

등간격 평면 배열을 이용한 랜덤 스위치 아날로그 빔형성의 보안 전송률 분석

유병하, 정해준

경희대학교 전자정보융합공학과

{syeon2513, haejoonjung}@khu.ac.kr

Analysis of Secrecy Rate of Random Switched Analog Beamforming Using Uniform Planar Arrays

Byungha You, Haejoon Jung

Dept. of Electronics and Information Convergence Engineering, Kyung Hee Univ.

요약

본 논문에서는 등간격 평면 배열 안테나를 활용한 랜덤 스위칭 기법을 제안한다. 본 기법은 매 전송 데이터 심볼마다 전체 안테나 요소 중 송신할 안테나 일부를 선택하여 특정 각도 외의 방사 패턴을 무작위하게 만듦으로써 3차원 공간 상에서 물리계층 보안을 달성한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안 기법에 대한 보안 전송률 분석의 타당성을 검증한다.

I. 서론

물리계층 보안 (PLS: Physical Layer Security)은 보안 키 공유 및 관리를 필요로 하지 않아, 기존 상위 계층에서 수행되던 보안 기법의 대체재로서 주목을 받고 있다. 다중 안테나 배열 (multi-antenna arrays)을 활용하여 무선 채널의 임의성을 조절함으로써 정보 유출을 예방하는 PLS 방식이 널리 활용되고 있다 [1].

아날로그 빔형성 기반의 다중 안테나 PLS 기법으로서 랜덤 스위칭 방식이 제안되었다 [2]. 이 기법은 송신기의 안테나 요소 중 특정 개수를 매 전송 데이터 심볼마다 무작위로 선택하여 전통적 아날로그 빔형성을 수행하고, 나머지 요소들은 ‘switched off’ 상태로 만든다. 이러한 랜덤 스위칭 동작을 통해 원하는 각도 방향 외의 다른 모든 방향의 방사 패턴을 무작위하게 변화시켜 인공 잡음 (artificial noise)을 주입할 수 있다.

그러나 기존에는 등간격 선형 배열 (ULA: uniform linear arrays) 안테나를 가정하여 3차원적 물리계층 보안을 달성하지 못한다는 한계가 있었다. 또한, 기존의 이론 분석은 안테나 표본을 선택하는 랜덤 과정을 근사화하여 배열 계수 (array factor)의 통계치 분석에 오류가 있었다. 이에 본 논문에서는 등간격 평면 배열 (UPA: uniform planar arrays) 안테나를 이용한 랜덤 스위칭 기법에 대하여 정확한 랜덤 과정 모델링을 통해 배열 계수 및 보안 전송률 (secrecy rate)을 분석한다.

II. 본론

II-1. 시스템 모델

송신기는 x 축을 따라 N_x 개, y 축을 따라 N_y 개, 총 $N = N_x N_y$ 개의 요소로 이루어진 UPA를 장착하고 있다고 가정한다. 또한, UPA의 중심을 3차원 극좌표계의 원점에 위치시키고, UPA의 안테나 요소들을 x 축 방향으로도 y 축 방향으로도 서로 반과장, 즉 $d_x = d_y = d = \lambda/2$ 만큼 띄운다. 단일 안테나를 장착한 수신자 (Bob)와 도청자

(Eve)는 각각 $(\rho_B, \phi_B, \theta_B)$, $(\rho_E, \phi_E, \theta_E)$ 에 위치하며, 여기서 ρ 는 원점으로부터의 거리, ϕ 는 방위각 (azimuth angle), θ 는 양각 (elevation angle)이다. 송신기와 수신자 간의 채널은 직진 (LoS: Line-of-Sight) 채널을 가정하고 거리 감쇠를 고려한다. x 축을 기준으로 $m \in \{1, 2, \dots, N_x\}$ 번째, y 축을 기준으로 $n \in \{1, 2, \dots, N_y\}$ 번째 요소를 $m = \lfloor \frac{i-1}{N_y} \rfloor + 1$, $n = \text{mod}(i-1, N_y) + 1$ 와 같은 수식으로 매핑한다고 할 때, 채널 벡터 $\mathbf{h}(\rho, \phi, \theta)$ 의 i 번째 요소를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_i(\rho, \phi, \theta) = \frac{1}{\rho} e^{-j[(\frac{N_x+1}{2}-m)\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \cos \phi + (\frac{N_y+1}{2}-n)\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \sin \phi]} \quad (1)$$

전송 데이터 심볼 $s(k) \in \mathbb{C}$ 는 $\mathbb{E}[|s(k)|^2] = 1$ 이며 여기서 k 는 transmit time index (TTI)이다. \mathbf{x}^T 가 x 의 전치행렬이라 할 때, 빔형성 벡터 $\mathbf{w}(k) = [w_1(k), w_2(k), \dots, w_N(k)]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 가 적용되며, $w_i(k)$ 는 k 번째 심볼에서 $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 번째 송신 안테나의 빔형성 가중치를 의미한다. 수신자, 즉 Bob이나 Eve의 수신 신호는 $y(\rho, \phi, \theta, k) = \sqrt{P} \mathbf{h}(\rho, \phi, \theta) \mathbf{w}(k) s(k) + v(k)$ 이며, 여기서 P 는 송신 전력, $v(k)$ 는 평균이 0 분산이 σ^2 인 복소 가우시안 분포를 따르는 부가 잡음이다. 여기서 채널 벡터와 빔형성 벡터의 곱은 배열 계수 $\mathcal{A}(\rho, \phi, \theta, k) = \mathbf{h}(\rho, \phi, \theta) \mathbf{w}(k)$ 이다.

II-2. 랜덤 스위치 아날로그 빔형성

전통적 아날로그 빔형성 벡터 $\mathbf{w}(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \mathcal{L} \mathbf{h}(\rho, \phi, \theta)}$ 를 적용하면 Bob에서의 배열 계수가 최대화되지만 far-field 방사 패턴이 일정하다. 이와 달리, 랜덤 스위치 아날로그 빔형성은 far-field 방사 패턴의 부엽 (sidelobes)을 매 TTI마다 무작위하게 생성함으로써 인공 잡음을 주입할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, [2]에서 제안된 랜덤 스위치 아날로그 빔형성 벡터를 다음과 같이 도입한다.

$$\mathbf{w}_i(k) = \frac{1}{\sqrt{M}} a_i(k) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \mathcal{L} h_i(\rho_B, \phi_B, \theta_B)} \quad (2)$$

$a_i(k)$ 는 $N \times 1$ 벡터 $\mathbf{a}(k) \in \{0, 1\}$ 의 i 번째 요소이며, TTI 마다 무작위로 각 요소의 스위치 상태를 결정한다. 이때 1 은 안테나의 'switched on' 상태를, 0 은 안테나의 'switched off' 상태를 나타낸다. 전자는 M 개 (즉, $\sum_{i=1}^N a_i = M$), 후자는 $(N - M)$ 개이다.

II-3. 배열 계수 및 보안 전송률 분석

랜덤 스위칭 기법에 대한 기존의 이론 분석은 안테나 랜덤 선택을 베르누이 랜덤 변수로서 근사화하였다. 이 근사화에서는 랜덤 선택되는 안테나의 개수가 매 표본 추출마다 변하게 되며, 이로 인해 배열 계수의 통계치 분석에 있어 오류가 발생한다. 일정한 개수의 표본을 랜덤추출하기 위하여, 유한집합 $U = \{\mathbf{u}_1 = \mathbf{h}_1(k)\mathbf{w}_1(k), \dots, \mathbf{u}_N = \mathbf{h}_N(k)\mathbf{w}_N(k)\}$ 에서 M 개의 'switched on' 상태의 표본 $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_M$ 을 무작위로 비복원 추출한다고 가정한다. 이로써 이들의 합 $\Xi = \sum_{i=1}^M \chi_i$ 은 배열 계수 $\mathcal{A}(\rho, \phi, \theta, k)$ 와 동일하다. 랜덤 표본의 합 Ξ 의 평균은 [3]의 공식에 의해 $\mathbb{E}[\Xi] = \frac{M}{N} \sum_{i=1}^N u_i$ 와 같이 얻을 수 있다. 따라서 배열 계수의 평균은 다음과 같다.

$$\mathbb{E}[\mathcal{A}(\rho, \phi, \theta, k)] = \frac{1}{\rho \sqrt{M} N} \frac{M \sin(N_x \alpha(\phi, \theta)/2) \sin(N_y \beta(\phi, \theta)/2)}{\sin(\alpha(\phi, \theta)/2) \sin(\beta(\phi, \theta)/2)} \quad (3)$$

여기서 $\alpha(\phi, \theta) = \frac{2\pi d}{\lambda} (\sin \theta_B \cos \phi_B - \sin \theta \cos \phi)$, $\beta(\phi, \theta) = \frac{2\pi d}{\lambda} (\sin \theta_B \sin \phi_B - \sin \theta \sin \phi)$ 이다. 다음으로, 배열 계수의 분산을 구하기 위해서 $\mathbb{E}[|\Xi|^2]$ 를 먼저 구한다. [3]의 공식에 의해 $\mathbb{E}[|\Xi|^2] = \mathbb{E}[\sum_{i=1}^M \chi_i^2] + \mathbb{E}[\sum_{i=1}^M \sum_{i \neq j} \chi_i \chi_j^*] = \frac{1}{\rho^2 M} [M(1 - \frac{M-1}{N-1}) + \frac{M(M-1) \sin^2(N_x \alpha(\phi, \theta)/2) \sin^2(N_y \beta(\phi, \theta)/2)}{N(N-1) \sin^2(\alpha(\phi, \theta)/2) \sin^2(\beta(\phi, \theta)/2)}]$ 와 같이 유도되며 배열 계수의 분산을 다음과 같이 얻는다.

$$\text{Var}[\mathcal{A}(\rho, \phi, \theta, k)] = \mathbb{E}[|\Xi|^2] - |\mathbb{E}[\Xi]|^2 = \frac{1}{\rho^2 M N^2 (N-1)} \left(N^2 - \frac{\sin^2(N_x \alpha(\phi, \theta)/2) \sin^2(N_y \beta(\phi, \theta)/2)}{\sin^2(\alpha(\phi, \theta)/2) \sin^2(\beta(\phi, \theta)/2)} \right) \quad (4)$$

보안 성능 지표로서 정보가 안전하게 전송될 수 있는 최대 데이터율 (data rate)을 의미하는 보안 전송률 η 를 도입한다. 이는 $\eta = [\log_2(1 + \gamma_B) - \log_2(1 + \gamma_E)]^+$ 와 같이 Bob 과 Eve 의 신호 대 잡음비 (SNR: signal-to-noise-ratios)를 이용하여 계산된다. 여기서 $[x]^+ = \max(0, x)$ 이다. γ_B 와 γ_E 는 다음과 같다 [2].

$$\gamma_B = \frac{P |\mathbb{E}[\mathcal{A}(\rho_B, \phi_B, \theta_B, k)]|^2}{P \text{Var}[\mathcal{A}(\rho_B, \phi_B, \theta_B, k)] + \sigma^2} \quad (5)$$

$$\gamma_E = \frac{P |\mathbb{E}[\mathcal{A}(\rho_E, \phi_E, \theta_E, k)]|^2}{P \text{Var}[\mathcal{A}(\rho_E, \phi_E, \theta_E, k)] + \sigma^2} \quad (6)$$

배열 계수의 평균과 분산 (3)과 (4)를 이용하여 Bob 과 Eve 의 SNR (5)와 (6)을 얻을 수 있으며, 보안 전송률 η 를 유도할 수 있다. 랜덤 스위칭 기법 수행 시 전통적 아날로그 빔형성에 비해 γ_B 가 약간 감소하나, Bob 을 제외한 방향에서 far-field 방사 패턴의 무작위화로 인해 γ_E 가 크게 감소하므로 보안 전송률이 크게 향상된다.

II-4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 위해 설정된 반송파 주파수는 5GHz 이다. 이에 따라 파장은 약 $\lambda \approx 0.06\text{m}$ 이며 안테나 요소 간 간격은 $d \approx 0.03\text{m}$ 이다. UPA 를 이루는 요소 개수는 $N_x = N_y = 8$, 즉 이다. 랜덤 스위칭 수행 시 $M = 56$ 개의 안테나 요소가 선택된다. $(\rho_B, \phi_B, \theta_B) = (1\text{km}, 90^\circ, 30^\circ)$ 에 Bob 을 위치시켰으며, Eve 의 거리 위치도 $\rho_E = 1\text{km}$ 로 두었다. 또한 $\frac{P}{\rho^2 \sigma^2} = 30\text{dB}$ 가 되도록 송신 전력을 설정하였으며, 랜덤 스위칭을 위한 시뮬레이션 반복은 10^4 번 수행하였다.

그림 1 은 2 개의 비교 기법에 대한 보안 전송률 결과를 보여준다. UPA 를 이용한 전통적 아날로그 빔형성 기법은 방사 패턴이 고정되어 있어 상대적으로 낮은 η 를 보인다. $N = 64$ 개의 요소로 이루어진 ULA 안테나를

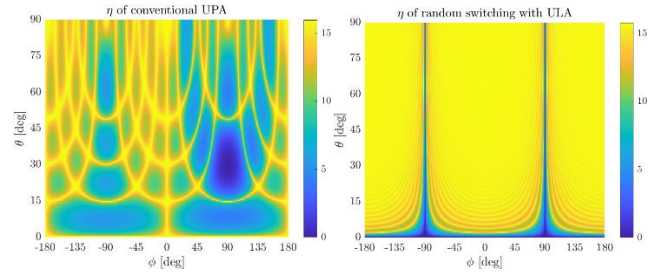


그림 1. 비교 기법의 η (좌: UPA 를 이용한 전통적 아날로그 빔형성, 우: ULA 를 이용한 랜덤 스위칭)

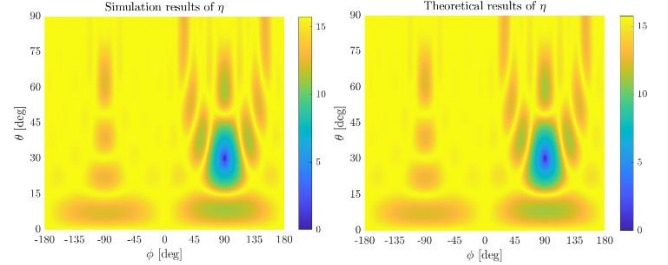


그림 2. 제안된 기법의 η (좌: 시뮬레이션, 우: 이론)

이용해 랜덤 스위칭을 수행할 때에는 $\phi_E = \phi_B$ 를 제외한 방위각에 대하여는 높은 η 를 달성하나, 양각을 구분할 수 없어 3 차원 공간 상에서 안전한 통신을 수행하기 어렵다. 이에 반해, 그림 2 에서는 제안된 기법이 3 차원 far-field 방사 패턴을 무작위화시켜 3 차원 공간 선택성을 확보할 수 있음을 보여주고 있다. 또한 이론 결과는 시뮬레이션 결과와 일치하며 제안된 랜덤 과정 모델링 및 보안 전송률 분석이 타당함을 뒷받침한다.

III. 결론

본 논문에서는 아날로그 빔형성 기반 PLS 기법인 랜덤 스위칭 기법에 대한 정확한 랜덤 과정 모델링을 수행함으로써 3 차원 공간 상 보안 전송률을 분석하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 본 분석의 타당성을 검증하였으며, 비교 기법 대비 높은 보안 성능을 달성하고 3 차원 공간 선택성을 확보할 수 있음을 보였다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the MSIT, Korea, in part under the National Research Foundation of Korea grants (RS-2023-00276086, RS-2023-00303757, NRF-2022R1F1A1A1065367 and NRF-2022R1A4A3033401) and in part under the Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grants (RS-2024-00397480, IITP-2024-2021-0-02046, IITP-2023-RS-2023-00266615).

참고 문헌

- [1] M. Mitev, A. Chorti, H. V. Poor and G. P. Fettweis, "What Physical Layer Security Can Do for 6G Security," *IEEE Open J. of Vehicular Tech.*, vol. 4, pp. 375-388, 2023
- [2] N. Valliappan, A. Lozano and R. W. Heath, "Antenna Subset Modulation for Secure Millimeter-Wave Wireless Communication," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 61, no. 8, pp. 3231-3245, August 2013
- [3] D. G. Horvitz and D. J. Thompson, "A generalization of sampling without replacement from a finite universe," *J. Amer. Statist. Assoc.*, vol. 47, no. 260, pp. 663-685, Dec. 1952.