

최소거리탐지 알고리즘(MDSA)을 이용한 ML 탐지 MIMO 시스템 연구

정회원 권 오 주*

Low Complexity MIMO System Using Minimum Distance Searching Algorithm (MDSA) with Linear Receiver

Oh-ju Kwon* *Regular Member*

요 약

본 논문은 공간다중화 MIMO 시스템인 ML 수신기법의 연산량을 감소시키는 최소거리탐지 알고리즘 (MDSA: Minimum Distance Searching Algorithm)을 제안한다. 선형수신기의 출력값을 기준비트로 설정하여 탐색공간을 줄이고 기준비트와 수신심벌과의 최소거리를 이용하여 최종송신심벌로의 최적경로를 구함으로써 ML의 연산량을 효율적으로 감소시킨다. 제안한 기법의 연산 반복수는 송신안테나 4개, 성상차수 16일 때, ML 방식에 비해 0.21%로 감소되었다. 성능분석 시뮬레이션 결과는 16QAM에서 송신 안테나 2개, 수신안테나 3개 이상일 때 MDS는 ML과 성능이 거의 동일하였고, QPSK에서 송신 안테나 4개, 수신안테나 6개 이상일 때 MDS의 성능은 ML에 비해 약간 열화됨을 확인 할 수 있었다.

Key Words : MIMO, MDSA, ZF, ML, Complexity

ABSTRACT

This paper proposes Minimum Distance Searching Algorithm (MDSA) which reduces the computational complexity (CC) of the ML, the kind of Spatial Multiplexing (SM) MIMO system. The MDSA searches candidate symbols with a starting symbol, which is called reference bits. We used the linear receiver of MIMO techniques to find a starting symbol. The MDSA searches the shortest path to a transmitted symbol using reference bits and Minimum Distance(MD) concept. The CC of MDSA is reduced to the 0.21% to the ML as the transmit antennas is 4 in 16QAM. The simulation result shows the BER of MDSA is nearly same to the BER of ML as the transmit antennas is 2 and the receive antennas is 3 in 16QAM and slightly degraded to the BER of ML as the transmit antennas is 4 and the receive antennas is 6 in QPSK.

I. 서론

송수신단에 다중 안테나를 사용하는 다중입출력 (MIMO: Multiple Input Multiple Output) 시스템은 다중페이딩 무선통신 환경에서 단일입출력 (SISO: Single Input Single Output) 시스템보다 데이터 전송

율 및 채널용량을 증가시킨다. MIMO는 공간다이버시티를 최대로 증기한 전력효율 방식과 주파수를 효율적으로 사용하는 공간다중화 (SM: Spatial Multiplexing) 방식으로 구분되며, 공간다중화 방식은 고속데이터 전송이 요구되는 고속하향패킷전송 (HSDPA), WLAN의 표준인 IEEE 802.11에 적용되었으며^[1,2], 저전력 소

* 국방과학연구소 (koj@add.re.kr)

논문번호: KICS2006-02-076, 접수일자: 2007년 2월 20일, 최종논문접수일자: 2007년 3월 26일

모가 요구되는 센서 네트워크의 송수신기술로 연구가 활발히 진행되고 있다^{3,4)}.

공간다중화 방식은 서로 다른 송신 안테나에서 서로 다른 데이터를 전송하는 방식으로 수신기법으로는 Zero Forcing (ZF), Minimum Mean Square Error (MMSE)과 같은 선형수신기법 및 ML (Maximum Likelihood) 기법과 가장 대표적인 BLAST 기법으로 구분된다. 공간다중화 방식에서 성능이 가장 우수한 ML은 가능한 모든 심벌들의 조합들을 탐색하여 수신심벌과 가장 거리가 가까운 심벌을 선택하는 MIMO 수신기법이다. ML 기법은 송신안테나 개수 n_T 와 성상차수 M 이 증가함에 따라 탐색해야하는 심벌들의 조합수가 기하급수적으로 증가하여 시스템 구현을 어렵게 한다. ML의 연산량을 감소시키기 위해 결정피드백 기법을 이용하는 Vertical Bell Labs Layered Space Time (V-BLAST)기법이 루스트레크날러지에 의해 제안되었다⁵⁾. V-BLAST는 수신 데이터들을 수신안테나별로 분리하기위해 연속적인 널링과 삭제 (cancellation)기법을 사용하는 결정피드백기법을 적용한 방식이다. V-BLAST는 널링과 삭제과정에서 발생하는 에러 전파로 인해 성능이 저하되는 단점이 있다. 심벌들의 탐색공간을 래티스 (Lattice)를 중심으로 한정하여 연산량을 감소시키고 성능을 ML과 유사하게 설계된 Sphere Decoding (SD)기법이 제안되었다. SD는 ML과 성능이 유사한 반면, SNR이 낮은 영역에서 탐색해야하는 심벌개수가 증가하여 연산량이 증가하는 단점이 있다⁶⁾. SD의 연산량을 감소시키기 위해 16QAM MIMO 시스템을 QPSK 변조방식의 2단 SD 방식으로 분리한 다단 (multistage) SD 방식이 제안되었다. 다단 SD 방식은 연산량은 감소시킬 수 있으나 높은 SNR에서 성능이 열화되는 단점이 있다⁸⁾.

따라서, 본 논문은 ML과 유사한 성능을 달성하고, SNR값과 무관하게 연산량이 낮은 ML기법의 MIMO 탐지기법인 최소거리탐지 알고리즘 (MDSA: Minimum Distance Searching Algorithm)을 제안한다. 연산량을 감소시키기 위해 일차적으로 기존의 선형 수신기법인 ZF 혹은 MMSE를 사용하여 생성한 기준심벌을 MDS의 입력으로 사용한다. ML은 기준심벌을 설정하지 않고 모든심벌들을 탐색하므로 연산량이 성상차수와 안테나개수에 따라 기하급수적으로 증가하나, 기준심벌을 시작점으로 주위 심벌들을 탐색하면 연산량을 일차적으로 감소시킬 수 있다. 선형수신기법을 이용하여 구한 기준심벌을 기준

으로 최적송신심벌을 탐색한다. 기준심벌에서 해밍거리차가 적은 주위심벌들 중에서 최적송신심벌이 있을 가능성이 높다는 것이 본 논문의 기본가정이다. 본 논문은 기준심벌과 주위심벌사이의 거리차를 이용하여 주위심벌들 중에서 최소거리차 (MD: Minimum Distance)의 심벌을 새로운 기준심벌로 설정한다. MDS는 MD를 이용하여 기준심벌들을 구하고 기준심벌들 중에서 최소값을 갖는 심벌을 최종송신심벌로 설정한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 기존의 ML기법을 기술하고, 3장에서 제안한 MDS에 대해 설명하며, 4장에서 ML기법과 ZF-MDS 기법의 성능 및 연산량을 비교분석한 후, 5장에서 결론을 맺는다.

II. ML 기법

MIMO 시스템의 수신심벌벡터 \mathbf{y} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{d} + \mathbf{n} \quad (1)$$

여기서, \mathbf{y} 는 $N \times 1$ 벡터, \mathbf{H} 는 $N \times M$ Rayleigh fading channel matrix, \mathbf{d} 는 $M \times 1$ 송신심벌벡터, \mathbf{n} 은 $M \times 1$ 부가백색가우시안잡음 (AWGN)이다. ML의 출력은 수신신호벡터 \mathbf{y} , 채널응답 \mathbf{H} , 송신심벌벡터 \mathbf{d} 로 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{\mathbf{d}}_{ML} = \arg \min_{\mathbf{d} \in D} \left\{ \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{d}\|^2 \right\} \quad (2)$$

여기서, D 는 모든 가능한 송신심벌벡터집합이고, \mathbf{H} 는 완벽하게 예측되었다고 가정한다. D 에서 수신심벌벡터 \mathbf{y} 와 가장 유사한 심벌을 최종심벌로 선택해야 하므로 D 집합내의 심벌개수가 증가할수록 연산량도 증가해야 한다. 맵핑신호 S 는 M^n 개의 탐색심벌들로 구성되어 있으므로 수신심벌에 대한 최적의 송신심벌을 구하기 위해 M^n 번 탐색해야 한다.

III. MDS 알고리즘

ML은 수신단에서 송신심벌벡터 \mathbf{d} 를 디코딩하기 위해 많은 연산량을 필요로 한다. 본 장에서는 ML의 연산량을 감소시키는 MDS알고리즘을 제안한다. MDS는 수신신호로부터 선형수신기법을 이용하여 기준심벌을 설정하는 부분과 기준심벌로부터 송신심벌벡터집합을 탐색하는 MDS로 구성되어있다.

본 논문은 ZF 혹은 MMSE를 이용하여 D 집합중에서 ML 탐색의 시작점인 기준심벌을 구하여 MDS의 입력으로 사용한다. 기준심벌을 구할 때 ZF 혹은 MMSE를 사용함으로써 연산량을 1차적으로 감소시킬 수 있다. ZF 수신기의 출력 X_{ZF} 와 MMSE 수신기의 출력 X_{MMSE} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{ZF} &= \mathbf{H}^{-1}\mathbf{y} \\ \mathbf{x}_{MMSE} &= [\mathbf{H}^T\mathbf{H} + \mathbf{I}/\text{SNR}]^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{y} \end{aligned} \quad (3)$$

선형수신기로부터 기준심벌을 구한 후, 기준심벌의 에러분포를 기준심벌과 주위심벌사이의 거리차에러 히스토그램을 이용하여 구하였다. 에러 히스토그램은 선형수신기법의 출력심벌에 발생하는 에러빈도수를 나타낸다.

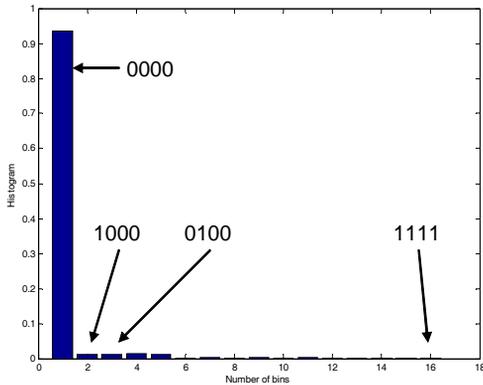


그림 1. ZF 출력의 에러 히스토그램

그림 1은 송신안테나 2개, 성상차수 4일 때의 ZF 출력 히스토그램이다. x축은 심벌집합 [0000 0001, ..., 1111]이고, y축은 심벌의 발생빈도수이다. [0000]는 ZF 출력값 중에서 에러가 발생하지 않은 심벌을 매핑한 값으로 복소신호 $[a+bj; c+dj]$ 를 의미하고 [0001]은 ZF 출력값 중에서 d 에서 에러가 발생한 것을 나타낸다. 여기서, a, b, c, d 는 심벌레벨값이다.

그림 1은 기준심벌에 에러가 발생할 경우, 거리가 가장 가까운 주위심벌 중에서 송신심벌일 가능성이 가장 높다는 것을 보여준다. 여기서 주위심벌은 a, b, c, d 중에서 임의의 값 하나만 변환 심벌들이다.

기준심벌 X_{ZF} 는 송신안테나 개수 n_T 와 성상차수 M 에 따라 결정된 $N_b = n_T \cdot \text{Log}_2 M$ 개 비트인 $\mathbf{B} = [b_0 b_1 \dots b_{N_b-1}]$ 로 매핑된다. 예를 들면 송신안테나 개수가

2개, QPSK인 경우에 ZF 출력값 $[0.6+0.1j; -0.2-0.1j]$ 은 [1100]비트로 매핑된다. ZF 출력값을 기준비트 $\mathbf{B}_0 (= [0000])$ 로 설정하여 초기화한다. \mathbf{B} 와 수신신호 \mathbf{y} 사이의 거리오차 d_0 를 다음식과 같이 구한다.

$$d_o = \|\mathbf{y} - \mathbf{H} \cdot \mathbf{Q}(\mathbf{B})\| \quad (4)$$

여기서, $\mathbf{Q}(\cdot)$ 는 \mathbf{B} 를 심벌값으로 매핑하는 매핑함수이다. 기준비트집합 \mathbf{B}_T 는 $[\mathbf{B}_0 \dots \mathbf{B}_{N_b-1}]$ 와 같이 구성되며 N_b 개수만큼 기준비트값이 변한다. 기준비트 \mathbf{B}_0 로부터 새로운 기준비트 \mathbf{B}_1 을 다음과 같이 구한다. \mathbf{B}_0 에서 해밍거리가 1인 주위 비트값 $\mathbf{B}_{0n} = [\mathbf{B}_{01} \dots \mathbf{B}_{0N_b}]$ 을 구한 후, 수신심벌벡터 \mathbf{y} 와의 거리차이 $\mathbf{d} = [d_{11} \dots d_{1N_b}]$ 을 식 (4)를 이용하여 구한다. 비트개수 N_b 가 4일 때 \mathbf{B}_0 와 \mathbf{B}_{0n} 의 관계는 그림 2와 같다.

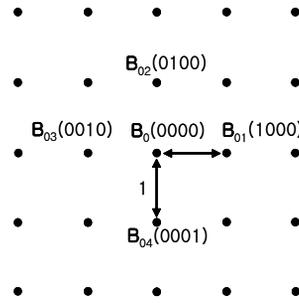


그림 2. 비트개수 $N_b=4$ 일때 기준비트와 주위비트의 거리관계

\mathbf{d} 에서 기준심벌과 MD값을 가지는 주위비트를 새로운 기준비트 \mathbf{B}_1 으로 설정한다. \mathbf{B}_1 에서 해밍거리가 1인 주위비트를 설정할 때 이전 기준심벌인 \mathbf{B}_0 는 주위비트로 설정하지 않는다. 이와 같은 탐색기법으로 기준비트집합 \mathbf{B}_T 를 구하고 \mathbf{B}_T 중에서 최소값을 가지는 \mathbf{B}_i 를 최종송신심벌로 매핑한다.

그림 3은 비트개수 N_b 가 4일때 MDS 탐색알고리즘을 트리기법으로 설명한 그림이다. 그림 3에서 실선은 탐색횟수이고, {0000, 0100, 0110, 1111}은 기준비트값을 나타낸다. 기준비트값에서 주위비트를 탐색할 때 해밍거리가 1인 주위심벌만을 탐색한다.

그림 4는 MDS 알고리즘의 전체 흐름도이다. MDS는 초기화 과정, 주위심벌탐색과정, 최종심벌디코딩 과정으로 구분된다. 초기화 과정에서는 ZF 혹은 MMSE를 이용하여 기준심벌을 구한 후 N_o, i, j

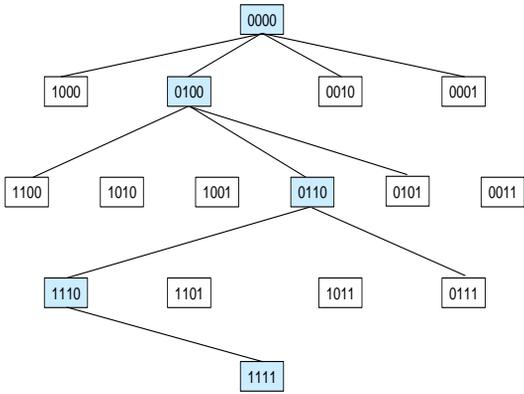


그림 3. 비트개수 $N_b=4$ 일때 MDS 트리 탐색알고리즘

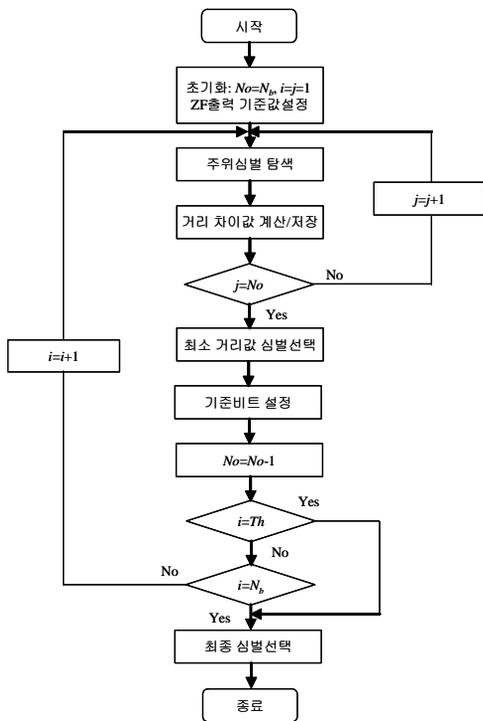


그림 4. MDS 알고리즘 순서도

의 초기값을 설정한다. 여기서, N_o 는 탐색할 주위심벌의 개수, i 는 갱신되는 기준심벌의 인덱스를 나타내는 변수로 1에서 N_b 만큼 변하고, j 는 N_o 에서 1까지 변한다. 주위심벌탐색과정에서는 기준심벌을 구하고 해밍거리가 1인 주위심벌과 기준심벌 사이의 거리차를 구한 후, 최소거리차를 가지는 주위심벌을 새로운 기준심벌로 설정한다. i 의 값이 N_b 가

될 때까지 주위심벌탐색과정을 반복한다. 최종심벌 디코딩 과정에서는 기준심벌들 중에서 최소거리값을 갖는 값을 최종심벌로 디코딩한다.

IV. 시뮬레이션 및 성능분석

본 장에서는 MIMO 송신부, MIMO 채널 및 MDS MIMO 수신부로 MIMO 시스템을 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다. 송신안테나 n_T 가 2개 일 때, 수신안테나 n_R 이 2, 3, 4개인 경우와 n_T 가 4개 일 때, n_R 이 4, 6, 8개인 경우를 고려하여 성능을 비교분석하였다. 변복조방식은 QPSK 혹은 16QAM를 적용하였으며, MIMO 채널은 $n_R \times n_T$ flat Rayleigh fading 복소채널행렬 \mathbf{H} 와 $n_R \times 1$ AWGN 복소행렬 \mathbf{n} 으로 구성하였다. 수신단에서는 채널정보 \mathbf{H} 를 완벽히 예측하고, n_R 이 항상 n_T 보다 크다고 가정한다.

송신심벌 D 집합에서 최종심벌을 구하기 위해 요구되는 탐색수를 연산량으로 나타내어 ML과 MDS의 연산량을 표 1과 같이 비교하였다. 정상차수 16, n_T 가 4일 때 MDS의 반복계산수인 연산량은 137번으로 ML의 연산량에 비해 연산량 비율이 0.21%이하로 감소하였다.

표 1. MDS기법의 연산량과 ML기법과의 연산비

n_T	M	4		16		64	
		연산	비율	연산	비율	연산	비율
2		11	68.5	37	14.4	79	1.93
3		22	34.4	79	1.93	172	0.066
4		37	14.5	137	0.21	301	0.001

그림 5는 QPSK에서 n_T 가 2개, n_R 이 2, 3, 4일 때 ML, ZF-VBLAST와 ZF-MDS 기법의 BER 성능을 비교한 것으로 ZF-MDS의 성능은 ZF-VBLAST보다 우수하지만 ML보다 성능이 열화 됨을 보여준다. ZF-MDS 성능 패턴은 초기심벌을 구할 때 ZF를 사용하므로 ZF를 이용하는 VBLAST 기법과 유사한 성능패턴을 보여준다. n_T 가 2개, n_R 이 4개 이상일 때, ZF-MDS는 ML의 성능과 유사하였으며, SNR 10dB에서 ZF-MDS와 ML는 10^{-5} BER를 달성하였다.

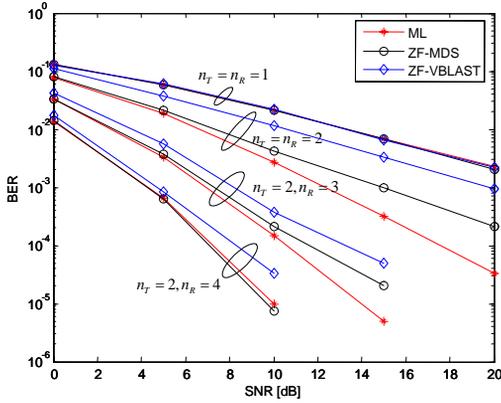


그림 5. ZF-MDS 기법의 BER 성능 (QPSK, $n_T=2$)

그림 6은 16QAM에서 n_T 가 2개, n_R 이 2, 3, 4일 때 ML, ZF-VBLAST와 ZF-MDS 기법의 BER 성능을 비교한 것이다. ZF-MDS의 성능은 ZF-VBLAST보다 우수하지만 ML보다 열화되었으며, ZF-MDS 성능 패턴은 ZF-VBLAST 기법과 유사하였다. n_T 가 2개, n_R 이 3개 이상일 때, ZF-MDS는 ML과 근사한 성능을 달성하였으며, SNR 14dB에서 ZF-MDS와 ML은 10^{-4} BER를 달성하였다.

그림 7은 QPSK에서 n_T 가 4개, n_R 이 4, 6, 8개 일 때 ML, ZF-VBLAST와 ZF-MDS 기법의 BER 성능을 비교한 것이다. n_T 가 4개, n_R 이 4개 일 때, 제안한 방식의 성능은 ML에 비해 상당히 열화되었으나 ZF-VBLAST 성능보다 약간 향상되었다. 제안 방식의 성능은 각 안테나개수에 대해 ZF-VBLAST와 유사한 패턴을 나타내었다. 이는 초기 심벌을 구하는 방식(ZF), 즉 초기심벌 추정값에 제안 알고리즘의 성능이 영향을 받음을 보여준다. 반면에 n_T 가 4개, n_R 이 6개 이상 일 때, 제안한 방식의 성능이 ML에 상당히 근접하였으며 SNR 5dB에서 ZF-MDS는 $2.5 \cdot 10^{-4}$, ML은 $7 \cdot 10^{-5}$ BER를 달성하였다.

V. 결론

본 논문은 MIMO 공간다중화 시스템의 최적 수신기법인 ML의 연산량을 감소시키는 MDS알고리즘을 제안하였다. MDS는 기준비트와 최소해밍거리를 갖는 주위비트에 에러가 발생할 가능성이 적다는 특성을 이용하였다. 연산량이 적은 선형수신기법을 사용하여 MDS의 탐색기준점을 제공함으로써 ML에 비해 성능열화를 감소시키고 연산량을 감소시킬

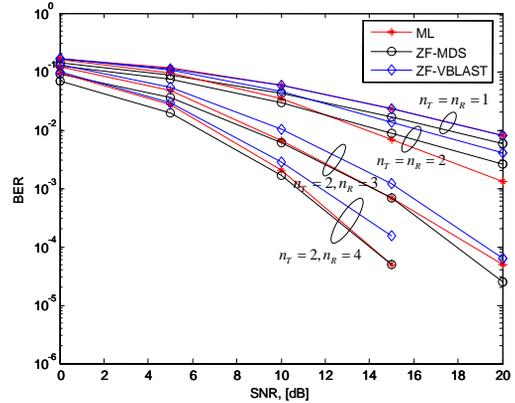


그림 6. ZF-MDS 기법의 BER 성능 (16QAM, $n_T=2$)

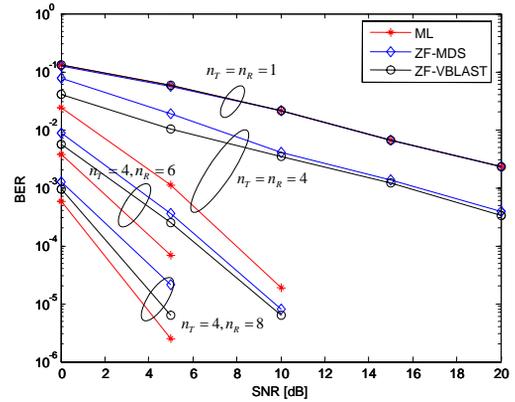


그림 7. ZF-MDS 기법의 BER 성능 (QPSK, $n_T=4$)

수 있었다. MDS의 연산량은 SNR값과 상관없이 일정하면서 송신안테나 4개, 성상차수 16일 때, ML 기법에 비해 0.21%로 감소되었다. MDS는 16QAM에서 송신 안테나 2개, 수신안테나 3개 이상일 때 ML과 거의 동일한 BER 성능을 달성하였고, QPSK에서 송신 안테나 4개, 수신안테나 6개 이상일 때 MDS의 성능은 ML에 비해 약간 열화됨을 확인할 수 있었다. 따라서, 제안한 MDS 알고리즘은 송신 안테나 개수가 2x3, 4x6이상인 MIMO 수신기에 적합한 구조임을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

[1] H. Yang, "A Road to Future Broadband Wireless Access: MIMO-OFDM-Based Air Interface," *IEEE Commun. Mag.*, Jan. 2005, pp53-60.
 [2] <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>

[3] S. Cui, Andrea J. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-Efficiency of MIMO and Cooperative MIMO Techniques in Sensor Networks," *IEEE Journal On Selected Areas in Commun.*, Vol. 22, No.6, Aug. 2004, pp1089-1098.

[4] D. Morris and O. Kwon, "Transporting JPEG Images over MIMO Links in Ad-Hoc Networks: an Investigation," *IEEE Sarnoff Sym.*, Mar. 2006.

[5] G. Golden, C. Foschini, R. Valenzuela, and P. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture," *IEE Electronics Letters*, Vol. 35, No. 1, Jan. 1999, pp14-16.

[6] E. Viterbo, and J. Boutros, "A Universal Lattice Code Decoder for Fading Channels," *IEEE Trans. On Information Theory*, Vol. 45, No. 5, July 1999, pp1639-1642.

[7] B. Hassibi, and H. Vikalo, "On the Sphere-Decoding Algorithm I. Expected Complexity," *IEEE Trans. On Signal Processing*, Vol. 53, No. 8, Aug. 2005, pp2806-2818.

[8] T. Cui, and C. Tellambura, "Approximate ML Detection for MIMO Systems Using Multistage Sphere Decoding," *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 12, No. 3, Mar. 2005, pp222-225.

권 오 주 (Oh-ju Kwon)

정회원



1989년 2월 : 경북대학교 전자 공
학과 졸업

1993년 2월 : 경북대학교 전자 공
학과 석사

2002년 2월 : 경북대학교 전자 공
학과 박사

1993년 3월~현재 : 국방과학연구소
선임연구원

<관심분야> 무선이동통신, 데이터링크, 통신신호처리