

# 서로 다른 지연 시간을 갖는 OFDMA 기반 Wireless Mesh Network에서의 채널 할당 기법

정회원 유현 일\*, 박창 환\*, 종신회원 조용수\*

## A Channel Assignment Technique for OFDMA-based Wireless Mesh Network with Different Time Delays

Hyun Il Yoo\*, Chang Hwan Park\* *Regular Members*, Yong Soo Cho\* *Lifelong Member*

### 요 약

본 논문에서는 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)기반의 WMN(Wireless Mesh Network)에서 분산 MR(distributed Mesh Router)간 TDoA(Time Difference of Arrival)에 의한 ISI(Inter-Symbol Interference) 및 ICI(Inter-Carrier Interference) 간섭을 완화시키기 위한 자원할당 기법을 제안한다. WMN에서 서로 다른 지연 시간에 따른 ISI와 ICI의 영향을 최소화하기 위하여 각 MR별로 자원할당에 따른 SINR을 정의하고, 이를 바탕으로 fairness를 고려한 자원 할당 기법을 제안한다. 제안된 자원할당 기법은 기존의 기법과 비교하여 WMN에서 BER 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 모의실험을 통하여 확인한다.

**Key Words** : Wireless Mesh Networks(WMN), OFDMA, Resource Allocation, TDoA

### ABSTRACT

In this paper, a channel assignment technique to mitigate interferences due to ISI(Inter Symbol Interference) and ICI(Inter Carrier Interference) caused by TDoA(Time Difference of Arrival) among distributed MRs(Mesh Routers) in OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)-based WMN(Wireless Mesh Network) is proposed. The SINR(Signal to Interference and Noise Ratio) associated with the channel assignment for each MR is defined to minimize the effect of ISI and ICI due to TDoA in WMN, which is then used to propose a channel assignment technique considering fairness constraint. It is verified by computer simulation that the proposed channel assignment technique can improve the performance of BER(Bit Error Rate) in WMNs with compared to the conventional technique.

### 1. 서 론

무선 메쉬 네트워크(Wireless Mesh Network; WMN)는 다중 인터페이스와 다중 채널을 지원함으로써 기존의 무선 네트워크에서 발생하는 여러 문제점을 해결할 수 있는 핵심적인 미래기술로 대두되고 있다<sup>1-3)</sup>. 이러한 WMN에서는 기존의 Ad-hoc 네트워크

기술을 바탕으로 하고 있으며, 이동성 및 자원의 제약이 없고 자가 구성 등의 특징 때문에 확장 및 유지보수가 쉽다는 장점이 있다. 또한 메쉬 라우터(Mesh Router; MR)의 호스트 라우터(host router) 기능을 통하여 기존의 네트워크 기술인 센서 네트워크, Wi-Fi, WPAN 등의 이종(heterogeneous) 네트워크와 통합하여 수용할 수 있다<sup>4)</sup>.

\* 본 연구는 방송통신위원회의 차세대통신네트워크원천기술개발사업의 연구결과로 수행되었음(KCA-2011-10913-04003).

\* School of Electrical & Electronic Engineering, Chung-Ang University, KOREA(yscho@cau.ac.kr)

논문번호: KICS2011-01-011, 접수일자: 2011년 1월 4일, 최종논문접수일자: 2011년 5월 13일

그러나 이와 같은 장점에도 불구하고 WMN는 네트워크의 규모가 증가함에 따라 성능이 감소될 수 있는 문제점이 있다<sup>[5]</sup>. 즉, 네트워크의 규모가 증가함에 따라 다중 채널 환경이 발생하며, 특히 메쉬 백본에서의 MR간 채널 간섭으로 인하여 발생한다. MR간 채널 간섭은 전체 네트워크의 지연시간 증가 및 종단간 처리량 감소라는 결과를 초래한다. 이와 같은 문제를 최소화하기 위해 클러스터 기반 채널 할당 방식(Cluster Based Channel Assignment)이 제안되었다<sup>[6,7]</sup>. OFDMA 기반 WMN에서 각 MR들은 물리적인 통신 가능 거리에 존재하는 이웃 MR들과 클러스터를 구성하고, MR들의 채널 정보를 채널 데이터로 유지하는 클러스터 헤더(Cluster Header; CH)가 선출된다. CH들은 인접한 클러스터의 CH들과 채널 스캐닝 및 채널 스위칭을 수행하지 않고 효율적으로 통신하기 위해 동일 채널을 할당하며, 클러스터 내의 MR들에게는 통신 채널과 간섭이 발생하지 않도록 직교 채널을 할당한다. 또한 CH는 자신의 클러스터 내의 MR들과의 통신을 위해 시간/주파수 자원을 할당하며 각 MR들은 전송해야 하는 데이터가 존재하는 경우 자신에게 할당된 시간/주파수 자원을 이용하여 데이터를 전송하게 된다.

하지만, 클러스터 기반 채널 할당을 통해 CH가 클러스터 내 MR들에게 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 기술을 적용하여 각 MR들이 사용하는 자원의 충돌이 발생하지 않도록 자원을 할당하더라도 각 MR들은 클러스터 내에 공간적으로 분산되어 분포하므로 각 MR들의 시간 동기를 맞추는데 어려움이 있다. 참고문헌 [8, 9]에서는 클러스터 간 동기를 획득하기 위하여 CH와 MR의 협력을 통한 분산 동기(distributed synchronization) 기법이 제안되었다. 그러나 클러스터 간에 동기를 이룬 경우에도 MR-TTI(Mesh Router Transmission Time Interval) 구간에서 다수의 MR간 거리에 따라 서로 다른 지연 시간을 가질 수 있으며, 이로 인하여 인접 심볼간 간섭(Inter Symbol Interference; ISI)와 인접 부반송파간 간섭(Inter Carrier Interference; ICI)에 의한 심각한 성능 열화가 발생할 수 있다. 기존의 OFDMA 기반 셀룰러 통신 시스템에서는 기지국에서 TDoA에 의한 간섭이 발생하지 않도록 단말이 송신 시간을 조절하지만, WMN에서는 근본적으로 MR의 송신 시간 조절을 통하여 TDoA에 의한 간섭을 극복할 수 없다. OFDM 시스템에서는 TDoA에 의한 ISI와 ICI를 회피하기 위하여 최대 CIR(Channel Impulse Response) 길이와 지연 시간차의 샘플 수의 합보다

큰 보호 구간 샘플 수를 필요로 한다<sup>[10]</sup>. 그러나 추가적인 보호 구간 및 보호 부반송파는 채널 용량과 시스템 수율을 감소시킨다. 따라서 OFDMA 기반 WMN에서 채널 용량 및 시스템 수율을 감소시키지 않으며 TDoA에 의한 간섭을 극복하는 기법의 연구가 필요하다.

본 논문에서는 OFDMA 기반의 WMN에서 추가적인 보호 구간 및 보호 부반송파를 사용하지 않으며, 분산 MR간 TDoA에 의한 ISI 및 ICI 간섭을 완화시키기 위한 자원할당 기법을 제안한다. WMN에서 TDoA 따른 ISI와 ICI의 영향을 최소화하기 위하여 각 MR별로 자원할당에 따른 SINR(Signal to Interference and Noise Ratio)을 정의하고, 이를 바탕으로 모든 MR에게 균등한 자원을 할당하는 기법을 제안한다. 제안된 자원 할당 기법은 기존의 기법과 비교하여 WMN에서 BER(Bit Error Rate)과 SIR(Signal to Interference Ratio) 성능이 크게 향상되는 것을 모의 실험을 통하여 확인한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 OFDMA 기반 WMN에서 TDoA에 의해 발생하는 간섭의 영향을 살펴보고, III장에서는 TDoA에 의한 간섭을 최소화할 수 있는 자원 할당 기법 및 절차를 제안한다. IV장에서는 모의 실험을 통해 자원 할당 기법의 성능을 분석하며, V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. OFDMA기반 WMN에서 TDoA에 의한 간섭의 영향

본 장에서는 하나의 CH와 다수의 MR이 존재하는 클러스터 환경에서 MR간 발생 가능한 TDoA에 의한 ISI 및 ICI에 대해 기술한다. 그림 1은 WMN에서 신호 전송 경로의 예를 보여준다. 여기서, MR과 CH간, MR과 MR간 통신이 동시에 가능한 MR-TTI 구간을 고려한다<sup>[8]</sup>.

그림 1에서, MR0은 CH에게 상향링크 신호를 송신하며, 다른 MR이 CH에게 전송한 상향링크 신호와의

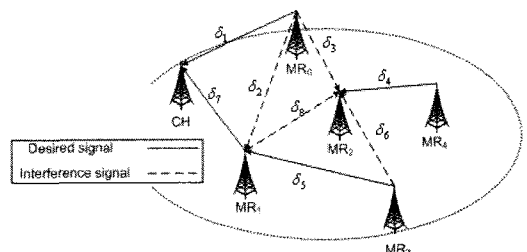


그림 1. WMN에서 MR-TTI 구간 시 신호 전송 경로의 예

MAI (Multiple Access Interference)를 회피하기 위하여 MR-RACH (Random Access Channel)를 이용하여 CH에 수신 시간을 동기화 시킨다. MR3와 MR4는 각각 MR1와 MR2에게 신호를 전송한다. 각 MR은 인접 채널간 간섭(Inter-Channel Interference)를 회피하기 위하여 서로 다른 부반송파 집합을 사용한다. 그림 2는 클러스터 내 각 MR에 할당된 자원 type을 보여주는 그림이며, 본 논문에서는 서로 중첩되지 않는 부반송파 집합을 사용하며 block type을 가정한다. 그림 2에 나타난 바와 같이 OFDMA를 적용하여 각 MR은 인접 MR과의 인접 채널간 간섭을 회피할 수 있지만 WMN에서 각 MR들은 공간적으로 분산되어 있기 때문에 서로 다른 전파 지연에 의한 ISI 및 ICI가 발생한다. 그림 3은 서로 다른 전파 지연을 갖는 수신 신호를 보여준다. 여기서  $\phi_{d,u}$ 는 desired 신호(Block #1 signal)과 u번째 undesired 신호 사이의 TDoA를 나타낸다. 그림 3에 나타난 바와 같이 MR이 desired 신호에 대해 심볼 타이밍을 추정하고 FFT를 수행하더라도 TDoA에 의해 이전 undesired 신호(Block #2 signal)와 다음 undesired 신호(Block #3,4 signal)에 의한 ISI 및 ICI가 나타나기 때문에 네트워크 성능이 열화된다<sup>[5,11]</sup>.

u개의 서로 다른 전파 지연을 갖는 신호가 수신될 때 desired 신호 d에 대한 SINR은 다음과 같이 나타난다<sup>[10,11]</sup>.

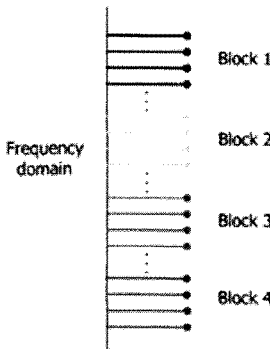


그림 2. 클러스터 내 MR의 자원 분포의 예

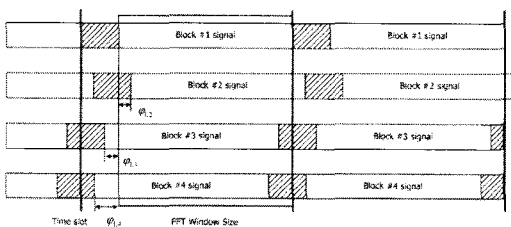


그림 3. 서로 다른 지연 시간을 갖는 수신 신호의 예

$$SINR_{d,k} = \frac{|H_{d,k}|^2}{I_{TDoA,k}^d + \frac{\rho_0^\beta}{E_s / N_0}} \quad (1)$$

여기서,  $|H_{d,k}|^2$ ,  $I_{TDoA,k}^d$ ,  $\rho_0^\beta$ ,  $E_s$ 와  $N_0$ 는 주파수 영역에서 부반송파 인덱스 k에서 desired signal d의 채널 이득, TDoA에 의한 ISI 및 ICI, desired 신호의 전파 지연에 따른 경로 손실, 수신 신호의 에너지와 잡음을 나타낸다.  $\beta$ 는 감쇠 지수를 나타낸다, reference 부반송파 집합 m에 따른 desired signal d의 TDoA에 의한 간섭은 다음과 같이 주어진다.

$$I_{TDoA,m}^d = \sum_{u \neq d}^U \left( \frac{\rho_u}{\rho_0} \right)^{-\beta} \sum_{c=0}^{C-1} E \left[ |h_{u,c}|^2 \right]^2 \times \left| \sum_{j \in m} (b_{u,j}^- - b_{u,j}^+) \zeta \left( j - k, \frac{(\rho_u - \rho_0)\Delta + \tau_{u,c}}{T_s} \right) \right| \quad (2)$$

$$\zeta(p, n) = \begin{cases} 0, & , 0 < n \leq N_g \\ \frac{\sin \left( \pi \frac{n - N_g}{N} p \right)}{N \sin \left( \frac{\pi p}{N} \right)} e^{j \frac{\pi p}{N} (n + N_g - 1)}, & , N_g < n \leq N + N_g \end{cases} \quad (3)$$

$$A_{u,m} = (0, \dots, \lfloor N/m \rfloor + \lfloor N/m \rfloor \cdot (m-1) - 1) \quad (4)$$

$$A_{u,m} \cap A_{d,m} = \Phi, \quad u \neq d \quad (5)$$

여기서,  $h_{u,c}$ ,  $N_g$ ,  $N$ ,  $\Delta$ ,  $\tau_{u,c}$ ,  $T_s$ 와  $A_{u,m}$ 는 u-번째 MR에서 전송된 신호의 c-번째 채널 경로, 보호구간의 길이, FFT size, 클러스터 반경을 고려한 최대 지연, 채널 지연, 샘플링 주기와 u-번째 MR에게 할당된 부반송파 집합을 나타낸다. (5)에 나타난 바와 같이 인접 MR간 할당된 부반송파 집합은 OFDMA기법을 통해 중첩되지 않는다.  $\{b_{u,j}^-, b_{u,j}^+\}$ 는 j-번째 부반송파에서 전송되는 연속적인 두 심볼을 나타낸다. TDoA에 의한 간섭이 발생하지 않기 위해서는 (2)에 나타난 항목  $(b_{u,j}^- - b_{u,j}^+)$ 와  $\zeta(j - k, (\rho_u - \rho_0)\Delta + \tau_{u,c} / T_s)$ 를 제거해야한다. 이를 위해선  $b_{u,j}^- = b_{u,j}^+$  또는 TDoA 항목인  $(\rho_u - \rho_0)\Delta + \tau_{u,c} / T_s$ 가 보호구간( $N_g$ ) 길이보다 작을 때 부반송파간 직교특성이 유지된다. TDoA에 의한 간섭을 제거하기 위해 추가적인 보호구간을 삽입하였을 때의 효율은 다음과 같다.

$$E_t = \frac{E_{Ecp}}{E_{Con}} = \frac{N_{frame} - N_{sym} (N_g + N_{Ecp})}{N_{frame} - N_{sym} N_g} \quad (6)$$

여기서  $E_t$ ,  $E_{Exp}$ 와  $E_{Con}$ 는 시간영역에서의 시스템 효율, 추가 보호구간을 삽입하였을 때의 효율과 기존의 보호구간을 삽입하지 않은 경우의 효율을 나타낸다.  $N_{frame}$ ,  $N_{sym}$ 와  $N_{Exp}$ 는 한 프레임의 길이, 한 프레임 내의 심볼 개수와 추가적으로 삽입한 보호구간의 길이를 나타낸다. (6)에 나타난 바와 같이  $N_{Exp}$ 의 길이에 따라 시스템 효율  $E_t$ 가 감소하는 것을 알 수 있다.

또한 TDoA에 의한 간섭을 제거하기 위해 보호 부반송파를 삽입하였을 때의 효율은 다음과 같다.

$$E_f = \frac{E_{Egc}}{E_{Con}} = \frac{(BW - F_{gc})}{BW} \quad (7)$$

여기서  $E_f$ 와  $E_{Egc}$ 는 주파수 영역에서의 시스템 효율과 추가 보호 부반송파를 삽입하였을 때의 효율을 나타낸다.  $BW$ 와  $F_{gc}$ 는 대역폭과 추가 삽입한 보호 부반송파를 나타낸다. (6)과 마찬가지로 삽입한 보호 부반송파  $F_{gc}$ 의 개수에 따라 시스템 효율  $E_f$ 가 감소하는 것을 알 수 있다.

따라서 시스템 효율을 감소시키지 않으며 TDoA에 의한 ISI 및 ICI의 영향을 최소화할 수 있는 방식의 연구가 필요하다. (2)와 (3)에 나타난 바와 같이 TDoA에 의한 간섭은 desired 신호가 할당된 대역과 undesired 신호가 할당된 대역이 멀리 떨어져 있을수록 감소한다. 이러한 특성을 이용하여 본 논문에서는 undesired 신호와 desired 신호간의 TDoA와 CIR을 고려하여 TDoA에 의한 간섭의 영향이 큰 신호를 desired 신호로부터 멀리 배치하는 자원할당 기법을 제안한다. 제안하는 자원할당 기법에서는 보호구간 및 보호 부반송파를 삽입하지 않기 때문에 시스템 효율이 기존과 동일하게( $E_t = E_f = 1$ ) 유지되며 TDoA에 의한 간섭이 최소화하는 것을 특징으로 한다. 본 논문에서,  $MR_u$ 의 CIR은 혼련 신호 또는 파일럿 심볼을 이용하여 획득한 상황을 가정한다.

### III. TDoA에 의한 간섭을 최소화하는 자원할당 기법

TDoA에 의한 간섭을 최소화하기 위한 목적 함수는 desired 신호의 자원할당에 따른 SINR을 최대화하는 것으로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{maximize } SINR_{d,m} = \sum_{k \in m} \frac{|H_{d,k}|^2}{I_{TDoA,k}^d + \frac{\rho_0^\beta}{E_s / N_0}} \\ & \text{subject to} \\ & \min(R_{u,m}) > R_T, \quad \forall u \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $SINR_{d,m}$ ,  $R_T$ 와  $R_{u,m}$ 는 부반송파 집합  $m$ 에 따른 desired 신호의 SINR, 만족해야 하는 전송률과  $u$ -번째 메쉬 라우터의 전송률을 나타낸다. (8)은 클러스터 내 모든 MR에게 균등한 자원 할당을 위해 클러스터 내 모든 MR이 주어진 전송률을 만족하면서 타겟 MR의 SINR을 최대화하는 자원배치를 목적으로 한다. 이 경우 모든 MR은 QoS (Quality of Service)를 만족할 순 있지만 시스템 효율이 극대화되지 않는다.  $\max(SINR)$ 와  $\min(1/SINR)$ 는 등가이므로 이를 만족하는 부반송파 집합은  $\min(1/SINR_{d,m})$ 를 통해 찾을 수 있다.

본 논문에서는 (8)에 나타난 최적화 함수를 통해 WMN에서 TDoA의 간섭을 최소화할 수 있는 자원할당 기법을 제안한다. (8)에 나타난 바와 같이  $\min(1/SINR_{d,m})$ 을 만족하기 위해 먼저 누설 확률(outage probability)를 찾는다. 누설 확률은 수신된 SINR이 주어진 임계값보다 작은 경우를 의미하며 보통 요구되는 BER로부터 계산된다. (8)에서 높은 SNR 환경을 고려하여 잡음의 영향을 제거하면, 부반송파 집합  $m$ 에 따른  $u$ -번째 MR의 누설 확률은 다음과 같이 나타낸다<sup>[12]</sup>.

$$\begin{aligned} O_{u,m} &= \text{Prob}(SINR_{u,m} \leq SINR_{th}) \\ &= \text{Prob}(SIR_{u,m} \leq SIR_{th}) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $O_{u,m}$ 와  $SIR_{th}$ 는  $u$ -번째 MR의 누설 확률과 SIR 임계값을 나타낸다. (9)는 (8)을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$O_{u,m} = \text{Pr}\left(|H_{u,m}|^2 \leq SIR_{th} \cdot I_{TDoA,m}^u\right) \quad (10)$$

(9)에 나타난  $O_i$ 는 [13]을 참조하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} O_{u,m} &= \text{Pr}\left(|H_{u,m}|^2 \leq SIR_{th} \cdot I_{TDoA,m}^u\right) \\ &= 1 - \prod_{u=d} \frac{1}{1 + \frac{SIR_{th} \cdot I_{TDoA,m}^u}{|H_{u,m}|^2}} \end{aligned} \quad (11)$$

부반송과 집합  $m$ 에 따른  $u$ -번째 MR의 전송률  $R_{u,m}$ 는 SIR의 함수로 주어지며 다음과 같다.

$$R_{u,m} = (1/T_s) \log_2(1 + K_u \cdot SIR_{u,m}) \quad (12)$$

여기서,  $K_u$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$K_u = -\frac{1.5}{\ln(5 \cdot BER_u)} \quad (13)$$

$BER_u$ 는  $u$ -번째 MR의 요구되는 BER을 나타낸다. (12)에 나타난 바와 같이 전송률과 SIR은 비례관계이므로 (8)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{maximize } R_{d,m} \\ &\text{subject to} \\ &R_{u,x} \geq R_t, \quad \forall u \\ &\sum_{u=d} I_{TD\text{DoA},m}^u \leq I_t \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $R_{u,m}$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$R_{u,m} = \frac{W}{U+1} \cdot \log_2 \left( 1 + K_u \cdot \frac{|H_{u,m}|^2}{I_{TD\text{DoA},m}^u} \right) \quad (15)$$

부반송과 집합  $m$ 에 따른  $u$ -번째 MR의  $I_{TD\text{DoA},m}^u$ 에 의한 전송률을 계산하기 위해  $R_{u,m}$ 의 1차 도함수를 다음과 같이 나타낸다.

$$g_{u,I_{TD\text{DoA},m}^u} = \frac{\partial R_{u,m}}{\partial I_{TD\text{DoA},m}^u} \quad (16)$$

(15)의 log항의 편미분은 (17)와 (18)에 나타난 성질을 이용하면

$$(\log f(x)) = \frac{f'(x)}{f(x)} \quad (17)$$

$$\log_2 \left( 1 + K_u \cdot \frac{|H_{u,m}|^2}{I_{TD\text{DoA},m}^u} \right) = \frac{\log \left( 1 + K_u \cdot \frac{|H_{u,m}|^2}{I_{TD\text{DoA},m}^u} \right)}{\log 2} \quad (18)$$

(16)은 다음과 같이 정리된다.

$$g_{u,I_{TD\text{DoA},m}^u} = \frac{W}{U+1} \cdot \frac{K_u \cdot |H_{u,m}|^2 \cdot \log 2}{I_{TD\text{DoA},m}^u \cdot (I_{TD\text{DoA},m}^u + \Omega_{u,m})} \quad (19)$$

$$\Omega_{u,m} = K_u \cdot |H_{u,m}|^2 \quad (20)$$

(19)에 나타난  $R_{u,m}$ 의 1차 도함수는  $\Omega_{u,m} > 0$ 와  $I_{TD\text{DoA},m}^u \cdot (I_{TD\text{DoA},m}^u + \Omega_{u,m}) > 0$ 을 만족하므로 TDDoA에 의한 모든 간섭에 대해 양의 값을 갖는다.

(17)의 2차 도함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{dg_{u,I_{TD\text{DoA},m}^u}}{dI_{TD\text{DoA},m}^u} = \frac{W}{(U+1) \cdot \log 2} \left( \frac{-1}{I_{TD\text{DoA},m}^u} + \frac{1}{I_{TD\text{DoA},m}^u + \Omega_{u,m}} \right) \quad (21)$$

여기서,  $I_{TD\text{DoA},m}^u > 0$ 이고  $\forall \Omega_{u,m} > 0$ 을 만족하므로 2차 도함수는 음의 값을 가지며 단조 감소 함수이다. 따라서  $R_{u,m}$ 는 최대값을 가지며, 이를 만족하는  $I_{TD\text{DoA},m}^u$ 를 찾아야한다.

$R_{u,m}$ 을 최대화할 수 있는  $I_{TD\text{DoA},m}^u$ 를 찾기위해 다음과 같이 Lagrangian 함수를 정의한다.

$$L(I_{TD\text{DoA},m}^u, \lambda_u) \equiv R_{u,m} - R_t - \lambda_u \left( \sum_{i=1, i \neq u}^U I_{TD\text{DoA},m}^i - I_t \right) \quad (22)$$

여기서,  $\lambda_u$ 는 Lagrangian multiplier를 나타낸다. KKT(Karush-Kuhn-Tucker) 이론<sup>[14]</sup>을 적용하여 (22)의  $I_{TD\text{DoA},m}^u$ 에 대한 1차 도함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial L(I_{TD\text{DoA},m}^u, \lambda_u)}{\partial I_{TD\text{DoA},m}^u} = 0, \quad \text{i.e., } g_{u,I_{TD\text{DoA},m}^u} = \lambda_u \quad (23)$$

(21)에 나타난 2차 도함수는 단조 감소 함수이기 때문에  $\forall \Omega_{u,m} > 0$ 에 대해  $g_{k,I_{TD\text{DoA},m}^k}^{-1}$ 가 존재한다. (25)에 나타난  $g_{k,I_{TD\text{DoA},m}^k}^{-1}$ 에 대해서  $g_{k,\lambda_u}^{-1} = I_{TD\text{DoA},m}^k, \forall k$ 이므로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1, i \neq u}^U g_{i,\lambda_u}^{-1} = I_t \quad (24)$$

(24)의 좌항을 다음과 같이 정의하면,

$$q_{\lambda_u} \equiv \sum_{i=1, i \neq u}^U g_{i,\lambda_u}^{-1} \quad (25)$$

(23)에 나타난 2차 도함수는 음의 값을 가지므로

$dq/d\lambda_u$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{dq}{d\lambda_u} &= \sum_{i=1, i \neq u}^U \frac{dg_i^{-1}}{d\lambda_u} \\ &= \sum_{i=1, i \neq u}^U \left( 1 / \left( \frac{dg_i}{dI_{TDoA, m}^u} \right) \right) < 0 \end{aligned} \quad (26)$$

$q_{\lambda_u}$ 는 단조 감소 함수이며 Lagrange multiplier  $\lambda_u$ 는 다음과 같다.

$$\lambda_u^* = q_{\lambda_u}^{-1} \quad (27)$$

마지막으로  $R_{u, m}$ 을 최대화하는 TDoA에 의한 간섭은 다음과 같이 주어진다.

$$I_{TDoA, m}^u = g_{u, \lambda_u}^{-1}. \quad (28)$$

CH는 (28)에 나타난  $u$ -번째 MR이 전송하는 부반송과 집합  $m$ 에 따른  $I_{TDoA, m}^u$ 을 참조하여 각 MR에게 TDoA의 영향을 최소화할 수 있는 부반송과 집합을 할당한다.

표 1은 (8)부터 (28)에 나타난 TDoA를 갖는 WMN에서 자원할당 과정을 보여주는 의사 코드이다. 제안하는 자원할당 과정은 크게 2 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계는 각 MR이 임의의 부반송과 집합에 따른 TDoA에 의한 간섭을 측정하는 단계이다. 각 MR은 간섭을 측정하면서 전송률을 만족하는 부반송과 집합의 후보를 CH에게 전송한다. 두 번째 단계로써 CH는 각 MR로부터 전송 받은 부반송과 집합의 후보중, 전송률을 최대화할 수 있는 부반송과 집합을 각 MR에게 할당한다.

#### IV. 모의실험

본 장에서는 그림 1에 나타난 시나리오에서 TDoA를 갖는 OFDMA 기반 WMN에서 TDoA에 의한 간섭을 최소화할 수 있는 제안된 자원할당 기법의 성능을 평가한다. 모의실험에서는 256개의 부반송과 ( $N=256$ )와 32개의 샘플의 보호구간( $N_g=32$ )를 가정하였다. 클러스터 커버리지는 1km, 각 MR의 커버리지는 500m, 클러스터 내의 부반송과 집합의 수는 8, MR의 수는 5를 가정하였다. 그림 1에서 MR1의 desired 신호 MR3에서 전송된 신호와 undesired 신호

간 발생한 TDoA( $\phi_{1,0}$ )는 -8 샘플, MR2의 desired 신호 MR4에서 전송된 신호와 undesired 신호간 발생한 TDoAs( $\phi_{2,0}, \phi_{2,1}, \phi_{2,3}$ )는 각각 -4, -2, 8 샘플을 가정하였다. 즉, MR1은 TDoA의 영향으로 다음 심볼에 의한 ISI 및 ICI가 발생하고, MR2는 이전 심볼 및 다음 심볼에 의한 ISI 및 ICI가 발생한다. CIR의 PDP는 26개의 샘플을 갖는 지수 모델을 사용하였다. 일반적으로 OFDMA 상향링크 시스템에서는 셀 내 각 단말의 전력 제어를 통해 기지국에 수신되는 신호들의 수신 전력이 동일하지만, 본 시나리오와 같이 일반적인 WMN에서는 OFDMA 상향링크 시스템과 다르게 undesired 신호의 수신 전력이 desired 신호의 수신 전력에 비해 높은 경우가 존재한다.

그림 4와 그림 5은 제안된 방식의 BER 성능과 SIR 성능을 기존 방식과 비교하여 나타낸 그림이다. 여기서 TDoA에 의한 간섭이 발생하였을 때 자원할당 방식에 따른 성능을 확인하기 위하여 각 MR의 CIR에

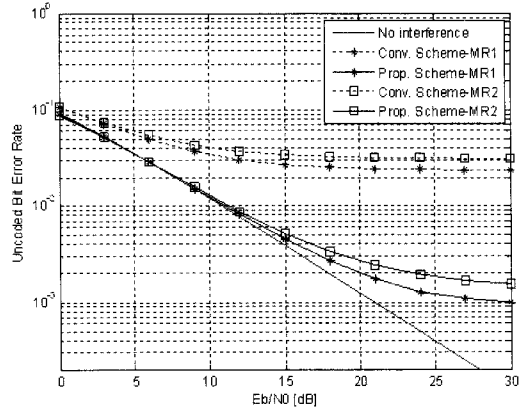


그림 4. 제안된 자원할당 기법을 적용한 BER 성능 (case I)

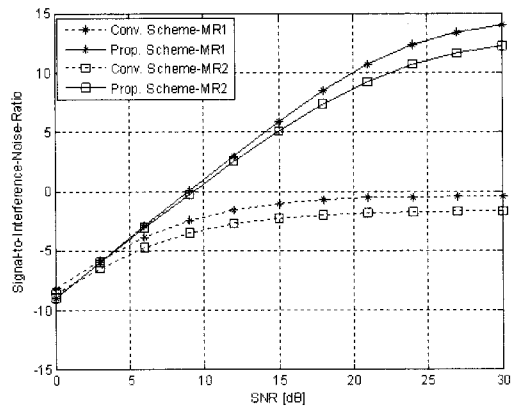


그림 5. 제안된 자원할당 기법을 적용한 SIR 성능 (case I)

Phase 1 : Find an Interference solution

(Find an Interference solution  $I_{TDoA,m}^u$ )

$$I_{TDoA,m}^u = \sum_{i=1}^U \left( \frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^\beta \sum_{c=0}^{C-1} E[|h_{i,c}|^2] \times \left| \sum_{j \in m} (b_{i,j}^- - b_{i,j}^+) \zeta \left( j-k, \frac{(\rho_i - \rho_0)\Delta + \tau_{i,k}}{T_i} \right) \right|$$

$$g_{u, I_{TDoA,m}^u} = \frac{W}{U+1} \frac{K_u |H_{u,m}|^2 \cdot \log 2}{I_{TDoA,m}^u (I_{TDoA,m}^u + K_u |H_{u,m}|^2)}$$

$q_{\lambda_u} = \sum_{i=1, i \neq u}^U g_{i, \lambda_u}^{-1}$   
 if  $\lambda_u^* < 0$ , then "problem is infeasible" (Stop),  $\lambda_u^* = q_{\lambda_u}^{-1}$   
 $I_{TDoA,m}^u = g_{u, \lambda_u}^{-1}$ ;

Phase 2 : Find appropriate set of subcarrier allocation for all MR

Choose  $A_{u,m}$  such that

$$A_{u,m} = A_{i,m} \cap A_{j,m}, \quad d, i \in U$$

$$R_{u,m} = \frac{W}{U+1} \cdot \log_2 \left( 1 + K_u \cdot \frac{|H_{u,m}|^2}{I_{TDoA,m}^u} \right)$$

Calculate  $R_{u,m}$  associated with  $A_{u,m}$

Choose  $\hat{R}_{u,m} = \max(R_{u,m})$

Set of subcarrier allocation  $A_{i,m}$  associated with  $\hat{R}_{u,m}$  is assigned to MR  $i$

표 1. 차세대 이동 WMN에서의 핸드오버 시나리오

따른 AMC(Adaptive Modulation Coding) 및 부반송파의 전력 할당은 고려하지 않는다. 기존 방식은 CH가 TDoA에 의한 간섭의 영향을 고려하지 않은 채 8개의 부반송파 집합 중 각 MR에게 할당되는 부반송파 집합을 임의로 할당한 경우를 가정한다. 따라서 기존 방식에서는 TDoA에 의한 간섭이 큰 undesired 신호들이 desired 신호와 인접하게 할당될 수 있다. 그림 4에, 기존 방식이 적용되었을 때 MR1과 MR2의 관점에서 BER 성능이 점선으로 표시되었으며, 이 그림으로부터 TDoA에 의한 간섭에 의해 성능이 크게 열화됨을 확인할 수 있다. 실선은 제안된 자원 할당 기법을 적용한 경우의 성능을 보여준다. 제안된 자원 할당 기법을 적용한 경우 기존 방식과 비교하였을 때, 시스템 효율을 동일하게 유지하며 성능이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있다. 제안된 자원 할당 기법에서는 클러스터 내의 특정 MR만을 고려하지 않고 모든 MR의 전송률을 고려하여 자원을 할당하기 때문에 간섭이 없는 이상적인 환경에 비해서는 높은 SNR 환경에서 성능 열화가 발생함을 알 수 있다. 그림 5에 나타난 SIR 성능 또한 기존 방식에 비해 제안된 방식을 적용하였을 때 성능이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있다.

그림 6와 그림 7은 그림 1에서 MR1의 desired 신호 MR3에서 전송된 신호와 undesired 신호간 발생한 TDoA( $\phi_{1,0}$ )는 -5 샘플, MR2의 desired 신호 MR4에서 전송된 신호와 undesired 신호간 발생한 TDoAs

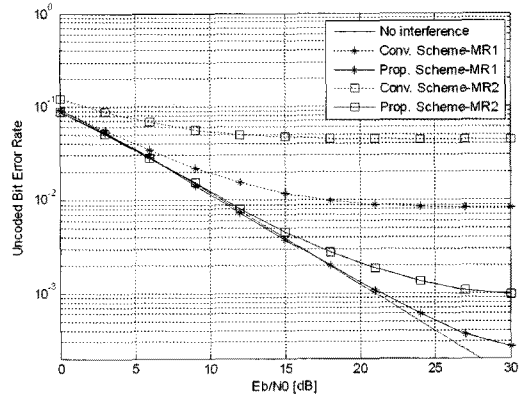


그림 6. 제안된 자원할당 기법을 적용한 BER 성능 (case II)

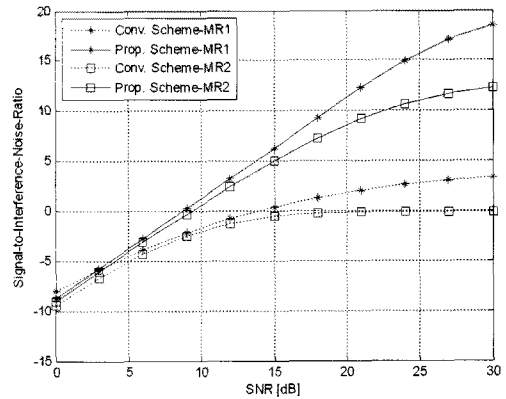


그림 7. 제안된 자원할당 기법을 적용한 SIR 성능 (case II)

( $\phi_{2,0}, \phi_{2,1}, \phi_{2,3}$ )는 각각 -1, 7, -5 샘플을 가정한 경우 제안된 방식의 BER 성능과 SIR 성능을 기존 방식과 비교하여 나타낸 그림이다. 그림 4부터 그림 7에 나타난 바와 같이 제안하는 자원 할당 기법을 적용한 경우 기존 방식과 비교하였을 때, 시스템 효율을 동일하게 유지하며 성능이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 OFDMA기반의 WMN에서 분산 MR간 TDoA에 의한 ISI 및 ICI 간섭을 완화시키기 위한 자원 할당 기법을 제안하였다. 무선 메쉬 네트워크에서 서로 다른 지연 시간에 따른 ISI와 ICI의 영향을 최소화하기 위하여 각 노드별로 자원 할당에 따른 SINR을 정의하고, 이를 바탕으로 클러스터 내 모든 MR에게 균등하게 자원을 할당하는 기법을 제안하였다. 제안된 자원 할당 기법은 기존의 기법과 비교하여

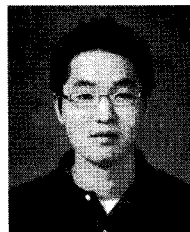
무선 메쉬 네트워크에서 BER 성능과 SIR 성능이 크게 향상되는 것을 모의실험을 통하여 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] E. Hossain and K. K. leung, "Wireless Mesh Networks: Architectures and Protocols," *Springer Media*, 2008.
- [2] I. F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, "Wireless mesh networks: A survey," *Computer Networks (Elsevier)*, Vol.47, pp.445-487, Mar., 2005.
- [3] Ö. Oyman, J. N. Laneman, and S. Sandhu, "Multihop relaying for broadband wireless mesh networks: from theory to practice," *IEEE Commun. Mag.*, Vol.45, No.11, pp.116-122, Nov., 2007.
- [4] J. H. Huang, L. C. Wang, and C. J. Chang, "Chapter 2: Architectures and Deployment Strategies for Wireless Mesh Networks," *Wireless Mesh Networks, Springer US*, 2008.
- [5] M. Alicherry, R. Bhatia, and L. E. Li, "Joint Channel Assignment and Routing for Throughput Optimization in Multi-radio Wireless Mesh Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.24, No.11, pp.1960-1971, Nov., 2006.
- [6] S. Xu and T. Saadavi, "Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop ad hoc networks?," *IEEE Communications Magazine*, pp.130-137, Jun., 2001.
- [7] M. Marina, S. Das, "A topology control approach for Utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks", *IEEE International Conference on Broadband Networks*, pp.381-390, Oct., 2005.
- [8] H. Anouar, C. Bonnet, F. Kaltenberger, and R. Knopp, "OpenAirMesh-an experimental platform for cooperative mesh networks," *Proc. 1st COST2100 Workshop on MIMO and Cooperative Communications*, Trondheim, Norway, Jun., 2008.
- [9] E. Sourour and M. Nakagawa, "Mutual Decentralized Synchronization for Intervehicle Communications," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Vol.48, pp.2015-2027, Nov., 1999.
- [10] H. K. Son, S. H. Lee and G. T. Gil, "The Mai Mitigation Scheme for OFDM-based Asynchronous Networks over Multi-Cell Environments," *Proc. of IEE VTC 2008*, pp.2331-2335, May, 2008.
- [11] K. A. Hamdi, "Precise Interference Analysis of OFDMA Time-Asynchronous Wireless Ad-hoc Networks," *IEEE Transaction on Wireless Communications*, Vol.9, No.1, pp.134-144, Jan., 2010
- [12] S. Kandukuri and S. Boyd, "Optimal Power Control in Interference Limited Fading Wireless Channels with Outage Probability Specifications," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.1, No.1, pp.46-55, Jan., 2002.
- [13] Y. D. Yao and A. Sheikh, "Outage Probability Analysis for Microcell Mobile Radio Systems with Cochanel Interferers in Rician/Rayleigh Fading Environment," *Electron. Letter*, Vol.26, No.13, pp.864-866, Jun. 1990.
- [14] D. Bertsekas, *Nonlinear Programming*, Belmont, MA: Athena, 1995.

유 현 일 (Hyun Il Yoo)

정회원

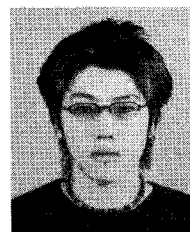


2005년 2월 중앙대학교 전자전  
기공학부 졸업(학사)  
2007년 2월 중앙대학교 전자전  
기공학부 졸업(석사)  
2007년 3월~2011 2월 중앙대  
학교 공학 박사  
2011 2월~현재 Lignex1 통신연  
구센터 선임연구원

<관심분야> 디지털통신, 무선모뎀, OFDM, WMNs

박 창 환 (Chang Hwan Park)

정회원



2005년 2월 중앙대학교 전자전  
기공학부 졸업(학사)  
2007년 2월 중앙대학교 전자전  
기공학부 졸업(석사)  
2007년 3월~현재 중앙대학교  
전자전기공학부 박사과정  
<관심분야> 디지털통신, 무선모뎀,  
OFDM, MIMO



조 용 수 (Yong Soo Cho)

종신회원



1984년 2월 중앙대학교 전자공  
학과 졸업(학사)

1987년 2월 연세대학교 전자공  
학과 졸업 (석사)

1991년 2월 The University of  
Texas at Austin 공학박사

1992년 3월~현재 중앙대학교 전  
자전기공학과 교수

2003년 8월~2007년 12월 TTA 휴대인터넷 (와이브  
로) 프로젝트그룹 (PG302) 무선접속 실무반 의장  
<관심분야> 4G 이동통신, OFDM/DMT 모뎀 설계,  
MIMO-OFDM 모뎀 설계