

생체모방 알고리즘을 이용한 OFDMA 무선 메쉬 통신시스템의 분산 시간 동기화 기법 연구

김미정*, 이윤재*, 조용수^o

A Distributed Time Synchronization Technique for OFDMA-based Wireless Mesh Communication Systems Using Bio-inspired Algorithm

Mi-Jeong Kim*, Yun-Jae Lee*, Yong-Soo Cho^o

요 약

본 논문에서는 최근 차세대 무선 통신네트워크 기술로 주목받고 있는 OFDMA 무선 메쉬통신시스템에서의 분산 시간동기화 기법을 제안한다. 제안방식은 물리계층 기반에서 이루어지는 생체모방 알고리즘을 활용한 자가 분산 시간동기화 기법으로, 인접 이웃노드로부터 수신된 신호의 TDoA(Time Difference of Arrival) 정보를 이용하여 다음 주기의 전송주기와 FFT 시작점을 업데이트한다. 분산처리가 가능한 생체모방 알고리즘의 장점이 반영되어, 제안된 동기화 기법에서도 중앙제어 없이 주위 정보(local Information)와 각 노드에 의한 분산처리만으로 빠르고 간단하게 노드 간 시간 동기 획득이 가능하다. 제안된 분산 시간 동기화 기법은 모의실험을 통하여 시간동기화 수렴 확률 및 정확도 등의 측면에서 성능을 분석한다.

Key Words : OFDMA, Time Synchronization, Bio-inspired Algorithm, Wireless Mesh Network

ABSTRACT

In this paper, we propose a distributed time synchronization technique for OFDMA-based wireless mesh communication systems. The proposed technique employs the bio-inspired algorithm for self-time synchronization in the physical layer. To achieve the network synchronicity, the proposed technique updates the transmission time and the FFT window using the TDoA information of received signals from the neighbor nodes. The proposed technique can achieve fast self-synchronization among nodes with a simple algorithm, without the need of a centralized controller. The performance of the proposed time synchronization technique is evaluated by simulation in terms of convergence speed and convergence probability.

I. 서 론

무선 메쉬네트워크는 추가적인 유선망을 증설하지 않고 저렴한 비용으로 기존의 무선 채널을 보다

넓은 영역으로 확장시켜 시스템 수율을 향상시키고, 네트워크의 운용 및 보수에 용이한 장점을 가지고 있다. 또한 다중 인터페이스와 다중 채널을 지원함으로써 기존의 무선 네트워크에서 발생하는 여러

* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(NIPA-2013-H0301-13-1002)과 2012년도 교육과학기술부의 한국연구재단의 기초연구사업(2012005603) 지원을 받아 수행되었음

• First Author : School of Electric & Electronic Engineering, Chung-Ang University, KOREA, romanstyle@hanmail.com, 정희원

° Corresponding Author : School of Electric & Electronic Engineering, Chung-Ang University, KOREA, yscho@cau.ac.kr, 종신희원

* 중앙대학교

논문번호 : KICS2013-09-399, 접수일자 : 2013년 9월 12일, 심사일자 : 2013년 11월 15일, 최종논문접수일자 : 2013년 11월 26일

가지 문제점들을 해결할 수 있는 대안으로 주목을 받고 있다.

특히 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 기반의 무선 메쉬 통신시스템은 핸드오버와 자원할당의 유연성을 지원하고, 간단한 부반송파 할당기법만으로 다중 채널간 간섭 회피가 용이하여 차세대 통신네트워크에 적합한 물리계층 기반기술로 고려되고 있다. 그러나 OFDMA 시스템은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식과 마찬가지로 시간동기에 매우 민감한 특성을 가지고 있다. OFDMA 시스템에서 노드들의 서로 다른 시간 동기오차는 인접 심볼간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI) 뿐만 아니라, 전체적인 시스템 성능을 열화시킨다. 이러한 간섭을 완화시키기 위해 노드 간 동기를 추정 및 보정하기 위한 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 지금까지의 OFDMA 시스템에서 노드 간 시간동기화 기법은 알고리즘적인 차이가 있으나 대부분 중앙노드에 의한 집중적 제어방식이다. 그러나 높은 데이터 전송률과 이동성 등 차세대 통신네트워크에 대한 이용자 요구를 충족하기 위해서는 중앙 집중적 제어방식이 아닌 분산적, 주변 환경에 대처할 수 있는 적응적 특성이 반드시 고려되어야 한다. 중앙노드에 의한 집중 제어방식은 잦은 제어신호 교환으로 오버헤드 및 시간지연이 많이 발생하고, 에너지 효율 등 전반적인 시스템 성능을 저하시키게 된다^[1]. 이런 이유로 최근 통신, 로봇 등 다양한 연구 분야에서는 생체모방 알고리즘에 대한 관심이 크게 집중되고 있다. 생체모방 알고리즘은 자연계 생물체들의 행동원리를 규명하고 수학적으로 모델링한 알고리즘을 말한다. 실제로 생체모방 알고리즘을 적용한 대부분의 시스템들은 자연계 생물체들과 마찬가지로 간단한 규칙과 동작만으로 자가망 구성이 용이하고, 각각의 노드가 중앙 집중적인 통제 없이도 시스템 전체의 동기화가 가능한 분산적 특성(decentralized characteristic)을 가진다. 이에 본 논문에서는 OFDMA 무선 메쉬 통신시스템에서 생체모방 알고리즘을 적용, 중앙제어 없이 주위 정보(local Information)와 각 노드에 의한 분산처리만으로 노드 간 시간 동기 획득이 가능한 분산 시간동기화 기법을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서 OFDMA 무선 메쉬통신시스템 모델을 설명한다. III장에서는 생체모방 알고리즘을 살펴보고, II장에서 제시된 OFDMA 무선 메쉬통신시스템에서의 생체모

방 알고리즘을 이용한 분산 시간동기화 기법을 제안한다. IV장에서는 모의실험을 통해 제안된 분산 시간 동기화 기법의 성능을 분석한다. V장에서 결론을 맺는다.

II. OFDMA 무선 메쉬 통신시스템 모델

생체모방 알고리즘을 이용한 분산 시간 동기화 기법을 제안하기에 앞서, 본 장에서는 중앙제어 노드가 존재하지 않는 OFDMA 무선 메쉬통신시스템

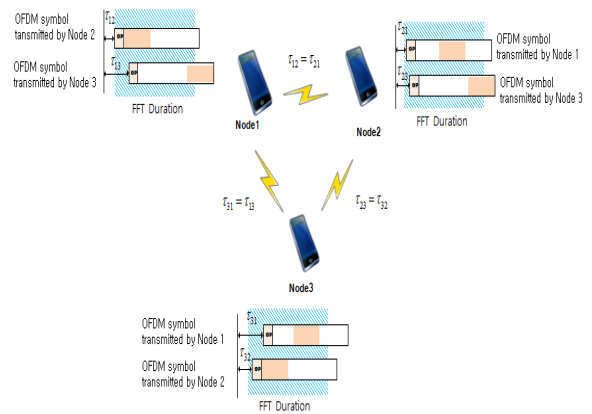


그림 1. OFDMA 기반 무선 메쉬 통신시스템 블록도
Fig. 1. Block diagram of an OFDMA-based wireless mesh communication system

에 대해 살펴본다.

OFDMA 무선 메쉬통신시스템은 N 개의 노드와 K 개의 부반송파로 이루어지며, 부반송파들은 부채널로 묶여져 서로 다른 노드에게 중첩되지 않게 할당된다 (orthogonal allocation). OFDMA 무선 메쉬 네트워크로 연결된 모든 노드들은 초기 레인징 과정을 통해 대략적인 시간 및 주파수 동기를 획득하며, 데이터 전송을 수행하기에 앞서 노드 간 네트워크 동기화를 위한 일련의 전처리(preprocessing) 과정을 수행한다. 각 노드들은 1-hop 노드에게 주기적으로 제어신호를 전송하고, 이를 통해 노드 간 채널 지연 및 이용 가능한 자원정보 등을 공유하고 업데이트한다. 노드들은 수신채널을 통해 언제든 인접 노드의 신호를 수신할 수 있으며, 수신된 정보를 통해 서로 다른 TDoA(Time Difference of Arrivals) 정보를 예측하고 이용할 수 있다^[2]. <그림 1>은 3개의 노드로 구성된 OFDMA 무선 메쉬통신시스템의 예시 블록도이다. 제시된 OFDMA 무선 메쉬통신시스템에서 i 번째 노드가 인접노드들로부터 수신한 신호 $y^{(i)}(n)$ 는 다음과 같다.

$$y^{(i)}(n) = \sum_{j=1}^{N^{(i)}} x_j^{(i)}(n) + z_i(n) \quad (1)$$

$$x_j^{(i)}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} H_{ij}[k] X_j[k] \exp(j2\pi(k + \epsilon_{ij})(n + \delta_{ij})/N) \quad (2)$$

여기서 $X_j[k]$ 는 노드 j 가 k 번째 부반송파를 통해 전송한 OFDM 신호, $H_{ij}[k]$ 는 노드 i 와 노드 j 간 채널, N 은 부반송파 개수를 나타낸다. 이때 노드 j 는 노드 i 와 1-hop으로 연결되어 통신을 수행한다. $N^{(i)}$ 는 노드 i 와 1-hop으로 연결되어 통신을 수행하는 이웃 노드수를 말한다. 그리고 ϵ_{ij} 와 δ_{ij} 는 각각 주파수 오프셋(frequency-offset)과 타이밍 오프셋(timing Offset)이다. 이때 타이밍 오프셋 δ_{ij} 는 각 노드에 의한 전송시간 오차(transmission timing error, t_i) 및 RTD(Round-Trip Delay, RTD)와 같은 채널 전송지연(propagation delay, τ_{ij}) 등을 모두 포함한다³⁾.

제시된 무선 메쉬통신시스템은 크게 네트워크 동기 획득을 위한 동기 패킷 전송슬롯과 데이터 패킷 전송 슬롯으로 구분된다. 무선 메쉬 네트워크 내 모든 노드는 네트워크 동기 획득을 위한 수렴조건을 만족할 때까지 전송주기 T 마다 OFDM 신호를 전송하며, 동시에 1-hop 이웃 노드의 신호를 수신할 수 있다고 가정한다. 이때 최대 동기 패킷 전송슬롯 수는 채널 환경 및 시스템 요구성능 등을 고려하여 설정한다.

본 논문에서는 OFDMA 기반 시스템에서 시간동기화 기법에 대해 다루고자 하므로, 네트워크 각 노드의 전송시간 및 채널 전송지연의 영향만을 고려하여 위의 수식(1)과 (2)를 간략화 하고자 한다. 시간 정보를 표현하는 시간 프로세스(time process)를 제안하는 기법에 맞춰 단순화한 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_j^{(i)}(n) &= t_j(n) + \tau_{ij} \\ &= nT + t_j + \tau_{ij}, \quad j = 1, \dots, N^{(i)} \end{aligned} \quad (3)$$

이때 $r_j^{(i)}(n)$ 은 노드 j 의 n 번째 신호가 노드 i 에 도착한 시간으로, 노드 신호 간 TDoA는 노드의 전송시간 $t_j(n)$ 와 채널 전송지연 τ_{ij} 에 의해 영향

을 받는다. 네트워크 내 모든 노드가 동일한 시간정보를 가지더라도 채널 전송지연에 의해 노드 신호 간 TDoA가 발생함을 알 수 있다(<그림 2>). 본 논문에서는 송·수신단에서 신호검출 및 변복조 등 신호 처리를 위해 소요되는 지연시간(processing delay)은 동일하다고 가정하며, 그 영향은 고려하지 않는다.

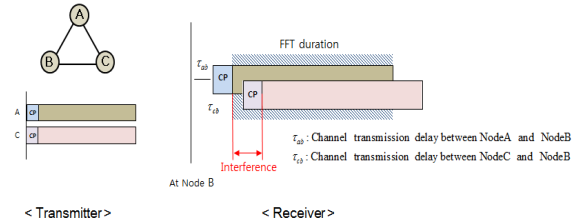


그림 2. 채널 전송지연에 의한 TDoA 영향
Fig. 2. Effect of TDoA due to channel transmission delay

OFDMA 기반 시스템에서 다중노드 신호 간 TDoA는 ISI와 ICI(Inter-Carrier Interference)를 발생시켜 이로 인한 시스템 성능열화가 발생한다. 이때, OFDM 시스템에서는 서로 다른 지연시간에 의한 ISI와 ICI를 회피하기 위하여 최대 CIR 길이와 지연시간차의 샘플수의 합보다 많은 보호구간 샘플 수 또는 최대 CIR 길이와 보호구간 샘플수 차이만큼의 보호 부반송파를 필요로 한다⁴⁾. 더불어 중앙 집중적 제어방식을 사용하는 기존의 OFDMA 무선 통신시스템에서는 BS가 노드 간 TDoA를 고려하여, 각 노드에게 다음 전송시간 조절을 요청한다. 앞서 제시된 노드 간 TDoA의 영향을 완화시키기 위해 제시된 방식들은 채널 용량과 시스템 수율을 감소시킬 뿐만 아니라, 높은 전송률과 분산처리를 요하는 차세대 통신시스템에서는 비교적 적합하지 않아 대안이 요구되고 있다.

III. 제안된 동기화 기법

생체모방 알고리즘은 자연계에 존재하는 다양한 생명체의 행동원리를 수학적으로 모델링하여 만든 알고리즘을 말한다. 최근까지 연구가 활발히 진행되어 온 생체모방 알고리즘으로는 생체의 진화과정을 모델링한 유전자(Genetic) 알고리즘, 개미들이 페르몬 분비를 기반으로 최적의 길을 찾는 과정을 모델링한 개미집단 최적화(Ant Colony Optimization, ACO) 알고리즘, 반딧불의 발광주기의 동기화 과정

을 묘사한 반딧불(Firefly) 알고리즘, 꿀벌들의 먹이 찾는 행동을 모델링한 꿀벌(Bee) 알고리즘 등이 있다⁵⁾. 이러한 생체모방 알고리즘은 주로 최적화 문제에 많이 응용되어 왔으며, 공학은 물론 인문·사회학 등 다양한 분야에서 그 적용방안을 모색해오고 있다. 최근에는 새, 물고기 등과 같은 무리 떼의 자기질서화(Self-Ordered) 현상을 모델링한 군집이론(Flocking Theory)에 관한 연구가 활발히 진행 중이다⁶⁻⁸⁾. 본 논문에서도 앞서 살펴본 무선 메쉬 통신 시스템에서 노드 간 시간 동기화를 할 때 고려해야 할 환경이 Flocking 모델에서 고려하는 환경과 유사하다는 점에 주목한다. 실제로 수 많은 노드수가 그물망처럼 묶여 통신을 수행하게 되는 무선 메쉬 통신시스템에서는 기존의 중앙집중 제어 방식으로 동기화를 수행하는 것은 매우 비효율적이다. 이에 본 절에서는 Cucker-Smale이 제시한 일반적인 Flocking 모델을 살펴보고, OFDMA 무선 메쉬통신 시스템에 그 적용방안을 모색해본다. 그 후, OFDMA 무선 메쉬통신시스템에서 중앙제어 노드 없이 인접 노드의 정보만으로 네트워크 동기화를 획득하기 위한 분산 시간동기화 기법을 제안한다.

3.1. Cucker-Smale의 군집이론

대표적인 생체모방 알고리즘인 군집이론은 1986년 Reynolds에 의해 처음 컴퓨터 시뮬레이션이 이루어진 이후 많은 분야에서 이를 활용한 결과들이 나오고 있다. 군집이론은 각각의 개체들이 자신의 이웃 개체들과의 정보를 바탕으로 자신의 속도를 제어함으로써 타 개체들과의 상호작용을 이뤄 군집 현상이 발생한다는 것이다.

근 F. Cucker와 S. Smale은 각 개체들이 분리성(seperation), 정렬성(alignment), 응집성(cohesion) 세 가지 군집이론 조건들을 분산 방식으로 수행하고, 각 개체들의 초기 속도와 위치가 특정 값의 범위에 있다면 일정 시간이 지난 후에 모든 개체의 속도와 위치는 각 개체들의 초기 속도와 위치의 평균값으로 수렴한다는 사실을 수학적으로 증명하였다⁹⁾. Cucker-Smale모델이라고 불리는 군집이론의 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}x_i = v_i, \quad t > 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}v_i = \frac{\lambda}{N} \sum_{j=1}^N \psi(|x_j - x_i|)(v_j - v_i) \quad (5)$$

여기서 x_i 와 v_i 는 각각 개체 i 의 위치와 속도를 나타내며, N 은 개체의 개수이다. λ 는 개체들 간 결합력의 세기를 나타내며, $\psi(\cdot)$ 는 개체들의 통신 가능한 범위를 나타내는 함수이다. 이때 $\psi(\cdot)$ 함수가 가질 수 있는 값은 다음과 같다.

$$\psi_1(|x_j - x_i|) = 1 \quad (6)$$

$$\psi_2(|x_j - x_i|) = 1_{|x_j - x_i| \leq r} \quad (7)$$

$$\psi_3(|x_j - x_i|) = \frac{1}{(1 + |x_j - x_i|^2)^\beta} \quad (8)$$

위 식에서 r 은 양수, β 는 음수가 아닌 값을 가진다. 수식(5)로부터, 각 개체는 자신의 속도와 자신과 이웃한 개체와의 속도 차이 평균에 가중치를 부여한 값을 통해 자신의 속도를 제어하는 것을 알 수 있다. 이렇듯 각 개체에서 이루어지는 간단하고 독자적인 동작의 반복은 각 개체를 Flocking이라는 집단행동으로 수렴하게 한다. 이와 같이 각 개체들이 서로 주위 개체들의 정보만을 활용하여 자신의 속도 벡터 증감을 조절하면 각 개체들의 속도는 다음과 같이 전체 개체의 평균 속도에 수렴한다.

$$v_c = v_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_j \quad (9)$$

위에서 살펴본 바와 같이, Cucker-Smale 모델은 그 특성상 각 개체에서 정보의 분산 처리를 가정하므로 분산 처리가 요구되는 분야에서 최적화된 해를 구하는데 이론적인 바탕을 제공하고 있다.

본 논문에서는 OFDMA 무선 메쉬통신시스템에서의 분산 시간 동기화 기법을 제안하기 위해 앞서 살펴본 Cucker-Smale 모델을 응용해보고자 한다. 수식 (4)와 (5)에서 이동성을 가진 무리의 객체는 무선 메쉬 네트워크상의 노드로, 무리 속에서 동일한 속도를 유지하는 각 객체의 속도는 네트워크 내에서 노드가 동일하게 가져야 하는 시간 정보로 대응시킬 수 있다. Cucker-Smale 모델과 마찬가지로, 제안된 분산 시간동기화 기법에서는 각 노드가 분산 처리 방식을 통해 자신의 전송범위 내 지역 정보를 바탕으로 미리 정해진 간단한 동작을 수행함으로써 네트워크 전체의 시간 동기화를 이룬다. 그

러나 여기서 주목할 것은 수식 (4)와 (5)에서 제시된 Cucker-Smale 모델에서는 각 노드 간 지연채널을 가정하지 않고 있다. Cucker-Smale 모델과 같이 채널 전송지연을 고려하지 않는 경우에 각 노드는 자신의 전송범위 내에 있는 노드의 전송정보를 즉각적으로 이용가능하며, 본 논문에서 분산 동기화 기법 제안을 위해 변형된 Flocking 모델은 다음과 같다^[10].

$$t_i(n+1) - t_i(n) = \frac{\lambda}{N^{(i)}} \sum_{j=1}^{N^{(i)}} (t_j - t_i) \quad (10)$$

그러나 실제 통신채널 환경에서는 각 노드 간 전송시간 오차 뿐만 아니라 노드 간 채널 전송지연이 존재한다. 채널 전송지연은 이 경우에, 노드가 수식 (11)에서와 같이 인접 이웃노드의 지연된 전송정보를 바탕으로 전송시간을 업데이트하면 채널 전송지연의 평균의 합만큼 오차가 발생되고 이는 계속 누적된다.

$$\begin{aligned} t_i(n+1) - t_i(n) &= \frac{\lambda}{N^{(i)}} \sum_{j=1}^{N^{(i)}} (r_j^{(i)}(n) - t_i(n)) \\ &= \frac{\lambda}{N^{(i)}} \sum_{j=1}^{N^{(i)}} (t_j(n) - t_i(n) + \tau_{ij}) \\ &= \frac{\lambda}{N^{(i)}} \sum_{j=1}^{N^{(i)}} (t_j(n) - t_i(n)) + \frac{\lambda}{N^{(i)}} \sum_{j=1}^{N^{(i)}} \tau_{ij} \end{aligned} \quad (11)$$

따라서, 채널 전송지연이 존재하는 환경에서 자연생태계의 Flocking 모델과 같은 시간동기화를 이루기 위해서는 완벽한 채널 전송지연 예측과 그에 따른 보상이 필요하다. 그러나 중앙제어 노드와 수신 노드간 일대일 동기화 과정을 거치는 기존 OFDMA 기반 시스템과 달리, 메쉬 통신네트워크시스템에서 완벽한 채널 전송지연 보상을 위해서는 <그림 3>과 같이 각 노드가 순차적으로 서로 다른 채널 전송지연 보상값을 가지는 같은 데이터를 통신 노드 수만큼 반복 전송해야 한다.

$$t_i^{(j)}(n+1) = t_i(n) + \Delta_{ij}, \quad j = 1, \dots, N^{(i)} \quad (12)$$

여기서 $t_i^{(j)}(n+1)$ 은 노드 i 가 수신노드 j 에게 다음 신호를 전송하는 시간을 말하며, Δ_{ij} 은 채널 전송지연을 반영한 채널지연 보상값을 말한다. Δ_{ij} 은 노드 i 에 수신된 노드 j 정보를 바탕으로 예측

가능하며, 예측된 채널지연 값에 대해 마이너스를 취한 값을 가진다($\Delta_{ij} = -\tau_{ij}$).

그러나 이 방식은 타임스탬프 등과 같은 MAC기반 데이터를 이용하여 각 노드로부터 수신된 데이터의 분리 및 노드간 채널 전송지연을 정확히 예측해야 하는 추가적인 과정을 수행해야 한다. 또한 각기 다른 보상값을 가지는 데이터의 반복전송이 요구되는 만큼 시스템 전송효율을 크게 저하시키는 방법으로 대용량 데이터 서비스를 지향하는 차세대 메쉬 통신시스템에는 적합하지 않다.

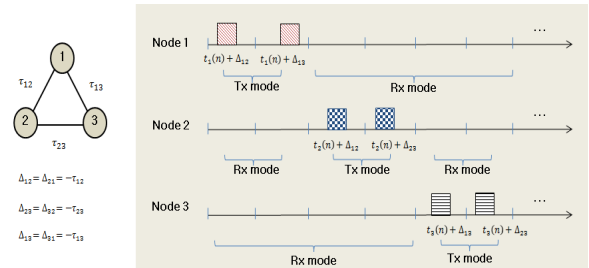


그림 3. 노드간 서로 다른 채널 전송지연 보상을 위한 동기화 과정
Fig. 3. Synchronization process for compensation of channel transmission delay among nodes

3.2. 제안된 분산 시간동기화 기법

본 절에서는 앞서 살펴본 OFDMA 무선 메쉬통신시스템에서 Flocking 모델을 적용한 분산 시간동기화 기법을 제안한다. 일반적으로 다중 사용자가 존재하는 OFDMA 시스템에서의 시간동기화 과정을 살펴보면, 중앙제어 노드는 각 사용자들로부터 수신된 정보를 바탕으로 사용자들에게 전송시간 업데이트 요청메시지를 전송한다. 전송시간 업데이트 요청메시지를 수신한 각 사용자들은 자신의 전송시간을 보정한다. 이때 중앙 제어노드에 도착한 사용자 신호들이 보호구간 이내에 수신되는 경우, 위상회전이 발생하나 등화기를 통해 데이터 손실 없이 수신이 가능하다. 본 제안 기법에서도 기존 OFDMA 시간동기화 방식과 마찬가지로, 모든 사용자의 데이터 손실이 발생하지 않도록 모든 사용자의 전송신호가 가능한 보호구간 이내로 수신할 수 있도록 시간 동기화 과정을 수행하고자 한다. 다만 본 논문에서는 OFDMA 메쉬통신시스템을 가정하고 있으므로 기존 OFDMA 시간 동기화 방식에 달리, 중앙제어 노드와 하위 노드간 동기화를 위한 제어신호 송수신 과정없이 수신된 이웃노드의 정보만을 이용하여 자신의 다음 전송시간을 보정해나가는 자가 시간 동기

화 기법(self-time synchronization) 을 고려하고자 한다.

제안된 분산 시간동기화 기법은 Flocking 모델을 적용함으로써 별도의 채널 전송 지연 예측 및 보상 동작없이 인접 이웃노드로부터 수신된 신호의 시간 정보만을 이용하여 자신의 다음 전송시간을 스스로 보정한다. 그리고 기존의 Flocking 모델과 마찬가지로, 일정 시간이 지나면 수신된 이웃 노드들의 전송 신호는 임의의 시간동기 수렴범위 내에 수신되어진다. 본 절에서 소개하고자 하는 제안 동기화 기법은 크게 두 단계로, 인접 이웃노드로부터 수신된 신호의 TDoA 정보를 바탕으로 자신의 다음 전송시간을 스스로 보정하는 자가 시간동기화 단계와 FFT 윈도우 시작위치를 업데이트 하는 FFT 시작점 보정(FFT window update) 단계로 이루어진다.

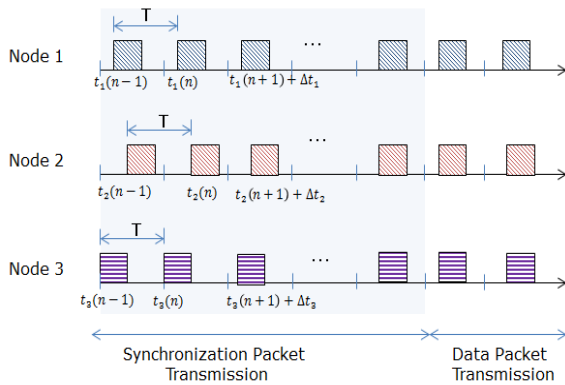


그림 4. 제안된 분산 시간 동기화 기법의 네트워크 동기화 과정(N=3)

Fig. 4. Synchronization process of proposed distributed time synchronization technique(N=3)

먼저 Flocking 모델을 변형 적용한 자가 시간동기화 단계에 대해 살펴본다. 자가 시간동기화 단계에서 각 노드는 수신된 신호들의 TDoA 정보에 대해 평균을 구하고, 구한 평균에 자신의 시간 동기를 맞추는 동작을 수행한다. 여기서 각 노드는 전송채널을 통해 매 T 전송 주기마다 자신의 신호를 송출하고, 수신채널을 통해 인접 이웃노드의 신호를 동시에 수신한다. 이때 각 노드의 다음 전송시간 정보는 이웃노드의 전송신호 수신시간 변동량에 따라 변화한다. 제안된 분산 시간동기화 기법에서 이웃노드로부터 수신된 신호의 시간 정보에 따른 각 노드의 전송시간 정보 변화관계를 표현하면 다음과 같다.

$$t_i(n+1) = -(t_i(n) + \mu \cdot \Delta t_i(n)), \quad 0 < \mu \leq 1 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_i(n) &= \frac{1}{N^{(i)}} \sum_{j=1}^{N^{(i)}} (r_j^{(i)}(n) - t_i(n)) \\ &= \frac{1}{N^{(i)}} \sum_{j=1}^{N^{(i)}} (t_j(n) - t_i(n) + \tau_{ij}) \\ &= \frac{1}{N^{(i)}} \sum_{j=1}^{N^{(i)}} (t_j(n) - t_i(n)) + \frac{1}{N^{(i)}} \sum_{j=1}^{N^{(i)}} \tau_{ij} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 μ 는 이웃노드에 의해 보정되는 시간정보 변동량에 대한 가중치를 나타내며, $0 < \mu \leq 1$ 의 값을 가진다. 위 수식으로부터 각 노드의 다음 전송시간은 수신된 이웃노드 정보에 따른 시간정보 변동량에 가중치를 부가하여 업데이트 된다. 또한 수신된 TDoA 평균정보에 마이너스를 취해줌으로써 별도의 채널 전송지연 오차 및 보상 과정없이 앞의 수식(11)에서 살펴본 채널 전송지연에 의한 오차 누적분 ($\sum_{j=1}^{N^{(i)}} \tau_{ij} / N^{(i)}$)을 상쇄시켜 준다.

제안된 동기화 기법의 두 번째 단계로써 자가 시간동기화 단계를 거친 각 노드는 FFT 윈도우 위치를 보정하게 되는데, FFT 윈도우 시작위치는 아래와 같이 가장 먼저 수신된 신호의 값에 따라 업데이트된다.

$$FFT_i(n+1) = \min(r_j^{(i)}(n)) + CP \quad (15)$$

제안된 분산 시간 동기화 기법의 성능은 자가 시간동기화 단계에서 좌우되며, 해당 단계에서 가능한 모든 인접노드로부터 수신된 신호가 보호구간 이내로 들어오게 함으로써 전체 시스템의 성능 저하를 방지한다. 앞서 제시된 자가 시간동기화 단계를 통해 모든 이웃노드의 수신신호가 보호구간 이내로 들어오는 경우, 수식 (15)를 통해 복조된 신호는 데이터 손실은 존재하지 않고 다만 전송신호의 위상이 회전된 형태로 나타나게 된다. 이때 발생한 위상 회전량은 앞의 자가 시간동기화 과정에서 보정되지 못한 잔여 시간동기오차와 부채널 위치의 곱에 비례하여 나타나며, ISI는 발생하지 않는다. 이는 등화 기법, 차등변조 또는 자원할당 등을 통해 해결가능하다.

앞서 제시된 자가 시간동기화 단계와 FFT 시작점 보정단계는 네트워크 내 모든 노드가 이웃 노드

로부터 수신된 신호가 수렴구간인 보호구간 이내로 들어올 때까지 반복 실행된다. <그림 5>은 제안된 분산 시간동기화 기법의 순서도이다.

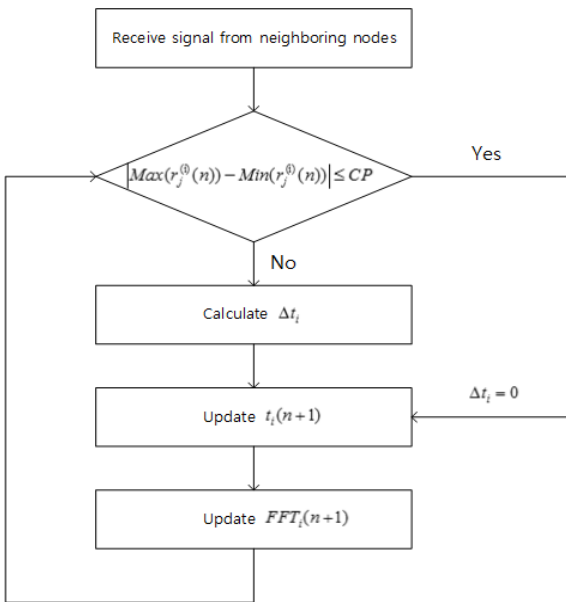


그림 5. 제안된 분산 시간 동기화 기법의 순서도
 Fig. 5. Block diagram of proposed distributed synchronization technique

본 논문에서는 각 노드가 서로 다른 채널 전송지연을 가지는 노드와 동시에 데이터를 송수신하는 메쉬 네트워크를 고려하고 있으며, 이와 같은 메쉬 네트워크의 특성상 제안된 시간동기화 기법의 동기 수렴 오차범위는 1-hop으로 연결된 채널들의 최대-최소 전송지연 차이값에 의해 영향을 받는다. 예를 들어 3개의 분산 노드가 1-hop으로 연결된 삼각 토폴로지 형태의 OFDMA 무선 메쉬통신시스템을 가정할 때, 노드 1에서의 시간 동기 오차범위로 정의된 수렴 정확도는 다음과 같다.

$$0 \leq \text{Accuracy Bound}_{Node1} \leq |\tau_{12} - \tau_{13}| \quad (16)$$

이는 Flocking 모델을 적용함으로써 네트워크를 구성하는 각 노드가 가진 서로 다른 시간동기 오차는 보정이 가능하나, 노드간 채널 전송지연 평균값을 고려하여 전송시간을 업데이트 하더라도 동시에 서로 다른 채널 전송지연을 완벽히 보상할 수 없기 때문이다. 또한 통신환경에 존재하는 노드간 채널 전송지연은 통제할 수 없는 변수로, 임의의 노드 환경에 맞춰 전송시간을 업데이트하더라도 1-hop으로

연결된 다른 노드의 채널환경에 의해 시간동기 오차가 발생, 시스템 성능을 저하시키게 된다. 따라서 노드간 채널 전송지연 차이가 보호구간 길이보다 큰 경우에는 해당노드와 1-hop으로 연결되는 스폰서 노드를 변경, 메쉬네트워크 토폴로지 형태를 업데이트함으로써 네트워크내 시간 동기화는 물론 전체 시스템 성능 열화를 방지할 수 있다.

IV. 모 의 실험

본 장에서는 여러 시뮬레이션 환경 하에서 제안된 분산 시간동기화 기법의 성능을 분석한다. 모의실험에 사용된 부반송파 개수 및 보호구간 길이 등과 같은 시스템 파라미터 값은 모바일 와이맥스 (WiMax) 표준을 따른다. 3, 4, 5개 노드로 구성된 메쉬 네트워크를 고려하며, 각 노드는 2개의 1-hop 노드를 가지는 링타입 토폴로지 형태를 가정한다.

본 논문에서는 메쉬네트워크내 노드간 시간 동기화 성능을 분석하기 위해 여러 파라미터 값에 따른 각 노드에서의 시간동기 수렴곡선과 수렴확률을 살펴본다. 먼저 각 노드에서의 시간동기 수렴 여부는 각 노드에 수신된 신호의 Max-Min TDOA으로 판단한다. 즉 이웃노드로부터 신호가 도착한 수신시점의 차이는 전체 네트워크에서 가장 빠른 시간 정보를 가진 노드와 가장 느린 시간 정보를 가진 노드의 시간 정보의 차를 표현한 값으로 해당 값이 크면 노드 간 시간차가 크다는 것을 의미하므로 시간동기가 맞지 않다고 판단한다. 또, 본 논문에서는 OFDMA 시스템의 성능에 영향을 미치는 보호구간 길이를 시간동기 수렴범위로 설정하고, 각 노드에 수신된 신호의 Max-Min TDOA 값이 보호구간 길이 범위를 넘어갈 경우 시간동기 수렴범위를 벗어났다고 판단한다.

<그림 6>에서는 노드가 3개인 환경에서 기존 Cucker-Smale이 제시한 Flocking모델을 그대로 OFDMA 무선 메쉬통신시스템에 적용했을 때 시간동기 수렴곡선 성능을 보여준다. <그림 6(a)>은 각 노드간 채널 전송지연이 존재하지 않는 경우의 시간동기 수렴 성능을 나타낸다. 이 경우, Cucker-Smale 모델과 마찬가지로 일정시간이 지난 이후에 모든 노드의 초기 전송시간의 평균값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그러나 <그림 6(b)>에 나타난 바와 같이, 노드간 채널 전송지연 값이 존재하는 경우에는 보상되지 않은 노드간 채널 전송지연 값이 다음 전송시간 업데이트 값에 오차로 누적

되어 수렴되지 않고 발산되는 것을 확인할 수 있다.

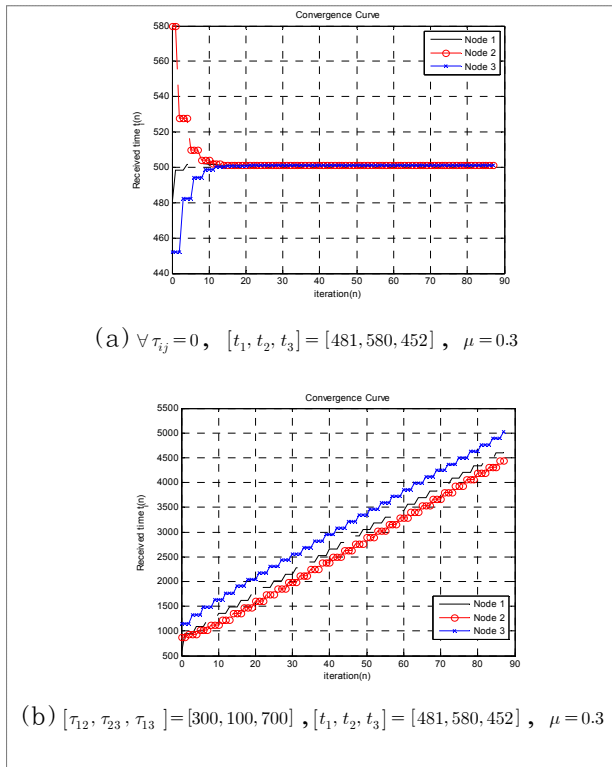


그림 6. Cucker-Smale의 Flocking 모델에 의한 시간동기 수렴 곡선
 Fig. 6. Convergence curve of time synchronization for Cucker-Smale's Flocking model

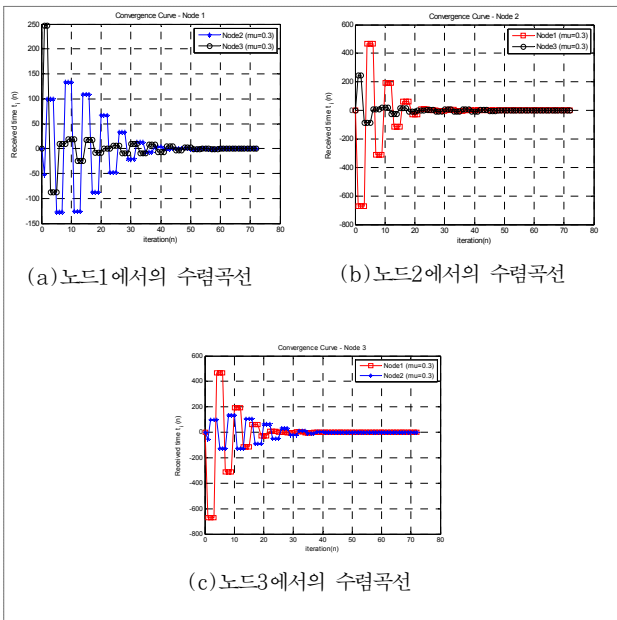


그림 7. 제안된 분산 시간 동기화 기법의 시간동기 수렴곡선 (채널 지연이 없는 경우) ($\forall \tau_{ij} = 0, [t_1, t_2, t_3] = [918, -52, 247]$)
 Fig. 7. Convergence curve of proposed distributed time synchronization technique (No channel delay) ($\forall \tau_{ij} = 0, [t_1, t_2, t_3] = [918, -52, 247]$)

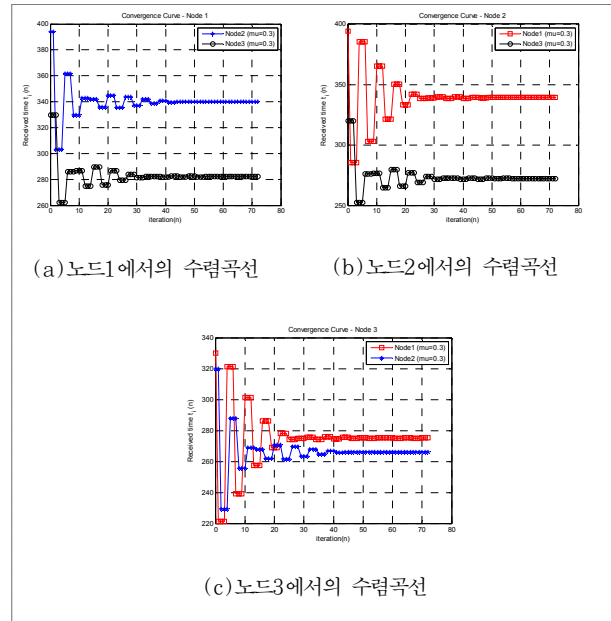


그림 8. 제안된 분산 시간 동기화 기법의 시간동기 수렴곡선 (노드간 동일한 시간 동기인 경우)
 ($[\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{13}] = [394, 320, 330], \forall t_i = 0, i = 1, 2, 3$)
 Fig. 8. Convergence curve of proposed distributed time synchronization technique (same transmission time among nodes)
 ($[\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{13}] = [394, 320, 330], \forall t_i = 0, i = 1, 2, 3$)

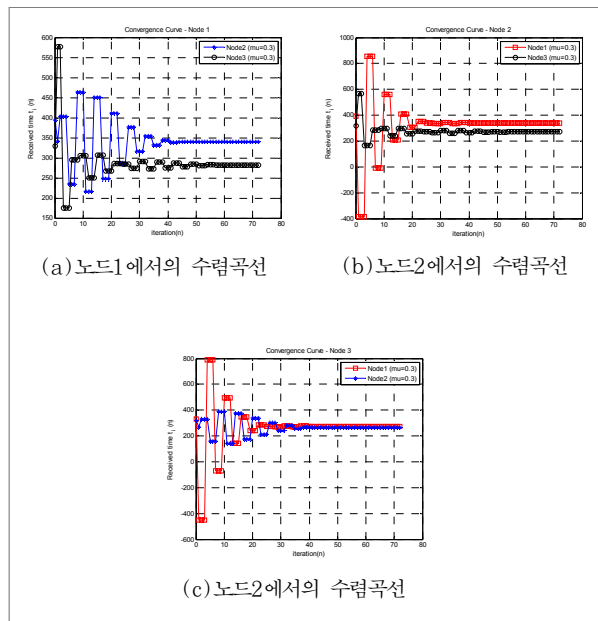


그림 9. 제안된 분산 시간 동기화 기법의 시간동기 수렴곡선 (일반적인 경우) ($[\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{13}] = [394, 320, 330], [t_1, t_2, t_3] = [918, -52, 247]$)
 Fig. 9. Convergence curve of proposed distributed time synchronization technique (general case)
 ($[\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{13}] = [394, 320, 330], [t_1, t_2, t_3] = [918, -52, 247]$)

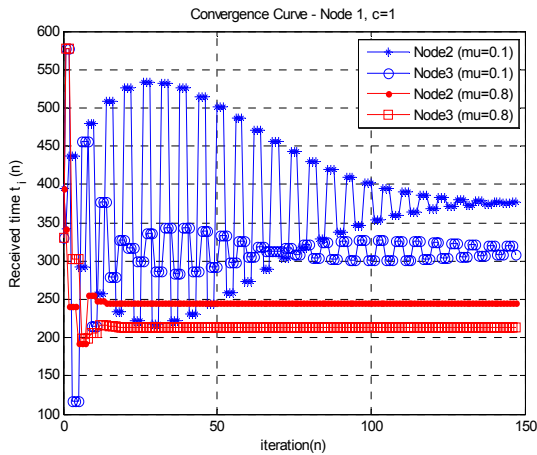


그림 10. 가중치 파라미터 μ 값에 따른 시간 동기 수렴 곡선
Fig. 10. Time synchronization convergence curve vs. weight parameter μ

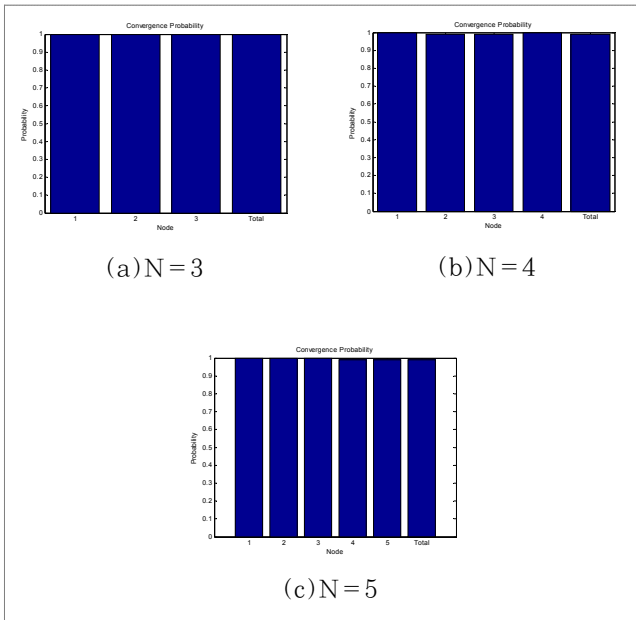


그림 11. 노드 수에 따른 시간동기 수렴확률
Fig. 11. Convergence probability of time synchronization when the number of nodes varies

<그림 7> ~ <그림 9>에서는 동일한 환경에서 제안된 분산 시간 동기화 기법의 성능을 나타낸다. 이때 시뮬레이션에 사용된 가중치 파라미터 μ 는 0.3으로 설정하였다. <그림 7>은 채널 전송지연(τ_{ij}) 이 존재하지 않는 경우에 제안 기법의 시간동기 수렴곡선으로, 기존의 Flocking 모델을 적용한 방식과 마찬가지로 서로 다른 시간 동기를 가지고 있는 모든 노드의 신호가 한 지점에 수신 가능하도록 네트워크 시간 동기화가 완벽하게 이루어진 것을 확

인할 수 있다. 반면에 <그림 8>은 노드간 동일한 시간 동기를 이루고 있으나, 서로 다른 채널 전송지연(τ_{ij})이 존재하는 시뮬레이션 환경에서의 시간동기 수렴 곡선을 나타낸다. 수신노드에서 발생한 신호의 TDoA는 모두 전송 채널에 의한 것으로, 1-hop으로 연결된 노드간 채널 전송지연 값 차이만큼의 Max-Min TDoA가 발생함을 확인할 수 있다. <그림 9>에서는 노드간 상이한 시간동기 및 채널 전송지연이 모두 존재하는 경우의 시간동기 수렴 곡선이다. 앞서 <그림 7>과 <그림 8>에서 살펴본 바와 같이 이 경우에서도 노드간 채널지연 값 차이만큼의 수렴오차가 발생함을 확인할 수 있다.

<그림 10>은 이웃노드에 의해 보정되는 시간정보 변동량에 대한 가중치(μ) 값에 따른 제안 동기화 기법의 시간 동기 수렴 곡선을 나타낸다. 그림으로부터 동일한 노드간 시간동기 오차 및 전송채널 환경하에, 가중치가 큰 경우에 그렇지 않은 경우보다 이웃노드에 의한 시간 변동량에 민감하게 반응하여 빠르게 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

<그림 11>은 분산 노드수에 따른 제안 동기화 기법의 시간동기 수렴확률 성능을 나타낸다. 3, 4, 5개의 분산노드로 이루어진 링 토폴로지 환경하에서, 네트워크 내 모든 노드가 시간동기 수렴범위로 들어오는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 OFDMA 무선 메쉬통신시스템에서 생체모방 알고리즘을 이용한 분산 시간동기화 기법을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 그 성능을 분석하였다. 제안된 분산 시간 동기화 기법은 별도의 노드간 채널 전송지연 예측 및 보상 과정을 수행하지 않고도, 수신된 신호의 TDoA 정보만을 이용한 분산 동기화 동작을 수행함으로써 간단하고 빠르게 전체 네트워크 동기화를 가져옴을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제안된 분산 시간동기화 기법은 고속-대용량 전송률과 이동성이 요구되어지는 차세대 메쉬네트워크의 동기화 방식으로 적합할 것으로 기대된다.

References

[1] A. Ouni, H. Rivano and F. Valois, "Wireless mesh networks: energy-capacity tradeoff and

physical layer parameters,” in *Proc. 22nd IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, pp. 1845-1849, Toronto, Canada, Sep. 2011.

[2] IEEE LAN/MAN Standards Committee, *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5GHz Band*, IEEE Std. 802.11a-1999, 1999.

[3] Y. Zhou, Z. Zhang, and X. Zhou, “OFDMA initial ranging for IEEE 802.16e based on time-domain and frequency-domain approaches,” in *Proc. Int. Conf. Commun. Technol. (ICCT)*, pp. 1-5, Guilin, China, Nov. 2006.

[4] K. A Harndi, “Precise interference analysis of OFDMA time asynchronous wireless ad-hoc network,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 1, pp. 134-144, Jan. 2010.

[5] H. H. Choi and J. R. Lee, “Communication network techniques using bio-inspired algorithm,” *Inform. Commun. (KICS Mag.)*, vol. 29, no. 4, pp. 62-71, Mar. 2012.

[6] S. Barbarossa and G. Scutari, “Bio-inspired sensor network design,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 3, pp. 26-35, May 2007.

[7] D. Lucarelli and I. J. Wang, “Decentralized synchronization protocols with nearest neighbor communication,” in *Proc. 2nd Int. Conf. Embedded Networked Sensor Syst. (SenSys '04)*, pp. 62-68, Baltimore, U.S.A., Nov. 2004.

[8] L. Liu, Y. Xiao, and J. Zhang, “A bio-inspired time synchronization algorithm for wireless sensor networks,” in *Proc. 2nd Int. Conf. Comput. Eng. Technol. (ICCET)*, pp. V4-306-V4-311, Chengdu, China, Apr. 2010.

[9] F. Cucker and S. Smale, “Emergent behavior in flocks,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 5, pp. 852-862, May 2007.

[10] H. J. Yoo, M. N. Lee, and Y. S. Cho, “A distributed frequency synchronization technique for OFDMA-based mesh networks using bio-inspired algorithm,” *J. KICS*, vol.

37, no. 11, pp. 1022-1032, Nov. 2012.

김미정 (Mi-Jeong Kim)



2003년 2월 세종대학교 정보통신공학과 졸업(석사)
 2007년 2월 세종대학교 정보통신공학과 졸업(박사)
 현재 중앙대학교 u-Office 무선네트워크 연구센터 산학협력중점교수

<관심분야> 디지털통신, 4G/5G 이동통신

이윤재 (Yun-Jae Lee)



2012년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(학사)
 2012년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정
 <관심분야> 디지털통신, 무선모뎀, MIMO-OFDM

조용수 (Yong-Soo Cho)

1984년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(학사)



1987년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(석사)
 1991년 2월 The University of Texas of Austin 공학박사
 1992년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수
 2003년 8월~2007년 12월

TTA 휴대인터넷(와이브로) 프로젝트그룹(PG302) 무선접속 실무반 의장

<관심분야> 4G이동통신, OFDM/DMT 모뎀 설계, MIMO-OFDM 모뎀 설계, 5G 이동통신