
이진 PAM DS UWB 통신에서 MIMO 검출 기법

강윤정* · 김길남* · 김상준**

*동아대학교

MIMO Detection Algorithms in Binary PAM DS UWB Communication

Yun-jeong Kang* · Gil-nam Kim* · Sang-choon Kim**

*Donga University

E-mail : yujeka0308@naver.com

요 약

본 논문에서는 2PAM(binary pulse-antipodal modulation) DS(direct-sequence) UWB(ultra-wideband) 시스템을 V-BLAST(vertical bell lab layered space-time) 구조를 사용하는 MIMO(multiple input multiple output) 시스템에 적용하여 실내 무선 채널 환경에서 고속 데이터 전송률을 달성하고자 한다. 이러한 2PAM DS UWB MIMO 시스템의 BER 성능과 송수신 안테나의 차원과의 관계가 논의된다. 또한, UWB-MIMO 시스템의 수신기에서는 ZF(zero-forcing), ZF-OSIC(ordered successive interference cancellation), MMSE(minimum-mean-square-error), MMSE-OSIC, ML(maximum likelihood)과 같은 다양한 MIMO(multiple input multiple output)와 같은 다양한 MIMO 검출기법이 비교, 분석된다.

ABSTRACT

In this paper, binary pulse-antipodal modulation (2PAM) direct-sequence (DS) 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 over indoor wireless channels. The relationship between antenna dimension and BER performance of 2PAM DS UWB MIMO system is discussed. In the receiver of UWB-MIMO system, 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.

키워드

Ultra-wideband, Binary Pulse-Antipodal Modulation, MIMO Detection, Multiple Antennas,

1. 서 론

UWB(ultra-wideband) 기술은 정보를 전송하기 위해 낮은 순환 주기(low-duty-cycle) 펄스를 이용하는 무선 통신 기술이다. 단거리 구간에서 높은 데이터 전송률을 달성할 수 있기 때문에 최근 학회 및 응용분야에서 많은 관심을 받아왔다. 다중 안테나는 간섭을 제거하고, 송수신 다양성을 획득하기 위해 모바일 통신 시스템의 역 링크에서 사용되어져 왔다. MIMO(multiple input multiple output) 시스템은 이러한 다중 안테나를 무선 링크의 양 끝단에 사용하는 기술로 UWB

시스템과 결합하여 공간적 다양성을 이용한 수신기의 성능 개선 뿐 아니라 향상된 데이터 전송률을 기대할 수 있다.

현재 MIMO 시스템에 관한 연구는 공간적으로 다중화된 신호를 수신기에서 검출하는 MIMO 검출 알고리즘에 집중되어 있다. 일반적으로 ZF, MMSE, ML 수신기가 사용되어지고, 신호간의 간섭을 제거하는 SIC(successive interference cancellation)방법이 ZF, MMSE에 적용될 수 있다.

본 논문에서는 2PAM DS UWB-MIMO 시스템의 수식적 모델에 대해 기술하고, ZF, MMSE,

ZF-OSIC, MMSE-OSIC, ML과 같은 MIMO 검출 알고리즘에 대해 언급한다. 시물레이션을 통해 레일리 페이딩 채널 환경에서 UWB-MIMO 시스템의 성능이 평가 되어진다. 특히 채널 검출 알고리즘에 따른 시스템의 성능이 비교, 분석되고, 송수신 안테나의 수와 BER 성능과의 관계가 논의 된다.

II. 시스템 모델

본 논문의 UWB시스템에는 N_t 개의 송신 안테나와 N_r 개의 수신 안테나가 사용되는 MIMO시스템이 적용된다. MIMO 시스템에는 가장 널리 사용되는 송수신 방법으로 V-BLAST(Vertical Bell Laboratories Layered Space-Time) 구조를 사용하였다. Binary Source로부터 생성된 이진 데이터 스트림은 안테나 간의 코딩작업 없이 N 개의 서브스트림이 되고, 송신 안테나를 통해 독립적인 신호가 전송된다. 그림 1에서 보여지는 것과 같이 Binary Source로부터 생성된 비트구간 T_b 를 가지는 이진 데이터 스트림 $a_{nj} \in \{0, 1\}$ 는 N_t 개의 UWB 변조기의 입력으로 전달된다.

1. 이진 PAM DS UWB 송신기

본 논문에서는 2PAM-DS-UWB시스템을 MIMO 시스템에 적용한다. 그림1에서 각각의 UWB변조기에서는 입력 신호가 생성되고, 변조 과정에 대한 상세한 블록 구조가 그림의 상단에 보여진다. 그리고 n 번째 송신 안테나를 통해 전송되는 2PAM-DS-UWB 신호의 수식적 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_n(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} b_{nj} c_{nj} \sqrt{E_{txp}} w(t - jT_s) \quad (1)$$

여기서 E_{txp} 는 각 단일 펄스에 대해 전송되는 에너지를 표기한다. $b_{nj} \in \{-1, 1\}$ 는 a_{nj} 을 BPSK 신호로 변조한 것으로, 각 비트는 비트 구간 T_b 동안에 N_s 번 반복되어 T_s 의 프레임 시간을 가진다. c_{nj} 는 n 번째 안테나로부터 DS 코드 수열의 j 번째 계수를 나타낸다. DS 코드는 의사 무작위 추출(pseudorandom) 수열로써, 구간 $[0, N_h - 1]$ 에 대해 균일 분포에서 무작위로 선택된 N_p 개의 정수로 구성된다. 바꿔 말하면, n 번째 송신기에서 DS 코드는 $c_{nnp} \in \{0, 1, \dots, N_h\}$ 을 만족하는 $[c_{n1}, c_{n2}, \dots, c_{nN_p}]$ 에 의해 주어진다. n 번째 송신기에서의 이진 비트 b_{nj} 는 DS 코드 c_{nj} 와 곱해짐으로 PAM-DS 변조가 되어진다. 나노초 단위의 폭 T_w 를 가지는 매우 짧은 펄스(monocycle)파형 $w(t)$ 는 펄스 형태 인자 α 를 가지는 2차 도함수 가우시안 파형으로 에너지 정규화 된 펄스 파형이다 [1],[8].

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

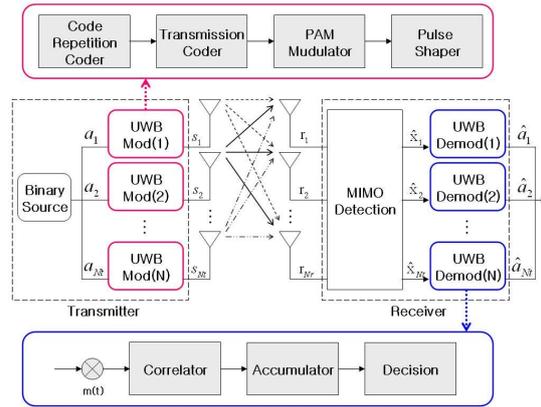


그림 1. UWB-MIMO 시스템 모델

2. UWB-MIMO 수신기

채널은 한 개의 데이터 프레임이 송신되는 동안 변하지 않는 레일리 평탄 페이딩 가정한다. (1)에서의 신호가 채널을 통과하여 m 번째 수신안테나를 통해 수신된 신호는 다음과 같다.

$$r_m(t) = \sum_{n=1}^{N_t} h_{mn} s_n(t) + \eta_m(t) \quad (3)$$

여기서 h_{nm} 는 $Normal(0,1)$ 분포를 따르는 가우시안 랜덤 변수이고, $\eta_m(t)$ 는 $Normal(0,1)$ 의 분포를 따르는 부가 백색 가우시안 잡음(AWGN)으로 채널 페이딩 과정에 대해 독립적이다.

MIMO 검출 과정을 위해 식(3)을 벡터 형식으로 표현하면 $N_r \times 1$ 의 수신된 신호 벡터 \mathbf{r} 은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \boldsymbol{\eta} \quad (4)$$

식(4)에서 \mathbf{s} 는 송신안테나를 통해 전송되는 $N_t \times 1$ 의 UWB신호 벡터이고, $\boldsymbol{\eta}$ 는 잡음에 대한 $N_r \times 1$ 벡터 표현이다. 각각의 독립된 이산 시간 채널 이득을 가지는 $N_r \times N_t$ 채널 행렬 \mathbf{H} 는 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_t} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r 1} & h_{N_r 2} & \dots & h_{N_r N_t} \end{bmatrix} \quad (5)$$

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

$$\hat{s}_n(t) = \sum_{j=0}^{N_s} b_{nj} c_{nj} \sqrt{E_{txp}} w(t - jT_s) + \eta'_n \quad (7)$$

채널 검출에 의해 분리된 N_t 개의 신호들에 대한 테스트 통계변수는 다음과 같다.

$$D_n = \int_0^{T_b} \hat{s}_n(t) m_n(t) dt \quad (8)$$

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

$$m_n(t) = \sum_{j=0}^{N_s-1} c_{nj} v_n(t-jT_s) \quad (9)$$

$$v_n(t) = w(t) - w(t-\varepsilon) \quad (10)$$

테스트 통계변수에 기반을 둔 수신기의 결정규칙은 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} D_n \geq 0 &\Rightarrow \hat{a}_n = 0 \\ D_n < 0 &\Rightarrow \hat{a}_n = 1 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 \hat{a}_n 는 a_n 의 추정된 비트를 나타낸다.

III. MIMO 검출 기법

1. ZF 검출 기법

ZF(zero forcing) 검출은 채널 매트릭스의 역을 통해 공간적으로 다중화 된 신호를 분리하는 기법으로 검출된 신호 $\hat{\mathbf{x}}$ 는 다음과 같다 [5].

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{r} \quad (12)$$

$$\mathbf{H}^\dagger = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (13)$$

식(12)에서 \mathbf{H}^\dagger 는 \mathbf{H} 의 Moore-Penrose 준역행렬(pseudo-inverse)로 식(13)으로 정의 된다 [3],[4]. 이러한 ZF기법은 \mathbf{H}^\dagger 가 잡음성분에도 영향을 주기 때문에 검출 후 잡음까지도 증가되는 결점을 가진다.

2. MMSE 검출 기법

MMSE(minimum mean-square error) 검출은 송신안테나로부터의 신호에 대해 잡음과 상호 간섭 성분을 최소화 하는 방법으로 ZF과 비교할 때 잡음에 덜 민감한 장점을 가지게 된다. 검출된 신호 $\hat{\mathbf{x}}$ 는 다음과 같이 구해진다 [7].

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + 2\sigma_n^2 \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{r} \quad (14)$$

여기서 σ_n^2 는 잡음의 분산 값 이다.

3. OSIC 검출 기법

ZF과 MMSE 알고리즘에는 OSIC(ordered successive interference cancellation)기법을 적용하여 간섭성분을 제거함으로써 더욱 향상된 성능을 기대할 수 있다. ZF과 MMSE에 적용되는 OSIC 알고리즘의 과정은 표 1에 나타난다 [5],[6].

표1에서 b-1은 b-2, b-3는 각각 널링(nulling) 벡터, 결정 통계치를 표현한다. b-4의 검출된 신호는 b-5에서 수신된 신호로부터 검파된 신호를 제거한다. b-6은 다음 i번째 순환을 위해 새로운 준역행렬을 구하는 과정이다. 새로운 준역행렬은 \mathbf{H} 의 k_j 번째 역벡터가 0으로 채워진 형태이다.

4. Maximum Likelihood

ML 검출방식은 가장 가능성 있는 송신 신호 벡터를 찾기 위해 모든 신호좌표를 비교하여 그 거리가 가장 짧은 신호를 수신된 신호로 검출한

표 1. OSIC 알고리즘

a	$\mathbf{G}_i = \begin{cases} (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H, & \text{if ZF-OSIC} \\ (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + 2\sigma_n^2 \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{H}^H, & \text{if MMSE-OSIC} \end{cases}$
b	for $i = 1, 2, \dots, N_t$
b-1	$k_j = \arg \min \ (\mathbf{G}_i)_j\ ^2, j \in \{k_1, \dots, k_{i-1}\}$
b-2	$\mathbf{w}_{k_j} = (\mathbf{G}_i)_{k_j}$
b-3	$s'_{k_j} = \mathbf{w}_{k_j}^T \mathbf{r}_i$
b-4	$\hat{s}_{k_j} = Q(s'_{k_j})$
b-5	$\mathbf{r}_{i+1} = \mathbf{r}_i - \hat{\mathbf{s}}_{k_j} (\mathbf{H})_{k_j}$
b-6	$\mathbf{G}_{i+1} = \mathbf{H}_{i,k_j}^\pm$
	end

다. 이 과정의 경우, 추정된 이진 신호좌표 $\hat{\mathbf{a}}$ 를 검출하기 때문에, UWB수신기는 필요하지 않다. 추정된 이진 비트의 벡터 $\hat{\mathbf{a}}$ 는 다음의 식으로 얻어진다.

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \min \| \mathbf{r} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{s}} \|^2 \quad (15)$$

여기서 \mathbf{r} 은 $N_r \times 1$ 의 수신벡터이다. 1비트씩 전송하는 N_t 개의 송신기에서 전송 가능한 정보비트가 \mathbf{a} 라고 할 때, $\mathbf{a}^{(k)}$ 는 식(16)과 같이 2^{N_t} 개의 가능한 벡터조합을 가진다.

$$\mathbf{a}^{(k)} = [a_1^{(k)} a_2^{(k)} \dots a_{N_t}^{(k)}], \quad k = 1, 2, \dots, 2^{N_t} \quad (16)$$

따라서 식(15)의 $\hat{\mathbf{s}}$ 는 $\mathbf{a}^{(k)}$ 로 인해 송신 안테나에서 전송 가능한 UWB 신호 벡터이다.

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

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서는 MIMO 레일리 평탄 페이딩 채널환경에 있는 이진 PAM-DS UWB 시스템의 경우, ZF, ZF-OSIC, MMSE, MMSE-OSIC, ML와 같은 MIMO 검출 알고리즘에 따른 BER성능이 비교 평가된다. 시뮬레이션 결과는 총 1000,000 회의 독립적인 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 얻어진다.

그림 2는 2×2 2PAM UWB-MIMO 시스템의 성능이 검출 방식에 따라 비교되었고 그림 3은 4×4 시스템의 성능이 평가 되었다. 두 그림에서 공통적으로 SNR이 증가 할수록 검출방식에 따른 성능 차이가 명확하게 생기는 것을 볼 수 있다. ML 수신기는 검출 방식들 중에서 가장 우수한 성능을 가지고, ZF과 MMSE의 경우보다 ZF-OSIC와 MMSE-OSIC 경우에서 더욱 향상된 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이것은 잠재하는 다이버시티 이득 때문이다. 4×4 를 보았을 때, 약 13dB SNR 보다 작은 범위에서 ZF-OSIC의

표 2. UWB-MIMO 시스템의 파라미터

명칭	표기	수치
샘플링 주파수	f_c	50×10^9
펄스 간격	T_w	0.5×10^{-9}
펄스 형태 인자	α	0.25×10^{-9}
평균 전송 전력	Pow	-30 dBm
비트 당 펄스 수	N_s	3
프레임 시간	T_s	3×10^{-9}
DS 코드 범위	N_h	3
DS 코드 주기	N_p	3

성능은 MMSE 성능보다 열악하지만, SNR이 증가할수록 MMSE의 성능보다 ZF-OSIC의 성능이 점점 더 향상되는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 그림 2와 3의 BER 곡선을 비교할 때, ML, ZF-OSIC, MMSE-OSIC 검출을 사용할 경우, 2x2 PAM UWB-MIMO 시스템에서 보다 4x4 PAM UWB-MIMO 시스템에 더욱 우수한 BER 성능이 얻어지는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

레이리 평탄 페이딩 채널 환경에서 2PAM-UWB-MIMO 시스템의 MIMO 검출 알고리즘들에 따른 BER 성능이 비교 평가되었다. 시뮬레이션 결과는 ZF와 MMSE의 성능보다 OSIC 검출 기술을 적용했을 때, 잠재하는 다이버시티 이득으로 인해 성능이 더욱 향상되었다. 적용한 검출방법 중 ML 수신기가 가장 우수한 성능을 나타내었다. 또한 안테나 다이버시티를 활용함으로써, ZF-OSIC, MMSE-OSIC, ML 검출의 BER 성능에 대해서 2x2 시스템의 경우 보다 4x4 시스템이 더 우수한 BER 성능을 가진다는 것을 확인할 수 있다.

참고문헌

[1] M. D. Benedetto and G. Giancola, Understanding Ultra Wide Band Radio Fundamentals, Upper Saddle River, New Jersey, 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 Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, no.3, pp.281-302, April 2003.

[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.

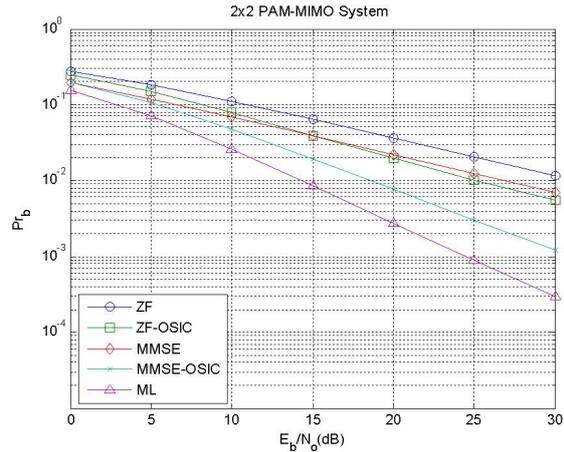


그림 2. 2x2 PAM UWB-MIMO 시스템의 BER 성능

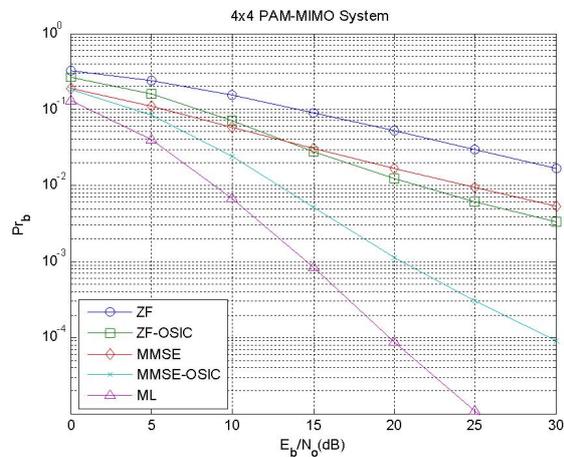


그림 3. 4x4 PAM UWB-MIMO 시스템의 BER 성능

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, CRC Press, 2001

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