

교차 편파를 이용한 MIMO 채널에서 1-비트 피드백 기반 OSTBC의 물리계층 보안 성능 분석

이상준 · 이인호*

Secrecy Performance Analysis of One-Bit Feedback-Based OSTBC in Cross-Polarized MIMO Channels

Sangjun Lee · In-Ho Lee*

Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University, Anseong
456-749, Korea

요 약

본 논문에서는 공간적 상관관계를 갖는 MIMO(multiple-input multiple-output) 채널을 가정하여 도청자가 존재하는 환경인 와이어탭(wiretap) 채널을 고려한다. 이 때, 각 노드에서 안테나의 교차 편파를 가정하여 1-비트 피드백을 이용하는 직교 시공간 블록 코드(OSTBC: orthogonal space-time block code)의 물리계층 보안 성능을 분석한다. 본 논문에서는 1-비트 피드백을 이용하여 OSTBC(O-OSTBC: one-bit feedback-based OSTBC) 전송을 위한 송신안테나 그룹을 선택하는 방법을 제시하고, 다양한 송신안테나 그룹핑 방법들에 대하여 보안 불통 확률(secrecy outage probability)을 비교한다. 특히, 높은 공간적 상관관계를 갖는 MIMO 채널에서 O-OSTBC와 기존의 OSTBC와의 보안 불통 확률의 성능을 비교하여 효율적인 송신안테나 그룹핑 방법을 제안한다.

ABSTRACT

In this paper, we consider wiretap channels in the presence of an eavesdropper assuming spatially correlated MIMO(multiple-input multiple-output) channels, where we analyze a physical layer security performance of orthogonal space-time block code(OSTBC) using one-bit feedback assuming cross polarized antennas at each node. In this paper, we present a method to select a transmit-antenna group for OSTBC using one-bit feedback(O-OSTBC) and compare secrecy outage probabilities of various transmit-antenna grouping methods. Especially, we propose an efficient transmit-antenna grouping method by comparing secrecy outage probabilities of O-OSTBC and conventional OSTBC in highly correlated MIMO channels.

키워드 : 다중 입력 다중 출력, 직교 시공간 블록 코드, 보안, 교차 편파, 공간적 상관관계, 불통 확률

Key word : MIMO, OSTBC, Secrecy, Cross polarization, Spatial correlation, Outage probability

접수일자 : 2014. 10. 08 심사완료일자 : 2014. 10. 31 게재확정일자 : 2014. 11. 14

* **Corresponding Author** In-Ho Lee (E-mail:ihlee@hknu.ac.kr, Tel:+82-31-670-5197)

Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.2.301>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근에 무선 통신이 급속히 발전함에 따라, 통신 보안 분야에서도 활발한 연구가 진행되고 있다. 기존의 통신 보안은 주로 암호학(cryptography)의 측면에서 연구되어져 왔다. 하지만, 현재는 무선통신의 물리계층에서 활발히 연구되어지고 있다[1]. Wyner는 도청자가 존재하는 환경을 채널 모델로서 표현하였는데, 이것이 와이어탭(wiretap) 채널 모델이다[2]. 최근에는 MIMO (multiple-input multiple-output) 시스템을 이용한 와이어탭 채널 환경에서의 연구가 활발히 진행되고 있다 [3-5]. [3]에서는 피드백 오버헤드 측면에서 MIMO보다 우수한 성능을 보이는 직교 시공간 블록 코드(OSTBC: orthogonal space-time block code)를 이용하여 물리계층 보안 성능을 분석하였다. 이 때, 실제 환경에 적합한 환경을 고려하기 위하여 안테나 간 상관계수를 갖는 채널을 가정하였다. [4,5]에서는 송신안테나 선택 기술(TAS: transmit antenna selection)을 이용하여 물리계층 보안 성능을 분석하였다. TAS는 물리계층 보안 성능을 향상시키기 위하여 소스 노드(source node)에서 가장 좋은 채널을 갖는 안테나를 선택하는 기술이다.

[3-5]에서는 각 노드에서 동일 편파 안테나를 이용한 반면, [6]에서는 동일 편파 안테나와 교차 편파 안테나를 모두 가정하여 채널용량을 비교, 분석하였다. 동일 편파 안테나를 이용한 MIMO에서 좋은 성능을 얻으려면 채널의 공간적인 분리를 위한 충분한 안테나 간격이 요구된다. 반면, 교차 편파 안테나를 이용한 MIMO에서는 편파 간 분리를 통해 좁은 안테나 간격에서도 성능을 향상시킬 수 있다.

OSTBC는 TAS 보다 적은 피드백 오버헤드를 요구하지만, 불통 확률 성능은 TAS가 OSTBC 보다 우수하다. 본 논문에서는 기존 OSTBC의 불통 성능 개선을 위하여 1-비트 피드백을 이용하는 OSTBC(O-OSTBC: one-bit feedback OSTBC)를 제안한다. 특히, 공간적 상관관계를 갖는 MIMO 채널에서 높은 상관관계를 가정하여 기존의 OSTBC(C-OSTBC: conventional OSTBC)와 O-OSTBC에 대한 보안 불통 확률 결과를 비교 및 분석한다. 이 때, 다양한 안테나 개수를 갖는 경우들을 가정하고, 교차 편파 안테나 간 상관관계를 고려하여 소스 노드에서의 안테나 선택그룹을 다양하게 가정한다.

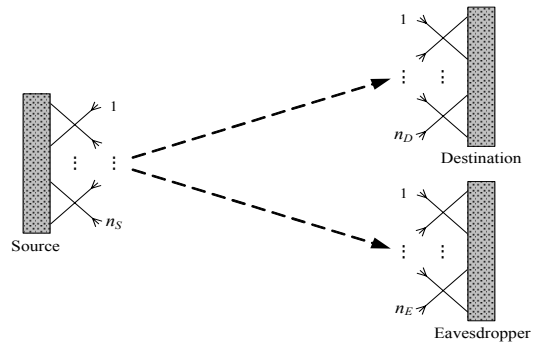


그림 1. 교차 편파를 이용한 와이어탭 채널 모델
Fig. 1 Cross-polarized wiretap channel model

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1에서와 같이 소스 노드 S , 목적지 노드(destination node) D , 그리고 도청 노드(eavesdropper node) E 로 구성된 MIMO 와이어탭 채널을 고려한다. 이 때, 각 노드에서의 안테나는 교차 편파를 이용한다. 본 논문에서는 소스 노드가 목적지 노드와 도청 노드의 채널상태정보(CSI: channel state information)를 모른다고 가정한다. 소스 노드에서의 전송 심볼 개수와 전송 주기는 각각 L, T 로 가정한다. 이 때 부호율(code rate) C^R 은 $C^R = L/T$ 로 정의된다. 소스 노드와 목적지 노드, 그리고 도청 노드의 안테나 개수는 각각 n_s, n_D , 그리고 n_E 로 가정하며 모든 노드에서의 안테나 개수는 $2k(k \geq 1)$ 개임을 가정한다. 목적지 노드와 도청 노드에서의 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Z_D &= H_{SD}X + N_D, \\ Z_E &= H_{SE}X + N_E. \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서, Z_D 는 목적지 노드에서의 수신 신호로서 $n_D \times T$ 행렬을 의미하고, Z_E 는 도청 노드에서의 수신 신호로서 $n_E \times T$ 행렬을 의미한다. 또한, X 는 $n_s \times T$ 행렬의 OSTBC 전송 신호를 의미한다. N_D 와 N_E 는 각각 목적지 노드와 도청 노드에서의 평균 0과 분산 σ^2 을 갖는 백색 가우시안 잡음으로서 $n_d \times T$ 행렬과 $n_e \times T$ 행렬을 의미한다. H_{SD} 와 H_{SE} 는 각각 $S-D$ 와 $S-E$ 의

공간적 상관관계를 고려한 MIMO 채널을 의미하며 다음과 같이 표현된다[7].

$$\begin{aligned} H_{SD} &= R_D^{1/2} H_{iid}^{SD} R_S^{1/2}, \\ H_{SE} &= R_E^{1/2} H_{iid}^{SE} R_S^{1/2}. \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서, R_S , R_D , 그리고 R_E 는 각각 $n_S \times n_S$, $n_D \times n_D$, 그리고 $n_E \times n_E$ 행렬로서 소스 노드와 목적지 노드, 그리고 도청 노드에서의 안테나 간 상관관계를 결정하는 행렬을 의미한다. 또한, $(\cdot)^{1/2}$ 는 행렬의 허미션(hermitian) 제곱근을 의미한다. 행렬 H_{iid}^{SD} 와 H_{iid}^{SE} 의 성분들은 각각 $S-D$ 와 $S-E$ 의 독립적이고 균일분포를 갖는 복소 가우시안 랜덤 변수들을 의미한다. 본 논문에서 모든 노드들에 대한 평균 송신 신호 대 잡음비(SNR: signal-to-noise ratio)는 $\rho = P/\sigma^2$ 로 가정한다. 이 때, P 는 모든 노드에서 전송되는 송신전력을 의미한다. OSTBC를 이용할 때, MIMO 채널은 심볼 당 순시 수신 SNR을 갖는 독립적인 SISO(single-input single-output) 채널로 표현될 수 있다. 목적지 노드와 도청 노드의 순시 수신 SNR Γ_D 와 Γ_E 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Gamma_D &= (\rho/C^R n_S) \|H_{SD}\|^2, \\ \Gamma_E &= (\rho/C^R n_S) \|H_{SE}\|^2. \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서, $\|H_{SD}\|^2$ 와 $\|H_{SE}\|^2$ 은 각각 행렬 H_{SD} 와 H_{SE} 의 제곱 연산된 Frobenius norm을 의미한다[7].

III. 보안 채널 용량과 불통 확률

3.1. C-OSTBC의 보안 채널 용량

C-OSTBC는 소스 노드에서 신호를 전송할 시 모든 안테나를 이용한다. C-OSTBC에서 목적지 노드와 도청 노드에서의 채널 용량 C_D 와 C_E 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C_D &= C^R \log(1 + \Gamma_D), \\ C_E &= C^R \log(1 + \Gamma_E). \end{aligned} \quad (4)$$

C-OSTBC에서의 와이어탭 채널에 대한 보안 채널 용량 S 는 다음과 같이 표현된다.

$$S = \begin{cases} C_D - C_E, & \Gamma_D > \Gamma_E \\ 0, & \Gamma_D \leq \Gamma_E \end{cases} \quad (5)$$

3.2. O-OSTBC의 보안 채널 용량

O-OSTBC는 소스 노드에서 원하는 안테나 간의 묶음을 통해 두 개의 그룹을 형성하여 그 중에서 좋은 성능을 제공하는 그룹의 인덱스만을 피드백하는 방식이다. 예를 들어, 첫 번째 안테나 그룹을 선택할 경우, 0을 피드백하고, 두 번째 안테나 그룹을 선택할 경우, 1을 피드백한다. 따라서, 하나의 비트만을 이용한 피드백이 가능하다. O-OSTBC에서 목적지 노드에서의 채널 용량 C_D^* 는 다음과 같이 표현된다.

$$C_D^* = C^R \log(1 + \Gamma_{D,i^*}). \quad (6)$$

식 (6)에서, i^* 는 다음과 같이 표현된다.

$$i^* = \arg \max_{i=1,2} \{C^R \log(1 + \Gamma_{D,i})\}. \quad (7)$$

식 (7)의 부호율 C^R 의 값은 다양한 조건에 의해 정의된 표 1을 통해 선택된다. 또한, 표 1에서 i 에 대한 송신 안테나 선택그룹 G 를 제시한다.

도청 노드에서의 채널 용량은 C-OSTBC의 것과 동일하다. O-OSTBC에서의 와이어탭 채널에 대한 보안 채널 용량 S 는 다음과 같이 표현된다.

$$S = \begin{cases} C_D^* - C_E, & \Gamma_{D,i^*} > \Gamma_E \\ 0, & \Gamma_{D,i^*} \leq \Gamma_E \end{cases} \quad (8)$$

3.3. 보안 불통 확률

와이어탭 채널 환경에서 보안 불통 확률 $O_S(R)$ 는 S 가 목표 보안 데이터 율(target secrecy data rate) R 보다 작을 확률로 정의되고, 다음과 같이 표현된다.

$$O_S(R) = \Pr(S < R). \quad (9)$$

표 1. 시뮬레이션 시나리오
Table. 1 Simulation scenarios

구 분	적용 기술	안테나 개수, n_{rep}	부호율, C^R	송신안테나 선택그룹, G	
				i=1	i=2
Case I	O-OSTBC	4	1	{1,2}	{3,4}
				{1,3}	{2,4}
Case II	C-OSTBC	4	3/4	{1,2}	{3,4}
				{1,3}	{2,4}
		8	5/8	{1,2,3,4}	{5,6,7,8}
				{1,3,5,7}	{2,4,6,8}
	O-OSTBC	4	1	{1,2}	{3,4}
				{1,3}	{2,4}
8	3/4	{1,2,3,4}	{5,6,7,8}		
		{1,3,5,7}	{2,4,6,8}		
Case III	O-OSTBC	4	1	{1,2}	{3,4}
				{1,3}	{2,4}
		8	3/4	{1,2,3,4}	{5,6,7,8}
				{1,3,5,7}	{2,4,6,8}

IV. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 2장에서 제안한 교차 편파를 이용한 와이어택 채널 환경에서의 O-OSTBC에 대한 보안 불통 확률을 실험한다. 이 때, 교차 편파의 영향을 고려하여 다양한 송신안테나의 그룹핑을 가정한다. 이것은 송신 안테나 그룹 선택의 측면에서, 같은 방향을 바라보는 안테나들의 묶음을 통한 그룹과 다른 방향을 바라보는 안테나들의 묶음을 통한 그룹의 상관관계에 따른 성능의 차이를 분석하기 위함이다. 표 1에서, 송신안테나 선택그룹 {{1,2},{3,4}}와 {{1,2,3,4},{5,6,7,8}}은 상이한 방향을 갖는 안테나들의 묶음을 의미하고, {{1,3},{2,4}}와 {{1,3,5,7},{2,4,6,8}}은 동일한 방향을 갖는 안테나들의 묶음을 의미한다. 또한, 본 시뮬레이션에서는 소스 노드와 목적지 노드, 그리고 도청 노드에서의 동일한 안테나 개수를 고려할 것이기 때문에 $n_{rep} = n_S = n_D = n_E$ 로서 대표 노드 안테나의 개수 n_{rep} 을 가정한다.

OSTBC에서 부호율은 송신안테나가 2개일 경우와 4개일 경우, 각각 최대 1과 3/4이다[8]. 또한 [9]에서, 8개의 송신안테나에 대한 최대 부호율이 5/8임을 증명한다. 따라서, 본 시뮬레이션에서는 표 1에서와 같이 시뮬

레이션을 위한 부호율로서 최대 부호율 값을 가정하였다. 성능 분석을 위한 시뮬레이션 환경으로는 몬테 카를로(Monte-Carlo) 방식을 이용한다. 이 때, 제안 시스템의 보다 나은 시뮬레이션 성능 결과를 도출하기 위해 교차 편파 안테나 간의 높은 상관관계(HC: high correlation)만을 고려하여 분석한다. 안테나 간 상관관계 행렬을 구성하는 상관계수는 식 (10)을 이용하여 얻으며[10], HC를 고려하기 위하여 소스 노드, 목적지 노드, 그리고 도청 노드가 갖는 안테나간 상관관계를 결정하는 변수인 A 와 d 를 각각 0.1, 0.5로 가정한다. 이 때, A 는 확산 각도, d 는 두 안테나 간 파장의 거리를 의미한다.

$$\Phi(d) \approx \exp(-23A^2d^2). \quad (10)$$

본 논문에서 R_S , R_D , 그리고 R_E 는 모두 동일하게 가정하고 대표적인 심볼로서 $R_{rep} = R_S = R_D = R_E$ 로 표현하기로 한다.

$$R_{rep} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.79 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.79 \\ 0.79 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.79 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R_{rep} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.79 & 0 & 0.39 & 0 & 0.12 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.79 & 0 & 0.39 & 0 & 0.12 \\ 0.79 & 0 & 1 & 0 & 0.79 & 0 & 0.39 & 0 \\ 0 & 0.79 & 0 & 1 & 0 & 0.79 & 0 & 0.39 \\ 0.39 & 0 & 0.79 & 0 & 1 & 0 & 0.79 & 0 \\ 0 & 0.39 & 0 & 0.79 & 0 & 1 & 0 & 0.79 \\ 0.12 & 0 & 0.39 & 0 & 0.79 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.12 & 0 & 0.39 & 0 & 0.79 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (11)과 (12)는 각각 n_{rep} 이 4와 8일 때의 R_{rep} 을 나타낸다. 더욱 가시적인 시뮬레이션 성능 결과 분석을 위하여 모든 경우에 대해 도청 노드의 평균 SNR은 -10dB로 가정한다.

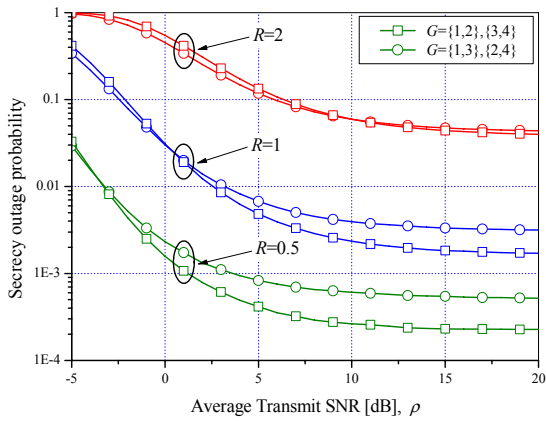


그림 2. Case I에 대한 O-OSTBC의 보안 불통 확률
Fig. 2 Secrecy outage probability of O-OSTBC for Case I

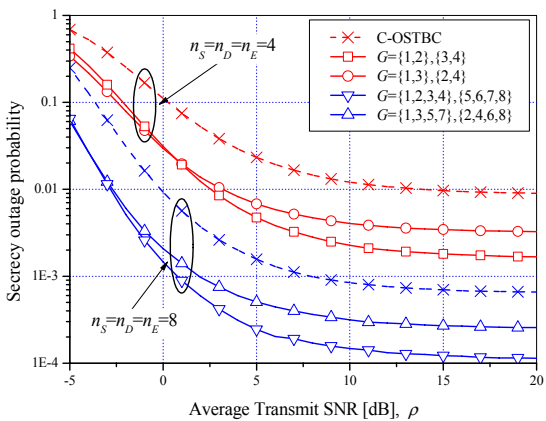


그림 3. Case II에 대한 O-OSTBC의 보안 불통 확률
Fig. 3 Secrecy outage probability of O-OSTBC for Case II

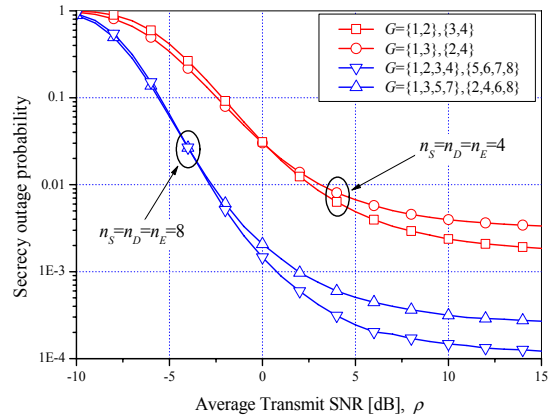


그림 4. Case III에 대한 O-OSTBC의 보안 불통 확률
Fig. 4 Secrecy outage probability of O-OSTBC for Case III

그림 2는 다양한 R 의 값을 가정하여 Case I에 대한 보안 불통 확률을 분석한다. $n_{rep} = 4$ 를 가정하여, 1,2 번째의 송신안테나 그룹핑과 3,4 번째의 송신안테나 그룹핑을 통한 O-OSTBC와 1,3 번째의 송신안테나 그룹핑과 2,4 번째의 송신안테나 그룹핑을 통한 O-OSTBC의 보안 불통 성능을 비교한다. 이 때, R 의 값은 0.5, 1, 2 bps/Hz로 가정하였다. R 이 증가함에 따라, O-OSTBC의 보안 불통 성능이 저하됨을 알 수 있고, 보안 불통 확률이 대부분 수렴하는 지점인 높은 평균 SNR(약 20dB)에서 동일한 안테나 배치를 갖는 그룹과 상이한 안테나 배치를 갖는 그룹의 O-OSTBC에 대한 보안 불통 확률의 차이가 감소함을 확인할 수 있다.

그림 3은 $R=1$ bps/Hz를 가정하여 Case II에 대한 보안 불통 확률을 분석한다. $n_{rep} = 4, 8$ 인 경우를 가정하여 O-OSTBC와 C-OSTBC의 보안 불통 확률을 비교한다. 여기서, $n_{rep} = 4, 8$ 의 두 경우에서 모두 제한된 O-OSTBC의 보안 불통 확률이 C-OSTBC의 보안 불통 확률보다 낮음을 확인할 수 있다. 또한, n_{rep} 이 증가함에 따라, O-OSTBC의 보안 불통 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.

그림 4에서는 그림 3과 마찬가지로 $R=1$ bps/Hz를 가정하였고, 수신 전력 이득과 다이버시티 이득의 비중에 알아보기 위해 그림 2, 3과 달리 평균 SNR을 의미하는 X축의 구간을 좌측으로 5dB만큼 이동하였다. $n_{rep} = 4, 8$ 인 경우에 각각 약 -3.8dB, 0.4dB의 평균 SNR을 기준으로 낮은 ρ 에서는 1,3 번째의 송신안테나 그룹

핑과 2,4번째의 송신안테나 그룹핑을 통한 O-OSTBC와 1,3,5,7번째의 송신안테나 그룹핑과 2,4,6,8번째의 송신안테나 그룹핑을 통한 O-OSTBC, 높은 ρ 에서는 1,2번째의 송신안테나 그룹핑과 3,4번째의 송신안테나 그룹핑을 통한 O-OSTBC와 1,2,3,4번째의 송신안테나 그룹핑과 5,6,7,8번째의 송신안테나 그룹핑을 통한 O-OSTBC가 더 좋은 보안 불통 성능을 보인다. 이것은, 낮은 ρ 에서는 수신 전력 이득의 비중이 증가하는 반면에, 높은 ρ 에서는 다이버시티 이득의 비중이 증가하기 때문이다[11]. 동일한 방향의 안테나 그룹핑의 경우, 안테나 간 상관관계가 굉장히 높다. 즉, 수신 전력 이득의 측면에서 이점을 얻을 수 있다. 반면에, 상이한 방향의 안테나 그룹핑의 경우에는 안테나 간 상관관계가 매우 적다. 따라서, 상이성을 통해 얻어지는 이득인 다이버시티 측면에서 이득을 얻게 된다. 또한, n_{rep} 이 증가함에 따라 동일한 방향의 안테나 그룹과 상이한 방향의 안테나 그룹에 대한 보안 불통 확률의 교차점이 좌측으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 도청자가 존재하는 MIMO 와이어랩 채널에서 O-OSTBC 기술을 제시하였고, 동일한 방향의 안테나 그룹과 상이한 방향의 안테나 그룹을 가정하여 보안 불통 확률 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 통해, R 이 증가함에 따라 보안 불통 확률이 수렴하는 높은 평균 SNR에서 동일한 안테나 배치를 갖는 그룹과 상이한 안테나 배치를 갖는 그룹의 O-OSTBC에 대한 보안 불통 확률의 차이가 감소함을 확인하였다. 또한, $n_{rep} = 4, 8$ 인 두 경우에 모두 보안 불통 확률 측면에서 제안 기술인 O-OSTBC가 C-OSTBC보다 좋은 성능을 나타냄을 확인하였다. 하지만, 피드백 오버헤드 측면에서 O-OSTBC는 C-OSTBC보다 높은 피드백을 요구한다. 시뮬레이션 결과를 통해, 동일한 방향의 안테나 그룹과 상이한 방향의 안테나 그룹에 대한 O-OSTBC의 보안 불통 확률의 교차점이 존재함을 확인하였다. 교차점을 중심으로, 낮은 대역에서는 높은 상관관계로 인한 수신 전력 이득의 증가로 인해 동일한 방향의 안테나 그룹에 대한 O-OSTBC의 보안 불통 성능이 더 좋음을 확인할 수 있었고, 높은 대역에서는 낮

은 상관관계로 인한 다이버시티 이득의 증가로 인해 상이한 방향의 안테나 그룹에 대한 O-OSTBC의 보안 불통 성능이 더 좋음을 확인하였다. 이 양상은 $n_{rep} = 4, 8$ 에서 모두 동일하게 관찰되었다.

그림 2,3,4를 통해, $R = 1\text{bps/Hz}$ 에서 약 0dB 이 후에는 상이한 방향의 안테나를 갖는 그룹에 대한 O-OSTBC의 보안 불통 성능이 동일한 방향의 안테나를 갖는 그룹에 대한 O-OSTBC의 보안 불통 성능보다 좋은 것을 확인할 수 있다. 따라서, 일반적인 SNR 대역에서 상이한 방향의 안테나 배치를 갖는 그룹핑을 통해 O-OSTBC의 보안 불통 성능을 향상시킬 수 있다.

REFERENCES

- [1] M. Bloch, J. Barros, M. Rodrigues, and S. McLaughlin, "Wireless information-theoretic security," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 6, pp. 2515-2534, June 2008.
- [2] A. Wyner, "The wire-tap channel," *Bell Syst. Technol. J.*, vol. 54, no. 8, pp. 1355-1387, Oct. 1975.
- [3] N. S. Ferdinand, D. Benevides da Costa, and M. Latva-aho, "Physical layer security in MIMO OSTBC line-of-sight wiretap channels with arbitrary transmit/receive antenna correlation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 2, no. 5, pp. 467-470, Oct. 2013.
- [4] N. Yang, P. L. Yeoh, M. ElKashlan, R. Schober, and I. B. Collings, "Transmit antenna selection for security enhancement in MIMO wiretap channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 1, pp. 144-154, Jan. 2013.
- [5] N. Yang, H. A. Suraweera, I. B. Collings, and C. Yuen, "Physical layer security of TAS/MRC with antenna correlation," *IEEE Trans. Inf. Forens. Security*, vol. 8, no. 1, pp. 254-259, Jan. 2013.
- [6] M. Coldrey, "Modeling and capacity of polarized MIMO channels," in *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference*, pp.440-444, May 2008.
- [7] E. G. Larsson and P. Stoica, *Space-Time Block Coding for Wireless Communication*, Cambridge Univ. Press, 2003.
- [8] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 45, no. 5, pp. 1456-1467, July 1999.
- [9] X.-B. Liang, "A complex orthogonal space-time block code for 8 transmit antennas," *IEEE Commun. Lett.*, vol.9, no.2,

- pp.115-117, Feb. 2005.
- [10] G. D. Durgin and T. S. Rappaport, "Effects of multipath angular spread on the spatial cross-correlation of received voltage envelopes," in *Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 996-1000, Sep. 1999.
- [11] Z. Wang and G. B. Giannakis, "A simple and general parameterization quantifying performance in fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 8, pp. 1389-1398, Aug. 2003.



이상준(Sangjun Lee)

2013년 2월 : 국립한경대학교 전자공학과 학사
2013년 3월 ~ 현재 : 국립한경대학교 일반대학원 전기전자제어공학과 석사과정
※관심분야 : 이동통신, 무선 협력 통신 시스템, MIMO 전송 기술



이인호(In-Ho Lee)

2003년 2월 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부 학사
2005년 2월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 공학석사
2008년 8월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 공학박사
2008년 9월 ~ 2010년 4월 : 삼성전자 DMC 연구소 책임연구원
2010년 4월 ~ 2011년 3월 : 한양대학교 ERICA 부설연구소 공학기술연구소 박사후과정
2011년 3월 ~ 현재 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과 조교수
※관심분야 : 무선 협력 통신 시스템, MIMO 전송 기술, 무선자원관리 기술