

경로생성 및 지형차폐를 고려한 통신영역 생성 방법

우상호^{*.1)} · 김재민¹⁾ · 백인혜¹⁾ · 김기범¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제1기술연구본부

Research of Communication Coverage and Terrain Masking for Path Planning

Sang Hyo Woo^{*.1)} · Jae Min Kim¹⁾ · InHye Beak¹⁾ · Ki Bum Kim¹⁾

¹⁾ The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 26 December 2019 / Revised 17 June 2020 / Accepted 10 July 2020)

Abstract

Recent complex battle field demands Network Centric Warfare(NCW) ability to control various parts into a cohesive unit. In path planning filed, the NCW ability increases complexity of path planning algorithm, and it has to consider a communication coverage map as well as traditional parameters such as minimum radar exposure and survivability. In this paper, pros and cons of various propagation models are summarized, and we suggest a coverage map generation method using a Longley-Rice propagation model. Previous coverage map based on line of sight has significant discontinuities that limits selection of path planning algorithms such as Dijkstra and fast marching only. If there is method to remove discontinuities in the coverage map, optimization based path planning algorithms such as trajectory optimization and Particle Swarm Optimization(PSO) can also be used. In this paper, the Longley-Rice propagation model is used to calculate continuous RF strengths, and convert the strength data using smoothed leaky BER for the coverage map. In addition, we also suggest other types of rough coverage map generation using a lookup table method with simple inputs such as terrain type and antenna heights only. The implemented communication coverage map can be used various path planning algorithms, especially in the optimization based algorithms.

Key Words : Communication Coverage(통신영역), Path Planning(경로계획), Longley-Rice, BER(Bit Error Rate)

1. 서론

최근 비행체들은 통신 성능이 결합되어 표적 명중 여부 및 이동 표적 공격 등의 기능을 결합하여 궁극적으로 네트워크 중심전 NCW(Network Centric Warfare)으로 진화하고 있다. 그러므로 경로생성 분야에서도 통신 성능을 고려하여 경로를 생성하는 연구가 활발히

^{*} Corresponding author, E-mail: bionaver@gmail.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

진행되고 있으며, 기존의 피탐성, 생존성 등 다양한 요소들을 바탕으로 최적의 경로를 생성하여 임무성공 확률을 증가시키는 것을 목표로 한다. 특히 피탐성, 생존성은 지형차폐에 많은 영향을 받으므로 경로생성에 필수적으로 고려해야 하는 사항이다.

기존 통신을 고려한 경로생성 연구들은 일반적으로 가시선 및 최대 통신 가능 여부에 집중하여 경로를 생성하는 연구가 많이 진행되었다^[1-4]. 이러한 방법은 구현이 간단하며, 연산 속도가 빠르므로 단순한 경로생성 문제에서 많이 사용된다. 특히 짧은 통신 거리에서는 정밀한 전파 모델과 오차가 크지 않기 때문에 그 효율성이 높다. 하지만 가시선을 이용한 방법은 불연속 지점이 다량 생성되므로 활용할 수 있는 경로생성 알고리즘이 제한적이다. 불연속 데이터들은 다수의 지역 최소값을 발생시키며, 이러한 지역 최소값은 전역 최적화 및 궤적 계획 경로 생성에 어려움이 발생한다.

다른 전파모델로는 통계적 모델을 이용하는 것이 있으며, Hata, Rician, Rayleigh 등이 대표적이다^[1,2]. 이러한 방법들은 지형을 고려하지 않고, 통계적인 전파 감쇄를 묘사한다. 주로 실제 건물 및 지형을 전부 고려하기 어려운 도시에서 적합하고, Rician 모델은 외곽지역에 전파 감쇄를 통계적으로 묘사한다. 이러한 통계 기반 전파모델은 연산이 매우 빠르나 지형을 고려할 수 없는 단점이 있다.

또 다른 방법으로 상용 또는 공개 통신 시뮬레이터를 이용하여^[5-8] 경로 생성에 접목시키는 방법이다. Table 1은 MANETs(Mobile AdHoc Networks)에서 주로 많이 사용되는 통신 시뮬레이터들을 요약한 자료이며^[9,10], 2006년 기준으로 ns-2 시뮬레이터가 많이 사용되는 것을 알 수 있다. 이러한 시뮬레이터들의 주목적은 라우팅, 망구성, 프로토콜 등의 네트워크 분석을 목표로 하고 있다. OPNET, QualNet, OMNet++ 등은 다양한 전파모델의 연동이 가능하며, 지형을 고려한 전파 모델도 연결이 가능하다.

그러나 이러한 전파모델들은 별도의 라이선스 구입으로 추가적인 비용이 발생한다. 또한 시뮬레이터 연동 노력에 비하여 경로생성에서 직접적으로 얻는 효과는 제한적이다.

최근 Johansen 그룹에서는 정밀한 전파모델을 직접 결합한 경로 생성 연구를 수행하였다^[13,14]. 상기 그룹에서 사용하는 전파모델은 SPLAT!(Signal Propagation Loss, And Terrain)이며, Longley-Rice 모델을 기반으로 인공적인 건물까지 고려하여 전파환경을 묘사하는 전파모델이다. SPLAT!는 전파가시선구역에서는 아직 그 정확성에 논란은 있지만^[13], Longley-Rice 모델이 고려할 수 없는 인공 건물을 고려하는 장점이 있다. 다만 Johansen 그룹에서는 복잡한 SPLAT! 전파모델의 변수에 대한 설명이 전혀 없으며, MILP(Mixed-Integer Linear Program) 경로생성 알고리즘을 사용하므로 미리 통신 영역을 계산하는 방식이 아니다. 그러므로 Johansen 그룹의 최적 경로 생성에 수천초의 시간이 필요하며^[11], 따라서 수초 이내에 경로를 생성해야 하는 환경에서 사용은 부적합하다.

또한 Loskot 그룹에서도 SPLAT!를 이용하여 중계기 문제를 고려한 연구들이 있다^[14]. 이 논문에서는 안테나 및 RF 변수들이 정확하게 명시되어 있고, SPLAT! 모델을 이용하여 중계 가능 여부 문제만 고려하고 있으나, 경로생성을 위한 별도의 연구를 고려되어 있지 않다.

그러므로 본 논문에서는 지형 차폐가 고려된 공학 전파 손실 모델을 이용하여 통신영역 생성 방법을 제안 하였다. 생성된 통신영역은 기존의 가시선 결과에 비하여 연속적인 데이터를 가지는 것이 특징이며, 통신이 가능한 영역에서는 비용(cost) 변화량을 둔감하게 하였다. 그러므로 통신이 가능한 영역에서는 자유로운 경로생성이 가능하며, 불가능한 영역에서는 비용값의 기울기를 이용하여 빠르게 통신이 가능한 영역으로 수렴할 수 있다.

Table 1. Various communication simulators in 2005^[10]

| 시뮬레이터 이름 | 인지도 (%) | 라이선스 | 전파모델 |
|----------|---------|----------|--|
| ns-2 | 88.8 | 오픈 소스 | FS, Two-ray, Rician, Rayleigh |
| GloMoSim | 4 | 오픈 소스 | Two-ray |
| OPNET | 2.61 | 상용 | FS, Hata, Longley-Rics, TIREM, Wallfish |
| QualNet | 2.61 | 상용 | TIREM, R802.11a/b/g, WiMAX, GSM, Link-11, Link-16, EPLRS, Urban, ALE/ASAPs |
| OMNet++ | 1.04 | 학술 용만 무료 | Two-ray, Rician, LogNormal |

2. 본 론

2.1 다양한 전파 전파모델(Radio propagation model)

전파모델은 대원(Great circle), 굴절, 회절, 산란, 시간율, 공간율, 전리층 반사, 환경 감쇄, 다중 경로 등의 전파의 복잡한 현상을 묘사하여 실제 환경과 유사한 결과를 재현하는 모델이다. 많은 전파모델이 존재하며 미 육군에서는 기본적으로 도심, 교외지역을 구분하여 전파모델을 사용한다.

가장 간단한 전파모델은 전파 가시선을 이용한 방법이며, Fig. 1은 지형이 고려된 전파가시선 결과를 보여주고 있다. 그림에서 붉은 영역은 전파가시선에 생성되는 영역이고, 푸른색은 가시선이 생성되지 않는 영역이다. 데이터는 이진수로 저장되므로 기울기 또는 경향성이 없고, 불연속점이 많아 사용할 수 있는 경로 생성 알고리즘에 제약이 있다.

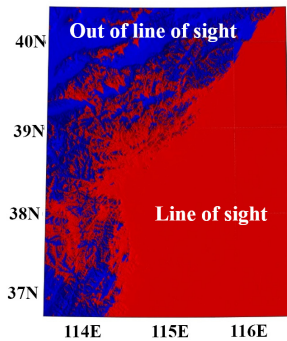


Fig. 1. Example of line of sight with terrain

도심지역에서는 Okumura Hata 및 UPM(Urban Propagation Model)이 미 육군에서 많이 사용되고 있다. Okumura Hata 모델은 복잡한 건물을 무시하고, 특정 도시에서 측정값을 기반으로 경험식 기반의 전파 손실을 예측할 수 있다. UPM은 실질적인 도심 지형 정보를 바탕으로 계산 복잡도를 낮추어 전파 손실을 예측할 수 있는 모델이다. 이는 인공위성 기술의 발달을 바탕으로 복잡한 도시의 건물 환경의 실측을 통하여 예측이 가능해진 것이다.

교외지역에서는 Longley-Rice, Tech Note 101을 기반으로 만들어진 TIREM(Terrain Integrated Rough Earth Model)을 미 육군에서 사용하고 있다. 기반이 된 Longley-Rice 모델은 NTSC(National Television System Committee), DTV(Digital Television)에 활용되면서 다양

한 연구자들이 검증한 기준 모델이다. 하지만 Longley-Rice 모델은 지상 중계만 고려하여 고도에 따른 굴절률을 고려하지 않는다. 그러므로 최대 송,수신기 고도는 3 km(MSL, Mean Sea Level) 미만이며, 이는 고도에 따른 굴절률 변화를 무시할 수 있는 최대 고도이다.

TIREM 모델은 전파 가시선 밖에서는 double knife-edge diffraction, rough-earth diffraction, tropospheric scatter 등 다양한 모델들을 조합으로 총 9가지 계산방법^[15]을 이용하여 다양한 장비에서 실제 사용되고 있다.

최근에는 광선추적(Ray tracing) 기법을 이용하여 정밀한 예측이 가능한 방법도 민간에서 많이 사용된다^[16]. 이러한 방법은 주로 건물 내부에서 복잡한 차폐물을 고려할 시 기존 경험식으로 예측이 불가능한 전파 손실을 예측할 수 있으나, 넓은 지역에서는 연산량 증가로 처리속도의 문제가 발생한다.

광선추적 기법 중 가장 속도가 빠른 Two-Ray 전파 손실 모델의 경우 Fig. 2와 같이 깊은 페이딩을 예측할 수 있다^[17]. 이러한 깊은 페이딩은 섬 등의 기타 지형이 없는 해상 환경에서 관측 및 예상이 가능하지만, 지상에서는 넓은 범위로 발산하며 발산 계수를 지형 형태에 따라 적절하게 입력해야 한다. 모든 지도에서 발산 계수를 입력하여 사용하는 시스템은 ADM(Air Defence Model, IABG) 레이더 모델이 있으며, 지형정보를 SEDRIS(Synthetic Environment Data Representation and Interchange Specification) 기반으로 16가지 Radio Significant Factor로 재질로 나누어서 입력 및 활용하고 있는 것으로 알려져 있다.

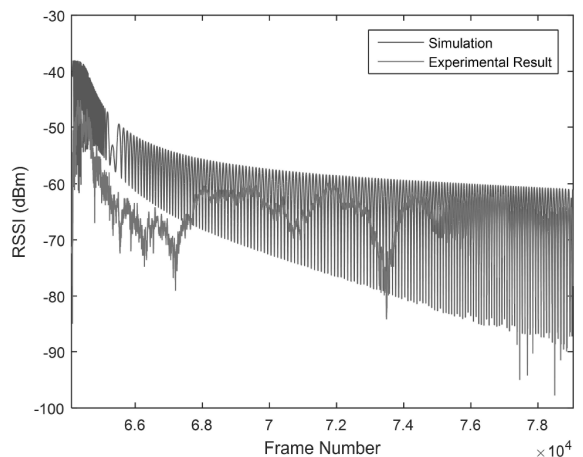


Fig. 2. Example of simulation and experimental result^[17]

그러나 지형 및 재질에 따른 발산 계수를 입력하여도 깊은 페이딩이 발생하는 지점을 정확히 예측하는 것은 불가능하며, 통계적인 페이딩 발생 빈도 예측만 가능하다. 본 논문의 목표는 경로생성을 위한 통신영역 생성이며, 잘못된 깊은 페이딩 발생 예측은 잘못된 경로가 추천되는 현상이 발생된다. 또한 예측된 신호 강도는 실제 측정 시 완전히 유사한 형태가 나오지 않는 것을 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 지형반사를 고려하여 깊은 페이딩을 예측할 수 있는 Two-ray 전파손실 모델의 사용은 적합하지 않다. Table 2는 여러 전파모델의 설명을 요약한 표이다.

Table 2. Summary of typical propagation models^[18]

| 항목 | Okumura-Hata | TIREM | Longley-Rice | Two-ray |
|---------------|--------------|----------|--------------|---------|
| 주파수 (MHz) | 150~1500 | 1~40,000 | 20~40,000 | - |
| 범위 (km) | 1~20 | 1~2,000 | 1~2,000 | - |
| 송신 안테나 높이 (m) | 30~200 | 0~30,000 | 0.5~2999 | - |
| 수신 안테나 높이 (m) | 1~20 | 0~30,000 | 0.5~2999 | - |
| 지형 데이터 | X | O | O | X |

본 논문에서는 경로생성을 위한 지형 차폐가 고려된 통신영역 생성을 목표로 한다. 그러므로 광선추적 기법과 같이 좁은 영역에 정확한 예측을 하는 기법보다는 Longley-Rice, TIREM 모델과 같이 지형이 고려된 결과를 도출되는 모델을 선택하였다. 특히 두 모델은 깊은 페이딩을 예측하지 않으므로 경로생성용 전파모델로 적합하다. 그중 TIREM의 경우 라이선스 구매가 필요하므로, Longley-Rice 모델을 이용하여 선행 연구를 진행하였다.

2.2 신속 통신영역 지도 생성

통신영역 생성은 공학모델을 이용하여 정밀하게 분석하는 것이 일반적이나, 신속한 경로생성이 더 중요한 경우도 있다. 이렇게 연산 속도가 중요할 경우에는 기존 공학 전파모델을 기반으로 분석된 값을 순람표(Lookup-table)로 저장하고, 이를 기반으로 신속 통신영역을 생성하는 방법을 먼저 제안하였다. 사용된 방법

은 실제 지형이 아닌 일반적인 지형에 따른 통신 거리를 나타내고 있으므로, 중계기 배치 및 시스템 설계에도 많이 활용될 수 있다.

사용된 전파모델은 Longley-Rice area mode 이며, 바다, 평지, 언덕, 산악, 거친 산악 5가지로 나누어서 분석한 결과를 활용하였다. 이 모델은 송수신 지점간 지형데이터가 필요하지 않으며, 통상적인 지형에 따른 전파감쇄를 분석할 수 있는 Longley-Rice 모델의 일부이다.

Table 3은 분석에 사용된 주요 변수를 나타내고 있다. 주요 변수에는 기본적인 RF 변수 외 기후(Climat), 대지(Continetal), 및 기준(Criteria)이 결정되면 신뢰성(Reliability) 변수 계산이 가능하다. 신뢰성은 공간 및 시간율로 구성되어 있으며, F(50,90)은 공간율 50 %, 시간율 90 %를 의미한다. 신뢰성 수치는 NTSC Grade A, B 중 보수적인 NTSC Grade B 규정을 참고하였으며, 시간에 따른 전파손실의 변화를 고려하여 전파손실 값이 90 % 확률로 출력된 값 보다 작게 나타나는 것을 의미한다. 기준(criteria)은 지상 플랫폼의 경우 Very careful로, 공중 플랫폼의 경우에는 Random으로 변수를 사용되었다.

안정적인 E_b/N_0 값은 AWGN 채널에서 BER(Bit Error Rate) 결과를 이용하여 계산하고, 간단한 채널코딩을 이용하여 안정적인 E_b/N_0 를 가상으로 입력하였다. 실제 BER 결과는 구현된 시스템에서 측정하여 입력하면 되므로 절대값이 중요한 것은 아니다. 그러므로 본 논문에서는 통상적인 QPSK & 길삼부호(Convolutional Coding, Trellis) 결과를 이용하여 최소 E_b/N_0 를 기반으로 분석하였다. 수식 (1), (2)는 QPSK BER을 Q 함수를 이용하여 기술한 것이며, Fig. 3에서 결과를 볼 수 있다.

$$BER = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}}\right) \tag{1}$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt \tag{2}$$

Fig. 4는 분석된 Longley-Rice 모델과 자유공간 손실 모델을 비교한 그림이다. 약 40 km 이전에는 수치가 큰 차이가 발생하지 않으며, 이후 신뢰성 하강에 의하여 약간의 감쇄가 보이고 있다. 지형 및 굴절에 따라 급격히 감쇄하는 부분도 잘 보이고 있다.

Table 3. Summary of typical RF parameters

| 항목 | 값 |
|--------------|----------------------------------|
| 손실 (dB) | 4 |
| 안테나 이득 (dBi) | 11.5 (Tx), -3 (Rx) |
| 기후 | 대륙성 기후 |
| 신뢰도 | F(50,90) |
| 송,수신 기준 | Very careful (송신) Random (수신) |
| 대기 재질 | Average ground |
| 안정적인 Eb/No | 8.6 dB @ QPSK |

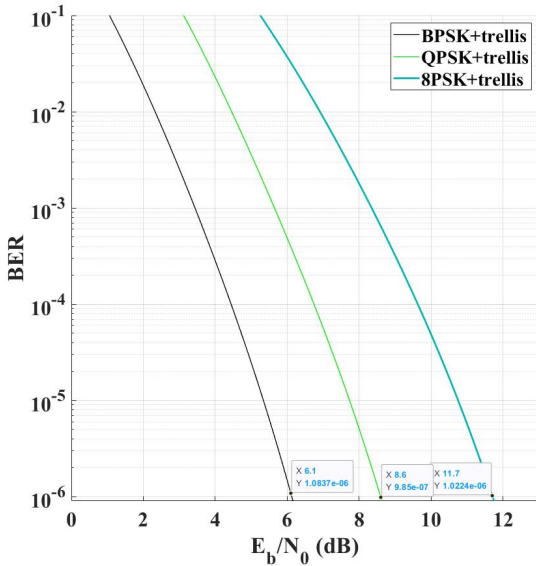


Fig. 3. BER result

Fig. 5는 분석된 결과 중 언덕 및 거친 산악지형에서 안정적인 E_b/N_0 가정을 기준으로 통신가능 범위를 나타낸 결과이며, 실제 지형을 사용하지 않았기 때문에 중계기 배치 위치에 따라 결과가 변하지 않는 장점이 있다. 분석 결과를 보면 수신기 안테나 고도가 낮을 경우에는 중계기 고도가 높아도 통신 가능 거리가 급격히 축소되는 것을 알 수 있다. 그러므로 종말 접근까지 통신이 가능하려면 중계기의 고도가 높고 표적 근처에 배치되어 있어야 하며, 만약 수신기가 100 m 이상에서 정상적으로 동작한다면 통신 가능 거리가 완만히 변화한다.

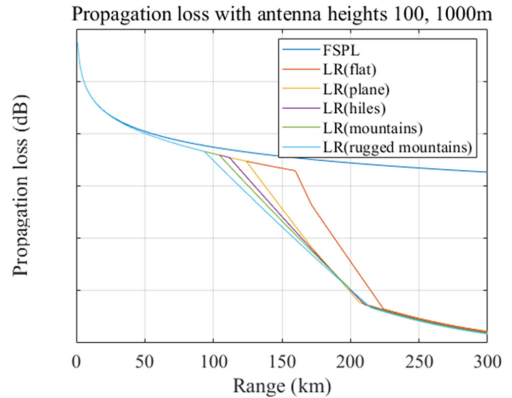
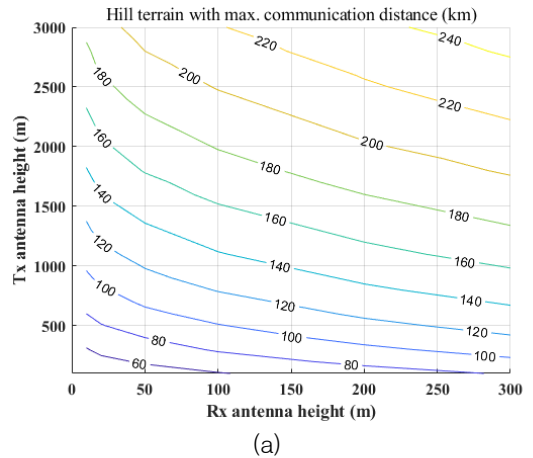
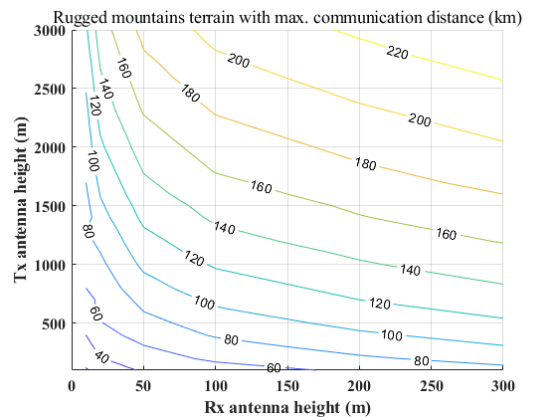


Fig. 4. Propagation loss with antenna height (100, 1000 m)



(a)



(b)

Fig. 5. Communication distance with different terrain. (a) Hill. (b) Rugged mountains

2.3 일반 통신영역지도 생성

신속한 계산이 필요하지 않을 경우에는 모델의 정밀도 향상이 가능하며, Longley-Rice(LR) point to point 모델을 이용하여 이를 구현하였다. 특히 LR 전파모델은 지형에 따른 연속적인 경로 손실값을 계산하므로 불연속적인 데이터가 생성되지 않는 것은 경로생성에 도움이 되는 특징이다.

LR 전파 손실 모델 수식은

$$PL = \begin{cases} \max(0, A_{LOS} + K_{LOS}, & d \leq d_{LS} \\ A_{diff} + K_{diff}d, & d_{LS} \leq d \leq d_{sca} \\ A_{sca} + A_{sca}d, & d \geq d_{sca} \end{cases} \quad (3)$$

이며, d_{LS} , d_{sca} 는 통신 가시선 및 산란 거리를 나타내며, A , K 는 각 상황에 따라 간결하게 표현된 감쇄 항목이다. 특히 LR 모델은 지형의 불규칙(irregularity) 지표를 고려하여 지형차폐를 구현하게 되어 있다. 이 지형의 불규칙 지표를 대략적으로 설명하면, 송,수신기 지상거리에 십분위 범위(interdecile range)에 고도차의 십분위 범위를 계산하는 것이며, 기본 가정은 지형이 정규분포라고 가정하고 있다. 또한 LR 모델은 시간, 장소에 따른 변화값을 예측을 바탕으로 하고 있으며, 이는 기후에 따라 변화한다. 그러므로 예측을 원하는 지형의 기후 및 표면 굴절도(surface refractivity)를 선정하면 시간, 장소에 따라 변화할 수 있는 통계값이 반영되어 계산된다.

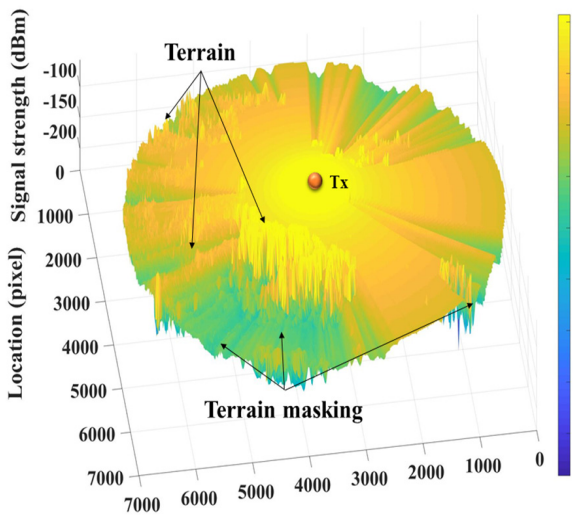


Fig. 6. Predicted signal strength

Fig. 6은 계산된 전파 손실 및 Fig. 5의 대표 변수를 바탕으로 계산된 수신 신호 강도를 나타내고 있다. 위치는 새만금(35.762588, 126.507435) 지형 정보를 입력하여 사용하였으며, 수신 신호 강도는 송신기에서 원형으로 신호가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 신호 강도 데이터를 기준으로 경로를 생성하면 송신기에 최대한 근접한 부분으로 경로가 생성되는 부작용이 발생한다.

또한 언덕 등의 지형에 따라 지형 차폐가 예측되고 있으며, 최초 차폐 언덕에서는 신호가 더 강하게 생성되고 있다. 이는 수신기가 언덕 위로 배치되면서 지형 차폐 영향이 줄어드는 현상이며, 현실에서도 관측된다. 하지만 생성되는 비행경로가 언덕 위를 비행하면서 고도를 변경하는 것은 적합한 경로가 아니다.

그러므로 안정적인 경로 생성을 위해서는 특정 신호강도 이상에서는 통신이 안전하다고 가정하고 비용(cost)값을 둔감하게 만들 필요가 있다. 이를 위하여 경험적인 시그모이드(sigmoid) 함수나 경험적인 가시선 보간^[2]등을 사용할 수도 있으나, 본 논문에서는 통신의 물리적인 특성을 그대로 반영할 수 있는 수정된 Leaky BER(Bit Error Rate)을 제안한다. 수정된 Leaky BER은 수식 (4)에서 표현하고 있다.

$$BER_{lea} = \begin{cases} Q(2E_b/N_0 + \sigma), & E_b/N_0 \geq \alpha \\ -0.05(E_b/N_0 - \alpha) + \lambda, & E_b/N_0 < \alpha \end{cases} \quad (4)$$

Leaky BER은 수식 (1)를 변경한 것이다. σ 값은 안정적인 BER 수치를 조절할 때 사용되는 변수이며, α 값은 Leaky 함수로 변경되는 부분이다. 상수 0.05는 BER 증가 기울기이며 경험적으로 선택된 변수이며, λ 는 $BER_{lea}(\alpha)$ 값이다. Leaky BER의 결과는 Fig. 7에서 나타내고 있으며, 수정된 Leaky 부분을 잘 묘사하고 있다. 만약 수식 1의 BER을 사용하면 BER 0.5 이하에서는 변화가 없으므로 통신이 불가능한 영역에서 빠르게 통신이 되는 영역으로 수렴이 어려울 것이다. Leaky BER을 적용하면 통신이 불가능한 영역에서는 최대한 통신이 가능한 곳으로 경로가 생성되며, 기울기 값이 반영하여 수렴 속도의 향상이 가능하며, 실험 결과 부분에서 간략하게 증명하였다.

Fig. 8에서는 Leaky BER을 이용하여 생성된 통신영역 결과이다. x,y 축의 단위는 pixel로 사용한 지형 데이터 해상도에 따라 거리가 결정된다. 그림을 보면 통신이 가능한 구간에서는 비용(cost)값이 크게 차이가

없는 것을 볼 수 있으며, 지형 차폐는 동일하게 발생한다. 결과적으로 불연속 구간이 없으며, 지형 차폐가 발생하는 곳은 Leaky BER이 급등하는 것을 볼 수 있다. 통상적인 BER 그래프와 다르게 Leaky BER은 SNR이 매우 낮을 경우 BER 값이 1 이상인 구간도 존재하는 것을 볼 수 있다. 만약 통신 유무만 고려한다면 이러한 수치 및 위치는 의미가 없지만, 높은 Leaky BER 값은 통신이 가능한 영역으로 빠르게 수렴을 도와주는 역할을 한다. 이는 최적화 기반의 경로생성 시 경로를 생성하는 시간을 줄여주는 역할을 담당한다.

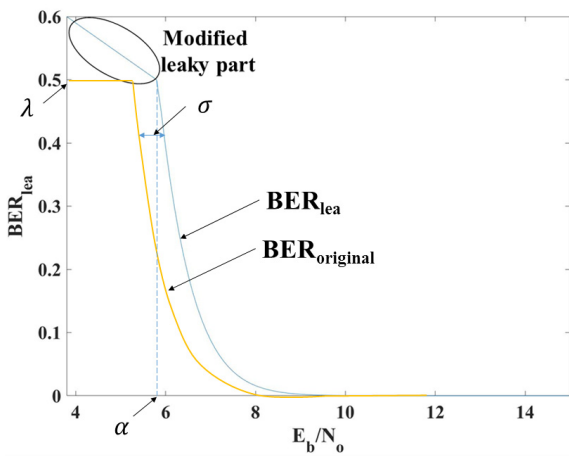


Fig. 7. Example of leaky BER

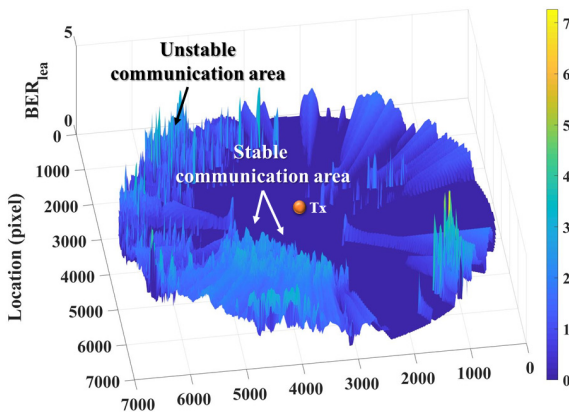


Fig. 8. Example of predicted Leaky BER

다만 최적화 알고리즘에 따라 Leaky BER 데이터의 국소 최저치(local minima)가 수렴 문제를 발생시킬 수 있다. 그러므로 Leaky BER 데이터를 2차원 컨볼루션

(convolution)을 이용하여 평균값을 추출하고 이를 Fig. 9에서 보여주고 있다. 그림에서는 통신이 불가능한 영역에서 국소 최저치가 거의 사라지고 평활화(smoothed)된 데이터만 존재하므로 최적화 알고리즘 특성에 영향을 적게 받을 수 있다.

평활화 작업을 위한 2차원 컨볼루션 계산 시간은 오래 걸리는 작업이므로 GPU를 이용하여 가속하였으며, 통신가능 영역은 설정된 커널의 크기에 따라 축소된다. 그러므로 평활화된 데이터 기반 경로생성 시 통신이 불가능한 지역에서 가능한 지역으로 빠르게 수렴이 가능하지만, 사용할 수 있는 통신영역은 조금 축소가 된다.

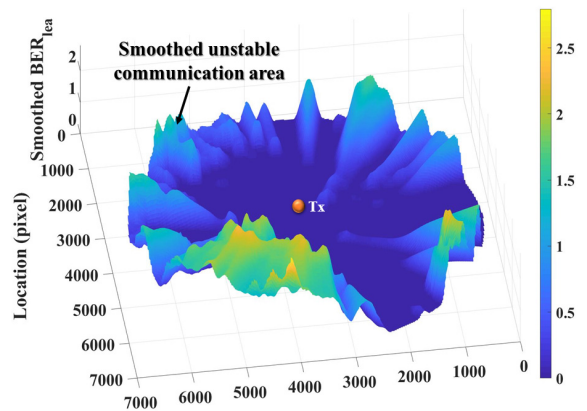


Fig. 9. Example of smoothed leaky BER

3. 실험

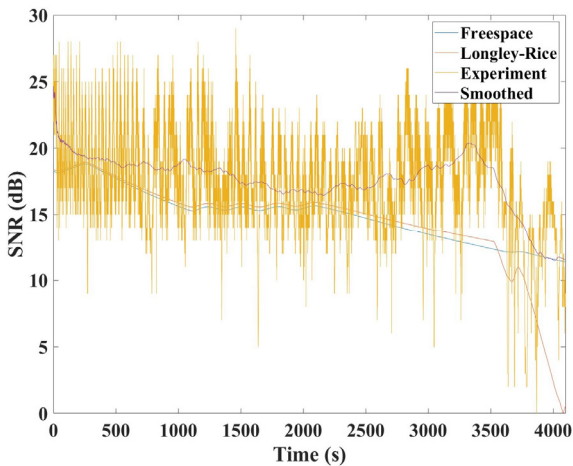
Table 4는 통상적인 BER과 제안된 Leaky BER로 생성된 통신영역에서 전역 최소값으로 수렴하는 속도를 나타내고 있는 표이다. 실험에 사용된 최적화 알고리즘은 기본적인 내부점법(interior-point)이며, Original BER의 경우 BER이 0.5로 포화된 데이터가 많으므로 수렴이 대부분 불가능하다. Leaky BER의 경우 포화되는 데이터가 없으므로 수렴 속도가 차이가 나며, Smoothed 된 데이터에서 국소해가 나올 가능성이 축소된다.

야외 실험은 제주도(33.360119, 126.460342)에서 항공기를 이용하여 전파실험을 총 6회를 수행하였으며, 이중 다이버시티 효과를 고려하지 않은 2회 실험결과를 LR 모델과 비교하였다. 항공실험에서는 비행기에 장착된 안테나가 이득이 방향에 따라 균등하지 않고, 선회

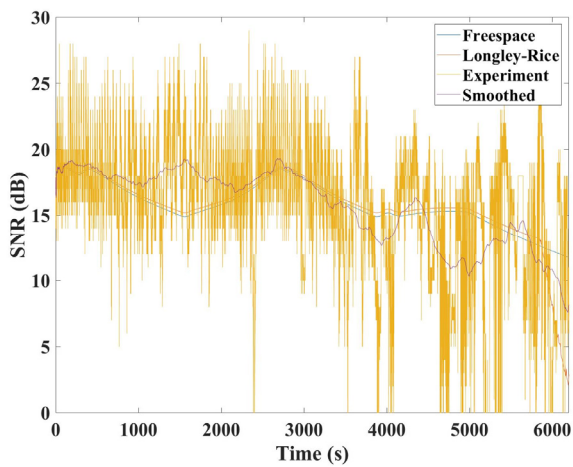
(bank turn)시 비행체에 방해가 받는다. 또한 바다에서 실험하여 다중반사가 발생하지만 LR 모델에서는 이를 고려하지 않는다. 마지막으로 야외 실험은 외부 노이즈에 영향을 받으며, 노이즈는 SNR을 변화시킨다.

Table 4. Comparison of convergence speed

| 비용 함수 | 수렴 속도(s) |
|--------------------|------------|
| Original BER | Impossible |
| Leaky BER | 0.22 |
| Smoothed leaky BER | 0.17 |



(a)



(b)

Fig. 10. Experimental result

대부분의 항공 실험은 Clear LOS(Line Of Sight) 조건이며, LR 모델에서 F(50,50) 기준으로 평균값을 추출하였다. 비행고도는 약 2800~3200 m 정도인데, LR 모델 고도 한계로 고도 3000 m 이상은 3000 m로 고정하였다.

Fig. 10에서와 같이 LR 모델 결과는 Freespace 모델에 비해 SNR이 약간 높게 나오는 것을 알 수 있다. 측정 결과는 다중반사등의 영향으로 변동이 심하므로 이동 평균법을 적용하였으며 이를 smoothed로 표현하였다.

실험 결과를 보면 지형, 지물을 고려하지 않는 Clear LOS 상태에서는 LR, Freespace 모델 중 어느 것을 사용해도 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 다만 특정 시간((a) 약 3500초, (b) 약 5800 초) 이후에는 LR 모델에서 급격한 감쇄가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 지구 곡률반경 및 굴절도가 반영된 결과이다.

Fig. 11은 F(90,50) 기준으로 LR 모델에서 예측된 신호강도 결과 그림이다. 좌측은 지형에 의해 통신이 불가능한 지역이 발생하였고, 우측은 신호강도가 거리에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. 남쪽은 단순히 지형 정보를 넣지 않아 반원 형태로 표시되고 있다.

Fig. 12는 예측된 Leaky BER 결과를 나타내고 있다. 통신이 가능한 영역에서는 0에 가까운 결과를 나타내고 있으며, 통신이 불가능한 영역에서는 결과값이 급증하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13은 평활화된 Leaky BER 결과를 나타내고 있다. 기존 Leaky BER결과는 지형지물에 의하여 다량의 국소 최소값(local minima)이 관측되나, 평활화된 데이터에서는 국소 최소값이 많이 제거된 것을 볼 수 있다.

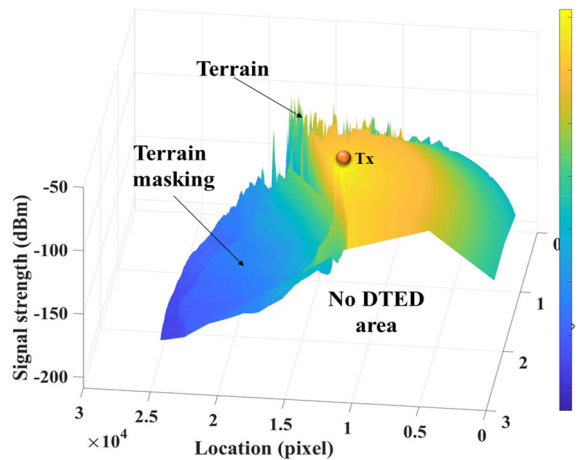


Fig. 11. Predicted signal strength

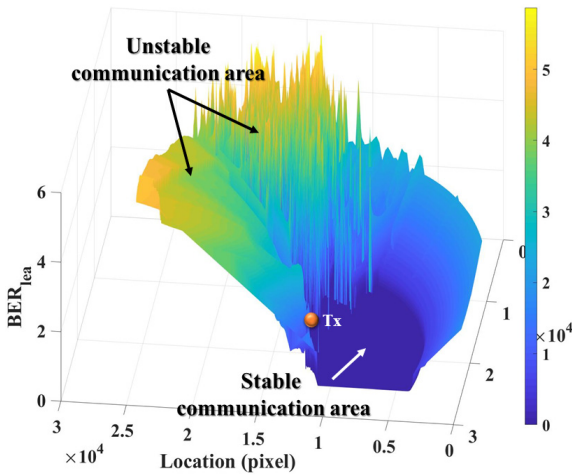


Fig. 12. Predicted Leaky BER

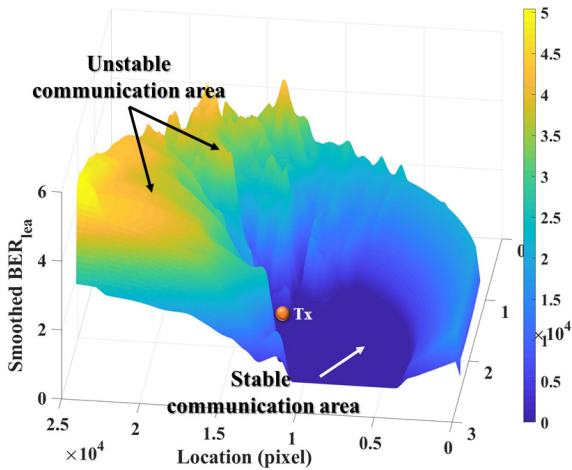


Fig. 13. Predicted smoothed leaky BER

4. 결론

지금까지 Leaky BER를 이용하여 경로생성을 위한 통신영역을 추출하는 방법을 기술하였다. 구현된 방법은 통신이 불가능한 지역에서 통신이 가능한 영역으로 쉽게 최적화가 가능하다. 또한 통신이 가능한 영역에서는 민감도를 축소하여 다른 제약사항들에 더 영향을 받을 수 있도록 한 것이 특징이다. 구현된 Leaky BER을 이용하면 PSO(Particle Swarm Optimization) 또는 궤적 계획 등의 경로생성 알고리즘의 활용이 가능할 것이다. 하지만 본 논문에서 고려하지 못한 사항들

은 아래와 같다.

본 논문에서는 송,수신기 3차원 안테나의 성능을 의도적으로 입력하지 않았다. 경로계획에서는 비행체의 자세를 예상할 수 없는 경우가 많으므로 단일 안테나 성능을 입력하여 비행방향에 무관하게 통신 성능을 예상할 수 있도록 하였다. 그러므로 추후 비행체의 비행방향을 고려한 경로생성을 위해서는 비행방향에 따른 통신영역 생성에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 고정된 위치에서 통신가능 영역 생성만 고려되었으나, 이동하는 타 플랫폼(중계기)를 고려한 경로생성 역시 추가적인 연구가 필요한 분야이다. 이를 위해서는 고속의 연산속도가 바탕이 되어 타 플랫폼의 위치까지 제안이 가능해야 한다.

구현된 모델은 기본적으로 Clear LOS를 기준으로 교정이 되어 있으며, 추가적으로 다양한 반사 환경에서 실험이 필요하다. 또한 전자전 상황에서 통신영역 축소도 추가적인 연구가 필요하다.

마지막으로 LR 모델은 지상 중계기를 기반으로 연구된 모델이므로 최대 예측가능 고도가 3 km 미만인 한계가 있다. 그러므로 이 이상의 중계기 모델을 고려하고 있다면, TIREM 모델을 사용하거나 고도에 따른 굴절 모델을 LR 모델에 추가하여야 한다.

References

- [1] D. Ho, E. I. Grotli, P. B. Sujit, T. A. Johansen, and J. B. Sousa, "Cluster-based Communication Topology Selection and UAV Path Planning in Wireless Sensor Networks," in 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems(ICUAS), pp. 59-68, 2013.
- [2] P. Ladosz, H. Oh, and W.-H. Chen, "Trajectory Planning for Communication Relay Unmanned Aerial Vehicles in Urban Dynamic Environments," Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol. 89, No. 1, pp. 7-25, 2018/01/01 2018.
- [3] R. C. Arkin and J. Diaz, "Line-of-Sight Constrained Exploration for Reactive Multiagent Robotic Teams," 7th International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 455-461, 2002.
- [4] S. Tom, "Safe Trajectory Planning of Autonomous Vehicles," Doctor of Philosophy at the Massachusetts

- Institute of Technology, 2006.
- [5] L. F. Perrone and Y. Yougu, "Modeling and Simulation Best Practices for Wireless Ad Hoc Networks," in Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, Vol. 1, pp. 685-693, 2003.
- [6] D. J. Thunte, "Methodology and Ground Rules for Simulating Airborne Military Communication Systems," in 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings(IEEE Cat. No. 04TH8720), Vol. 2, pp. 1061-1080, 2004.
- [7] S. Demers and L. Kant, "MANETs: Performance Analysis and Management," in MILCOM 2006 - 2006 IEEE Military Communications Conference, pp. 1-7, 2006.
- [8] C. M. Durham, T. R. Andel, K. M. Hopkinson, and S. H. Kurkowski, "Evaluation of an OPNET Model for Unmanned Aerial Vehicle(UAV) Networks," Presented at the Proceedings of the 2009 Spring Simulation Multiconference, San Diego, California, No. 66, pp. 1-8, 2009.
- [9] C. Kwan-Wu, "The Behavior of MANET Routing Protocols in Realistic Environments," in 2005 Asia-Pacific Conference on Communications, pp. 906-910, 2005.
- [10] L. Hogue, P. Bouvry, and F. Guinand, "An Overview of MANETs Simulation," Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Vol. 150, No. 1, pp. 81-101, 2006/03/09 2006.
- [11] E. I. Grötli and T. A. Johansen, "Path Planning for UAVs Under Communication Constraints Using SPLAT! and MILP," Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol. 65, No. 1, pp. 265-282, 2012/01/01 2012.
- [12] A. Grancharova, E. I. Grötli, D.-T. Ho, and T. A. Johansen, "UAVs Trajectory Planning by Distributed MPC under Radio Communication Path Loss Constraints," Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol. 79, No. 1, pp. 115-134, 2015/07/01 2015.
- [13] S. Kasampalis, P. I. Lazaridis, Z. D. Zaharis, A. Bizopoulos, S. Zettas, and J. Cosmas, "Comparison of Longley-Rice, ITM and ITWOM propagation models for DTV and FM broadcasting," in 2013 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications(WPMC), pp. 1-6, 2013.
- [14] S. M. Al-Shehri, P. Loskot, and M. J. J. T. S. Hirsch, "Enabling Connectivity for Tactical Networks in Mountainous Areas by Aerial Relays," Journal Article, Vol. 71, No. 4, pp. 561-575, August 01 2019.
- [15] M. K. Hogan "Advanced Mission Planning Tool For Real-Time Kinematic (RTK) GPS Surveying," ION NTM, Vol. 61, No. 3, pp. 480-488, 2005.
- [16] J. S. Lu, X. Han, and H. L. Bertoni, "The Influence of Terrain Scattering on Radio Links in Hilly/Mountainous Regions," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 61, No. 3, pp. 1385-1395, 2013.
- [17] K. Jaemin, "Overcoming Two-Ray Propagation Loss of Parabolic Trajectory Air-Vehicles via Received Signal Strength Prediction in Maritime Environments," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 42, pp. 1306-1315, 07/31 2017.
- [18] J. D. Park, H. J. Lee, J. S. Park, D. J. Jung, S. H. Chae, G. H. Baek, "Spectrum Management System Development Trend," The Magazine of the IEIE, Vol. 44. No. 4, p. 18, 2017.