

Bio-inspired 알고리즘을 이용한 OFDMA 기반 메쉬 네트워크의 분산 주파수 동기화 기법

유현종*, 이미나*, 조용수°

A Distributed Frequency Synchronization Technique for OFDMA-Based Mesh Networks Using Bio-Inspired Algorithm

Hyun-Jong Yoo*, Mi-Na Lee*, Yong-Soo Cho°

요 약

본 논문에서는 OFDMA 기반의 무선 메쉬 네트워크에서 다수의 노드 간 발생하게 되는 주파수 비동기 문제를 해결하기 위해 생체모방 알고리즘(bio-inspired algorithm)을 이용하여 인접 노드 간 지역적인 주파수 동기화를 통해 메쉬 네트워크 전체를 하나의 주파수로 수렴시켜 나가는 분산 주파수 동기화 방식을 제안한다. 메쉬 네트워크의 주파수 수렴 특성은 네트워크의 규모와 구성 노드들의 배치에 따라 서로 다르기 때문에 특정 토폴로지의 경우 주파수 수렴을 위해 많은 시간이 소요될 수 있다. 제안하는 기법은 가중치 적용을 통하여 메쉬 토폴로지 형태에 크게 의존하지 않는 빠른 주파수 동기화를 이룰 수 있음을 확인한다.

Key Words : Wireless Mesh Networks, OFDMA, Bio-inspired Algorithm, Multiple Carrier Frequency Offset, Frequency Synchronization

ABSTRACT

In OFDMA-based wireless mesh networks, synchronization of carrier frequencies among adjacent nodes is known to be difficult. In this paper, a distributed synchronization technique is proposed to solve the synchronization problem in OFDMA-based wireless mesh networks by using the bio-inspired algorithm. In the proposed approach, carrier frequencies of all nodes in a mesh network are converged into one frequency by locally synchronizing the frequencies of adjacent nodes. It may take a long time to be converged in some topologies since the convergence characteristic of carrier frequencies in a mesh network may vary depending on the size of the network and deployment of nodes. It is shown that fast frequency synchronization, not heavily depending on the topology, can be achieved through the proposed algorithm with an adjustable weight.

I. 서 론

추가적인 유선망을 증설하지 않고 저렴한 비용으로 기존의 무선 채널을 보다 넓은 영역으로 확장시

켜 시스템의 수율을 향상시키고, 네트워크의 운용 및 보수에 용이한 장점을 가지고 있는 무선 메쉬 네트워크(Wireless Mesh Networks, WMN)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다¹⁻³⁾. 이러한 무선

※ 본 연구는 방송통신인프라원천기술개발사업(KCA-10-911-04-003), 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(NIPA-2012-H0301-12-4004), 2012년도 교육과학기술부의 한국연구재단의 기초연구사업(2012005603) 지원을 받아 수행되었음

♦ 주저자 : School of Electric & Electronic Engineering, Chung-Ang University, KOREA, hyunjong.yoo84@gmail.com, 준회원

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

* School of Electric & Electronic Engineering, Chung-Ang University, KOREA

논문번호 : KICS2012-08-388, 접수일자 : 2012년 8월 30일, 최종논문접수일자 : 2012년 10월 26일

메쉬 네트워크는 다중 인터페이스와 다중 채널을 지원함으로써 기존의 무선 네트워크에서 발생하는 여러 문제점들을 해결할 수 있는 기술로 기대되고 있다. 최근 네트워크의 전송율을 증가시키고, 긴밀하고 유연한 자원 할당으로 다중 채널 간 간섭 문제를 회피하기 위하여 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 방식이 고려되고 있다. [4]에서는 WiMAX와 UMTS LTE를 플랫폼으로 하는 EURECOM의 OpenAirInterface를 이용한 OFDMA 기반의 single-frequency full-synchronized WMN가 구현되었다.

OFDMA 기반의 시스템에서는 노드의 이동성, 오실레이터의 변조 주파수 오차, 추정 및 보상 오차 등에 의해서 심볼 타이밍 오프셋과 반송파 주파수 오프셋이 발생하게 되며, 이는 시스템 전체의 성능을 좌우하는 주요한 요인이 된다^[5,6]. 메쉬 네트워크에서는 노드 간 간섭을 최소화하기 위해 기존의 셀룰러 통신 시스템에서와 같이 레인징 과정을 통해 송신 전력을 조절한다. 하지만, 메쉬 선출 알고리즘과 분산 스케줄링에 의해 각 노드마다 송수신 시간이 서로 다르게 할당되고^[7], 넓은 커버리지를 필요로 하는 네트워크의 경우 노드 간 전력 차에 따른 NFP (Near-Far Problem)를 완벽하게 극복할 수 없기 때문에 이로 인한 노드 간 타이밍 및 주파수 오프셋의 영향은 더욱 심각하게 나타난다.

한편, 자연계의 다양한 생물체의 군집 행동을 모티브로 하여 행동 원리를 규명하고 이를 모델링하려는 시도가 1970년대 처음 시작되었다. 이후 여러 가지 생체모방 알고리즘(Bio-inspired Algorithm)이 정의되었으며, 최근 10년간 이를 여러 응용 분야에 접목하는 연구가 활발히 진행되고 있다^[8,9]. 생태계를 구성하는 생물체의 군집 행동은 무리의 리더의 일방적인 통제로부터 이루어지지 않는다. 각 생물체들은 집단에서 약속된 단순한 몇 가지 행동 원칙에 따라 외부의 제어 없이도 독자적인 행동 양식을 규명할 수 있으며, 이를 통해 무리 전체가 질서 있는 군집 행동을 하거나 동기화를 이룰 수 있게 된다. [10]에서는 지금까지 연구되어 온 생체모방 알고리즘의 대표적인 예와 개념적 이해를 잘 정리하고 있다.

미래 메쉬 네트워크의 규모는 점점 더 늘어날 것으로 예상되고 있는 가운데, 한정적인 통신 자원의 제약 및 다수 노드의 이동성 등으로 인한 네트워크의 구조적, 물리적인 변화에 대처할 수 있는 네트워킹 알고리즘이 요구되는 시점에 있다^[11]. 이러한 필요는 실시간으로 노드 배치의 유동적인 변화가 일

어나는 메쉬 네트워크의 동기화 문제에도 동일하게 적용될 수 있다. 최근 이와 관련하여, 생체모방 알고리즘의 적응적, 자율적인 특성을 이용한 동기화 알고리즘들이 소개되었다. 예를 들면, 반딧불 알고리즘을 적용하여 네트워크 내 노드들이 서로 다른 오실레이터 클럭을 갖는 경우 인접 참조 노드로부터 전송 시간을 동기화 하는 기법^[12,13]과 MANET (Mobile Ad-hoc Wireless Network)에서 토폴로지의 노드 배치와 이동성을 이용하여 분리된 네트워크 간의 시간 동기를 맞추는 기법^[14], Neuron firing을 이용한 DESYNC 알고리즘을 적용하여 특정 다중 홉 토폴로지로 구성된 네트워크에서 노드가 임의로 진입하거나 이탈하게 될 경우, 이러한 변화에 맞춰 유동적인 노드 간 전송 시간 간격 조절을 통해 효율적인 자원 스케줄링을 운용하는 기법^[15], Optimal Foraging 알고리즘을 적용하여 센서 네트워크에서 참조 노드로부터 수신된 기준 신호를 이용하여 일반 노드 간에 지역적인 시간 동기화를 이끌어내는 기법^[16] 등이 이에 속한다.

본 논문에서는, 다수의 노드가 서로 다른 반송파 주파수를 갖는 메쉬 네트워크 환경에서 빈번하게 발생하는 다중 주파수 오프셋(multiple CFO) 문제를 해결하기 위해 생체모방 알고리즘을 이용하여 네트워크 내 노드들의 지역적인 주파수 동기화를 통해 네트워크 전체를 동일한 주파수로 통일시켜 나가는 분산 주파수 동기화 기법을 제안한다. 또한, 이를 다양한 형태의 토폴로지로 확장하는 과정에서 발생하게 되는 토폴로지 별 동기화 시간 차이를 극복하기 위한 적응적인 가중치 적용 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 OFDMA 기반 메쉬 네트워크에서 다수의 노드 간 주파수 오프셋의 영향 및 동기화의 문제점들을 살펴보고, 생체모방 알고리즘의 하나인 플로킹(flocking) 알고리즘을 요약하여 설명한다. 3장에서는 제안하는 메쉬 네트워크의 주파수 동기화 기법을 설명하고, 여러 가지 형태의 다양한 토폴로지에 대하여 빠른 동기화를 수행할 수 있는 가중치 적용 방법에 대하여 살펴본다. 4장에서는 모의실험을 통해 제안하는 메쉬 네트워크의 동기화 기법의 성능을 분석하고, 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 선행(관련) 연구

2.1. OFDMA 기반 메쉬 네트워크에서 주파수 동기 문제점

OFDMA 기반 메쉬 네트워크에서 주파수 옵셋의 영향을 알아보기 위하여, 그림 1과 같이 서로 다른 오실레이터 변조 주파수를 가진 4개의 노드로 구성된 간단한 메쉬 네트워크 예를 가정한다.

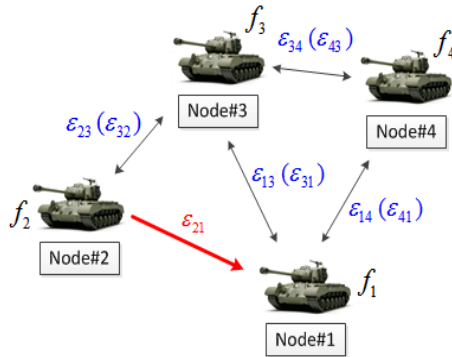


그림 1. 다수의 노드 간 서로 다른 CFO가 존재하는 메쉬 네트워크 모델
Fig. 1. A mesh network model with different CFOs between nodes

여기서 ϵ 은 노드 간 발생하는 normalized CFO (이하 CFO)를 의미하고, ϵ 의 아래 첨자는 네트워크 엔트리 과정을 통해 할당된 각 노드의 노드 고유 번호를 의미한다. 즉, ϵ_{21} 은 노드 1에서 측정된 노드 2와의 상대적인 CFO를 의미한다. 또한, 노드 2에서 측정된 노드 1과의 CFO는 ϵ_{21} 과 그 크기가 같고, 부호는 반대가 된다.

그림 1의 네트워크에서 노드 1은 자신의 원 홉 노드인 노드 2, 3, 4로부터 자원 할당을 통한 데이터의 동시 수신이 가능하다. 하지만 이러한 경우의 수신 신호에는 서로 다른 반송파 주파수 옵셋이 존재하게 되고, 어느 한 쪽 노드의 주파수 옵셋을 보상 하더라도 남아있는 다른 노드와의 주파수 옵셋으로 인해 ICI(Inter-Carrier Interference)가 발생하게 되어 시스템 성능의 심각한 열화를 초래할 수 있다¹⁷⁻¹⁹⁾.

그림 2는 다중 주파수 옵셋이 발생했을 때의 노드 1에 수신된 자원 블록(orthogonal resource allocation)의 예를 보여준다. 여기서 노드 1에서 인접 노드에 대한 주파수 옵셋 추정은 완벽하게 이루어졌다고 가정한다. 만약 노드 1이 인접 노드들로부터 동시에 수신된 신호에 노드 2에 해당하는 주파수 옵셋을 보상하게 된다면, 노드 2의 메시지는 주파수 옵셋의 영향없이 수신이 가능하다. 하지만 이 때, 다른 인접 노드인 노드 3, 4의 자원 블록에는 여전히 주파수 옵셋의 영향이 남아있기 때문에 ICI가 발생하게 되어 두 노드의 메시지를 완벽하게 수신할 수 없게 된다. 또한, 주파수의 보상이 이루어진 노드 2에도 주파수 옵셋 보상 과정에서 발생하는 인접 자원으

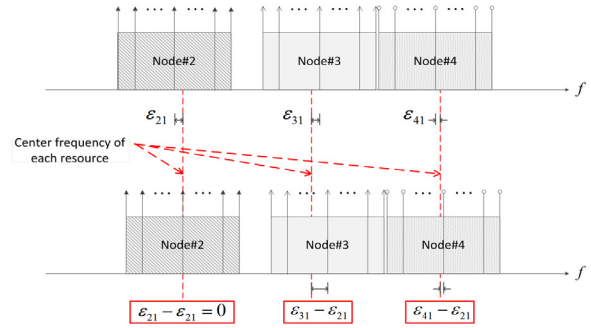


그림 2. 노드 1에서 하나의 주파수 옵셋으로 보상된 자원 블록
Fig. 2. Resource blocks compensated by the CFO between node 1 and node 2

로부터의 MUI(Multi-User Interference)로 인해 BER 성능의 열화가 발생할 수 있다. OFDMA 시스템에서 인접한 다수의 노드 간 발생하는 주파수 옵셋의 영향은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$r[l] = \sum_{i=1}^M y^{(i)}[l] e^{j2\pi\epsilon_i \frac{l}{L}} + z[l], \quad -L_g \leq l \leq L-1 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}^{(m)}[l] &= r[l] e^{-j2\pi\epsilon_m \frac{l}{L}} \\ &= \underbrace{y^{(m)}[l]}_{\substack{m\text{th node's} \\ \text{signal}}} + \underbrace{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^M y^{(i)}[l] e^{j2\pi(\epsilon_i - \epsilon_m) \frac{l}{L}}}_{\text{multiuser interference (MUI)}} + \underbrace{z[l] e^{-j2\pi\epsilon_m \frac{l}{L}}}_{\text{additive noise}} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)은 서로 다른 주파수 옵셋을 갖는 인접 노드들로부터 특정 노드에 수신된 신호의 l 번째 시간 샘플을 나타낸다. 여기서 M 은 전송된 노드의 수, L_g 는 보호구간의 길이, L 은 FFT의 크기, ϵ_i 는 수신 노드와 i 번 노드와의 반송파 주파수 옵셋, $z[l]$ 은 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 잡음을 의미한다. 또한 식 (2)는 여러 노드들로부터 수신된 신호에 m 번째 노드의 주파수 옵셋이 보상된 신호를 나타낸다. 마지막 식의 오른쪽 첫 번째 항은 m 번째 노드로부터 송신된 신호이고, 두 번째 항은 MUI, 세 번째 항은 잡음을 의미한다. 이로부터, 여러 노드들로부터 송신된 신호를 하나의 주파수로 보상하여 수신하게 되면, MUI의 영향으로 인해 BER 성능의 열화가 발생하게 됨을 확인할 수 있다.

이와 같은 다중 반송파 주파수 옵셋으로 인한 간섭 문제를 해결하기 위해 OFDMA 기반 셀룰러 시스템의 상향링크에서는 기지국에서 DFT 이후에 할당된 각 자원 블록에 해당하는 주파수 옵셋을 보상

하여 데이터를 수신하는 CLJL 및 HL 기법과 인접 노드 간 간섭을 최소화하기 위한 채널 할당 기법 등이 발표되었다. 하지만 이러한 기법들은 단말의 수가 많아질수록 convolution 연산 수행 횟수 증가에 따른 계산 복잡도 문제로 실제 구현이 어렵고, 보상 후에도 여전히 잔존하게 되는 반송파 주파수 오프셋의 영향이 증가하게 되어 다중 주파수 오프셋으로 인한 간섭 문제를 근본적으로 해결하기가 어렵다^{18,19)}.

2.2. Bio-inspired 알고리즘 : 플로킹 알고리즘

생태계를 구성하는 생물체들의 행동 원리를 관찰하여 모델링하는 생체모방 알고리즘에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데, 날아다니는 새 떼를 모델링하기 위한 기법으로 플로킹 이론이 Reynolds에 의해 처음 소개되었다. 플로킹 이론에서 군집에 속한 개체는 인공생명 개념의 일종인 ‘보이드(boid)’라 부르며, 각 보이드는 분리성(separation), 정렬성(alignment), 응집성(cohesion)이라는 세 가지 기본적인 조종 행동(steering behavior) 규칙에 따라 서로 충돌하거나 흩어지지 않고 동일한 목표점을 향해 무리지어 가기 위한 자기 질서화(self-ordered) 행동을 하게 된다. 무리에 속한 보이드는 자신의 시야에 들어온 모든 보이드의 행동 정보를 수집하여 자신의 다음 움직임을 결정한다. 만약 자신의 주변 보이드들이 적정거리보다 가까워진다면 이로부터 멀어지려는 분리 행동을, 멀어진다면 가까워지려는 응집 행동을, 방향을 바꾸는 보이드들이 증가한다면 그 변화량의 평균값으로 자신의 방향을 수정하는 정렬 행동을 하게 된다^{20,21)}.

플로킹 알고리즘은 그동안 많은 연구가 이루어져 왔지만, 대부분의 연구는 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 기술적인 모델링에 집중되어 있었다. 하지만 최근에 F. Cucker와 S. Smale은 각 개체들이 플로킹 알고리즘의 조종 행동 규칙에 따라 분산 처리 방식으로 수행되었을 때, 각 개체의 초기 속도와 위치가 특정 조건 안에 있으면 모든 개체의 속도와 위치가 일정 시간의 경과 후에 특정 값으로 수렴하게 된다는 사실을 증명하였다. Cucker-Smale 모델로 불리는 플로킹 알고리즘의 수학적 모델은 다음과 같다²²⁾.

$$\frac{dx^{(n)}}{dt} = v^{(n)}, \quad v^{(n)} = v^{(n)} + \sum_{i=1}^N \eta (\|x^{(i)} - x^{(n)}\|^2) (v^{(i)} - v^{(n)}) \quad (3)$$

$$v^{(n)} = v_c^{(n)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v^{(i)}, \quad 1 \leq n, i \leq N \quad (4)$$

여기서 $x^{(n)}$ 는 n 번째 개체의 위치, $v^{(n)}$ 는 t 시간에서의 n 번째 개체의 속도, N 은 개체들의 수, η 는 개체들 간 결합력의 세기 및 통신 가능 범위를 나타내는 감소함수이다. 이처럼 각 개체들은 서로 식(3)을 통해 자신의 주변 개체들의 정보만을 이용해서 자신의 속도 벡터의 변화를 조절함으로써 모든 개체들의 속도를 식(4)와 같이 전체 개체의 평균에 수렴시켜 나간다.

Cucker-Smale 모델은 무리에 포함된 개체의 행동 결정을 군집의 조종 행동 규칙에 따라 실시간으로 주변 상황을 평가하여 결정함으로써 환경적 변화에 빠르게 반응할 수 있다는 이점을 갖는다. 또한, 플로킹을 통해 각 개체는 자신의 주변에 존재하는 개체들의 행동 정보를 목적 함수에 대입하여 자신의 다음 행동을 결정하고, 이것이 다시 주변의 다음 행동에 영향을 미치게 되는 상호 연관적인 정보 갱신 과정을 수행하게 된다. 이러한 형태의 정보 갱신은 결국 무리가 일련의 규칙성을 찾아가면서 하나의 목표점을 향해 움직일 수 있도록 돕는다.

이러한 플로킹 이론의 성격은, 노드의 이동성이나 새로운 노드의 진입, 또는 이탈로 인한 노드 간 주파수 동기 변화를 실시간적으로 추정하고 평가해야 하는 메쉬 네트워크에 적용하기 적합하다. 이는 또한, 특정 목적 함수를 통해 노드 상호 간의 갱신 정보를 공유함으로써 네트워크 전체가 일련의 규칙성을 가지고 점차 원하는 목표점을 향해 수렴하게 되는데 그 이론적인 바탕을 제공한다.

III. 메쉬 네트워크를 위한 분산 주파수 동기화 기법

메쉬 네트워크에 존재하는 각 노드는 자신의 반경 r 내에 존재하는 모든 노드들로부터 수신되는 프리앰블 신호를 이용하여 주변의 주파수 오프셋 정보를 수집한다. 여기서 r 은 시스템에서 정의된 원 홉 거리, 또는 신호의 크기 및 분산 네트워크 스케줄링 등을 고려한 노드 간 최대 통신 가능 링크 거리가 된다. 각 노드는 메쉬 선출 알고리즘에 의해, 자신의 프리앰블을 송수신할 영역을 할당 받을 수 있으며, 이로 인해, 노드 간 충돌 없이 자신의 원 홉 노드들과 프리앰블을 통한 주파수 오프셋 추정이 가능

하다^[5]. 여기서는 충분한 프리앰블 반복 수신을 통해 주변 노드들에 대한 정확한 반송파 주파수 오프셋의 추정이 이루어졌다고 가정한다. 앞 장에서 설명한 Cucker-Smale 모델을 기반으로 메쉬 네트워크를 위한 주파수 동기화 식을 다음과 같이 제안한다.

$$\epsilon_{k+1}^{(n)} = \epsilon_k^{(n)} + \frac{\sum_{i=1}^{N_{1-hop}^{(n)}} \alpha_i \cdot \epsilon_k^{(i,n)}}{1 + \sum_{i=1}^{N_{1-hop}^{(n)}} \alpha_i} \quad (5)$$

여기서 k 는 주파수 갱신 횟수, n 은 네트워크 내에 존재하는 노드의 고유 번호, $N_{1-hop}^{(n)}$ 은 노드 번호가 n 인 노드의 원 홉 노드 수, $\epsilon_k^{(i,n)}$ 은 k 번째 갱신 시에 n 번 노드에서 추정된 인접 노드 i 의 반송파 주파수 오프셋, $\epsilon_k^{(n)}$ 은 n 번 노드의 현재 반송파 주파수 오프셋 보상 값, $\epsilon_{k+1}^{(n)}$ 은 n 번 노드의 다음 반송파 주파수 오프셋 보상 값, α_i 는 네트워크의 주파수 수렴 특성을 고려하여 i 번 노드의 주파수 오프셋에 적용되는 가중치를 나타낸다. 제안하는 알고리즘의 가중치는 플로킹 알고리즘의 수렴성이 식 (3)의 Cucker-Smale 모델에서 η 가 감소함수일 때 성립하는 점을 고려하여 적절하게 선택해야 하며, 이에 대해서는 뒤에서 기술한다.

실제의 메쉬 네트워크에서는 노드 간 발생하는 주파수 오프셋의 차이가 반드시 0이 아니더라도 시스템의 성능을 만족시키는 특정 임계 값(ϵ_{th}) 이하가 된다면, 노드 간 통신이 문제없이 이루어질 수 있다^[6]. 여기서 ϵ_{th} 은 시스템에서 정의되는 파라미터이다. 이에 따라, 제안하는 주파수 동기화 알고리즘은 수행 종료 후, 네트워크 내에 존재하는 모든 노드 간 발생하는 주파수 오프셋이 ϵ_{th} 이하로 수렴되었을 때 동기가 성공적으로 이루어졌다고 판단한다. 또한, 본 논문에서는 다수의 노드 간 주파수 오프셋이 존재하는 네트워크를 고려하기 위해 각 노드들은 서로 다른 반송파 주파수를 갖는다고 가정하며, 네트워크를 형성하는 모든 노드들은 네트워크 진입 과정에서 인접 노드들로부터 전송되는 방송 정보를 통해 기존의 네트워크와 시간 동기를 맞추고, 노드 고유 번호를 할당 받았다고 가정한다.

메쉬 네트워크에서는 다수의 노드들이 랜덤한 위치에 분포하여 거의 무한에 가까운 종류의 토폴로지를 구성할 수 있다. 이로 인해, 제안하는 분산 주파수 동기 알고리즘은 토폴로지의 형태에 따라 매

우 다양한 수렴 특성을 갖게 되며, 특정 토폴로지의 경우에는 임의의 노드 간 주파수 정보가 매우 느리게 전파되는 구간이 발생하게 되어 네트워크 전체가 하나의 주파수로 수렴되기까지 긴 동기화 시간이 소요될 수 있다. 만약 이처럼, 네트워크의 동기 시간이 길어지게 되면, 네트워크 내에는 주파수 수렴 과정에서 여전히 남아있게 되는 시스템 임계값을 만족시키지 못하는 노드들의 영향으로 인해 통신이 불가능한 링크가 발생하게 된다. 따라서 메쉬 네트워크의 동기화 방식은 토폴로지의 형태에 상관없이 가능한 빠른 주파수 수렴 시간을 보장할 수 있어야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 장에서는 토폴로지의 형태에 따른 주파수 수렴 특성 차이를 분석하고, 긴 동기화 시간을 갖는 특정 토폴로지의 수렴 속도를 향상시키기 위한 가중치 적용 방법을 설명한다. 먼저, 토폴로지의 형태에 따른 주파수 수렴 특성을 확인해보기 위해 다음과 같은 세 가지 형태의 토폴로지를 고려한다.

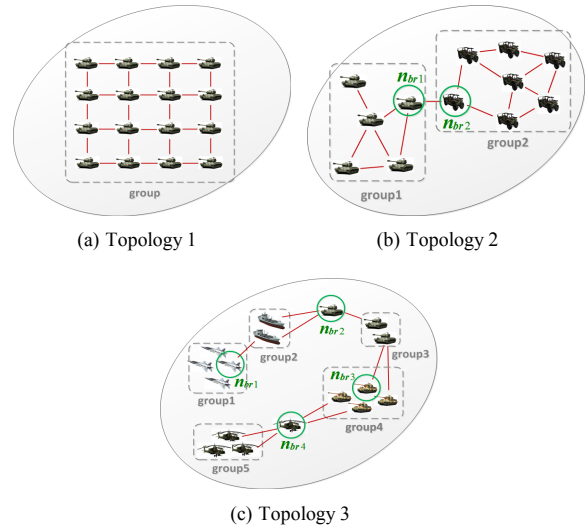


그림 3. 다수의 노드로 구성된 다양한 메쉬 토폴로지 예
Fig. 3. Examples of mesh topologies

그림 3(a)는 서로 다른 주파수를 가진 노드들이 상호 간에 긴밀하게 연결되어 있는 메쉬 토폴로지를 나타낸다. 이러한 토폴로지에서는 인접 노드 간 지역적인 반송파 주파수 변화가 네트워크에 전체에 원활하게 전파될 수 있기 때문에 반복적인 주파수 갱신을 통하여 비교적 빠른 시간 안에 주파수 동기화를 이루게 된다. 그림 3(b)는 서로 다른 주파수로 수렴되는 두 개의 그룹이 각 그룹 내에 존재하는 하나의 대표 노드를 통해 연결되어 있는 토폴로지를 나타낸다(여기서 ‘그룹’은 설명의 편의를 위해

정의한 것으로, 실제 네트워크는 그룹의 경계가 없는 단일 네트워크로 운영된다. 각 그룹의 경계에서 다른 그룹과의 연결고리가 되는 대표 노드를 ‘브릿지 노드(n_{br})’라고 정의한다. 이와 같은 형태의 토폴로지는, 주파수 수렴이 진행됨에 따라 점차 브릿지 노드를 중심으로 주파수 정보의 공유가 이루어지게 된다. 즉, 다수의 노드가 서로 긴밀하게 연결되어 정보 교환을 이루는 그룹 내 노드끼리는 빠른 수렴이 진행되는데 반해, 각 그룹을 연결하는 브릿지 노드 간에는 그룹 간 주파수 정보의 이동이 상대적으로 작게 나타나 그룹 내 노드들은 결국 브릿지 노드인 n_{br1} 과 n_{br2} 를 통해서만 상대 그룹의 주파수를 전달받게 되는 것이다. 이는 곧 그룹 내에서 아무리 빠른 주파수 수렴이 이루어지더라도 브릿지 노드 간에 주파수 정보가 느리게 이동하게 된다면, 네트워크 전체는 결국 주파수 동기화를 위해 긴 시간을 필요로 하게 된다는 것을 의미한다. 그림 3(c)는 여러 그룹들이 브릿지 노드를 통해 서로 꼬리를 물고 연결되어 있는 토폴로지를 나타낸다. 이러한 토폴로지는 각 그룹을 형성하는 노드의 수는 적지만 서로 비슷한 수로 이루어져 있기 때문에 임의의 두 그룹 간 주파수 정보의 이동이 빠르게 나타나지 않으며, 다수의 그룹이 연속적으로 연결되어 있기 때문에 그룹 간 주파수 이동의 방향성이 불분명하게 나타나는 문제가 발생하게 된다. 예를 들어, 그룹 3은 그룹 2와 그룹 4의 주파수 사이에서 자신의 주파수의 수렴 위치를 결정하게 되는데, 그룹 2와 4는 다시 그룹 1과 그룹 3의 주파수와 그룹 3과 그룹 5의 주파수로부터 그 수렴 값이 결정된다. 이와 같이, 이러한 형태의 토폴로지는 결국 모든 그룹들이 서로 얽혀져서 주파수를 갱신하게 되는 형태를 띠게 되므로 역시 네트워크 전체가 특정 주파수로 수렴되기까지 긴 시간이 소요된다. 그림 3의 각 토폴로지에 대한 주파수 수렴 특성은 다음 장의 모의실험을 통해 확인할 수 있다.

전술한 바와 같이, 주파수 동기 알고리즘은 메쉬 네트워크의 토폴로지 형태에 따라 다양한 수렴 특성을 갖게 된다. 특히, 긴 동기화 시간이 소요되는 토폴로지의 주파수 수렴은 주로 브릿지 노드를 중심으로 그룹 간 주파수 정보의 이동이 불분명하게 나타나는 상황에서 발생하게 된다. 긴 수렴 시간을 갖는 토폴로지에 대한 동기화 문제를 해결하기 위하여 브릿지 노드를 선택하고, 선택된 노드에 적절한 가중치를 부여함으로써 그룹 간 원활한 주파수 정보의 이동을 유도할 수 있다. 먼저, 브릿지 노드

를 선택하는 방법을 설명하기 위해 두 개 이상의 그룹으로 이루어진 임의의 토폴로지를 고려한다. 토폴로지 내 서로 인접한 임의의 두 그룹은 각각 노드 1, 2, 3, 4, 5와 노드 A, B, C, D로 구성되어 있고, 각 그룹의 브릿지 노드는 노드 1과 노드 A라고 가정한다. 그림 4(a), (b)에서는 이러한 토폴로지에서 주파수 동기화가 어느 정도 진행된 이후, 두 그룹의 브릿지 노드인 노드 1과 노드 A에서 추정된 인접 노드들의 주파수 오프셋 분포를 나타내고 있다. 이 때, 인접한 두 브릿지 노드끼리의 주파수 오프셋은 앞에서 기술한 바와 같이 어느 노드에서 추정하느냐에 따라 그 크기는 같고, 부호는 반대가 된다.

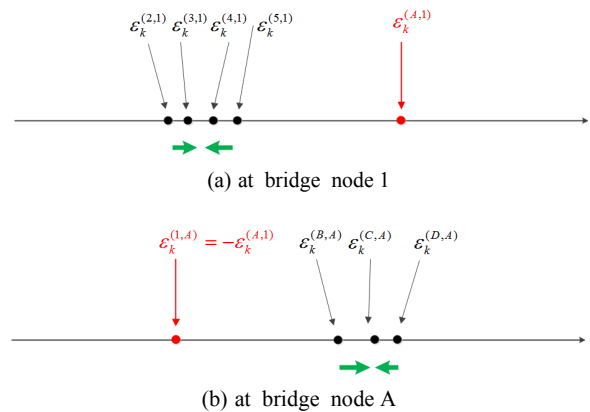


그림 4. 어느 정도 동기화 진행 이후, 임의의 토폴로지 내 인접한 두 그룹의 브릿지 노드에서 추정된 반송파 주파수 오프셋 분포
Fig. 4. A distribution of estimated CFOs at adjacent bridge nodes after synchronization algorithm is applied

주파수 동기화가 진행됨에 따라, 노드 1에서 추정된 다른 그룹의 브릿지 노드(노드 A)의 주파수 오프셋($\epsilon_k^{(A,1)}$)은 노드 1의 그룹 내에 존재하는 노드들의 주파수 오프셋에 비해 상대적으로 멀리 떨어진 곳에 분포하게 된다. 이는 동일 그룹 내 노드인 노드 1, 2, 3, 4, 5는 서로 긴밀하게 연결되어 있기 때문에 빠르게 주파수가 하나의 값으로 수렴되는 반면, 다른 그룹에 속해 있는 브릿지 노드 A의 주파수는 노드 A가 속한 그룹의 주파수 수렴 값에 가깝게 위치하기 때문이다. 결국, 동기화 알고리즘이 시작되고 어느 정도의 수렴이 진행되고 나면, 네트워크의 노드들은 자신의 인접 노드의 주파수 오프셋 분포로부터 어떤 노드가 브릿지 노드인지를 판단할 수 있게 된다. 이러한 사실에 근거하여, 네트워크 내 노드들은 자신의 주파수를 갱신할 때, 수집된 주변 노드들의 주파수 오프셋 분포 중 가장 멀리 떨어져 있는 값을 브릿지 노드라고 판단하고, 이 값에 가중치를 부여할 수 있다. 이 때, 단순히 가장 크거나 작

은 값이 아닌, 가장 큰 값과의 차이가 시스템 임계 값 이하를 만족하는 모든 값에 대하여 브릿지 노드 라고 판단해야 하는데, 이는 토폴로지에 따라 하나의 노드에 다수의 브릿지 노드가 연결되어 있는 경우가 있기 때문이다. 가장 멀리 떨어져 있는 하나의 값에만 가중치를 부여하게 되면 특정 그룹에만 주파수의 이동이 몰리게 되어 오히려 최적의 수렴 속도를 저해하는 요인이 될 수 있다. 이러한 점을 고려하여 네트워크의 빠른 주파수 동기화를 위해 결정되는 가중치의 값은 다음과 같다.

$$\alpha_i = \begin{cases} aN_{1-hop}^{(i)} & (\text{if } i \text{ is bridge node}) \\ 1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (6)$$

여기서 가중치로 인접 노드 수의 비를 사용하는 이유는 네트워크에 존재하는 모든 노드들이 참고하는 자신의 인접 브릿지 노드의 주파수 갱신 비중을 동일하게 맞추기 위함이다. 만약 이 비중을 동일하지 않는다면 동일 네트워크 내에서도 특정 브릿지 노드 간에는 일방적인 주파수 공유가 이루어지는 반면, 어떤 브릿지 노드 간에는 정보의 이동이 여전히 작게 이루어지는 상황이 발생할 수 있다. 이는 결국, 네트워크의 주파수 수렴 특성을 더 악화시키거나 발산하게 만드는 요인이 된다. 여기서 a 는 가중치 비중 결정 상수이다. 만약 이 값이 1이라면 브릿지 노드의 주파수 업데이트가 해당 노드의 다음 갱신 값의 약 50%의 비중을 차지하게 되고, 2가 되면 약 75%의 비중을 차지하게 된다.

가중치의 값이 결정되면 선택된 가중치 적용 노드를 중심으로 네트워크가 최적의 주파수 수렴 속도를 갖기 위한 주파수 이동 방향을 결정해야 한다. 이를 위해 선택된 브릿지 노드를 기준으로 그룹 상호 간에 주파수 정보의 이동량을 늘려주거나, 또는 어느 한 쪽이 다른 쪽 그룹의 반송파 주파수를 따라가는 가중치 적용 방식을 고려할 수 있다. 가중치 적용 방법에 따른 수렴 특성의 변화는 모의실험을 통해 확인할 수 있다.

IV. 모 의 실험

본 장에서는 본 논문에서 제안하는 메쉬 네트워크에서의 주파수 동기화 알고리즘의 성능을 분석한다. 먼저, 토폴로지에 따른 주파수 동기화 수렴 특성을 확인해보기 위해 노드를 그림 3과 같은 분포로 배치시키고 노드별로 갱신 횟수에 따른 반

송파 주파수의 수렴 특성을 확인하였다. 각 노드는 자신의 원 홉 노드들로부터 프리앰블 수신을 통해 주파수 옵셋을 추정하고 자신의 주파수를 수정하는 동작을 수행해나간다. 이 때, 토폴로지 형태 외에 수렴 속도에 영향을 미칠 수 있는 요소들을 배제하기 위해 각 노드에서 주파수 옵셋의 추정 오차는 오차없이 이루어졌다고 가정한다.

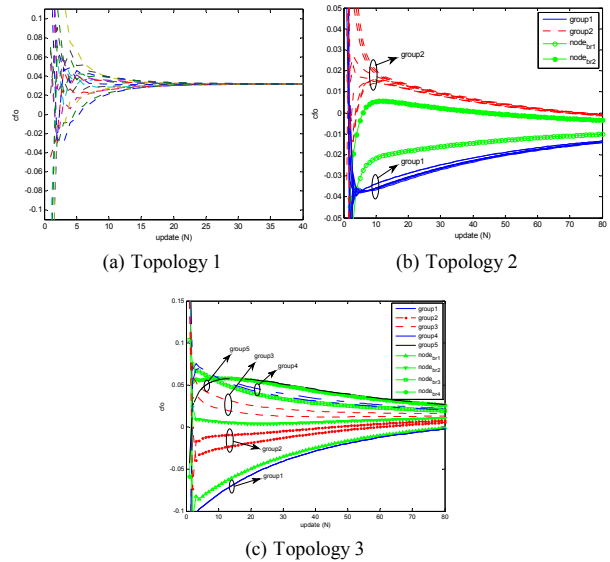


그림 5. 메쉬 네트워크에서 각 노드별 주파수 수렴 특성 Fig. 5. Convergence characteristic of CFO for each node

그림 5은 가중치가 적용되지 않은 경우에 식 (5)의 각 토폴로지의 노드별 주파수 수렴 특성을 나타낸다. 여기서 y축은 각 노드의 반송파 주파수를 CFO로 환산하여 나타낸 값으로, 두 노드 간 환산된 값의 차이가 실제 발생한 반송파 주파수 옵셋을 의미한다. 각 노드는 중심 주파수 2.59GHz의 ± 1.0 ppm 이내의 오차를 갖는 TCXO를 사용하고, 시스템에서 정의된 부반송파 간격은 10.94kHz로 가정하여 노드 간 발생 가능한 주파수 옵셋을 초기 값으로 설정하였다.

노드들이 서로 긴밀하게 연결되어 있는 그림 3(a) 토폴로지의 경우, 노드별 원 홉 노드 수가 균등하게 분포되어 있어 네트워크 전체적으로 활발한 주파수 갱신이 이루어지게 된다. 각 노드는 자신의 반송파 주파수를 주변의 변화에 빠르게 맞춰가면서 네트워크 전체를 하나의 주파수로 수렴시켜나간다. 반면, 그림 3(b), (c)와 같이 서로 다른 두(또는 다수) 그룹이 하나(또는 소수)의 노드로 연결되어 있는 토폴로지의 경우에는 각 그룹의 브릿지 노드를 중심으로 주파수 수렴 변화의 폭이 전체적으로 매우

작게 나타난다. 토폴로지 1은 약 20회 주파수 갱신 이후, 주파수 수렴이 이루어진 것에 반해, 토폴로지 2, 3에서는 80회 이상의 주파수 갱신 후에도 주파수의 수렴이 이루어지지 않는다. 이 때, 토폴로지 2, 3에서 각 그룹을 연결하는 브릿지 노드는 자신의 그룹 내에 속한 노드들의 수렴 값과 인접 그룹의 주파수 중간 지점에 위치하여 네트워크의 수렴을 이끌어나가는 것을 확인할 수 있다.

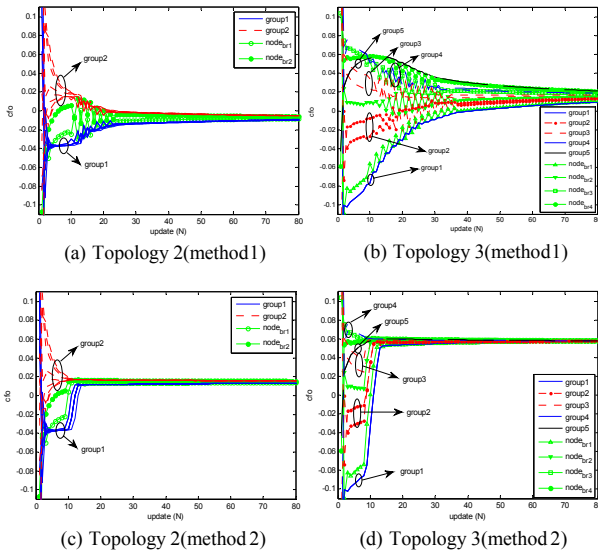


그림 6. 가중치 적용 방법에 따른 각 노드별 주파수 수렴 특성 Fig. 6. Convergence characteristic of CFO for each node depending on different method of application of weight

그림 6은 동일한 조건 하에서 토폴로지 2, 3에 대한 제안된 알고리즘의 노드별 주파수 수렴 특성을 나타낸다. 3장에서 기술한 가중치 적용 방법에 따른 수렴 속도의 차이를 확인하기 위하여 가중치 적용 시 브릿지 노드를 중심으로 양 방향으로 전달 하거나(방법 1) 한 방향으로만 주파수의 이동을 제한하여(방법 2) 각각에 대한 모의실험을 수행하였다. 그림 6의 (a), (b)는 방법 1, (c), (d)는 방법 2에 대한 모의실험 결과를 나타낸다. 먼저, 가중치를 적용 함으로써 두 가지 방법 모두 가중치 적용 이전에 비해 네트워크의 주파수 수렴 시간이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 가중치가 적용되기 시작하는 13회 주파수 갱신 시점 이후의 변화를 살펴 보면, 방법 1의 경우, 토폴로지 2(그림 6(a))에서는 브릿지 노드를 중심으로 두 인접 그룹 간 주파수의 이동이 증가하기 시작하면서 네트워크가 전체적으로 빠르게 하나의 수렴점을 향하게 되는 반면, 토폴로지 3(그림 6(b))은 다수의 그룹이 서로 연결되어 있기 때문에 상호 그룹 간 주파수 이동을 상쇄시키는

문제가 나타나 수렴 속도의 향상이 비교적 크게 일어나지 않는다. 이와 달리, 방법 2를 사용하여 가중치를 적용한 그림 6(c), (d)의 경우에는 각 그룹이 자신의 주파수를 인접 그룹 중 어느 한 쪽 그룹으로만 맞춰감에 따라 네트워크 내에는 그룹 간 일정한 방향성을 갖는 주파수의 이동이 발생하게 되고, 이로 인해 토폴로지의 형태에 크게 의존하지 않고 네트워크 전체를 하나의 주파수로 빠르게 수렴시켜 나가게 된다.

본 논문에서 제안하는 주파수 동기화 알고리즘의 성능을 임의의 메쉬 토폴로지에 대하여 확인하기 위해 일정한 크기의 네트워크 공간 내에 여러 노드들을 랜덤한 위치에 분포시켜 다양한 형태의 토폴로지를 구성하여 모의실험을 수행하였다. 네트워크에 진입한 각 노드는 시스템에서 정의된 노드 간 통신 거리 r 내에 존재하는 노드들과 원 흡을 이루어 각각으로부터 수신된 프리앰블을 사용하여 반송파 주파수 읍셋을 추정한다. 이 때, 주파수 읍셋 추정을 위해 IEEE 802.16m 프리앰블을 사용하였다. 이를 바탕으로, 주파수 동기화 알고리즘 수행 이후, 네트워크에 존재하는 모든 노드 간에 발생하는 반송파 주파수 읍셋이 시스템에서 정의된 임계값 ($\mathcal{E}_{th} = 0.01$) 이하로 수렴되었을 때, 네트워크의 주파수 동기화가 성공했다고 판단하였다⁶⁾.

그림 7은 10,000가지의 서로 다른 메쉬 토폴로지에 대한 가중치 적용 전후의 주파수 동기화 시간의 평균을 나타낸다. 가중치(weight)를 적용했을 때의 네트워크 수렴 속도가 적용하지 않았을 경우에 비하여 크게 향상된 것을 확인할 수 있다. 시스템에서 정의된 원 흡 반경이 증가할수록 노드별 평균 원 흡 노드 수가 많아지게 되므로 마찬가지로 네트워크의 동기 속도가 증가하게 된다. 하지만, 실제 메쉬 네트워크에서는 원 흡 거리 증가에 따라 다수 노드 간 간섭으로 인한 주파수 읍셋 추정 성능의 열화 및 인접 노드의 주파수 읍셋 정보 수집을 위한 주파수 갱신 시간 간격의 증가 등의 문제가 발생하므로, 이를 고려한 시스템 원 흡 거리가 결정되어야 한다. 제안하는 주파수 동기화 기법은 원 흡 거리의 영향에 크게 의존하지 않고, 일반적으로 빠른 동기화 시간을 이끌어낼 수 있다는 장점을 갖는다.

그림 8은 가중치 전후의 토폴로지별 주파수 수렴 시간의 변화를 나타낸다. 그림 8(a)는 가중치 적용 전 네트워크의 주파수가 동기화되기까지 소요되는

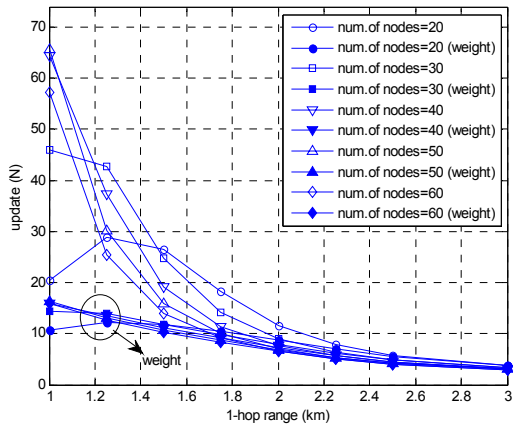
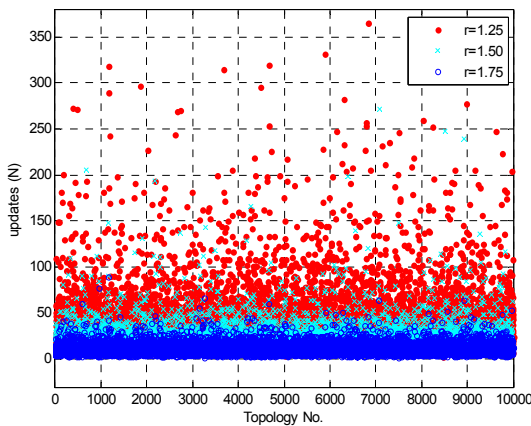
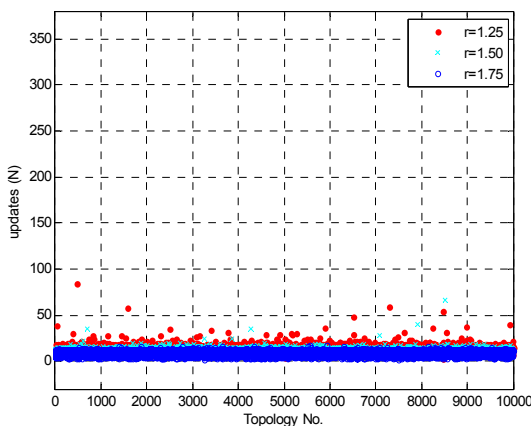


그림 7. 가중치 적용 전후의 주파수 동기화 시간(SNR=15dB)
 Fig. 7. Synchronization time of carrier frequency before and after application of weight(SNR=15dB)



(a) before application of weight



(b) after application of weight

그림 8. 가중치 적용 전후의 토폴로지별 주파수 동기화 시간의 변화(num. of nodes=40)
 Fig. 8. The change of synchronization time of carrier frequency for each topology before and after application of weight(num. of nodes=40)

주파수 갱신 횟수를 나타내고 있으며, 그림 8(b)는 가중치를 적용한 이후를 나타낸다. 10,000가지의 토폴로지에 대하여 주파수 동기화 알고리즘의 수렴 시간을 확인해본 결과, 가중치 적용 이후 토폴로지 별로 동기화 소요 시간의 향상이 크게 일어났으며, 원 홉 반경이 커짐에 따라 평균적인 원 홉 노드 수가 증가하기 때문에 수렴 속도의 변화는 상대적으로 작게 발생하게 되는 것을 확인할 수 있다. 결국, 제안하는 동기화 기법은 적절한 가중치를 적용함으로써 토폴로지의 형태나 네트워크의 원 홉 노드 수 등의 영향을 크게 받지 않는 일반적으로 빠른 주파수 수렴 속도를 이끌어낼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 생태계를 구성하는 생물체들의 행동 원리를 관찰하여 모델링하는 생체모방 알고리즘을 이용하여 메시 네트워크에서 발생하는 다중 반송파 주파수 윅셋 문제를 해결하기 위한 동기화 알고리즘을 제안하였다. 제안된 분산 주파수 동기화 알고리즘을 통해, 네트워크 내의 각 노드는 자신의 주변 노드들과의 지역적인 수렴을 통해 네트워크 전체를 하나의 주파수로 맞춰나간다. 또한, 토폴로지 형태에 따라 다양하게 나타나는 수렴 시간의 변화 문제를 해결하기 위하여 네트워크의 전체적인 주파수 이동을 저해하는 노드를 찾고, 이 노드에 가중치를 부여함으로써 토폴로지 형태에 크게 의존하지 않고 빠른 동기화 속도를 보장할 수 있는 가중치 적용 기법을 제안하였다. 모의실험 결과, 가중치 적용 이후, 주파수 동기화 수렴 속도가 크게 향상되었으며, 네트워크 내 평균적인 원 홉 노드 수에 관계없이 빠른 주파수 수렴이 이루어지는 것을 확인하였다.

References

- [1] E. Hossain and K. Leung, "Wireless Mesh Networks: Architectures and Protocols", Springer, 2008.
- [2] I. F. Akyildiz and X. Wang, "Wireless Mesh Networks: A Survey", Computer Networks(Elsevier), vol. 47, no. 4, 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 Transactions on Communications Magazine*, vol. 45, no. 11, pp. 116-122, Nov. 2007.
- [4] F. Kaltenberger et. al., “Design and Implementation of a Single-frequency Mesh Network using OpenAirInterface,” *EURASIP Journal on Communications and Networking*, vol. 2010, pp. 1-12, Apr. 2010.
- [5] L. Wei and C. Schlegel, “Synchronization Requirements for Multi-user OFDM on Satellite Mobile and Two-path Rayleigh Fading Channels”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, no. 234, pp. 887-895, Feb./Mar./Apr. 1995.
- [6] T. Pollet, M. Van Bladel, and M. Moeneclaey, “BER Sensitivity of OFDM Systems to Carrier Frequency Offset and Weiner Phase Noise”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, no. 234, pp. 191-193, Feb. /Mar./Apr. 1995.
- [7] W. Shin, A. Lee, H. Kim, K. Lim, and D. Kwon, “Efficient 2-D Mesh Election Algorithms for OFDMA-Based Wireless Mesh Networks”, *IEEE 5th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, pp. 1-6, Dec. 2011.
- [8] M. Eigen and P. Schuster, “The Hypercycle: A Principle of Natural Self-Organization”, *Springer*, Nov. 1977.
- [9] M. Wang and T. Suda, “The Bio- Networking Architecture: A Biologically Inspired Approach to the Design of Scalable, Adaptive, and Survivable/Available Network Applications:”, *IEEE Symposium on Applications and the Internet (SAINT)*, 2001.
- [10] H. H. Choi and J. R. Lee, “Techniques for Communications and Networks Based on Bio-inspired Algorithm (생체모방 알고리즘 기반 통신 네트워크 기술),” *The Journal of the KICS*, vol. 29, no. 4, pp. 62-71, Apr. 2012.
- [11] “OUTLOOK: Vision and Research Directions for the Wireless World”, *WWRF (World Wide Radio Forum)*, no. 4, Jul. 2009.
- [12] G. Werner-Allen, G. Tewari, A. Patel, M. Welsh, and R. Nagpal, “Firefly-inspired Sensor Network Synchronicity with Realistic Radio Effects”, *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor System (SenSys’05)*, pp. 142-153, Nov. 2005.
- [13] A. Tyrrell and G. Auer, “Imposing a Reference Timing onto Firefly Synchronization in Wireless Networks”, *IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 222-226, Apr. 2007.
- [14] G. A. Puerta, E. A. Aguirre, and M. A. Alzate, “Effect of Topology and Mobility in Bio-inspired Synchronization of Mobile Ad Hoc Networks”, *IEEE Latin-American Conference on Communications(LATINCOM)*, pp.1-6, Sep. 2010.
- [15] J. Degesys and R. Nagpal, “Towards Desynchronization of Multi-hop Topologies,” *IEEE 2nd International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO)*, pp. 129-138, Oct. 2008.
- [16] L. Liu, Y. Xiao, and J. Zhang, “A Bio-inspired Time Synchronization Algorithm for Wireless Sensor Networks”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology (ICCET)*, vol. 4, pp. 2473-2478, Apr. 2010.
- [17] J. J. Beek, P. O. Börjesson, M. L. Boucheret, D. Landström, J. M. Arenas, P. Ödling, C. Östberg, M. Wahlqvist, and S. K. Wilson, “A Time and Frequency Synchronization Scheme for Multiuser OFDM,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 11, pp. 1900-1914, Nov. 1999.
- [18] J. Choi, C. Lee, H. W. Jung, and Y. H. Lee, “Carrier Frequency Offset Compensation for Uplink of OFDM-FDMA Systems”, *IEEE Communications Letters*, vol. 4, no. 12, pp. 414-416, Dec. 2000.

- [19] D. Huang and K. B. Letaief, "An interference-cancellation scheme for carrier frequency offsets correction in OFDMA systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53, no. 7, pp. 1155-1165, Jul. 2005.
- [20] W. Reynolds, "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model", *In Proceedings of SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 21, no. 4, pp. 25-34, Jul. 1987.
- [21] C. W. Reynolds, "Steering Behaviors for Autonomous Characters", *In Proceedings of the 1999 Game Developers Conference*, pp.763-782, Aug. 1999.
- [22] Cucker and S. Smale, "Emergent Behavior in Flocks," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, no. 5, pp. 852-862, May 2007.

유 현 종 (Hyun-Jong Yoo)



2011년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(학사)
2011년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정
<관심분야> 디지털통신, 무선모뎀, MIMO-OFDM

이 미 나 (Mi-Na Lee)



2011년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(학사)
2011년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정
<관심분야> 디지털통신, 무선모뎀, MIMO-OFDM

조 용 수 (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 모델 설계, MIMO-OFDM 모델 설계