

직접 확산 초 광대역 통신에서의 적응 다중 안테나 전송 기법

종신회원 송형규*, 정회원 국형준**

Adaptive Multiple Antenna Transmission Scheme in DS-UWB System

Hyoung-Kyu Song* *Lifelong Member*, Hyung-Joon Kook** *Regular Member*

요 약

최근 초 광대역(UWB) 시스템은 높은 데이터 전송율과 낮은 전력소모로 IEEE 802.15.3a에서 표준안으로 고려되고 있다. IEEE 802.15.3a에서 고려되고 있는 시스템 중에, 직접 확산초 광대역 통신(DS-UWB)은 UWB의 이점과 특성을 잘 이용한 시스템이라 할 수 있다. 하지만, DS-UWB의 에러율과 전송 용량은 다중 페이딩 채널에 의해 많은 제한을 받고 있다. 전송 용량과 에러율의 감소를 극복할 효과적이고 강력한 기법이 다중 안테나를 이용한 방법이라 하겠다. STBC는 전송 신호의 안정성 향상에 중점을 둔 시스템이지만, 전송율이 떨어진다. 그러나, V-BLAST는 전송 신호의 안정성은 떨어지지만, 전송율의 향상을 가져올 수 있다. 본 논문에서는 M진 DS-UWB에서 채널 용량을 높이고 안정성을 확보하기 위한 적응 다중 안테나 전송 기법을 제안한다. 제안된 시스템은 STBC와 V-BLAST의 한계점인 에러율과 처리량을 극복할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이를 컴퓨터 모의실험으로 검증하였고 분석하였다.

Key Words : DS-UWB, STBC, V-BLAST, SNR estimation

ABSTRACT

Recently, ultra wideband(UWB) is emerging as a solution for the IEEE 802.15.3a(TG3a) standard because of its potential to enable high-speed data transmission with low power consumption. One of the submitted systems as a PHY proposal is M-ary biorthogonal keying direct sequence ultra wideband(M-BOK DS-UWB). In this paper, adaptive multiple antenna transmission scheme for achieving high capacity and reliability in M-BOK DS-UWB is proposed. This proposed system can overcome the limitations of STBC and V-BLAST, such as bit error rate performance and throughput.

I. 서론

최근 초 광대역(UWB : Ultra Wideband)시스템은 높은 데이터 전송율과 낮은 전력소모로 IEEE 802.15.3a에서 표준안으로 고려되고 있다^[1]. IEEE 802.15.3a에서 제안된 시스템 중에 하나인 M-BOK

DS-UWB(M-ary Biorthogonal Keying Direct-Sequence UWB)는 이동 통신에서 필수요소인 낮은 복잡도와 적은 전력소모의 특징을 갖춘 시스템이다^[2]. 그러나, DS-UWB의 에러율과 전송 용량은 다중 페이딩 채널에 의해 많은 제한을 받고 있다. 따라서, 다중 페이딩 채널에 의해 감소되는 에러율과 전송 용량을

※ 본 결과물은 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구결과입니다.

* 세종대학교 정보통신공학과(songhk@sejong.ac.kr),

** 세종대학교 컴퓨터공학과(kook@sejong.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-11-472, 접수일자 : 2005년 11월 22일

높이기 위한 대책이 필요하다.

이러한 전송 용량과 에러율의 감소를 극복할 효과적이고 강력한 기법이 다중 안테나를 이용한 방법이라 하겠다. 본 논문에서는 두 개의 다중 안테나 기법을 고려한다. 즉, STBC(Space-Time Block Code)와 V-BLAST(Vertical Bell Laboratories Layered Space Time)이다. STBC는 Alamouti^[3]에 의해 처음 제안된 시스템으로서 다이버시티 이득과 에러율의 향상으로 많은 주목을 받고 있다. V-BLAST^[4]는 전송 안테나의 수(n_T)와 수신 안테나의 수(n_R)를 높여 주파수 효율을 높이는 시스템이다. 그러나, 이 두 시스템은 각각 단점을 가지고 있다. 다시 말하면, STBC는 신호의 안정성이 향상되는 반면, 전송율이 떨어지고 V-BLAST는 신호의 전송율은 향상이 되지만 신호의 안정성은 떨어지는 특징을 가지고 있다. 따라서, 각각을 적절하게 이용하면 신호의 안정성과 전송율을 동시에 향상시킬 수 있는 시스템을 생각할 수 있다.

본 논문에서는 DS-UWB에서 다중 안테나를 사용하여 전송 신호의 안정성과 전송율을 높일 수 있는 기법에 대해 알아본다.

II. DS-UWB의 신호 모델

N_p 개의 능동 피코넷(active piconet)이 있는 DS-UWB 시스템을 고려한다. 송신기에서 사용한 M-BOK 종류와 피코넷을 수신기에서 이미 알고 있다고 가정한다. 한 심볼 주기 T 동안의 k 번째 피코넷을 사용하는 어떤 사용자가 전송코자 하는 신호는 식 (1)처럼 주어진다.

$$s^{(k)}(t) = \sqrt{2P} b_k(t) \cos(w_c t) \quad (1)$$

여기서 w_c 는 일반 캐리어 주파수이고, P 는 심볼 당 전송 전력을 나타낸다. $b_k(t)$ 는 k 번째 피코넷의 전송된 i 번째 터너리 코드워드이다. 코드워드 $b_k(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$b_k(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} b_k[j] p(t - jT_c), \quad b_k[j] \in \{-1, 0, 1\} \quad (2)$$

여기서 $p(t)$ 는 단위 높이의 펄스이고, T_c 는 주기를 나타낸다. 코드워드 $b_k(t)$ 는 길이 $N = T/T_c$

의 $M/2$ 개의 직교 파형으로 만들어진 M 개의 배직교 파형(biorthogonal waveform)으로 구성된다. 그리고 다음 조건을 만족한다.

$$b_{ik}(t) = -b_{(i+M/2)k}[j] \quad (3)$$

일반적인 다중 비동기식 피코넷 사용자의 수신된 신호는 식 (4)로 표현될 수 있다.

$$y(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{l=1}^L \beta_l^{(k)} b_k(t - \tau_l^{(k)}) \cos(w_c t + \theta_l^{(k)}) + w(t) \quad (4)$$

여기서 $E_s = PT$ 는 심볼 파워를 나타내고, L 은 다중 경로의 수이며, $\beta_l^{(k)}$ 는 l 번째 경로의 경로 이득을 나타낸다. $\tau_l^{(k)} = \tau_0^{(k)} + lT_c$ 은 l 번째 경로의 지연을 나타내고, $[0, \pi)$ 범위에 균등 분포를 가진다고 가정한 $\theta_l^{(k)}$ 은 l 번째 경로의 위상을 표현하고 있다. $w(t)$ 는 양측 전력 스펙트럼 밀도를 가지는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)을 나타낸다.

첫 번째 피코넷을 쓴다고 가정하자 ($k=1$). 수신단에서는 원하는 신호의 첫 번째 경로에 정합 필터(matched filter)의 동기를 맞춘다. i 번째 코드워드($i=1, 2, \dots, M$) 가 전송되어졌다고 가정했을 때, 각 표본 추출 시간에서의 Rake 수신기의 m 번째 상관기의 출력은 식 (5)와 같다.

$$y[m] = \sum_{l=1}^L \int_{\tau_c}^{\tau_c + iT_c} y(t) \beta_l^{(1)} b_{1l}(t - lT_c) \cos(w_c t + \theta_l^{(1)}) dt \\ = \sum_{l=1}^L \begin{cases} \Gamma^{(l)} + I_p^{(l)} + I_s^{(l)} + W^{(l)} & m = i \\ -(\Gamma^{(l)} + I_p^{(l)} + I_s^{(l)} + W^{(l)}) & m = i + M/2 \\ I_p^{(l)} + I_s^{(l)} + W^{(l)} & elsewhere \end{cases} \quad (5)$$

여기서 $\Gamma^{(l)} = \sqrt{E_s T/2} (\alpha_l)^2$ 은 검출된 신호 성분이고, $I_p^{(l)}$ 는 $(N_p - 1)$ 개의 다른 동시 운영 피코넷(SOP : Simultaneous Operating Piconet)로부터 생기는 간섭을 표현한다. $I_s^{(l)}$ 은 사용자 스스로 인해 생긴 간섭을 나타내며, $W^{(l)}$ 은 제로 가우시안 잡음을 표현한다. $I_p^{(l)}$ 과 $I_s^{(l)}$ 의 분산과 $W^{(l)}$ 은 쉽게 [5]를 참고하여 구할 수 있다. 그래서 $\beta_l = \alpha_l e^{j\theta_l}$ 에 따라 ($l=1, 2, \dots, L$) Rake 수신기의 결과 값은 모든 간섭 부분 분산의 합과 같은 분산과 $\Gamma^{(l)} = \pm \sqrt{E_s T/2} (\alpha_l)^2$

인 평균을 가지는 정규 랜덤 과정(Gaussian random process)이다.

III. 적응 다중 안테나 전송 기법

3.1 STBC

Alamouti는 최초로 2개의 안테나에 대해 복소 직교 설계(complex orthogonal design)을 이용한 송신기 구조를 제안하였다³⁾. 이에 Tarokh는 Alamouti의 제안을 일반화하여 복소 설계(orthogonal design)에 기반한 STBC를 제안하였다⁶⁾. 본 논문에서 고려된 STBC의 전송 matrix는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2 & x_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ -x_2 & x_1 & -x_4 & x_3 \\ -x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 \\ -x_4 & -x_3 & x_2 & x_1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

수신기에서는 ML(Maximum Likelihood) 복호 방식을 이용하여 Euclidean distance가 최소를 만족하는 심볼을 추정한다. 전송되는 matrix의 직교성 때문에 복호에 있어서, 심볼 단위로 분리해서 복호할 수 있다. STBC는 linear processing만으로 수신 신호의 복원이 가능하므로, 수신기의 복잡도가 안테나의 개수에 따라 선형적으로 증가하여 수신기의 구조가 상대적으로 간단한 장점이 있다. 그러나, STBC는 flat fading 환경을 가정하고 있고 적어도 연속된 두 심볼간 채널의 변화가 없어야 한다⁷⁾.

3.2 V-BLAST

송신기에서 다수의 안테나를 서로 다른 데이터를 전송하고, 개별 안테나의 신호는 독립적인 페이딩을 겪게 되며, 수신기에서는 이를 이용하여 적절한 신호 처리를 통해 송신 데이터를 구분해내는 BLAST 기술은 다중 안테나를 이용하여, 시스템이 사용하는 주파수영역은 증가시키지 않고도, 데이터 전송량을 증가하게 한다. 따라서 송수신 안테나의 개수를 동시에 증가시킴으로써 채널 용량이 증가하여 보다 많은 데이터를 전송할 수 있다⁴⁾⁽⁷⁾.

V-BLAST는 수신안테나 수(n_R)가 송신안테나 수(n_T)와 같거나 많아야 한다. 수신기에서 검출 방법

에 따라 Linear detection, ML(Maximum Likelihood detection)으로 분류할 수 있다. 본 논문에서는 ZF(Zero-Forcing) 검출 방법을 고려하였다. 전송되는 심볼 벡터를 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_{n_T})^T$ 라 하면, 이때 수신되는 n_R 개의 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1n_T} \\ h_{21} & \dots & h_{2n_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n_R1} & \dots & h_{n_Rn_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n_T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{n_R} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 \mathbf{H} 는 $n_R \times n_T$ 채널 행렬, \mathbf{n} 은 분산이 σ^2 인 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 행렬이다. 이에 대한 검출 알고리즘은 다음과 같다.

initialization :

$$i \leftarrow 1 \quad (9)$$

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{H}^+ \quad (10)$$

recursion :

$$k_i = \arg \min_{j \in k_1, \dots, k_{i-1}} \left\| (\mathbf{G}_i)_j \right\|^2 \quad (11)$$

$$\mathbf{w}_{k_i} = (\mathbf{G}_i)_{k_i} \quad (12)$$

$$y_{k_i} = \mathbf{w}_{k_i}^T \mathbf{r}_i \quad (13)$$

$$\tilde{x}_{k_i} = Q(y_{k_i}) \quad (14)$$

$$\mathbf{r}_{i+1} = \mathbf{r}_i - \tilde{x}_{k_i} (\mathbf{H})_{k_i} \quad (15)$$

$$\mathbf{G}_{i+1} = \mathbf{H}_{k_i}^+ \quad (16)$$

$$i \leftarrow i+1 \quad (17)$$

여기서 $Q(\cdot)$ 는 심볼 복조 함수이고, \mathbf{H}^+ 는 \mathbf{H} 의 Moore-Penrose pseudo-inverse, 그리고 $\|\cdot\|$ 은 벡터의 유클리디안 크기이다. $(\mathbf{G}_i)_j$ 는 \mathbf{G}_i 의 j 번째 열(column)이다. 식 (11)은 S_{opt} (Optimal Ordering)을 결정한다. 식 (12)부터 식 (14)는 각각 ZF-nulling 벡터, 신호 복조, \mathbf{x} 의 추정값을 구하는 식이다. 식

(15)는 수신된 신호로부터 검출된 신호를 cancellation 하는 과정이다. 그리고 식 (16)은 다음 iteration에서 사용할 pseudo inverse 행렬을 구하는 식이다. 여기서 주의해야 할 것은 k_1, k_2, \dots, k_i 번째 열(column)은 '0' 행렬로 되었다는 것이다. k_1, k_2, \dots, k_i 번째 열들이 '0' 행렬로 되었다는 것은 k_1, k_2, \dots, k_i 에 해당하는 \mathbf{x} 신호는 검출되었고 cancellation 되었음을 의미한다.

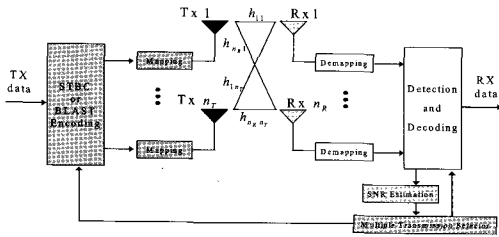


그림 1. M-BOK DS-UWB에서의 적응 다중 안테나 전송기법(adaptive multiple antenna transmission scheme)의 블록도

IV. 적응 다중 안테나 전송 기법

STBC는 신호의 안정성(reliability)향상에 관한 시스템이고, V-BLAST는 전송율(transmission rate)의 향상에 관한 시스템이다. 다시 말하면, STBC는 신호의 안정성이 향상되는 반면, 전송율이 떨어지고 V-BLAST는 신호의 전송율은 향상이 되지만 신호의 안정성은 떨어지는 특징을 가지고 있다. 따라서, 각각을 적절하게 이용하면 신호의 안정성과 전송율을 동시에 향상시킬 수 있는 시스템을 만들 수 있다. 그림 1은 STBC와 V-BLAST를 결합한 적응 다중 안테나 전송기법(adaptive multiple antenna transmission scheme)의 블록도이다. 이 시스템은 SNR (signal-to-noise ratio) 추정을 기반으로 feedback 채널이 완전하다는 가정하에 설계되었다.

V. SNR 추정 기법

초기상태에서 SNR을 추정하기 위해, V-BLAST를 초기 시스템으로 사용하였다. 먼저, 채널 \mathbf{H} 를 완벽하게 추정되었다고 가정하고 각 수신안테나의 순간 SNR(instantaneous SNR)을 추정하기 위해, 랜덤하게 발생된 training sequence를 사용하였다.

각 n_r 개의 전송안테나에서 training sequence를 보내 n_r 개의 수신안테나에서 수신한다. 수신안테나

로부터 수신된 신호와 training sequence를 통하여 각 안테나에서의 순간 SNR을 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_i = \frac{|\mathbf{H}_i \cdot \mathbf{x}|^2}{|\mathbf{y}_i - \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{x}|^2}, i=1, 2, \dots, n_r \quad (18)$$

$$\gamma_i[\text{dB}] = 10 \log_{10} \rho_i \quad (19)$$

여기서 \mathbf{H}_i 는 $n_r \times n_t$ 행렬인 \mathbf{H} 의 i 번째 행이고, \mathbf{x} 는 training sequence, \mathbf{y}_i 는 i 번째 수신안테나에서 수신된 신호이다.

VI. 적응 전송 알고리즘

training sequence를 사용하여 추정된 SNR을 통해 선택된 전송모드 정보가 feedback 채널을 통해 전송단에 완벽하게 전해진다고 가정한다. 그러면 전송모드를 정할 때 n_r 개의 수신안테나에서 측정된 SNR을 어떠한 방법으로 결합하는지가 중요하다. 세 가지 결합 방법을 생각할 수 있다. 첫째, n_r 개의 수신안테나에서 측정된 SNR의 평균을 구하는 방법(average SNR) 둘째는, n_r 개의 수신안테나에서 가장 작은 SNR을 선택하는 방법(minimum SNR) 셋째로는, n_r 개의 수신안테나에서 가장 큰 SNR을 선택하는 방법(maximum SNR)이다. 이를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

그림 1은 사용 예로서 한글 프로그램에서 제공하는 캡션편집 기능을 이용하여 작성합니다. 그림과 표는 가능하면 육안으로 분명히 식별할 수 있을 정도로 크기가 적당하여야 하며, 육안으로 식별되지 않을 때에는 논문을 게재할 수 없습니다. 또한 그림과 표의 위치는 가능한 논문의 상단 혹은 하단에 삽입하는 것을 원칙으로 합니다. 캡션의 여백은 아래쪽에 위치하고 있기 때문에 위쪽에 5mm, 아래쪽에 0mm의 여백을 주어야 합니다. 만일 논문 위쪽에 위치하고 있다면 반대로 위쪽에 0mm 아래쪽에 5mm의 여백을 주어야 한다.

$$\Gamma_1 = \frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^{n_r} \gamma_i \quad (20)$$

$$\Gamma_2 = \min \{ \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{n_r} \} \quad (21)$$

$$\Gamma_3 = \max \{ \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{n_r} \} \quad (22)$$

본 절에서 고려된 전송 모드를 살펴보면 식 (23)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{No Tx} && \text{if } \Gamma_i < \eta_1 \\
 & \text{STBC 4 Tx} \times 4 \text{ Rx} && \text{if } \eta_1 \leq \Gamma_i < \eta_2 \\
 & \text{STBC 2 Tx} \times 2 \text{ Rx} && \text{if } \eta_2 \leq \Gamma_i < \eta_3 \\
 & \text{STBC 2 Tx} \times 1 \text{ Rx} && \text{if } \eta_3 \leq \Gamma_i < \eta_4 \\
 & \text{BLAST 2 Tx} \times 2 \text{ Rx} && \text{if } \eta_4 \leq \Gamma_i < \eta_5 \\
 & \text{BLAST 4 Tx} \times 4 \text{ Rx} && \text{if } \eta_5 \leq \Gamma_i < \eta_6 \\
 & \text{BLAST 8 Tx} \times 8 \text{ Rx} && \text{if } \Gamma_i \geq \eta_6
 \end{aligned} \tag{23}$$

여기서 η_i 들은 switching-level이다.

VII. 컴퓨터 모의실험

본 절에서는 제안된 2-BOK DS-UWB에 대한 다중 안테나 적응 전송기법의 BER 성능을 논하겠다. 시스템 환경은 1-path Rayleigh 채널로 가정했으며 수신단에서 SNR추정과 전송 모드 결정에 걸린 시간동안 채널이 변하지 않는다는 가정을 하였다. 또한 전송 모드 정보도 전송단과 수신단에 모두 완벽하게 이용 가능하다는 가정을 하였다. 표 1은 적응 전송기법의 모의실험에서 사용된 SNR switching-level들이다.

다중 안테나 적응 전송기법을 적용한 DS-UWB의 성능을 그림 2에서 보였다. minimum SNR 기법의 성능을 그림 2에서 보였다. minimum SNR 기법

표 1. SNR switching-level

η_1	η_2	η_3	η_4	η_5	η_6
-7 dB	-3 dB	3 dB	8 dB	25 dB	33 dB

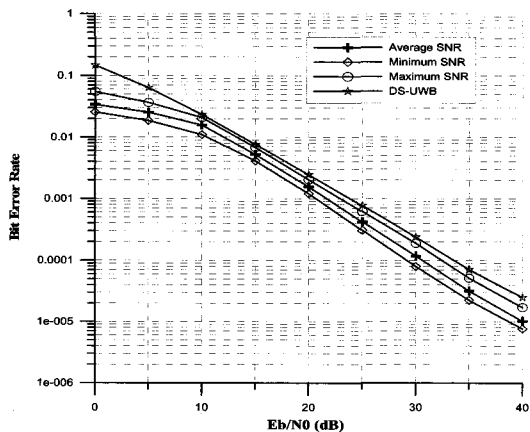


그림 2. 다중 안테나 적응 전송기법을 적용한 2-BOK DS-UWB의 BER 성능

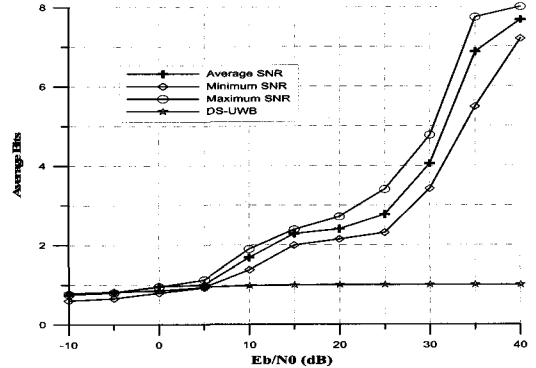


그림 3. 다중 안테나 적응 전송기법을 적용한 2-BOK DS-UWB의 평균 전송비트수

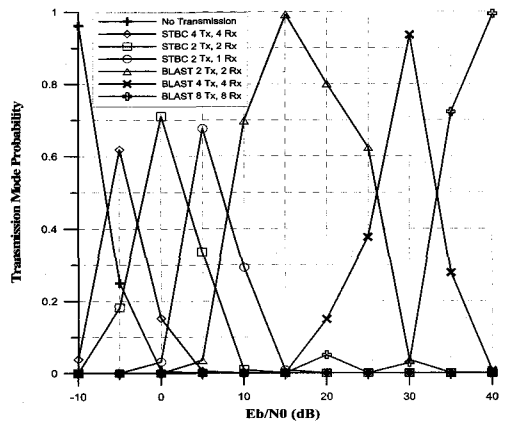


그림 4. 다중 안테나 적응 전송기법을 적용한 2-BOK DS-UWB에서의 각 전송모드의 선택 확률

이 가장 좋은 BER 성능을 보이고 있다. 하지만, 그림 3에서는 minimum SNR 기법이 가장 안 좋은 평균 전송 비트수를 보이고 있다. 이는 수신안테나에서 SNR을 합성할 때 SNR이 가장 작은 수신안테나를 기준으로 합성하기 때문에 BER 성능은 좋을 수 있지만, 전송 비트수는 감소하는 경향이 있다. 반대로, maximum SNR 기법은 BER 성능은 가장 나쁘지만, 전송 비트수는 가장 많다. 앞에서 설명한 minimum SNR 기법과 같은 경향이라 할 수 있겠다. 그림 4는 각 전송 모드가 어떤 Eb/N0에서 얼마만큼 선택되는지를 보여주는 전송 모드 확률 그림이다. 이는 표 1에서 정한 switching-level에 중속적인 경향을 가진다.

VIII. 결론

DS-UWB는 IEEE 802.15.3a에서 고려되고 있는 시스템으로 적은 전력소모와 낮은 복잡도의 UWB

