

저전력 광역 통신 시스템을 위한 채널 적응형 대역폭 할당 방법

신 준 우*

Channel Adaptive Bandwidth Allocation Method for Low Power Wide Area Communication Systems

Joonwoo Shin*

요 약

저전력 광역(Low Power Wide Area; LPWA) 통신 기술은, 다양한 응용 매체(Application)의 유비쿼터스 연결을 가능케 하는, 사물인터넷(Internet-of-Thing; IoT) 시스템의 핵심 기술이다. LPWA 통신시스템의 저전력 광역화를 위한 방법으로 신호 대역폭을 줄여 수신기 감도(receiver sensitivity)를 개선하는 초협대역(Ultra Narrow Band; UNB) 변조 기술이 주목 받고 있다. 본 논문에서는 UNB 변조 기술에서 협대역화로 인해 발생하는 전송용량 감소 문제를 개선하기 위해, “채널 적응형 대역폭 할당 방법”을 제안한다. 제안하는 방법은 채널 이득을 고려해 대역폭을 결정함으로써 전송용량을 개선한다. 그리고 제안하는 방법을 실제 통신 시스템으로 구현할 때 고려해야 할 사항들, 즉 전송 신호의 물리계층 프레임 구조; 기준치(Threshold) 기반 전송 시점 결정 방법; 유한(Finite) 크기의 대역폭 집합에서 운용 방법 등을 제시한다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션으로 제안하는 방법의 전송용량 개선 효과를 확인하고, 전송 지연(Transmit Latency)을 분석한다.

Key Words : LPWA, IoT, Bandwidth Allocation

ABSTRACT

Low power wide area (LPWA) communication techniques are essential to implement the Internet-of-Thing (IoT) networks, where a wide range of emerging applications are ubiquitously connected. To widen the coverage of LPWA network, the ultra narrow band (UNB) modulation method has been drawn attentions. However, when adopting the UNB method to the LPWA network, due to the narrow bandwidth nature of UNB method, the reduction of system throughput is unavoidable. In this paper, to improve the throughput of LPWA communication systems, we propose a “channel adaptive bandwidth allocation method”. Exploiting channel gain in the process of bandwidth allocation, the proposed scheme does increase the throughput. In addition, we present various design guidelines which are vital to realize the proposed method, such as a physical layer frame structure; a transmission starting point decision rule; and a bandwidth selection method over finite cardinality bandwidth set. From numerical simulations, we show the performance improvement of the proposed scheme and analyze its transmit latency.

* First and Corresponding Author: Korea Maritime and Ocean University (KMOU), Navigation Science Department, joonoos@kmou.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2017-05-142, Received May 7, 2017; Revised August 14, 2017; Accepted September 27, 2017

I. 서 론

저전력 광역(Low power wide area; LPWA) 통신 기술은 넓은 영역에 분포한 여러 단말기들이 주전원(main power) 없이 배터리 전력만으로 동작하는 사물인터넷(Internet-of-Thing; IoT) 기술의 핵심이다¹⁾. 최근 저전력 광역 통신 기술을 적용한 IoT 통신망을 스마트 농업(Smart Agriculture), 해상 물류(Maritime Logistic) 등 다양한 산업 분야에 활용하려는 시도가 활발하다^{2,3)}.

저전력 광역 통신기술의 커버리지 확장 방법으로 잡음 전력(Noise Power)을 줄여 수신기 감도(Receiver Sensitivity)를 개선하는 초협대역(Ultra Narrow Band; UNB) 변조 기술이 물리 계층(Physical Layer) 관점에서 알려져 있다^{4,5)}. 수신기 감도는 신호-대-잡음 비(Signal-to-Noise Ratio; SNR), 즉 송신 신호 전력과 채널 이득의 곱을 잡음 전력으로 나눈 값과 밀접한 관련이 있다. 초협대역 변조 기술은 신호대역폭을 작게 함으로써 잡음 전력, 즉 신호대역폭과 잡음 밀도의 곱에 해당하는 값을 줄이는 방법으로 수신기 감도를 개선한다⁵⁾. 하지만 이 방법은 신호-대-잡음 비 향상을 위해 신호 대역폭을 희생함으로써 전송용량(Throughput)이 감소하는 단점이 있다.

또한 매체 접근 제어 계층(Medium Access Control) 관점에서, 반송과 인지 무선 접속(Carrier Sensing Multiple Access; CSMA) 방법과 같은 무작위 접속(Random Access) 기술을 활용해 송신할 신호가 있을 때만 전송 경로를 확보함으로써 단말기의 불필요한 전력 손실을 줄이려는 연구가 저전력 광역 통신기술의 저전력화 방법으로 알려져 있다¹⁾.

본 논문은 초협대역 변조 기술 적용 시 발생하는 전송용량 감소 문제를 해결하기 위해, 채널 적응형 대역폭 할당(Adaptive Bandwidth Allocation) 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 저전력 광역 통신 기술의 저전력화 기술인 무작위 접속 기술의 특성을 응용해, 신호 송신 시점을 채널 이득이 가장 큰 시점으로 선택함으로써 신호-대-잡음 비를 개선하고 전송용량을 증대한다. 적응형 대역폭 할당 기술은 사물인터넷 시스템과 직교분할다중접속(Orthogonal Frequency Division Multiplex; OFDM) 시스템에 대해 활발히 진행되었다⁶⁻⁸⁾. 참고문헌 [6]은 IoT 시스템에 적응형 대역폭 할당 방법을 최초로 적용하였으나, 제안하는 방법과 달리 대역폭 결정 과정에서 채널 이득이 반영되지 않았다. 또한 직교분할다중접속 시스템에서 적응형 대역폭 할당 방법은 부반송과 할당 개수를 조절하

는 형태로 대역폭을 할당한다. 이 경우 정해진 부반송과 간격(Subcarrier Spacing)을 기준으로 잡음전력이 결정되므로, 대역폭 조절에 따른 수신기 감도 변화를 신호-대-잡음 비에 적절히 반영할 수 없다는 점에서 제안하는 방법과 차이가 있다^{7,8)}. 본 논문에서는 제안하는 채널 적응형 대역폭 할당 방법을 실제 통신 시스템에 적용할 경우 고려해야할 전송 신호의 물리 계층 프레임 구조; 기준치(Threshold) 기반 전송 시점 결정 방법; 유한(Finite) 크기의 대역폭 집합에서 운용 방법 등을 제시한다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 채널 적응형 대역폭 할당 방법의 전송용량 개선 효과를 보이고, 전송 지연(Transmit Latency)을 확인한다.

본 논문에서의 표기법은 다음과 같다. 임의의 변수 x 에 대해, $E(x)$ 와 $|x|$ 는 각각 x 의 평균치와 절대치를 의미한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1 과 같이 송신기와 수신기가 각각 한 개의 안테나를 장착한 상황링크(Uplink) 저전력 광역 통신망 시스템을 고려한다.

단말기의 기저대역 송신 신호 x 에 대한 기저국 수신한 신호는 다음과 같다.

$$y = \sqrt{P_T}hx + n \quad (1)$$

여기서 $E(|x|^2) = \sigma_x^2 = 1$ 로 가정한다. P_T 는 단말기 송신전력, n 은 기저국 수신 잡음을 의미한다. h 는 단말기와 기저국간 무선 채널로 플랫 페이딩(Flat Fading) 채널을 가정한다).

기저대역 대역폭을 W , 잡음 전력 밀도를 N_0 로 나타낼 때, 수식 (1) 의 수신 잡음 n 에 대한 잡음 전력은 다음과 나타낼 수 있다.

$$P_n [\text{Watt}] = N_0 W \quad (2)$$

수식 (2)는 상온(절대온도 $T = 290^\circ\text{K}$)에서 열잡음 전력 $-114 [\text{dBm}]$, 수신 증폭기 잡음 지수 $NF [\text{dB}]$, 수신기 이득 $G [\text{dB}]$ 등을 포함해 다음

1) 다중 경로가 없는 플랫 페이딩 채널 모델은 IoT 기술의 적용 분야인 스마트 농업, 즉 장애물 없는 들이나 농장에서 농작물을 관리하는 센서 네트워크 시스템 환경에 적합하다 [2].

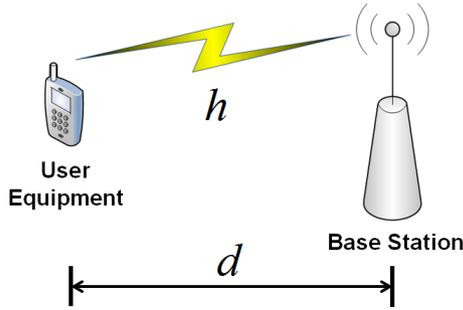


그림 1. 상향링크 시스템 모델
Fig. 1. Uplink Communication System Model

의 수식 (3)을 선형 스케일 (Linear Scale)로 표현한 것이다.

$$P_n [\text{dBm}] = -114 [\text{dBm}] + NF + G + 10 \log_{10} \left(\frac{W}{10^6} \right) \quad (3)$$

수식 (2)를 이용해 신호-대-잡음 비를 구하면 다음과 같다.

$$\text{SNR} = \frac{|h|^2 P_T \sigma_s^2}{P_n} = \frac{|h|^2 P_T}{N_0 W} \quad (4)$$

수식 (4)의 신호-대-잡음 비와 직교분할다중접속 시스템에 대한 적응형 채널 할당 연구에서 고려하는 신호-대-잡음 비를 비교하면, 후자의 경우 고정된 부분 송파 간격을 기준으로 잡음 전력 σ_n^2 을 구하고, 이를 토대로 다음과 같이 신호-대-잡음 비를 표현한다^[7,8].

$$\text{SNR}_{\text{OFDM}} = \frac{|h|^2 P_T \sigma_s^2}{\sigma_n^2}$$

이 경우, 대역폭 조절에 따른 수신기 감도 변화를 신호-대-잡음 비에 나타낼 수 없다. 이에 반해, 여기서는 수식 (3)을 고려해 신호-대-잡음 비를 (4)와 같이 표현함으로써 대역폭 조절에 따른 신호-대-잡음 비 증감을 정확히 반영할 수 있다.

플랫 페이딩 채널에서 대역폭 W 에 대한 데이터 전송용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R [\text{bps}] = W \log \left(1 + \frac{|h|^2 P_T}{N_0 W} \right) \quad (5)$$

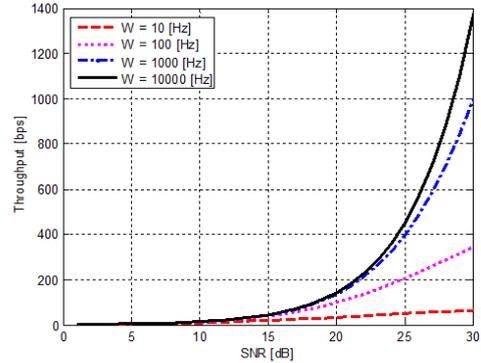


그림 2. 신호 대역폭에 따른 전송 속도 ($\frac{P_T}{N_0} = 1$)

Fig. 2. Various Throughput over a number of bandwidth

수식 (5)를 이용해 다양한 대역폭 W 에 대해 전송 용량을 계산하면 그림 2와 같다 ($\frac{P_T}{N_0} = 1$ 로 가정).

III. 기존 저전력 광역 통신 시스템 기술

본 절에서는 저전력 광역 통신 시스템의 넓은 커버리지와 저전력 특성을 충족하기 위한 기존 기술을 설명한다.

3.1 전송 거리 확대를 위한 초협대역 변조 방법

통신 시스템의 전송 거리는 수신기가 오류 없이 메시지를 복원할 수 있는 최소 신호-대-잡음 비에 의해 결정된다. 따라서 최대 통달 거리에서 오류 없이 메시지를 복원할 수 있는 최소 신호-대-잡음 비를 SNR_{th} 라할 때, 해당 저전력 광역시스템은 다음을 만족하도록 설계되어야 한다.

$$\text{SNR} = \frac{|h|^2 P_T}{N_0 W} \geq \text{SNR}_{th} \quad (6)$$

수식 (6)을 만족하도록 신호-대-잡음 비를 증가시키는 방법은 송신 전력 P_T 와 신호 대역폭 W 를 조절하는 것이다. 그런데 저전력 광역 통신 시스템의 저전력 특성을 고려할 때, 단말기는 전력 사용을 최소화해야 한다. 그러므로 저전력 광역 시스템 환경에서 단말기 송신 전력 P_T 를 증가시켜 신호-대-잡음 비를

2) 채널 이득 $|h|^2$ 은 송신기, 수신기에서 조절할 수 있는 파라미터가 아니다.

개선하는 방법은 적절하지 않다. 여기서 P_T 는 시스템 설계 시 단말기의 저전력 특성을 충족하기 위해 설정된 최대 전송 전력이다. 따라서 저전력 특성을 유지하면서 전송 거리를 확대하는 방법, 즉 신호-대-잡음 비를 증가시키는 방법은 대역폭 W 를 줄이는 것이다 (수식 (6)에서 대역폭 W 를 줄이면 신호-대-잡음 비가 향상됨을 쉽게 확인할 수 있다). 이와 같이 대역폭 W 를 조절해 신호-대-잡음 비를 개선하고, 이를 통해 수신기 감도 기준치를 크게 낮추는 방법을 활용한 것이 초협대역 변조 기술이다^{4,5)}. 그러나 그림 2에서 알 수 있듯이 신호 대역폭을 줄이면 전송용량이 감소한다. 즉, 초협대역 기술은 전송 거리 확대 과정에서 전송용량이 감소하는 단점이 있다.

3.2 전력 효율 개선을 위한 무작위 접속 방법

저전력 광역 통신 시스템에서 단말기의 전력 효율을 개선하기 위해, 단말기가 기지국과 연결되는 무선 채널을 상시 연결(Continuous Transmission) 하지 않고 송신할 메시지가 있을 때 무선 채널을 연결해 신호를 전송하는 불연속 전송(Discontinuous Transmission; DTX) 방법이 매체 접근 제어 계층 관점에서 주목받고 있다¹¹⁾. 이러한 불연속 전송 방법을 저전력 광역 통신 시스템에 적용하면, 단말기는 전송할 메시지가 없는 상황에서도 무선 채널을 연결하고 있음으로 인해 발생하는 전력 손실을 줄일 수 있다. 이러한 불연속 전송 방법 구현 기술 중에서 단말기가 전송을 원하는 시점에 무선 채널이 다른 사용자에게 의해 사용되지 않음을 확인하고 신호를 전송하는 반송과 인지 다중 접속(Carrier Sensing Multiple Access; CSMA) 방법과 다른 사용자의 무선 채널 사용을 고려하지 않고 임의의 시점에 신호를 전송하고 대신 다른 사용자 송신 신호와 무선 채널 상에서 충돌이 발생할 경우 일정 시간을 두고 재전송하는 알로하(Aloha) 프로토콜 등이 저전력 광역 통신 시스템에 적절한 무작위 접속 기술로 알려져 있다¹¹⁾.

IV. 전송 속도 개선을 위해 제안하는 채널 적응형 대역폭 할당 방법

여기서는 II 장에서 설명한 저전력 광역 통신 시스템의 저전력화 기술인 무작위 접속 방법의 불연속 전송 특성을 활용해 초협대역 변조 기술의 전송속도를 개선하는 방법을 제안한다.

4.1 제안하는 채널 적응형 대역폭 할당 방법

불연속 전송 무작위 접속 방법에서는 송신할 메시지가 발생했을 때 채널 상황을 고려하거나(반송과 인지 다중 접속 방법), 또는 고려하지 않고(알로하 프로토콜) 신호를 송신한다. 여기서는 이를 응용해 단말기에서 채널의 이득을 고려해 전송 시점을 결정하는 방법을 제안한다. 즉 송신부에서 메시지를 일정 시간 저장하더라도 채널 이득이 최대가 되는 시점, 즉 $|h| = |h_{\max}|$ 인 시점을 찾아 신호를 전송하는 방법을 제안한다(h_{\max} 는 채널 이득이 최대일 때 채널 계수).

이와 같이 채널 이득이 최대가 될 때 신호를 전송할 경우, 신호-대-잡음 비 기준치 SNR_{th} 를 만족하는 최대 대역폭, W_{\max} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{\max} = \frac{|h_{\max}|^2 P_T}{N_0 \text{SNR}_{th}} \geq \frac{|\tilde{h}|^2 P_T}{N_0 \text{SNR}_{th}} = \tilde{W} \quad (7)$$

여기서 \tilde{h} 는 다음을 만족한다.

$$\tilde{h} \in \{h(t) | t \neq \tau, h(\tau) = h_{\max}\}$$

제안하는 방법에서는 채널 이득이 최대가 되는 시점에 신호를 전송하므로, 신호-대-잡음 비 기준치 SNR_{th} 를 만족하는 대역폭 W_{\max} 가 송신기에서 전송 데이터 발생 시점에 주어진 임의의 채널이득을 기준으로 대역폭을 결정하는 방법(본 논문에서는 이를 'Random' 방법이라 한다)의 대역폭 \tilde{W} 보다 크다. 따라서 제안하는 채널 적응형 대역폭 할당 방법은 'Random' 방법의 전송 속도를 개선 할 수 있다. 다만 'Random' 방법의 경우, 송신부에서 전송할 데이터 발생 시 지연 없이 송신이 가능하다, 제안하는 방법의 경우 채널 이득이 가장 클 때까지 전송 지연이 발생한다(이는 시뮬레이션을 통해 확인, 분석한다).

4.2 제안 방법의 시스템 적용 시 고려 사항

4.2.1 물리계층 전송 프레임 구조

통신 시스템에서 데이터 전송을 위한 물리 계층 프레임은 일반적으로 그림 3과 같은 구조를 갖는다. 데이터 전송 구간(Data Transmission Period)에서 음성 또는 영상과 같은 메시지 신호를 데이터 채널을 통해

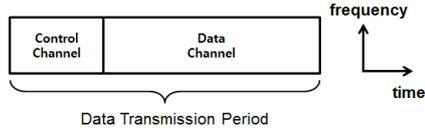


그림 3. 기존 물리계층 프레임 구조
Fig. 3. A Conventional Physical Layer Frame Structure

전송하고, 적응 변조 및 코딩(Adaptive Modulation & Coding; AMC) 정보, 채널 추정을 위한 기준 신호(Reference Signal)의 위치 정보 등 각종 제어 신호는 제어 채널(Control Channel)을 이용해 전송한다^[4]. 그런데 제안하는 채널 적응형 대역폭 할당 방법의 경우, 단말기가 데이터 전송에 앞서 상향링크 채널 정보를 획득해야 한다. 따라서 그림 4와 같이 상향링크 채널 측정(Channel Measurement) 구간이 포함된 형태로 물리 계층 프레임 구조가 구성되어야 한다.

상향링크 채널 측정 구간의 운용은 듀플렉스(Duplex) 방식에 따라 다르다. 우선 시분할 듀플렉스 방식의 경우, 채널 측정 구간 동안 기지국은 채널 추정을 위한 기준 신호를 전송하고 단말기는 이를 이용해 하향링크 채널을 추정한다. 그리고 상향/하향 링크 채널 가역성(Uplink/Downlink Channel Reciprocity)을 이용해 상향링크 채널 정보를 획득한다. 주파수 분할 듀플렉스 방식의 경우, 단말기가 기준 신호를 전송하고 기지국이 이를 이용해 상향링크 채널을 추정한다. 그리고 기지국이 추정한 채널 정보를 단말기로 피드백 하는 과정도 채널 측정구간에 포함한다.

III 장에서 설명한 반송파 인지 무선 접속 방법도 그림 4과 같은 형태의 물리계층 프레임 구조를 갖는다. 그러나 반송파 인지 무선 접속 방법에서는 채널 측정 구간을 다른 사용자의 채널 사용 유무를 판단하는 데 활용하는데 비해, 제안하는 방법은 해당 구간을 사용자의 상향링크 채널 정보 획득에 사용하는 점이 다르다.

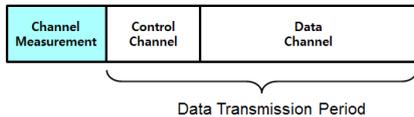


그림 4. 제안하는 방법을 위한 물리계층 구조A
Fig. 4. Physical Layer Frame Structure for Proposed Method

4.2.2 기준치(Threshold) 기반 전송 시점 결정

송신 측에서는 특정 시점, τ_1 이 최적의 전송 시점(채널 이득이 최대인 시점) 인지 여부를 판단하기 위

알고리즘 1. 기준치 (Threshold) 기반 전송 시점 결정 방법

```

Step 1
Channel measurement

Step 2
IF  $|h|^2 \geq G_{TH}$  ,
    Data Transmission
    (where  $G_{TH}$  is threshold)
ELSE
    Wait for a predefined time interval, and go to Step 1
END
    
```

해서는 τ_1 에서 채널 정보와 더불어 τ_1 이후의 상당한 시간 $\tau_1 + T$ 까지 상향 링크 채널 정보를 알아야 한다($T > 0$). 이러한 조건이 충족될 때, 단말기는 τ_1 에서 채널 이득이 T 시간 구간 내에서 최대인지 여부를 판단하고 전송 시점을 결정할 수 있다(본 논문에서는 이를 'Known Channel Gain' 방법이라 한다). 그러나 실제 시스템에서는 T 구간 동안의 채널 정보를 미리 앞서서 예측하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 알고리즘 1 과 같이 기준치를 기반으로 전송 시점 결정 방법을 제안한다.

알고리즘 1의 동작원리는 다음과 같다. 송신기에서 메시지가 발생하면 상향링크 채널 이득을 기준치 G_{TH} 와 비교하고, G_{TH} 보다 크면 신호를 전송하고, 그렇지 않으면 II 장에서 설명한 알로하 프로토콜과 같이 일정 시간동안 신호를 전송하지 않고 대기한 후 다시 전송을 시도함으로써 전송 시 채널 이득이 최소한 G_{TH} 이상 되도록 한다. 여기서 G_{TH} 가 클수록 채널 이득이 큰 시점을 선택하므로, 동일한 전송 거리에 대해 전송용량이 커진다. 그러나 다음 장의 시뮬레이션 결과에서도 확인할 수 있듯이 전송 가능한 채널 발생 확률이 낮아 전송 지연 시간이 길어지는 단점이 있다. 반대로 G_{TH} 가 작으면 전송 용량은 커지나, 기준치를 만족하는 채널 발생 확률이 높아 전송 지연이 줄어드는 장점도 있다. 기준치에 따른 전송속도 분석과 outage 확률 분석은 학문적 의미가 있는 주제이나 본 논문의 범위를 벗어나므로 추후 연구에서 다루도록 한다. 대신 여기서는 기준치를 채널 이득의 평균값, 즉 $G_{TH} = E(|h|^2)$ 으로 설정한다.

4.2.3 유한(Finite) 대역폭 집합에서 대역폭 할당 방법

앞에서 설명한 신호-대-잡음 비 기준치, SNR_{th} 를 만족하는 최대 대역폭 W_{max} 결정 방법은 연속된 수 (Continuous Number)의 대역폭 집합, 즉 무한히 (Infinitely) 많은 성분을 갖는 대역폭 집합에서 대역폭을 결정한다. 그러나 실제 상용 통신 시스템은 불연속된 수(Discrete Number)의 대역폭 집합, 즉 유한한 개수의 성분을 갖는 집합에서 대역폭을 결정한다³⁾. 따라서 본 논문에서는 크기 N 의 대역폭 집합 $\Psi = \{W_1, \dots, W_N\}$ 에서 채널 적응형 대역폭 할당 방법을 운용할 수 있도록, 다음과 같이 수정된 방법을 제안한다.

$$\overline{W}_{max} = \arg \max_{W \in \Psi} W \leq \frac{G_{TH} P_T}{N_0 SNR_{TH}} \quad (8)$$

앞의 가, 나, 다 절에서 설명한 사항을 종합해 실제 시스템에서 운용 가능한 채널 적응형 대역폭 할당 방

법을 정리하면 알고리즘 2와 같다.

V. 시뮬레이션 결과

제안하는 채널 적응형 대역폭 할당 방법의 성능은 다음의 환경에서 확인한다. 기존 적응형 대역폭 할당 방법은 대역폭 결정시 채널 이득을 반영할 수 없거나, 대역폭 변화에 따른 신호-대-잡음 비 증감을 나타낼 수 없어 비교 시스템으로 적용하기 어렵다. 그래서 여기서는 채널 이득을 고려하지 않고 임의로 대역폭을 할당하는 'Random' 방법을 기준으로 제안하는 방법의 성능 개선 효과를 확인한다.

플랫 페이딩 채널 계수는 경로 손실(Path Loss)을 포함할 수 있도록 다음과 같이 모델링한다.

$$h = \frac{g}{\sqrt{\delta_{free} d^\beta}} \quad (9)$$

여기서 g 는 평균 '0', 분산 '1' 의 i.i.d.(Independent and Identically Distributed) 분포를 따르는 복소 가우시안 확률 변수이다. δ_{free} 는 자유공간상의 경로 손실을 반영하기 위한 스케일링 파라미터(scaling parameter)로서 파장 λ , 기준 거리 d_0 에 대해

$$\delta_{free} = \frac{(4\pi d_0 / \lambda)^2}{d_0^\beta} \text{이다}^4). \text{ 여기서 파장 } \lambda \text{을 결정}$$

하는 반송파 주파수를 2.3 [GHz] 로 가정한다. 또한 d 와 β 는 각각 단말기와 기지국 간 거리, 경로 손실 지수(path loss exponent)를 의미하며, $\beta = 2.8$ 로 가정한다. 또한 단말기 송신 전력 $P_T = 23$ [dBm], 기지국 수신기 이득 $G_T = 10$ [dB], 신호-대-잡음 비 기준치 $SNR_{th} = 10$ [dB], 그리고 채널 이득 기준치 $G_{TH} = 0.5$ 로 가정한다.

그림 5는 무한히 많은 성분을 갖는 대역폭 집합에서 대역폭을 결정하는 경우의 전송용량을 구한 결과로서, 'Random' 방법 대비 제안하는 방법의 성능 개선 효과를 확인할 수 있다. 채널 정보를 사전에 알고 있는 경우 ('Known Channel Gain')와 기준치를 기준으로 전송 시점을 결정하는 방법('Threshold')에 대해, 단말기와 기지국 간 거리가 1000[m] 인 점에서 'Random' 방법 대비 각각 334% 그리고 89% 전송속

알고리즘 2. 실제 시스템용 채널 적응형 대역폭 할당 방법
Step 1
Channel measurement using the frame structure in Fig. 4
Step 2
IF $ h ^2 \geq G_{TH}$,
IF $\frac{ h ^2 P_T}{N_0 W_{min}} \geq SNR_{TH}$,
where
$W_{min} = \min_{W \in \Psi} \overline{W}$
Decide bandwidth with equation (8)
ELSE
Wait for a predefined time interval, and go to Step 1
ELSE
Wait for a predefined time interval, and go to Step 1
END

3) 3GPP LTE/LTE-A 의 경우 선택 가능한 대역폭 집합은 {1.4, 3, 5, 10, 15, 20} [MHz] 이다 [9].

4) 일반적으로 기준 거리 d_0 는 100[m]로 선택한다 [10].

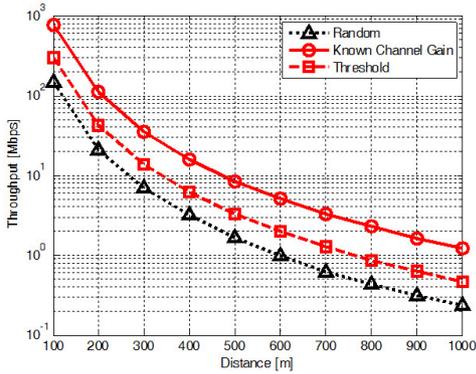


그림 5. 무한 대역폭 집합에 대한 전송 성능
Fig. 5. Throughput Performance over Infinite Bandwidth Set

도 개선 효과를 보인다. 그림 6은 유한한 대역폭 성분을 갖는 대역폭 집합 $\Psi = \{1, 2, \dots, 100\}$ [MHz]에 대해 제안하는 알고리즘 2를 이용해 전송용량을 구한 것이다. 그림 5와 마찬가지로 제안하는 방법의 성능 개선 효과를 확인할 수 있다. 단말기와 기지국 간 거리 1000 [m]이 지점에서 전송용량을 비교하면, 'Random' 방법은 0.2822 [Mbps] 인데 비해, 제안하는 방법은 1.2262 [Mbps] ('Known Channel Gain'), 0.4809 [Mbps] ('Threshold')의 전송 속도를 얻는다. 그림 5와 그림 6의 결과를 비교하면, 유한한 대역폭 성분을 갖는 대역폭 집합이더라도 1 [MHz] 간격으로 100 개의 대역폭 성분을 갖는 집합 Ψ 의 경우, 무한한 대역폭 성분을 갖는 경우와 비교해 성능 손실이 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 대역폭 성분의 개수가 작아질수록, 즉 집합 Ψ 의 크기가 작아질 경우 세 방법('Random' 방법, 'Known

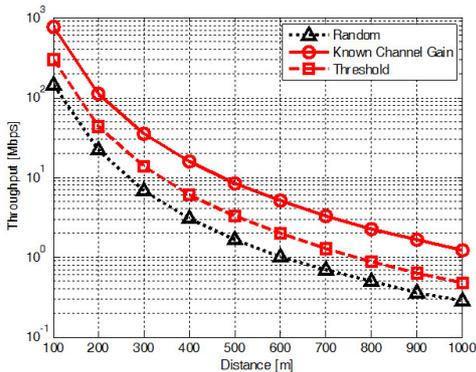


그림 6. 유한 대역폭 집합에 대한 전송 성능
Fig. 6. Throughput Performance over Finite Bandwidth Set

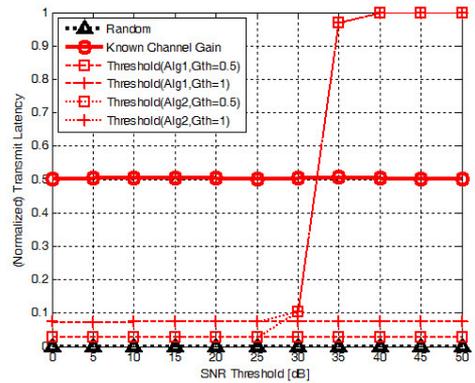


그림 7. (정규화된) 전송 지연 성능
Fig. 7. (Normalized) Transmit Latency Performance

Channel Gain' 방법, 'Threshold' 방법) 모두 그림 5에 비해 성능이 열화 된다(이에 대한 실험 결과는 지면 관계상 생략한다).

그림 7은 각 전송 방법 별 다양한 SNR_{th} 에 대한 전송 지연 성능을 보여준다. 그림 7에서 상향링크 채널 관찰 시간 T^5 ($T > 0$), 각 기법 별 신호 전송 시점 t ($0 \leq t \leq T$)의 비, 즉 $\frac{t}{T}$ 을 '(정규화된) 전송 지연'으로 나타내고, 단말기와 기지국 간 거리는 100[m]로 가정한다.

'Random' 방법의 경우 송신기에서 전송할 데이터가 생성되면 해당 순간의 채널이득을 기준으로 SNR_{th} 조건을 충족하도록 대역폭을 조절해 전송하므로 전송 지연이 없다. 하지만 'Known Channel Knowledge' 방법과 알고리즘 1(무한 대역폭 집합)로 동작하는 'Threshold' 방법의 경우, 채널 관찰 시간 T 동안 각각 채널이득이 가장 큰 채널 instance와 채널이득이 G_{TH} 보다 큰 채널 instance까지 대기해야하므로 전송 지연이 가장 커지는 단점이 있다. 또한 'Threshold' 방법의 경우, IV장에서 설명한 대로 G_{TH} 가 '0.5'에서 '1'로 커짐에 따라 전송 지연이 커짐을 확인할 수 있다. 그리고 'Random' 방법, 'Known Channel Knowledge' 방법, 그리고 알고리즘 1로 동작하는 'Threshold' 방법의 경우, 할당 대역폭에 제한이 없으므로 각각 SNR_{th} 를 만족하는 대역폭으로 전송해 SNR_{th} 에 따른 전송지연 차이가 없다. 그러나 알고리즘 2(유한 대역폭 집합)로 동작하는

5) 본 논문의 실험에서는 1000 개 채널 instance 생성 시간을 기준으로 가정함

'Threshold' 방법의 경우, 대역폭 집합의 최소값(본 실험에서는 1 MHz 로 설정)으로 할당 대역폭이 제한 되므로 주어진 채널이득과 대역폭 집합의 최소값으로 SNR_{th} 를 만족하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이와 같은 경우, 알고리즘 2 에서는 데이터를 전송하지 않고 대기하므로 SNR_{th} 가 증가함에 따라 전송 지연이 커진다.

VI. 결 론

본 논문에서는, 저전력 광역 통신 시스템의 커버리지 확장 방법인, 초협대역 변조 기술의 전송용량을 향상하기 위한 채널 적응형 대역폭 할당 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 채널 이득을 고려해 대역폭을 결정함으로써, 거리가 먼 두 지점 간 통신에서 오류 없이 메시지 복원을 가능케 하는 신호-대-잡음 비 기준치를 만족하면서 동시에 전송 용량을 개선할 수 있다. 또한 제안하는 방법을 실제 시스템에 적용할 때 고려해야할 사항인, 전송 신호의 물리계층 프레임 구조; 기준치 기반 전송 시점 결정 방법; 유한한 크기의 대역폭 집합에서 운용 방법 등을 제시하였다. 마지막으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법의 전송속도 개선 효과를 확인하고, 이에 따른 전송지연도 분석하였다.

References

[1] X. Xiong, K. Zheng, R. Xu, W. Xiang, and P. Chatzimisios, "Low power wide area machine-to-machine networks: Key techniques and prototype," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, pp. 64-71, Sept. 2015.

[2] C. Cambras, S. Sendra, J. Lloret, and L. Garcia, "An IoT service-oriented system for agriculture monitoring," *IEEE Proc. ICC*, France, May 2017.

[3] H. Wang, O. Osen, and G. Li, "Big data and industrial internet of things for the maritime industry in northwestern norway," *IEEE Region 10 Conference (TELCON)*, Macau, Nov. 2015

[4] M. Anteur, V. Deslandes, N. Thomas, and A. Beylot, "Ultra narrow band technique for low power wide area communications," *IEEE*

Proc. Globecom, USA, Dec. 2015.

[5] T. Lassen, *Long-range RF communication: why narrowband is the de facto standard*, Texas Instruments White Paper, 2014, from <http://www.ti.com/lit/wp/swry006/swry006.pdf>

[6] L. Wang, X. Zhang, S. Wang, and J. Yang, "An online strategy of adaptive traffic offloading and bandwidth allocation for green M2M communications," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 6444-6453, Apr. 2017.

[7] I. Wong and R. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 17, pp. 1747-1758, Oct. 1999.

[8] C. Wong and B. Evans, "Optimal downlink OFDMA resource allocation with linear complexity to maximize ergodic rates," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, pp. 962-971, Mar. 2008.

[9] 3GPP TS 36.211, V13.01.0, *Evolved Terrestrial Radio Access; Physical Channels and Modulation* (Release 13), Mar. 2016.

[10] M. Zhou, J. Jurianto, J. Shankar, and M. Fujise, "Characterization of radio path loss in seaport environment for WiMAX applications," *Int. Symp. Ant. and Propag.*, Nov. 2006.

신 준 우 (Joonwoo Shin)



2000년 2월 : 한양대학교 전자·전자통신·전파공학부 졸업
 2002년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
 2013년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
 2002년 1월~2014년 8월 : 한국

전자통신연구원 이동통신방식연구실
 2014년 9월~현재 : 한국해양대학교 해사대학 항해학부 교수

<관심분야> 해상통신 시스템 및 차세대 이동통신 시스템 물리계층 설계