안테나간 상관도를 고려한 이동형 안테나 시스템의 성능 분석

이예림, 백주영, 김종민†, 염정선‡, 정방철
충남대학교, †한국과학영재학교, ‡한경국립대학교
yeliming4522@o.cnu.ac.kr, jybaek@o.cnu.ac.kr, franzkim@gmail.com, jsyeom@hknu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Performance Analysis of Movable Antenna Systems considering Antenna Correlation

Ye Rim Lee, Juyeong Baek, Jong Min Kim†, Jeong Seon Yeom‡, Bang Chul Jung
Chungnam National University, †Korea Science Academy of KAIST, ‡Hankyong National University

요 약

본 논문은 등간격 안테나 포트 (port) 간 채널 상관성을 고려한 이동형 안테나 시스템의 아웃티지 확률 성능을 분석한다. 구체적으로, 이동성을 가진 유체가 움직이면서 채널의 크기가 가장 큰 안테나 포트에서 신호를 수신한다. 본 논문에서는 기존의 채널 상관 행렬을 Green 행렬로 근사하여 분석하는 프레임워크를 기반으로 Geometric 행렬로 근사하여 분석하는 방법을 제안한다. Geometric 근사 행렬은 이미 Green 행렬의 특성을 가지고 있다는 점에서 의미가 있으며, 분석 결과와 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 수학적 분석의 정확함을 검증한다.

Ⅰ. 서 론

현재 다양한 6G 서비스들이 빠르고 안정적인 네트워크 연결을 제공해야 하는 필요성에 따라 많은 안테나를 사용해 전송 효율을 높이기 위해 다중 안테나 시스템이 등장하였다. 하지만, 한정된 공간 안에 많은 안테나를 설치하는 것은 현실적으로 많은 제약이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근 이동형 안테나가 등장하였고, 작은 공간 안에서 이동성을 가지는 1차원 이동형 안테나인 유체 안테나에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1].

[2]에서는 유체 안테나 시스템에서 안테나 간 상관관계가 있는 채널의 수학적 분석의 용이성을 제공하고자 채널 상관 행렬을 Green 행렬로 근사화하여 분석하였다. 본 논문에서는 [2]의 연구를 확장하여 채널 상관 행렬을 geometric 행렬로 근사화하여 아웃티지 확률을 분석하는 방법을 제안한다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서는 단일 안테나를 가진 송신기와 수신기가 존재하는 시스템을 고려한다. 이때 수신기는 길이가 $W\lambda$인 선형 안테나이며, W는 안테나 길이 파라미터, λ는 파장이다. 안테나 내부에는 이동이 가능한 유체가 있는데, 안테나 내부에 미리 같은 간격으로 정의된 N개의 포트 (port)에 위치할 수 있다. 무선 채널 벡터 $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{N\times 1} = \{h_1,...,h_N\}^T$는 레일리 (Rayleigh) 페이딩 모델을 가정하고, $\mathcal{CN}(\mathbf{0}_N, \mathbf{R})$의 분포를 따른다. $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{N\times N}$은 안테나 포트 간 상관관계 계수로 이루어진 행렬을 나타낸다. 임의의 k번째 안테나와 l번째 안테나 사이 상관관계 계수는 Jakes 모델을 따르고 다음과 같이 나타낸다.

$$R_{k,l} = J_0\left(2\pi\frac{\Delta d_{k,l}}{\lambda}\right) = J_0\left(\frac{2\pi(k-l)}{N-1}W\right),\ k,l \in 1,...,N, \quad (1)$$

$d_{k,l}$은 k번째 안테나와 l번째 안테나 사이 거리, $J_0(\bullet)$은 제 1종 베셀 함수를 의미한다. $\mathbf{R}$을 고윳값 분해하면 $\mathbf{R}=\mathbf{UDU}^H$으로 나타낼 수 있다. 이때 $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{N\times N}$는 0이 아닌 $\mathbf{R}$의 고윳값을 원소로 가진 대각 행렬이며, $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{N\times N}$는 관련된 고유벡터로 이루어진 행렬이다. $\mathbf{S}=\mathbf{UD}^{1/2}$로 나타내면, $\mathbf{S}$를 채널 상관행렬로 정의할 수 있다. 최종적으로 채널 $\mathbf{h}$와 수신 신호 벡터 $\mathbf{y}$는 다음과 같다.

$$\mathbf{h} = \mathbf{S}(\mathbf{A}+j\mathbf{B}), \qquad \mathbf{y} = \mathbf{hx}+\mathbf{n}, \quad (2)$$

여기서 j는 복소수 단위, $\mathbf{A},\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{N\times 1}$는 서로 독립인 가우시안 랜덤변수로 이루어진 벡터로 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}_N, \mathbf{I}_N \times 1/2)$의 분포를 따른다. $\mathbf{x}$는 송신 신호 벡터, $\mathbf{n}$은 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}_N, \mathbf{I}_N \times N_0)$의 분포를 따르는 가산 백색 가우시안 잡음이다.

본 논문의 시스템은 fluid가 채널의 크기가 가장 큰 포트에 위치하여 신호를 수신하게 되고 이를 M번째 포트로 정의하면, 수신단에서의 아웃티지 조건은 다음과 같다.

$$\{\log_2(1+\sqrt{g_M^2\gamma_M}) < R\} = \{g_M < \sqrt{\gamma_{th}/\gamma_M}\}, \quad (3)$$

여기서 $\gamma_M = E[|x|]^2/N_0$은 활성화 안테나 포트에서의 평균 송신 신호 대 잡음 비 (signal-to-noise ratio, SNR), R은 목표 전송률을 의미한다.

Ⅲ. Geometric 행렬 근사를 통한 아웃티지 확률 성능 분석

이전에 문헌 [2]에서 Green 행렬 근사를 통해 상관관계가 존재하는 fluid 안테나 시스템의 아웃티지 확률을 분석한 바 있다. Green 행렬은 기존 상관 행렬인 $\mathbf{R}$과 가장 가까운 값으로 근사해 만든 새로운 행렬 $\mathbf{C}$를 말하며, $\mathbf{C}$의 역행렬인 $\mathbf{C}^{-1}$이 삼중대각 (tridiagonal) 특성을 가지는 행렬을 말한다. 하지만 원래의 행렬과 새로 근사해 만든 Green 행렬의 노름 (norm)의 차이가 안테나 포트의 개수가 늘어날수록 커져 시뮬레이션 결과와 분석 결과의 성능 차이가 점점 커지는 문제가 있었다.

따라서 본 논문에서는 $\mathbf{R}$을 geometric 행렬로 근사하여 분석하는 방법을 제안하였다. Geometric 상관 행렬은 이미 역행렬이 삼중대각 특성을 가지고 있다는 것이 알려져 있어 기존의 분석 수식을 적용할 수 있다. 상관 행렬 $\mathbf{R}$의 각 요소들과 평균 제곱 오차 (mean squared error, MSE)를 가장 최소로 만들 수 있는 ρ값을 계산하여 geometric 근사 행렬을 계산하였다. MSE 값을 가장 최소로 만들 수 있는 ρ값은 아래의 식과 같다.

$$\mathrm{MSE} = \| R_{i,j} - \rho^{|i-j|} \|^2/N^2,$$
$$\log\rho = \log\sum_{k=1}^{N} k(N-k)f(k)/(n^2(n^2-1)/12) \quad (4)$$

계산한 ρ값으로 만든 geometric 근사 행렬로 모든 안테나 포트의 채널 크기의 joint CDF와 아웃티지 확률을 아래와 같이 수학적으로 계산할 수 있다.

$$F_{|h_1|,\cdots,|h_N|}(R_1,R_2,\cdots,R_N) = (1-\rho^2)$$
$$\times \sum_{i_1=0}^{\infty}\sum_{i_2=0}^{\infty}\cdots\sum_{i_{N-1}=0}^{\infty} \frac{|p_{1,2}|^{2i_1}|p_{2,3}|^{2i_2}\cdots|p_{N-1,N}|^{2i_{N-1}}}{p_{1,1}^{i_1+1}\,p_{2,2}^{i_1+i_2+1}\cdots p_{N-1,N-1}^{i_{N-2}+i_{N-1}+1}\,p_{N,N}^{i_{N-1}+1}} \quad (5)$$
$$\times \prod_{j=1}^{N-1}(i_j!\Gamma(i_j+1))^{-1}\gamma(i_1+1, p_{1.1}R_1^2/2)\gamma(i_1+i_2+1, p_{2,2}R_2^2/2)$$
$$\cdots\gamma(i_{N-2}+i_{N-1}+1, p_{N-1,N-1}R_{N-1}^2/2)\gamma(i_{N-1}+1, p_{N,N}R_N^2/2),$$

$$P_{out}(\gamma_{th}) = F_{|h_1|,\cdots,|h_N|}(\sqrt{\gamma_{th}/\gamma_M},\dots,\sqrt{\gamma_{th}/\gamma_M}), \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{W}$는 $\mathbf{C}^{-1}$을 의미하고 $p_{i,j}$는 $\mathbf{W}$의 i,j번째 원소를 의미한다. $\Gamma(.)$은 감마 함수, $\gamma(.)$은 하부 불완전 감마 함수이다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과 및 결론

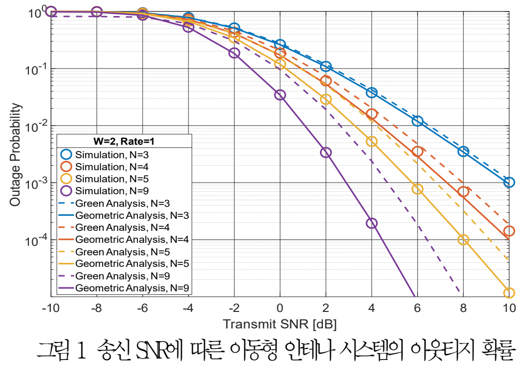

그림 1 송신 SNR에 따른 이동형 안테나 시스템의 아웃티지 확률

그림 1은 송신 SNR에 따른 본 시스템의 아웃티지 확률 성능을 보여준다. 유체 안테나의 길이는 2λ, Rate은 목표 전송률을 의미한다. 안테나 포트가 증가할수록 다이버시티가 높아지므로 아웃티지 확률 성능이 향상된다. 기존의 Green 근사 행렬로 분석한 결과보다 본 논문에서 제안한 geometric 근사 행렬로 분석한 결과가 시뮬레이션 결과와 더 유사한 것을 확인할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 및 한국연구재단의 지원(No.NRF-2022R1I1A3073740)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

[1] K. K. Wong, A. Shojaeifard, K. F. Tong, and Y. Zhang, "Fluid antenna systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 1950-1962, Mar. 2021.
[2] 이예림, 백주영, 염정선, 김종민, 정방철, "6G 무선 네트워크를 위한 Fluid 안테나 시스템의 새로운 분석 방법," JCCI, Apr. 2024.