DBpia

論文 96-21-10-12

조견표를 이용한 무직류 및 최소대역폭 이진선로부호의 설계

正會員 정 창 기*, 주 언 경*

Design of DC-free and minimum bandwidth binary line codes by look-up table

Chang Ki Jeong*, Eon Kyeong Joo* *Regular Members*

※본 논문은 정보통신부에 시행한 대학기초연구지원사업에 의하여 연구되었습니다.

요 약

본 논문에서는 조견표를 이용한 무직류 및 최소대역폭 이진선로부호를 제안하고, 그 성능을 분석한다. 성능 분석의 결과, 제안된 부호는 직류 및 Nyquist 주파수에서 전력영점을 가짐을 알 수 있다. 제안된 부호 중 디지털합과 교번디지털합이 모두 0인 부호어로 구성된 이진선로부호는 부호율은 낮지만 우수한 스펙트럼 특성을 가진다. 또한, 디지털합과 교번디지털합이 0이 아닌 부호어도 포함하여 구성된 이진선로부호는 스펙트럼특성은 나쁘지만 높은 부호율을 가진다.

ABSTRACT

In this paper, DC-free and minimum bandwidth binary line codes with look-up table are proposed and their performances are analyzed. As results of performance analysis, the proposed codes are shown to have spectral nulls at DC and Nyquist frequency. Among the proposed codes, binary line codes of which both codeword digital sum and alternating digital sum are zero have lower code rate but better spectral characteristics. Furthermore, binary line codes which consist of all codewords including those with nonzero digital sum and alternating digital sum have worse spectral characteristics but higher code rate.

*경북대학교 전자공학과
Department of Electronics, Kyungpook National University
論文番號:96073-0226
接受日字:1996年 2月 26日

www.dbpia.co.kr

I. 서 론

데이터의 전송이나 기록에 있어서 자체동기 능력을 향상시키고, 전송신호의 스펙트럼을 주어진 선로의 주파수 전달 특성에 맞추기 위하여 선로부호가 필요하다. 일반적으로, 선로부호를 선택할 때 고려해야 할 사항으로는 유한연속장(limited runlength), 무직류(DC-free), 그리고 최소대역폭(minimum bandwidth) 특성 등이 있다. 선로부호가 자체동기 능력을 가지기 위하여 동일 심벌의 연속이 제한되어야 하는 데 이러한 특성을 유한연속장 특성이라고 한다. 이와 같은 유한연속장 특성을 가지는 선로부호는 자기기록 시스템 등에서 많이 응용된다[1]. 한편, 기저대역 디지털 전송시스템, 광섬유 통신시스템, 자기기록 시스템 등에 필요한 무직류 선로부호는 주어진 선로의 주파수 특성에 맞게 직류성분은 없고 저주파성분은 억압된 특성을 가진다[1, 2]. 또한 데이타의 고속 전송이 가능하도록 하기 위하여 전송신호의 대역폭을 최대한 줄일 필요가 있다. Nyquist의 이론에 의하면 심벌들 간의 간섭이 없도록 하는 조건에서 신호의 최소대역폭은 심벌주파수의 반이 된다. 그러므로 Nyquist 주파수에서 전력영점을 가지는 선로부호는 최소대역폭만을 사용하므로 고속의 전송에 유리하고 pilot tone의 주입이 용이한 장점을 가지고 있다[1, 3].

지금까지는 주로 이러한 특성 중 어느 하나만을 만족하는 선로부호에 대하여 연구가 이루어 졌으나, 최근에는 무직류 특성과 최소대역폭 특성을 만족하는 이진선로부호에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-7]. 이진선로부호의 경우 무직류 특성이 만족되면 유한연속장 특성도 부수적으로 만족된다. 특히 광섬유 통신 시스템과 자기기록 시스템과 같이 채널에 비선형성이 존재하는 경우에는 이진선로부호가 더욱 더 효율적이다.

본 논문에서는 조견표(look-up table)를 이용하여 무직류 및 최소대역폭 특성을 만족하는 이진선로부호의 설계방법을 제시한다. 그리고 이러한 무직류 특성과 최소대역폭 특성을 동시에 만족하는 이진선로부호의 부호율, 스펙트럼 특성 등을 구한다.

II. 이진선로부호의 파라메타

무직류 특성을 만족하기 위한 필요충분조건은 축적디지털합(running digital sum)인 D_m이 모든 m에 대하여 유한한 값을 가지는 것이다[8]. 즉,

$$D_m = \sum_{i=1}^{m} d(V^i) < \infty, \text{ for all } m \tag{1}$$

여기서 $d(V^i)$는 전송된 n 비트 부호어 V^i의 디지털합(digital sum)으로서 다음과 같이 정의된다.

$$d(V^i) = \sum_{j=1}^{n} v_j^i \tag{2}$$

여기서 v_j^i는 V^i의 j번째 비트에서 논리적 심벌의 집합인 {0, 1}을 물리적 심벌의 집합인 {−1, 1}로 치환한 것이다.

비슷하게 최소대역폭 특성을 만족하기 위한 필요충분조건은 축적교번디지털합(running alternating digital sum)인 A_m이 모든 m에 대하여 유한한 값을 가지는 것이다[9]. 즉,

$$A_m = \sum_{i=1}^{m} a(V^i) < \infty, \text{ for all } m \tag{3}$$

여기서 $a(V^i)$는 V^i의 교번디지털합(alternating digital sum)으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} a(V^i) &= \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j+(i-1)n} v_j^i \\ &= (-1)^{(i-1)n} \left\{ \sum_{j=1}^{\lfloor n/2 \rfloor} v_{2j}^i - \sum_{j=1}^{\lceil n/2 \rceil} v_{2j-1}^i \right\} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $\lfloor x \rfloor$는 x보다 크지 않는 최대정수이고, $\lceil x \rceil$는 x보다 작지 않는 최소정수이다. 따라서 부호어의 교번디지털합은 짝수번째 비트에 대한 디지털합과 홀수번째 비트에 대한 디지털합의 차가 된다.

III. 무직류 및 최소대역폭 이진선로부호

조견표를 이용하는 무직류 이진선로부호에는 디지털합이 0인 부호어로만 구성되어 부호율은 다소 낮지만 저주파성분의 억압특성이 우수한 영디스패러티(zero-disparity) 부호와 저주파성분의 억압특성은 다소 나쁘지만 부호율을 향상시키기 위하여 디지털합이 0이 아닌 부호어까지 이용하는 저디스패러티(low-

www.dbpia.co.kr

disparity) 부호가 있다[1]. 이와 비슷하게, 조견표를 이용하고 무직류 및 최소대역폭 특성을 만족하는 이진선로부호에는 디지털합과 교번디지털합이 모두 0인 부호어로 구성된 경우와 그렇지 않은 부호어까지 포함하여 구성된 경우가 있을 수 있다. 편의상 본 논문에서는 부호어의 길이가 n이고 정보어의 길이가 k인 이진선로부호를 (n, k) DFMB(DC-free minimum bandwidth binary) 부호라 한다. 그리고 디지털합과 교번디지털합이 모두 0인 부호어로 구성된 DFMB 부호를 Class Ⅰ 이진선로부호, 디지털합과 교번디지털합이 0이 아닌 부호어까지 포함하여 구성된 DFMB 부호를 Class Ⅱ 이진선로부호라 한다.

1. Class Ⅰ 이진선로부호

전술한 바와 같이 이진선로부호가 무직류 특성과 최소대역폭 특성을 동시에 만족하기 위해서는 축적디지털합과 축적교번디지털합이 모두 유한하여야 한다. 그런데 만약 디지털합과 교번디지털합이 모두 0인 부호어로만 이진선로부호를 구성한다면 이러한 조건은 당연히 만족되고 따라서 이진선로부호는 무직류 특성과 최소대역폭 특성을 동시에 가질 것이다. 이러한 이진선로부호 중에서 (4, 2) DFMB 부호를 표 1에 나타내었다. 이 부호는 Manchester 부호를 이용하여 얻을 수 있는 quadphase 부호와 동일하다[1].

표 1. (4, 2) DFMB 부호의 조견표
Table 1. Look-up table for a (4,2) DFMB code.

message	codeword
00	0011
01	0110
10	1001
11	1100

이러한 Class Ⅰ 이진선로부호의 부호율을 구하기 위하여 부호어의 길이가 주어질 경우 디지털합과 교번디지털합이 모두 0인 부호어의 개수를 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저, 식 (2)에서 부호어의 디지털합이 0이기 위해서는 부호어 내의 1의 개수가 n/2이어야 하고 부호어의 길이는 짝수이어야 한다. 또한 부호어의 길이가 짝수이면 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a(V^i)=\sum_{j=1}^{n/2} v_{2j}^i - \sum_{j=1}^{n/2} v_{2j-1}^i \tag{5}$$

그리고 이 경우 부호어의 교번디지털합이 0이기 위해서는 식 (5)에서 우변의 첫째항과 둘째항의 값이 같아야 한다. 즉, 부호어의 디지털합과 교번디지털합이 동시에 0이 되기 위해서는 그 부호어의 홀수번째에서 1의 개수와 짝수번째에서 1의 개수가 n/4으로 같아야 한다. 그리고 이것은 부호어의 길이가 4의 배수일 때 가능하다. 따라서 부호어의 디지털합과 교번디지털합이 동시에 0이 되는 부호어의 수 N_I은 다음과 같이 구해진다.

$$N_I = \begin{cases} \binom{n/2}{n/4}^2, & n=4, 8, 12, \cdots \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

이러한 부호어만을 이용하는 이진선로부호의 경우 하나의 부호어에 하나의 정보어가 대응되므로 N_I은 정보어의 개수 M_I과 동일하다. 따라서 부호어의 길이가 4의 배수일 때 부호어의 길이에 따른 유용한 정보어의 개수, 정보어의 길이, 그리고 부호율을 구할 수 있으며 그 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. 부호어의 길이에 따른 정보어의 개수, 정보어의 길이, 그리고 부호율
Table 2. Number of messages, message length, and code rate according to codeword length.

n	M_I	k	k/n
4	4	2	0.5
8	36	5	0.625
12	400	8	0.667
16	4900	12	0.75
20	63504	15	0.75
24	853776	19	0.792
⋮	⋮	⋮	⋮

2. Class Ⅱ 이진선로부호

Class Ⅰ 이진선로부호의 경우 디지털합과 교번디지털합이 0이 아닌 부호어를 이용하지 못하므로 부호

www.dbpia.co.kr

율이 다소 낮다. 따라서 부호율을 향상시키기 위해서는 디지털합과 교번디지털합이 모두 0이 아닌 부호어까지 이용하여 무직류 및 최소대역폭 특성을 만족하는 이진선로부호를 설계해야 한다. 만약 0이상인 경우를 "+"로, 0미만인 경우를 "−"로 표시한다면 그 이전 부호어까지 축적디지털합과 축적교번디지털합의 상태는 {+, +}, {+, −}, {−, +}, 그리고 {−, −}로 표시될 수 있다. 부호어의 전송시 그 이전 부호어까지의 축적디지털합과 축적교번디지털합의 상태와 반대의 극성인 디지털합과 교번디지털합을 가진 부호어를 선택하여 전송할 수 있다면 그 부호는 무직류 및 최소대역폭 특성을 가질 것이다. 이러한 부호의 예로서 (4, 3) DFMB 부호를 표 3에 나타내었다.

표 3. (4, 3) DFMB 부호의 조건표
Table 3. Look-up table for a (4, 3) DFMB code.

message	codeword			
	state 1	state 2	state 3	state 4
000	0000	0000	1111	1111
001	0011	0011	0011	0011
010	1000	0100	1011	0111
011	0110	0110	0110	0110
100	1001	1001	1001	1001
101	0010	0001	1110	1101
110	1100	1100	1100	1100
111	1010	0101	1010	0101

여기서 상태 1은 그 이전 부호어까지 축적디지털합과 축적교번디지털합의 상태가 {+, +}, 상태 2는 {+, −}, 상태 3은 {−, +}, 그리고 상태 4는 {−, −}인 경우이다. 표 3에서 0011, 0110, 1001, 1100과 같이 디지털합과 교번디지털합이 모두 0인 경우에는 어떠한 상태에서도 축적디지털합과 축적교번디지털합을 증가시키지 못하므로 하나의 부호어가 하나의 정보어에 대응된다. 그리고 0101, 1010과 같이 디지털합이 0이고 교번디지털합이 0이 아닌 경우에는 축적디지털합은 증가시키지 못한다. 따라서 축적교번디지털합을 증가시키지 않도록 하기 위하여 그 부호어와 투명한 부호어가 서로 짝이 되어 하나의 정보어에 대응된다. 즉, 0101의 교번디지털합은 4이므로 축적교번디지털합의 상태가 "−"인 상태 2와 상태 4에 대응되고 0101과 투명한 부호어인 1010은 교번디지털합이 −4이므로 축적교번디지털합의 상태가 "+"인 상태 1과 상태 3에 대응된다. 또한 0000, 1111과 같이 디지털합이 0이 아니고 교번디지털합이 0인 경우에는 축적교번디지털합은 증가시키지 못한다. 따라서 축적디지털합을 증가시키지 않도록 하기 위하여 그 부호어와 투명한 부호어가 서로 짝이 되어 하나의 정보어에 대응된다. 즉, 0000의 디지털합은 −4이므로 축적디지털합의 상태가 "+"인 상태 1과 상태 2에 대응되고 0000과 투명한 부호어인 1111은 디지털합이 4이므로 축적디지털합의 상태가 "−"인 상태 3과 상태 4에 대응된다. 마지막으로 그 외의 다른 부호어처럼 디지털합과 교번디지털합 중 어느 것도 0이 아닌 경우에는 축적디지털합과 축적교번디지털합 모두 증가시키지 않도록 하기 위하여 상태가 다른 4개의 부호어가 짝이 되어 하나의 정보어에 대응된다.

이러한 이진선로부호의 부호율은 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저, 부호어의 디지털합이 0이기 위해서는 식 (2)에 의하여 부호어의 길이가 짝수이고 1의 개수가 n/2이어야 하므로 이러한 부호어의 개수 N_2는 다음과 같다.

$$N_2 = \begin{cases} \binom{n}{n/2}, & n = 2, 4, 6, \cdots \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{7}$$

따라서 부호어의 디지털합이 0이고 교번디지털합이 0이 아닌 부호어의 개수는 다음과 같이 구해진다.

$$N_2 - N_1 = \begin{cases} \binom{n}{n/2}, & n = 2, 6, 10, \cdots \\ \binom{n}{n/2} - \binom{n/2}{n/4}^2, & n = 4, 8, 12, \cdots \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{8}$$

또한, 교번디지털합이 0이기 위해서는 식 (4)에 의하여 부호어의 길이가 짝수이고 부호어에서 짝수번째에서 1의 개수와 홀수번째에서 1의 개수가 같아야 한다. 따라서 교번디지털합이 0인 부호어의 개수 N_3은 다음과 같다.

$$N_3 = \begin{cases} \sum_{i=0}^{n/2} \binom{n/2}{i}^2, & n = 2, 4, 6, \cdots \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{9}$$

www.dbpia.co.kr

조합에서 이미 잘 알려진 성질을 이용하면 식 (9)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_3 = \begin{cases} \binom{n}{n/2}, & n = 2, 4, 6, \cdots \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

따라서 부호어의 디지털합이 0이 아니고 교번디지털합이 0인 부호어의 개수는 다음과 같이 구해진다.

$$N_3 - N_1 = \begin{cases} \binom{n}{n/2}, & n = 2, 6, 10, \cdots \\ \binom{n}{n/2} - \binom{n/2}{n/4}^2, & n = 4, 8, 12, \cdots \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

마지막으로 디지털합과 교번디지털합 중 어느 것도 0이 아닌 부호어의 개수 N_4는 다음과 같다.

$$N_4 = \begin{cases} 2^n - 2\binom{n}{n/2}, & n = 2, 6, 10, \cdots \\ 2^n - 2\binom{n}{n/2} + \binom{n/2}{n/4}^2, & n = 4, 8, 12, \cdots \\ 2^n, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

따라서 부호어의 길이가 주어질 때 이러한 이진선로부호의 유용한 정보어의 개수 M_2는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} M_2 &= N_1 + \frac{N_2 - N_1}{2} + \frac{N_3 - N_1}{2} + \frac{N_4}{4} \\ &= \begin{cases} \frac{1}{4}\left\{2^n + 2\binom{n}{n/2}\right\}, & n = 2, 6, 10, \cdots \\ \frac{1}{4}\left\{2^n + 2\binom{n}{n/2} + \binom{n/2}{n/4}^2\right\}, & n = 4, 8, 12, \cdots \\ 2^{n-2}, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

부호어의 길이에 따른 유용한 정보어의 개수, 정보어의 길이, 그리고 부호율을 표 4에 나타내었다.

표 4에서 부호어의 길이가 홀수인 몇 가지 경우를 제외하면 부호어의 길이가 길어질수록 부호율이 좋아진다. 또한, 본 논문에서 제안한 조건표를 이용한 부호의 경우 기존의 부호[1, 4-6]보다 부호율면에서 비슷하거나 다소 높음을 알 수 있다. 예를 들면 부호어의 길이가 8인 경우에 대해서 지금까지는 정보어의 길이가 5인 무직류 및 최소대역폭 이진선로부호가 제안되었으나[6] 표 4에서 정보어의 길이가 6인 부호가 존재함을 알 수 있다.

표 4. 부호어의 길이에 따른 정보어의 개수, 정보어의 길이, 그리고 부호율

Table 4. Number of messages, message length, and code rate according to codeword length.

n	M_2	k	k/n
2	2	1	0.5
3	2	1	0.33
4	8	3	0.75
5	8	3	0.6
6	26	4	0.67
7	32	5	0.71
8	108	6	0.75
9	128	7	0.78
10	382	8	0.8
⋮	⋮	⋮	⋮

Ⅳ. 제안된 이진선로부호의 성능분석

Class Ⅰ 이진선로부호는 모두 0과 모두 1인 부호어를 포함하지 않고 또한 투명하게 설계될 수 있으므로 최대연속장 R_{max}는 다음과 같다.

$$R_{max} = \max\{R_{mid}, R_{start} + R_{end}\} \leq n \quad (14)$$

여기서 R_{mid}는 부호어 내에서 최대연속장이고, R_{start}와 R_{end}는 각각 부호어의 처음과 끝에서 최대연속장이다. 그리고 n은 4의 배수이다. 또한 이러한 이진선로부호의 축적디지털합과 축적교번디지털합은 0이다.

한편, Class Ⅱ 이진선로부호의 경우 모두 0과 모두 1인 부호어를 포함하는 경우도 있고 그렇지 않은 경우도 있으므로 R_{max}를 일반적으로 구하기는 매우 어렵다. 그러나 모두 0과 모두 1인 부호어를 포함하고 있다는 가정하에서 최악의 경우를 생각하여 이 값을 구하면 다음과 같다[10].

$$R_{max} \leq 2\left\{n + \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right\} \quad (15)$$

그러나 Class Ⅱ 이진선로부호의 대부분은 모두 0과

www.dbpia.co.kr

모두 1인 부호어를 포함하지 않게 설계될 수 있으며, 따라서 이 부호의 R_{max}는 위의 식에서 구한 최대값보다 훨씬 작다. 또한 축적디지털합과 축적교번디지털합이 가질 수 있는 값의 범위는 부호어의 길이가 짝수인 경우에는 $-n$에서 $(n-2)$이고, 홀수인 경우에는 $-n$에서 $(n-1)$이다. 이것은 그 이전 부호어까지 축적디지털합 또는 축적교번디지털합이 0인 경우 디지털합 또는 교번디지털합이 $-n$인 부호어는 전송될 수 있지만 n인 부호어는 전송될 수 없기 때문이다.

Class Ⅰ 이진선로부호와 Class Ⅱ 이진선로부호의 전력스펙트럼밀도는 Cariolaro와 Tronca의 알고리즘[11]을 이용하여 구할 수 있으며, 부호어의 길이가 4인 경우의 전력스펙트럼밀도를 그림 1에 나타내었다.

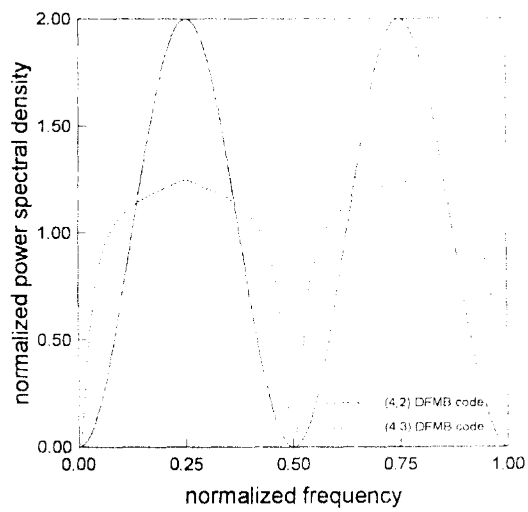

그림 1. 이진선로부호의 전력스펙트럼밀도
Fig. 1. Power spectral density of binary line codes.

그림 1에서 제안된 이진선로부호는 직류 및 Nyquist 주파수에서 전력영점을 가지므로 무직류 및 최소대역폭 특성이 만족됨을 알 수 있다. 그리고 Class Ⅰ 이진선로부호가 Class Ⅱ 이진선로부호에 비해 저주파성분 및 Nyquist 주파수 부근의 성분에 대한 억압특성이 더 우수함을 알 수 있다. 이것은 축적디지털합과 축적교번디지털합을 Class Ⅱ 이진선로부호에 비해 Class Ⅰ 이진선로부호가 훨씬 더 좁은 범위로 조절할 수 있기 때문이다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 조견표를 이용한 무직류 및 최소대역폭 이진선로부호를 제안하였다. 그리고 제안된 부호의 부호율, 최대연속장, 축적디지털합, 축적교번디지털합, 그리고 스펙트럼 특성을 구하였다.

그 결과 제안된 부호는 직류 및 Nyquist 주파수에서 전력영점을 가지므로 무직류 및 최소대역폭 특성을 만족하였다. 그리고 디지털합과 교번디지털합이 모두 0인 부호어로 구성된 Class Ⅰ 이진선로부호의 경우에는 부호율은 다소 떨어지나 저주파성분 및 Nyquist 주파수 부근의 성분들에 대한 억압특성이 더 우수하였다. 반면에 디지털합과 교번디지털합이 0이 아닌 부호어까지 포함하여 구성된 Class Ⅱ 이진선로부호의 경우에는 저주파성분 및 Nyquist 주파수 부근의 성분들에 대한 억압특성은 다소 나쁘나 부호율은 더 높았다. 그리고 제안된 부호는 무직류 특성을 만족하는 이진선로부호이므로 유한연속장 특성도 부수적으로 가짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. K. A. S. Immink, *Coding Techniques for Digital Recorders*, Prentice Hall, New York, 1991.
2. J. R. Pierce, "Some practical aspects of digital transmission," *IEEE Spectrum*, vol. 5, no. 11, pp. 63-70, Nov. 1968.
3. D. Y. Kim and J. K. Kim, "A condition for stable minimum-bandwidth line codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 33, no. 2, pp. 152-157, Feb. 1985.
4. J. H. Kim and D. Y. Kim, "Design and analysis of a minimum bandwidth binary line code MB34," *J. KITE*, vol. 29-A, no. 8, pp. 621-628, Aug. 1992.
5. J. H. Kim and D. Y. Kim, "Design and analysis of binary line code MB46," *J. KICS*, vol. 17, no. 9, pp. 963-970, Sep. 1992.
6. J. H. Kim and D. Y. Kim, "Design and analysis of a memoryless minimum bandwidth binary line code MB58," *J. KICS*, vol. 17, no. 10, pp. 1074-1080, Dec. 1992.
7. L. J. Fredrickson, "On the Shannon capacity of

www.dbpia.co.kr

DC-and Nyquist-free codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 37, no. 3, pp. 918-923, May 1991.
8. G. L. Pierobon, "Codes for zero spectral density at zero frequency," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 30, no. 2, pp. 435-439, Mar. 1984.
9. B. H. Marcus, and P. H. Siegel, "On codes with spectral nulls at rational submultiples of the symbol frequency," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 33, no. 4, pp. 557-568, Jul. 1987.
10. J. J. O'Reilly and A. Popplewell, "A further note on DC-free coset codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 36, no. 3, pp. 675-676, May 1990.
11. G. L. Cariolaro and G. P. Tronca, "Spectra of block coded digital signals," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 22, no. 10, pp. 1555-1564, Oct. 1974.

정 창 기(Chang Ki Jeong) 정회원
현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정
한국통신학회 논문지 제20권 제5호 참조

주 언 경(Eon Kyeong Joo) 정회원
현재 : 경북대학교 전자·전기공학부 부교수
한국통신학회 논문지 제20권 제5호 참조

www.dbpia.co.kr