

극 부호를 활용한 셀룰러 IoT시스템용 주파수도약 비허가 다중접속기법

최소연, 장한승, 정방철

충남대학교

soyeonchoi@cnu.ac.kr, jhans@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

A Grand-Free Multiple Access Technique based on Frequency Hopping with Polar Codes for Cellular IoT Systems

So Yeon Choi, Han Seung Jang, and Bang Chul Jung

Chungnam National University

요 약

본 논문은 셀룰러 IoT시스템을 위하여 직교 주파수도약 다중화와 극 부호(Polar Codes)를 이용한 새로운 셀룰러 하향링크용 비허가 다중접속기법(Grant-Free Multiple Access, GFMA)을 제안한다. 특히, 제안하는 기술은 간단한 제어 정보 수신 및 주파수도약 방식의 데이터 수신을 통해 값싼 IoT장비들에 적용이 용이하다. 제안한 직교 주파수 도약 다중화 기법에서는 각 IoT단말들은 정해진 무작위 도약 패턴에 따라 데이터를 수신하므로 동시에 동일한 주파수 자원을 2개 이상의 IoT단말기가 사용했을 때 충돌이 발생 할 수 있다. 본 논문에서는 충돌 발생 확률을 고려하여 새로운 Log-Likelihood Ratio (LLR) 값을 계산하고 극 부호의 성능을 검증한다. 또한, 요구되는 프레임 오류 확률에 따라 수용 가능한 단말기의 수를 제시한다. 본 제안기술을 통해 다수의 IoT 단말을 효과적으로 셀룰러 하향링크에 수용할 수 있을 것으로 예상된다.

I. 서 론

5G 이동통신에서는 셀룰러 기지국을 이용하여 스마트 폰뿐만 아니라 다양한 수 많은 Internet of Things (IoT) 단말기를 서비스하는 셀룰러 IoT에 대한 관심이 매우 높다 [1]. 셀룰러 IoT 서비스를 위해서는 기존의 인간 대 인간 (Human-to-Human) 또는 인간 대 사물 간 (Human-to-Machine)의 통신 방법과는 다른 접근 방식이 필요하다. 예를 들어, 하향링크 (Downlink) 서비스를 위하여 기존 스마트폰으로 데이터를 전송할 때 기지국이 스케줄링 방식을 이용하였다. 그러나 단말기의 수가 매우 많은 셀룰러 IoT 상황에서는 기존 스케줄링 기법을 사용할 경우 사용자 선택 및 자원할당을 위한 제어신호의 오버헤드가 매우 심각하다. 따라서 최근 IoT서비스를 위하여 제어신호의 오버헤드를 낮추면서 다수의 IoT단말기를 효과적으로 셀룰러 네트워크에서 수용하는 연구들이 진행되고 있다 [2]. 또한, IoT서비스는 일반적으로 전송하는 패킷의 길이가 짧은 특성을 가지는데 이러한 길이가 짧은 패킷 전송에 기존 LDPC보다 더 좋은 성능을 보이면서 이론적인 최적 성능을 만족하는 극 부호 (Polar Codes)가 제안되었고 [3], 최근 5G 이동통신 시스템에서도 극 부호가 채택될 예정이다 [4].

본 논문에서는 셀룰러 네트워크에서 직교 주파수 도약 (Orthogonal Frequency Hopping Multiplexing: OFHM)과 극 부호(Polar codes)를 활용하는 비허가 다중접속 방식을 제안한다. 특히, 본 논문에서는 IoT 서비스를 위한 새로운 프레임 구조를 제안하고, 직교 주파수 도약 다중화에서 발생할 수 있는 도약패턴 충돌문제를 해결하는 극 부호용 LLR계산 기법을 제안한다. 마지막으로 본 논문에서는 제안된 비허가 다중접속 기법을 활용했을 때, 주어진 블록오류 확률을 만족시키면서 최대 수용가능 한 IoT연결의 수를 도출한다.

II. 제안한 주파수 도약기반 비허가 다중접속 기술

직교 주파수 도약 다중화 시스템은 사용자별로 자신의 주파수 자원 도약 패턴에 따라 기지국으로부터 데이터를 수신하게 된다 [5]. 하지만 사용자 수가 많아지면 도약 패턴 사이에 충돌이 발생할 수 있다. 따라서 직교 주파수 도약 다중화 시스템에서 충돌이 발생할 확률은 아래의 식으로 계산 할 수 있다.

$$P_c = 1 - \left(1 - \frac{\bar{v}}{N_F}\right)^{M-1} \quad (1)$$

여기서, $\bar{v}$ 는 채널 활동인수, N_F 는 직교 주파수 수, M 은 활성 사용자의 수를 나타낸다. 도약 패턴에 충돌이 일어났을 경우, 충돌된 자원위치에 송신해야 할 심벌의 부호가 같을 때는 상승(synergy)이 발생하고, 심벌의 부호가 다를 때는 천공(perforation)이 발생한다. 충돌 확률(P_c)을 알 수 있을 때, 심벌의 천공확률은 아래의 수식으로 계산 가능하다.

$$P_p = 1 - \left(1 - \frac{m-1}{m} \cdot \frac{\bar{v}}{N_F}\right)^{M-1} \quad (2)$$

여기서, m 은 데이터 변조에서 심벌 위치의 수 (BPSK 경우 $m=2$)를 의미한다. 심벌 천공에 따른 에러 발생의 문제는 송수신단에서 극 부호 방식과 같은 강한 채널부호/복호 방식을 사용하는 것으로 해결할 수 있다.

그림 1은 제안하는 하향링크 데이터 프레임구조를 보여주고 있다. 여기서 앞부분은 시그널 기반의 프리앰블의 위치이고, 다음은 주파수 도약패턴에 의한 데이터 수신을 위한 자원을 보여준다. 먼저 서비스 받을 단말기 정보와 천공 발생 확률을 함께 전달하는 시그널 방식의 프리앰블을 새롭게 제안한다. 시그널 방식의 프리앰블은 Zadoff-Chu (ZC) 시퀀스 [6]를 이용하여 생성할 수 있다. ZC 시퀀스는 루트 번호가 서로 같은 ZC 시퀀스끼리는 자기상관 특성을 보이며 루트 번호가 서로 다른 ZC 시퀀스끼리는 상호상관 특성을 보인다. 본 연구에서는 상호상관 특성을 갖도록 서로 다른 두 개의 루트 번호를 이용해 각각의 ZC 시퀀스를 만들고 이를 중첩한 프리앰블을 생성한다. 그림 2에서 첫 번째 루트 번호를 이용한 ZC 시퀀스를 통해 하향링크 서비스를 받게 되는 다수의 단말기의 인덱스를 알려준다. 그리고 두 번째 루트 번호를 이용한 ZC 시퀀스를 통해 천공 발생 확률 값을 알려주게 된다 [7]. 각 단말기들은 먼저 수신된 프리앰블과 첫 번째 루트 번호를 갖는 기준 ZC 시퀀스와의 상관값 계산과 임계값 검출을 통해 자신의 서비스 여부를 확인하고 서비스를 받게 될 단말은 다시 한 번 수신된 프리앰블과 두 번째 루트번호를 이용한 기준 ZC 시퀀스와의 상관 값 계산과 임계값 검출을 통해 천공 발생 확률 값을 얻게 된다. 그림1의 자원에 위치에서 서비스 받을 사용자가 두 명일 때 각각의 도약 패턴과 도약 패턴이 충돌하는 경우를 보여준다. 먼저 충돌된 두 심벌의 부호가 다르면 (+1-1=0) 천공이 발생하고, 기지국은 천공된 심벌에는 송신전력을 할당하지 않는다. 반대로 충돌된 두 심벌의 부호가 같으면 상승이 발생하고 기지국은 원래의 부호를 전송한다.

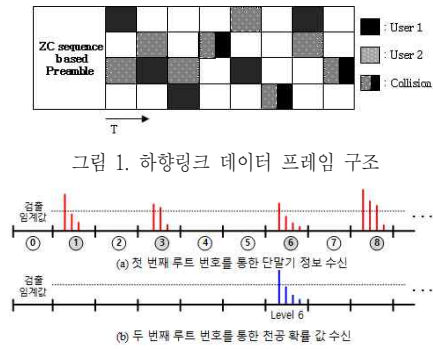


그림 2. 제안된 프리앰블을 통한 단말기 정보 및 천공 확률 값 수신

III. 천공 확률을 고려한 극 부호 복호기용 LLR 계산법

극 부호는 연속 제거 복호(Successive Cancellation Decoding)와 연속 제거 리스트 복호(Successive Cancellation List Decoding)를 사용해 데이터를 복호 한다 [3], [8]. 두 가지 복호 모두 입력 비트를 하나씩 순차적으로 복호 한다. 연속 제거 리스트 복호는 각각의 복호 단계에서 리스트 크기(L) 만큼의 복호 경로를 비교하며, 최종 단계에서 L개의 복호 경로 가운데 가장 가능성이 높은 경로가 복호결과가 된다. 따라서 한 가지 경로만 계산하는 연속 제거 복호 보다 연속 제거 리스트 복호의 성능이 좋다. 두 가지 복호 모두 아래와 같은 일반적인 LLR 값을 복호에 이용한다.

$$LLR = \ln \left(\frac{\Pr(y|x=+1)}{\Pr(y|x=-1)} \right) = \exp \left(\frac{2y}{\sigma^2} \right) \quad (3)$$

하지만 직교 주파수 도약 다중화에 의해 발생하는 천공 확률에 의해 위와 같은 일반적인 LLR 값을 이용해 복호를 할 때 에러 발생 확률이 커지게 되는 문제가 있다. 따라서 수신단에서 천공 확률을 알고 있을 때 이를 고려하여 아래와 같이 LLR 값을 계산한다.

$$LLR = \ln \frac{(1 - P_p) \exp \left(- \left(y - h \frac{1}{\sqrt{1 - P_p}} \right)^2 / 2\sigma^2 \right) + P_p \exp \left(- \frac{y^2}{2\sigma^2} \right)}{(1 - P_p) \exp \left(- \left(y + h \frac{1}{\sqrt{1 - P_p}} \right)^2 / 2\sigma^2 \right) + P_p \exp \left(- \frac{y^2}{2\sigma^2} \right)} \quad (4)$$

여기서, P_p 는 천공확률, h 는 채널, σ^2 은 잡음의 분산 값을 나타낸다.

IV. 실험결과

수신단에서 채널과 심벌 천공 발생 확률(P_p)을 알고 LLR 값을 계산한다고 가정했을 때 연속 제거 복호와 연속 제거 리스트 복호의 BLER 값의 결과를 보인다. 그림 4는 연속 제거 복호, 그림 5는 연속 제거 리스트 복호를 사용했을 때의 BLER 성능을 보여준다. 정보 비트 K의 길이는 256, 부호 비율(code rate)은 1/3을 사용하였다. 연속 제거 리스트 복호에서 L은 16, CRC 비트의 수는 8로 가정하였다. 두 복호 방식 모두 일반적인 LLR 값을 이용했을 때 보다 천공 발생확률을 고려한 LLR 값을 이용한 복호에서 E_b/N_0 값이 커질수록 BLER 성능이 향상된 것을 볼 수 있다. 또한 E_b/N_0 이 7dB에서 연속 제거 리스트 복호를 사용 했을 때 연속 제거 복호보다 대략 3dB의 성능 이득을 관찰할 수 있다. 표 1은 직교 주파수 수(N_F)가 64개일 때 목표 BLER 값과 활동인수($\bar{n}$)를 변화 시켰을 때, 한 서비스 프레임에서 수용 가능한 사용자 수를 정리하고 있다. 목표 BLER값이 작고, 활동인수가 커질수록 수용 가능한 사용자 수가 줄어든다. 요구되는 BLER 값이 10^{-3} 이고 활동인수가 30%일 때 대략 45대 단말에게 한 서비스 프레임에서 하향링크 데이터 서비스를 제공할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 셀룰러 네트워크에서 IoT단말기의 데이터를 효과적으로 전송하는 직교 주파수 도약 다중화와 극 부호를 이용하는 새로운 비허가 다중접속 방식을 제안하였다. 또한, 제안된 기법과 극 부호를 효과적으로

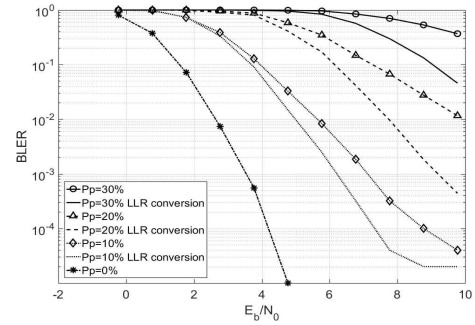


그림 4. 페이딩 채널에서 연속 제거기반 극 부호 복호의 BLER 성능 ($K=256$, $R_c=1/3$)

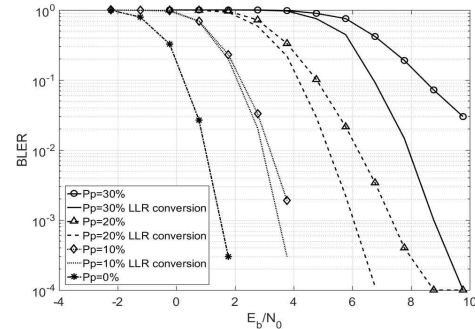


그림 5. 페이딩 채널에서 리스트기반 극 부호 복호의 BLER 성능($K=256$, $R_c=1/3$)

표 1. 요구되는 BLER 값과 활동인수 변화에 따른 수용 사용자 수

BLER	10%	20%	30%	40%	50%
10^{-5}	66	33	22	17	14
10^{-4}	93	47	31	24	19
10^{-3}	135	68	45	34	27

결합하기 위하여 직교 도약 패턴의 충돌확률을 LLR계산에 적용하는 기법도 제안하였다. 제안하는 기법을 통하여 셀룰러 하향링크에서 다수의 IoT 단말기 들을 수용할 수 있음을 보였고, 천공확률을 고려한 새로운 LLR 값을 극 부호의 복호기에 적용하여 BLER 성능이 향상됨을 보였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2016년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2016R1A2B4014834).

참 고 문 헌

- [1] ITU-R, "IMT vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," *Recommendation ITU-R M. 2083*, Sep. 2015.
- [2] M. Shirvanimoghaddam and S. J. Johnson, "Multiple access technologies for cellular M2M communications," *ZTE Communications*, 2016.
- [3] E. Arıkan, "Channel polarization : A method for constructin capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 7, pp. 3051-3073, Jul. 2009.
- [4] 3GPP, "5G: Study on new radio (NR) access technology, 3GPP TR 38.912 v.14.0.0, May 2017.
- [5] B. C. Jung and D. K. Sung, "Performance analysis of orthogonal code hopping multiplexing systems with repetition, convolutional, and turbo codes," *IEEE Trans. on Veh. Technology*, Vol. 57, No. 3, pp. 932-944, Mar. 2008.
- [6] D. Chu, "Polyphase codes with good periodic correlation properties," *774 IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 18, no. 4, pp. 531-532, Jul. 1972.
- [7] H. S. Jang, S. M. Kim, H.-S. Park, and D. K. Sung, "Message-embedded random access for cellular M2M communications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 5, pp. 902-905, May 2016.
- [8] I. Tal and A. Vardy, "List decoding of polar codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 5, pp. 2213-2226, May 2015.