스펙트럼을 비교하면 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

첫째, DB, MDB, BP 부호는 순서대로  $fT=0, 0.25, 0.5$ 에서 스펙트럼 밀도의 최대치를 나타내고 모두 단봉 형태이다. 각각의 눈폭은  $0.667T, 0.357T, 0$ 으로서,  $fT=0$  근처에 전력성분이 집중될수록 눈폭이 넓고, 반대로  $fT=0.5$  근처에 전력성분이 집중될수록 눈폭이 작아진다는 일반적인 경향을 나타내고 있다. 이것은 DSV가 작을수록, 또 ISV가 클수록 눈폭이 작아지는 경향과 대체로 일치한다.

둘째, DB부호의 변형인 VDB5와 VDB6는 DSV =무한대, ISV = 2로 두 파라메타는 동일한 반면, 이 중에서 q의 증가에 따라  $fT=0.25$ 에 전력이 집중되어 가는 VDB6의 눈폭이 더 넓다. 또한 MDB부호의 변형인 TIB5, VMDB5, RMD35, RMD45, RMD33에서 이들은 모두 DSV=2, ISV=4로 동일한데, q의 증가에 따라  $fT=0.25$  근처에 전력이 집중되어 가는 VMDB5, RMD35, RMD45가 그렇지 않은 TIB5나 RMD33보다 눈폭이 넓음을 알 수 있다.

셋째, RMD35와 DRMD35를 비교해 보면, DSV가 작고 ISV가 큰 RMD35의 눈폭이 더 작다. 또 그림 10을 보면  $fT=0.25$ 를 중심으로 RMD35의 전력분포가 상대적으로  $fT=0.5$ 쪽에 더 치우쳐 있음을 알 수 있다. 이것은 동일한 선형부호(MDB)를 변형시킬 경우 DSV가 작고 ISV가 클수록 눈폭이 작아진다는 사실과 이 경우 전력스펙트럼은  $fT=0.5$  쪽에 더 치우치게 된다는 앞서 언급한 전력스펙트럼과 눈폭에 대한 일반적인 경향과 일치한다.

## V. 결 론

본 논문에서는 "0"의 길이가 제한된 선로부호의 전력스펙트럼을 구할 수 있는 G. L. Cariolaro의 알고리즘을 분석하고 이를 MBPOW란 컴퓨터 프로그램으로 구현하였으며, 이를 이용하여 지금까지 연구되어진 런길이가 제한된 최소대역폭 선로부호중 VDB 5, VDB6, TIB5, VMDB5, RMD35, DRMD35, RMD 45, RMD33의 전력스펙트럼을 구하고 그 특성 및 눈폭과의 관련성을 고찰하였다. 이로써 런길이가 제한된 최소대역폭 선로부호의 성능은 입력데이터의 "0" 확률에 따라 나타나는 전력분포에 의해 평가될 수 있는 바, 그 전력스펙트럼이 대역의 중심에 분포하도록 설계된 것이 동일한 조건의 DSV와 ISV에 대해 더 넓은 눈폭을 가짐을 알 수 있었다. 또한 DSV와 ISV뿐만 아니라 전력스펙트럼에 있어서도 RMD35와 DRMD35는 이중성(duality)을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

더 연구되어야 할 것으로는, 런길이(run-length)가 제한되어 있지 않은 최소대역폭 선로부호인 VBPm (variation of the bipolar code with the limited ISV of m)부호<sup>[14]</sup>와 "0"뿐만 아니라 "+", "-" 심벌의 런길이도 제한시킨 선로부호<sup>[2]</sup>의 전력스펙트럼을 구하는 것, 대체패턴과 전력스펙트럼의 관련성, 시각정보 추출 성능과 전력스펙트럼과의 관련성을 들 수 있다.

## 參 考 文 獻

[1] D.Y. Kim and S.-K. Kim, "A condition for stable minimum-bandwidth line codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-33, no. 2, pp. 152-157, Feb. 1985.

[2] D.Y. Kim, J.I. Baek, J.-K. Kim, S.K. Hyun, and Y.K. Park, "Run-length-limited variants of duobinary and modified duobinary," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-35, no. 2, pp. 142-150, Feb. 1987.

[3] 김대영, 김재균, "저역통과 선로를 위한 최소대역폭 선로부호" 대한 전자 공학회지, 20권

5 호, pp. 23-30, 1983년, 9월.

- [4] 김대영, "최소대역폭 펄스코드에 관한 연구" 박사학위논문, 한국과학기술원, 1983.
- [5] 백제인, "안정된 최소대역폭 전송을 위한 고리모양의 선로부호에 관한 연구" 박사학위 논문, 한국과학기술원, 1986.
- [6] P. Kabal and S. Pasupathy, "Partial-response signaling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-23, no. 9, pp. 921-934, Sep. 1975.
- [7] V.I. Johannes, A.G. Kaim, and T. Walzman, "Bipolar pulse transmission with zero extraction," *IEEE Trans. Commun. Technol.*, vol. COM-17, no. 2, pp. 303-310, Apr. 1969.
- [8] W. Debus, "General method for calculating the spectrum of a zero substitution coded signal," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-27, no. 11, pp. 1637-1643, Nov. 1979.
- [9] 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, no. 3, pp. 473-481, May 1982.
- [10] G.L. Cariolaro and G.P. Tronca, "Spectra of block-coded digital signals," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-22, pp. 1555-1564, Oct. 1974.
- [11] A. Lender, "The duobinary technique for high-speed data transmission," *IEEE Trans. Commun. Electron.*, vol. 82, pp. 214-218, May 1963.
- [12] A. Crosier, "Introduction to pseudoternary transmission codes," *IBM J. RES. DEVELOP.*, pp. 354-367, July 1970.
- [13] M.R. Aaron, "PCM transmission in the exchange plant," *BSTJ*, vol. 41, pp. 99-142, Jan. 1962.
- [14] E.R. Kretzmer, "Generalization of a technique for binary data transmission," *IEEE Trans. Commun. Technol.*, vol. COM-14, pp. 67-68, Feb. 1966. \*



著 者 紹 介



**金 在 均(正會員)**

1938年 9月 17日生. 1962年 2月 한국항공대학 응용전자과 졸업 공학사 학위취득. 1967年 2月 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업. 공학석사 학위취득. 1971年 8月 미국 남가주대학교 대학원 전기공학과 졸업 공학박사. 1962年 4月~1966年 7月 공군복무(중위). 1972년 4月~1973年 3月 미국 NASA GSFC연구원. 1984年 1月~1985年 6月 과학기술처 전기전자조정관. 1973年 4月~현재 한국과학기술원 교수. 주 관심분야는 영상처리, 정보이론 디지털 통신 등임.



**玄 相 均(正會員)**

1958年 11月 23日生. 1981年 2月 서울대학교 전자공학과 졸업 공학사 학위취득. 1983年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업 공학석사 학위취득. 1983年 3月~1987年 2月 삼성 반도체통신(주) 통신연구소 근무(사설교환기 분야). 1987年 3月~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 영상통신연구실 박사과정. 주 관심 분야는 선로부호이론, 디지털 통신, ISDN 교환기 등임.