

해상시험장 무선통신망 적용을 위한 대류권 산란 전파 모델 분석

김동섭, 김태현, 안성진

국방과학연구소

dongsup29@add.re.kr

Analysis of troposcatter propagation models for application to maritime test range wireless communication network

Kim Dong Seob, Kim Tae Hyeon, Ahn Sung Jin

Agency for Defense Development

요 약

본 논문은 해상시험장 무선통신망 적용 가능성을 검토하기 위해 ITU-R 권고 P.452, P.617과 P.2001 전파 모델을 대상으로, 육지-해상 140km 구간에 대해 MATLAB 시뮬레이션을 수행하였다. 분석 결과, 해상환경에서 P.617은 P.452보다 상대적으로 큰 산란 손실을 산정하였으며, P.2001은 두 모델의 중간 수준 손실이 나타났다.

I. 서 론

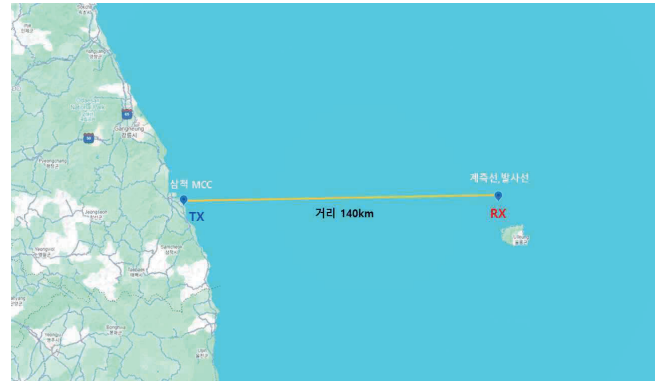
국방과학연구소 해상시험장은 시험통제센터(MCC), 육상 추적소, 해상 추적소를 포함한 계측선과 발사선으로 구성되며, 시험 구성요소 간 유·무선 통신망을 구축하여 운용 중이다. 세부 구성으로 시험통제센터와 육상 추적소는 전용회선으로 연결하고, 나머지 구간은 가시거리(LOS) 기반 무선통신 장비로 구성하여 시험/계측데이터와 음성통신 및 영상을 전송한다. 그러나 가시거리 통신 방식은 선박의 선회 및 기동 시 마스트, 연돌 등과 같은 구조물에 의한 전파 차단, 원해 이동 시 거리 증가에 따른 중계 부담 등으로 신뢰성 확보에 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 육지-해상 구간을 직접 연결하는 트로포스캐터 기반 비가시거리(BLOS) 통신이 고려될 수 있다. 트로포스캐터 링크를 설계할 때는 전파 예측 모델의 적절한 선택이 핵심이며, 국제전기통신연합(ITU)은 여러 권고안을 제시하고 있다. 본 논문에서는 MATLAB 시뮬레이션을 통해 ITU-R P.452, P.617과 P.2001 대류권 산란 모델을 해상환경 조건에서 비교하였으며, 이를 통해 해상시험장 적용 가능성을 검토하였다.

II. 본론

트로포스캐터는 대류권 상층 약 1 ~ 12km의 불균일한(Irregularity) 굴절률 분포에서 발생하는 산란 현상을 활용하여, 가시거리를 넘어 비가시거리 통신을 가능하게 하는 기술이다. 송신 전파의 일부가 대류권에서 산란되어 수신기에 도달하며, 이를 통해 수백 km에 이르는 장거리 통신이 가능하다.

본 논문에서는 해상시험장 무선통신망 적용 가능성을 검토하기 위해 시험통제센터와 울릉도 인근 해역까지 약 140km 구간을 설정하였다. 이 구간은 동해상 비가시거리 통신 시나리오로, 육지에 위치한 시험통제센터와 해상에 향해 중인 계측선, 발사선을 가정할 수 있다. 특히 기존의 가시거리 기반 무선통신망은 수십 km 범위에서는 안정적으로 운용되지만, 원해 구간에서는 중계가 필요하거나 신뢰성이 저하되는 한계를 보인다. 이에 본 연구에서는 강원도 삼척시에서 울릉도 북쪽 해상까지 구간을 분석 대상으로 삼아, 트로포스캐터 기반 무선통신망 설계 가능성을 검토하였다.

[그림 1]은 구글어스를 이용해 살펴본 140km의 통신 시험구간을 보여준다.



[그림 1] 시험통제센터 - 울릉도 인근 해역 시험구간

위의 통신 시험구간에 적용할 ITU-R 권고 P.452, P.617과 P.2001 모델을 비교하였다. 세 모델의 대류권 산란 손실 산정 식은 다음과 같다.

$$L_{bs}(p) = 190 + L_f + 20\log d + 0.573\theta - 0.15N_0 + L_c + A_g - 10.1[-\log(p/50)]^{0.7} \quad (1)$$

$$L_{bs}(p) = F + 22\log f + 35\log\theta + 17\log d + L_c + Y_p \quad (2)$$

$$L_b = L_m - 5\log[10^{-0.2(L_{bm12} - L_m)} + 10^{-0.2(L_{bm3} - L_m)} + 10^{-0.2(L_{bm4} - L_m)}] \quad (3)$$

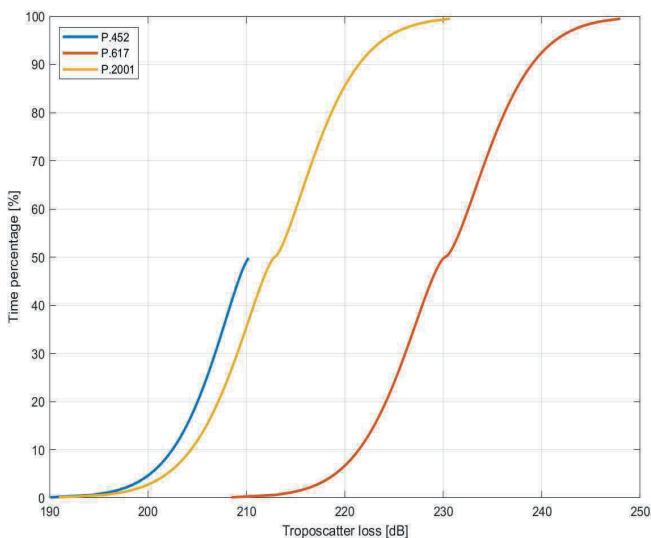
식(1) P.452 전파 모델로, 주파수 f , 거리 d , 산란각 θ , 굴절률 N_0 , 시간을 p 를 주요 변수로 하며, 간섭 분석과 장거리 전파 예측을 목적으로 제시된 모델이다. 산란 손실 항이 포함되어 있으나 상대적으로 낮은 손실을 산출하는 경향을 보인다.[1] 식(2) P.617 전파 모델은, 트로포스캐터 통신 링크 설계를 위한 모델로, 기후 보정항 F 와 시간 확률항 Y_p 를 반영하여 동일

조건에서 P.452보다 큰 손실을 나타내어[2] 보수적인 설계 기준으로 활용된다. 식(3) P.2001 전파 모델은 LOS·회절, 대류권 산란, 덩트 전파 등 다양한 전파 현상을 전력합 형태로 결합하는 종합 모델로, 30MHz ~ 50GHz 주파수 범위와 다양한 기후·지형 조건에 적용이 가능하다. 본 논문에서는 세 모델 간 상대 비교에 초점을 두었으므로, 안테나 결합 손실 L_c 와 기체 흡수 손실 A_g 는 제외하였다. 주파수 대역은 5GHz로 설정했고, 링크 거리는 140km 구간으로 가정하였다. 송신 출력은 63 dBm, 송·수신 안테나의 이득은 각각 39 dBi로 설정하였으며, 시간율 p 는 1%로 링크 가용도 99%에 해당하도록 하였다. 주요 파라미터는 [표 1]에 정리하였다. 또한 본 연구에서는 ITU-R P.453에서 제시하는 중위도 해상환경 평균값을 참조[4]하여 유효지구반경 계수 $k = 4/3$, 지표굴절률 N_0 는 330, 굴절률 기울기 dN 은 -45, 대기 scale height h_b 는 7.35km로 적용하였다. 단, 비교의 현실성을 위해 P.2001의 N_0 는 313으로 설정하였다.

[표 1] 주요 파라미터

| 파라미터 | 값 | 비고 |
|--------|--------|-----------|
| 주파수 | 5 | GHz |
| 링크 거리 | 140 | km |
| 송신 출력 | 63 | dBm |
| 안테나 이득 | 39 | dBi |
| 안테나 높이 | 20 / 5 | Tx/Rx(m) |
| 링크 가용도 | 99% | $p = 1\%$ |

세 모델의 손실 산정식과 [표 1]의 주요 파라미터를 종합하여 MATLAB R2024a 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 동일 조건에서 산출된 대류권 산란 손실은 P.452에서 195.7dB, P.617에서 214.3dB 그리고 P.2001에서 197dB로 나타났다.



[그림 2] P.452, P.617과 P.2001 대류권 산란 손실 비교

[그림 2]는 세 모델을 적용하여 계산한 대류권 산란 손실을 비교한 결과를 보여준다. 분석 결과, P.617은 기후 보정항 F 와 시간 확률항 Y_p 를 포함함으로써 가장 보수적인 결과를 나타내며, 모든 시간율 구간에서 손실 값이

크게 산정된다. P.452는 시간율 p 를 50%까지만 산정할 수 있어 그래프가 절반까지만 표현되며, 이 구간에서는 상대적으로 작은 손실 경향을 보인다. 반대로 P.2001은 전 구간에서 연속적인 곡선을 제공하며, 손실 수준이 P.452와 P.617 사이에 위치하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 각 모델이 산란 공통체적(Common volume) 보정과 기상 인자 반영 절차에서 서로 다른 계산 구조를 채택하기 때문이다. 특히 P.2001은 권고식 내별도의 파라미터 집합을 적용하여 전 구간의 시간율에 대해 연속적인 손실 특성을 제시하므로, P.452 및 P.617과 구별되는 손실 경향을 보이며, 보다 일반화된 예측 모델로 활용될 수 있음을 시사한다. 추가적으로, 시간율 $p = 1\%, 10\%, 50\%$ 조건에서 산란 손실을 산정한 결과를 [표 2]에 요약하였다.

[표 2] 시간율에 따른 전파 모델별 산란 손실 비교

| 시간율 모델 | 1% | 10% | 50% |
|-----------|-------|-------|-------|
| P.452 | 195.7 | 202.5 | 210.3 |
| P.617 | 214.3 | 221.4 | 230.2 |
| P.2001 | 197 | 204.4 | 212.9 |

동일한 시스템 조건에서도 적용하는 전파 모델에 따라 산란 손실이 유의미하게 달라졌으며, 이는 곧 링크마진과 통신 신뢰성에 직접적인 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 따라서 해상환경에서의 무선통신망 설계에서는 각 모델의 특성을 종합적으로 고려하는 접근이 요구된다.

III. 결론

본 논문에서는 ITU-R 권고 P.452, P.617과 P.2001 대류권 산란 전파 모델을 해상환경에 적용하여 약 140km 구간을 대상으로 비교·분석하였다. 시뮬레이션 결과, 세 모델은 서로 다른 손실 경향을 보였으며 P.617은 가장 큰 산란 손실을 산정하여 보수적 설계 기준으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 반면 P.452는 적용 범위가 시간율 50% 이하로 제한되어 장거리 해상환경의 전 구간 예측에는 한계가 있으며, P.2001은 다양한 전파 환경을 대상으로 개발된 범용 예측 모델로서 P.452와 P.617 사이에 중간 수준의 손실을 제시하였다. [표 2]에서도 확인되듯, 모델 선택에 따라 링크 마진과 통신 신뢰성 평가는 달라질 수 있다. 따라서 해상시협망의 무선통신망 설계에서는 각 모델의 특성과 한계를 종합적으로 고려해야 한다. 향후 연구에서는 우리나라 해상환경 특성을 반영한 추가 파라미터 보완과 실측 데이터 검증을 통해 대류권 산란 모델의 정확도를 높일 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] ITU-R P.452, "Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz"
- [2] ITU-R P.617, "Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems"
- [3] ITU-R 2001, "A general purpose wide-range terrestrial propagation model in the frequency range 30 MHz to 50GHz"
- [4] ITU-R P.453 "The radio refractive index: its formula and refractivity data"