

다중경로 페이딩 환경하에서의 저궤도 위성통신시스템 성능 분석

Performance Analysis of Low Earth Orbit Satellite Communication Systems Under Multi-path Fading Environments

이해욱¹ · 류영빈² · 오혁준^{1*}

¹광운대학교 전자통신공학과

²한화시스템 연구소

Hae-uk Lee¹ · Young-bin Ryu² · Hyuk-jun Oh^{1*}

¹*Department of Electronics & Communications Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

²Research Center, Hanwha Systems, Gyunggido, 13591, Korea

[요 약]

저궤도 위성 통신시스템의 경우, 정지 궤도 위성 통신시스템과 달리 지상 기기 기준 상대적으로 고속 기동하여 움직이며, 지상 기기와 이루는 각도 역시 고정되지 않고 넓은 범위에서 가변적으로 되므로 지상에 존재하는 건물, 산 등과 같은 지형물의 위치 및 높이에 따라 위성 통신 시스템임에도 불구하고 다중 경로로 인한 주파수 선택적 페이딩 현상이 나타날 수 있다. 본 논문에서는 저궤도 위성 통신시스템에서 발생할 수 있는 저궤도 다중 경로 페이딩 위성 채널 모델과 저궤도 위성의 고속기동으로 발생하는 도플러 주파수 천이에 대하여 분석하고, 이를 기반으로 다중 경로 페이딩 위성 채널 모델에 적합한 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 및 SC-FDE(Single Carrier Frequency Domain Equalizer) 전송 방식에 대하여 효과적인 등화 기법을 제시한다. 또한, 본 논문에서는 제시된 등화 기법이 적용된 OFDM 및 SC-FDE 전송 방식의 저궤도 다중 경로 페이딩 위성 채널 환경에서의 성능을 모의실험을 통하여 비교 분석하였으며, SC-FDE 방식이 OFDM 방식보다 우수함을 확인하였다.

[Abstract]

Unlike geostationary satellite communication systems, low-earth orbit(LEO) satellite communication systems move at relatively high speeds, and the angle with the ground device is not fixed and varies over a wide range. The propagation channel condition between satellites and ground nodes cannot be assumed line of sight(LOS) anymore. This paper analyzes the low-orbit multi-path fading satellite channel model that can occur in LEO satellite communication systems and Doppler frequency transition caused by high-speed maneuvering of LEO satellites and presents effective equalization techniques for OFDM and SC-FDE transmission methods suitable for multi-path frequency selective fading satellite channel models. In addition, this paper compares and analyzes the performance of OFDM and SC-FDE transmission methods in multipath fading LEO satellite channel environment using the proposed equalization techniques through simulations. Simulation results showed that SC-FDE outperformed OFDM.

Key word : Low-earth orbit, Multi-path, Fading, Multi-carrier, Frequency domain equalizer.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.4.410>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 18 July 2023; Revised 10 August 2023

Accepted (Publication) 29 August 2023 (30 August 2023)

*Corresponding Author ; Hyuk-jun Oh

Tel: +82-02-940-5132

E-mail: hj_oh@kw.ac.kr

1. 서론

차세대 통신시스템은 무선 이동성, 글로벌 커버리지 및 광대역 고속 전송으로 특징지어진다. 이러한 경향을 고려할 때, 위성통신은 글로벌 통신을 위한 가장 효과적인 대안이다. 위성통신은 지형과 해양의 영향을 받지 않기 때문에 미래의 통신망에서 대체 불가능한 역할을 할 것으로 기대된다. 게다가, 지구 동기 궤도 위성과 비교했을 때, 저궤도 위성은 극지 커버리지, 유연한 네트워킹, 낮은 전파 손실 및 지연, 공중 장치 및 다양한 핸드셋이 많은 상용 시스템에 널리 배치된 위성과의 직접 통신할 수 있도록 지원하는 장점이 있다[1].

지상파 영역의 추세와 낮은 주파수 대역에서 발생하는 스펙트럼 혼잡에 대응하여 Ku, K, Ka 및 Q/V와 같은 주파수 대역이 점점 더 저궤도 위성 통신시스템에 인기를 끌고 있으며, 향후 6G 배치는 유사한 고대역폭[2]에서 이루어질 것으로 예상되므로, 저궤도 위성 통신시스템과의 잠재적 통합을 촉진할 수 있다. 그러나 이러한 대역의 신호 전파는 매우 큰 도플러 주파수 이동 및 도플러 확산, 주파수 의존성, 광범위한 커버리지 범위 및 긴 통신거리를 보여주는 등 기존 정지궤도 위성 통신 시스템과는 전혀 다른 무선 채널 환경을 보인다.

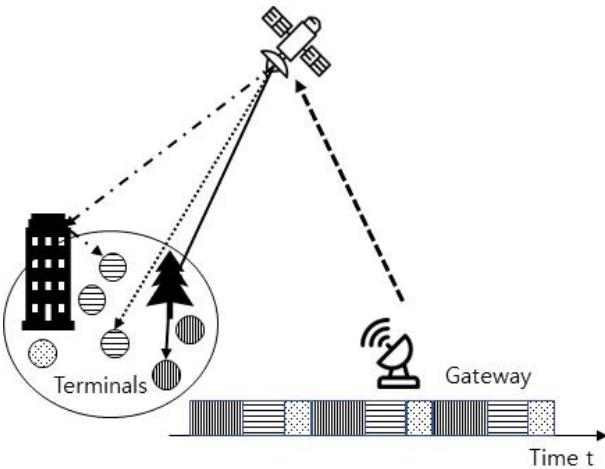


그림 1. 다중 경로 저궤도 위성 통신 전송 특성
Fig. 1. Multi-path LEO satellite communication channel

정지 궤도 위성의 경우에는 고속파에 대해 검증된 채널 모델이 제안되어 있다. 예를 들어, 논문[3]은 신호 대 잡음 비로 특징지어지는 결정론적이고 스폿 빔에 공통적인 채널을 기반으로 채널 모델을 정립하였다. 논문[4]에서, 마르코프 체인에 의해 모델링 된 경로 손실 및 음영, 확률적 모델에 의해 모델링 된 소규모 페이딩을 포함하여 Q-밴드에서 작동하는 정지궤도 위성을 위한 3차원 채널 모델이 제안되었다. 또한 수신기의 움직임과 환경 산란의 영향을 받는 리키안 인자가 고려되었다. 그럼에도 불구하고 이러한 모델은 저궤도 위성 통신시스템에 대하여는 유효하지 않다.

여러 연구를 통하여 저궤도 위성 통신을 위한 다양한 채널 모델이 연구되었다. 논문[5]에서 저자들은 통신 채널 모델을 고려하지 않고 다운 링크에 대한 LEO 기반 NTN(Non Terrestrial Network) 처리량과 용량 성능을 분석하고 평가하였다. 그들은 평균 스펙트럼 효율을 사용하여 매우 작은 빔 폭을 갖는 위성 통신 시스템에 대해 채널을 측정하였다.

저궤도 위성들의 우주 공간에서의 배치 위치에 따라 LEO 궤도를 특징짓는 위성의 고유한 고속 이동은 채널 모델에 대한 특별한 주의가 필요하다. 이 기능은 이동성, 가용성 및 사용자 처리량 측면에서 시스템 성능에 영향을 미치는 다양한 전파 조건을 부과한다. 따라서 LEO 위성 시스템에서는 이동 위성과 지상 사용자 간의 신호 변화를 정확하게 이해하는 것이 기본이다. 이와 관련하여 논문[6]은 채널 모델이 없는 것과 마찬가지로 논문[7]의 3GPP에서 정의한 협대역 모델에 따라 그림자 효과와 고속 페이딩에 대한 K 인자를 가정하여 LEO 위성 간 핸드오버에 대한 성능을 평가하였다. 그러나 이 가정은 저궤도 위성 시스템 구성에서 예상되는 광대역 서비스에는 적합하지 않다. 논문[6]에서는 LEO 기반 위성 통신 시스템의 이동성 성능을 평가하기 위한 시스템 수준 시뮬레이션을 수행했으며, 이동성 측면에서 적합한 채널 모델이 없으므로 위성에서 사용자 연결에 대해 일정한 LOS 구성 요소가 가정되었다. 결론적으로 고도 600 km 이상에서 운용되는 저궤도 위성 통신시스템의 경우 고속의 주파수 선택적 페이징이 다중 경로 페이딩으로 인하여 발생하기 때문에, 기존에 정지궤도 위성 통신 시스템에 사용되어 온 LOS 전송채널을 가정한 전송 방식의 통신시스템을 사용하는 것이 부적합하다는 것이 확인되었다.

저궤도 위성통신은 기존 정지궤도 위성통신 환경과 달리, 주파수 선택적 페이딩과 제한된 스펙트럼으로 어려움을 겪기 때문에 이러한 단점을 극복하기 위해 효율적이고 잘 수행된 전송 방식을 채택해야 한다. 직교 부반송파를 사용하는 OFDM은 주파수 선택적 페이딩에 저항하는 능력을 강화할 뿐만 아니라 스펙트럼 활용도가 높다. 또한 OFDM은 위성 통신 시스템의 업링크 및 다운 링크 모두에서 비대칭 데이터 속도에 적합한 유연한 부반송파 할당을 지원한다. 반면, PAPR(Peak to Average Power Ratio)이 높아 전력효율이 낮으므로 SC-FDE 방식도 OFDM과 함께 이러한 저궤도 위성통신 환경에서 발생하는 주파수 선택적 페이딩에 대응하기 위한 하나의 대안으로 고려할 수 있다. 따라서 위성 시스템에 적용되는 OFDM 방식과 SC-FDE 방식에 대한 비교분석이 중요하다.

본 논문은 저궤도 위성 통신시스템이 운용되는 다중 경로와 고속 도플러 주파수 천이로 인한 주파수 선택적 페이딩 위성 채널 모델에 관하여 기술하고, 이러한 전송채널 환경에 적합한 OFDM 및 SC-FDE 시스템의 등화 성능을 비교 분석한다. 이를 통하여 저궤도 위성 통신에 적합한 최적의 전송 방식이 갖추어야 할 특징을 도출한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 다루는 저궤도 위성 통신시스템의 주파수 선택적 고속 페이딩 채널 모델에 관하여 기술하고, 이러한 채널 모델을 극복할 수 있는 OFDM 및 SC-FDE 전송 방식 각각에 대

한 등화 기법을 제안한다. 제안된 두 전송 방식의 성능을 비교 분석하기 위하여, 기술된 저궤도위성 무선 채널 모델에서의 모의실험을 실시하여 얻어진 결과를 분석한다. 끝으로 III장에서 결론을 맺는다.

II. 저궤도 위성통신 다중경로 페이딩 성능 분석

2-1 저궤도 다중 경로 페이딩 위성 채널 모델

저궤도위성 통신시스템에 대한 완전하거나 명확한 채널 모델은 정해져 있지 않으나, 기존 다중 경로 페이딩에 대한 채널 모델을 기반으로 위성 통신 시스템에서 관측되는 특징들을 반영한 수정 채널 모델들이 대안으로 사용된다. 보통 광대역 서비스용 모델과 협대역 전송에 사용할 수 있는 모델, 모델이 표준화된 경우, 통계적 분포를 나타내는 경우, 기하학적 분석 또는 감쇄 분석 전용일 때 등으로 위성 채널 모델을 구별할 수 있다 [8]. 기존 다중 경로 페이딩 채널 모델들인 TDL(Tapped Delay Line) 및 CDL(Clustered Delay Line) 모델들은 통계적 모델로써, 기하학적 분석을 기반으로 다중 경로를 갖는 경우에 사용되는 대표성이 인정되는 모델이다.

TDL은 서로 다른 지연 시간을 갖는 탭 모델이며, 각 탭은 무작위 변수로 모델링 된다. CDL은 공간 특성을 고려하여 탭이 클러스터로 대체되는 일반 형태로써, CDL은 수신된 신호가 여러 개의 개별 지연 클러스터로 구성된 채널 모델의 한 유형이다. 각 클러스터에는 지연은 같지만, 출발 각도와 도착 각도가 다른 여러 개의 다중 경로 구성 요소가 포함되어 있다. 이를 저궤도위성 통신시스템에 적용하기 위해 위성통신 환경을 정의해야 하는데, 이는 항상 명확한 것은 아니라는 한계가 존재한다.

LEO 위성통신에서 고속 전송 신호의 대역폭은 전송채널의 코히어런스 대역폭보다 커서 채널의 주파수 선택적 페이딩이 발생한다. 일반적으로 주파수 선택적 페이딩 채널을 모델링하는데 WSSUS(Wide-Sense Stationary Un-correlative Scattering) 모델이 사용된다. 이러한 채널은 종종 다중 경로의 고도 중첩과 다중 경로의 지연이 필터의 매개 변수인 시간 변동 임펄스 응답 선형 필터의 직렬연결로 설명된다.

$h(t, \tau)$ 가 시간 $t - \tau$ 에서의 주파수 선택적 페이딩 채널에 대한 임펄스 응답 값일 때, 다중 경로의 개수 L , 진폭 $A_n(t)$, 위상 $\theta_n(t)$, 시간 지연 $\tau_n(t)$ 에 대하여 임펄스 응답은 다음과 같이 일종의 TDL 형태로 표현될 수 있다.

$$h(t, \tau) = \sum_{n=0}^L A_n(t) e^{-j\theta_n(t)} \delta(\tau - \tau_n(t)) \quad (1)$$

LEO 위성은 지상 기기가 지원할 수 없는 광활한 들판과 사막과 같은 외딴 지역을 적용하여 지상 통신을 보완할 수 있다

[9]. 이러한 영역에서는 음영 영역이 존재하지 않기 때문에 가시선(LOS) 구성 요소가 우세하다는 것이 입증되었다. 역으로 이야기하면, 도심과 같은 빌딩 숲을 이루는 곳에서는 LOS 성분이 존재하지 않고 비가시선(NLOS) 성분만 존재할 수 있다는 것이다. 따라서 LEO 위성 채널 모델도 라이시안(Rician) 또는 레일리(Rayleigh) 분포를 갖는 통계적 채널로 모델링 가능하다.

이에 따라, 본 논문에서는 식 (1)에 기반한 TDL 채널 모델을 성능 분석을 위한 LEO 위성 채널 모델 기본 구조로 사용한다. 식 (1)에서, 서로 다른 τ_1 과 τ_2 에 대해 $h(t, \tau_1)$ 와 $h(t, \tau_2)$ 는 상호 상관관계가 없다. WSSUS 가정에 따라 TDL 구조에 기반한 식 (1)은 아래와 같이 간략화할 수 있다.

$$h(t, \tau) = \sum_{n=0}^L a_n \cdot g_n(t) \cdot \delta(\tau - \tau_n(t)) \quad (2)$$

a_n 은 각 경로의 진폭에 대한 통계적 특성을 나타내는 값으로, 도심이 아닌 들판과 같은 트인 지역에서는 a_0 의 경우 라이시안 분포를 갖고 그렇지 않으면 레일리 분포를 갖는다. $g_n(t)$ 복소 가우시안 프로세스이다.

본 논문에서는 다중 경로 페이딩 파라미터의 유연한 설정 및 변경을 위하여 CDL 모델에 안테나 패턴을 고려한 공간필터를 통과시켜 얻어진 TDL 모델을 사용한다. LOS 경로가 존재하는 다중 경로 페이딩 TDL 모델과 LOS 경로가 존재하지 않는 TDL 모델 등 2가지의 채널 모델을 적용하여 성능 분석을 수행하였다.

LEO 위성 채널에 대한 TDL 모델에서 다중 경로 채널의 임펄스 응답은 각 경로가 특정 진폭 페이딩 및 전력 스펙트럼을 갖는 서로 다른 지연을 가진 여러 경로로 구성되는데, 본 논문에서는 3GPP 표준화 그룹에서 측정된 채널 데이터를 사용하였다 [7, 10].

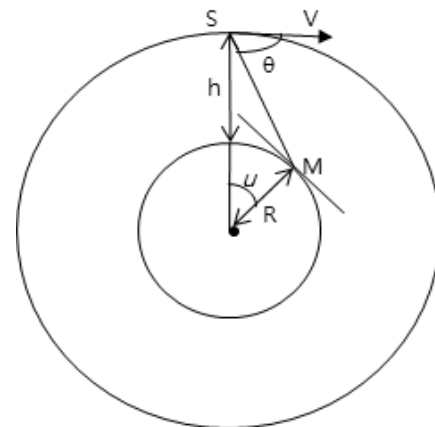


그림 2. 저궤도위성 채널 모델링
Fig. 2. LEO satellite propagation channel modelling

저궤도위성 채널 모델에 있어서, 기존 정지궤도 위성 채널 모델 및 OTM(On The Move) 지상 통신 채널 모델과 차별화되

는 한 가지가 위성의 고속 이동으로 인한 도플러 천이 현상이다. 지상 기기의 이동으로 인한 도플러 천이는 상대적으로 저궤도위성의 고속 운동으로 발생하는 도플러 주파수 천이와 비교할 때, 무시할 수 있는 수준으로 가정할 수 있다. 그림 2는 저궤도위성의 고속기동으로 인한 도플러 천이 현상을 모델링 하기 위한 기하학적 방법론을 나타내고 있다. 지상 기기 또는 단말이 궤도 평면에 위치할 때 최대 도플러 천이가 나타난다.

그림 2에서 위성 S는 원형 궤도를 돌고 있으며, 벡터 V는 궤도 속도 벡터에 해당한다. 도플러 천이는 궤도 평면에 있는 지상 기기 또는 단말기 M에 대해 계산된다. 도플러 천이 값에 영향을 미치는 요인 중 하나는 \overline{SM} 과 속도 벡터 \vec{V} 사이의 각도 θ 이다. 위성이 고도 h에 있고, 지구 반지름이 R이며, 위성 속도가 V이고, 전송 주파수가 F_c 일 때, 위성 운동으로 인한 도플러 주파수 F_d 는 다음과 같이 표현된다.

$$F_d = \frac{F_c}{c} \cdot V \cdot \cos\theta \tag{3}$$

$$= \frac{F_c}{c} \cdot V \cdot \frac{\sin u}{\sqrt{1+\gamma^2-2\gamma\cos u}}$$

$\gamma=(R+h)/R$ 이고, u 는 지구 중심을 기준으로 위성과 지상 기기가 이루는 각도로써, 위성 움직임에 따라 $u(t)$ 는 $V \cdot t/(R+h)$ 형태로 시간에 따라 달라진다. 따라서, 고정된 지상 기기 M에 대하여 저궤도 위성 통신시스템에서는 도플러 주파수가 시간에 따라 변하게 되며, 이에 따라 시간에 다른 도플러 천이 주파수 변화율이 중요한 채널 파라미터가 된다.

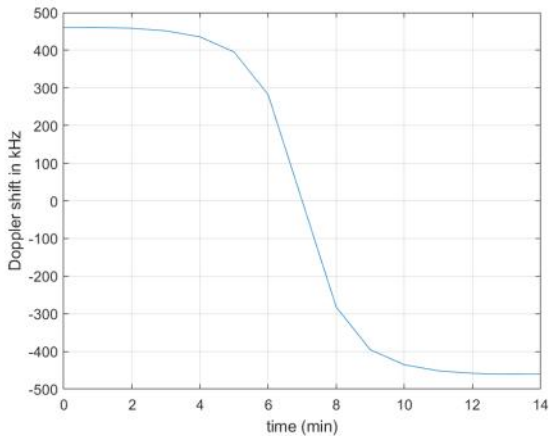


그림 3. 저궤도 위성 채널 도플러 주파수 천이를
Fig. 3. Doppler shift variation rate

예를 들어, 위도 차이에 따른 지구의 자전 속도 차이를 무시하면 고도 600 km 상공을 운항 중인 저궤도 위성에 대하여 속도 V는 7.5622 km/s이며, 통신을 위한 주파수 대역의 중심 값이 20 GHz 일 때, 해당 저궤도 위성이 지구를 중심으로 원운동을 할 때 발생하는 도플러 주파수 천이는 그림 3과 같다.

저궤도 위성을 포함한 모든 위성 통신 시스템에 있어서 신뢰성 있는 성능 분석을 위하여 고려하여야 하는 또 하나의 중요한 요소가 안테나 방사 패턴이다. 대부분의 위성 통신 시스템은 지향성 안테나를 사용하는 것이 일반적이다. 정지 궤도 위성이 경우, 고정된 커버리지로 인하여 지향성이 매우 큰 고정 빔을 운용할 수 있으나, 저궤도 위성의 경우 통신을 위한 커버리지 확보를 위하여 위성의 위치에 따라 적응적으로 지향성 안테나의 반사각을 조정하여야 한다. 본 논문에서는 원형 모양의 커버리지를 갖는 일반적인 반사 안테나에 해당하는 다음과 같은 정규화된 안테나 방사 패턴을 가정한다.

$$\begin{cases} 1, & \theta = 0 \\ 4 \left| \frac{J_1(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \right|^2, & 0 < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \tag{4}$$

여기서 $J_1(x)$ 는 1차 베셀 함수이고, k 는 파동 수로써 $2\pi f/c$ 이며, f 는 작동 주파수, c 는 진공에서의 빛의 속도, θ 는 안테나 메인 빔의 보어 뷰에서 측정된 각도이다. a가 5과장의 수직 반경일 때 대한 정규화된 안테나 방사 패턴을 그림 4에 도시하였다.

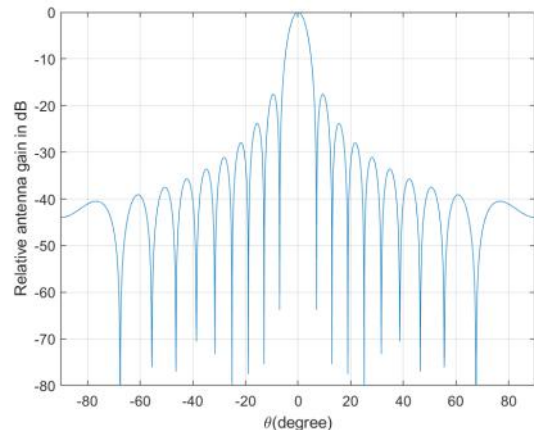


그림 4. 저궤도 위성 안테나 방사 패턴
Fig. 4. LEO satellite antenna gain pattern

고속 페이딩을 위해 채택된 지상 기기 또는 단말의 기준 안테나 패턴은 준 등방성을 갖는 선형 편광안테나로 가정한다. 즉, 한 평면에서 360도 전 방향으로 방사하는 다이폴 안테나를 의미한다.

페이딩 모델과 관련하여 추가로 고려할 수 있는 그림자 페이딩은, 로그 정규 분포로 모델링되며 dB 단위로 표현될 때 표준 편차가 있는 제로 평균 정규 분포를 따르게 된다.

클러터 손실은 주변 건물과 지상의 물체에 의해 발생하는 신호 전력의 감쇠를 모델링하는 것으로써, 이는 표고 각, 반송파 주파수 및 환경에 따라 달라진다. 클러터 손실을 포함한 기타 장거리 경로 손실, O2I 통과 손실, 대기 흡수 손실, 강우 등과 같은 기상으로 인한 감쇄 등과 같은 손실은 SNR에 반영하여 모델

링이 가능하므로 링크 버짓 분석이 아닌 성능 분석이 목표인 본 논문에서는 따로 독립적인 파라미터로 고려하지 않는다.

2-2 다중 경로 페이딩 위성 채널 등화 기법

위에서 기술한 광대역 저궤도위성 통신시스템의 다중 경로로 인한 주파수 선택적 고속 페이딩 채널을 극복하기 위하여 광대역 채널 등화에 효과적인 OFDM과 SC-FDE를 고려한다. 기존 정지궤도 위성 통신 시스템에 사용되던 DVB-S와 같은 단일 반송파와 전송 방식의 경우, 고속 도플러 천이 및 주파수 선택적 채널 열화로 인하여 성능 저하가 크게 나타나거나, 채널 등화를 위한 등화기의 현실적인 복잡도가 매우 크므로, 이를 저궤도 위성 통신시스템에 적용하는 것은 타당하지 않다.

OFDM과 SC-FDE 전송 방식의 성능 분석을 위하여 본 논문에서는 3GPP에서 5G NR(New Radio) 기반으로 NTN 시스템을 지원하는 물리 계층 웨이브폼의 기본 구조를 적용한다. SC-FDE 전송 방식의 경우, 5G NR에 기반한 OFDM 시스템과 기본적으로 같은 구조를 가정하되, 두 방식 간의 원천적인 상이함으로 인하여 발생하는 차이점에 대하여는 공정한 비교를 위하여 CP(Cyclic Prefix) 길이, FFT(Fast Fourier Transform) 크기, 파일럿 오버헤드 등등의 핵심 물리 계층 파라미터를 같은 값으로 설정한다.

두 전송 방식의 성능 분석을 위하여는 채널추정 기법과 등화 기법에 대한 설계가 필요하다. 본 논문에서는 가장 보편적으로 실제 구현에 사용되는 OFDM 및 SC-FDE 시스템의 채널추정 기법 및 등화 기법을 적용하여 성능 분석하였다. OFDM 시스템의 경우, 격자형의 파일럿을 자원 할당된 시간/주파수 영역 내에 배치하고, 이를 기반으로 주파수 영역과 시간 영역에서 일차적인 이동 평균을 구하는 일종의 저역 필터를 사용하고, 이 값에 기반한 2차원 내삽 기법을 통하여 채널을 추정한다. 등화의 경우엔, 한 개의 탭을 갖는 MMSE(Minimum Mean Square Error) 등화기를 사용한다.

SC-FDE의 경우, 비교 분석하는 OFDM 시스템과 같은 자원 할당 비율로 파일럿 신호를 CP 다음에 오도록 배치한다. 이를 기반으로 LMS(Least Mean Squares) 적응 필터를 사용하여 무선 채널의 임펄스 응답을 추정한다. OFDM 시스템과 동등한 수준의 구현 복잡도를 보장하기 위하여 RLS(Recursive Least Squares)가 아닌 LMS 방식의 적응 필터를 사용한다. 추정된 임펄스 응답을 FFT 하여 주파수 영역에서 OFDM 시스템과 동일하게 하나의 탭으로 이루어진 등화를 수행하며, 마지막으로 IFFT를 거쳐 최종 수신 심볼을 복조한다.

III. 모의실험 결과

다중 경로 페이딩 위성 채널 하에서 운용되는 저궤도위성 통신시스템에 적용 가능한 OFDM 시스템과 SC-FDE 시스템의 성능 비교분석을 위하여 2.1에서 기술한 채널 모델에서 2.2에 기술한 3GPP 5G NR 시스템과 기본적인 구조가 같은 물리 계층

웨이브폼 파라미터에 따라 모의실험을 수행하였다. 직접적인 LOS 경로가 존재하는 일반적인 경우뿐만 아니라, LOS 경로가 직접적으로 존재하지 않는 도심 환경에 대하여도 모의실험을 수행하였다. 2.1에서 기술된 TDL 구조를 갖는 다중 경로 페이딩 저궤도위성 채널 파라미터는 아래 표와 같으며, 딜레이 스프레드는 30ns이다[7, 10].

표 1. LOS 경로가 존재하는 다중 경로 위성 채널 TDL 모델
Table 1. Multi-path fading TDL model with a LOS path

Path No.	Normalized delay	Relative Power [dB]	LOS/NLOS
1	0	-0.284	LOS
2	0	-11.991	NLOS
3	0.5596	-9.887	NLOS
4	7.3340	-16.771	NLOS

표 2. NLOS 다중 경로 위성 채널 TDL 모델
Table 2. NLOS multi-path fading TDL model

Path No.	Normalized delay	Relative Power [dB]	LOS/NLOS
1	0	0	NLOS
2	1.0811	-4.675	NLOS
3	2.8416	-6.482	NLOS

중심주파수는 20 GHz, 위성 고도는 600 km, 단말 속도는 3 km/h를 가정하였으며, 2.1에서 식 (3)으로 주어진 위성 안테나 방사 패턴과 지상 기기 또는 단말용으로 2.1에서 기술된 준 등방성 선형 편광안테나를 가정하였다. OFDM 및 SC-FDE 시스템은 동일하게 4,096개의 부반송파 개수, 30 kHz 부반송파 간격, 122.88 MHz의 샘플 속도, 최대 3,300개 (275 RB) 부반송파 할당 가능, 2.86 us 및 2.34 us 길이의 CP 등등 5G NR 시스템과 같은 물리 계층 파라미터로 설정하였다. 이는 약 100 MHz의 대역폭에 해당하며, 파일럿 오버헤드는 18%이고, 변조 방식은 가장 기본 성능 분석을 위하여 QPSK를 사용하였다. 본 논문에서는 실제 채널추정을 통한 등화 성능을 통하여 실제 OFDM 및 SC-FDE 시스템의 다중 경로 페이딩 위성 채널 상황에서 실질적인 저궤도위성 시스템의 성능을 비교 분석하는 것이 목적이므로, 초기동기의 경우 OFDM 및 SC-FDE 시스템과 독립적으로 5G NR 시스템의 초기동기를 위한 물리 채널들을 이용하여 정상적으로 수행되었다고 가정하였다.

그림 5와 6에서 보듯이, LOS 경로가 존재하는 다중 경로 페이딩 위성 채널의 경우엔 OFDM 전송 방식이 약 1 dB 우수한 성능을 나타내지만, LOS 경로가 존재하지 않는 NLOS 다중 경로 페이딩 채널에 대하여는 반대로 SC-FDE 방식이 5 dB 이상 우수한 성능을 보인다.

두 전송 방식의 공정한 성능 비교를 위하여는 각 전송 방식의 PAPR을 비교하여야 한다. PAPR이 높을수록 전력증폭기 출력을 백오프하여 송신하여야 하므로, 이는 결국 SNR에서 손해를 보는 것과 같다. 단일 반송파 시스템인 SC-FDE 전송 방식이 다중 반송파 시스템인 OFDM 방식에 비하여 약 2.5 dB 이상

PAPR 측면에서 우수한 성능을 갖는다. 이를 고려하면, 결론적으로 SC-FDE 방식이 OFDM 방식에 비하여 LOS 경로 존재 유무에 상관없이 다중 경로 저궤도 위성 채널 특성에 대하여 우수함을 확인하였다.

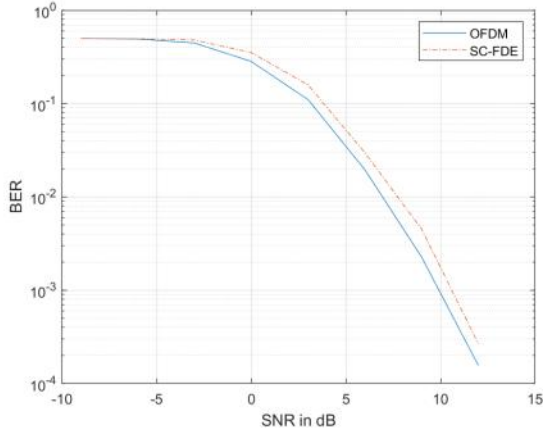


그림 5. LOS 경로가 존재하는 경우 BER 성능 곡선
Fig. 5. BER curve for the TDL model with a LOS path

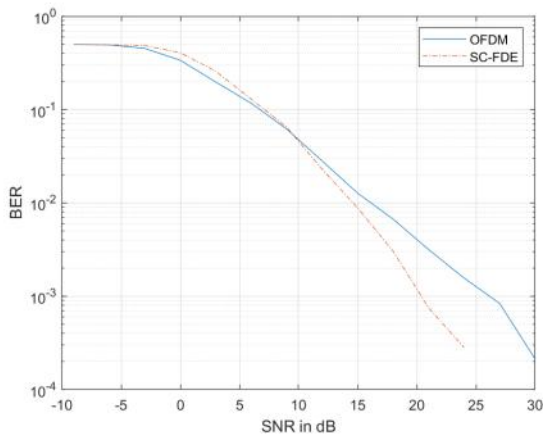


그림 6. NLOS 다중 경로 위성 채널 BER 성능 곡선
Fig. 6. BER curves for the NLOS TDL model

IV. 결 론

본 논문에서는 정지 궤도 위성 통신시스템과 달리, 저궤도 위성 통신시스템에서는 다중 경로 주파수 선택적 고속 페이딩 채널 현상이 나타날 수 있다는 근거를 기술하였다. 지상 기기 또는 단말을 기준으로 저궤도 위성이 지표면으로부터 부상하여 다시 반대편 지표면으로 이동하는 일종의 고속기동으로 인하여, 지상 기기 및 단말과 이루는 가변적인 각도에 따라 지상에 존재하는 지형물의 위치 및 높이에 의해 다중 경로로 인한 주파수 선택적 페이딩 현상이 나타날 수 있음을 보였다. 또한, 저궤도 위성 통신시스템에서 발생하는 저궤도 다중 경로 페이딩 TDL 채널 모델 및 도플러 주파수 천이에 대하여 분석하고, 이

를 기반으로 다중 경로 페이딩에 적합한 전송 방식으로 OFDM 및 SC-FDE를 고려하여 두 방식의 성능을 비교 분석하였다. 분석 결과, OFDM 방식의 성능이 LOS 경로가 존재할 때는 더 우수한 것으로 보였으나, 실제 PAPR을 고려하면 SC-FDE가 LOS 경로 유무에 상관없이 다중 경로 저궤도 위성 채널에 더 적합하다는 것을 확인하였다.

Acknowledgments

이 논문은 2023년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2021M1B3A3102358)과 2022년 광운대학교 우수연구자 사업 지원을 받아 수행된 연구 결과이다.

References

- [1] O. Kodheli, E. Lagunas, N. Maturo, S. Sharma, B. Shankar, J. Montoya, J. Duncan, D. Spano, S. Chatzinotas, S. Kisseleff, J. Querol, L. Lei, T. Vu, G. Goussetis, "Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 23, No. 1, pp. 70-109, Jan. 2021.
- [2] C. Wang, J. Huang, H. Wang, X. Gao, X. You, and Y. Hao, "6G Wireless Channel Measurements and Models: Trends and Challenges," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 15, No. 4, pp. 22-32, Dec. 2020.
- [3] E. Lutz, "Towards the Terabit/s satellite-interference issues in the user link," *International Journal of Satellite Communications and Networking*, Vol. 34, pp. 461-482, June 2015.
- [4] L. Bai, C. Wang, G. Goussetis, S. Wu, Q. Zhu, W. Zhou, E. Aggoune, "Channel Modeling for Satellite Communication Channels at Q-Band in High Latitude," *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 137691-137703, Sep. 2019.
- [5] J. Sedin, L. Feltrin, and X. Lin, "Throughput and Capacity Evaluation of 5G New Radio Non-Terrestrial Networks with LEO Satellites," in *Proceeding of the IEEE Global Communications Conference*, pp. 1-6, Dec. 2020.
- [6] E. Juan, M. Lauridsen, J. Wigard, and P. E. Mogensen, "5G New Radio Mobility Performance in LEO-based Non-Terrestrial Networks," in *Proceeding of the IEEE Globecom Workshops*, pp. 1-6, Dec. 2020.
- [7] 3GPP TR 38.811. "Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks," 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.
- [8] V. M. Baeza, E. Lagunas, H. Al-Hraishawi, and S.

Chatzinotas, "An Overview of Channel Models for NGSO Satellites," in *Proceeding of the IEEE 96th Vehicular Technology Conference*, London, United Kingdom, pp. 1-6, Sep. 2022.

[9] W. J. Vogel and J. Goldhirsh, "Fade Measurements at L-band and UHF in Mountainous Terrain for Land Mobile

Satellite Systems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 36, No. 1, pp. 104-113, Jan. 1988.

[10] 3GPP TR 38.901. "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz," 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.



이 해 옥 (Hae-Uk Lee)

2023년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 학사
2023년 3월 ~ 현재: 광운대학교 전자통신공학과 석사과정

※관심분야: 위성통신, 지능형신호처리, 인공지능 반도체



류 영 빈 (Young-Bin Ryu)

2021년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 학사
2023년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 석사
2023년 2월 ~ 현재: 한화시스템 연구원

※관심분야: 위성통신, 통신신호처리



오 혁 준 (Hyuk-Jun Oh)

1999년 8월 : 한국과학기술원 전자 전산학과 박사
2001년 1월 ~ 2004년 8월 :미국 퀄컴 QCT 3GPP 사업부
2004년 3월 ~ 현재: 광운대학교 전자통신공학과 교수

※관심분야: 위성통신, 통신신호처리, 레이다신호처리, 인공지능