

# 수신 한계에 의해 결측되는 경로손실 예측

노연수, 이동엽, 박용우, 박재돈, 최행근\*  
국방과학연구소, \*티앤비전파기술(주)

nes@add.re.kr, dyleee@add.re.kr, pyw@add.re.kr, jaedon2@add.re.kr, \*radioeng@tnbrt.com

## Pathloss Prediction Censored by Receiving Threshold

Eonsu Noh, Dongyeob Lee, Yongwoo Park, Jaedon Park, Haing Kun Choi\*  
Agency for Defense Development, \*TnB Radio Tech

### 요약

전파 경로손실은 측정된 수신신호세기 데이터를 바탕으로 예측할 수 있지만 데이터가 충분하지 않거나 결측된 경우 일반화하여 예측하는데 어려움이 있다. 경로손실이 큰 전파환경에서는 수신신호세기가 미약하기 때문에 장비의 수신 한계 이하의 신호는 결측될 가능성이 높다. 본 논문에서는 주파수와 거리에 따라 결측되는 경로손실 값의 비율을 확인하고 결측 비율이 경로손실 예측에 미치는 영향을 분석하였다.

### I. 개요

전파 환경은 측정된 수신 신호를 바탕으로 수립된 경험적 모델(empirical model)과 광선 추적(ray-tracing) 등 근사화를 포함한 이론적인 전자기적 해석 방법 기반의 결정론적 모델(deterministic model)을 활용하여 예측할 수 있다 [1]. 송수신기 간의 전파 경로손실은 출력, 송수신 안테나 이득, 수신전력 등을 바탕으로 계산할 수 있으며, 경험적 모델은 닫힌 형태(closed-form)의 수식이기 때문에 결정론적 모델에 비해 사용하기 용이하고 계산 속도가 빠르다.

경험적 모델은 새로운 전파환경 혹은 경로손실을 예측하고자 하는 지역의 측정 데이터가 부족할 경우 예측 정확도가 상대적으로 낮다. 또한 경험적 모델이 특정 데이터에 편향(bias)되어 개발될 경우 일반화가 어려울 수 있다. 예를 들어, 큰 경로손실 값에 편향된 모델로 경로손실이 상대적으로 작은 지역의 전파 환경을 예측할 경우 예측 오차가 크게 발생할 수 있다. 거리 및 주파수가 증가함에 따라 경로손실이 커지지만, 측정 가능한 경로손실 최대값은 장비 물리적 한계로 인해 제한적일 수 밖에 없다.

본 논문에서는 UHF 대역에서 거리에 따라 결측 되는 경로손실 데이터의 비율을 확인하고 수신 한계 이하의 수신신호 값들을 고려한 경험적 모델을 도출하였다.

### II. 경험적 경로손실 모델

경험적 모델(empirical) 중 floating intercept (FI) 모델은 측정 데이터를 기반으로 거리에 따른 경로손실을 예측하기 위해 아래의 수식과 같이 정의할 수 있다.

$$PL[dB] = \alpha + \beta \cdot \log_{10}(d) + \chi_{\sigma} \quad (1)$$

식(1)에서  $\alpha$ 는 경로손실 상수 (dB),  $\beta$ 는 거리에 대한 경로손실(PL)의 기울기(slope), 그리고  $\chi_{\sigma}$ 는 평균이 0 이고 표준편차가  $\sigma$ 인 가우시안 랜덤 변수를 의미한다.

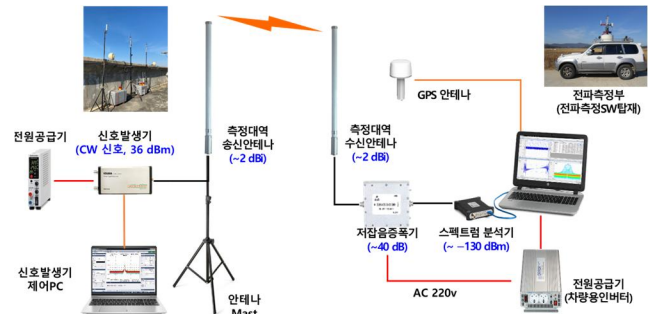


그림 1. 이동형 수신신호세기 측정 프레임워크

이때  $\alpha$ 가 송수신기 간 거리가 1 m 일때의 자유공간손실과 동일하다면 수식 (1)은 Close-in (CI)모델로 해석될 수 있다 [2]. FI 모델의 계수( $\alpha, \beta$ )는 측정값과  $\alpha + \beta \cdot \log_{10}(d)$ 의 차이의 제곱 합(sum of squares error)을 최소화함으로써 도출할 수 있다. 만약 장비의 수신 한계 레벨로 인해 경로손실 값이 결측되는 경우, 측정 데이터가 가우시안 분포를 따른다는 가정하에 likelihood 함수를 정의할 수 있고 log-likelihood 함수를 최대화함으로써 계수( $\alpha, \beta$ )를 추정할 수 있다 [3].

### III. 전파환경 측정 및 분석

경로손실은 국내 교외지역(전북 익산시)에서 측정하였다. 그림 1은 송수신부를 포함한 측정 프레임워크를 보여준다. UHF 대역의 주파수 1,2,3( $f_1, f_2, f_3$ )에서 동작하는 송신 안테나(무지향성, 이득 2 dBi)들을 건물 옥상에 설치하였으며, 수신 안테나(무지향성, 이득 2 dBi)들은 SUV 차량 위에 탑재하였다. 송신부는 각 중심 주파수에서 36 dBm 출력으로 연속파를 방사했고 수신부는 송신부로부터 1 km 이상 떨어진 지점들을 이동하며 수신신호세기를 측정했다. 수신부에는 이득이 약 40 dB 인 저잡음 증폭기를 사용하였으며 기타 잡음 환경 등을 고려했을 때 측정 가능한

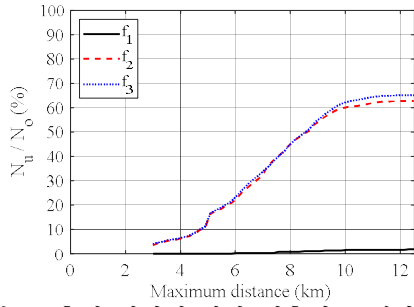


그림 2. 측정 거리에 따라 결측되는 데이터 비율

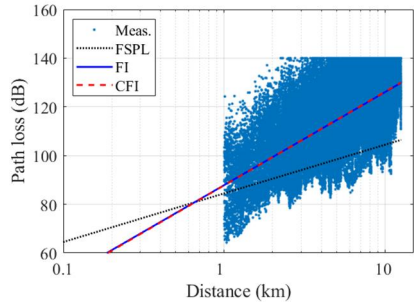


그림 3. 경로손실 측정 및 예측값(주파수 1)

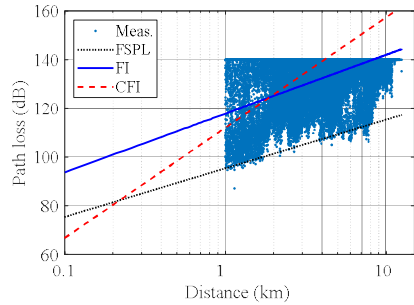


그림 4. 경로손실 측정값 및 예측값(주파수 2)

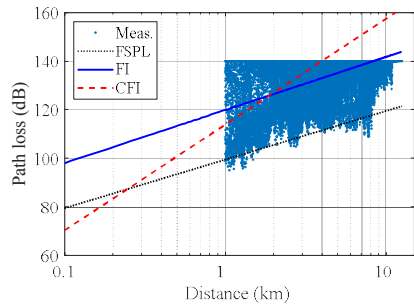


그림 5. 경로손실 측정값 및 예측값(주파수 3)

수신한계레벨(threshold)은  $-100$  dBm(경로손실 약  $140$  dB)으로 판단하였다. 수신한계레벨 이하의 결측된 수신신호값들은  $-100$  dBm 으로 대체하였다.

그림 2 는 수신한계레벨로 측정된 데이터 개수( $N_u$ )와 전체 측정 데이터 개수( $N_o$ )의 비율( $R$ )을 보여준다. 각 주파수에서의 데이터 비율을 측정 거리에 따른 함수로 나타냈으며, 거리와 주파수가 증가( $f_1 < f_2 < f_3$ )함에 따라  $R$  이 증가하였다.  $R$  은 주파수가  $f_1$  일 때 최대 5% 미만이었으며,  $f_2$  와  $f_3$  일 때는 약 9 km 부터 50% 이상의 데이터가 수신한계레벨에 의해 결측되었다.

그림 3~5 는 각 주파수에서 측정된 경로손실과 자유공간손실(FSPL: Free space path loss) 및 경험적 모델을 통해 예측한 경로손실을 보여준다. FI 모델과 결측 데이터를 고려한 FI 모델 (CFI)은 측정된 경로손실 값에 대해 피팅(fitting)되었다. 그림 3 에서는 최대 측정 거리에서의  $R$  이 5% 미만으로 결측 데이터 개수가 작기

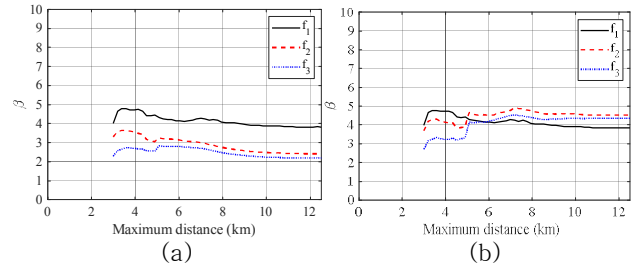


그림 6. 거리에 따른  $\beta$  (a) FI 모델, (b) CFI 모델

때문에 FI 와 CFI 모델의 예측 결과가 유사하였다. 하지만 그림 4 와 5 에서는 최대 측정 거리에서의  $R$  이 약 60% 이상이기 때문에 FI 모델의 예측이 수신한계값에 편향되는 반면, CFI 모델은 결측된 데이터들의 분포를 가정하여 피팅되므로 예측에 확연한 차이를 보였다.

그림 6(a)와 6(b)는 FI 와 CFI 모델의  $\beta$  를 거리에 대한 함수로 보여준다. 그림 6(a)에서  $\beta$  는 약 6km( $R$  이 20% 이상)부터 감소하는 경향을 보인다. 이는 거리가 증가함에 따라 결측 데이터의 영향이 증가하므로 FI 모델이 수신한계레벨에 의한 결측값에 편향되기 때문이다. 그림 6(b) 에서  $f_1$  에 대한 CFI 모델의  $\beta$  는 결측 데이터의 영향이 없기 때문에( $R$  이 5% 미만) FI 모델의  $\beta$  와 유사한 결과를 나타낸다. 하지만,  $f_2$  와  $f_3$  에서는  $\beta$  가 7 km( $R$  이 약 40%)까지 증가하고 이후는 일정한 양상을 보인다. 8km 이상의 거리( $R$  이 50% 이상)에서는 결측된 데이터가 관측된 데이터 보다 많기 때문에  $\beta$  에 큰 변화가 없는 것으로 판단된다. 측정 거리가 최대일 때 FI 모델의  $\beta$  는  $f_1, f_2, f_3$  에서 3.82, 2.41, 2.81, CFI 모델의  $\beta$  는 3.85, 4.53, 4.36 으로 도출되었다.

### III. 결론

측정 거리, 주파수, 가시선 여부 등 다양한 전파 환경 요소들에 의해 측정이 불가능한 경로손실 결측 데이터들이 발생하였다. 측정하고자 하는 전파 환경의 주파수가 높아질수록 거리 대비 결측되는 측정 데이터의 비율이 증가할 것이며, 이는 범용적인 경험적 모델을 개발하는데 큰 걸림돌이 될 수 있다. 따라서 범용적으로 활용할 수 있는 경험적 모델을 개발하기 위해서는 결측 데이터들의 분포와 발생 요소들을 고려할 필요가 있다고 판단된다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 대한민국 정부(국방부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (22-CM-TN-39)

### 참고 문헌

- [1] E. Noh and J. Park, "A two-stage model for enhanced prediction of received signal strength in maritime environments," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024. (doi: 10.1109/LAWP.2024.3398800)
- [2] T. S. Rappaport *et al.*, "Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design," *IEEE Transactions on Communications*, pp. 3029-3056, 2015.
- [3] C. Gustafson *et al.*, "Statistical modeling and estimation of censored pathloss data," *IEEE Wireless Communications Letters*, pp. 569-572, 2015.