http://dx.doi.org/10.7840/kics.2014.39A.8.488

생체모방 기법을 활용한 OFDMA기반 무선 메쉬 네트워크의 분산 시간 및 주파수 동기화 알고리듬의 수렴성 분석

김 미 정◆, 최 주 영* 조 용 수°

Convergence Analysis of Distributed Time and Frequency Synchronization Algorithm for OFDMA-Based Wireless Mesh Networks Using Bio-Inspired Technique

Mi-Jeong Kim◆, Joo-Hyung Choi* Young-Soo Cho°

요 약

본 논문은 OFDMA 기반 무선 메쉬 네트워크에서 플로킹 기법을 활용한 분산 시간 및 주파수 동기화 알고리듬을 다룬다. 채널전송 지연의 영향을 고려하지 않는 기존 플로킹 기법과 달리, 본 논문에서는 실제 무선 메쉬 네트워크 환경을 고려하기 위하여 시간 및 주파수 동기를 맞추기 위한 동기화 파라미터를 설정하고, 제안된 시간 및 주파수 동기화 모델의 수렴조건과 동기화 파라미터 설정범위를 분석 도출한다. 그리고 모의실험을 통하여 동기화 파라미터에 설정에 따른 제안된 기법의 시간 및 주파수 동기화의 수렴성능을 검증한다.

Key Words : synchronization, bio-inspired algorithm, flocking, OFDMA, wireless mesh network

ABSTRACT

This paper deals with distributed time and frequency synchronization algorithms using the flocking technique for OFDMA-based wireless mesh networks. We propose a time and frequency synchronization model taking into account channel propagation delays existing in wireless mesh networks, and analyze the convergence condition of the proposed synchronization algorithm. Convergence performance of the proposed synchronization algorithm is analyzed via computer simulation in terms of synchronization parameters in the time and frequency synchronization model.

Ⅰ. 서 론

무선 메쉬 네트워크는 기존 무선 네트워크에 비해 저렴한 비용으로 빠르게 구축가능하며, 동일 네트워크는 물론 이종 네트워크 간 통합이 자유로워 차세대 네트워크 기술로 부각되고 있다. 일반적으로 높은 이동성과 고속의 데이터 전송률을 요구하는 차세대 분산 무선 메쉬 네트워크에서는 많은 통신부하와 자원낭비를 가져오는 기존의 중앙집중식 통신 알고리즘을 그대로 적용하기가 쉽지 않다. 이에 최근에는 한정된 통신자원의 제약을 극복하고, 다수 노드의 이동성으로 인한 네트워크의 잦은 변화에 대처하기 위하여 생체모방 기법을 적용한 자율 네트워크에 관한 연구들이 활발히 진행 중이다[1]. 생체모방 기법은 자연생태계를 구성하는 생물체들의 행동원리를 수학적으로 모델링한 것으로 그동안 대부분의 연구가 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 기술적 모델링에 집중되어왔으나, F. Cucker와 S. Smale은 논문 [2]를 통해 플로킹(Flocking) 알고리듬에 대한 수학적 모델을 제시하고 그에 대한 수렴조건을 증명하였다. 그러나 기존의 플로킹 알고리듬은 개체간 지연채널을 고려하지 않아, 실제 통신환경에 해당 알고리듬을 그대로 활용하기 어렵다. 이에 본 논문에서는 GPS와 같은 기준시간 정보가 존재하지 않는 환경에서 채널지연이 존재하는 무선 채널에 적합한 분산 메쉬 통신 시스템 동기화 모델을 제안하고, 제안된 동기화 기법의 성능을 분석한다.

Ⅱ. 생체모방 동기화 기법 및 수렴성능 분석

2.1 생체모방 시간 및 주파수 동기화 기법

플로킹 알고리듬에 사용되는 Cucker-Smale 모델의

※ 본 연구는 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업 (NIPA-2014-H0301-14-1015) 과 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었습니다.
◆ First Author : Chung-Ang University, Electronical and Electronics Engineering, kimmj@cau.ac.kr, 정회원
° Corresponding Author : Chung-Ang University, Electronical and Electronics Engineering, yscho@cau.ac.kr, 종신회원
* Chung-Ang University, Electronical and Electronics Engineering, wngud5003@nate.com, 학생회원
논문번호 : KICS2014-03-080, Received March 10, 2014; Revised April 18, 2014; Accepted July 16, 2014

수학적 모델은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}x_i = v_i, \qquad t>0,\ i=1,\cdots,N \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt}v_i = \frac{\lambda}{N}\sum_{j=1}^{N}\psi(|x_j-x_i|)(v_j-v_i) \tag{2}$$

여기서, x_i와 v_i는 개체 i의 위치와 속도를, N은 개체의 개수를 나타낸다. λ는 개체들간 결합력의 세기를 나타내며, $\psi(\bullet)$는 개체들의 통신 가능한 범위를 나타내는 함수이다. 수식 (1)과 (2)로부터, 각 개체는 자신의 속도와 이웃 개체의 속도차이 평균에 가중치를 부여함으로써 자신의 속도와 위치를 제어하며, 일정시간이 지난 후에는 임의의 값으로 수렴한다는 것을 알 수 있다. 이에 본 논문에서는 Cucker-Smale 모델의 개체 i를 무선 메쉬 네트워크의 i번째 단말로, 개체 속도 v_i를 네트워크내 단말이 동일하게 가져야 하는 시간 동기정보(t_i) 또는 주파수 동기정보(f_i)로 대응시킨다. 단, 본 논문에서는 지연채널 영향을 고려하기 위해 C-S 플로킹 알고리듬에 동기화 파라미터를 설정하였으며, 시간 및 주파수 동기화 모델은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} t_i(n+1) \\ f_i(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}\ c_{12} \\ c_{21}\ c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_i(n) \\ f_i(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_{11}\ \mu_{12} \\ \mu_{21}\ \mu_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \triangle t_i(n) \\ \triangle f_i(n) \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서, $t_i(n)$와 $f_i(n)$는 i번째 단말의 전송시간 및 주파수 동기정보를 나타낸다. $\triangle t_i(n)$과 $\triangle f_i(n)$은 다음 전송시간 및 주파수 업데이트를 위해 사용되는 동기정보를 나타내며, 다음과 같이 주어진다.

$$\triangle t_i = \frac{1}{N_i}\sum_{j=1}^{N_i}(t_{j\to i}(n)-t_i(n)) \tag{4}$$

$$\triangle f_i(n) = \frac{1}{N_i}\sum_{j=1}^{N_i}(f_j-f_i) \tag{5}$$

여기서, $t_{j\to i}(n)$는 j번째 단말의 정보가 i번째 단말에 도착한 시간정보를 의미하며, 이는 단말간에 존재하는 채널 전송지연(τ_{ij})의 영향을 받는다.

$$t_{j\to i}(n) = t_j(n)+\tau_{ij} \tag{6}$$

그리고 $c_{i,j}$, $\mu_{i,j}$는 각각 시간 및 주파수 동기정보 갱신을 위해 사용되는 동기화 파라미터이다. 본 논문에서는 시간동기와 주파수 동기간에는 커플링이 존재하지 않는다고($c_{12}=c_{21}=0$, $\mu_{12}=\mu_{21}=0$) 가정한다. 각 단말은 이웃 단말로부터 주기적으로 수신된 제어정보를 기반으로 시간 및 주파수 동기 정보 $t_{j\to i}(n)$과 $f_j(n)$을 획득하고, 시간 및 주파수 동기 수렴조건을 만족할 때까지 수식 (3)의 동기정보 갱신과정을 반복적으로 수행한다. 이때 채널전송 지연의 영향을 제거하면서 시간 및 주파수 동기를 맞추기 위해서는 동기화 파라미터 $c_{i,j}$, $\mu_{i,j}$의 값이 적정하게 설정되어야 한다.

2.2 동기화 파라미터 설정 범위 및 수렴성능 분석

일반적으로 OFDMA 시스템에서는 다중 단말로부터 전송된 신호들이 CP(Cyclic Prefix)구간 이내에 수신될 경우에는 등화기를 통해 데이터 손실없이 수신이 가능한 반면, 주파수 동기오차는 미미한 소수배 오차에도 전체 시스템 성능 열화를 가져온다. 따라서 제안된 기법의 시간 동기 수렴조건은 네트워크내 각 단말로부터 수신된 모든 시간동기 오차가 CP구간 이내로 들어오는 것으로, 주파수 동기 수렴조건은 네트워크의 모든 단만간 주파수 동기오차가 허용오차 이내로 들어오는 것으로 정의한다.

본 절에서는 시간 및 주파수 동기화를 위한 파라미터 $c_{i,j}$, $\mu_{i,j}$의 설정범위를 도출하기 위해, 먼저 수식 (3)에서 제안된 동기화 모델을 분석한다. 여기서는 수식의 편의상 동기화 파라미터의 아래 첨자를 삭제한다. 인접 단말로부터 수신된 시간 및 주파수 동기정보를 입력으로, 새로 갱신된 자신의 시간 및 주파수 동기정보를 출력으로 가지는 시스템으로 간주할 경우에 해당 시스템의 z-transform $H(z)$은 다음과 같이 주어진다.

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\mu}{z-c+\mu} \tag{7}$$

여기서 $H(z)$는 $c-\mu$에서 real pole을 가지기 때문에 제안된 동기화 알고리듬이 수렴하기 위해서는 real pole 값이 z평면의 단위원 내부에 존재해야 한다. 따라서 제안된 생체모방 동기화 모델이 수렴을 하기 위해서는 동기화 파라미터 설정범위를 다음과 같이 설정해야 한다.

$$-1<c-\mu<1 \tag{8}$$

그러나 위 수식 (8)은 플로킹 모델과 같이 전송시간 지연이 존재하지 않는 것을 전제하고 있어 시간 동기화 관점에서는 실제 통신환경에 위배되는 측면이 존재한다. 채널전송 지연의 영향을 받지 않는 주파수 동기화의 경우, 수식 (8)에서 제시된 범위를 만족하는 c와 μ를 설정하는 것만으로도 수렴조건을 만족할 수 있다. 즉, 주파수 동기 알고리듬은 위의 동기화 파라미터 값 설정만으로도 모든 단말들이 일정시간 이후에 초기 단말들이 가지는 주파수 동기정보의 평균값으로 수렴하게 되며, 주파수 동기수렴 정확도는 일반적으로 채널 전송지연의 영향을 받는 시간동기에 비해 우수하다.

그러나 제안된 시간 동기화 알고리듬에서는 수식

(4)와 (6)에 의한 전송지연(τ_{ij})의 영향 $\frac{1}{N_i}\sum_{j=1}^{N_i}\tau_{ij}$을 제거하기 위해 다음과 같은 범위 내에서 동기화 파라미터 값을 설정해야 한다.

$$-1 < c-\mu < 1, \quad \mu < 0 \tag{9}$$

다만, 동기화 파라미터 c, μ 값이 수식 (9)에서 제시된 설정범위를 만족할 경우, 모든 노드의 시간 동기화 결과가 수렴되나 채널 전송 지연에 의한 동기수렴 오차가 존재할 수 있다. 제안된 시간 동기화 알고리듬의 동기수렴 오차 범위는 채널링크들의 최대-최소 채널 전송지연 차이값에 의해 영향을 받으며, 시간 동기수렴 정확도 $E(i)$는 다음과 같다.

$$E(i) \le \left| \max_{i,j}\{\tau_{ij}\} - \min_{i,j}\{\tau_{ij}\} \right| \tag{10}$$

Ⅲ. 모의실험

모의실험에 사용된 시스템 파라미터 값은 모바일 와이맥스(WiMax) 표준을 따른다. 모의실험에 사용된 FFT/IFFT 크기는 2048, CP 구간은 512이다. 네트워크내 각 단말은 서로 다른 시간동기 및 채널 전송지연을 가지고 있으며, 이웃 단말로부터의 신호검출 및 주파수 동기정보를 완벽히 획득함을 가정한다. 네트워크내 단말의 위치는 통신반경 10km 이내에서 랜덤 추출하였으며, 단말위치에 따른 채널지연은 참고문헌 [3]에 제시된 RMa LOS 채널모델을 따른다. 샘플주기 T_s는 0.129us/sample이며, 모든 단말은 1-hop으로 연결되어 있음을 가정한다.

그림 1과 그림 2는 각각 3개의 단말로 구성된 무선 메쉬 네트워크 환경에서 제안된 시간 및 주파수 동기 알고리듬의 수렴곡선 성능을 나타낸다. 그림 1에서 모의실험에 사용된 동기화 파라미터 c, μ가 수식 (9)의

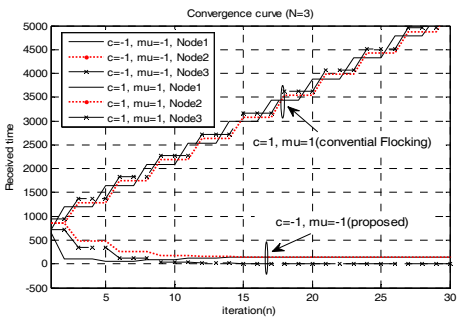

그림 1. 제안된 시간동기 알고리듬의 수렴 성능
Fig. 1. The performance of the proposed time synchronization algorithm

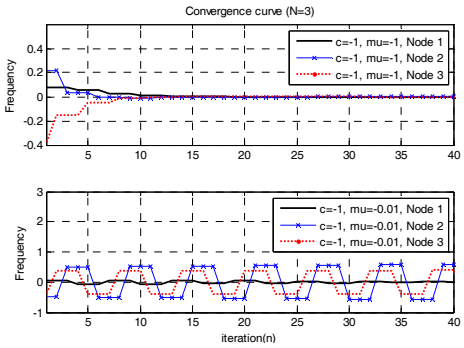

그림 2. 제안된 주파수동기 알고리듬의 수렴 성능
Fig. 2. The performance of the proposed frequency synchronization algorithm

동기화 파라미터 설정범위 조건을 만족($c=-1, \mu=-1$)하는 경우, 모든 단말간 시간 동기오차는 수렴범위 이내로 들어오며, 수렴동기 정확도는 노드간 채널 전송지연 이내로 발생한다. 반면 파라미터가 설정범위를 벗어나는 경우에는 단말들의 수렴곡선이 발산되는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 2로부터, 주파수 동기는 수식 (8)의 조건을 만족하는 경우에는 모든 단말들이 빠르고 정확하게 수렴하나, 수렴조건을 벗어나는 경우에는 발산함을 알 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 분산 OFDMA 무선 메쉬 네트워크에 적합하도록 시간 및 주파수 동기화 파라미터를 설정한 플로킹 모델을 제안하였다. 제안된 동기 알고리듬이 수렴을 하기 위해서는 동기화 파라미터 c, μ 값이 동기화 파라미터 설정범위 이내로 정해져야 하며, 이 설정 값의 수렴 조건 만족 여부에 따라 시간 및 주파수 동기 수렴 특성이 결정됨을 모의실험을 통해 확인하였다.

References

[1] J. Y. Jeong and J. R. Lee, "Bio-inspired networking technology," *Inf. Commun. Mag.*, vol. 31, no. 1, pp. 53-62, 2014.

[2] Cucker and S. Smale, "Emergent behavior in flocks," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 52, no. 5, pp. 852-862, May 2007.

[3] Recommendation ITU-R M.1225, Guide Lines for the Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000, 1997.