

심우주에서의 신뢰적 데이터 통신을 위한 HARQ 기법에 대한 조사

전용인, 이윤성, Duc Thien Hua, 조성래

중앙대학교 컴퓨터공학과

{yijeon, yslee, thien}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

An Investigation into HARQ Techniques for Reliable Data Communication in Deep Space Networks

Yongin Jeon, Yunseong Lee, Duc Thien Hua, Sungrae Cho

Department of Computer Science and Engineering, Chung-Ang Univ.

요 약

본 논문은 심 우주 네트워크 환경에서 신뢰적 데이터 통신을 위한 방법으로 Hybrid Automatic Repeat Request(HARQ)를 이용하는 방식에 초점을 두어, 신뢰적 데이터 통신을 위한 다양한 HARQ를 제안한다.

I. 서 론

심우주 환경에서 신뢰할 수 있는 통신을 하기 위해서는 높은 전파 지연, 높은 링크 오류율, 낮은 대역폭과 비대칭 대역폭 등 심 우주 통신의 고유한 특성에 의해 야기되는 난제의 해결이 필요하다. 데이터 전송이 이루어지는 심우주 통신 채널은 큰 왕복 시간(Round-Trip Time, RTT)과 간헐적인 연결, 고도로 가변적인 전파채널이 특징이다. 예를 들어, 지구와 화성사이의 RTT는 행성간 거리가 약 6 천만 Km에서 4 억 Km까지 다양하기 때문에 약 6.5 분에서 44 분 범위에 있다. 이 큰 RTT는 전송제어 프로토콜 및 인터넷 프로토콜(TCP/IP)와 같은 전통적인 데이터 전송 프로토콜을 비효율적으로 만든다. 그 이유에는 TCP의 재전송 프로토콜의 비효율성, 수신계통과의 거리 및 열 노이즈로 신호 에너지가 손실되어 신호 저하가 생기기 때문이다. 현재 심 우주 통신 시스템에는 실시간 채널 상태 예측이 활용되지 않으며 4 주마다 심 우주 네트워크에 명령을 내려 전송 매개변수를 재구성하는 Background sequencing을 수행하는 것이 표준 방법이다. 이는 출발지 노드(예: 지구)에서 단순히 목적지 노드(예: 화성)까지의 통신에서 여러 정정 코드를 고려하지 않는, 즉 적응적 코딩률을 고려하지 않고 단순히 데이터 프레임 전송 성공에만 목적을 두었다는 것을 나타내고, 패킷 손실에 취약하다는 한계점이 명확하게 드러난다. 패킷 손실을 해결하기 위하여 보통 잘 알려진 오류 정정 기법으로 자동 반복 요청(Automatic Repeat Request, ARQ)이 많이 활용되나, 이는 심 우주 환경에서 데이터의 재 전송 뿐만 아니라 데이터 재 전송 요청까지도 통신 거리를 고려하였을 때 굉장한 오버헤드이다.

따라서, 본 논문에서는 위의 문제 해결을 위한 방법으로 H-ARQ(Hybrid ARQ)기법에 초점을 맞춰 다양한 H-ARQ 방식을 제안한다.

II. 본 론

많은 무선 채널은 시간에 따라 달라지며 전송기에는 채널 상태 정보(Channel State Information, CSI)를 알

수 없다. 이 경우 오류 수정 코드만으로는 충분히 낮은 오류율을 달성하기가 어렵다. 전방 오류 수정(FEC)과 자동 재전송 요청(ARQ)을 모두 결합한 하이브리드 자동 재전송 요청(HARQ)은 무선 링크를 통한 데이터 전송의 신뢰성을 보장하기 위해 일반적으로 사용되는 기술이다. 본 논문에서는 NC-HARQ, Fast HARQ, N-HARQ, 및 PS-IR-HARQ 같은 최근 S-IoT, 5G network 등 다양한 분야의 연구에서 활용되고 있는 다양한 HARQ 방식을 고려해 보았다.

1. NC-HARQ

위성 기반 사물 인터넷(S-IoT)환경에서 먼 거리로 인한 전파지연을 해결하기 위해 개발된 방법으로 실시간 IoT 애플리케이션은 짧은 중단 간 지연 시간으로 정보를 전송해야 한다. 이때 신뢰할 수 있는 피드백 전송을 이용하게 되면 S-IoT의 낮은 효율성으로 인해 지상 네트워크에서 전통적으로 사용되어 지는 HARQ 전략은 적합하지 않다. NC-HARQ 기법은 S-IoT에서 제한적/무 피드백 멀티 홉 전송을 실현하기 위해 마지막으로 수신된 업데이트의 생성 이후 경과된 시간으로 정의되는 정보적시성(Age of Information, AoI)개념과 결합된 네트워크 코드로, NC-HARQ 프로토콜은 여러 최신 HARQ 체계와 비교하여 더 낮은 평균 AoI를 달성하는데 SNR이 10dB로 감소함에 따라 Fast HARQ에 비해 평균 AoI를 35% 개선하고, 파일의 패킷수가 2에서 4로 증가하면 D-HARQ 체계에 비해 AoI의 개선률이 21%에서 40%로 증가하는 것을 보이며 이는 기존 체계보다 더 나은 AoI 성능을 가지고 있음을 나타낸다.

2. Fast HARQ

일부 HARQ 피드백 신호와 연속적인 메시지 디코딩을 생략하는 방식으로 일반적인 메시지 디코딩 지연 프로파일과 최대 2~5개의 전송 라운드에서 제안된 FAST HARQ 프로토콜은 코드 레이트/페이딩 모델과 관계없이 표준 HARQ와 비교하여 각각 27%, 42%, 52% 및 60%의 예상 지연 시간을 개선할 수 있는 방식이다. 디코딩 및 피드백 지연을 최소화하는 데 초점을 맞춰 단대단 지연을 줄이기 위해 1) 일부 ACK

(NACK 피드백 신호가 생략되고 2) 수신자가 모든 전송이 아닌 높은 성공적인 디코딩 확률을 추정하는 경우에만 수신 메시지를 디코딩하는 방법으로 디코딩 및 피드백 지연을 절감할 수 있다. 이는 Fast HARQ 프로토콜은 지연 제한 애플리케이션에서 효과적으로 사용될 수 있음을 의미한다. 그러나 PA의 비효율성이 HARQ 프로토콜의 성능에 현저하게 영향을 미치는 특징이 있어 이부분을 신중히 고려하여 네트워크 설계를 하여야 한다.

3. N-HARQ

5세대 모바일 표준(5G)은 초고신뢰성과 낮은 지연 시간(ultra-high reliability and low latency, URLLC)이 요구되는 무선 산업 제어 및 스마트 그리드 같은 미션 크리티컬 애플리케이션을 지원하기 위해 구상되었다. URLLC의 애플리케이션 시나리오에서는 엄격한 패킷 레벨 지연 요구 사항을 충족하기 위해 작은 데이터 페이로드와 짧은 패킷의 통신 프로토콜이 필요하다. 실패한 패킷의 재전송이 새로운 시간 슬롯에 제공되는 기존의 HARQ와는 달리, 제안된 체계에서 패킷의 재전송은 다음 도착하는 패킷과 함께 제공된다. N-HARQ를 사용하면 재전송으로 인한 대기열 지연을 방지하고 패킷 도착 지연을 줄일 수 있다. N-HARQ에서 패킷이 실패했을 때 송신기는 중첩 부호화(superposition coding, SC)를 사용하여 새로 도착한 패킷과 재전송 패킷을 상호 연결하는 반면 수신기는 연속적인 간섭 취소(successive interference cancellation, SIC)를 사용하여 비 직교 신호를 분리하는 방식으로 URLLC의 중요한 시나리오인 재전송을 단 한 번만 허용한다. 이러한 특징으로 N-HARQ는 다양한 안정성 및 지연 시간 요구사항을 가진 애플리케이션을 더욱 유연하게 지원이 가능하다.

4. PS-IR-HARQ

5G 하이브리드 자동 재전송 요청(HARQ)에 대한 부분 중첩을 제안하여 5G 시스템에 대한 처리량 강화 HARQ 체계를 구축하기 위해 개발되었다. 추가 대역폭과 전송 전력이 들지 않고 그것의 부분 비트를 새로운 패킷에 중첩(XORing)함으로써 잘못된 패킷을 재전송하는 원리이다. 5G 표준의 하드웨어 구성 요소를 기반으로 구현될 수 있고, 최대 10%의 처리량이 개선된다. PS-IR-HARQ 방법은 패킷이 성공적으로 수신되지 않는 경우, 제안된 체계에서 첫 번째 재전송은 패킷 간 코딩을 구현하는 간단한 방법인 새로운 패킷에 부분 코드화된 비트를 중첩함으로써 생성된다. 수신기에서 디코더는 반복적인 BP(신뢰 전파) 알고리즘을 수행하여 잘못된(대상) 패킷을 복구한다. 그래도 실패하면 이후 RR(또는 IR)을 전송하여 송신기가 단일 패킷 모드로 전환된다. 일반적으로 코드 속도가 증가하는 여러 인코더/디코더를 필요로 하는 기존의 교차 패킷 코딩 HARQ 체계와 달리, 제안된 PS-HARQ 체계는 하나의 인코더/디코더만 필요하며 기본 코딩 구조를 거의 변경하지 않는다. 이는 백트랙 재전송(BRQ) 체계와 계층 코드 HARQ(L-HARQ) 체계와 유사하다. 또한 단순성과 유연성으로, 기존의 단일 패킷 HARQ 체계와 함께 구현할 수 있어 실질적으로 5G 표준의 하드웨어 구성 요소를 기반으로 쉽게 구현할 수 있다.

본 논문에서는 심 우주 환경에서 데이터 통신을 위한 HARQ를 선정하였다. 본문 [1],[2][3]&[4]에서 소개한 다양한 종류의 HARQ를 심우주 환경에 맞춰 높은 전파지연, 높은 링크 오류율, 낮은 대역폭과 비대칭 대역폭을 고려한 시뮬레이션을 통해 데이터를 정량화 하면 다양한 심 우주 환경에 대응하며 통신이 가능할 것이라 사료된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2018년도 정보(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임

[NRF-2018M1A3A3A02066018]

참 고 문 헌

- [1] S. Liu, J. Jiao, Z. Ni, S. Wu and Q. Zhang, "Age-Optimal NC-HARQ Protocol for Multi-hop Satellite-based Internet of Things," *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/WCNC49053.2021.9417388.
- [2] B. Makki, T. Svensson, G. Caire and M. Zorzi, "Fast HARQ Over Finite Blocklength Codes: A Technique for Low-Latency Reliable Communication," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 1, pp. 194-209, Jan. 2019, doi: 10.1109/TWC.2018.2878713.
- [3] F. Nadeem, M. Shirvanimoghaddam, Y. Li and B. Vucetic, "Non-orthogonal HARQ for Delay Sensitive Applications," *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC40277.2020.9149036.
- [4] Q. Wang, S. Cai, L. Chen and X. Ma, "A Throughput-Enhanced HARQ Scheme for 5G System via Partial Superposition," in *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 10, pp. 2162-2166, Oct. 2020, doi: 10.1109/LCOMM.2020.3004407.

III. 결 론