

대규모 IoT 네트워크를 위한 저복잡도 PIC 수신기 기반 RH-GFMA 기법

이지영^{1,3}, 이영석², 정방철²

¹충남대학교, ²아주대학교, ³국방기술진흥연구소

^{1,3}jylee7@krit.re.kr, ²{youngseoklee; bcjung}@ajou.ac.kr

Low-Complexity PIC Receiver-based RH-GFMA Technique for Massive IoT Networks

Jiyoung Lee^{1,3}, Young-Seok Lee², Bang Chul Jung²

¹Chungnam National University, ²Ajou University,

³Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement

요약

본 논문에서는 대규모 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 네트워크에서 병렬 간섭 제거(parallel interference cancellation: PIC) 수신기를 활용한 자원 도약 기반 비허가 다중 접속(resource hopping-based grant-free multiple access: RH-GFMA) 기법을 제안한다. 제안 기법은 종래의 zero-forcing (ZF) 수신기 기반 RH-GFMA 기법 [1] 대비 계산 복잡도가 낮으면서도 강인한 통신 성능을 달성하며, 모의실험을 통해 비트 오류율(bit-error rate: BER) 관점에서 성능 향상을 검증한다.

I. 서론

국방 전술 무선 통신망에서 저지연성은 핵심 요구사항이며 비허가 다중 접속(grant-free multiple access: GFMA)은 별도의 스케줄링 없이 다수 단말의 동시에 전송을 가능하게 하는 대규모 전술 통신의 핵심 기술로 주목받고 있다. [1]에서 제안된 자원 도약 기반 GFMA(resource hopping-based GFMA: RH-GFMA) 기법은 단말마다 고유한 도약 패턴을 적용함으로써 동일 자원에서의 최대 충돌 단말 수를 제어할 수 있어, 대규모 국방 전술 무선 통신망에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, [1]에서는 zero-forcing (ZF) 수신기를 이용한 다중 사용자 겹파를 수행하였으며, 이는 행렬 역연산에 따른 높은 계산 복잡도와 잡음 증폭으로 인한 통신 성능 저하를 초래한다. 따라서, 본 논문에서는 기존 기법의 한계를 극복하기 위해, 낮은 계산 복잡도와 견고한 성능을 동시에 달성할 수 있는 병렬 간섭 제거(parallel interference cancellation: PIC) 수신기를 결합한 RH-GFMA 기법을 제안한다. 또한, 모의실험을 통해 제안 기법이 기존 방식 대비 비트 오류율(bit-error rate: BER) 관점에서 우수한 성능을 보임을 검증한다.

II. 제안하는 PIC 수신기를 활용한 RH-GFMA 기법

본 논문에서는 [1]에서 고려한 상향링크 RH-GFMA 기법의 시스템 모델을 동일하게 가정한다. RH-GFMA는 로딩 인자(loading factor, L)에 의해 특정 자원에서 충돌하는 단말 수가 제한된다. 따라서, 특정 자원에서 J 개 다중 안테나를 갖는 수신기에 도달하는 수신 신호 $\mathbf{r} (\in \mathbb{C}^J)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r} = \sum_{k=1}^L \mathbf{h}_k b_k x_k + \mathbf{w},$$

여기서 $\mathbf{h}_k (\in \mathbb{C}^J)$ 는 $k (\in \{1, \dots, K\})$ 째 단말로부터 수신기까지의 무선 채널 벡터를 나타내며 $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_J)$ 분포를 따르는 레일리(Rayleigh) 페이팅 채널을 가정한다. b_k 는 단말들의 활성 확률로 인해 결정되는 파라미터로 활성 확률 $\nu (\in [0, 1])$ 에 따라 활성화된 단말은 1 그렇지 않으면 0의 값을 갖는다. $\mathbf{w} (\in \mathbb{C}^J)$ 는 수신기에서 발생하는 열잡음 벡터를 나타내며, 본 논문에서 모든 잡음 성분은 독립이고 동일한 $\mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$ 분포를 따른다고 가정한다.

PIC 수신기는 동일 자원에서 충돌한 모든 단말의 송신 심볼을 병렬적으로 추정한다. 본 논문에서는 특정 자원에서 $U (\leq L)$ 개의 단말이 활성화된 경우를 가정하고 PIC 수신기를 활용한 RH-GFMA 기법을 기술한다. 먼저, $u (\in \{1, \dots, U\})$ 째 단말이 전송한 심볼 x_u 를 추정하기 위해 초기 추정치 $\hat{x}_u^{(0)}$ 는 선형 최소 평균 제곱 오차(linear minimum mean square error: LMMSE) 추정기를 통해 검파하며, 이후, 전체 반복 횟수 I 까지 각 반복 단계에서 다른 단말로부터 발생하는 간섭을 병렬로 재구성하여 제거하고, 정합 필터(matched filter) 기반의 결정 과정을 통해 원하는 심볼을 다음과 같이 재추정한다 [2].

$$\mathbf{r}_u^{(i)} = \mathbf{r} - \sum_{v \neq u} \hat{x}_v^{(i-1)}, \hat{x}_u^{(i)} = Q \left(\frac{\mathbf{h}_u^H \mathbf{r}_u^{(i)}}{\|\mathbf{h}_u\|} \right),$$

여기서 $Q(\cdot)$ 은 입력 신호에 대한 신호 겹파기를 나타낸다.

III. 모의실험 결과 및 결론

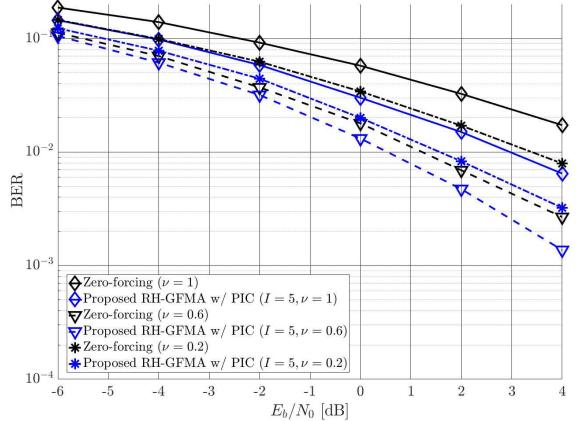


그림 1. 제안하는 PIC 수신기 기반 RH-GFMA 기법의 BER 성능.

그림 1은 제안하는 PIC 수신기를 활용한 RH-GFMA 기법의 평균 BER 성능을 도시한 결과이다. 본 모의실험에서는 직교 위상 천이(quadrature phase shift keying: QPSK) 변조를 가정하였고, 수신기 안테나 수는 4개, L 은 3으로 설정하였다. 모의실험을 통해 제안하는 PIC 수신기 기반 RH-GFMA 기법이 다양한 활성 확률과 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR) 조건에서 기존 ZF 수신기 기반 기법 대비 상당히 향상된 BER 성능을 달성함을 검증하였다. 이는 PIC 수신기의 병렬 업데이트 구조를 통해 다중 사용자 간섭을 명시적으로 재구성 및 제거함으로써, 심볼 추정치를 반복적으로 개선할 수 있기 때문으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단(No. RS-2025-02303435)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] Y. -S. Lee, K. -H. Lee, H. S. Jang, G. Jo, and B. C. Jung, “Performance analysis of resource hopping-based grant-free multiple access for massive IoT networks,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp. 2685–2689, Dec. 2022.
- [2] G. Caire, R. Muller, and T. Tanaka, “Iterative multiuser joint decoding: Optimal power allocation and low-complexity implementation,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 9, pp. 1950–1973, Sep. 2004.