

## 6G 무선 네트워크를 위한 Fluid 안테나 시스템의 새로운 분석 방법

이예림<sup>1</sup>, 백주영<sup>1</sup>, 염정선<sup>2</sup>, 김종민<sup>3</sup>, 정방철<sup>1</sup><sup>1</sup>충남대학교 전자공학과, <sup>2</sup>한경국립대학교 전자전기공학부, <sup>3</sup>한국과학영재학교

## A Novel Analytical Framework of Fluid Antenna System for 6G Wireless Networks

Ye Rim Lee<sup>1</sup>, Juyeong Baek<sup>1</sup>, Jeong Seon Yeom<sup>2</sup>, Jong Min Kim<sup>3</sup>, Bang Chul Jung<sup>1</sup><sup>1</sup>Dept. of Electronics Engineering, Chungnam National University<sup>2</sup>School of Electronic & Electrical Engineering, Hankyong National University<sup>3</sup>Korea Science Academy of KAIST

yeliming4522@o.cnu.ac.kr, jybaek@o.cnu.ac.kr, jsyeom@hknu.ac.kr, franzkim@gmail.com,

bcjung@cnu.ac.kr

## 요 약

본 논문에서는 등간격 안테나 포트(port)간 채널 상관성을 고려한 선형 유체 안테나 시스템의 아웃티지 확률을 수학적으로 분석한다. 유체 안테나를 이용하여 수신 신호의 신호대 잡음비를 최대화하기 위해 순시적으로 금속 유체를 가장 큰 채널 이득을 갖는 안테나 포트에 위치시킴으로써 해당 안테나 포트를 활성화한다. 본 논문에서는 분석의 용이성을 제공하기 위해 위 시스템의 채널 상관행렬을 Green 행렬로 근사화하여 닫힌 형태의 수식으로 아웃티지 확률을 수학적으로 분석하는 방법을 제시한다.

## 1. 서론

현재 하드웨어의 발전으로 이동통신 기기가 소형화, 경량화됨에 따라 한정된 공간에 다중 안테나 시스템을 구현하기 위해 다양한 형태의 안테나가 개발되었다. 하지만 안테나의 밀집화로 인해 각각의 안테나는 더 이상 독립적 요소로 고려될 수 없으므로 안테나의 채널 간 상관관계 (correlation)를 고려해야 한다. 최근 작은 공간안에 유동성을 가진 금속 유체 (fluid)로 구성된 유체 안테나가 대두되었다[1]. 해당 유체 안테나 시스템에 대한 수학적 분석 연구가 다수 있지만 안테나 포트 간 정확한 채널 상관 관계를 고려한 연구는 없다.

본 논문에서는 정확한 채널 상관행렬을 고려하기 위해 임의의 안테나 포트가 특정 안테나 포트와만 상관성이 있는 것이 아닌 모든 안테나 포트와 상관성이 존재하는 모델로 해석하였다. 본 시스템은 채널 상관성으로 인해 기존의 수학적 분석이 용이하지 않다. 그러므로 우리는 수학적 분석의 용이성을 제공하고자 채널 상관 행렬을 Green 행렬로 근사화하여 아웃티지 확률을 수학적으로 근사하는 분석 방법을 제시한다.

## 2. 시스템 모델

본 논문에서는 단일 안테나를 갖는 송신기와 수신기가 존재하는 시스템을 고려한다. 이때 수신기는 길이가  $W\lambda$ 인 선형 안테나이며 안테나 내부에는 이동이 가능한 유체가 존재한다. 이 유체는 안테나 내부에 등간격으로 사전 정의된  $N$ 개의 안테나 포트 (port)에 소프트웨어적으로 배치할 수 있다고 가정한다.  $W$ 는 안테나의 길이 파라미터이며  $\lambda$ 는 파장을 의미한다. 무선 채널 벡터  $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 레일리(Rayleigh) 페이딩 채널 모델을 가정하며  $\mathcal{NC}(\mathbf{0}_N, \mathbf{R})$ 의 분포를 따른다. 여기서  $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 은 채널 간 상관관계수 (correlation coefficient)로 이루어진 행렬이며, 다음과 같은 Jakes 모델을 따른다.

$$(R)_{k,l} = \sigma_h^2 J_0 \left( 2\pi \frac{\Delta d_{k,l}}{\lambda} \right) = \sigma_h^2 J_0 \left( \frac{2\pi(k-l)}{(N-1)W} \right), \quad (1)$$

$$k, l \in \{1, \dots, N\},$$

여기서  $\Delta d_{k,l}$ 는 임의의  $k$ 번째 포트와  $l$ 번째 포트 사이 거리를 의미하며,  $J_0(\cdot)$ 는 제 1 종 베셀 함수이다.  $\mathbf{R}$ 을 고윳값 분해하면  $\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{U}^H$ 로 주어진다. 이때  $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{r \times r}$ 는 0이 아닌  $\mathbf{R}$ 의 고윳값을 원소로 가진 대각 행렬이며  $r = \text{rank}(\mathbf{R})$ 이고,  $\mathbf{U} \in \mathbb{C}^{N \times r}$ 는 관련된 고유벡터로 구성된 행렬이다.  $\mathbf{S} = \mathbf{U}\mathbf{D}^{\frac{1}{2}}$ 로 정의하면, 행렬  $\mathbf{S}$ 는 채널 간 상관관계수인  $s_{k,l}(k, l \in \{1, \dots, N\})$ 로 구성된 행렬이 된다.  $k$ 번째 안테나 채널과 수신 신호를 나타내면 다음과 같다.

$$g_k = \sum_{l=1}^N s_{k,l}(a_l + jb_l), \quad y_k = g_k x + n_k, \quad (2)$$

여기서  $j$ 는 복소수 단위,  $a_k$ 와  $b_k$ 는 서로 독립이면서  $\mathcal{N}(0, \frac{1}{2})$ 의 분포를 따르는 가우시안 랜덤변수이다.  $x$ 는 송신 신호,  $n_k$ 는  $\mathcal{CN}(0, N_0)$  분포를 따르는 가산 백색 가우시안 잡음이다.

본 논문의 유체 안테나 시스템은 금속 유체가 채널의 크기가 가장 큰 포트에 배치되어 신호를 수신하므로 활성화 안테나 포트는 다음과 같이 결정된다.

$$M = \arg_k \max\{|g_1|, |g_2|, \dots, |g_N|\}. \quad (3)$$

그러므로 수신단에서의 아웃티지 조건은 다음과 같다.

$$\left\{ \log_2 \left( 1 + \sqrt{g_M^2 \gamma_M} \right) < R \right\} = \{g_M < \sqrt{\gamma_{th} / \gamma_M}\}, \quad (4)$$

여기서  $\gamma_M \triangleq E[|x|^2] / N_0$ 은 활성화 안테나 포트에서의 평균 송신 신호 대 잡음비 (Signal-to-noise ratio, SNR),  $R$ 은 목표 전송률을 의미하며  $\gamma_{th} \triangleq 2^R - 1$ 이다.

## 3. 채널의 CDF 및 아웃티지 확률 분석

문헌 [1]에서 안테나 포트 간 상관관계는 특정 안테나 포트와 첫 번째 포트와의 상관성만 고려하였기 때문에 채널 크기의 분포 또한, 첫 번째 안테나 포트를 조건으로 두고 나머지 포트들은 독립이라는 점을 이용하여 분석하였다. 따라서 조건부 확률 계산에 의해 아래의 수식과 같이 분석하였다.

$$F_{|g_1|, |g_2|, \dots, |g_N|}(r_1, r_2, \dots, r_N) = F_{|g_2|, |g_3|, \dots, |g_N|}(r_2, r_3, \dots, r_N) F_{|g_1|}(r_1) \quad (5)$$

하지만, 앞서 설명했듯이 모든 안테나 포트 간에 상관관계가 존재하기 때문에 위 분석 방법은 정확하지 않을 수 있다. 또한, 이로부터 유도된 아웃티지 확률의 최종식은 닫힌 형태의 수식으로 주어지지 않는다.

그러므로, 모든 안테나 포트에 대해서 채널간 상관관계가 존재할 때 채널의 분포를 분석해야 한다. 문헌 [2]에서는 채널간 임의의 상관 계수가 주어질 때 채널 분포를 분석하였다. 하지만, 해당 논문에서 유도된 누적확률 분포 (cumulative distribution function, CDF)의 최종식은 매우 복잡하여 유의미한 통찰력을 얻기 어렵다. 본 논문에서는 문헌 [3]의 Green 행렬 근사를 이용해 상관관계가 존재하는 채널을 분석하였다.

Green 행렬이란 본 논문에서는 기존 correlation 행렬인  $\mathbf{R}$  과 가장 가까운 값으로 근사해 만든 새로운 행렬  $\mathbf{C}$ 를 의미한다. 이때 근사화 조건은 행렬  $\mathbf{C}$ 의 역행렬인  $\mathbf{C}^{-1}$ 이 삼중대각 (tridiagonal) 행렬의 특성을 갖는다. 삼중대각 특성을 가지는 행렬은 행렬의 대각선과 그 대각선 바로 위 (upper diagonal)와 아래 (lower diagonal)에 위치한 대각선을 제외하고 나머지 원소가 0 인 행렬을 뜻한다. 이러한 삼중대각 행렬의 역행렬인 Green 행렬은 다음과 같은 형태를 가진다.

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} u_1 v_1 & u_1 v_2 & \cdots & u_1 v_n \\ u_1 v_2 & u_2 v_2 & \cdots & u_2 v_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_1 v_n & u_2 v_n & \cdots & u_n v_n \end{pmatrix}. \quad (6)$$

여기서  $u_i/v_i = 1$ 이며  $u_i = 1/v_i$ 의 식을 통해 구할 수 있다. 따라서 위 조건을 만족하는 Green 행렬은 아래의 비선형 연립 방정식을 통해 계산한다.

$$\begin{aligned} v_2 &= R_{2,1} v_1 \\ v_3 &= R_{3,1} v_1 & v_3 &= R_{3,2} v_2 \\ & \vdots & & \vdots \\ v_n &= R_{n,1} v_1 & v_n &= R_{n,2} v_2 & \cdots & v_n &= R_{n,n-1} v_{n-1} \end{aligned} \quad (7)$$

위 비선형 연립 방정식은 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 통해 해를 구할 수 있다. 위 조건을 모두 만족하는 Green 근사 행렬이 존재한다면, 채널간 상관관계가 존재할 때 아래와 같이 닫힌 형태의 수식으로 모든 안테나 포트의 채널 크기의 joint CDF 를 수학적으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} & F_{|g_{1,1}|, |g_{2,1}|, \dots, |g_{N,1}|}(R_1, R_2, \dots, R_N) \\ &= |\mathbf{W}| \\ & \times \sum_{i_1=0}^{\infty} \sum_{i_2=0}^{\infty} \cdots \sum_{i_{N-1}=0}^{\infty} \frac{|p_{1,2}|^{2i_1} |p_{2,3}|^{2i_2} \cdots |p_{N-1,N}|^{2i_{N-1}}}{p_{1,1}^{i_1+1} p_{2,2}^{i_1+i_2+1} \cdots p_{N-1,N-1}^{i_{N-2}+i_{N-1}+1} p_{N,N}^{i_{N-1}+1}} \\ & \times \prod_{j=1}^{N-1} (i_j! \Gamma(i_j + 1))^{-1} \gamma(i_1 + 1, p_{1,1} R_1^2/2) \\ & \times \gamma(i_1 + i_2 + 1, p_{2,2} R_2^2/2) \times \gamma(i_{N-1} + 1, p_{N,N} R_N^2/2) \\ & \times \cdots \gamma(i_{N-2} + i_{N-1} + 1, p_{N-1,N-1} R_{N-1}^2/2), \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $\mathbf{W}$ 는  $\mathbf{C}^{-1}$ 을 의미하고  $|\cdot|$ 는 행렬식을 의미하며  $p_{i,j}$ 는  $\mathbf{C}^{-1}$ 의  $i, j$ 번째 원소를 의미한다.  $\Gamma(\cdot)$ 은 감마 함수,  $\gamma(\cdot)$ 은 하부 불완전 감마 함수이다. 수식 (8)에서 무한대 자연수를 더하는 연산은 현실적으로 불가능하므로 구현을 위한 근사화 과정은 모의실험 결과에서 설명한다. CDF 수식을 이용해 아래와 같이 본 시스템에서의 아웃티지 확률식이 주어진다.

$$P_{\text{out}}(\gamma_{th}) \approx F_{|g_{1,1}|, |g_{2,1}|, \dots, |g_{N,1}|}(\sqrt{\gamma_{th}/\gamma_M}, \dots, \sqrt{\gamma_{th}/\gamma_M}) \quad (9)$$

#### 4. 모의실험 결과 및 결론

본 논문의 모의실험에서 유체 안테나의 길이는 2λ이다. 그림 1은 수신단의 유효 채널 크기  $R$ 에 따른

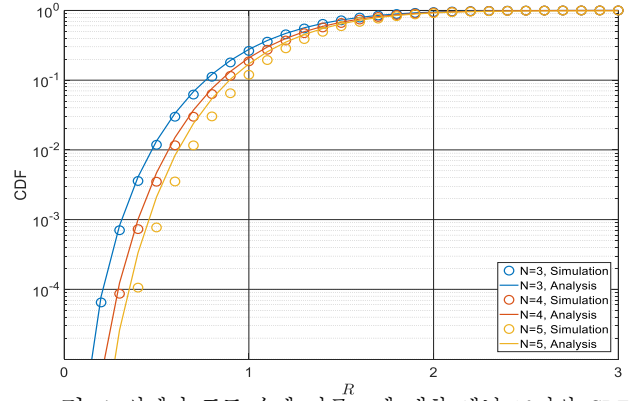


그림 1 안테나 포트 수에 따른  $R$ 에 대한 채널 크기의 CDF

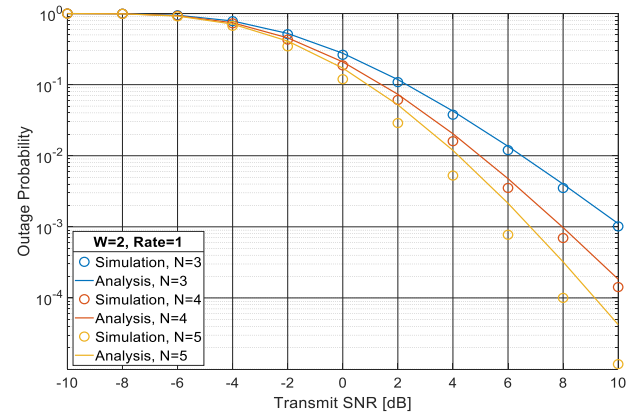


그림 2 송신 SNR에 따른 아웃티지 확률 성능 분석

유체 안테나 시스템의 CDF 를 보인다.  $R$  이 증가할수록 수학적으로 분석한 CDF의 정확성이 증가하는 경향을 보인다.

그림 2는 송신 SNR에 따른 본 시스템의 아웃티지 확률을 보인다. Rate은 목표 전송률을 의미한다. 전체적인 경향은 안테나 포트 수가 증가할수록 채널 선택 다이버시티가 높아지므로 아웃티지 확률이 감소한다. 모의실험 결과와 Green 행렬 근사를 통한 수학적 분석 결과를 비교해보면, Green 행렬 근사를 통한 수학적 분석 결과가 시뮬레이션 결과의 upper bound로 근사화되는 것을 확인할 수 있다.

#### 5. ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 및 한국연구재단의 지원(No. NRF-2022R1I1A30733740)을 받아 수행된 연구임.

#### 6. 참고 문헌

- [1] K. K. Wong, K. F. Tong, Y. Shen, Y. Chen, and Y. Zhang, "Bruce Lee-inspired fluid antenna system: Six research topics and the potentials for 6G," *Frontiers Commun. Netw.*, vol. 3, Art. no. 853416, Mar. 2022.
- [2] O. C. Ugweje and V. A. Aalo, "Performance of selection diversity system in correlated Nakagami fading," in *Proc. IEEE 47th Veh. Technol. Conf. Technol. Motion*, May 1997, pp. 1488-1492.
- [3] G. K. Karagiannidis, D. A. Zogas, and S. A. Kotsopoulos, "An efficient approach to multivariate Nakagami- $m$  distribution using Green's matrix approximation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 5, pp. 883-889, Sep. 2003.