
MIMO 기법을 적용한 HDR-WPAN 시스템의 성능분석

한덕수* · 강철규** · 오창현** · 조성준*

Performance Analysis of HDR-WPAN System with MIMO Techniques

Deog-Su Han* · Chul-Gyu Kang** · Chang-Heon Oh** · Sung-Joon Cho*

요 약

본 논문에서는 최근 홈 네트워크 기술로 관심을 받고 있는 IEEE 802.15.3 HDR-WPAN (High Data Rate-Wireless Personal Area Network) 시스템의 성능 및 용량 향상 방안으로 MIMO 기법을 적용하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다. 특히, MIMO 기법 중 독립적인 각각의 부채널들에 서로 다른 데이터를 전송하여 전송률을 높이는 V-BLAST 기법을 적용하였다. HDR-WPAN 시스템의 TCM-64QAM 모드에서 V-BLAST 기법을 적용한 경우 최소 2개의 송수신 안테나를 사용하는 것으로도 대역폭 확장 없이 110Mbps 이상의 전송속도를 얻을 수 있었으며, 레일리 페이딩 채널에서 송신 안테나 2개, 수신 안테나 2개를 사용할 경우 약 $E_b/N_0 = 35\text{dB}$ (MMSE 알고리즘)에서 10⁻⁴의 BER 성능을 얻을 수 있었다. V-BLAST 기법을 적용한 HDR-WPAN 시스템은 수신단에서 복조 순서(ordering)를 결정하는 과정이 다소 복잡하지만 추가적인 대역폭 확장 없이 데이터 스트림을 다수의 안테나로 전송하여 전송 용량 및 성능을 높일 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we proposed reliability and capacity enhancement methods for IEEE 802.15.3 HDR-WPAN (High Data Rate-Wireless Personal Area Network) system which is currently getting an interest in home network technology adopting a MIMO technique. We also analyzed performance of the proposed system through a computer simulation. The HDR-WPAN system using V-BLAST algorithm, transmitting the different signal vector to each other's sub-channel, can get the transmission speed of more than 110Mbps using two Tx/Rx antenna without bandwidth expansion in TCM-64QAM mode. Also the proposed system has reliability of 10⁻⁴ at $E_b/N_0=35\text{dB}$ under the Rayleigh fading channel in case of two Tx/Rx antenna with MMSE algorithm. The HDR-WPAN system adopting V-BLAST method has its drawback which is very complicated to determine the decision-ordering at the receiver. But, the proposed system enhances the transmission capacity and reliability without extra bandwidth expansion by sending data streams to multiple antennas.

키워드

HDR-WPAN, MIMO, V-BLAST, Capacity enhancement

I. 서 론

가정 내에서 HDTV 등의 멀티미디어 통신에 대한 수요

가 증가함에 따라 이를 수용할 수 있는 초고속 무선 시스템에 대한 요구가 증가하고 있다. 특히, 디지털화가 진전된 현 시점에서는 가정 내 약 100Mbps 이상의 고속 대용

* 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부

접수일자 : 2006. 3. 10

** 한국기술교육대학교 정보기술공학부

량 전송이 요구된다. 고속 대용량의 정보를 전송하기 위해서는 더 많은 주파수 대역이 필요하지만 가용 주파수 대역에 제약이 존재하므로 제한된 주파수 대역 내에서 시스템의 전송 용량을 극대화 하는 방법이 필요하게 되었다. 이러한 요구로 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 시스템이 제안되었다[1].

MIMO 시스템에서 주로 고려되는 기법은 크게 두 가지로 분류된다. 그 첫 번째는 STC (Space-Time Coding) 기법으로 대표되는 MIMO 다이버시티 기법이다. 이는 다중 송수신 안테나를 이용, 시공간 다이버시티 이득을 통하여 수신단의 신호 대 잡음비를 개선하는 것이다. 두 번째는 MIMO 멀티플렉싱 (multiplexing) 기법으로서 BLAST (Bell-lab layered space time)를 들 수 있다. 이는 각 송신 안테나에 다른 데이터를 전송하는 방식으로 전송률의 이득을 얻는데 중점을 둔 기법이다[2, 3].

홈 네트워크의 백본망으로 사용되는 HDR-WPAN 시스템은 다른 클러스터(가전 기기들 간의 네트워크 구성망)간, 다른 네트워크 망 간에 고속의 데이터를 주고받아야 한다. 그러므로 본 논문에서는 HDR-WPAN 시스템의 전송 속도를 높이는 방안으로 MIMO 멀티플렉싱 기법 중 V-BLAST (Vertical-BLAST) 기법을 적용하고 이에 대한 용량 및 성능 개선을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석한다.

본 논문의 구성은 I장 서론에 이어 II장에서 HDR-WPAN 시스템을 설명하고 III장에서는 MIMO 시스템의 채널 용량과 공간 멀티플렉싱 기법인 V-BLAST에 대해서 설명한다. 그리고 IV장에서는 제안한 시스템을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석하고 V장에서 결론을 맺는다.

II. HDR-WPAN 시스템

HDR-WPAN 시스템은 IEEE 802.15.3 tasking 그룹에서 표준으로 제정한 기술로 10m의 거리에서 데이터 전송을 요구하는 무선기기들 간의 네트워킹 기술이다. HDR-WPAN 시스템은 표 1과 같이 5개의 변조방식으로 11, 22, 33, 44, 55Mbps의 전송속도를 지원한다[4].

표 1. HDR-WPAN 시스템의 변조방식, 코딩, 데이터 레이트

Table 1. Modulation type, coding, and data-rate of HDR-WPAN system.

Modulation type	Coding	Data Rate
QPSK	8-state TCM	11 Mbps
DQPSK	none	22 Mbps
16-QAM	8-state TCM	33 Mbps
32-QAM	8-state TCM	44 Mbps
64-QAM	8-state TCM	55 Mbps

HDR-WPAN 시스템의 PHY 프레임은 4가지 세그먼트(프리앰블, 헤더, 데이터, 테일 심벌)를 포함한다. 프리앰블은 수신기에서 동기화, carrier-offset 복구, 그리고 신호 등화 용도로 사용되고, 프리앰블의 마지막 심벌은 differential-QPSK 변조 시 기준신호가 된다. 헤더에는 스크램블러를 초기화하기 위한 seed id, PHY의 변조방식, 프레임 페이로드의 길이가 포함되며, 헤더는 CCITT CRC-16 HCS (Header Check Sequence)로 보호된다. 테일 심벌은 프레임의 끝에 위치하며, 트렐리스 코드가 가장 좋은 거리특성을 갖도록 해준다. 페이로드는 최소 64 octets, 최대 2048 octets을 지원하며 보안을 목적으로 하는 4 octets을 제외하면 최대 2044 octets까지 사용가능하다.

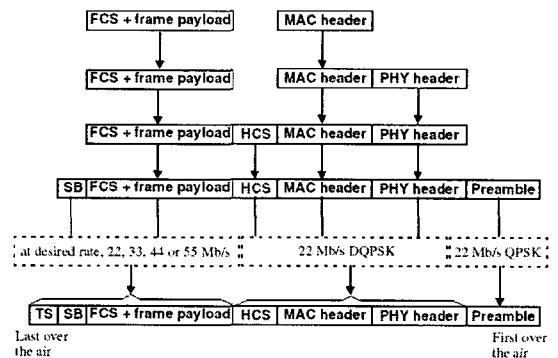


그림 1. 22, 33, 44, 55Mbps 전송을 위한 프레임 포맷
Fig. 1. Frame format for 22, 33, 44, 55Mbps transmission.

그림 1은 22, 33, 44, 55Mbps의 전송속도를 위한 PHY 프레임 포맷을 나타낸다. 11Mbps의 경우는 그림 2에서와 같이 PHY 헤더, MAC 헤더, HCS를 TCM-QPSK로 한번 더 변조한다.

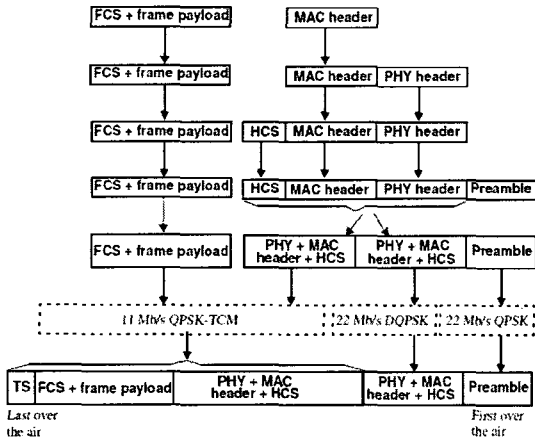


그림 2. 11Mbps 전송을 위한 프레임 포맷
Fig. 2. Frame format for 11Mbps transmission.

III. MIMO 시스템

다중 안테나 (MIMO) 시스템은 다수의 송수신 안테나를 사용하여 주파수의 효율성과 전송 품질을 향상시키는 광대역 무선 전송기술로 송신 다이버시티 방식과 공간 멀티플렉싱 방식으로 구분된다[3]. 송신 다이버시티 방식은 다이버시티 차수를 높여 전송 품질을 향상시킬 수 있지만, 기본적으로 전송률이 1symbol/set/Hz로 제한된다. 반면, 공간 멀티플렉싱을 위한 다중 안테나 시스템은 송신 다이버시티를 이용하는 시스템에 비해 상대적으로 다이버시티 차수는 낮지만 안테나 개수에 비례하여 전송 용량을 높일 수 있다.

본 장에서는 다중 안테나 시스템의 채널 용량, 공간 멀티플렉싱 방식의 대표적인 방식인 V-BLAST 그리고 복조 방식에 대해서 설명한다.

3.1 MIMO 시스템의 채널 용량

그림 3은 N_T 개의 송신 안테나와 N_R 개의 수신 안테나를 사용하는 다중 안테나 시스템의 구조를 나타낸다[5].

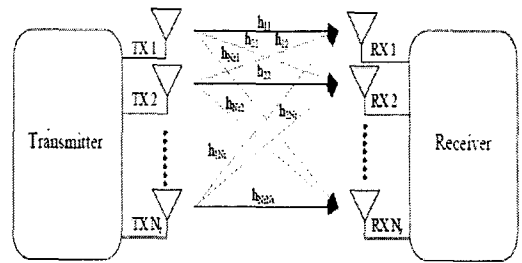


그림 3. 다중 안테나 시스템의 구조
Fig. 3. Configuration of multiple antennas system.

송수신 안테나 사이의 채널 H 가 $M_R \times M_T$ 형태를 가질 때, 각 수신 안테나의 수신 신호는 다음과 같이 표현 된다.

$$r = Hs + n. \tag{1}$$

여기서, $r = [r_0, r_1, \dots, r_{M_R-1}]^T$ 는 $M_R \times 1$ 수신신호 벡터이고, $s = [s_0, s_1, \dots, s_{M_T-1}]^T$ 는 $M_T \times 1$ 송신신호 벡터, $n = [n_0, n_1, \dots, n_{M_R-1}]^T$ 는 $M_R \times 1$ 잡음 벡터이다. 송신단에서는 채널 정보를 알 수 없으므로 각 송신 안테나는 모두 동일한 전력으로 신호를 송신하는 것이 최적이다. 각 송신 안테나 전송 신호가 동일한 평균 전력을 갖고 상호 독립일 경우 다중 안테나 시스템의 채널 용량은 식 (2)와 같이 표현된다[2].

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_{M_R} + \frac{\rho}{M_T} HH^H \right) \right] \text{bps/Hz}. \tag{2}$$

여기서, 식 (2)은 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$C = \sum_{i=1}^{\min(N_T, M)} \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N} \lambda_i \right) \text{bps/Hz}. \tag{3}$$

식 (3)의 채널 용량은 서로 독립적인 레일리 페이딩 채널일 경우 안테나 수에 비례하여 선형적으로 증가한다.

그림 4는 $M_R = M_T$ 인 경우 평균 채널 용량의 변화를 나타낸다. 동일한 신호 대 잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio) 값에서 채널 용량이 안테나 수에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

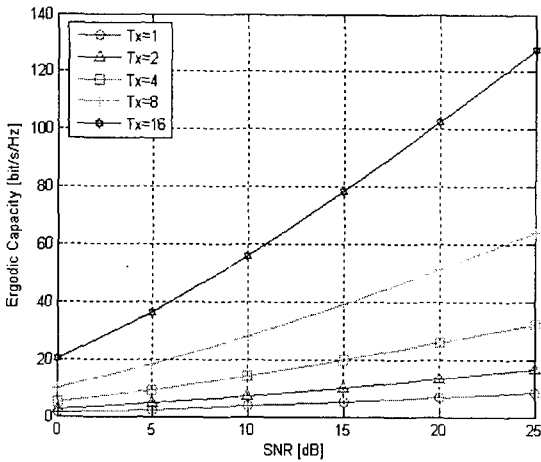


그림 4. 다중 안테나 시스템의 채널 용량
Fig. 4. Channel capacity of multiple antennas system.

3.2 V-BLAST 시스템

MIMO 채널 환경에서의 멀티플렉싱 기법은 여러 개의 송신 안테나를 사용하여 전송률을 향상시킨다. 따라서 단일 송신 안테나를 적용하는 경우와 비교할 때, 같은 전송률을 얻기 위하여 낮은 차수의 변조기법을 사용할 수 있다는 장점을 가진다. 반면, 송신 단의 안테나 수가 증가할수록 수신 단 역시 안테나 수가 증가되어야 한다는 단점이 있다[5, 6].

공간 멀티플렉싱 기법에 속하는 BLAST는 D-BLAST (diagonal BLAST)와 V-BLAST(vertical BLAST)의 두 기법으로 분류된다. 먼저 제안된 구조는 D-BLAST이다. 이 방식은 각 송신 안테나를 통해 전송되는 신호들을 매 심벌 구간마다 시간, 공간상에서 대각 방향으로 편이시켜 반복적으로 송신함으로써 모든 송신 신호들이 높은 다이버시티를 얻도록 구현한 방식이다. 그러나 실제 구현이 어렵고 복잡도가 큰 단점이 있다. 이를 보다 단순화하기 위한 방안으로 각 부 채널을 수직적으로 구분하여 복원하는 V-BLAST가 제안되었다. V-BLAST 방식 역시 수신단의 안테나 개수가 송신단의 안테나 개수 이상일 경우에 동작한다는 전제 조건을 가지고 있다. 그림 5는 V-BLAST 시스템의 송신단 구조를 나타낸다.

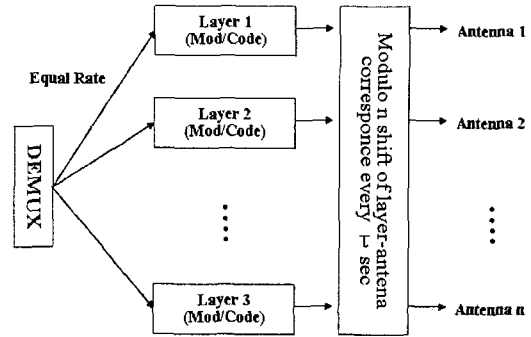


그림 5. V-BLAST의 송신 단 구조
Fig. 5. Transmitter configuration of V-BLAST.

V-BLAST 시스템은 순차 입력되는 전송 데이터를 송신 안테나 개수만큼 병렬화 시켜 변조 및 코딩을 수행한다. 따라서 데이터가 입력됨에 따라 송신 안테나 개수만큼의 비트 열, 즉 레이어가 형성된다. 다중 안테나로 수신된 레이어 신호들은 서로에게 간섭으로 작용하여 시스템의 성능열화를 유발한다. 따라서 수신 단은 nulling과 cancelling을 수행하여 다른 레이어에 전송된 심벌에 의한 간섭을 제거한다. Nulling 과정은 일반적으로 MMSE (Minimum Mean Squared Error) 또는 ZF (Zero Forcing) 기법의 두 가지 방식이 사용된다[7].

(1) Zero Forcing 알고리즘

ZF 수신기는 다중 안테나 시스템에서 공간 멀티플렉싱을 구현하는 가장 간단한 형태의 선형 수신기 (linear receiver) 이다. ZF 수신기는 수신 안테나의 개수가 송신 안테나의 개수와 같거나 많은 조건에서 동작한다. 송신단에서 N개의 안테나를 사용하고 수신단에서 M개의 안테나를 사용하는 통신시스템을 가정하면, 송신단에서는 N개의 서로 다른 신호를 각각의 송신 안테나를 통해 전송하게 되고 수신단에서는 M개의 수신 안테나를 통해 채널을 통과한 전송신호들이 서로 중첩된 형태로 수신된다. 이 때, i번째 송신 안테나로부터 전송된 신호를 복원하고자 할 경우 수신기는 M개의 수신 신호들의 선형 조합으로 나머지 N-1개의 송신 안테나로부터 전송된 신호들을 제거하게 된다. ZF 수신기를 사용하는 경우 수신기의 동작을 수식으로 정리해보면 다음과 같이 표현할 수 있다 [7].

초기화 과정:

$$G_i = H^+$$

$$i = 1$$

반복과정:

$$k_j = \arg \min_j \|(G_i)_j\|^2$$

$$w_{k_i} = (G_i)_{k_i}$$

$$y_{k_i} = w_{k_i}^T r_i$$

$$\hat{a}_{k_i} = Q(y_{k_i})$$

$$r_{i+1} = r_i - \hat{a}_{k_i} (H)_{k_i}$$

$$G_{i+1} = H_{k_i}^+$$

$$i = i + 1$$

(2) MMSE 알고리즘

MMSE 수신기는 ZF 수신기와 더불어 MIMO 시스템에서 멀티플렉싱을 구현하는 간단한 형태의 수신기 구조 중의 하나이다. 수신 신호에 복호 행렬을 곱하여 송신 신호를 복원하는 방식은 ZF 수신기와 유사하다. 그러나 ZF 수신기가 수신 신호로부터 n번째 송신 안테나로부터의 신호를 추정하는데 있어, M개의 수신 신호를 적절히 조합하여 다른 송신 안테나로부터의 간섭신호를 완전히 제거하여 원하는 신호를 얻어내는 반면, MMSE 수신기는 수신단에서 더해지는 백색 가우시안 잡음의 분산 값을 고려하여 추정하는 신호의 평균제곱오차가 최소가 되도록 수신 신호들을 조합하는 특징을 갖는다[7].

MMSE 수신기를 이용하는 경우 수신기의 동작을 수식으로 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

초기화 과정:

$$G_i = H^+$$

$$i = 1, \quad r_i = r$$

$$G_i = (H^H H + \sigma^2 I_{M_T})^{-1} H^H$$

$$k_i = \arg \min_j \|(G_i)_j\|^2$$

반복과정:

$$w_{k_i} = (G_i)_{k_i}$$

$$y_{k_i} = w_{k_i}^T r_i$$

$$\hat{a}_{k_i} = Q(y_{k_i})$$

$$r_{i+1} = r_i - \hat{a}_{k_i} (H)_{k_i}$$

$$G_{i+1} = (H_i^H H_i + \sigma^2 I_{M_T})^{-1} H_i^H$$

$$k_{i+1} = \arg \min_{j \in \{k_1, \dots, k_i\}} \|(G_{i+1})_j\|^2$$

$$i = i + 1$$

IV. 성능 분석

본 장에서는 110Mbps 이상의 데이터 전송속도를 얻기 위해 HDR-WPAN 시스템에 MIMO (V-BLAST) 기법을 적용한 경우에 대해 성능을 분석한다. 디코딩 알고리즘으로는 ZF과 MMSE를 사용하였고 송수신 안테나 간의 각 채널은 레일리 페이딩 환경을 가정하였으며, 시스템 동기화 채널 추정은 완벽하다고 가정하였다.

표 2. 시뮬레이션 파라메타
Table 2. Simulation parameters.

Parameter	Value
Modulation (data rate)	TCM-16QAM(33Mbps) TCM-32QAM(44Mbps) TCM-64QAM(55 Mbps)
Channel encoder	8-state convolutional code
#of Antenna	2Tx-2Rx, 3Tx-3Rx, 4Tx-4Rx
Decoder Algorithm	Viterbi, ZF, MMSE
Frame length	125octets, 1000packets

공간 멀티플렉싱 방식인 V-BLAST 기법은 MIMO 환경에 의해 제공되는 독립적인 부채널들에서 서로 다른 데이터를 전송하여 전송속도를 높인다. 다중 안테나를 통해 동시에 전송할 수 있는 서로 다른 신호의 개수는 사용하는 송수신 안테나의 최소값과 같다. 그러므로 HDR-WPAN 시스템의 각 전송률 당 송수신 안테나의 개수를 4, 3, 2개로 증가시키면 HDR-WPAN 시스템의 데이터 전송속도를(33Mbps, 44Mbps, 55Mbps) 110Mbps 이상(즉, 132Mbps, 132Mbps, 110Mbps)으로 할 수 있다.

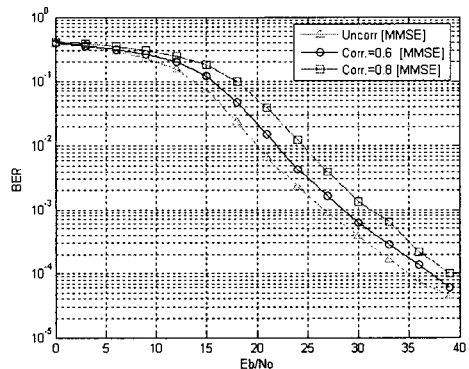


그림 6. 채널상관 값에 따른 V-BLAST 적용 TCM-64QAM 시스템의 BER 성능 (2Tx-2Rx 경우)
Fig. 6. BER performance of TCM-64QAM system with V-BLAST algorithm according to the channel correlation value (2Tx-2Rx case).

그림 6은 상관된 채널에 따른 V-BLAST 적용 시스템의 BER 성능이다. MIMO 시스템의 채널 용량은 채널 매트릭의 각 서브 채널들 간 상관값에 의존하며, 각 서브 채널이 서로 독립일 때 최대의 성능을 가짐을 보인다. 110Mbps 전송률 환경(2개의 송수신 안테나, TCM-64QAM 변조, MMSE 알고리즘)에서 각 서브 채널간의 상관값이 0.6일 경우 완전 독립 채널보다 약 2.5dB(BER=10⁻⁴ 기준)의 성능 열화를 갖고, 채널 상관값이 0.8일 경우 약 4dB(BER=10⁻⁴ 기준)의 성능 열화를 갖는다.

그림 7은 TCM-16QAM 변조 방식과 송신 안테나의 수 4, 수신 안테나의 수를 4, 6개로 하여 전송률 132Mbps를 가질 경우의 BER 성능이다. 10⁻⁴의 BER에서 수신 안테나 4, ZF를 사용하였을 경우 TCM-16QAM보다 약 5dB의 성능 열화를, MMSE를 사용하였을 경우 약 1.5dB의 성능 향상을 보였다. 수신 안테나 6, ZF를 사용하였을 경우 기존의 시스템보다 약 18dB의 성능 개선을, MMSE를 사용하였을 경우 약 19dB의 성능 개선을 보였다. 또한 수신 안테나의 수가 증가함에 따라 ZF를 사용할 경우 약 20dB의 성능이 개선되었고, MMSE를 사용할 경우 약 15dB의 성능 개선을 보였다.

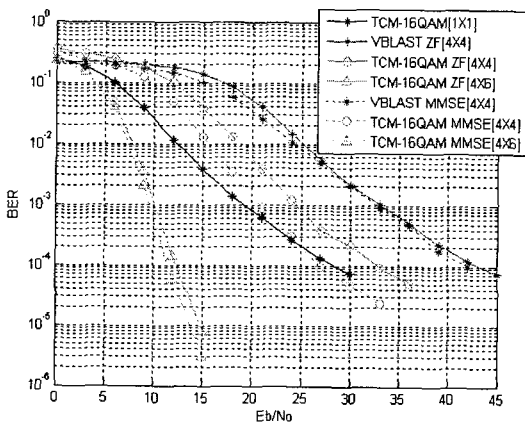


그림 7. TCM-16QAM 시스템의 BER 성능 (132Mbps, 4Tx 경우)
Fig. 7. BER performance of TCM-16QAM system (132Mbps, 4Tx case).

그림 8은 TCM-32QAM 변조 방식과 송신 안테나의 수를 3개로 하여 데이터 전송률 132Mbps를 가질 때의 BER 성능이다. ZF 복조 알고리즘을 사용할 경우 10⁻⁴의 BER

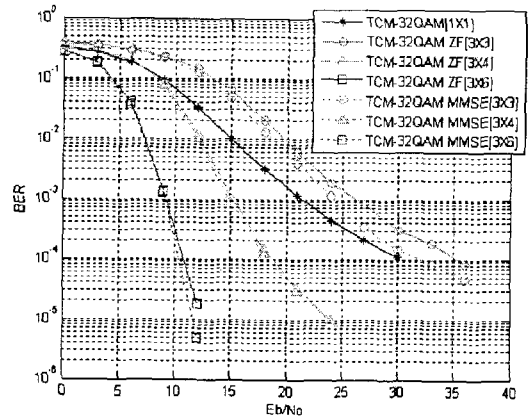


그림 8. TCM-32QAM 시스템의 BER 성능 (132Mbps, 3Tx 경우)
Fig. 8. BER performance of TCM-32QAM system (132Mbps, 3Tx case).

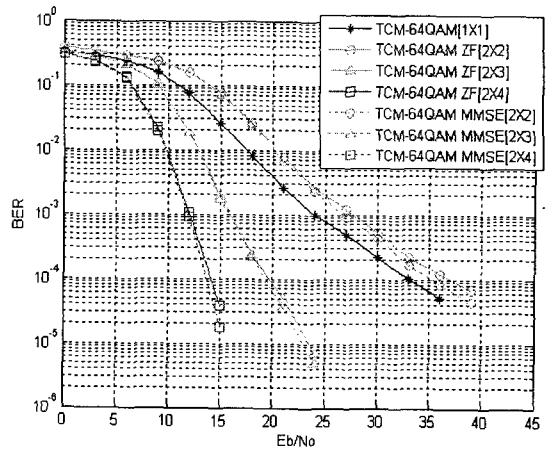


그림 9. TCM-64QAM 시스템의 BER 성능 (110Mbps, 2Tx 경우)
Fig. 9. BER performance of TCM-64QAM system (110Mbps, 2Tx case).

에서 3개의 수신 안테나는 약 6dB의 성능 열화를 가져오고, 4개의 수신 안테나를 사용할 경우는 약 12dB의 성능 개선을, 6개의 수신 안테나를 사용할 경우는 약 18dB 성능 개선을 보였다. 복호 알고리즘으로 MMSE를 사용하고 수신 안테나의 수를 3개로 할 경우는 약 3dB의 성능 열화를, 4개의 수신 안테나는 약 12.5dB의 성능 개선을, 6개의 수신 안테나는 약 19dB의 성능 개선을 보였다.

그림 9는 TCM-64QAM 모드에서 송신 안테나 수를 2

개로 하여 데이터 전송률을 110Mbps로 향상시켰을 때의 BER 성능이다. 수신 안테나의 수를 2, 3, 4개로 하고 ZF 복조 알고리즘을 사용할 경우 10^{-4} 의 BER에서 2개의 수신 안테나는 약 3dB의 성능 열화를 가져오고, 3개의 수신 안테나를 사용할 경우 약 13dB의 성능 개선을, 4개의 수신 안테나를 사용할 경우는 약 18dB 성능 개선을 보였다. 복조 알고리즘으로 MMSE를 사용하고 수신 안테나의 수를 2개로 할 경우는 약 2dB의 성능 열화를, 3개의 수신 안테나는 약 13.5dB의 성능 개선을, 4개의 수신 안테나는 약 19dB의 성능 개선을 보였다.

V. 결 론

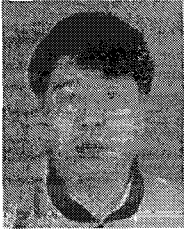
본 논문에서는 HDR-WPAN 시스템의 성능 및 용량 향상 방안으로 MIMO 기법을 적용하고 이에 대한 성능을 분석하였다. 특히, MIMO 기법 중 독립적인 각각의 부채널들에 서로 다른 데이터를 전송하여 전송률을 높이는 V-BLAST 기법을 사용하였다:

MIMO 시스템의 채널 용량은 서로 독립적인 페이딩 채널에서 최대의 성능을 가지며, 안테나 수에 비례하여 증가한다. 또한 서브 채널 간 상관성을 가질수록 성능이 열화된다. 대역폭 확장 없이 송수신 안테나의 수를 증가시키는 V-BLAST 기법을 적용한 경우 최소 2개의 송수신 안테나를 사용(TCM-64QAM 경우)함으로써 110Mbps 이상의 전송이 가능하였고 송신 안테나 2개, 수신 안테나 4개를 사용한 경우 최대 19dB (BER=10⁻⁴, MMSE 알고리즘) 성능이 향상됨을 확인하였다. 본 논문의 결과로부터 V-BLAST 기법을 HDR-WPAN 시스템에 적용할 경우 홈네트워크의 백본 망으로 제한된 통신 자원을 최대한 활용하여 고속 대용량의 데이터를 전송할 수 있다.

참고문헌

- [1] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Bell Labs Tech. Journal*, vol. 1, pp. 41-59, August 1996.
- [2] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Kluwer, Wireless Personal Communications*, pp. 311-335, 1998.
- [3] 최수기, 박승영, 강충구, "다차원 회전 변조기반의 공간 다중화 MIMO 시스템," *Telecommunications REWIEW*, vol. 14, no. 3, pp. 436-448, June 2004.
- [4] IEEE Std 802.15.3, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2003.
- [5] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," in *Proc. URSI Int. Symp. Signals, Systems, and Electronics*, Pisa, Italy, pp. 295-300, Sept. 1998.
- [6] Golden, G. D., et al., "Detection algorithm and initial laboratory results using the V-BLAST space-time communication," *Electronic Letters*, vol. 35, no. 1, pp. 14-16, 1999.
- [7] Bolcskei, H., and A. Paulraj, *Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Wireless Systems*. Comm. Handbook, CRC Press, 2003.

저자소개



한 덕 수 (Deog-Su Han)

1987년 2월 한국항공대학교 항공통신공학과 (공학사)
1989년 2월 한국항공대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)

2003년 3월~현재 한국항공대학교 대학원 정보통신공학과 박사과정 재학중

1988년 11월~1993년 12월 (주)동양정밀공업 주임연구원

1994년 1월~현재 삼성전자(주) 수석연구원

※관심분야: 이동통신, CDMA



강 철 규 (Chul-Gyu Kang)

2004년 2월 한국기술교육대학교 정보통신공학과 (공학사)
2006년 2월 한국기술교육대학교 대학원 전기전자공학과 (공학석사)

※관심분야: 홈네트워크, 멀티미디어 무선통신



오 창 현 (Chang-Heon Oh)

1988년 2월 한국항공대학교 항공통신공학과 (공학사)

1990년 2월 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 (공학석사)

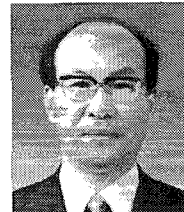
1996년 2월 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과 (공학박사)

1990년~1993년 한진전자(주) 기술연구소 근무

1993년~1999년 삼성전자(주) CDMA 개발팀 근무

1999년~현재: 한국기술교육대학교 정보기술공학부 교수

※관심분야 : 이동통신, 멀티미디어 무선통신, SDR, RFID/USN, CR



조 성 준 (Sung-Joon Cho)

1969년 2월 한국항공대학교 항공통신공학과(공학사)

1975년 2월 한양대학교 대학원(공학석사)

1981년 3월 오사카대학 대학원(공학박사)

1972년 8월~현재 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수

※관심분야: 이동통신, 무선통신, 환경전자공학, 이동무선인터넷