

단일 반송파 시스템의 단말기 성능 개선 연구

(A Research on Terminal Performance Enhancement in Single-Carrier System)

정혁구¹⁾

(Jung Hyeok Koo)

요약 이 논문은 하나의 기지국과 통화하는 다수의 단말기에서의 수신 성능 개선에 관한 것이다. 일반적인 기지국과 단말기들간의 연결은 다수의 단말기들이 하나의 기지국에 연결되어 있으며, 시간이나 주파수 또는 코드를 할당하여 사용하는 방법이 사용되고 있다. 이러한 환경에서 기지국 역할을 하는 액세스 포인트가 여러 개의 단말기들과 별도로 전송하는 전송 데이터를 변형하여 수신기에서 수신 능력을 향상시킬 수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 수신기에서 최대 출력 결합을 사용할 수 있도록 송신 데이터를 구성하고, 수신기마다 송신 신호를 추정하여 비트오류율을 모의 실험하고 그 성능을 제시한다.

핵심주제어 : 단말기, 단일 반송파, 수신 성능, 최대 출력 결합

Abstract This Paper Addresses a Performance Enhancement of Multitude Receivers Communicating with a Basestation. A General Link between Basestation and Terminal is that a Basestation is connected with Multitude Receivers and Time, Frequency and Code are shared and used among them. We propose an Algorithm of Enhancing Receiver Capability at the Receiver when access Point of Acting as a Basestation in this Environment Modifies Transmission Data Separately to be sent. In the Proposed Algorithm, we configure Transmit Data to Use Maximal Ratio Combining Technique in the Receiver, and Estimate Transmitter Signal per Each Receiver and Simulate Bit Error Rate and Show the Performance Results.

Key Words : Maximal Ratio Combining, Receive Capability, Single Carrier, Terminal

1. 서론

일반적인 기지국 단말기 통신 시스템 구조는 하나의 기지국이 다수의 단말기들과 통신하고 있

는 구조이다. 이와 같은 기지국 또는 액세스 포인트에서의 신호 전송은 시간, 주파수 또는 코드를 분할하여 사용하는 구조인데 통상 하나의 단말기마다 하나의 시간대에 전송되는 시분할다중화 구조에서는 신호가 전송되지 않는 시간블록에서는 신호가 전송되고 있지 않지만 단말기에서는 영 신호를 수신받고 있는 것이 되므로 단말기에서는 이러한 신호 특성을 수신기 결합 구조에 사

* Corresponding Author : junghk@hanbat.ac.kr

Manuscript received November 2, 2017 / accepted December 11, 2017

1) 한밭대학교 정보통신공학과, 제1저자

용하여 수신 이득을 향상시키는 방법에 사용할 수 있을 것으로 보인다. 이와 같은 수신 결합 연구는 OFDM의 경우에는 실내 무선 랜의 다중 송수신 안테나 환경인 IEEE802.11n[1-4]를 비롯하여 다중 경로 채널에서 효과적으로 사용되는 변조 방식이며, 이러한 방식에 선택적 결합 방법과 아울러 최대 유효 수신 결합 방법을 함께 사용하는 하이브리드 결합 기술은 단일 송신 안테나 및 단일 수신 안테나 시스템에서 매우 효과적이라고 알려져 있다[5]. 이와 같은 OFDM 시스템에서 반복 전송 알고리즘을 시간 영역에서 영삽입 알고리즘을 적용하여 수신기에서 결합 이득을 얻고자 하는 알고리즘이 제안되었다[6]. 또한 이와 같은 단일 송신 안테나를 다중 송신 안테나로 확장했을 때 수신기에서 데이터 복조가 가능하도록 결합 가능한 구조를 Alamouti가 시공간 블록코드로 제시하였다[7]. 한편 이와 같은 결합 구조를 단일 반송파 시스템에서 주파수 영역 등화기를 사용하는 방법으로 Al-Dhahir가 제시하였다[8].

이러한 구조 연구에 교번 스위치를 송신기에 추가하고 수신기에서는 최대 유효 수신 결합을 사용하는 교번 스위칭 공간 또는 주파수 영역 블록코딩 방법 [9-11]들이 제안되어 왔다. 이와 같은 교번 스위칭 기법이 단일 반송파 시스템에 적용 가능하며, 반복 전송 효과를 얻을 수 있도록 전송 구조를 변경하고 그에 따른 수신기 구조 변경 및 결합 구조를 변경하여 적용하는 알고리즘을 제안하고자 한다.

역세스 포인트가 단일 반송파 전송 방식으로 데이터를 전송하는 구조에서는 각 단말기 수신기마다 데이터를 전송받는 시간이 지연되므로 수신기의 신호를 해석할 때는 지연되는 시간을 고려하여야 하며, 이와 같은 수신데이터의 해석은 결합 방법이 사용됨에 따라 다이버시티 차수에 비례하여 결합 구조가 가능하여 수신 비트오류율이 개선될 것으로 예상된다. 따라서 제안하는 알고리즘은 여러 대의 단말기들과 통신하는 에드혹 기반의 송수신 방식, 특히 기지국 방식으로 운용하는 무선기 시스템이나 실내 무선 랜 시스템들에 활용될 수 있으며, 모의 실험 환경으로는 실내 무선 랜 환경의 채널인 HiperLAN/2 채널 A를 사용하여 그 결과를 제시한다. 모의 실험결과

는 종래의 방법인 단일 반송파 시스템과 비교하였으며, 결과는 비트 오류율로서 제시하였다. 이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 종래의 단일 반송파 시스템에 대하여 설명하고, 3장에서는 제안하는 단말기 성능 개선 방법에 대하여 기술하고, 4장에서는 모의 실험결과 그리고 5장에서는 결론을 제시하였다.

2. 단일 반송파 전송시스템

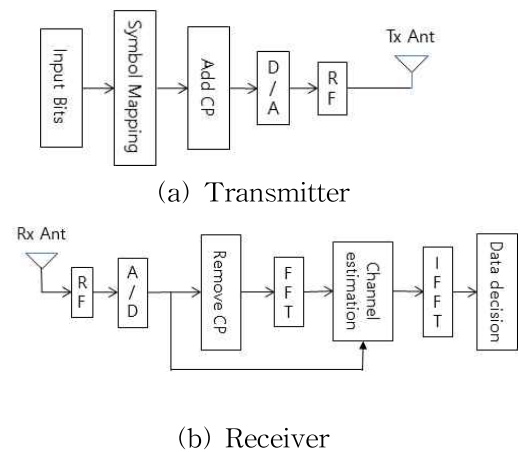


Fig. 1 Block Diagram of Transmitter and Receiver in Single-Carrier System with Frequency Domain Equalization

Fig. 1은 단일 반송파 시스템의 송신기와 수신기 블록도이며, 채널 등화기로는 주파수 영역 등화기를 사용한다. 먼저 송신기 구조를 설명하면, 랜덤한 사용자 데이터를 입력 비트 블록에서 발생시키며, 그 후에 변조 수준(Modulation Level)에 따라 심볼로 변환된다.

송신기에서는 사이클릭 프리픽스를 추가하여 송신하는데 그 이유는 수신기에서 FFT(Fast Fourier Transform)이후에 채널 등화시 선형 컨벌루션이 환형 컨벌루션으로 처리되기 위함이다. 그 이후에 RF 신호로 변환하고 그 후에 안테나를 통하여 전송된다.

만일 전송하고자 하는 데이터 블록을 \mathbf{x} 라 하고, \mathbf{x} 의 심볼 개수를 N이라 하면,

$$\mathbf{x} = [x(1) \ x(2) \ x(3) \ \dots \ x(N)] \quad (1)$$

수신기의 채널추정블록에서 사용할 사이클릭 프레픽스(CP : Cyclic Prefix)는 통상 전체 데이터 \mathbf{x} 의 개수 N 의 $1/4 \sim 1/8$ 에 해당하는 크기 만큼의 데이터를 추가하는데 여기에서는 크기를 $1/4$ 로하고, 그 크기만큼의 데이터를 복사하게 블록의 앞부분에 다음과 같이 위치하게 한다.

$$\mathbf{x}_1 = [cp(1) \ \dots \ cp(N/4) \ x(1) \ x(2) \ \dots \ x(N)] \quad (2)$$

여기에서,

$$cp(1) = x(3N/4 + 1), \dots, cp(N/4) = x(N)$$

주파수 영역 등화기를 사용하는 수신기에서는 RF 신호를 기저대역으로 변환한 후 시간 영역 신호를 주파수 영역 신호로 변환하고 채널 추정 블록에서 추정된 채널의 주파수 응답을 이용하여 채널 보상을 실시한다. 이와 같이 주파수 영역에서 채널 보상을 실시한 후 시간 영역 신호로 만든 다음에 데이터를 결정하게 된다. 이와 같은 방법은 주파수 영역에서 채널을 보상하는 것으로서 시간 영역 등화기를 사용하는 것보다 채널 보상하는 구조가 간단하여 많이 사용되고 있다.

3. 제안하는 다중 수신하는 단일 반송파 알고리즘

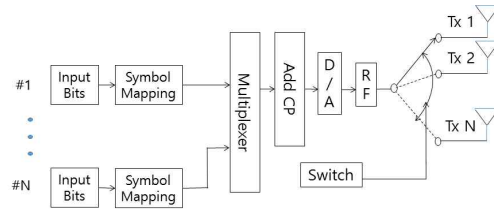
Fig. 2는 제안하는 단일 반송파 시스템에서 다중 수신할 수 있는 알고리즘이 가능하도록 하는 송신기와 수신기 블록도이며, 채널 등화기로는 주파수 영역 등화기를 사용한다. 먼저 송신기 구조를 설명하면, 송신기에서 보내는 하나의 블록은 크기가 M 이며, 이것을 N 개의 랜덤 사용자 데이터에 할당하여 전송되는데, 수신기 별로 입력비트 블록(#1)에서 입력비트 블록(#N)에서 각각 발생되며, 그 후에 변조 수준에 따라 심볼로 변환되는데, 변조 수준은 2bit, 4bit, 6bit 3가지 경우를 말한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_1 &= [s_1(1) \ s_1(2) \ \dots \ s_1(M/N)] \\ \mathbf{s}_2 &= [s_2(1) \ s_2(2) \ \dots \ s_2(M/N)] \\ &\dots \\ \mathbf{s}_N &= [s_N(1) \ s_N(2) \ \dots \ s_N(M/N)] \end{aligned} \quad (3)$$

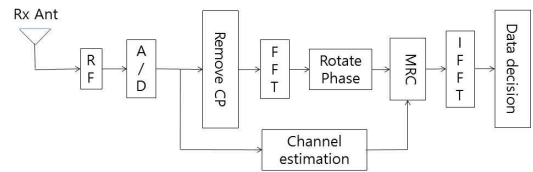
이렇게 심볼로 변환된 N 개의 사용자 데이터들은 다중화기(Multiplexer) 블록에서 하나의 심볼씩 순차적으로 다중화되어 N 개의 병렬 사용자 심볼들이 1 개의 직렬 심볼 시퀀스로 변환된다. 이하 M 은 64, N 은 4라고 가정한다. 다음 식은 다중화기의 출력을 말한다.

$$\mathbf{s} = [s_1(1) \ s_2(1) \ s_3(1) \ s_4(1) \ \dots \ s_1(16) \ s_2(16) \ s_3(16) \ s_4(16)] \quad (4)$$

선형 컨벌루션을 환형 컨벌루션으로 처리하기 위한 사이클릭 프레픽스를 추가하고 디지털 아날로그



(a) Transmitter



(b) Receiver

Fig. 2 Block Diagram of Transmitter and Receiver in a Proposed Multitude Reception Algorithm

컨버터(D/A)를 거쳐서 아날로그 신호로 만든 다음, 기저대역 신호를 RF 신호로 만들어서 안테나를 통하여 전송한다. 사이클릭 프레픽스를 추가하여 전송 신호 \mathbf{t} 를 구성하는 방법은 다음과 같다.

$$\text{위의 } \mathbf{s} \text{를 } \mathbf{s} = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_M] \text{라 가정하면,}$$

$$\mathbf{t} = [cp_1 \cdots cp_{M/4} s_1 s_2 s_3 \cdots s_M] \quad (5)$$

여기에서,

$$cp_1 = s_{3M/4+1}, cp_2 = s_{3M/4+2}, \cdots, cp_{M/4} = s_M$$

송신 안테나는 N 개로 구성되며, 각 송신 안테나에서는 미리 정해진 한 명의 사용자에게 데이터를 보낼 수 있다. 안테나와 RF 블록 사이에 위치한 스위치는 심볼 주기로 스위칭하며, 송신기에서는 블록당 M개의 데이터를 보내는 구조이지만, 하나의 시간에는 하나의 심볼을 한명의 사용자에게만 구조로 송신된다.

사이클릭 프레픽스 부분을 제외하고 스위치를 통과한 후 각 수신기에 보내지는 신호를 기술하면 다음과 같다.

사용자 1의 경우에는

$$[s_1(1)000 s_1(2)000 \cdots s_1(16)000] \quad (6)$$

사용자 2의 경우에는

$$[0 s_2(1)000 s_2(2)00 \cdots 0 s_2(16)00] \quad (7)$$

사용자 3의 경우에는

$$[00 s_3(1)000 s_3(2)0 \cdots 00 s_3(16)0] \quad (8)$$

사용자 4의 경우에는

$$[000 s_4(1)000 s_4(2) \cdots 000 s_4(16)] \quad (9)$$

이와 같이 단일 반송파 전송에서 심볼뒤에 규칙적으로 추가되어 전송되는 영 값은 에프에프티하여 주파수 영역에서 보면 반복되어 나타나는 신호가 된다. 한편 사용자 2부터 N 까지의 송신 데이터는 심볼 시간의 정수배만큼 각각 지연되므로 해당하는 위상 회전을 주파수 영역에서 보상해야만 한다.

제안하는 송신기 구조에서 송신 안테나를 여러 개를 쓰지 않고 하나만 쓰며, 수신기 안테나에서 다른 수신기로 가는 신호를 0으로 없애버리는 구

조의 송수신기 구조를 생각할 수 있으나, 제안하는 알고리즘은 영('0')삽입하는 것이 데이터 심볼 단위로 수행되는 것이며, HiperLan/2 채널 A 의 경우만 해도 채널 길이는 8 탭이므로 데이터 심볼들 간에 걸쳐 있는 채널 응답이므로 이와 같은 환경에서 수신기에서 MRC이득을 얻는 구조는 Fig. 2처럼 송신기에서는 TX 안테나를 여러 개를 각 사용자 별로 스위칭하며, 수신기에서는 MRC 결합하는 구조만이 이득을 얻을 수 있는 것으로 보인다. 또한 제안하는 구조의 사이클릭 프레픽스 구조 추가는 추가적인 송신전력이 요구된다는 점에서 단점이지만, 수신기에서 FFT를 사용하면서 간단해지는 채널 등화기의 장점과 함께 고려해 보면, 두 가지 장단점을 함께 고려하여야 하는 것으로 보인다.

한편 제안하는 구조에서 FFT 크기와 사용자 수 N 에 관한 것은 통신 시스템별로 규격이 정해졌을 때 사용가능한 크기들이 결정될 수 있을 것으로 보이며, 구체적인 통신 시스템별 사용 가능 파라미터는 별도로 검토되어야 할 사항으로 보인다.

제시하는 수신기 구조는 한 명의 수신기를 보여주며 하나의 안테나만이 있고, N 개의 수신기 구조를 감안하면, 차이는 (#1) 수신기의 경우에는 시간 지연이 없지만, (#2) 사용자의 경우에는 하나의 심볼 만큼의 시간 지연, (#3) 사용자의 경우에는 두 개의 심볼 만큼의 시간 지연, 이렇게 진행하여 (#N) 사용자의 경우에는 (N-1)개의 심볼 만큼의 시간 지연이 있게 된다. 이 시간 지연은 에프에프티를 하게 되면 위상 회전으로 나타나게 되고, 이 위상회전 양을 시간지연에 맞게 다시 보상해 주어야만 에프에프티 이후의 최대 유효 결합(MRC : Maximal Ratio Combining)에서 결합 이득을 얻을 수 있게 된다. 그 이후의 과정은 역 에프에프티를 하고 데이터를 결정하면 처음에 보낸 송신 데이터를 구할 수 있다.

송신기에서 전송되는 신호 \mathbf{t} 는 HiperLan/2 A 채널을 통과하게 되는데, l번째 송신 블록이 전송될 때 채널은 시간 영역에서 \mathbf{h}_l^j 로 표시하며 송신 안테나와 j 번째 수신 안테나와의 사이의 채널의 임펄스 응답 행렬을 의미한다. 이 임펄스 응답의 주

과수 영역 신호는 \mathbf{H}_l^j 로 표시하며 송신 안테나와 j 번째 수신 안테나와의 사이의 채널 주파수 응답으로서 $N \times N$ 행렬인 $diag\{H_{l,1}^j, H_{l,2}^j, \dots, H_{l,N}^j\}$ 로 표현된다. 여기에서 채널의 최대 지연 확산보다 사이클릭 프레픽스의 길이가 길다고 가정하고, 채널의 상태 정보는 알고 있다고 가정한다. l 번째 데이터 블록의 경우에 j 번째 수신기에서 수신된 시간 영역 신호가 에프에프티(FFT) 블록을 통과했을 때의 주파수 영역 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{Y}_l^j = \mathbf{H}_l^j \mathbf{T}_l + \mathbf{N}_l^j \quad (10)$$

여기에서 \mathbf{N}_l^j 은 표시하며 l 번째 데이터 블록의 경우에 j 번째 수신 안테나에서의 백색 가우스 잡음을 의미하며 \mathbf{T}_l 는 l 번째 데이터 블록의 송신 신호인 \mathbf{t}_l 의 주파수 영역 신호를 의미하며, 이후부터 식을 간단히 하기 위하여 아래 첨자 l 을 생략하여 표기한다.

한편 첫 번째 수신기에서의 수신 신호를 기준으로 설명하며 $j=1$ 로 가정하고 이하 생략하여 표기하며, $\mathbf{S1} = [s1(1) s1(2) \dots s1(16)]$ 라고 할 때,

$$FFT[s1(1) 0 0 0 s1(2) 0 0 0 \dots s1(16) 0 0 0] = [\mathbf{S1} \ \mathbf{S1} \ \mathbf{S1} \ \mathbf{S1}]$$

가 됨으로 주파수 영역에서 동일한 신호를 전송한 결과가 되므로, 이 결과를 이용하여 최대 윌 결합 방법을 사용하여 수신 이득을 얻도록 한다.

$$\hat{T}(i) = \frac{[H^*(i)Y(i) + H^*(i+16)Y(i+16) + H^*(i+32)Y(i+32) + H^*(i+48)Y(i+48)]}{|H(i)|^2 + |H(i+16)|^2 + |H(i+32)|^2 + |H(i+48)|^2} \quad (11)$$

여기에서 i 는 1과 16을 포함한 그 두 수 사이의 정수를 의미한다.

이렇게 구한 $\hat{\mathbf{T}}_l$ 을 역 에프에프티하면 다음과 같은 $\hat{\mathbf{t}}_l$ 를 구할 수 있고, 이 값을 가지고 수신 데이터 결정을 하면 원하는 송신 신호를 얻을 수 있다.

$$\hat{\mathbf{t}}_l = \mathbf{IFFT}[\hat{\mathbf{T}}_l] \quad (12)$$

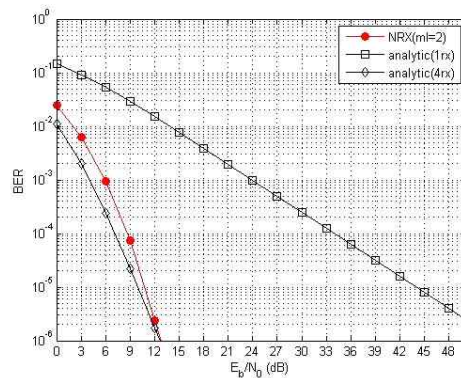
한편 수신기 안테나 1이외에 수신기 안테나 2부터 N 까지의 수신기에서의 수신 신호 처리는 Fig. 2에 있는 “Rotate Phase“ 블록에서 수신기 신호의 에프에프티한 신호의 위상을 보상해 주는 것이며, 이것은 시간 영역에서의 시간 천이는 주파수 영역에서의 위상회전에 해당하므로 그 값에 해당하는 위상 보상을 수행해 준 후 위에서 언급한 최대 윌 결합 과정을 수행하면 동일한 다이버시티 차수의 수신 결합 이득을 얻을 수 있다.

4. 모의 실험

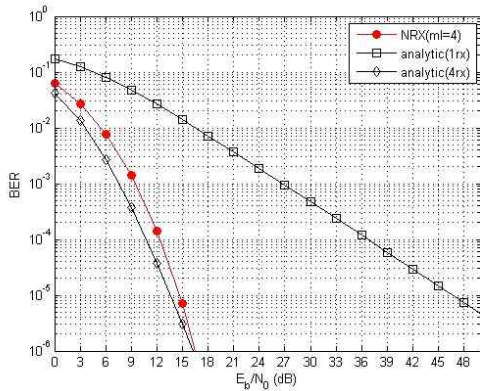
4.1 실험 환경 변수

모의실험에 사용한 단일 반송파 시스템의 환경 변수는 다음과 같다. 전체 20MHz 대역은 64개의 데이터 심볼로 이루어진 블록으로 구성된다. 유효 심볼 주기(3.2μs)와 보호 구간(0.8μs)을 포함한 하나의 데이터 심볼 주기는 4μs이다. 송신기에서는 80개의 심볼들(데이터 페이로드 64, 사이클릭 프레픽스 16 데이터 심볼)마다 그룹으로 묶어서 전송한다. HiperLAN/2 채널 A를 모의 실험 환경으로 사용하였으며 채널 상태 정보는 완벽하게 알고 있다고 가정하고, 도플러 주파수 $f_d=50\text{Hz}$ 로 가정하였다.

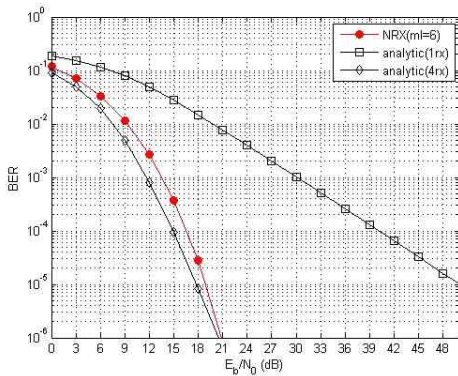
4.2 결과분석



(a) modulation level 2



(b) modulation level 4



(c) modulation level 6

Fig. 3 Performance comparison between a proposed multitude reception algorithm and analytic curves

Fig. 3은 제안하는 다중 수신 가능 알고리즘으로 모의실험한 단일 반송파 시스템의 성능을 종래의 주파수 영역 등화기를 사용하는 단일 반송파 알고리즘과 비교한 것이다. Fig. 3의 (a), (b), (c)는 모의 실험 환경 변수를 다르게 한 것으로서 (a)는 변조수준을 2 bit로 하고 (b)는 변조수준을 4 bit, (c)는 변조수준을 6 bit로 각각 가정한 것이다. 제안하는 다중 수신 단일 반송파 알고리즘은 종래의 알고리즘과의 데이터 전송율은 동일하지만, 데이터 펄스의 수신 폭이 짧아지므로 송수신에 사용하는 채널의 주파수 대역폭은 그에 비례하여 커진다고 볼 수 있지만, 송신기 입장에서는 여러 대의 단말기와 송수신하기 위한 최소 펄스 폭을 사용하는 것이며, 또한 그에 대응하기 위한 수신기의 입장에서 동일한 펄스폭을

사용하는 것이므로 그에 따른 적절한 주파수 대역폭을 사용한다고 볼 수 있으므로 사용하는 주파수 대역폭도 시스템의 입장에서 동일하다고 가정할 수 있다. 따라서 종래의 반복 전송 알고리즘들이 동일한 데이터 전송율을 주장하기 위하여 반복 하는 것 만큼 변조 수준을 높여서 비교하는 것이 본 논문에서는 필요치 않게 된다.

Fig. 3(a)에서는 종래의 방식과 비교하여 BER=10⁻⁵에서 34 dB의 이득이 있으며, (b)에서는 종래의 방식과 비교하여 BER=10⁻⁵에서 33 dB의 이득이 있으며, 마지막으로 (c)에서는 종래의 방식과 비교하여 BER=10⁻⁵에서 31 dB의 이득이 있다.

5. 결론

다수의 단말기들과 통신하고 있는 기지국의 경우에 기지국에서 단말기들에게로 송신되는 신호의 구성을 변경하여 수신기에서 반복 전송 결합 이득을 얻고자 한다. 각 수신기는 주파수 영역에서 신호를 처리하며, 송신기에서 전송하는 영 삼입된 시간영역 신호는 주파수 영역에서 반복 수신 받는 것으로 되어 수신기에서 최대 율 결합 이득을 얻음으로 단말기 수신시 송수신 전력 효율이 증가함을 모의 실험을 통하여 제시하였다.

References

- [1] Jin S., "Numerical Analysis of Power Save Multi-poll Operation in IEEE 802.11 WLANs," Journal of KIISR, Vol. 22, No. 3, pp. 13-18, June. 2017.
- [2] Jin S., "A Simulation Study on the Performance of the RAW in IEEE 802.11ah WLANs," Journal of KIISR, Vol. 20, No. 2, pp. 39-44, Apr. 2015.
- [3] Huh N.C. and Kim S., "Incremental Channel Scan Scheme based on Neighbor Channel Information in IEEE 802.11 Wireless LANs," Journal of KIISR, Vol. 20,

- No. 5, pp. 25-35, Oct. 2015.
- [4] IEEE P802.11nTM/D3.00, Part 11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- [5] Jeon, W.G. and Jung, H.K., "Hybrid SC/MRRC Technique for OFDM Systems," IEICE Trans. Commun. Vol. E89-B, No. 3, pp. 1003-1006, March, 2006.
- [6] Jung, H.K., "Low Power Transmission Technique for Single-Carrier Modulation with Frequency Domain Equalization," Trans. of KIEEP, will be published, Vol. 66P, No. 4, 2017.
- [7] S. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications," IEEE J. Select. Areas Commun., Vol. 16, No. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [8] N. Al-Dhahir, "Single-Carrier Frequency-Domain Equalization for Space-Time Block-Coded Transmissions Over Frequency-Selective Fading Channels," IEEE Commun. Letters, Vol. 5, No. 7, pp. 304-306, July. 2001.
- [9] Jung, H.K., "Alternate Time-Switched Space-Time Block Coding Technique for OFDM Systems," IEICE Trans. Commun. Vol. E95-B, No. 9, pp. 1038-3041, Sept, 2012.
- [10] Jung, H.K., "Alternate Time-Switched Space-Frequency Block Coding Technique for OFDM Systems," Journal of Electromagnetic Engineering and Science. Vol. 12, No. 4, pp. 287-289, Dec, 2012.
- [11] Jung, H.K., "Alternate Time-Switched Multiplexed Space-Frequency Block Coding technique for Single-Carrier System," Trans. of KIEEP, Vol. 65P, No. 4, pp. 316-320, Dec. 2016.



정혁구 (Jung Hyeok Koo)

- 정회원
- 연세대학교 공과대학 전기공학과 공학학사
- 연세대학교 일반대학원 전기공학과 공학석사
- 중앙대학교 전자공학과 공학박사
- 한밭대학교 정보기술대학 정보통신공학과 교수
- 관심분야 : 무선통신 모뎀, OFDM 시스템