

6G 저궤도 IoT 위성통신 시스템용 자원 도약 기반 비허가 다중접속 기법

송용진, 이영석, 정방철
충남대학교 전자공학과

e-mail : yjsong@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Resource Hopping-based Grant-Free Multiple Access Technique for 6G LEO Satellite IoT Communication Systems

Yong-Jin Song, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

Abstract

In this paper, we propose a novel resource hopping-based grant-free multiple access (RH-GFMA) with repetition for low-Earth orbit (LEO) satellite-based Internet-of-Things (IoT) communication systems. LEO satellite-based IoT networks must take into account sporadic IoT communication traffic as well as the characteristics of satellites, such as significant path loss and relatively high latency. To solve this problem, RH-GFMA technology is introduced, which allows IoT devices to communicate with the LEO satellite by repeatedly transmitting signals while hopping wireless resources. Through extensive simulations, we verify that the proposed technique can significantly improve the bit-error rate (BER) performance of the LEO satellite-based IoT communication system.

I. 서론

6세대(sixth-generation: 6G) 이동통신 시스템에서 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT)은 새로운 수준의 서비스 품질(quality of service: QoS)을 제공하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 특히, 6G 이동통신 시스템에서 논의된 전역 통신 커버리지를 포함한 QoS를 만족시키기 위해, IoT와 비지상 네트워크(non-terrestrial network: NTN)의 통합이 주목을 받고 있다 [1]. NTN 기술 중에서도 저궤도(low-Earth orbit: LEO) 위성은 낮은 지연시간, 다른 위성에 비해 감소된 경로 손실, 그리고 광범위한 통신 커버리지를 제공할 수 있어 NTN-IoT 시스템을 위한 핵심 기술로 평가되고 있다. 그러나, NTN-IoT 시스템은 대규모 IoT 기기 연결성, 산발적인 통신 트래픽과 같은 IoT 통신 시스템의 특성뿐만 아니라 NTN 시스템의 문제 등을 공동으로 고려해야 하므로 NTN-IoT 시스템용 무선 전송 및 접속 기술 개발이 매우 필요한 실정이다 [2].

비허가 다중 접속(grant-free multiple access: GFMA)은 종래의 허가 기반의 임의 접속 후 자원 할당 방식과 달리 기지국의 별도 허가 없이 IoT 단말이 기지국에 접속하여 데이터를 전송할 수 있는 기술이다. 이러한 GFMA 기술은 LEO 위성 기반 IoT 통신 시스템에서 위성의 높은 이동성과 높은 지연시간 특성을 고려할 때 기존 허가 기반 방식 대비 효과적인 IoT 통신 트래픽 수용이 가능할 것으로 예상된다. 그러나, GFMA 기법은 단말이 동일한 무선 자원을 이용하여 데이터를 전송하는 자원 충돌이 발생할 수 있

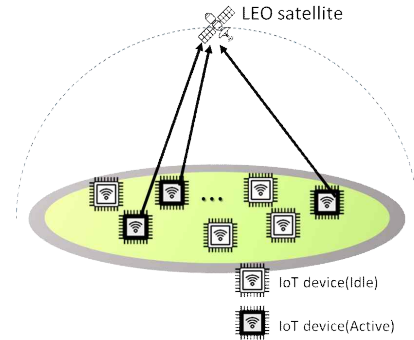


그림 1 LEO 위성 기반 IoT 통신 시스템 모델

으며, 이는 통신 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 LEO 위성 기반 IoT 통신 시스템에서 NTN 특성을 고려한 자원 도약 기반 GFMA(resource hopping-based GFMA: RH-GFMA [3]) 기술 적용을 제안한다. 이때, 위성의 속도를 고려할 때 hybrid ARQ(automatic repeat request)와 같은 재전송 프로토콜을 적용할 수 없으므로 본 논문에서는 반복(repetition) 전송을 도입한 RH-GFMA 기술을 제안한다. 모의실험을 통해, 본 논문에서 제안한 반복 전송을 통한 RH-GFMA 기법이 LEO 위성 기반 IoT 통신 시스템에서 상당한 통신 성능 향상을 보이는 것을 검증한다.

II. LEO-IoT 통신 시스템용 RH-GFMA 기법

본 논문에서는 그림 1과 같이 단일 안테나를 갖는 LEO 위성과 단일 안테나를 갖는 M 개의 IoT 단말이 직접 통신하는 비지상 IoT 네트워크를 고려한다. 이때, 각 IoT 단말과 LEO 위성 사이의 무선 채널 $\mathbf{h}(\in \mathbb{C}^M)$ 는 섀도우드 라이시안 페이딩(shadowed-Rician fading: SR fading)을 가정하였다 [4]. 또한, IoT 단말의 산발적인 트래픽 패턴을 고려하여 활성화률 $\zeta(\in (0,1])$ 에 따라 IoT 단말이 활성화된다고 가정하였다. 본 논문에서는 주파수-시간 영역에서 $R \times 1$ 개의 프리앰블 부분과 $R \times R$ 개의 데이터 부분을 나타내는 GFMA 블록을 고려한다 [3]. 여기서 부하율(load factor, L)을 도입하면 단일 GFMA 블록 내 수용할 수 있는 최대 IoT 단말 수는 $R \times L$ 개로 제한할 수 있다. 구체적으로, L 은 단일 GFMA 그룹 내에서 네트워크 내 IoT 단말 수 M 과 사용 가능한 자원 수 R 사이의 비율을 의미하여 L 이 1일 경우 모든 단말은 GFMA 블록 내 자원 충돌 없이 LEO 위성과 통신할 수 있음을 시사한다.

본 논문에서는 LEO 위성의 빔 간 직교성을 이용하여 하나의 빔을 통해 단일 GFMA 블록 내 IoT 단말을 수용할 수 있다고 가정한다.

본 논문에서는 LEO 위성 기반 IoT 통신 시스템에서 저지연성과 고신뢰 성능을 위해 반복 전송을 도입한 RH-GFMA 기법 적용을 제안한다. 본 논문에서 시간-주파수 영역 내 RH 패턴은 [3]에서 증명된 바와 같이 충돌 확률이 가장 낮은 라틴 스퀘어 그룹 도약(Latin-square group hopping: LSG hopping) 패턴을 채택한다. LSG 도약 패턴을 적용할 경우 L 개의 LSG가 생성될 수 있으며 동일한 LSG 내의 단말 간 자원 충돌은 발생하지 않는다. 따라서, GFMA 블록 내 특정 자원에 K 개의 단말에 의해 충돌이 발생할 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(K, \xi) = \binom{L-1}{K} \xi^K (1-\xi)^{(L-1-K)}.$$

따라서, n 번 반복 전송된 특정 자원에서, $m (\in 1, \dots, M)$ 째 단말의 $i (\in 1, \dots, n)$ 째 반복 전송에 해당하는 수신 신호 모델은 다음과 같다.

$$y_m^i = \begin{cases} h_{m,i}^i \sqrt{E_m} s_m^i + w, & \text{Collision Free} \\ h_{m,i}^i \sqrt{E_m} s_m^i + I_K + w, & \text{Collision} \end{cases},$$

여기서 $h_{m,i}^i$ 는 SR 페이딩 채널을 의미하며, E_m 은 단말의 송신 전력, s_m^i 은 m 째 단말이 전송한 송신 심볼을 의미한다. 또한, w 은 수신기에서 발생하는 부가 열잡음을 의미하며, 본 논문에서 모든 열잡음 신호는 통계적으로 평균이 0이고 분산이 $2\sigma_w^2$ 인 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정하였다. I_K 는 임의의 $K (\geq 1)$ 개의 간섭 단말로부터 수신된 신호를 나타내며 다음과 같다.

$$I_K = \sum_{k=1}^K h_{k,i} \sqrt{E_k} s_k$$

본 논문에서는 m 째 단말에 대한 비트 복호를 위해 로그 우도 비율(log-likelihood ratio: LLR) 계산 방법을 사용한다. 또한, 본 논문에서는 IoT 단말의 제한적인 에너지 효율을 고려하여 직교 위상 천이(quadrature phase shift keying: QPSK) 변조 심볼을 전송하였다고 가정한다. 따라서, 수신 신호에 대한 충돌이 없는 경우의 i 째 반복 전송에 해당하는 심볼의 $j (\in 1, 2)$ 째 비트에 대한 LLR은 다음과 같이 계산한다.

$$A(s_{m,j}^i) = \ln \frac{\sum_{s \in \mathbf{S}_0} \exp \left\{ -\frac{|y_m^i - s h_{m,i}^i \sqrt{E_m}|^2}{2\sigma_w^2} \right\}}{\sum_{s \in \mathbf{S}_1} \exp \left\{ -\frac{|y_m^i - s h_{m,i}^i \sqrt{E_m}|^2}{2\sigma_w^2} \right\}},$$

여기서 $\mathbf{S}_{i0}$ 와 $\mathbf{S}_{i1}$ 은 각각 j 째 비트가 0과 1일 때의 이상적인 성상도 심볼을 의미한다. 한편, 자원 충돌이 존재하는 경우의 i 째 반복 전송된 심볼의 j 째 비트에 대한 LLR 계산은 다음과 같다.

$$A(s_{m,j}^i) = \ln \frac{\sum_{s \in \mathbf{S}_{i0}} \sum_{c_1 \in \{\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_1\}} \dots \sum_{c_K \in \{\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_1\}} \exp \left\{ -\frac{|y_m^i - s h_{m,i}^i \sqrt{E_m} - \sum_{k=1}^K c_k h_{k,i} \sqrt{E_k}|^2}{2\sigma_w^2} \right\}}{\sum_{s \in \mathbf{S}_{i1}} \sum_{c_1 \in \{\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_1\}} \dots \sum_{c_K \in \{\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_1\}} \exp \left\{ -\frac{|y_m^i - s h_{m,i}^i \sqrt{E_m} - \sum_{k=1}^K c_k h_{k,i} \sqrt{E_k}|^2}{2\sigma_w^2} \right\}}.$$

최종적으로, n 번 반복 전송을 수행된 j 째 비트에 대한 LLR 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(s_{m,j}) = \sum_{i=1}^n A(s_{m,j}^i).$$

III. 모의실험 결과 및 결론

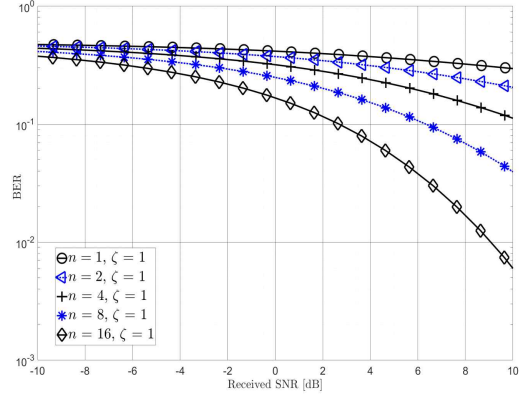


그림 2. 반복 전송 수 대비 RH-GFMA 기법의 BER 성능

그림 2는 LEO 위성 기반 IoT 통신 시스템용 반복 전송을 통한 RH-GFMA 기법의 BER 성능을 도시한 결과이다. 본 모의실험에서 중심 주파수는 2GHz이며, $R=17$, $L=2$ 를 가정하였으며, SR 채널 파라미터로 $(b_0, m, \Omega) = (0.126, 10.1, 0.835)$ 를 가정하였다. 또한, 위성 과 단말 간 거리는 600km로 설정하였으며, 모든 IoT 단말의 활성확률(ξ)은 1로 설정하였다. 그림 2를 통해 LEO 위성 기반 IoT 시스템에서 제안하는 반복 전송을 활용한 RH-GFMA 기법이 우수한 BER 성능을 갖는 것을 확인하였으며, 반복 수가 증가할수록 다이버시티 이득을 얻어 BER 성능이 크게 향상됨을 검증하였다.

Acknowledge

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(RS-2024-00396992) 및 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2022R1I1A3073740)을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] D. C. Nguyen *et al.*, "6G Internet of Things: A comprehensive survey," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 1, pp. 359-383, Jan. 2022.
- [2] A. F. M. S. Shah, M. Al. Karabulut, and K. Rabie, "Multiple access schemes for 6G enabled NTN-assisted IoT technologies: Recent developments, prospects and challenges," *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 7, no. 1, pp. 48-54, Jan. 2024.
- [3] H. S. Jang, B. C. Jung, T. Q. S. Quek, and D. K. Sung, "Resource-hopping-based grant-free multiple access for 6G-enabled IoT networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 20, pp. 15349-15360, Oct. 2021.
- [4] A. Abdi, W. C. Lau, M. -S. Alouini and M. Kaveh, "A new simple model for land mobile satellite channels: First- and second-order statistics," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 3, pp. 519-528, May 2003.