패킷 기반 통신을 하는 애드 혹 네트워크에서 반딧불 영감을 받은 분산 타이밍 동기 연구

이효석* · 김성진** · 권동승*** · 장성철*** · 김형진*** · 신원용****

A Study on the Firefly-Inspired Distributed Timing Synchronization in Ad Hoc Networks With Packet-Based Communications

Hyo Seok Yi* · Sungjin Kim** · Dong-Seung Kwon*** · Sung-Cheol Jang*** · Hyeong-Jin Kim*** · Won-Yong Shin****

본 연구는 방송통신위원회의 방송통신원천기술 개발의 연구 결과로 수행되었음(KCA-2012-12-911-04-002)

요 약

애드 혹 네트워크에서 반딧불 영감을 받은 접근 방식을 사용하는 분산 타이밍 동기 기술을 연구한다. 노드가 직교주파수분할다중접속 무선 인터페이스에서 통신하는 패킷 기반 통신을 하는 다중 반송파 시스템에 잘 적용될 수 있도록, 펄스의 결합진동자 이론에 기반한 반딧불 동기 알고리즘을 재조명한다. 주요 결과로써, 네트워크 내 노드 수 및 네트워크 위상과 같은 다양한 네트워크 변수가 주어질 때, 타이밍 동기화 시간을 최소화 하는 방식에서 결합함수 및 검파 임계값을 최적 설계함으로써 새로운 동기 코드 검파기를 소개한다. 실제적인 네트워크 환경에서 동기 상태로의 수렴을 보이기 위해 컴퓨터 모의실험을 수행한다.

ABSTRACT

In ad hoc networks, a distributed timing synchronization is studied using a firefly-inspired approach. We illuminate the exiting synchronization algorithm based on the theory of pulse-coupled oscillators so that the algorithm can be applied to multi-carrier systems through packet-based communications, where nodes communicate over an orthogonal frequency-division multiple access air interface. As our main result, we introduce a new sync-code detector, which optimally designs both the coupling function and the detection threshold when various network parameters such as the number of nodes in the network and network topology are given a priori. Computer simulations are performed to show the convergence to a synchronized state in realistic network environments.

키워드

검파 임계값, 결합함수, 분산 타이밍 동기, 패킷 기반 통신

Key word

Detection threshold, coupling function, distributed timing synchronization, packet-based communication

* 정회원 : Harvard University
** 정회원 : KAIST
*** 정회원 : 한국전자통신연구원
**** 정회원 : 단국대학교(교신저자, wyshin@dankook.ac.kr)

접수일자 : 2013. 01. 25
심사완료일자 : 2013. 02. 12

Open Access http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.3.575

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

IMT-Advanced 에서 제안되었고 LTE-Advanced 에서 새로운 아이템으로 정의된 기기 간 직접통신(D2D Communication: Device-to-Device Communication) [1]은 상대적으로 거리가 가까운 두 사용자가 기지국을 거치지 않고 직접 신호를 주고받음으로써 기존의 중앙 집중화 방식에 비해 주파수 자원을 절반만 사용, 주파수 효율을 두 배로 만들 수 있는 통신방식이다[2]. 또한 최근의 무선기술, 마이크로 시스템 및 센서기술이 발달함에 따라 각각의 센서가 환경을 인식 및 측정하고 데이터를 처리 후 서로 간에 통신을 주고받는 무선 센서 네트워크가 가능해졌다 [3]. 그러나, 위의 기기 간 직접통신 및 센서 네트워크와 같은 분산된 애드 혹 네트워크에서는 기지국에 의해 네트워크의 타이밍 동기화가 이루어지던 기존의 중앙 집중화된 시스템과는 달리 중앙의 기지국이 존재하지 않으므로 분산된 노드들로부터 네트워크를 타이밍 동기화하는 프로토콜이 필요하다.

네트워크 타이밍 동기화란 네트워크에 참여하는 모든 노드들이 동일한 내부기준시간을 가지게끔 동작하는 것으로, 시간분할다중접속 [4], 시공간 코딩을 이용한 협동전송 [5], 수면 모드의 스케쥴링 등 주파수/에너지 효율적인 네트워크 활용에 필수적인 조건이다. 분산된 네트워크에서의 동기화를 위해 제안된 초기 기술들 [6-8]이 상위 계층으로부터의 많은 양의 정보를 주고받아야 하는 반면, 자연의 반딧불에서 영감을 받은 분산 동기화 기술은 간단한 규칙과 규모의 확장에 자유로운 특성으로 인해 최근 주목받고 있다.

동남아시아의 반딧불들이 혼돈의 상태에서 자연적으로 동기화를 이룬다는 사실이 발견된 이후, Mirollo와 Strogatz는 펄스 결합진동자 (Pulsed Coupled Oscillator) 이론을 이용해 반딧불 동기화의 원리를 수학적으로 완벽하게 설명하였다 [9]. Mirollo-Strogatz 모델에서는 반딧불의 반짝임을 매우 짧은 시간동안 방출되는 펄스로 가정하였고, 이 펄스 기반의 반딧불 모델을 현재의 무선통신 네트워크에 적용하기 위해 여러 가지 현실적인 조건이 고려되었다. 전파의 지연 [10], 채널 감쇠와 잡음 [11]이 고려되었으며, 네트워크 위상에 따른 결합함수의 수렴효과 [12] 및 연속된 펄스로 이루어진 긴 동기화 신호 반영 [13]을 보였다.

그러나 현실적인 무선 채널 환경에서 펄스 기반의 동기화 기술은 잡음과 간섭으로 인해 펄스를 정확하게 측정하기 힘들다는 점과 노드의 상태가 네트워크 타이밍 동기화를 위한 동기화 모드와 데이터를 주고받는 통신 모드로 구분된다는 두 가지 문제점을 가진다. 특히 두 번째 문제점인 모드의 구분은 앞으로 중요하게 될 모바일 애드 혹 네트워크에서는 단점으로 작용할 것이다. 예를 들어, 동적인 네트워크에서는 연결이 끊어져 있던 부분이 전체 네트워크와 연결되면서 재 동기화가 이루어지는 경우가 발생하며, 이 경우 데이터를 주고받으면서 동시에 타이밍 동기화가 이루어져야 한다. 이를 위해 Tyrell 등은 타이밍 동기화 신호를 데이터 신호에 포함시킨 패킷 기반의 반딧불 동기화 기술을 제안하였다 [14].

패킷 기반의 반딧불 동기화에서는 프리앰블로 구성된 동기화 신호와 정보 전송 데이터가 모여서 하나의 패킷을 이루게 된다. 이것은 IEEE 802.11과 같은 규격에서 사용되는 직교주파수분할다중접속(OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 기반의 패킷 통신에서 제안하는 패킷 구조와 유사하며, OFDMA 기반 하에서의 반딧불 동기화 기술 역시 작동함을 보인 바 있다 [15]. 동기화 신호로는 PN (Pseudorandom Noise) 코드와 같이 자기 상관성이 뛰어난 신호를 모든 네트워크의 노드들이 공통으로 사용한다. 이 때 데이터를 전송하는 노드는 자신의 기준 시간에 맞추어 동기화 신호를 포함한 패킷을 전송한다. 데이터를 전송하지 않는 노드들은 외부에서 수신되는 신호로부터 동기화 신호를 찾고, 동기화 신호가 검출되는 경우, 검출된 동기화 신호로부터 자신의 기준시간을 반딧불 모델에서 주어진 결합함수에 의해 재설정하며, 동시에 수신된 데이터를 복호하게 된다.

위와 같은 모델에서 노드는 패킷을 전송하는 동안 신호를 수신할 수 없고 이것은 일반적인 애드 혹 네트워크에서 가정되는 시분할 이중화 시스템에서와 같이 주파수 대역을 통해 신호를 주고받는 상황과 잘 일치한다. 또한 노드들 간의 거리에 따른 전파지연이 존재하는데 이는 수신된 신호에 반응을 하지 않는 불응기 (refractory period)를 노드의 결합함수 (coupling function)에 반영함으로써 해결할 수 있다. 이와 같은 패킷 기반 반딧불 동기화에서는 네트워크의 구조에 따른 결합함수의 형태와 동기화 신호를 검출하는 임

계값의 크기가 네트워크 타이밍 동기화의 성능을 결정하게 된다.

본 논문에서는 반딧불 동기화 모델을 패킷 기반 OFDMA 시스템에 적용할 수 있도록 타이밍 동기화 신호를 프리앰블의 형태로 패킷 모델에 결합시키는 통합된 framework을 제공하며 주어진 모델이 현실적인 네트워크 위상에서 정상적으로 작동하는 것을 보인다. 또한, 반딧불 동기화 모델의 성능을 좌우하는 핵심변수인 결합함수의 변수와 검파 임계값을 최적화하여 표의 형태로 제공한다. 반딧불 동기화 모델의 최적화는 네트워크 타이밍 동기화 시간을 최소화 하는 방식으로 수행되며, 이때 타이밍 동기화 시간은 네트워크의 각 노드들의 기준시간에 대한 평균 타이밍 오차의 분산이 특정 레벨 이하로 떨어지는 데까지 소요되는 시간이다. 보다 구체적으로, 주어진 네트워크 구조변수인 노드의 수와 푸아송 과정 변수의 다양한 쌍에 대해 최적화시킨 반딧불 동기화 모델 결합함수의 변수와 검파 임계값을 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 결정하여 표로 제시한다. 수신기에서는 동기화 알고리즘 동작 이전에 시스템 설계자에 의해 구해진 최적의 값들이 수치적으로 결정될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 모의실험에 사용된 시스템 및 채널모델을 소개하고, III장에서는 Mirollo-Strogatz 동기화 모델과 다중 반송파 시스템에서의 분산 타이밍 동기 기술을 설명한다. IV장에서는 결합함수와 검파 임계값의 최적 설계방안을 제시하고, V장에서는 모의실험을 통해 다양한 환경에서 최적화된 결과를 제공한다. VI장에서는 본 논문을 요약 및 마무리 한다.

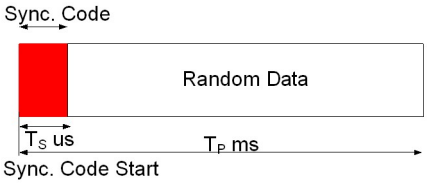

그림 1. 프레임 구조
Fig. 1 Frame structure

II. 시스템 및 채널 모델

본 논문에서는 가로 및 세로가 L km 로 주어진 평면 공간에 노드 N 개가 균일한 확률을 가지고 분포하는 2 차원 평면구조의 네트워크를 가정한다. 노드의 전송전력은 P 로 동일하며 모든 노드는 동일한 주파수 대역을 사용한다. 한 노드의 신호가 다른 노드에게 전달될 때 노드 사이의 거리에 따른 전파 지연 시간을 고려하여야 한다. 동기화 시스템이 안정화되기 위하여 불응기 T_{refr} 을 두게 되는데, 불응기는 전파 지연과 관계된 아래 수식을 만족하도록 잡는다.

$$T_{refr} > 2 \cdot \max_{(i,j)} d_{ij} \tag{1}$$

결합함수에서 T_{refr} 동안은 다른 노드들로부터 전송된 신호를 탐지하여도 위상을 변화시키지 않는 비 결합 (uncoupled) 상태를 유지하게 된다. 그리고, 노드가 송신 모드에 있을지 수신 모드에 있을지는 푸아송 과정에 의해 결정된다. 푸아송 과정은 상위계층에서 전송할 데이터가 임의의 시간에 내려오는 것을 모사하는 것으로, 푸아송 과정에서 사용되는 변수 λ는 노드들이 얼마나 자주 데이터 전송에 참여하는지에 대한 정도를 나타내게 된다. 즉, λ가 커질수록 송신 모드에 있는 노드 수가 증가하게 된다. 실험 결과 평균적으로 100번의 동작 중 $\lambda = 0.5$이면 39번, $\lambda = 0.75$이면 53번, $\lambda = 1$이면 63번의 횟수로 송신 모드로 동작하게 된다.

송신 모드에 있는 노드는 그림 1과 같은 프레임을 전송한다. 프레임구조는 T_P msec 길이의 프레임의 가장 앞부분에 T_S usec 길이의 동기화 신호가 프리앰블로써 존재한다.

동기화 신호는 자기 상관성이 높은 Hadamard 행렬 H_8의 한 행을 시간축의 신호로 사용한다. H_8은 아래의 관계식을 통해 구해진다.

$$H_{2^k} = H_2 \otimes H_{2^{k-1}}, \quad H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

위 식에서 $\otimes$ 기호는 Kronecker 곱을 나타낸다. 채널 모델은 ITU-R 보행자-B의 다중경로 채널 값을 사용한다. 채널 각각의 요소는 large-scale 경로 손실 부분과

small-scale 페이딩 부분으로 이루어지는데, 이 중 small-scale 페이딩은 노드들 간 서로 독립적으로 생성된 랜덤 변수로써 Rayleigh 페이딩으로 모델링된다고 가정한다.

Ⅲ. 패킷 기반 통신 시스템에서의 분산 타이밍 동기 기술

3.1. Mirollo와 Strogatz 모델 [9]

분산된 노드들이 단순한 규칙을 통해 자발적인 동기화를 이루는 Mirollo-Strogatz 반딧불 동기화 모델은 펄스의 결합된 상호진동자 모델로써 다음과 같이 나타내진다. 노드 i의 진동자는 위상변수 $\phi_i(t)$를 가지며 다른 노드의 수신 신호를 받지 않은 상태에서의 위상변수는 아래와 같이 선형적으로 증가한다.

$$\frac{d\phi_i(t)}{dt} = \frac{1}{T}$$

시간 $\phi_i(t) = 1$이 되었을 때의 시간 $t = \tau_i$를 노드 i의 기준 시간이라고 하며, 이 때 노드 i는 펄스를 방출하고 $\phi_i(t)$는 다시 0으로 바뀐다. 시간 $t = \tau_j$에 다른 노드 j로부터 동기화 신호가 수신된 경우 노드 i는 자신의 위상변수 $\phi_i(t)$를 현재의 값에 비례해서 변화시킨다. Mirollo와 Strogatz는 다양한 형태의 결합함수를 조사하였고 다음과 같은 간단한 형태의 식에서도 네트워크의 동기화가 가능함을 보였다.

$$\phi_i(\tau^+) = \min(\alpha \bullet \phi_i(\tau) + \beta, 1) \qquad (2)$$

이 때, $\phi_i(\tau^+)$는 τ 직후의 위상을 의미한다. 식 (2)에서 변수 α와 β는 결합변수로써 α와 β는 결합함수 $\phi_i(t)$의 기울기와 초기 절편 값을 나타낸다. 모든 노드가 동일한 결합함수를 가질 때, α>1, 0<β<1의 경우 노드들의 초기 조건과 관계없이 네트워크의 타이밍 동기화는 이루어진다. 즉, 위 조건 하에서 매 프레임마다 네트워크의 각 노드들의 기준시간에 대한 평균 타이밍 오차가 줄어드는 수렴 양상을 보인다. 따라서 적절한 변수 α와 β를 찾고 이를 바탕으로 결합함수를 설계하는 것이 반딧불 동기화 기술의 성능을 결정하게 된다.

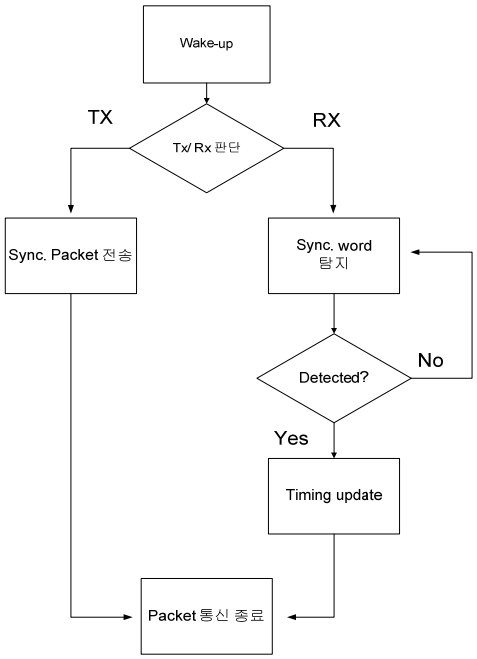

그림 2. 동기화 알고리즘
Fig. 2 Synchronization algorithm

3.2. 패킷 통신 구조에서의 동기화

반딧불 동기화 알고리즘은 그림 2와 같이 주어진다. 노드들은 푸아송 과정에 의해 매 프레임마다 임의로 수신과 송신 상태 중 하나의 모드로 결정된다. 송신 상태로 결정된 노드는 동기화 신호와 전송 데이터를 하나의 패킷으로 만들어 전송한다.

수신 상태에서는 다른 노드들로부터 들어오는 동기화 신호를 탐지한다. 동기화 신호의 탐지는 동기화 신호 길이만큼의 윈도우를 이용해 교차상관을 구하는 방식으로 이루어진다. 수신 신호 $y_i(t)$와 동기화 신호 $b(t)$에 대해 교차상관 식은 아래와 같이 주어진다.

$$R_i(t) = \int_0^{T_S} y_i(t-\tau) b^*(\tau)\, d\tau$$

이 때, T_S 는 동기화신호의 길이이다. 계산된 $R_i(t)$ 는 검파 임계값 r_{th}와 비교하여 동기화 신호의 수신 여부를 판단한다. 반딧불 동기화 기술에서 r_{th}의 크기는 오 경보 확률 (false alarm probability)와 탐지 실패 확률 (miss detection probability) 사이의 trade-off를 결정한다. 구체적으로, 임계값 r_{th}이 작으면 동기화 신호 수신 가능성이 높아지기 때문에 오 경보 확률이 높아지는 반면 탐지 실패 확률은 낮아지게 된다. 하지만 r_{th}이 클 때에는 오 경보 확률이 낮아지고 탐지 실패 확률은 높아진다. 따라서 네트워크 환경에 알맞게 r_{th} 값을 설정해 주어야 한다. 실제로 오 경보와 탐지 실패는 반딧불 동기화 기술 성능에 치명적인 영향을 주기 때문에 r_{th}의 정확한 설정은 매우 중요하다 할 수 있고, 이에 대한 최적 설계는 다음 장에서 제시된다.

Ⅳ. 최적 결합함수 및 검파 임계값 설계

반딧불 동기화 기술의 성능은 Ⅲ장에서 설명한 핵심 변수인 결합함수 내 변수 α와 β, 그리고 검파 임계값 r_{th}에 따라 결정된다. 본 장에서는 수신기에서 시스템 변수 α, β, r_{th}를 최적으로 설계하는 방안을 제안한다.

패킷 기반 통신 구조에서 반딧불 동기화 기술의 성능 비교를 위한 지표로는 오 경보 확률과 탐지 실패 확률 모두를 고려할 수 있으나, 본 논문에서는 이들 지표의 작용에 의해 동기화 기술의 성능을 결정짓게 되는 네트워크 동기화 수렴 시간을 성능 지표로 삼는다. 즉, 네트워크의 각 노드들의 기준시간에 대한 평균 타이밍 오차의 분산이 특정 레벨 이하로 떨어지는 데까지 소요되는 시간을 성능 지표로 삼게 된다. 동기화 수렴 시간을 정의하기 위해 먼저 샘플링 후 이산 시간 n에서 네트워크에 존재하는 노드들의 기준시간에 대한 평균 타이밍 오차의 분산 $v(n)$을 다음과 같이 정의한다.

$$v(n) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\tau_i(n) - \bar{\tau}(n))^2$$

이 때, $\tau_i(n)$는 노드 i가 가지는 기준시간을 나타내며, $\bar{\tau}(n)$는 $\tau_i(n)$의 평균이다. $\tau_i(n)$는 반딧불 동기 알고리즘에 의해 시간에 따라 변화하게 되므로 $v(n)$와 함께 세 값은 모두 시간 n의 함수가 된다. 네트워크의 입력 변수에는 노드의 수 N과 노드가 데이터를 전송하는 비율을 결정하는 λ가 있다. 이 변수들이 주어질 경우 네트워크가 결정되며, 반딧불 동기 알고리즘이 네트워크 타이밍 동기화를 달성하는 경우 $v(n)$는 시간이 증가할 때 0에 점차 가까워지게 될 것이다. 타이밍 오차의 분산에 대한 임계값을 v_0로 설정하자. 이로부터 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 $v(n)$의 평균 $\bar{v}(n)$를 구하여 $\bar{v}(n) \leq v_0$가 되는 최소 n을 네트워크의 수렴 시간 T_0로 정의한다. v_0는 네트워크 구조 변수에 따라 적절하게 설정될 수 있다. 이제 우리가 풀어야 할 문제는 주어진 N, λ에 대해 T_0를 최소로 만드는 α, β, r_{th}를 결정하는 것으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\min_{\alpha,\beta,r_{th}} T_0(\alpha,\beta,r_{th}) \quad s.t \quad \bar{v}(T_0) \leq v_0 \qquad (3)$$

위의 최적화될 변수들 이외에도 불응기 T_{refr} 값도 최적화될 수 있다. 노드 각각은 초기에 랜덤한 타이밍 편이를 가진다고 가정할 수 있는데, 초기 타이밍 편이가 취할 수 있는 최대 크기에 따라 T_{refr}도 알맞게 설정될 수 있다. 예를 들어, 노드들이 가지는 초기 타이밍 편이가 작은 경우 단말의 동기화 신호 전송이 불응기 안에 존재할 가능성이 커서 알고리즘이 빠르게 종료될 것이다. 반면, 초기 타이밍 편이가 클 경우 T_{refr}이 작으면 알고리즘이 수렴하는 데까지 오랜 시간이 소요되고 T_{refr}이 크면 빠른 수렴을 보장하지만 결과적인 타이밍 오차의 분산은 보다 증가할 수 있다. 본 연구에서는 편의상 식 (1)에서와 같이 전파 지연 시간의 최소 두 배 이상으로 충분히 크게 설정하여 초기 타이밍 편이 값에 상관없이 빠른 수렴을 보장하는 쪽에 초점을 맞추었다. 따라서 본 논문에서는 불응기 T_{refr} 값의 최적화는 수행하지 않는다.

V. 모의실험 결과

모의실험 결과에 사용된 시뮬레이션 변수들은 표 1에서 정리된다.

표 1. 모의실험 변수
Table. 1 Simulation parameters

변수	값
L	1 km
P	23 dBm
경로손실	$128.1+37.6\log_{10}(d(km))$
T_P	5 ms
T_S	100 us
β	0.02

본 시뮬레이션에서는 논문 [15]와 마찬가지로 결합함수 내 변수 중 하나인 β를 0.02로 고정하였다. 그 이유는 모의실험을 수행해본 결과 다른 두 변수 α, r_{th}에 비해 β의 경우 값을 변화시켜도 성능에 끼치는 영향이 크지 않기 때문이다. 실제로 수치적으로 최적화 알고리즘을 수행하기 위해서는 3차원을 사용해야 해서 복잡도가 매우 높게 되기에, 변수 하나를 무시하여 성능 저하를 거의 일으키지 않고 계산 복잡도를 낮추면서 최적화 수행이 가능하게 된다. 따라서 우리가 풀어야 할 문제는 T_0를 최소로 만드는 변수 α와 r_{th}를 결정하는 것으로 줄어들게 되고, 식 (3)은 아래와 같이 다시 쓰여 지게 된다.

$$\min_{\alpha, r_{th}} \; T_0(\alpha, r_{th}) \quad s.t \quad \bar{v}(T_0) \le v_0$$

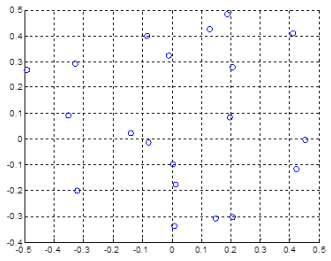

그림 3. N=20일 때의 네트워크 위상
Fig. 3 Network topology for N=20

그림 3은 $N=20$일 때 노드들의 분포를 나타낸 네트워크 위상이다. 주어진 노드 분포 하에서, 매 프레임 발생에 따른 평균 타이밍 오차의 분산 $\bar{v}(n)$ 및 모든 노드들의 기준시간 $\tau_i(n)$를 도시하도록 한다. 여기에서 각 노드 별 초기 타이밍 편이는 독립적으로 $[1, T_p f_s]$ 내 윈도우에서 균일한 확률을 가지고 발생된다고 가정한다. 이 때, T_p는 한 프레임 구간에 대한 시간 단위이며 f_s는 샘플링 율을 나타낸다. 즉, $T_p f_s$는 한 프레임 내에 존재하는 OFDMA 샘플 수를 나타낸다.

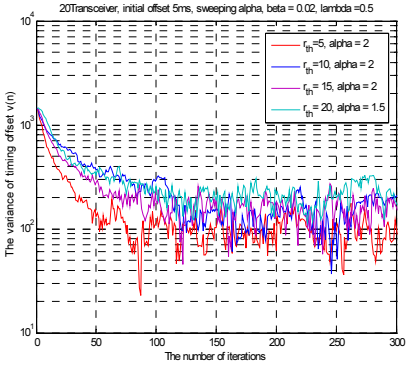

그림 4. 프레임 발생 수에 따른 타이밍 오차 분산 $\bar{v}(n)$
Fig. 4 The variance $\bar{v}(n)$ of timing offset according to the number of frame generations

그림 4는 $N=20$, $\lambda=0.5$, $T_p=5$ ms인 경우 다양한 α와 r_{th} 값을 가정할 때 프레임 발생 수에 따른 분산 $\bar{v}(n)$을 보여준다. 프레임 발생 수가 증가할수록 타이밍 오차의 분산이 감소하는 양상을 나타낸다. 뿐만 아니라 α에 따라 분산 값의 수렴 양상이 꽤 다름을 알 수 있고, 본 그림에서는 $\alpha=2$, $r_{th}=5$일 때 궁극적으로 최소의 분산을 보임을 확인할 수 있다. 예를 들어 알고리즘 멈춤 기준 (stopping criterion)과 관련된 분산 임계점을 $v_0=50$으로 가정하면 $n \ge 80$일 때 $\bar{v}(n)$은 식 (3)을 보장하므로 본 반딧불 동기 알고리즘은 수렴하는 것으로 간주될 수 있고 네트워크 타이밍 동기화가 이루어졌다고 할 수 있다.

그림 5는 동일한 시스템 변수($N=20$, $\lambda=0.5$, $T_p=5$ ms) 하에서 $r_{th}=5$, $\alpha=2$인 경우 프레임 발생 수에 따른 노드들의 기준시간 $\tau_i(n)$을 보여준다.

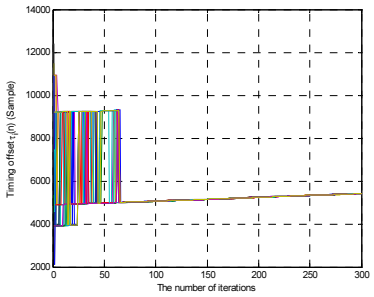

그림 5. 프레임 발생 수에 따른 노드들의 기준시간 $\tau_i(n)$
Fig. 5 The reference time $\tau_i(n)$ of nodes according to the number of frame generations

표 2. 최적의 반딧불 동기 알고리즘 변수
Table. 2 The optimal parameters for the firefly synchronization algorithm

네트워크 변수		최적 값	
N	λ	α	r_{th}
20	0.1	5	10
20	0.5	2	5
20	1	2	5
100	0.1	2	15
100	0.5	1.5	10
100	1	1.5	10

그림 5는 평균적인 값이 아닌 순간적인 값을 도시한 것으로 매번 모의실험 수행 시 다른 결과가 나타날 수 있겠으나, 전반적으로 유사한 수렴 양상을 보이게 된다. 예상 가능하듯이 프레임 발생 수가 증가하여 횟수가 70번이 넘어가면 노드들 간 기준시간이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

그림 4와 5에서 얻을 결과를 최적화되어야 할 시스템 변수 α (결합함수 내 변수)와 r_{th} (검파 임계값)에 대한 더 다양한 값들로 확장시킴으로써 표 2를 얻을 수 있다. 표2 에는 주어진 $N\,(N=20,100)$ 과 λ ($\lambda=0.1,0.5,1$)에 대해 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 수치적으로 구해진 최적의 α 및 r_{th} 값이 정리되어 있다. $\alpha>1$와 $r_{th}>0$에 대한 2차원 검색을 수행해야 하는데, 수신기 신호처리 측면에서 계산 복잡도를 줄이기 위해 값 변화가 성능에 영향을 많이 미치는 구간에 대해서는 조밀하게 샘플링을 한 반면 변수 값 변화가 성능에 영향을 크게 미치지 않는 구간에 대해서는 성긴 샘플링을 하였다. 구체적으로, $1<\alpha<2$에서는 조밀한 샘플링을, $\alpha\geq 2$에서는 정수 단위의 샘플링을 수행하였다 (즉, $\alpha=[1.0001,1.001,1.01,1.1,2,3,\cdots]$). r_{th}는 5의 배수로 샘플링을 하였다 (즉, $\alpha=[5,10,\cdots]$). 결론적으로 수신기에서는 동기화 알고리즘 동작 이전에 네트워크 환경에 따라 위에서 구한 최적 값을 설정해 줌으로써 수렴 성능을 월등히 개선할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 패킷 기반 통신을 하는 네트워크에서 반딧불 동기 알고리즘을 적용한 분산 타이밍 동기 기술을 재조명하였다. 컴퓨터 모의실험을 통해 수치적으로 주어진 네트워크 환경에 대해 최적의 결합함수 및 검파 임계값을 설계하는 방안을 제시하였다. 시스템 설계자에 의해 오프라인에서 결정되는 최적의 동기 알고리즘 변수를 사용하여 수렴 성능이 월등히 개선되었음을 확인하였다.

참고문헌

[1] 3GPP Radio Access Networks LTE-Advanced Status Release 11 Work Items “11. Study on LTE Device to Device Discovery and Communication,” LTE Asia, 6th Sep. 2011.

[2] J. Lehtom¨aki, I. Suliman, J. Vartiainen, M. Bennis, A. Taparugssanagorn, and K. Umebayashi, “Direct communication between terminals in infrastructure based networks,” in *Proc. ICT Mobile and Wireless Commun. Summit,* Stockholm, Sweden, 2008.

[3] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanium, and E. Cayirci, “A survey on sensor networks”, *IEEE Commun. Mag.,* vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Aug. 2002

[4] B. M. Sadler, ”Fundamentals of energy-constrained sensor network systems,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.,* vol. 20, no. 8, pp. 17-35, Aug. 2005.

[5] J. N. Lanemann and G.W. Wornell, "Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory,* vol. 49, no. 10, pp. 2415-2425, Oct. 2003.

[6] S. Ganeriwal, R. Kumar, S. Adlakha, and M. B. Srivastava, "Network-wide time synchronization in sensor networks," *UCLA NESL Tech. Rep.,* Jan. 2003.

[7] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts,"" presented at *5th Symp. Operating Syst. Design, Implement. (OSDI),* Boston, MA, Dec. 2002.

[8] K. Römer, "Time synchronization in ad hoc networks," in *Proc. 2nd ACM Int. Symp. Mobile Ad Hoc Netw. Comput (MoBiHoc),* Long Beach, CA, Oct. 2001, pp. 173-182.

[9] R. Mirollo and S. Strogatz, "Synchronization of Pulse-Coupled Biological Oscillators," *SIAM J. Applied Math.,* vol. 50, no. 6, pp. 1645-1662, Dec. 1990.

[10] R. Mathar and J. Mattfeldt, "Pulse-Coupled Decentral Synchronization," *SIAM J. on Applied Math.,* vol. 56, no. 4, pp. 1094-1106, Aug. 1996.

[11] Y.-W. Hong and A. Scaglione, "A Scalable Synchronization Protocol for Large Scale Sensor Networks and Its Applications," *IEEE J. Selected Areas Comm.,* vol. 23, no. 5, pp. 1085-1099, May 2005.

[12] D. Lucarelli and I.-J. Wang, "Decentralized Synchronization Protocols with Nearest Neighbor Communication," in *Proc. ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys),* Baltimore, ML, Nov. 2004.

[13] A. Tyrrell, G. Auer, and C. Bettstetter, "Fireflies as Role Models for Synchronization in Wireless Networks," in *Proc. Int. Conf. Bio Inspired Models of Netw., Inf. and Computing Systems (BIONETICS),* Cavalese, Italy, Dec. 2006, pp. 1-7.

[14] A. Tyrrell, G. Auer, and C. Bettstetter, "Emergent Slot Synchronization in Wireless Networks" *IEEE Trans. Mob. Comput.,* vol. 9, no. 5, pp. 719-732, May 2010.

[15] L. Sanguinetti., A. Tyrrell, M. Morelli., and G. Auer, "On the Performance of Biologically-Inspired Slot Synchronization in Multicarrier Ad Hoc Networks," in *Proc. Veh. Tech. Conf. (VTC)-Spring,* Marina Bay, Singapore, May 2008, pp. 21-25.

저자소개

이효석(Hyo Seok Yi)

1997년 2월 KAIST 물리학과 학사
1999년 2월 KAIST 물리학과 석사
2004년 8월 KAIST 물리학과 박사
2004년 8월 ~ 2007년 12월 ETRI 선임연구원
2008년 1월~현재 Harvard University Postdoctoral Fellow
※관심분야 : 정보이론, 통신이론, 환경친화적 통신

김성진(Seongjin Kim)

2008년 2월 연세대학교 전기및전자공학부 학사
2010년 2월 KAIST 전기및전자공학부 석사
현재 KAIST 전기및전자공학부 박사과정 재학
※관심분야 : 통신이론, 신호처리, 통신 시스템 설계

권동승(Dong-Seung Kwon)

1985년 2월 연세대학교 전자공학과 학사
1987년 2월 연세대학교 전자공학과 석사
2004년 2월 연세대학교 전자공학과 박사
1988년~현재 한국전자통신연구원
통신인터넷연구부문 모바일컨버전스연구부장
※관심분야 : 이동통신 시스템 및 무선전송기술

장성철(Sung-Cheol Chang)

1992년 2월 경북대 전자공학과 학사
1994년 2월 KAIST 전기및전자 공학과 석사
1999년 8월 KAIST 전기및전자 공학과 박사

1999년 7월~현재 한국전자통신연구원 근무
※관심분야 : 이동통신 무선접속 프로토콜 등

김형진(Hyung-Jin Kim)

1999년 2월 전남대학교 컴퓨터공학과 학사
2001년 2월 전남대학교 컴퓨터공학과 석사

2000년 12월~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
※관심분야 : 이동통신 시스템 및 무선전송기술

신원용(Won-Yong Shin)

2002년 2월 연세대학교 기계전자공학부 학사
2004년 2월 KAIST 전자전산학과 석사

2008년 8월 KAIST 전자전산학과 박사
2008년 2월~4월 Harvard University Visiting Scholar
2008년 9월~2009년 2월 KAIST 정보전자연구소 박사후연구원
2009년 3월~4월 KAIST 고성능집적시스템연구센터 선임급 위촉연구원
2008년 8월~2009년 4월 (주)루미콤 방문연구원
2009년 5월~2011년 10월 Harvard University Postdoctoral Fellow
2011년 10월~2012년 2월 Harvard University Research Associate
2012년 3월~현재 단국대학교 국제학부 모바일시스템 공학전공 조교수
※관심분야 : 정보이론, 통신이론, 신호처리, 다양한 다중사용자 네트워킹 이슈로의 응용