UWB-MIMO 시스템에서 채널 검파 방식에 따른 성능 비교분석

강윤정, 백선영, 김상준
동아대학교 전자공학과

Error Performance of UWB-MIMO system according to channel detection methods

Yunjeong Kang, Sunyoung Baek, and Sangchoon Kim
Department of Electronics Engineering, Dong-A University

Abstract - In this paper, binary pulse-position modulation (2PPM) time-hoping (TH) ultra-wideband (UWB) system is applied to multiple input multiple output (MIMO) system using vertical bell lab layered space-time (V-BLAST) structure to achieve high-data-rate communications. This UWB-MIMO system and its receivers are analyzed, and its BER performances are evaluated. In the receiver, various MIMO detection algorithms such as zero-forcing (ZF), ZF-ordered successive interference cancellation (OSIC), minimum-mean-square-error (MMSE), MMSE-OSIC and maximum likelihood (ML) are comparatively studied.

1. 서 론

임펄스 라디오(IR) 초광대역 (ultra-wideband :UWB) 통신 기술은 단거리 구간에서 고속 데이터 전송률을 얻기 위한 적합한 후보 기술로서 고려되어져 왔다[1]. 송신 안테나로부터 독립적인 신호들을 전송하는 MIMO 공간적 다중화 기법은 간섭성분을 줄이거나 제거하고 송수신 다이버시티를 획득하기 위해 사용되어져 왔다 [2]-[7].

MIMO 시스템에서 사용되는 V-BLAST 구조는 초기의 데이터 스트림을 송신 안테나 간의 코딩작업 없이 각각의 안테나에서 전송되는 N 개의 서브 스트림으로 나눈다. ZF, MMSE, ML 수신기는 일반적으로 공간적으로 다중화된 신호를 검파하기 위해 사용된다. 신호 검파 단계에서 간섭신호를 제거하는 OSIC 방법은 ZF과 MMSE 알고리즘과 결합 될 수 있다.

본 논문에서는 채널 지연에 의해 제한된 작업 처리량을 증가시키고, 공간적 다양성을 통해 존재하는 협대역 밴드 간섭을 제거하기 위해 UWB 시스템을 MIMO 시스템에 적용한다. 따라서, V-BLAST를 사용하는 UWB-MIMO시스템에서 ZF, MMSE, ZF-OSIC, MMSE-OSIC, ML 수신기가 고려되고, BER 성능이 비교적으로 분석된다. 시뮬레이션을 통해 ML 수신기가 가장 좋은 성능을 제공하고, 잠재적 다이버시티 이득을 활용하는 ZF-OSIC 와 MMSE-OSIC 검파 방식이 ZF, MMSE방식의 성능을 능가하는 것을 보인다. 또한 안테나 차원과 BER 성능사이의 관계가 논의된다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 단일 사용자 환경에서 N개의 송신 안테나와 M개의 수신 안테나를 가지는 UWB-MIMO 시스템이 고려된다. 그림 1에서 보여지는 것과 같이 Binary Source로부터 생성된 이진 데이터 스트림은 N개의 UWB 변조기로 나누어 전달된다. UWB변조기에서 생성되어 n번째 송신 안테나를 통해 전송되는 2PPM-TH-UWB 신호는 다음과 같이 수식적으로 표현된다.

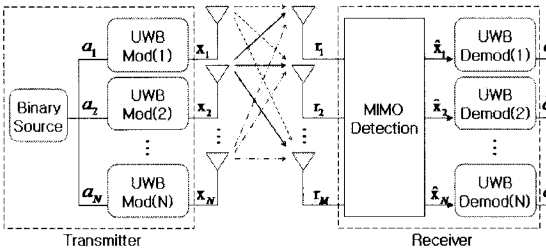
$$x_n(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sqrt{E_{txp}}\, p(y - jT_s - c_{nj}T_c - a_{nj}\varepsilon) \tag{1}$$

각 비트는 비트 구간 T_b 동안에 N_s번 반복되어 T_s의 프레임 시간을 가진다. $c_{nj}T_c$는 TH 코드에 의해 도입되는 시간 지연으로 T_c는 칩 시간 구간, c_{nj}는 n번째 안테나로부터 TH 코드 수열의 j번째 계수를 나타낸다. TH 코드는 의사 무작위 추출(pseudorandom) 수열로써, 구간 $[0, N_h - 1]$에 대해 균일 분포에서 무작위로 선택된 N_p개의 정수로 구성된다. 바꿔 말하면, n번째 송신기에서 TH 코드는 $c_{nn_p} \in 0, 1, \cdots, N_h$을 만족하는 $[c_{n1}, c_{n2}, \cdots, c_{nN_p}]$에 의해 주어진다. ε는 PPM 시간 전이 이므로, n번째 송신기에서의 이진 비트 a_{nj}로 인해 PPM변조에 의한 시간 전이 $a_{nj}\varepsilon$가 생긴다. E_{txp}는 각 단일 펄스에 대해 전송되는 에너지를 표기한다.

나노초 단위의 폭 T_p를 가지는 매우 짧은 펄스(monocycle)파형 $p(t)$는 펄스 형태 인자 α를 가지는 2차 도함수 가우시안 파형으로 에너지 정규화 된 펄스 파형이다 [1],[8].

$$p(t) = \left(1 - 4\pi \frac{t^2}{\alpha^2}\right) e^{-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}} \tag{2}$$

채널은 한 개의 데이터 프레임이 송신되는 동안 변하지 않는 레일리 평탄 페이딩 가정한다. 데이터 프레임은 1비트 이진신호로부터 생성된 2PPM-TH-UWB 신호의 길이 T_b를 가진다. 각각의 독립된 이산 시간 채널 이득을 가지는 $M \times N$ 채널 행렬은 $\mathbb{H} = [h_{(n,m)}] \in \mathbb{R}$와 같이 정의 하며, 각각의 원소는 평균이 0, 분산이 1인 $Normal(0,1)$분포를 따르는 가우시안 랜덤 변수이다.



<그림 1> UWB-MIMO 시스템모델

송수신간의 완벽한 동기화를 가정한다면, $M \times 1$의 수신된 신호 벡터 $\vec{\mathbf{r}}$는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\mathbf{r} = \mathbb{H}\mathbf{x} + \mathbf{w} \tag{3}$$

식(3)에서 $N \times 1$ 송신 신호 벡터 $\mathbf{x}$의 원소 x_n는 1비트 이진신호로부터의 2PPM-TH-UWB 신호이고 수식적인 표현은 다음과 같다.

$$x_n(t) = \sum_{j=0}^{N_s} \sqrt{E_{txp}}\, p(t - jT_s - c_{nj}T_c - a_{nj}\varepsilon) \tag{4}$$

$\mathbf{w}$는 $Normal(0,1)$의 분포를 따르는 $M \times 1$ 부가 백색 가우시안 잡음(AWGN)이고, 채널 페이딩 과정에 대해 독립적이다. 따라서 m번째 수신 안테나에서의 신호는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$r_m = x_1 h_{m1} + x_2 h_{m2} + \cdots + x_n h_{mN} + w_m \tag{5}$$

수신기에서는 공간적으로 다중화 된 채널에 대한 MIMO 검파와 송신기에 대한 동기화가 완벽하게 이루어진다고 가정한다. 그러면 채널검파과정에 의해 N개의 추정된 신호 $\hat{x}_n$은 수신 신호 벡터 $\mathbf{r}$로부터 분리되어 진다. [1]에서의 단일 안테나 시스템에 대한 분석적 접근과 유사한 상관 복조 단계에서 소프트 결정에 의한 분석은 1 비트 시간 구간 T_b에 대해 이루어진다. $t \in [0, T_b]$에 대한 $\hat{x}_n$는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{x}_n(t) = \sum_{j=0}^{N_s} \sqrt{E_{txp}}\, p(t - jT_s - c_{nj}T_c - a_{nj}\varepsilon) + w_n' \tag{6}$$

채널 검파에 의해 분리된 N개의 신호들에 대한 테스트 통계변수는 다음과 같다.

$$Z_n = \int_0^{T_b} \hat{x}_n(t) m_n(t)\, dt \tag{7}$$

n번째 송신기에 대한 상관 마스크(correlation mask) $m_n(t)$는 다음과 같이 표현된다.

$$m_n(t) = \sum_{j=0}^{N_s - 1} \eta_n(t - jT_s - c_{nj}T_c) \tag{8}$$

$$\eta(t) = p(t) - p(t - \varepsilon) \tag{9}$$

테스트 통계변수에 기반을 둔 수신기의 결정규칙은 다음과 같이 정의 된다.

$$Z \geq 0 \Rightarrow \hat{a}_n = 0 \qquad Z < 0 \Rightarrow \hat{a}_n = 1 \tag{10}$$

여기서 $\hat{a}_n$는 a_n의 추정된 비트를 나타낸다.

2.2 MIMO 검파 알고리즘

2.2.1 Zero Forcing

Zero Forcing (ZF) 검파는 채널 매트릭스의 역을 통해 송신안테나로부터의 신호를 분리할 수 있지만, 검파 후 잡음성분까지도 증가되는 결점을 가진다. 전송된 신호 $\mathbf{x}$는 다음과 같이 구해진다 [5].

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbb{H}^{\dagger}\mathbf{r} \tag{11}$$

이때, $\mathbb{H}^{\dagger}$는 $\mathbb{H}$의 Moore-Penrose 준역행렬(pseudo-inverse) 로 다음과 같

이 정의 된다 [3],[4].

$$\mathbf{H}^{\dagger}=(\mathbf{H}^{H}\mathbf{H})\mathbf{H}^{H} \tag{12}$$

2.2.2 Minimum Mean-Square Error

minimum mean-square error (MMSE) 검파는 송신안테나로부터의 신호에 대해 잡음과 상호 간섭 성분을 최소화 한다. 전송된 신호 $\mathbf{x}$는 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{\mathbf{x}}=(\mathbf{H}^{H}\mathbf{H}+2\sigma_{n}^{2}\mathbf{I_N})^{-1}\mathbf{H}^{H}\mathbf{r} \tag{13}$$

ZF과 비교했을 때, MMSE 검파방식은 잡음에 덜 민감하지만, 신호를 구분하는 능력은 떨어진다 [7].

2.2.3 Successive Interference Cancellation

V-BLAST 시스템은 더욱 향상된 성능을 위해 검파과정에서 ordered successive interference cancellation(OSIC) 알고리즘을 적용한다. OSIC 알고리즘을 포함한 ZF 또는 MMSE의 전체 알고리즘을 다음과 같이 진행된다 [5],[6].

초기화:
$$\mathbf{G_1}=\begin{cases}(\mathbf{H}^{H}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^{H}, & \text{if ZF}-\text{OSIC}\\(\mathbf{H}^{H}\mathbf{H}+2\sigma_n^2\mathbf{I}_N)^{-1}\mathbf{H}^{H}, & \text{if MMSE}-\text{OSIC}\end{cases} \tag{14a}$$

$$i=1 \tag{14b}$$

반복:
$$k_j=\arg_j\min\|(\mathbf{G}_i)_j\|^2,\quad j\in\{k_1,k_2,\cdots,k_{i-1}\} \tag{14c}$$

$$\mathbf{w}_{k_j}=(\mathbf{G}_i)_{k_j} \tag{14d}$$

$$x'_{k_j}=\mathbf{w}_{k_j}^{T}\mathbf{r}_i \tag{14e}$$

$$\widehat{x_{k_j}}=Q(x'_{k_j}) \tag{14f}$$

$$\mathbf{r_{i+1}}=\mathbf{r_i}-\widehat{\mathbf{x_{k_j}}}(\mathbf{H})_{k_j} \tag{14g}$$

$$G_{i+1}=H_{i,k_j}^{\pm} \tag{14h}$$

$$i=i+1 \tag{14i}$$

식 (14c)는 BER 성능을 최대화 해주는 최적의 열벡터 요소를 결정해주고, $(\mathbf{G}_i)_j$는 $\mathbf{G_i}$의 j번째 행을 나타낸다. 식(14d-f)는 각각 널링(nulling) 벡터, 결정 통계치(decision statistic), 송신된 신호 x에 대한 검파된 신호를 나타낸다. 식 (14g)에서는 수신된 신호 벡터로부터 검파된 신호를 제거 하며, 식(14h)는 다음 i번째 반복을 위해 새로운 준역행렬을 구하는 과정이다. 새로운 준역행렬은 $\mathbf{H}$의 k_j번째 열벡터가 0으로 채워진 간소화된 형태이다. 이것은 앞서 검파 후 제거된 k_j번째 안테나 신호에 대한 채널 행렬의 열벡터 성분이기 때문이다.

2.2.4 Maximum Likelihood

ML 검파방식은 가장 가능성 있는 송신 신호 벡터를 찾기 위해 모든 신호좌표를 비교하여 그 거리가 가장 짧은 신호를 수신된 신호로 검파한다. 이 과정의 경우, 추정된 이진 비트 $\hat{a}$를 바로 찾기 때문에, UWB수신기는 필요하지 않다. 추정된 이진 비트의 벡터$\hat{\mathbf{a}}$는 다음의 식으로 얻어진다.

$$\hat{\mathbf{a}}=\arg_{a}\,\mathrm{mim}\,\|\mathbf{r}-\mathbf{Hx}\|^2 \tag{15}$$

여기서 $\mathbf{r}$은 $M\times1$의 수신벡터이고, $\mathbf{x}$는 $\mathbf{a}$로 인한 가능한 UWB 신호의 전송벡터이다. 여기서 1비트씩 전송하는 N개의 송신 안테나를 가질 경우, $\mathbf{a}$는 2^N개의 가능한 벡터를 가진다.

ML 검파를 이용한 수신기는 안테나의 수가 증가 할수록 구현의 복잡성도 커지는 결점을 가지지만, 최적의 성능을 가지는 수신기이다.

2.3. 시뮬레이션 결과

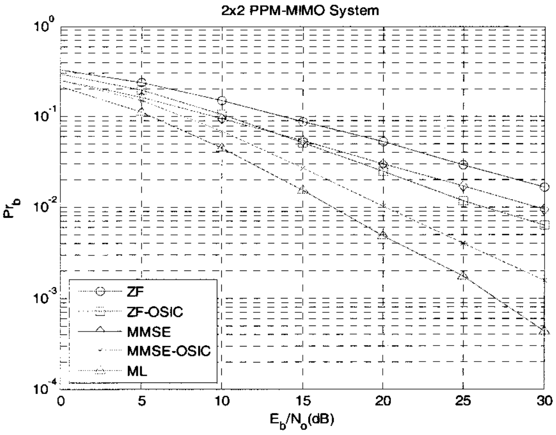
시뮬레이션에서는 MIMO 레일리 평탄 페이딩 채널환경에 있는 이진 PPM-TH UWB 시스템의 경우, ZF, ZF-OSIC, MMSE, MMSE-OSIC, ML와 같은 MIMO 검파 알고리즘에 따른 BER성능이 비교 평가된다. 시뮬레이션 결과는 총 100,000 회의 독립적인 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 얻어진다. 1회의 시뮬레이션에 대해 각 안테나에서 전송되는 정보 비트수는 1비트로 고정된다. 시스템 파라미터는 다음과 같다. : 샘플링 주파수 $f_c=50\times10^{9}$, 펄스 간격 $T_p=0.5\times10^{-9}$, 펄스 형태 인자 $\alpha=0.25\times10^{-9}$, 평균 전송 전력 $Pow=30\text{dBm}$, 비트 당 펄스 수 $N_s=3$, 프레임 시간 $T_s=3\times10^{-9}$, PPM 전이 시간 $\varepsilon=0.5\times10^{-9}$, 칩 시간 $T_c=10^{-9}$, TH 코드 범위 $N_h=3$, TH 코드 주기 $N_p=3$.

그림 2와 3은 2×2와 4×4 MIMO 채널에서 검파방식에 따른 BER 곡선을 보인다. SNR이 증가 할수록 검파방식에 따른 성능 차이가 명확하게 생기는 것을 볼 수 있다. ML 수신기는 검파 방식들 중에서 가장 우수한 성능을 가진다. 또한, ZF와 MMSE 의 경우보다 ZF-OSIC와 MMSE-OSIC 경우에서 더욱 향상 된 성능을 얻을 수 있다. 이것은 잠재하는 다이버시티 이득 때문이다. 약 10dB SNR 보다 작은 범위에서 ZF-OSIC의 성능은 MMSE성능보다 열악하지만, SNR이 증가 할수록 ZF-OSIC의 성능이 MMSE의 성능보다 점점 더 향상되는 것을 관찰 할 수 있다.

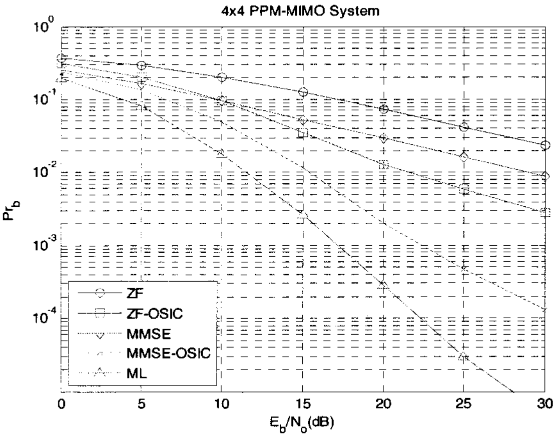
그림 2와 3을 비교함으로써, ML, ZF-OSIC, MMSE-OSIC 검파를 사용할 경우, 2×2 UWB-MIMO 시스템에서 보다 4×4 UWB-MIMO 시스템에 더욱 우수한 BER 성능이 얻어지는 것을 알 수 있다.

3. 결　론

레일리 평탄 페이딩 채널 환경에서 2PPM-UWB-MIMO 시스템의 MIMO 검파 알고리즘들에 따른 BER 성능이 비교 평가되었다. 시뮬레이션 결과는 ML 수신기의 성능이 가장 우수하고, 잠재하는 다이버시티 이득 때문에, ZF과 MMSE보다 이에 OSIC 검파 기술을 적용했을 때 성능이 더욱 향상됨을 보인다. 또한 안테나 다이버시티를 활용함으로써, ZF-OSIC, MMSE-OSIC, ML 검파의 BER 성능에 대해서 2×2 시스템의 경우 보다 4×4 시스템이 더 우수한 BER 성능을 가진다는 것을 확인 할 수 있다.



〈그림 2〉 2×2 PPM UWB-MIMO 시스템의 BER 성능



〈그림 3〉 4×4 PPM UWB-MIMO 시스템의 BER 성능

4. 감사의 글

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-331-D00382).

[참 고 문 헌]

[1] M. D. Benedetto and G. Giancola, Understanding Ultra Wide Band Radio Fundamentals, Uppe r Saddle River, NewJersey, U.S.A., Prentice Hall, 2004

[2] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P. J. Smith, and A. Naguib, "From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems," IEEE Journalon Selected Areasin Communications, vol. 21, no.3, pp.281-302, April2003.

[3] J. H. Winters, J. Salz, and R. D. Gitlin, "The impact of antenna diversity on the capacity of wireless communications systems," IEEE Trans. Commun., vol. 42, no. 2 - 4, pp. 1740 - 1751, Feb. - Apr. 1994.

[4] J. H. Winters, "On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment," IEEE Journal.Sel .Areas Commun., vol. SAC-5, no. 5, pp. 871 - 878, Jun. 1987.

[5] Mohinder J., Space-Time Codes and MIMO Systems, Artech House, 2004

[6] 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," ISSSE, URSI International Symposium,pp.295-300,Sept., 1998.

[7] Bolcskei, H., and A. Paulraj, "Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) Wireless Systems," Communications Handbook, CRCPress,2001

[8] R. A. Scholtz, "Multiple Access with Time-Hopping Impulse Modulation" in Proceedings of MILCOM'93, 1993, pp. 679-691