

다중 안테나 시스템을 이용한 해양 부이 통신 효율성 및 전력 사용 최적화에 관한 연구

장일웅, 김동구

연세대학교

{jiwo949, dkkim}@yonsei.ac.kr

A Study on the marine buoy communication efficiency and power usage optimization using multi-antenna systems

Ilwoong Jang, Dong Ku Kim

Yonsei Univ.

요약

본 연구는 해양 부이의 통신 시스템에서 데이터 전송률과 전력 소비를 최적화하기 위해 다중 안테나 시스템과 DFT(Discrete Fourier Transform, DFT) 빔포밍 기술을 적용한다. CDF(Cumulative Distribution Function) 분석을 통해 통신 성능을 평가하고, 급격한 해양 상태 변화에 따른 다양한 전력 정책을 적용하여 효율성을 개선하는 방법을 제시한다. 이 연구는 통신 기술의 효율성과 해양 부이의 에너지 관리를 향상하는 데 중점을 두고 있다.

I. 서론

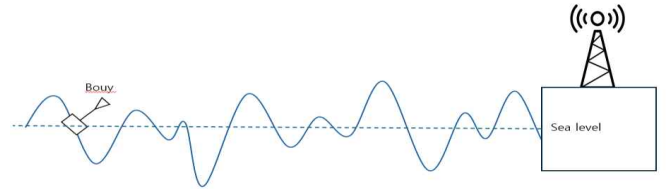
최근 연구에 따르면, 해양 부이를 통한 통신 시스템은 데이터 수집과 장거리 통신을 위해 점점 더 중요해지고 있다. 그러나 이러한 시스템들은 종종 전력 공급의 제한으로 인해 큰 도전에 직면하고 있다. 특히, 해양 부이는 배터리 수명과 전력 효율성에 크게 의존하며, 이는 부이의 운영 기간과 데이터 전송 능력에 직접적인 영향을 미친다.

이와 관련하여, 해양 부이의 전력 관리를 위한 다양한 기술적 접근 방식이 모색되고 있다. 예를 들어, 일부 연구에서는 해양 파동 에너지를 활용하여 부이를 동력으로 하는 새로운 시스템을 개발하고 있다. 이러한 시스템은 해양 파동의 운동 에너지를 전기 에너지로 변환하여 부이의 배터리를 충전하며, 이는 장기적으로 부이의 지속 가능성을 향상할 수 있다[1].

본 논문에서는 해양 부이의 데이터 전송률을 향상하기 위해 다중 안테나 시스템과 DFT 빔포밍 기술을 적용하고 큰 배가 지나가며 만드는 파도 같이 급격한 해양 상태 변화에 다양한 전력 정책을 적용하였다. 이를 통해 통신 성능을 향상하고, 전력 소비를 줄이며, 전반적인 시스템 효율성을 개선할 수 있다. 이 연구는 전력 제약이 큰 환경에서 해양 부이의 성능을 최적화하기 위해 특정 해양 상태에서 부이 안테나 개수별 성능을 비교하고 해양 상태 변화에서의 전력 정책을 적용하여 실험하였으며 지표로는 데이터 전송 속도와 전력 사용량으로 두었다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 N 개의 수신안테나를 가진 해양 통신 부이 시스템을 고려한다. N 개의 수신안테나는 수직으로 배치되어 있다. 또한 본 연구에서 파도의 실제 메커니즘을 모델링 하는 데 있어 개방 해양 파도 조건에 권장되는 통계적 모델인 Bretschneider 스펙트럼을 사용하였다[2]. 해당 스펙트럼은 파도의 각 주파수 ω 에 대한 에너지 밀도 $S_{\eta(\omega)}$ 를 다음과 같이 정의한다.



[그림 1] 파도가 있을 때 부표와 육지 간 통신 그림

$$S_{\eta(\omega)} = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega p^4}{\omega^5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega p}{\omega}\right)^4\right) \quad (1)$$

수식 (1)에서 H_s 는 유의 파고로, 일반적으로 파도의 상위 1/3의 평균 높이를 의미한다. ω_p 는 스펙트럼의 모달 주파수를 나타낸다. 이를 바탕으로 각 파도 성분의 진폭(u)은 다음과 같다.

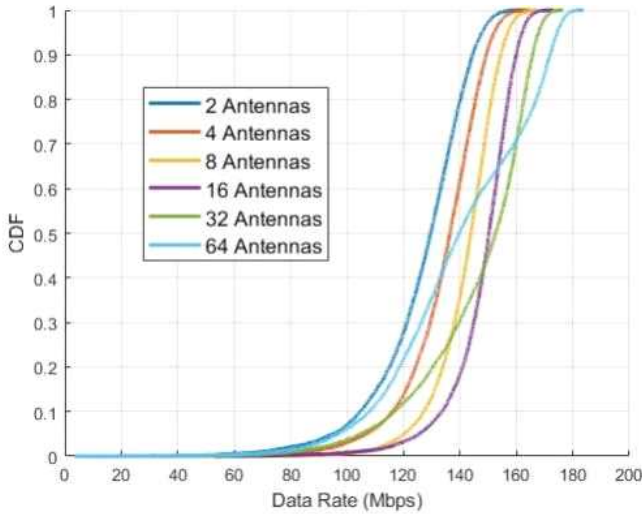
$$u = \sqrt{(2 \cdot S_{\eta} \cdot \Delta f)} \quad (2)$$

수식 (2)에서 Δf 는 주파수 간격이다. 각 파도 성분의 진폭은 Rayleigh 분포를 따른다. 이렇게 계산된 진폭과 위상을 이용하여 해양 표면 고도 $\eta(t)$ 는 다음과 같이 주어진 파도 성분들의 합으로 표현된다[3].

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^{N_f} a_i \cos(\omega_i t + k_i x + \alpha_i) \quad (3)$$

수식 (3)에서 N_f 는 파도 성분의 총 수, a_i 는 i 번째 파도 성분의 진폭, α_i 는 각 성분의 위상으로 균일 분포를 따르고, k_i 는 파동수, x 는 부이가 위치한 좌표, t 는 시간을 나타낸다. 부이의 안테나가 파도의 영향을 받아 기울어지는 각도 θ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\theta = \arctan\left(\frac{\eta(x_n + 2) - \eta(x_n)}{\Delta x}\right) \quad (4)$$



[그림 2] 안테나 개수에 따른 통신 부이 성능

III. 모의실험 환경 및 결과

본 논문에서는 특정 환경에서 해양 부이의 통신 효율성을 평가하기 위해 모의실험 환경을 수행하였다. Seastate 3[4]에서의 파도 영향을 고려하여 다양한 안테나 개수를 통해 데이터 전송 속도의 변화를 측정하였다. 채널은 해양에 위치가 고정되어 있는 부이로 가정하여 다중 경로의 영향을 받지 않아 무시하였고 각도에 따른 DFT 빔포밍을 이용한 이득을 이용하였으며 전체 시스템의 데이터 전송속도는 다음과 같이 계산된다.

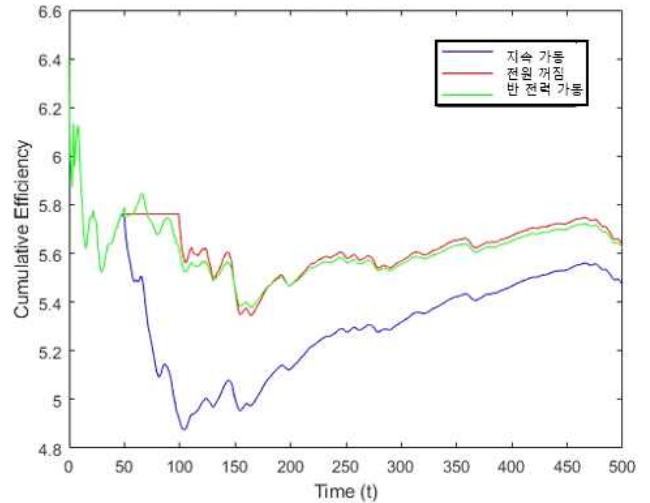
$$R = B \log_2 \left(1 + \frac{Pt \times G}{Pl \times N_0} \right) \quad (5)$$

여기서 B 대역폭, Pt 는 송신 파워, G 는 빔포밍 이득, Pl 은 2-ray 경로 손실, 그리고 N_0 는 가우시안 노이즈 파워이다. 사용 대역폭 10MHz를 사용하였다. [그림 2]은 다양한 안테나 개수에 따른 데이터 전송속도의 CDF를 나타낸다. 그래프에서 안테나 개수가 증가함에 따라 데이터 전송 속도의 CDF가 우측으로 이동하는 것을 보인다. 이는 더 많은 안테나 수를 사용할수록 높은 데이터 전송 속도를 달성할 확률이 증가한다는 것을 의미한다. 그러나 32개와 64개의 안테나 배열에서는 높은 데이터 전송 속도를 달성하는 CDF의 증가율이 상대적으로 완만해진다. 이는 32개 이상의 안테나 배열에서는 빔폭이 좁아져 부이의 흔들림으로 인한 방향 오차가 증가하여, 높은 전송 속도를 유지할 확률이 감소하는 것을 의미한다. 반면 16개의 안테나 배열은 충분한 빔폭과 방향 오차 내성을 제공하여 Seastate 3 조건에서 가장 효율적인 것으로 나타났다.

하지만 대형 선박이 지나가며 발생하는 큰 파도가 발생할 수 있다. 해당 상황에서는 통신부이의 각도가 크게 변할 수 있고 그 영향을 받는 시간 동안 데이터 전송속도가 매우 낮게 나올 수 있기 때문에 부이 시스템을 지속적으로 가동하는 것이 최선의 전략이 아닐 수 있음을 인지하여 큰 파도가 발생했을 경우 3가지의 전력 정책을 설정하여 시험하였다.

1. 지속 가동: 부이의 안테나 시스템을 지속적으로 가동하여 데이터를 연속적으로 전송한다.
2. 반 전력 가동: 부이의 안테나 시스템을 절반의 전력으로 가동하여 전력 소비를 줄이며 통신을 유지한다.
3. 전원 꺼짐: 대형 파도가 부이의 각도를 크게 변화시키는 상황에서는 안테나 시스템의 전원을 꺼버리고 통신을 중지한다.

각 전력 정책에 따른 시간별 누적 데이터 전송량과 소비된 누적 전력의 비율을 분석하여 데이터 전송과 에너지 소비를 모두 고려하였다.



[그림 3] 큰 파도로 인한 전력 정책별 효율성

[그림 3]은 큰 파도가 발생한 50초부터 30초간 전력 정책을 적용한 결과를 보여준다. 파도의 영향으로 인한 부이의 각도 변화가 심한 상황에서는 전원을 끄는 것이 에너지 소비를 줄이면서도 전체적인 시스템 효율성 감소를 방지하는 데 도움이 될 수 있음을 확인하였다. 그러나 전력 정책 이후 효율이 감소하였으며, 분석 결과 큰 파도의 영향이 종료되지 않았음을 확인하였다. 이는 파도의 지속적인 영향으로 인해 부이의 각도 변화가 계속되어 데이터 전송속도가 감소했기 때문으로 보인다.

IV 결론

본 연구에서는 Seastate 3 조건에서 다양한 안테나 개수와 통신 시스템의 효율성 간의 상관관계를 분석하였다. 모의 실험 결과, 16개의 안테나 배열이 가장 효율적인 것으로 나타났다. 이는 충분한 빔폭과 방향 오차 내성을 제공하여 높은 데이터 전송 속도를 일관되게 달성할 수 있었기 때문이다. 또한 대형 선박 통과로 인한 큰 파도 발생 시에는 전원을 끄는 것이 에너지 소비를 줄이면서도 전체적인 시스템 효율성 감소를 방지하는 데 가장 적합한 것으로 확인했다. 그러나 큰 파도의 영향이 지속되어 전력 정책 이후에도 효율이 감소하였음을 확인하였고 이는 파도의 지속적인 영향으로 인해 부이의 각도 변화가 계속되어 데이터 전송 속도가 감소했기 때문으로 보인다. 향후 전력 정책 적용시기와 정책 세분화, 적절한 지속시간에 대해 연구할 계획이다.

참고 문헌

- [1] R. Xu, H. Wang, Z. Xi, W. Wang, and M. Xu, "Recent Progress on Wave Energy Marine Buoys," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 5, p. 566, 2022.
- [2] L. H. Holthuijsen, *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2007.
- [3] Y. Huo, X. Dong, and S. Beatty, "Cellular Communications in Ocean Waves for Maritime Internet of Things," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 10, 2020.
- [4] FSH, MIT Mechanical Engineering, "Bretschneider Spectrum Definition," in 2.017J Design of Electromechanical Robotic Systems, Fall MIT OpenCourseWare, 2009.