

주파수 다이버시티를 이용한 순환 지연 다이버시티 OFDM 시스템의 성능 향상 연구

중신회원 정 혁 구*

A study on performance enhancement of cyclic delay diversity OFDM system using frequency diversity

Hyeok-Koo Jung* *Lifelong Member*

요 약

이 논문은 순환 지연 다이버시티 OFDM 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 주파수 다이버시티를 적용하는 알고리즘을 제안한다. OFDM 시스템에서 주파수 다이버시티 적용은 동일한 심볼을 상관관계가 없는 부반송파로 반복 전송하는 것으로 수행되며, 반복 전송 회수에 비례하여 변조 레벨을 증가시켜서 종래의 전송 시스템의 성능과 비교한다. 이 방법은 순환 지연 다이버시티 알고리즘과 같이 송신기 개수가 많아짐에 따라 수신기에서 부가적인 특별한 하드웨어가 필요하지 않다는 동일한 장점이 있게 되며, 성능 시험을 위해서 다중 송수신 안테나 환경 하에서 모의 실험을 수행하였다. 제안하는 알고리즘은 종래의 순환 지연 다이버시티를 활용한 OFDM 시스템과 비교하여 저밀도 변조 레벨에서 성능 향상이 현저함을 보여준다.

Key Words : frequency diversity, repetition, cyclic delay, OFDM, MISO

ABSTRACT

This paper proposes a technology for performance enhancement of cyclic delay diversity OFDM system using frequency diversity. The frequency diversity in an OFDM system can be done as repetitive transmission of the same symbol on uncorrelated subcarrier, this makes modulation level larger according to the number of repetitive transmission for the comparison with the traditional transmission system. This technique, like cyclic delay diversity, has a benefit which it does not need any special subsidiary hardware irrespective of the increase of the number of transmitter. For the performance comparison, we simulate the proposed algorithm in multiple input single out channel environment, it shows a better performance enhancement in low dense modulation level in comparison with the traditional cyclic delay diversity OFDM system.

I. 서 론

OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) 시스템은 무선 랜(LAN : Local Area Network)^[1] 환경

의 경우에 매우 효율적인 방식으로 알려져 있으며, 채널 환경이 다중 안테나로 진행되는 현대의 통신 시스템에 있어서 송신 안테나 신호들간의 결합 기술로 인한 성능 개선은 매우 중요한 기술적인 주제가

※ 이 논문은 2010년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

* 한밭대학교 정보통신컴퓨터공학부 전파공학전공(junghk@hanbat.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-09-411, 접수일자 : 2011년 9월 26일, 최종논문접수일자 : 2012년 1월 6일

되고 있다²⁾.

한편 이와 같은 다중 안테나 신호 결합을 위한 다중 안테나 신호들 간의 결합 기술중에서 수신 안테나 신호의 경우에는 최대 유효 수신 결합 (MRRC : Maximum Ratio Receive Combining) 방법이 최적으로 알려져 있으며, 최근에는 STBC 등을 비롯한 송신 안테나 신호들의 결합을 통한 이득 개선을 하고 있다³⁾⁵⁾. 그런데 이와 같은 전송 다이버시티 기술은 수신기에서 결합과정을 수행할 때 송신기 개수가 하나 이나 또는 여러 개이냐에 따라서 수신기 구조가 달라져야 한다는 단점을 보유하고 있다.

그래서 이 문제를 해결하기 위하여 제안된 순환 지연 다이버시티 알고리즘은 송신기에서는 시간영역에서 하나의 OFDM 심볼 신호를 순환 지연 이동하게 되면 그 영향은 주파수 영역에서 신호의 크기에는 영향이 없고 위상 변화에만 영향을 미친다는 점을 이용하여 수신기에서의 데이터 복호 구조를 간단하게 가져갈 수 있으며, 이렇게 구성된 주파수 영역에서의 같은 크기의 위상만 이동된 복수개의 송신 안테나 신호는 OFDM 시스템에서 대부분 채용하고 있는 채널코덱 특히 수신기에서의 비터비 알고리즘을 사용하게 되면 데이터 성능 개선효과가 매우 뚜렷하게 된다고 알려져 있다⁶⁾.

그런데 이와 같은 CDD-OFDM 알고리즘의 성능 개선을 하기 위하여 주파수 영역에서 반복 전송하는 방법을 도입하게 되면, 주파수 영역에서의 반복 전송으로 인하여 수신기에서의 수신 다이버시티가 증가하게 되고, 그 효과를 MRRC 기술로 성능 개선 이득을 얻을 수 있게 된다. 특히 이와 같은 기술은 단일 송신 안테나 등에서는 선택적 결합 기술 등과 하이브리드하게 결합하여 제안된 알고리즘³⁾등이 있으며, 이와 같은 기술을 CDD-OFDM 시스템에 적용하여 주파수 영역 반복 전송 기술을 제안하여 주파수 다이버시티 효과를 발생시키고 그 결과를 평가하고자 한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 이 논문에서 제안하고자 하는 주파수 다이버시티 CDD-OFDM 알고리즘에 대하여 기술하고, 3장에서는 다중 안테나 시험환경인 무선 랜 HiperLAN/2 채널 A 에서 모의 실험한 결과를 제시하고, 종래의 CDD-OFDM 시스템과의 성능을 비교하여 평가하며, 마지막으로 4장에서는 결론을 맺는다.

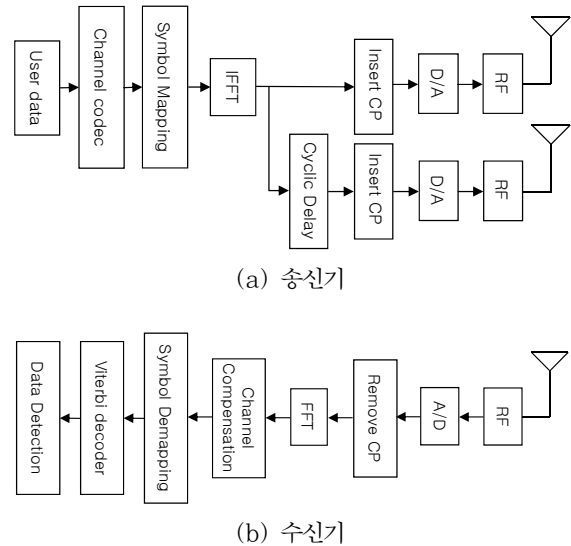


그림 1. 순환 지연 다이버시티 OFDM 알고리즘의 블록도
Fig. 1. Block diagram of CDD-OFDM algorithm

II. 주파수 다이버시티 순환 지연 다이버시티 OFDM 알고리즘(FD-CDD-OFDM : Frequency Diversity Cyclic Delay Diversity OFDM)

제안하는 주파수 다이버시티 순환 지연 다이버시티는 주파수 다이버시티 순환 지연 다이버시티 OFDM 알고리즘의 송신기 블록도는 그림 2. (a) 와 같다. 먼저 사용자의 데이터를 생성한 다음에 채널 코덱부에서는 길쌈부호기(부호율 1/2, 생성자 다항식 [171 133])를 구성하여 사용자 데이터를 부호화하고, 그 다음에 심볼 맵핑부에서 변조하여 심볼을 구성한 후, 구성된 심볼의 개수를 OFDM 심볼 개수의 절반씩 구성하여 하나의 OFDM 심볼을 2번 반복된 데이터 심볼 벡터로 구성한다. 이 때 전송된 동일한 데이터는 상관관계가 없는 부반송파에 위치하도록 데이터를 구성한다.

$$S = [S(0) S(1) \dots S(N/2-1) S(0) S(1) \dots S(N/2-1)] \quad (1)$$

식 (1) 에서 S 의 모든 요소는 CDD-OFDM 경우 변조수준 ml(modulation level)의 반복회수 배인 2*ml 인 변조수준으로 구성한다. 이와 같이 구성된 OFDM 심볼 데이터는 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)을 통하여 시간 영역신호로 변환되고, 이 변환된 동일한 시간영역 신호를 복수 개의 송신 안테나를 통하여 전송하게 된다. 단 이 경우 각 송신 안테나를 통하여

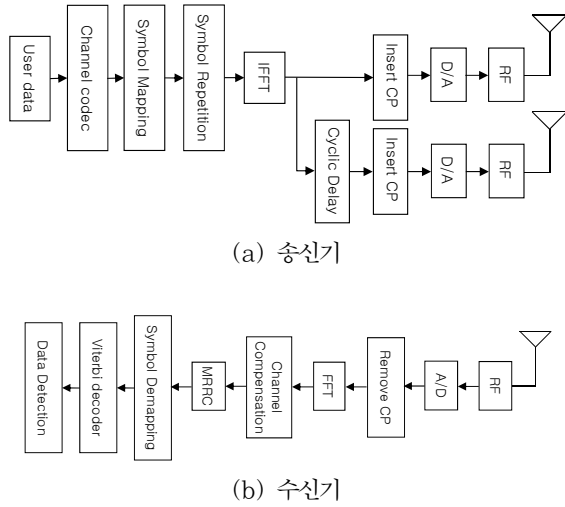


그림 2. 주파수 다이버시티 순환 지연 다이버시티 OFDM 알고리즘의 블록도
Fig. 2. Block diagram of the proposed frequency diversity CDD-OFDM algorithm

전송되는 신호는 데이터의 값은 동일한 신호지만, OFDM 심볼내에서 순환 지연되어 전송하게 되는데 이 순환지연의 효과는 전송경로간의 상관관계를 없게 하기 위함이다. 통상 추가된 송신 안테나에서 송신되는 신호는 안테나마다 특별한 지연값을 사용하고, 주로 $(\delta_{cyc,t}, t=1,2,\dots,T$ 여기서 T 는 송신안테나 개수) 라 한다. 이 때 첫 번째 송신안테나의 시간 지연 $\delta_{cyc,0}$ 은 0으로 가정하고, 추가되는 두 번째 송신 안테나 신호부터는 0 인 아닌 시간 지연 값을 사용하게 된다. 이렇게 구성하는 시간 영역에서의 순환 지연은 주파수 영역에서 위상 값이 변하는 것으로 나타나며, 이 위상 지연의 크기는 $\delta_{cyc,t}$ 에 비례하게 된다. 먼저 심볼 맵핑되어 IFFT 부에 의하여 변환된 시간영역 신호를 기술하면 다음 (2), (3) 식과 같다.

$$s(l) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} S(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kl} \quad (2)$$

$$\underbrace{s((l-\delta_{cyc})\%N)}_{\text{CDD신호}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \underbrace{e^{-j\frac{2\pi}{N}k\delta_{cyc}} S(k)}_{\text{위상지연신호}} e^{j\frac{2\pi}{N}kl} \quad (3)$$

여기에서 % 는 modular 기능을 의미하며, N 은 부반송파 개수이고, $0 \leq i < N$ 이다. 이렇게 구성된 순환지연 다이버시티 신호에 보호구간에 해당하는

CP(Cyclic Prefix)를 삽입하고 RF부를 통하여 전송한다.

제안하는 주파수 다이버시티 순환 지연 다이버시티 OFDM 알고리즘의 수신기 블록도는 그림 2. (b)와 같다. 먼저 두 개의 송신기로부터 전송된 두 신호는 합쳐져서 수신기에서 수신되며 RF 부에서 기저대역 신호로 변환되고 CP를 제거한다. 이 신호를 FFT 한후 채널 보상을 수행하고, 채널 보상이 끝난 이후에 최대 윌 수신 결합(MRRC : Maximum Ratio Receive Combining)을 수행하고 심볼 디맵핑 과정을 거친 후에 비터비 디코더를 통과시킨 후 데이터 검출 과정을 수행한다. 이 때 순환이동 다이버시티를 사용하게 되면 통상의 단일 송수신 안테나의 채널보상과 다른 채널 보상과정을 거치게 된다. 송신 채널이 복수 개이므로 이에 따른 보상과정을 거쳐야 한다. 보통 시간영역 신호에서 시간 지연은 주파수 영역에서의 위상 회전에 해당하므로,

$$x(t-t_0) \leftrightarrow e^{-j2\pi f t_0} X(f), X(f) = F\{x(t)\} \quad (4)$$

이 성립하고, 두 개의 송신 안테나간의 시간 지연된 송신 신호 $s(l), s((l-\delta_{cyc})\%N)$ 에 대응하는 주파수 영역 신호는 각각 다음의 **S**와 **Q**와 같다.

$$\mathbf{S} = FFT[\mathbf{s}] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= [S(0), e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}\delta_{cyc}} S(1), \dots, e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}(\frac{N}{2}-1)\delta_{cyc}} S(\frac{N}{2}-1), \\ & e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}(\frac{N}{2})\delta_{cyc}} S(\frac{N}{2}), \dots, e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}\delta_{cyc}} S(N-1)] \\ &= \mathbf{S} \cdot \text{diag}[e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}0\delta_{cyc}}, e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}\delta_{cyc}}, \dots, e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}(\frac{N}{2}-1)\delta_{cyc}}, \\ & e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}(\frac{N}{2})\delta_{cyc}}, \dots, e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}\delta_{cyc}}] \\ &= \mathbf{S} \cdot \mathbf{R} \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서 **R** 은

$$\mathbf{R} = \text{diag}[e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}0\delta_{cyc}}, e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}\delta_{cyc}}, \dots, e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}(\frac{N}{2}-1)\delta_{cyc}}, \\ e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}(\frac{N}{2})\delta_{cyc}}, \dots, e^{-j2\pi\frac{\Delta f}{N}\delta_{cyc}}] \quad (7)$$

와 같이 정의된다.

따라서 수신기에서 수신되어 FFT 변환된 신호는 다음과 같은 두 개의 주파수 영역 신호가 합쳐진 신호로 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \mathbf{S}\mathbf{H}_1 + \mathbf{Q}\mathbf{H}_2 + \mathbf{W} \\ &= \mathbf{S}\mathbf{H}_1 + \mathbf{S}\mathbf{R}\mathbf{H}_2 + \mathbf{W} \\ &= \mathbf{S}(\mathbf{H}_1 + \mathbf{R}\mathbf{H}_2) + \mathbf{W} \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서 \mathbf{Y} , \mathbf{S} , \mathbf{Q} , \mathbf{W} 는 모두 $1 \times N$ 크기의 벡터를 의미하며, \mathbf{H}_1 과 \mathbf{H}_2 는 $N \times N$ 크기의 대각 행렬이다. 또한 식 (8) 의 모든 신호는 하나의 OFDM 심볼에서의 신호를 의미하며, \mathbf{W} 는 AWGN 잡음을 의미한다. 또한 \mathbf{H}_1 은 첫 번째 송신 안테나와 수신 안테나간의 채널 주파수 응답을 OFDM 심볼 개수 만큼 대각 행렬화한 것을 의미하며, \mathbf{H}_2 는 두 번째 송신 안테나와 수신 안테나간의 대각 행렬화한 채널 주파수 응답이다. 이렇게 수신된 수신 신호 벡터 \mathbf{Y} 에 대한 채널 보상 방법으로 $\mathbf{H} = \mathbf{H}_1 + \mathbf{R}\mathbf{H}_2$ 값을 채널로 간주하여 보상하는 방법을 사용할 수 있다. 이와 같이 수신된 신호 \mathbf{Y} 는 주파수 영역에서 하나의 OFDM 심볼 내에서 동일한 신호를 다른 부반송파에 실어서 보낸 것이므로 MRRC가 가능하게 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= [Y(0) Y(1) \dots Y(N-1)] \\ \mathbf{H} &= [H(0) H(1) \dots H(N-1)] \end{aligned} \quad (9)$$

그러면 송신 신호 $\mathbf{S} = [S(0) S(1) \dots S(N-1)]$ 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{S}(i) = \frac{Y(i)H(i)^* + Y\left(\left(i + \frac{N}{2}\right) \% N\right)H\left(\left(i + \frac{N}{2}\right) \% N\right)}{|H(i)|^2 + \left|H\left(\left(i + \frac{N}{2}\right) \% N\right)\right|^2} \quad (10)$$

여기에서 $0 \leq i < N$ 이다. 이렇게 구한 $\hat{S}(i)$ 심볼은 개수가 $N/2$ 개이지만, 변조 수준이 2배로 된 것이므로, $\hat{S}(i)$ 로 부터 구할 수 있는 사용자 데이터 개수는 $2 * ml * (N/2) = ml * N$ 개가 된다. 여기에서 ml 은 변조 수준을 의미한다.

한편 그림 1에 주어진 종래의 방식인 CDD-OFDM 시스템에서의 주파수 영역 수신신호는 식 (8)과 같지

만, 이 경우에는 주파수 다이버시티로 인한 효과가 없기 때문에 MRC 기능을 수행할 수 없으므로 CDD로 인한 위상 회전된 채널의 영향만을 고려한 영('0') 강제 채널 보상이 가능하여 송신 신호 $\mathbf{S} = [S(0) S(1) \dots S(N-1)]$ 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{S}(i) = \frac{Y(i)}{H(i)}, \quad 0 \leq i < N \quad (11)$$

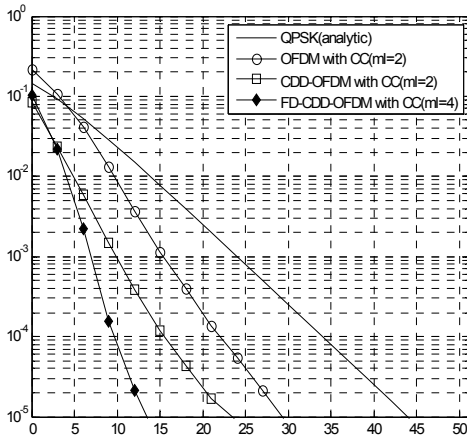
이 경우 구한 $\hat{S}(i)$ 심볼은 개수가 N 개가 된다.

III. 실험 및 고찰

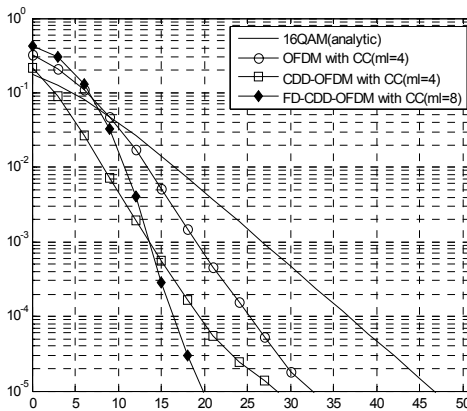
주파수 다이버시티를 활용한 순환 지연 다이버시티 OFDM 시스템의 성능을 확인하기 위하여 송신기의 안테나 개수로는 2개, 수신기의 안테나 개수는 1개를 사용한다. 수신기에서는 모의실험에 사용한 OFDM 시스템의 파라미터는 다음과 같다. 전체 20MHz 대역은 64개의 부반송파로 나누어지고, 유효 심볼 주기($T_s = 3.2 \mu s$)와 보호구간을 포함하는 하나의 OFDM 심볼주기는 $4 \mu s$ 이다. HiperLAN/2 channel A 를 모의 실험에 사용하는데 채널 상태 정보는 알고 있다고 가정한다. 비교하는 시스템으로는 순환 지연 다이버시티 OFDM 시스템을 사용하였고, 제안하는 주파수 다이버시티를 활용한 순환 지연 다이버시티 OFDM 은 반복전송으로 인하여 발생하는 데이터 손실을 비교하는 시스템과 같게 하기 위하여 두 배의 변조 수준(ml : modulation level)을 사용한다. 그림 3에서 (a), (b), (c) 그래프 모두 가로축은 E_b/N_0 , 세로축은 BER을 나타낸다. 그림 3 (a)에서는 HiperLAN/2 채널 A 에서의 제안하는 주파수 다이버시티 CDD-OFDM 과 종래의 CDD-OFDM 의 성능 차이를 보여 준다.

제안하는 FD-CDD-OFDM 알고리즘은 변조 레벨이 QPSK인 경우 매우 뛰어난 성능을 보인다. E_b/N_0 전 영역에서 우수하며 특히 $BER = 10^{-5}$ 에서 약 10dB 의 성능 향상을 보인다. 한편 16QAM 의 경우에는 $E_b/N_0 : 13 \text{ dB}$ 에서부터 우수하며 $BER = 10^{-5}$ 에서 약 8dB 의 성능 향상을 보인다. 하지만 64QAM 의 경우에는 $E_b/N_0 : 27 \text{ dB}$ 에서부터 우수하며 $BER = 10^{-5}$ 에서 약 3.5dB 의 성능 향상을 보인다. 그러므로 전체적으로 변조 수준이 낮은 경우에는 성능 개선 효과가 뚜렷하나 변조 수준이 높은

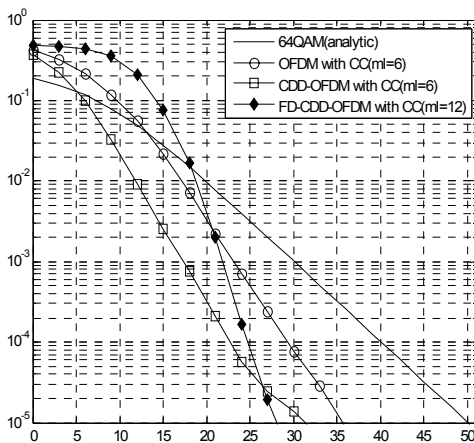
경우에는 성능 개선 효과가 그리 크지 않음을 알 수 있다.



(a) QPSK 경우



(b) 16 QAM



(c) 64 QAM

그림 3. 제안된 주파수 다이버시티 CDD-OFDM 과 CDD-OFDM 성능 비교(가로축은 E_b/N_0)

Fig. 3. Performance comparison between the proposed frequency diversity CDD-OFDM and CDD-OFDM algorithm

IV. 결 론

이 논문은 주파수 다이버시티를 활용하여 순환 지연 다이버시티 OFDM 시스템의 성능을 개선하는 주파수 다이버시티 CDD-OFDM 알고리즘을 제안한다. CDD-OFDM 으로 수신기의 복잡한 하드웨어의 추가없이 성능개선이 확인된 알고리즘에 주파수 다이버시티를 얻기 위하여 주파수 영역 반복 전송기법을 사용하고 그에 따른 MRC 이득을 얻게 된다. 제안하는 주파수 다이버시티 적용 알고리즘은 종래의 CDD-OFDM 시스템과 비교하여 저밀도 변조 레벨에서 성능향상이 현저함을 모의 실험을 통하여 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] *IEEE P802.11nTM / D3.00, Part11, WirelessLAN Medium AccessControl (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications.*
- [2] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE selected areas in Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct, 1998.
- [3] W. G. Jeon and H. K. Jung, "Hybrid SC/MRRC Technique for OFDM Systems," *IEICE Trans. on Commun.* vol. E89-B, no. 3, pp. 1003-1006, March, 2006.
- [4] H. K. Jung, W. G. Jeon, K. H. Seo, and Y. S. Cho, "A Subcarrier Selection Combining Technique for OFDM Systems," *IEICE Trans. on Commun.*, vol. E86-B, no. 7, pp. 2119-2124, July, 2003.
- [5] Y. M. Jung and H. K. Jung, "Shortened transmit technique removing zeros from repetition in the frequency domain for OFDM systems," *IEICE Electronics Express*, vol. 7, no. 19, pp. 1461-1466, Oct, 2010.
- [6] S. Plass, A. Dammann, and S. Sand, "An Overview of Cyclic Delay Diversity and its Applications," *VTC-2008 Fall*, pp. 1-5, 2008.

정 혁 구 (Hyeok-Koo Jung) 종신회원
현재 한밭대학교 정보통신컴퓨터공학부 부교수
한국통신학회논문지 2005년 5월 제30권 5C호 참조