

# 분산 네트워크를 위한 다수 노드 주파수 동기화 방식

정희원 김정현\*, 김지형\*, 임광재\*

## Multi-node Frequency Synchronization Method for Distributed Networks

Jung-Hyun Kim<sup>\*o</sup>, Ji-Hyung Kim<sup>\*</sup>, Kwang Jae Lim<sup>\*</sup> *Regular Members*

### 요약

본 논문에서는 분산 네트워크 환경에서 다수 노드들의 주파수를 동기화하기 위한 방식을 제안한다. 제안한 방식은 네트워크 상의 모든 노드들의 반송파 주파수를 동기화시킴으로써 새로운 노드 진입 시 노드 간 빠른 동기화가 가능토록 한다. 또한, 다수의 그룹이 네트워크 상에 존재하는 경우 인접 그룹 간의 동기화 방식을 제안한다. 제안한 주파수 동기 알고리즘은 노드의 진입이 유동적이고 그룹 간 병합과 분리가 빈번하게 발생할 수 있는 군 작전 시나리오에 효과적으로 사용될 것으로 기대된다.

**Key Words** : synchronization, distributed network, OFDMA, frequency estimation, multi-node system

### ABSTRACT

In this paper, we propose a novel method of multi-node frequency synchronization for distributed networks. The proposed method synchronizes carrier frequencies of all nodes in the network and this enables new entry node to synchronize immediately. Moreover, when several groups exist in the network, inter-group synchronization method is proposed. The proposed distributed frequency synchronization method is expected to be very useful for the military operation scenario that new node entry is in a state of flux and group merging and splitting frequently happen.

### I. 서론

차세대 군 작전 패러다임이 기존의 아날로그 개별 무기체계 위주의 평면적인 작전 개념에서 다수의 디지털 무기체계를 네트워크로 연결하고, 네트워크상의 노드들을 효과적으로 관리하여 정확한 지휘통제를 수행하는 입체적인 작전 개념으로 변모하고 있다. 이러한 시점에서 전차, 함정, 전투기 등의 단일 무기체계 효과보다는 이들 간의 네트워크 연결을 통한 시너지 효과 증대에 더욱 이목이 집중되고 있으며, 이를 위해 네트워크를 구성하는 요소들 간의 긴

밀한 통신 대책이 필수적이다. 이러한 필요에 적합한 방식 중의 하나로 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 방식을 들 수 있다.

OFDMA 기반의 시스템에서는 노드의 이동속도, 오실레이터 오차, 추정 오차 등에 의해 시간 및 주파수 오프셋이 발생하며 이는 전체 시스템의 성능을 좌우하는 주요한 요인이 된다.<sup>[1]</sup> 특히, 다수의 노드가 존재하는 분산 네트워크에서는 노드 간 시간 및 주파수 오프셋은 노드 간 간섭을 발생시켜 시스템 성능이 더욱 저하된다.<sup>[2]</sup> 따라서 유동적이고 유기적인

※ 본 연구는 방통통신위원회의 차세대통신네트워크원천기술개발사업의 연구결과로 수행되었음 (KCA-2011-10913-04003)

\* 한국전자통신연구원 차세대통신연구부문 모바일컨버전스연구부 모바일응용통신연구팀 (jh.kim06@etri.re.kr), (° : 교신저자)  
논문번호 : KICS2011-11-563, 접수일자 : 2011년 11월 30일, 최종논문접수일자 : 2012년 3월 2일

분산 네트워크 모델에 적용 가능한 시간 및 주파수 옵셋 동기화 방식이 요구된다.

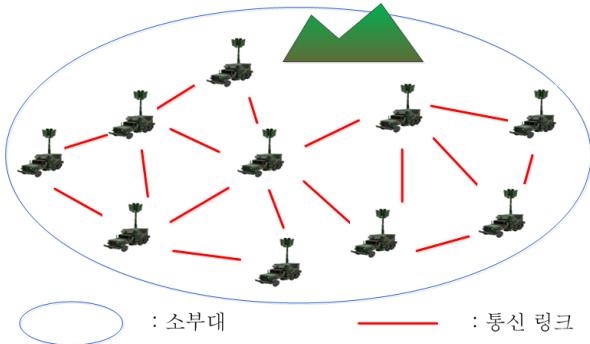


그림 1. 분산 네트워크 모델  
Fig. 1. Distributed network model

예를 들어, 그림 1과 같이 소부대 그룹으로 구성된 분산 네트워크에 다수의 노드들이 존재할 때 노드의 이동성과 유동적인 작전 수행을 위해 각 노드는 네트워크 초기 진입 혹은 재진입시 전체 네트워크의 원활한 통신에 영향을 최소화해야한다. 이를 위해 최초 네트워크 형성 시와 네트워크 재구성시 시간 및 주파수 옵셋을 안정화시키는 동기화 기법이 필요하다.

기존의 분산 네트워크에서 동기화에 대한 연구는 주로 무선 센서네트워크 환경에서 시간 동기화 알고리즘에 대해 진행되어 왔다. 대표적인 예로 참조노드가 주변의 다수 노드에게 시간 동기화를 수행하는 기법<sup>[3]</sup>과 참조노드 없이 노드 간 시간 동기화를 수행하는 기법<sup>[4]</sup>, 노드 쌍 간 동기화를 통해 시간 동기화를 수행하는 기법<sup>[5,6]</sup> 등이 있다. 반면, 주파수 동기화 방식에 대한 연구는 하나의 대표 노드가 네트워크상의 모든 다른 노드들에게 기준 신호를 방송하는 방식<sup>[7]</sup>과 노드 간 협력을 통한 상호 방송과 주파수 동기화 방식<sup>[8]</sup> 등이 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 분산 네트워크 시스템에서 노드 간 주파수 동기화는 시스템의 성능을 좌우하는 주요한 요인임에도 불구하고 그 연구가 매우 미비한 상태이다. 최근 <sup>[9,10]</sup>에서는 다수의 노드가 네트워크에 분산되어 있고 노드 간 연결이 유동적으로 변할 때, 동일한 특정 값을 추정함에 있어서 지역적 합의 과정을 통해 점차적으로 최적의 추정 값을 도출해내는 알고리즘을 제안했다. 따라서 본 논문에서는 <sup>[9,10]</sup>에 근거하여 각 노드가 자신의 주변 노드들의 방송과 주파수를 참조하여 자신의 방송과 주파수를 평균값으로 조절함으로써 네트워크의 모든 노드를 동일

한 값으로 근사 평균화하는 다수 노드 주파수 동기화 방식을 제안한다.

## II. 본론

### 2.1. 시스템 모델

다수 노드가 분산된 네트워크에서 인접 노드 간 주파수 옵셋의 영향을 살펴보기 위해 그림 2와 같이 네트워크 모델을 가정한다.

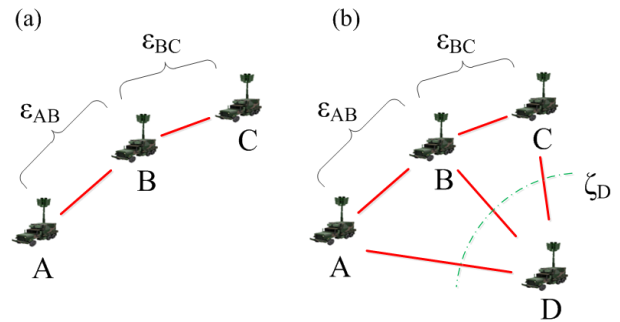


그림 2. 분산 네트워크에서 주파수 동기화 예  
Fig. 2. Example of frequency synchronization for distributed networks

본 논문에서는 링크를 형성하는 두 노드의 주파수 옵셋 차이를  $\epsilon$ 로 정의한다. 즉, 그림 2의 (a)에서 노드 A의 방송과 주파수를  $f_A$ 라 하고 노드 B의 방송과 주파수를  $f_B$ 라 하면 두 노드 간 주파수 옵셋  $\epsilon_{AB} = |f_A - f_B|$  이다. 임의의 링크에 대해  $\epsilon$ 가 특정 허용 값( $\epsilon_{th}$ ) 이내이면, 즉,  $\epsilon \leq \epsilon_{th}$  이면, 링크의 통신은 원활히 수행된다.<sup>[11]</sup> 만약 임의의 링크에 대해  $\epsilon > \epsilon_{th}$  이면 그 링크를 구성하는 두 노드는  $\epsilon \leq \epsilon_{th}$  가 되도록 각자의 주파수 옵셋을 조절한다. 기존 셀룰라 네트워크 환경에서 이 과정은 기지국과 단말 간에 수행된다. 그러나 분산 네트워크에서는 모든 노드가 동등하므로 상황에 따라 각 노드가 개별적으로 조절할 수 있다.

### 2.2. 분산 주파수 동기화 알고리즘

#### 2.2.1. 단일 그룹으로 구성된 네트워크의 분산 주파수 동기

임의의 노드에 대해 원홉 노드들의 방송과 주파수 값들 중 가장 큰 값과 가장 작은 값의 차이를  $\zeta$ 로 정의한다. 이때,  $\zeta$ 은 시스템에서 허용하는 특정 경계 값( $\zeta_{th}$ )보다 작아야, 즉,  $\zeta \leq \zeta_{th}$  이면, 간섭의 영향 없이 통신이 가능하다.<sup>[11]</sup> 따라서 각 노드는 자

신의 원홉 노드들의 평균 반송파 주파수 값에 자신의 반송파 주파수를 맞추므로써 네트워크 내의 모든 노드들이 점차적으로 동일한 반송파 주파수 값으로 수렴하도록 한다. 그러나 실제 시스템에서는 반송파 주파수 값 자체가 아닌 수신 노드의 반송파 주파수 값과 수신 신호로부터 추정된 값의 차이인 주파수 오프셋 값을 구하게 된다. 따라서 추정 오차로 인해 동기화 성능 열화가 발생할 수 있다. 이를 최소화하기 위해 송신 노드로부터 신호를 여러 번 수신하여 정확한 주파수 오프셋 값을 추정 후 동기화 알고리즘을 수행한다. 또한 여러 번 수신하는 과정에서 참조 값이 변하는 경우를 막기 위해 모든 노드는 동일한 시간 구간에 업데이트 하도록 한다.

각 노드는 네트워크 진입 시 기존 네트워크와 주파수뿐만 아니라 시간 도메인에서 동기화를 수행하게 된다. 이 과정에서 프레임의 시작점을 맞추게 되고 같은 시각 기준점을 갖게 된다. 이를 바탕으로 모든 노드는 같은 주기를 가지고 업데이트를 동시에 수행할 수 있다. 또한 업데이트 주기는 네트워크의 최대 원홉 노드 수를 고려하여 설정한다. 업데이트의 주기가 충분히 길면 스케줄링과 무관하게 모든 인접 노드들로부터 신호를 충분히 여러 번 수신할 수 있다.

그림 2의 네트워크에서 동기화 과정을 살펴보면 다음과 같다. 노드 A는 노드 B와 노드 D의 반송파 주파수를 추정하고 그 평균값을 참조하여 자신의 반송파 주파수를 조절한다. 노드 B는 노드 A와 노드 D의 반송파 주파수를 추정하고 그 평균값을 참조하여 자신의 반송파 주파수를 조절한다. 노드 C는 노드 B와 노드 D의 반송파 주파수를 추정하고 그 평균값을 참조하여 자신의 반송파 주파수를 조절한다. 마지막으로 노드 D는 노드 A, 노드 B, 노드 C의 반송파 주파수를 추정하고 그 평균값에 자신의 반송파 주파수를 맞춘다.

수식의 간소화를 위해 주파수 오프셋이 완벽히 추정되었다고 가정하면 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$f_A' = \frac{f_B + f_D}{2}, f_B' = \frac{f_A + f_C}{2},$$

$$f_C' = \frac{f_B + f_D}{2}, f_D' = \frac{f_A + f_B + f_C}{3}$$

(1)

새로 진입한 노드 D의  $\zeta$  값을 표현하면 다음과 같다.

$$\zeta_D = \max(f_A', f_B', f_C') - \min(f_A', f_B', f_C')$$

마찬가지로 노드 A, 노드 B, 노드 C에 대해서도 다음과 같이 표현된다.

$$\zeta_A = \max(f_B', f_D') - \min(f_B', f_D')$$

$$\zeta_B = \max(f_A', f_C', f_D') - \min(f_A', f_C', f_D')$$

$$\zeta_C = \max(f_B', f_D') - \min(f_B', f_D')$$

(2)

제안하는 동기화 알고리즘의 수렴성은 그림 3을 통해 직관적으로 살펴볼 수 있다. 그림 3에서  $f_A, f_B, f_C, f_D$ 은 동기화 알고리즘  $k$ 번 수행된 후 각 노드의 반송파 주파수이고,  $f_A', f_B', f_C', f_D'$ 은 동기화 알고리즘  $k+1$ 번 수행된 후 각 노드의 반송파 주파수라고 하면, 수직선 위에 표시된 각 노드의 반송파 주파수 값들은 동기화 알고리즘이 한 번 더 수행되면서 더 작은 구간 내에 존재하게 된다.

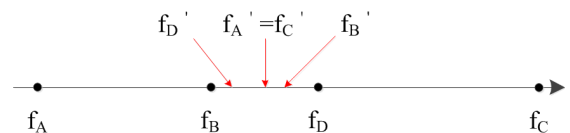


그림 3. 분산 주파수 동기 수행 전 후의 반송파 주파수 변화 경향  
Fig. 3. Trend of carrier frequency change before and after the proposed distributed frequency synchronization process

이처럼 동기화 과정이 수행된 후 노드들의 반송파 주파수 값들은 동기화 과정이 수행되기 전 반송파 주파수 값들의 최대 최소 범위의 내부에 존재하기 때문에 새로 계산된 반송파 주파수 값의 최대 최소 범위는 더욱 작아지게 된다. 이러한 경향은 충분히 큰 업데이트 횟수  $R$ 에 대해  $R$ 번째 업데이트 후의  $\zeta$  값을  $\zeta^R$ 라 하면,  $\zeta^R \leq \dots \leq \zeta^1$ 을 시사하며 충분히 작은 값  $\zeta_{th}$ 에 대해  $\zeta^R \leq \zeta_{th}$ 가 됨을 예측할 수 있다.  $\zeta$  값의 수렴 여부는 성공적인 통신 가능 여부와 직결되며 이는 다음 장에서 실험 결과를 통해 확인할 수 있다.

앞서 설명한 단일 그룹 내에서의 분산 주파수 동기화 알고리즘을 실제 노드  $i$ 에 적용하면 다음과 같이 간략히 표현된다.

**알고리즘 1** 분산 주파수 동기 알고리즘 (단일 그룹)

- 1: 모든  $n \in \chi_i$  에 대해  $f_n^0 = 0$ 으로 초기화
- 2:  $\bar{f}_i = 0, N_i = 0$ 으로 초기화
- 3: for 모든  $n \in \chi_i$  do
- 4:     for  $k = 1 \sim K_n$  do
- 5:          $f_n^k = \frac{(k-1)f_n^{k-1} + \tilde{f}_n^k}{k}$
- 6:     end for
- 7: end for
- 8: for 모든  $n \in \chi_i$  do
- 9:     if  $K_n \geq R$  do
- 10:          $\bar{f}_i = \bar{f}_i + f_n^{K_n}, N_i = N_i + 1$
- 11:     end if
- 12: end for
- 13:  $f_i = \frac{\bar{f}_i}{N_i}$

위의 알고리즘 1에서  $\chi_i$ 는 노드  $i$ 의 원홉 노드 집합이고  $K_n$ 은 노드  $n$ 에 대해 반복 추정 횟수이다.  $\tilde{f}_n^k$ 는 노드  $n$ 으로부터  $k$ 번째 수신한 프리앰블의 반송파 주파수 값이고  $f_n^k$ 는  $k$ 번 수신 후의 평균 반송파 주파수 값이다. 각 노드에 대해 수신 횟수  $K_n$ 이  $R$ 보다 크거나 같으면 충분히 신뢰할만한 값으로 판단하고, 이 값들을 사용하여 노드  $i$ 는 자신의 반송파 주파수 값  $f_i$ 를 업데이트 한다. 네트워크 내의 모든 노드가 위의 알고리즘을 한 번씩 수행하고 다음 수행할 때까지의 시간을 업데이트 주기로 정의한다. 이 업데이트가 여러 번 수행되면 네트워크 내의 노드들은 점차적으로 같은 값으로 수렴하게 된다.

2.2.1 다수의 그룹으로 구성된 네트워크의 분산 주파수 동기

다수 그룹으로 네트워크가 구성된 경우는, 그룹 별로 각각 노드 간 동기화 되었더라도 서로 다른 그룹이 근접했을 때 그룹 간의 동기화 과정이 필요하다. 이때 그룹 간의 분산 주파수 동기화는 그룹의 우선순위에 따라 달리 수행된다.

그림 4는 두 개의 그룹으로 구성된 분산 네트워크에서 노드 C가 분산 주파수 동기 알고리즘을 수행하는 예이다. 이때 상급 부대의 구성원인 노드 X, 노드 Y, 노드 Z의 우선순위가 더 높다고 하면, 노드 C는 원홉 거리의 노드들 중 노드 X와 노드 Z의 반송파 주파수만 참조하여 자신의 반송파 주파수를 조절한다. 또한 노드 C는 이후의 업데이트에서 자신

의 그룹의 노드들에게 점차적으로 상대 그룹의 주파수 옵셋을 전파하게 된다. 이러한 과정을 통해 두 그룹은 일정 업데이트 후에 동일한 반송파 주파수로 동기화 된다.

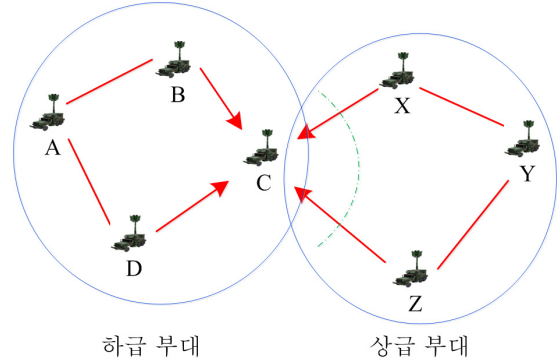


그림 4. 다수 그룹으로 구성된 분산 네트워크에서의 제안된 분산 주파수 동기화 예  
Fig. 4. Example of the proposed distributed frequency synchronization for distributed networks including several groups

앞서 설명한 다수 그룹 존재 시 분산 주파수 동기화 알고리즘을 실제 노드  $i$ 에 적용하면 다음과 같이 간략히 표현된다.

**알고리즘 2** 분산 주파수 동기 알고리즘 (다수 그룹)

- 1: 모든  $n \in \chi_i$  에 대해  $f_n^0 = 0$ 으로 초기화
- 2:  $\bar{f}_i = 0, N_i^P = 0$ 으로 초기화
- 3: for 모든  $n \in \chi_i$  do
- 4:     for  $k = 1 \sim K_n$  do
- 5:          $f_n^k = \frac{(k-1)f_n^{k-1} + \tilde{f}_n^k}{k}$
- 6:     end for
- 7: end for
- 8: for 모든  $n \in \chi_i$  do
- 9:     if  $P(n) = P_{\max}$  이고  $K_n \geq R$  이면 do
- 10:          $\bar{f}_i = \bar{f}_i + f_n^{K_n}, N_i^P = N_i^P + 1$
- 11:     end if
- 12: end for
- 13:  $f_i = \frac{\bar{f}_i}{N_i^P}$

위의 알고리즘 2에서  $P(\cdot)$ 는 그룹 간 우선순위를 나타내는 파라미터이고,  $P_{\max}$ 는 근접한 그룹들 중 가장 순위가 높은 그룹의 우선순위이다.

우선순위를 적용하는 그룹 간 주파수 동기화 알고리즘은 네트워크 내에 Global Positioning System(GPS)가 존재하는 경우에도 적용할 수 있

다. 네트워크의 모든 노드가 GPS를 가진 노드의 반송파 주파수에 동기화가 필요한 경우, 각 노드는 자신의 원홉 노드가 GPS의 반송파 주파수 값에 맞추어진 노드인지 아닌지 구분하여 자신의 반송파 주파수 변경에 반영해야 한다. 이를 위해 GPS의 반송파 주파수 값에 맞추어진 노드는 우선순위를 높게 하여 GPS의 반송파 주파수 값에 맞추어지지 않은 노드의 신호는 무시 하도록 설정할 수 있다.

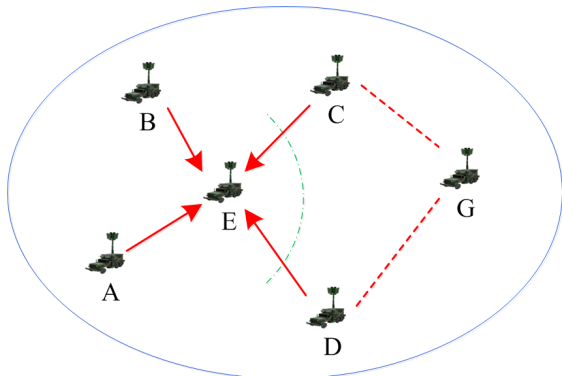


그림 5. GPS가 존재하는 분산 네트워크에서의 제안된 분산 주파수 동기화 예  
Fig. 5. Example of the proposed distributed frequency synchronization for distributed networks with GPS

그림 5는 GPS를 보유한 노드 G를 포함하는 분산 네트워크에서 노드 E가 분산 주파수 동기 알고리즘을 수행하는 예이다. 이때 노드 E는 GPS에 동기화 된 노드 C와 노드 D의 반송파 주파수만 참조하여 자신의 반송파 주파수를 조절한다.

### III. 실험 결과

본 논문에서는 실험을 위해 IEEE 802.16m<sup>[11]</sup>의 프리앰블을 사용하여 노드별 주파수 오프셋을 추정하였다. 이때 각 노드는 정확한 추정을 위하여 앞서 정의한 반복 수신 횟수  $K=10$ 으로 하여, 프리앰블을 10번 수신한 후 해당 노드의 주파수 오프셋을 추정한다. 채널은 ITU-R Veh-A<sup>[12]</sup>를 사용하고, 원홉거리 5km(SNR=8.47dB) 일 때, 속도 120km/h로 가정하였다. 네트워크 상에 14, 24, 34, 54개의 노드들을 랜덤한 위치에 순차적으로 진입시켰으며, 각 경우에 대해 평균 원홉의 수는 각각 약 3, 4, 5, 8개 이다. 이하 실험에서의 성공 확률은 앞서 정의한  $\zeta_{th}$ 가 부반송파 간격의 1%인 경우에 대해  $\zeta \leq \zeta_{th}$ 인 노드들은 송수신이 잡음의 영향 없이 성공했다고 가정하고 전체 노드 수 대비 성공한 노드

수를 백분율로 구한다.

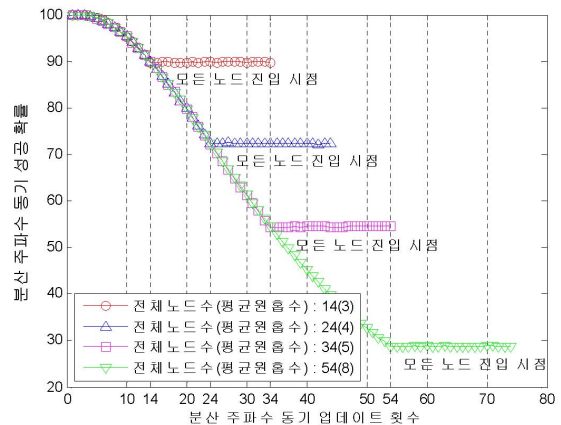


그림 6. 분산 네트워크에서의 셀룰라 시스템 기반 주파수 동기화 방식의 성능  
Fig. 6. Performance of the cellular system-based frequency synchronization scheme for distributed networks

그림 6은 분산 네트워크 환경에서 기본 셀룰라 시스템에서의 주파수 동기화 방식의 성능을 실험한 결과이다. 각 노드는 네트워크 진입 시 주변 노드로부터 수신한 신호의 세기에 따라 하나의 스폰서 노드를 설정하고 스폰서 노드에 대한 자신의 시간 및 주파수 오프셋을 동기화 한다. 따라서 수차례 동기화 업데이트가 수행된 후에도 스폰서 노드가 아닌 노드들과는 반송파 주파수가 동기화 되지 않는다. 만약 통신하고자 하는 특정 노드와 매번 동기화 한 후 통신한다고 할지라도 특정 노드를 제외한 나머지 노드들과의 주파수 오프셋으로 인한 간섭이 항상 발생하게 된다.

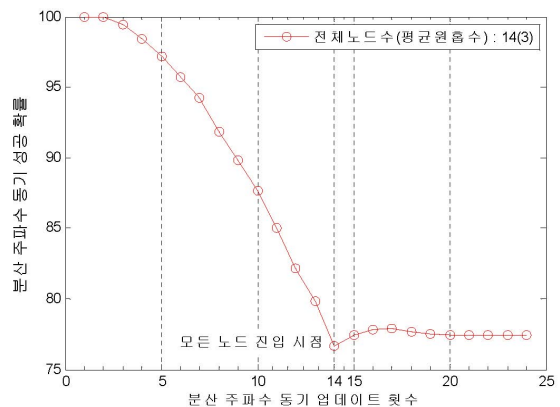


그림 7. 비동기식 업데이트를 사용한 타입-1 동기화 방식의 성능  
Fig. 7. Performance of the type-1 synchronization scheme using asynchronous update

앞서 언급한 바와 같이 제안하는 동기화 알고리즘

은 모든 노드가 같은 시간에 업데이트를 수행한다. 이 조건이 없으면 임의의 노드가 자신의 원홉들로부터 주파수 옵셋을 추정하여 자신의 반송파 주파수를 조절하는 과정에서 원홉의 반송파 주파수가 도중에 바뀔 수 있다. 이는 원홉 노드의 정확한 주파수 옵셋 추정을 불가능하게 한다. 그림 7은 동시에 업데이트 하지 않은 경우의 통신 성공 확률을 보여준다. 노드가 한 개씩 켜지면서 성공확률은 감소하여 모든 노드가 켜지고 동기화가 여러 번 수행된 후에도 성공확률의 증가가 미미함을 확인할 수 있다.

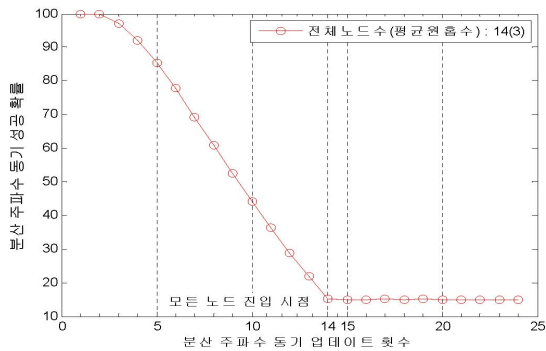


그림 8. 비동기식 업데이트를 사용한 타입2 동기화 방식의 성능  
Fig. 8. Performance of the type-2 synchronization scheme using asynchronous update

만일 자신의 값이 바뀔 때마다 주변 원홉 노드에 알려준다고 가정하면 임의의 노드가 자신의 원홉들로부터 주파수 옵셋을 추정하는 도중에 원홉 노드의 주파수 옵셋 값이 바뀌면 다시 처음부터 추정해야하므로 원홉 노드의 주파수 옵셋 값을 확정하지 못하고 계속해서 추정만 하게 된다. 그림 8은 도중에 주파수 옵셋이 바뀐 원홉 노드의 주파수 옵셋의 추정 카운트를 리셋한 경우의 실험 결과이다. 노드가 켜지는 과정에서 분산 주파수 동기화가 수행되더라도 불구하고 성공확률의 감소가 급격하며 모든 노드가 켜진 후에도 성공확률이 증가하지 않는다.

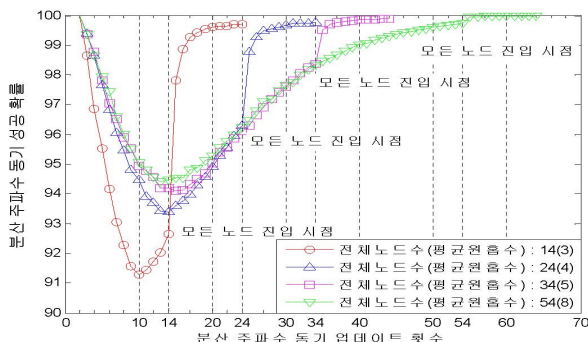


그림 9. 분산 네트워크에서의 제안한 분산 주파수 동기화 방식의 성능  
Fig. 9. Performance of the proposed distributed frequency synchronization scheme for distributed networks

그림 9는 모든 노드를 동시에 업데이트 하는 제안하는 분산 주파수 동기화 방식의 실험 결과이다. 가정한 4개의 환경에 대해 각각 전체 노드 14개인 경우 99.7%, 24개인 경우 99.8%, 34개인 경우 99.9%, 54개인 경우 99.99%의 성공확률로 수렴함을 확인할 수 있다.

네트워크 초기 형성 단계에 해당하는 10~14회 업데이트 이전에서는 하나의 진입 노드에 대해 네트워크가 안정화되기 전에 다음 새 노드가 진입하기 때문에 성능 열화가 발생한다. 그러나 이후 수차례 업데이트가 진행되면서 결국 네트워크가 안정화되고 안정화된 네트워크에 새로운 노드가 진입하게 되므로 10~14회 업데이트 후부터는 성능이 급격히 향상된다. 이 횟수는 전체 노드 수나 평균 원홉 수에 비례하지만 일정 노드 수 이상인 환경에서는 수차례 업데이트 이후부터 진입 노드에 대해 기존 네트워크가 충분히 안정화되어 있으므로 대체로 14회 업데이트 후부터 동기 성능이 향상되는 현상이 나타난다.

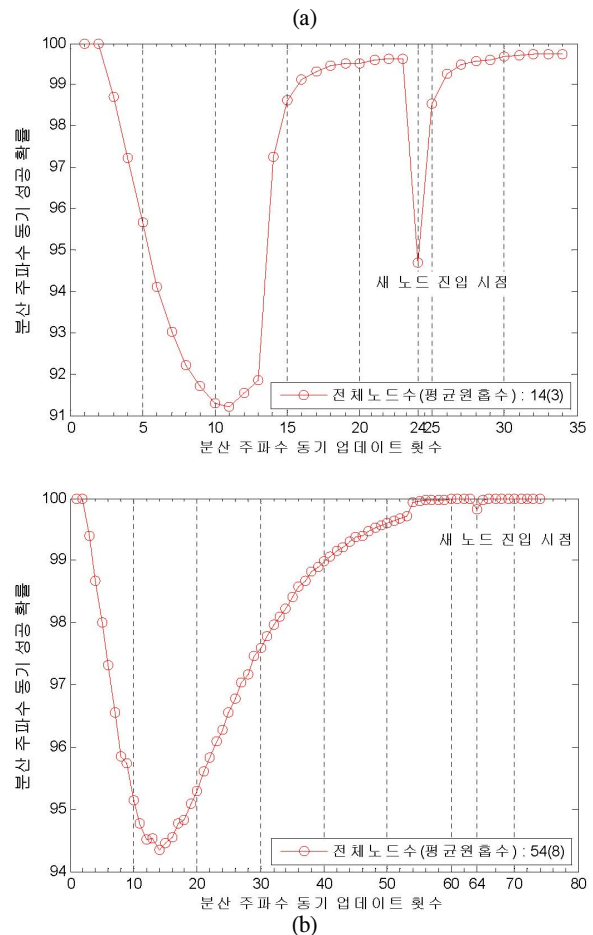


그림 10. 동기화 네트워크에 새로운 노드가 진입한 경우 제안한 분산 주파수 동기화 성능  
Fig. 10. Performance of the proposed distributed frequency synchronization scheme when new node enter the synchronized network

그림 10-(a),(b)는 모든 노드가 안정화된 후 새로운 노드가 진입했을 때 네트워크가 다시 안정화되기까지 시간을 확인한 실험이다. 평균 원홉 노드 수가 3개인 경우 4~5회 업데이트 후, 평균 원홉 노드 수가 8개인 경우 1~2회 업데이트 후 만에 네트워크가 다시 안정됨을 확인할 수 있다. 이는 평균 원홉 수가 많은 밀집한 네트워크 일수록 새로 진입한 노드가 보다 정확한 값으로 빠르게 네트워크에 동기화 할 수 있음을 보여준다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 분산 네트워크 환경에서 다수 노드들의 주파수를 동기화하기 위한 방식을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 네트워크를 구성하는 노드들의 주파수 오프셋을 동일한 값으로 수렴하도록 동기화 시킴으로써 전체 네트워크를 안정화시키고 새로운 노드가 진입하거나 기존 노드가 재진입할 때 단기간에 동기화가 가능하도록 한다. 또한 네트워크에 여러 개의 그룹이 존재하는 경우 그룹 간 동기화 방식과 GPS를 보유한 노드가 네트워크에 진입했을 경우 전체 노드들이 GPS에 동기화하는 방식을 제공한다.

모의실험 결과 제안한 주파수 동기화 알고리즘을 수차례 수행하면 네트워크상의 전체 노드가 14개인 경우 99.7%, 24개인 경우 99.8%, 34개인 경우 99.9%, 54개인 경우 99.99%의 높은 성공확률로 수렴함을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 주파수 동기 알고리즘은 노드의 진입이 유동적이고 그룹 간 병합과 분리가 빈번하게 발생할 수 있는 능동적이고 유동적인 군 작전 상황에 효과적으로 사용될 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

[1] T. Pollet, M. Van Bladel, and M. Moeneclaey, "BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Weiner phase noise," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 43, No. 2/3/4, pp. 191-193, February/March/April, 1995.

[2] K. A. Hamdi, "Precise Interference Analysis of OFDMA Time-Asynchronous Wireless Ad-hoc Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 9, No. 1, January, 2010.

[3] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin,

"Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts," *OSDI '02*, pp. 147-163, December, 2002.

[4] S. Palchaudhuri, A. K. Saha and D. B. Johnson, "Adaptive clock synchronization in sensor networks," *IPSN '04*, pp. 340-348, April, 2004.

[5] Miklos Maroti, Branislav Kusy, Gyula Simon, Akos Ledeczi, "The Flooding Time Synchronization Protocol," *SenSys '04*, pp. 39-49, November, 2004.

[6] K.-Y. Cheng, K.-S. Lui, Y.-C. Wu, and V. Tam, "A distributed multihop time synchronization protocol for wireless sensor networks using pairwise broadcast synchronization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 8, No. 4, pp. 1764-1772, April, 2009.

[7] S. Berger and A. Wittneben, "Carrier phase synchronization of multiple distributed nodes in a wireless network," *SPAWC '07*, pp. 1-5, June, 2007.

[8] Y. Hara, N. Fukui, and H. Kubo, "Over-the-Air Inter-Node Carrier Phase Synchronization for Coherent Transmission," *VTC '10*, pp. 1-5, May, 2010.

[9] A. Nedić, A. Olshevsky, A. Ozdaglar, and J. N. Tsitsiklis, "On distributed averaging algorithms and quantization effects," *IEEE Trans. Automat. Control*, Vol. 54, No. 11, pp. 2506-2517, November, 2009.

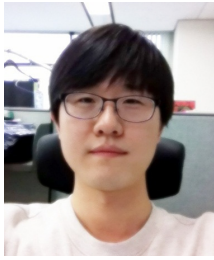
[10] A. Nedić, A. Ozdaglar, P. A. Parrilo, "Constrained consensus and optimization in multi-agent networks," *IEEE Trans. Automat. Control*, Vol. 55, No. 4, pp. 922-938, April, 2010.

[11] IEEE 802.16m, Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems: Advanced Air Interface, May, 2011.

[12] Recommendation ITU-R M.1225, "Guidelines for the evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000," 1997.

김 정 현 (Jung-Hyun Kim)

정회원



2006년 연세대학교 전기전자  
공학부 학사 졸업  
2008년 연세대학교 전기전자  
공학부 대학원 석사 졸업  
2009년 연세대학교 전기전자  
공학부 대학원 연구원  
2010년~현재 ETRI 모바일

응용통신연구팀 연구원

<관심분야> Error Correcting Codes, Network  
Coding, Channel estimation, Synchronization,  
OFDM systems

임 광 재 (Kwang Jae Lim)

정회원



1998년 인하대학교 전자공학과  
학사 졸업  
1992년 인하대학교 전자통신  
공학 석사 졸업  
1999년 인하대학교 전자통신  
공학 박사 졸업  
1999년~2009년 ETRI 위성

및 이동통신분야 선임연구원

2010년~현재 ETRI 모바일응용통신연구팀장

<관심분야> 이동/위성통신 물리계층 및 매체 접속  
계층

김 지 형 (Ji-Hyung Kim)

정회원



2000년 연세대학교 전기전자  
공학부 학사 졸업  
2002년 연세대학교 전기전자  
공학부 대학원 석사 졸업  
2007년 연세대학교 전기전자  
공학부 대학원 박사 졸업  
2007년~현재 ETRI 모바일 응

용통신연구팀 선임연구원

<관심분야> 이동통신시스템