

Hybrid ARQ 지원 통신 시스템에서 outage 확률 분석기법 동향 조사

김수홍, 고영채*
고려대학교

{integral98, koyc}@korea.ac.kr

A Survey on the Outage Probability Analysis Scheme in the Hybrid ARQ Aided Communication System

Su-Hong Kim, Young-Chai Ko *
Korea Univ.

요 약

다중 셀 다중 사용자 환경에서 사용자 간 간섭은 5G 통신에서 큰 문제점이 된다. 상향링크에서 신호간섭은 상향링크의 성능을 떨어뜨리고, 이는 곧 HARQ 피드백으로 인한 상향링크와 하향링크 간 연계성에 의해 하향링크 성능 저하로 이어진다. 따라서 이와 같은 통신 상황에서 사용자의 최소 요구 품질을 보장하고 통신 서비스 만족도를 증가시킬 수 있는 방안을 모색하고자, Hybrid ARQ (HARQ) 지원 통신에서의 outage 확률 분석기법 동향을 소개하고, 향후 연구 방향을 제시한다.

I. 서론

5 세대 이동통신 시스템은 채널 환경에 맞게 변조 방식과 부호화율(coding rate) 등을 변화시켜 성능 이득을 얻을 수 있는 다양한 전송기법을 채택해오고 있다. 그 중에서 재전송 기술과 오류정정부호의 패리티 비트(parity bit)를 조절하여 전송하는 Hybrid ARQ (HARQ) 방식은 물리계층의 FEC 기법과 논리계층의 ARQ 기법을 혼합한 방식으로 수율 및 신뢰도(reliability) 측면에서 효율적인 것으로 알려져 있으며 다양한 통신시스템에서 활용되고 있다.

HARQ 방식은 채널이 좋지 않은 환경이나 채널 정보를 순시적으로 갱신하지 않는 환경에서도 ACK 및 NACK 전송을 통해 신뢰도를 높인다. 그러나 상향링크 다중 셀에서 모바일 트래픽(mobile traffic)이 급격히 증가할 경우, HARQ 피드백의 TCP ACK 전송과정이 지연되어 하향링크 데이터 패킷이 도달하는 시간이 지연되고, 하향링크 성능의 감소가 일어난다.

기존 연구에서는 다중 셀 네트워크에서 상향링크의 성능 감소가 하향링크 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 HARQ 지원 통신에서 다양한 연구를 진행하였다. 본 논문에서는 상향링크 및 하향링크의 취약 사용자에게 초점을 맞추기 위해 HARQ 지원 통신 시스템에서 outage 확률 분석에 대한 기술 동향을 조사한다.

II. 본론

다중 셀 다중 사용자 상향링크 통신환경에서 사용자가 급증할 때, 간섭으로 인해 성능이 좋지 않은 사용자들은 outage가 발생한다. 이로 인해 기지국으로부터 NACK를 지속적으로 수신하게 되고 TCP ACK 처리 지연 및 하향링크 데이터 패킷이 도달되는 시간이 지연되어 하향링크 성능의 감소가 야기된다. 따라서 학계에서는

사용자 간 형평성, 최소 요구 품질을 보장하기 위한 통신기술의 확립을 위해 앞서 기술된 상황에 대한 정량적 연구를 진행하였고, 이에 따라 HARQ 기법이 적용되는 다양한 통신환경에서 outage 확률을 분석하는 다양한 연구가 진행된 바 있다.

정보이론을 활용한 연구 [1]에서는 갱신 이론(renewal theory)을 활용하여 HARQ 기법의 다양한 종류(type I, type II HARQ-CC, type II HARQ-IR)에 대응되는 상호 정보량(mutual information)의 폐쇄형 해(closed-form solution)를 수식을 활용해 도출하였다. 그 결과 IR-HARQ (Incremental redundancy HARQ) 방식이 다른 방식의 HARQ 기법에 비해 분석의 어려움이 있으나, 더 높은 데이터 용량을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

학계에서는 HARQ 방식이 신뢰할 수 있는 전송 기법임을 주목하여 [1]에서 연구된 HARQ 지원 통신의 상호 정보량의 폐쇄형 해를 다양한 통신환경에 접목시켜 활용하고 있다. 먼저 테라 헤르츠(THz) 기반 통신의 경우, 고주파 대역의 사용으로 인한 높은 경로 손실, 빔 정렬 오류 및 대기 감쇄의 영향으로 인해 많은 문제점(bottleneck)을 가지고 있다. 따라서 HARQ 기법을 사용하여 신뢰도를 높이는 동기를 가지고 있어 테라 헤르츠 기반 통신에서는 [2]의 연구와 같은 다양한 HARQ 기법에 따른 outage 확률을 분석하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, IR-HARQ 기법의 사용이 보다 좋은 성능을 도출하는 것을 확인하였다.

HARQ 지원 통신시스템의 상호 정보량의 폐쇄형 해를 활용하는 다른 예시로, 키홀 페이딩 효과(keyhole fading effect)가 적용되는 전송 모델에서 HARQ 기법이 지원됐을 때의 성능 및 outage를 통한 신뢰도를 분석한 다양한 연구들이 존재한다. 키홀 페이딩 효과가 적용되는 대표적인 전송 모델의 예시로 다중 입력 다중 출력 상황에서 차량 간 통신을 지원하는 MIMO-V2V 시스템

관련 연구 [3], [4]가 있다. 차량 간 통신의 경우 차량의 이동성 및 송수신 안테나의 낮은 고도로 인해 이러한 다중 산란 조건을 피하는 것이 불가피하며, 이로 인해 많은 MIMO-V2V 연구에서 HARQ 기법을 제안해 통신의 신뢰도를 높이는 것을 보여주고 있다. 키홀 페이딩 효과는 주로 가구나 창문에 의해서 많이 발생하기 때문에, 지능형 반사 표면(RIS; reconfigurable intelligent surface)을 이용한 통신의 성능을 분석하는 연구 [5]에서도 HARQ 기법을 활용한다. 위성통신에서도 키홀 효과가 존재하여 HARQ 기법을 활용하고 있고, 무선 광통신(FSO; free space optical) 연구 또한 위성 간 전파 지연 현상 완화 및 통신시스템의 신뢰도 향상을 위해 HARQ 기법을 적절히 활용하여 연구를 진행하고 있다. [6], [7]

기존의 연구된 방식의 HARQ 기법들과는 달리 변형된 형식의 HARQ 기법들 역시 다양하게 연구되고 있다. FSO 를 활용한 연구 [7]의 경우 전파 지연이 긴 위성 통신의 특징에 맞추어 기존의 HARQ 기법을 부분적으로 변형해서 활용한다. 크로스 패킷 HARQ (XP-HARQ) 기법을 연구한 [8]의 경우, 기존의 IR-HARQ 기법과 다르게 재전송에 새로운 정보를 도입하여 사용하는 방식으로 더 효율적인 자원활용을 할 수 있으며, outage 확률의 경계 표현식을 활용해 더 높은 신뢰도를 보이는 것을 확인할 수 있다.

기존의 정보이론을 바탕으로 HARQ 지원 통신에서 outage 확률의 고전적 경계 표현식(classical bound)과는 다르게, 다양한 환경에서 실제에 근접한 경계 표현식을 얻거나 문제를 완화(relaxation)시키는 방법이 연구되고 있다. [9]에서는 기하학적 프로그래밍(GP; geographical programming)을 활용한 문제 완화를 통해 더 적응적인 표현식을 얻어내었고, 결과적으로 새로운 전력 적응 체계를 활용함으로써 인해 고전적 경계를 기반으로 하는 기존 방법을 능가하는 성능을 보여준다.

III. 결론

본 논문에서는 5 세대 이동통신에서 요구되는 사용자 간 형평성 확보 및 최소 요구 품질을 보장하기 위해서, HARQ 지원 통신 시스템의 outage 확률 분석기법 동향을 조사하였다. 본문에서는 HARQ 방식이 신뢰할 수 있는 전송 기법임을 주목하여, HARQ 지원 통신에서 outage 확률을 통한 신뢰도 분석이 적용되는 전송 모델의 예시와 방향성을 제시하였다. HARQ 방식이 신뢰도를 보장하는 통신 기법임에 따라 HARQ 기법이 적용되는 전송 모델의 경우에는 전반적으로 통신의 신뢰도 관점에서 취약한 전송 모델이 해당되었다. 또한 HARQ 기법의 취약성 및 발전된 기법에 대해서도 연구가 되었고, 정보이론에 의존한 HARQ 기법 성능 분석에서 벗어나 새로운 이론을 적용하거나 문제를 완화시키는 등 다양한 방식의 성능 분석도 존재하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022-0-00704, 초고속 이동체 지원을 위한 3D-NET 핵심 기술 개발)

참 고 문 헌

[1] G. Caire and D. Tuninetti, "The throughput of hybrid-ARQ protocols for the Gaussian collision channel," in IEEE

Transactions on Information Theory, vol. 47, no. 5, pp. 1971-1988, July 2001

[2] Z. Song et al., "Outage Probability Analysis of HARQ-Aided Terahertz Communications," 2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Changsha, China, 2021, pp. 1-6

[3] G. Yang, H. Zhang, Z. Shi, S. Ma and H. Wang, "Asymptotic Outage Analysis of Spatially Correlated Rayleigh MIMO Channels," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 67, no. 1, pp. 263-278, March 2021

[4] H. Zhang, Z. Liao, Z. Shi, G. Yang, Q. Dou and S. Ma, "Outage Performance Analysis of Type-I HARQ Aided V2V Communications," 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Sanshui, Foshan, China, 2022, pp. 1-6

[6] M. Goswami, H. M. Kwon, K. Pham and J. Lyke, "Satellite MIMO digital beamforming under nonlinear high-power amplifier and keyhole", Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Netw. Commun. (ICNC), pp. 313-317, Apr. 2019.

[7] H. D. Le and A. T. Pham, "On the Design of FSO-Based Satellite Systems Using Incremental Redundancy Hybrid ARQ Protocols With Rate Adaptation," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 71, no. 1, pp. 463-477, Jan. 2022

[8] J. Feng, Z. Shi, G. Yang, N. I. Miridakis, S. Ma and T. A. Tsiftsis, "Outage Performance of Cross-Packet HARQ," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 11, no. 7, pp. 1423-1427, July 2022

[9] W. Wang and K. Shen, "A New Outage Probability Bound for IR-HARQ and Its Application to Power Adaptation," 2022 IEEE 23rd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communication (SPAWC), Oulu, Finland, 2022, pp. 1-5