

# 해수면 환경에서 저고도 소형 드론의 데이터링크 전파경로 손실에 관한 연구

김재신, 이동혁, 이희수, 서난솔

국방과학연구소

jaesin@add.re.kr

## A Study on the radio path loss of a low-altitude small drone over sea surface environments

Jaesin Kim, Donghyeok Lee, Huisoo Lee, and Nansol Seo

Agency for Defense Development

### 요약

본 논문은 해수면 환경의 저고도에서 운용되지만 장거리 통달거리를 요구하는 소형 드론의 데이터링크 시스템을 고려한다. 이 경우 전파경로 손실 측면에서 검토되어야 하는 3가지 사항에 대해 분석한 결과를 보여준다. 최대 전파가시선 계산, 측정치 기반 통계적 모델을 통한 주파수 감쇄, 그리고 구면 지구 two-ray 모델을 바탕으로 한 해수면 반사파를 검토해야 하는 이론적인 필요성을 설명하고, 시뮬레이션 결과를 통해 150 m 이하 저고도에서 운용 가능한 소형 드론에서 수십 km의 장거리 데이터링크를 사용할 때 전파경로 손실 관점에서 해수면 환경으로부터 받는 정량적 영향을 보여준다.

### I. 서론

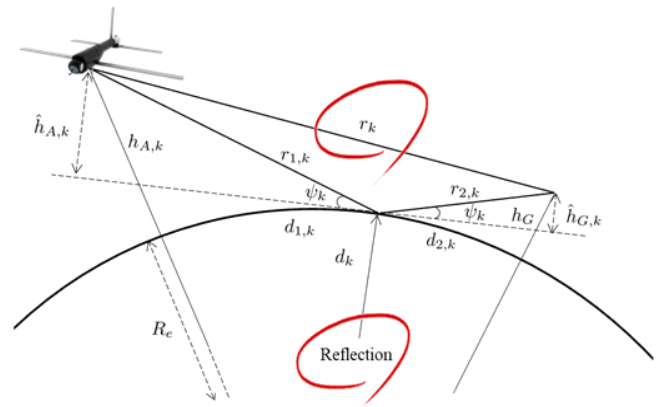
장거리 공중-지상 간 통신시스템에서 지구 곡률과 반사파를 고려한 전파 경로 손실의 예측은 가장 우선적으로 수행되어야 하는 분석이다. 예측된 경로 손실 기반의 링크버지 분석은 통달거리 산출 및 안테나, 송수신기의 주요 사양 등의 결정이 가능하게 된다. 또한, 해상 환경에서 유무인 함정 등의 다양한 플랫폼에서 감시정찰 등의 목적으로 소형 드론을 전개하고 임무를 수행할 때, 공중-지상 간 데이터링크 시스템은 드론의 조종통제뿐만 아니라 수집된 영상정보를 전달하는 역할을 수행한다 [1]. 본 논문에서는 150 m 이하 저고도에서 운용 가능한 소형 드론에서 수십 km의 장거리 데이터링크를 사용할 때 전파경로 손실 관점에서 해수면 환경으로부터 받는 영향을 분석한다.

### II. 본론

공중-지상 간 전파경로 손실 분석을 바탕으로 통신시스템의 통달거리를 분석할 때 아래와 같이 3가지 측면을 고려해야 한다. 첫 번째로 장거리 통신 목적의 공중-지상 간 시스템은 지구 곡률에 의한 전파가시선이 확보되는지 먼저 확인해야 한다. 이는 통신환경이 해수면 반사인지 지표면 반사인지 무관하며 그림 1과 같이 기하학적인 구조로부터 수식에 의해 쉽게 산출될 수 있다. 여기서 유효지구반지름 계수는 전파 굴절과 관련되어 대기에 영향을 받는 인자이지만 일반적인 경우 4/3을 사용할 수 있다.

해상에서 드론을 제어하고 영상을 수신하는 제어국의 높이를 3 m 그리고 드론의 고도는 150 m로 가정했을 때, 최대 전파가시선 거리는 수식에 의해 약 58 km 정도로 계산된다. 그림 1의 수식을 봤을 때, 제어국이나 드론의 높이가 높으면 높을수록 전파가시선이 증가된다는 것을 쉽게 알 수 있지만 실제로 제어국이나 드론의 높이를 상향시키는 것은 드론 기체의 운용고도나 해상 플랫폼의 현실적인 안테나 높이 등을 고려했을 때 매우 어려운 일일 것이다.

두 번째로 주파수에 따른 전파 감쇄 측면을 검토해야 한다. 주파수에 따른 전파 감쇄는 가장 손쉽게 자유공간 손실 모델로 확인할 수 있다. 하지



$$d_{LOS,max} = \sqrt{2R_e h_G + h_G^2} + \sqrt{2R_e h_A + h_A^2}$$

그림 1. 최대 전파가시선 산출

만 자유공간 손실 모델은 대기 손실, 회절 등의 실 환경 영향이 반영되어 있지 않으므로 경우에 따라 측정치 기반의 통계적 모델을 사용할 수도 있다. 국제전기연합(ITU)에서는 다양한 시스템과 주파수에서 경로손실에 대한 예측모델을 권고하고 있다. 그 중에서 ITU-R P.528 모델은 15.5 GHz 이하에서 공중 무선통신 시스템을 위한 경로 손실 데이터를 제공한다 [2]. 다만 본 모델은 평균 대륙성 온대 기후 지역에서 육상 환경의 측정 데이터에 기반한 통계적으로 예측된 데이터로서 다른 환경에 적용할 때는 이를 고려해야 한다.

그림 2는 ITU-R P.528 모델과 자유공간 손실 모델을 바탕으로 앞서 분석한 동일한 제어국 및 드론 높이를 가정하고 L-밴드 주파수와 99 %의 가용도를 고려했을 때 거리에 따른 경로손실을 보여준다. 제어국과 드론과의 거리가 멀어질수록 ITU 모델과 자유공간 손실 모델 간의 차이가 커짐을 알 수 있다. 그리고 앞서 산출하였던 최대 전파가시선인 58 km까지 가시선 확보가 가능함을 빨간색 커브를 통해 확인할 수 있지만 자유공간

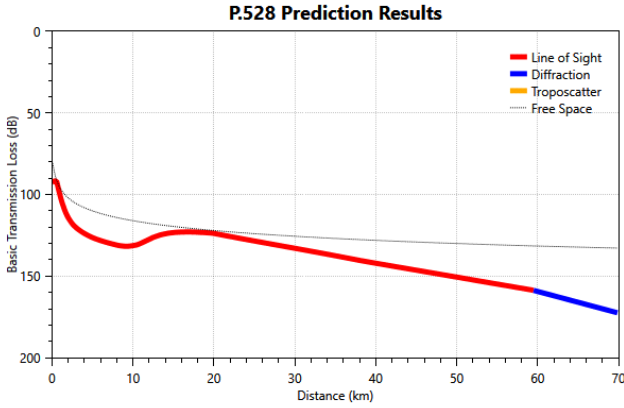


그림 2 ITU-R P.528모델 기반의 경로손실 산출

손실과 비교하면 20 dB이상의 추가 손실을 보여준다. 그 이상 넘어가면 지구 곡률 회절에 의한 전파 도달로 인해 전파 감쇄가 더 커져서 감소율이 더 커짐을 알 수 있다.

마지막으로 장거리 공중-지상 간 링크에서 고려할 사항은 해수면에 의한 반사파 영향이다. 전자파를 반사할 때 간단한 해수면의 경우는 흡수 거울과 같은 역할을 할 수도 있기 때문에 수신단에서 직접파와 반사파로 인한 로빙(lobing)효과로 거리에 따라 수신세기가 출렁거리는 경향성을 보여줄 수 있다 [3]. 따라서 특정 통달거리 지점마다 수신 전파세기가 떨어지는 nulling이 주기적으로 나타날 수 있으므로 드론 데이터링크 송수신기 설계 관점에서 사전에 검토가 필수적이다.

그림 3은 반사파의 영향을 확인할 수 있는 구면 지구 two-ray 모델을 가지고 거리에 따른 경로 손실을 보여준다. 제어국 및 드론의 높이, 주파수는 모두 이전과 동일하다. 그림에서 점선은 위에서 설명한 ITU-R P.528 모델의 99% 가용도 그래프이고, 전체적으로 upper bound로서 고려될 수 있다. 크게 two-ray 모델의 경우 평면 지구 모델과 곡면/구면 지구 모델 2가지로 나눌 수 있는데 통달거리가 커질수록 그림 1에 표현한 구면 지구 모델이 보다 정확한 결과치를 보여준다고 알려져 있다. 연구 [3]에서 보여준 구면 지구 two-ray 모델을 바탕으로 경로 손실을 산출해 보면 그림 3에서 빨간색 그래프로 나타낼 수 있다. 초반 10 km 정도까지는 약간의 로빙 영향이 나타나지만 10 km 이후부터는 로빙 영향이 보이지 않음을 알 수 있다. 로빙 효과의 직접적인 원인은 직접파와 반사파의 경로 차이로 인한 위상 차이에 의해 발생하는 것이다. 본 실험 결과의 이유는 제어국의 높이가 3m로 매우 낮아 직접파와 반사파의 경로 길이 차이가 매우 작고, 통달거리가 커짐에 따라 이 길이 차이가 줄어드는 효과가 더욱 커지기 때문이다. 참고로 파란색의 simplified two-ray 곡선은 정확도는 보다 떨어지지만 기하학을 바탕으로 한 간단한 수식으로 two-ray 영향을 확인할 수 있기에 비교를 위해 추가하였다 [4].

### III. 결론

본 논문에서는 해수면 환경의 저고도에서 운용되는 소형 드론 데이터링크의 전파 경로 손실에 대해 고려해야 할 점 3가지를 확인해보았다. 전파 가시선과 주파수 감쇄 영향을 통해 기본적인 데이터링크 시스템의 링크버킷을 할 수 있고, 추가적인 반사파 영향을 확인함으로써 지향성 멀티 섹터 안테나 또는 다중안테나 등으로 nulling 지점에서 안테나 이득을 상향하거나 보상하는 방법을 시스템 설계 시 선정할 수도 있을 것이다.

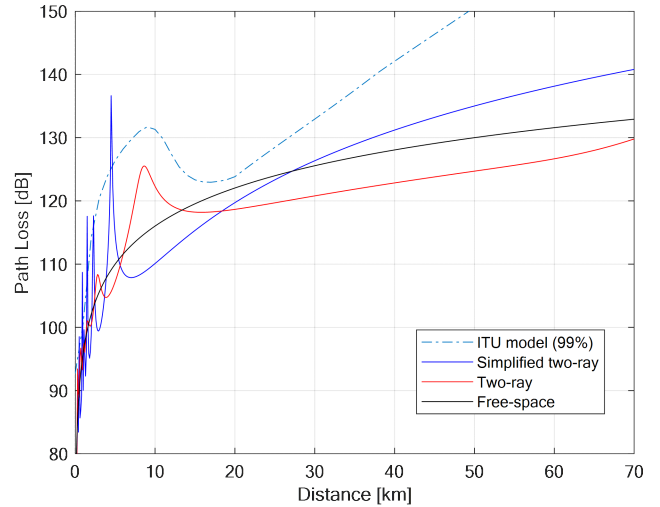


그림 3 구면 지구 two-ray 모델 기반의 경로손실 산출

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(912959201)

### 참고 문헌

- [1] 김태현 외 4. "해상 환경에서 무인수상정용 통신시스템의 전파 통달거리 분석," Journal of the KIMST, Vol. 21, No. 6, pp. 799-806, 2018.
- [2] ITU-R P.528, "Propagation curves for aeronautical mobile and radio navigation services using the VHF, UHF and SHF bands," ITU Radiocommunication Sector, 2012.
- [3] Kim, J, *et al.* "Channel measurements and characterizations for long range air-to-ground communication systems in the UHF band," IEEE Access, pp. 101880-101888, Sep. 2022.
- [4] Lee, Y. H., *et al.* "Near sea-surface mobile radiowave propagation at 5 GHz: measurements and modeling," Radio engineering, vol. 23, no. 3, pp. 824-830, Sep. 2014.