

# 다중 홉 네트워크를 위한 디지털 및 아날로그 협동 전송 시간 동기화 프로토콜

조 성 환<sup>°</sup>, Mary Ann Ingram<sup>\*</sup>

## Cooperative Analog and Digital (CANDI) Time Synchronization for Large Multihop Network

Sung-hwan Cho<sup>°</sup>, Mary Ann Ingram<sup>\*</sup>

### 요 약

멀티홉 네트워크에서 TPSN, RBS, FTSP와 같은 기존의 시간 동기화(TS : Time Synchronization) 방법들은 네트워크의 홉수가 증가 할 경우 TS 오류 또한 증가하게 된다는 단점을 가지고 있다. 이는 멀티홉 네트워크를 통해 구현되는 passive multistatic 레이더 시스템 및 무선 센서 네트워크 노드들 간의 시간 동기화 오류를 증가시켜 시스템 정확도를 저하시키는 중요한 원인이 된다. 따라서 이 논문에서는 동시 협동 전송(CCT : Concurrent Cooperative Transmission)과 반협동 스펙트럼 융합 전송(SCSF : Semi-Cooperative Spectrum Fusion)의 두 종류의 CT (Cooperative Transmission)을 이용한 시간 동기화 방법을 제안하고자 한다. CT를 이용하면 시간 정보가 전달 되는 데에 필요한 홉수를 줄여 결과적으로 TS 오류를 줄일 수 있다는 장점을 가지게 된다. CCT는 협동하고 있는 노드들이 디지털하게 인코딩된 동일한 메시지를 각각의 직교한(orthogonal) 채널을 통해서 동시에 전송하면, 수신 노드는 이를 수신하여 통합하여 디코딩함으로써 diversity gain을 얻는 전송방식이다. 반면 SCSF는 각각의 노드들이 상관성 있는 아날로그 데이터를 스펙트럼에 실어 동시에 전송하는 방식이다. 이 논문에서는 이 두 가지의 전송 방식을 융합한 아날로그 및 디지털 협동 전송 시간 동기화 프로토콜, 즉 CANDI 프로토콜을 제안하고, 이 프로토콜이 멀티홉 네트워크에서 기존의 시간 동기화 방식인 TPSN과 비교하여 상당히 큰 격차로 시간 오류를 줄이는 것을 시뮬레이션을 통해서 증명하고자 한다.

**Key words** : CANDI, Time Synchronization, CCT, SCSF, OLA

### ABSTRACT

For large multihop networks, large time synchronization (TS) errors can accumulate with conventional methods, such as TPSN, RBS, and FTSP, since they need a large number of hops to cover the network. In this paper, a method combining Concurrent Cooperative Transmission (CCT) and Semi-Cooperative Spectrum Fusion (SCSF) is proposed to reduce the number of hops to cover the large network. In CCT, cooperating nodes transmit the same digitally encoded message in orthogonal channels simultaneously, so receivers can benefit from array and diversity gains. SCSF is an analog cooperative transmission method where different cooperators transmit correlated information simultaneously. The two methods are combined to create a new distributed method of network TS, called the Cooperative Analog and Digital (CANDI) TS protocol, which promises significantly lower network TS errors in multi-hop networks. CANDI and TPSN are compared in simulation for a line network.

<sup>°</sup> 주저자 겸 교신저자 : 육군사관학교 전자정보학과 전자정보연구실, scho@kma.ac.kr, 정회원

<sup>\*</sup> Georgia Institute of Technology, Electrical and Computer Engineering, mai@gatech.edu

논문번호 : KICS2012-08-401, 접수일자 : 2012년 8월 31일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 9일

## I. 서 론

무선 센서 네트워크(WSN, Wireless Sensor Network)을 사용하고 있는 수많은 어플리케이션(application)들은 네트워크를 구성하고 있는 노드들 간의 시간 동기화(Time Synchronization, TS)를 필요로 한다. 각 센서 노드들이 수집한 데이터에 적절하게 시간을 기록하고, 그 데이터를 나중에 중앙 처리 장치에서 처리하게 할 수 있기 때문이다. 그 중에서도 몇몇의 어플리케이션들은 아주 큰 네트워크 영역을 포함하고 있는데, object tracking<sup>[1]</sup>과 global structural health monitoring<sup>[2]</sup> 등을 예로 들 수 있다. 또한 최근 군사 분야에서 주목되고 있는 passive multistatic 레이더<sup>[3]</sup>는 대스텔스(anti-stealth) 체계로서 주목을 받고 있는데, 이 때 레이더의 송신기와 수신기 사이의 TS가 레이더의 정밀도를 결정하는 중요한 요소이다.

넓은 범위를 포함하고 있는 WSNs는 커다란 멀티홉(multihop) 네트워크를 구성함으로써 네트워크 구성비용을 줄일 수 있다. 이 같은 멀티홉 네트워크를 동기화하는데 있어서, 각 노드들에 GPS를 설치하여 TS를 손쉽게 할 수 있지만 GPS 신호가 실내 및 수중을 비롯한 몇몇의 지역까지 도달하지 않고, 또한 전력을 많이 소비한다는 점에서 모든 노드에 GPS 장착하는 것은 비효율적이라 할 수 있다. 또한 군사적인 상황에서 적의 GPS 방해 능력에 대비하여 아군 무기체계들의 유사시에 GPS를 대신할 수 있는 TS 능력 보유를 필요로 하고 있다는 점에서 새로운 TS 방법의 개발이 요구되고 있다.

따라서 이 논문에서는 노드들이 두 번의 각기 다른 종류의 cooperative transmission (CT)<sup>[4]</sup>을 이용하여 절대 시간(absolute time)을 전파(broadcast)하는 새로운 접근방식을 제안하고자 한다.

일반적인 TS 방법에는 Reference Broadcast Synchronization (RBS)<sup>[5]</sup>, Timing-sync Protocol for Sensor Networks (TPSN)<sup>[6]</sup>, 그리고 the Flooding Tims Synchronization Protocol(FTSP)<sup>[7]</sup> 등이 있다. 이들 중 어느 방법도 CT를 사용하지 않기 때문에 다중 멀티홉 네트워크에서는 홉수가 늘어날수록 시간 오류의 분포가 커지게 된다.

최근에 발표된 [8]에서는 4~5개의 노드로 이루어진 클러스터들로 구성된 line network에 대해 꽤 높은 정확도로 클러스터내의 노드들 간의 TS를 실현할 수 있음을 실험을 통하여 증명하였다. 이것으로부터 우리는 두 개의 스테이지에서 각각 다른 종

류의 CT를 이용하여 클러스터내의 노드들간의 동기화가 아닌 네트워크 전역에 걸친 노드들간의 동기화 방법을 고안하였다. 첫 번째 스테이지에서는 concurrent cooperative transmission (CCT)<sup>[9,10]</sup>를 이용하였는데, CCT란 협동하고 있는 노드들이 동시에 그리고 동일한 디지털 메시지를 직교한(orthogonal) 채널<sup>1)</sup>에 전송하는 방식을 말한다. 수신노드들은 각각의 서로 다르게 페이드된 신호들을 받아 통합하는 과정을 거쳐 수신 신호를 복조하게 되는데, 이 때 diversity gain을 통하여 상당히 높은 SNR 이득을 얻게 된다. 두 번째 스테이지에서는 협동하고 있는 노드들이 각각의 시간 정보(제한된 프로토콜에서는 전파 시간)에 대한 예상값을 스펙트럼에 실어 보내게 된다. 이 신호들은 서로 중첩되어 수신자에게 전송되고, 이를 수신한 노드들은 수신된 신호의 스펙트럼의 평균값을 구함으로써 송신자들이 보낸 값들의 평균값을 수신할 수 있다.

firefly 혹은 pulse-coupled oscillator (PCO) 방식이라고 불리는 TS 방식은<sup>[11,12]</sup> 노드들이 그룹을 이루어 전송한다는 점, 그리고 노드 밀집도가 높은 다중 멀티홉 네트워크에 적용이 가능하다는 점에서 우리의 방법과 비슷하다고 할 수 있다. 하지만 firefly 방법에서는 TS의 과정이 CT의 range extention에 의존하지 않는다는 점에서 핵심적인 차이점이 존재한다. firefly에서 각 노드는 시간에 따라 선형적으로 증가하는 phase function을 가지고 있는데, phase function의 값은 시간의 흐름에 따라 증가함과 동시에 다른 노드로부터 발산된 펄스를 수신하게 되면 일정량만큼 증가하게 된다. 이 때 phase function의 값이 펄스 발생 한계에 도달하게 되면 노드는 non-CT의 방법으로 펄스를 발산한 뒤 phase function의 값을 다시 0으로 설정한다. 멀티홉을 통해 서로 연결되어 있는 모든 노드들은 적어도 하나의 접속된 노드(neighbor)를 갖기 때문에, 네트워크의 크기에 따라 그 수는 다르지만, 결국엔 몇 번의 펄스 발생 주기 이후에는 각각의 노드들은 동일한 펄스 발생 주기를 가지게 된다. 즉, 모든 노드들이 동일한 펄스 반복 주기를 가지고 있게 되는 것이다. Hong과 Scaglione<sup>[11]</sup>은 첫 번째로 PCO 개념을 WSNs에 적용시켰지만, 노드들이 발생시키는 펄스들은 non-CT와 같이 전혀 중첩되지 않는다고 가정하였다.

1) 각 채널들은 독립적인 multi-path fading을 가지고 있다.

[12]의 저자는 [11]에서 가정된 짧은 펄스 대신에 구현 가능한 길이의 펄스를 사용하였고, 신호의 처리(processing) 및 전파(propagation) 시간까지도 고려하였으며, 반이중 통신을 적용하는 등 [11]보다 firefly 방법을 실제 상황에 맞게 발전시켰다. 그 결과,  $m$  홉만큼 떨어진 두 개의 노드간의 시간 오류는 두 노드사이의 전파 시간정도로 나타났다<sup>[12]</sup>. 하지만 firefly 방식은 한번 네트워크가 동기화가 되더라도 절대시간을 공유하기 위해선 노드간의 디지털 통신이 전 네트워크에 걸쳐 반드시 이루어져야 한다. 아마도 이러한 과정은 두 노드들 간의 전형적인 non-CT의 방법으로 two-way 통신이 이뤄져야 때문에 네트워크에 부담을 초래할 것이다.

따라서 우리가 이 논문에서 제안하고 있는 방법은 CT의 transmit diversity을 이용하였다. 우리의 방법은 CT의 장점인 range extension과 SNR 이득을 통하여 네트워크 전역에 시간 정보를 전송하는데 필요한 홉수를 줄여 시간 오류를 최소화 하는 동시에, MAC 프로토콜을 필요로 하지 않으면서도 충돌이 발생하지 않는 두 번의 CT 전송(sweep)을 통하여 절대시간을 전송할 수 있다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 시스템 모델에 대하여 살펴보고, III장에서는 본 논문에서는 제안하는 TS 프로토콜인 협동 아날로그 및 디지털(Cooperative Analogy and Digital, CANDI) TS 방법을 소개한다. IV장에서는 시뮬레이션 결과를 통하여 기존의 전형적인 방식인 TPSN에 비해서 얼마나 시간 오류를 줄일 수 있는지 살펴본 뒤 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서 고려되는 토폴로지는 그림 1에 주어져 있다.  $R_k^{(j)}$ 는  $j$ 번째 클러스터의  $k$ 번째 노드를 나타내며, 한 클러스터에 존재하는 모든 노드는 같은 장소에 존재(co-located)한다고 가정한다.  $R_k^{(j)}$ 는  $T_{k,q}^{(j)}$ 라고 하는 로컬(local) 시계를 가지고 있으며, 여기서  $q$ 는 단계 번호인데 이는 III장에서 설명하도록 하겠다. TS의 목적은 로컬 시계인  $T_{k,q}^{(j)}$ 를 소스노드의 시간과 같게 만드는 것이기 때문에,  $t$ 를 소스노드의 시계라 하면, 노드  $R_k^{(j)}$ 가  $q$ 단계에서 가지고 있는 시간 오류는  $e_{k,q}^{(j)} = T_{k,q}^{(j)} - t$ 로 정의

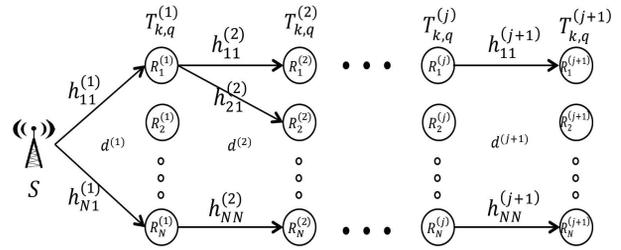


Fig. 1. Multi-hop Distributed Concurrent Cooperative Transmission

될 수 있다.  $j$ 번째 클러스터와  $j-1$ 번째 클러스터는 거리  $d^{(j)}$  [m]만큼 떨어져 있으며,  $d^{(j)}$ 는 전파(propagation) 시간과  $\tau^{(j)} = d^{(j)} / (3 \times 10^8)$ 의 관계에 있다. 그리고  $h_{kr}^{(j)}$ 는  $E\{|h_{kr}^{(j)}|^2\} = 1$ 의 조건을 만족하고 TS 과정 동안에는 값이 일정한  $R_r^{(j-1)}$ 과  $R_k^{(j)}$ 사이의 complex Rayleigh flat faded 채널 이득이라고 가정하였다.

클러스터의 각 노드는 독립적인 diversity channel을 이용하여 패킷을 전송하는데, diversity channel이란 클러스터 안의 노드들이 사용하는 채널들이 서로 orthogonal하다는 것을 의미한다. 그리고 수신자들은 diversity combining<sup>[8]</sup>을 할 수 있다고 가정한다.  $SNR_1$ 은  $R_k^{(1)}$ 가 소스노드로부터 신호를 받을 때의 평균 수신 SNR을 의미하고,  $SNR_j$ 는  $j \geq 2$ 인  $R_k^{(j)}$ 가  $j-1$ 클러스터를 구성하고 있는 임의의 노드에서 신호를 받을 때의 평균 수신 SNR을 의미한다. 따라서  $\alpha$ 를 pathloss exponent

라고 한다면,  $SNR_j = \left(\frac{d^{(1)}}{d^{(j)}}\right)^\alpha SNR_1$ 가 성립한다.

실제 통신환경에서의  $SNR_j$ 은 CCT를 통하여 range extension 되었을 때의 개별 채널에 대한 SNR 값이기 때문에  $SNR_1$ 보다 상당히 낮은 값을 예측할 수 있다.

## III. 협동 아날로그 및 디지털(CANDI) 시간 동기화

본 논문에서 제안하고 있는 CANDI 방법은 크게 두 단계로 나뉜다. 첫 번째는 디지털 단계이며 두 번째는 아날로그 단계이다. 먼저 프로토콜의 개략적인 설명을 제시한 후에 홉 증가에 따른 시간 오류 및 예측 방법에 대한 자세한 수학적 모델을 설명하고자 한다.

그림 2에서는 CANDI 프로토콜을 설명하기 위한 시간 도표를 제시하였다. 이 그림에서 가로축은 시간을 의미하며 세로축은 클러스터 숫자를 의미한다. 여기서  $S$ 는 소스노드를 의미한다. 실선 및 점선 모양의 화살표는 각각 CCT와 SCSF를 이용한 전송을 의미한다. CANDI 프로토콜은 소스노드가 자신의 시간정보( $t$ )를 포함한 TS 패킷을 첫 번째 클러스터에 전송하면서 시작된다. 첫 번째 클러스터의  $R_k^{(1)}$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) 노드들은 이 TS 패킷을 수신하여 그들의 로컬 시계를 패킷안의 포함된 시간정보  $t$ 에 동기화한다. 그 다음에는  $T_{proc}$ 이라는 시간동안 대기한 후 수신한 TS 패킷을 CCT를 이용하여 다음 클러스터에 있는 노드들에게 동시에 전송(broadcast)한다. 여기서  $T_{proc}$ 은 노드들이 동시에 패킷을 전송하게하기 위하여 대기하는 시간으로서, 이미 하드웨어에 따라 정해진 값이기 때문에  $T_{proc} = 0$ 이라고 가정한다. 다음 클러스터의  $R_k^{(2)}$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) 노드들은 첫 번째 클러스터에서 발송된 패킷을 수신하여  $R_k^{(1)}$ 와 같은 방법으로 로컬 시계를 동기화한다. 이러한 방법으로 시간 정보를 담고 있는 패킷은 네트워크 전역에 전파가 된다. 디지털 단계는 opportunistic large array(OLA) broadcast<sup>[13]</sup>와 매우 흡사한 것을 알 수 있다.

첫 번째 클러스터내의  $R_k^{(1)}$  노드들이 TS 패킷을 두 번째 클러스터로 전달할 때 소스노드 또한 그 패킷을 엿들을(overhear) 수 있다. 소스노드는 엿들은 패킷들의 SOP 시간을 center of mass 방법을 이용하여 예측하고, 그 시간을 이용하여 TPSN 프로토콜<sup>[6]</sup>과 유사한 방법으로 전파(propagation) 시간을 예측할 수 있다. 소스노드는 전파 시간의 예측값  $D^{(1)} = \hat{\tau}^{(1)}$ 을 첫 번째 클러스터내의 노드들에게 전송하고, 수신 노드들은 수신한 전파 시간을 그들의 로컬 시계에 더해줌으로써 좀 더 정확하게 동기화를 시켜줄 수 있게 된다.

이와 비슷하게  $j \geq 2$ 인  $j$ 번째 클러스터 내에 위치한 노드들이  $j+1$ 로 전송한 TS 패킷을  $j-1$ 번째 클러스터의 노드들 또한 CCT의 방법을 이용해서 엿들을 수 있고, 이어서 전파 시간  $\tau^{(j)}$ 를 예측할 수 있다. 이 때  $j$ 번째 클러스터의  $k$ 번째 노드가 예측한 전파시간을  $\hat{\tau}_k^{(j)}$ 라고 명시하자.  $\hat{\tau}_k^{(j)}$ 는  $j$ 번째의 같은 클러스터 내라 할지라도

non-deterministic한 시간 오류로 인하여 노드에 따라 값이 상이하기 때문에,  $j$ 번째 클러스터내의 있는 노드들은 CCT를 이용하여 예측값  $\hat{\tau}_k^{(j)}$ 를 다음 클러스터에 전송할 수 없게 된다.

약간씩 상이한 예측값을 전송하기 위해서 두 번째 아날로그 단계에서는 SCSF<sup>[11]</sup> 전송방식을 사용하였다. SCSF에서 다중의 센서노드들은 전송할 스칼라(scalar) 데이터를 주파수 변위 변조, 즉 analog linear frequency modulation을 이용하여 변조한 뒤, 수신자가 보낸 비콘(beacon) 패킷에 응답하여 동시에 전송하게 된다. 노드들이 변조된 신호를 동시에 전송하기 때문에 중첩된 신호들의 스펙트럼은 전송된 스칼라 데이터에 대한 모든 정보를 포함하고 있다. 따라서 수신 노드는 수신된 신호의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)에 대해 center of mass 방법을 취해줌으로써 채널상태에 따라 weighted된 평균값을 예측할 수 있다.

CANDI의 두 번째 단계인 아날로그 단계에서는 노드들이 계산한 전파 시간에 대한 예측값을 다음 클러스터에 전송하기 위하여 SCSF 전송 방식을 사용한다. 노드에 따라 non-deterministic 시간 오류로 인해서 예측값이 약간씩 상이하기 때문에 예측값들의 평균을 전달해 줄 수 있는 SCSF 전송 방식은 적절하다고 할 수 있다.

SCSF 전송방식은 [14]에 이미 자세히 연구가 되어있다. 저자는 수신노드, 즉 데이터를 종합하는 fusion 노드를 비행체라고 가정을 하였고, 따라서 센서 노드들과 fusion 노드 사이에는 Line of Sight (LOS)가 존재한다고 가정하였다. 하지만 본 논문의 II장에서 가정한 네트워크 구조는 2차원의 넓은 지역에 구성된 네트워크이기 때문에 SCSF의 LOS가 보장되지 않는 환경에서 성능에 대한 연구가 필요하였다. 우리는 시뮬레이션을 통해 SCSF가 non-LOS 환경에서도 여전히 diversity gain의 장점을 취하면서도 평균값을 전달하는데 효과가 있다는 것을 밝혀내었지만 본 논문에서는 지면제한으로 인하여 제시하지 않는다.

따라서  $R_k^{(j)}$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ )들은  $D_k^{(j)} = \widetilde{D}_k^{(j-1)} + \hat{\tau}_k^{(j)}$ 를 SCSF를 이용하여  $j$ 번째 클러스터내의 노드들에게 전송한다. 여기서  $\widetilde{D}_k^{(j-1)}$ 는 노드  $R_k^{(j)}$ 가 전 클러스터내의  $R_n^{(j-1)}$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) 노드들이 SCSF로 전송한

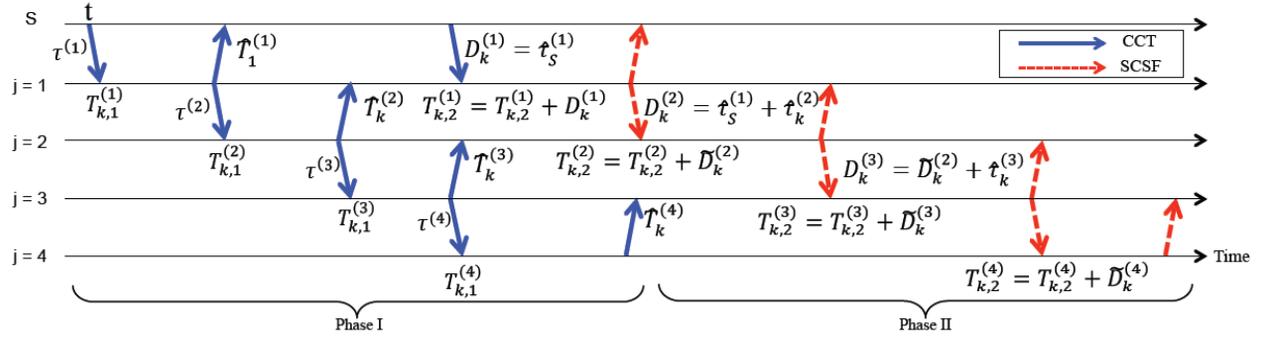


Fig. 2. CANDI Synchronization Protocol

$D_n^{(j-1)}$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ )을 수신하여 예측한 평균 값이다. 이 값은

$$\widetilde{D}_k^{(j-1)} = \frac{1}{h} \left\{ \frac{\sum_{n=1}^{N_{win}} v_n |F_k(n)|^2}{\sum_{n=1}^{N_{win}} |F_k(n)|^2} - f_c \right\} \quad (1)$$

을 이용하여 구할 수 있다. 여기서  $N_{win}$ 은 DFT 크기이며,  $v_n$ 은 n번째 DFT 주파수 값을,  $F_k(n)$ 는 수신된 신호의 n번째 DFT 값을 의미한다.  $f_c$ 와  $h$ 는 SCSF 전송에 쓰인 캐리어 주파수와 변조지수를 의미한다<sup>[14]</sup>.

### 3.1. 제 1단계 : 디지털

CANDI 프로토콜의 제 1단계인 디지털 단계에서 노드는 패킷의 앞쪽과 뒤쪽에 위치한 두 개의 preamble을 이용하여 수신된 패킷의 처음과 끝의 도착 시간을 계산하게 된다. 이 시간을 각각 Start of Packet (SOP) 시간과 End of Packet (EOP) 시간이라고 한다. CCT에서는 클러스터내의 노드들이 패킷을 동시에 전송하기 위해서 SOP 시간으로부터 패킷을 처리하는 시간인 이미 약속된  $T_{proc}$ 만큼을 기다린 후에 패킷 전송을 시작하게 된다.

#### 3.1.1. 첫 번째 홉

만약 타임 스탬프(time stamp)가 노드가 TS 패킷을 전송하기 직전에 패킷에 붙여진다면 소스노드에서의 send time error는 무시 할 만큼 작아지게 된다. 따라서 로컬 시계  $T_{k,1}^{(1)}$ 과 소스노드의 시간  $t$

와의 차이, 즉 시간 오류는 간단하게

$$e_{k,1}^{(1)} = w_{k,1}^{(1)} + \tau^{(1)}$$

와 같이 표현될 수 있다. 여기서  $w_{k,1}^{(1)}$ 은 노드  $R_k^{(1)}$ 가 소스노드로부터 패킷을 수신하면서 SOP를 예측할 때 발생하는 오류이고,  $\tau^{(1)}$ 은 소스노드와 첫 번째 클러스터사이의 실제 전파 시간이다. SOP 예측 오류는 수학적으로

$$w_{k,1}^{(j)} = \frac{x_{k,1}^{(j)}}{|h_{k,1}^{(j)}|} \sqrt{\frac{m}{SNR_1}}$$

로 표현된다<sup>[8]</sup>. 여기서  $m$ 은 SOP 시간을 감지하는 방법 또는 하드웨어에 따라 달라지는 상수이며  $x_{k,1}^{(j)}$ 는 표준 정규분포를 따르고 있는 확률 변수이다.  $SNR_{k,1}^{(j)} = |h_{k,1}^{(j)}|^2 SNR_1$  라고 하면,  $w_{k,1}^{(j)}$ 의 분산은  $m/SNR_{k,1}^{(j)}$ 가 된다는 것을 알 수 있다.

#### 3.1.2. 두 번째 홉

첫 번째 클러스터에서 수신된 TS 패킷을 전송하기 전에, 노드들은 패킷을 동시에 전송하기 위하여 사전에 약속된 시간인  $T_{proc}$ 만큼 대기하게 된다. 그러나 실제로 노드들이 서로 다른 시간율(clock rate)을 갖기 때문에  $T_{proc}$ 은 노드에 따라 약간씩 다른 값을 갖게 된다. 따라서 수신된 패킷의 앞뒤에 위치한 두 개의 preamble을 이용하여 시간을 보정을 해

이용하여 구현되었다. SDR은 크게 RF-daughterboard (RFX-2400)와 Universal Software Radio Peripheral (USRP1) board, 그리고 personal computer (PC)로 구성되어 있다. [9]의 실험에서 타임스탬프는 패킷이 USRP1 board에서 RFX-2400으로 넘겨질 때 부착되어 진다.

1) [9]에서 CCT는 Software Defined Radio (SDR)을

취야 한다. 그러나 시간을 보정 또한 SOP 및 EOP 예측 오류로 인하여 완벽하지 않기 때문에 시간을 보정 후의  $T_{proc}$ 에 대하여 새로운 오류 모델이 필요하다. 따라서 우리는 노드  $R_k^{(1)}$ 에서의  $T_{proc}$ 에 대한 오류를  $\xi_k^{(1)}$ 라고 표현하며, 이는  $\xi_k^{(1)} = T_{proc} \times f_s \times (w_{k1}^{(1)} + \phi_{k1}^{(1)})/B_s$ 로 구해질 수 있다. 여기서  $\phi_{k1}^{(1)}$ 는 EOP 예측 오류를,  $B_s$ 는 패킷당 표본화 수를 의미한다. 마지막으로  $f_s$ 는 소스노드의 클럭 주파수이다.

두 번째 클러스터의 각 노드  $R_k^{(2)}$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) 들은 각기 다른 diversity 채널들 통해  $N$ 개의 동일한 메시지(소스노드의 시간 정보  $t$ )에 대한 복사본들을 수신하게 된다. diversity 채널이란 서로 독립한 채널들을 의미하며, 즉 첫 번째 클러스터의 노드  $R_r^{(1)}$  ( $r = 1, 2, \dots, N$ )로부터  $R_k^{(2)}$ 까지의 채널  $h_{kr}^{(2)}$ 이 모두 독립되어 있다는 것을 의미한다. 각 노드가 이 독립된 채널을 통해 전송된  $N$ 개의 복사본들을 결합하여 패킷을 디코딩하기 때문에 SNR 이득을 취할 수 있게 되는 것이다. 이 때 중요한 점은 이러한 과정 속에서 시간 오류 또한 결합된다는 점이다.<sup>[8]</sup> 우선  $R_r^{(1)}$  노드로부터 송신된 신호를  $R_k^{(2)}$ 에서 수신할 때 발생하는 로컬 시간 오류를 정의하면,

$$e_{kr}^{(2)} = e_{r,1}^{(1)} + w_{kr}^{(2)} + \xi_r^{(1)} + \tau^{(2)}$$

로 정의된다.  $w_{kr}^{(2)}$ 는  $h_{kr}^{(2)}$  채널을 통해 전송된 패킷에 대한 SOP 예측 오류를 의미한다.

각각의 수신 노드  $R_k^{(2)}$ 은  $N$ 개의 복사본들을 결합할 때, 시간 에러를 최소화하기 위하여 [7]과 같이 BLUE (the best linear unbiased estimator)를 사용할 수 있다. 따라서  $R_k^{(2)}$ 의 로컬 시계인  $T_{k,1}^{(1)}$ 의 시간 오류  $e_{k,1}^{(2)}$ 는

$$\begin{aligned} e_{k,1}^{(2)} &= \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^{(2)} \hat{e}_{kr}^{(2)} \\ &= \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^{(2)} e_{r,1}^{(1)} + \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^{(2)} w_{kr}^{(2)} + \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^{(2)} \xi_r^{(1)} + \tau^{(2)} \end{aligned}$$

로 표현될 수 있다. 여기서  $\alpha_{kr}^{(2)} = \frac{|h_{kr}^{(2)}|^2}{\sum_{r=1}^N |h_{kr}^{(2)}|^2}$ 는

BLUE 계수이다. 이 BLUE 계수는 비상관성 (noncoherent) 결합기에서 center-of-mass 방식을 통한 결합 결과로부터 자동으로 예측이 되어 진다.

### 3.1.3. 나머지 홉

$j \geq 3$ 인  $R_k^{(j)}$  노드가 TS 패킷을 수신하면 패킷 안의 시간 정보를 이용하여 노드의 로컬 시계  $T_{k,1}^{(j)}$ 을 설정하고, 패킷을 다음 클러스터의 노드들에게 CCT를 이용하여 전송한다. 이 때  $j-1$  클러스터의  $r$ 번째 송신 노드와  $j$ 클러스터의  $k$ 번째 수신 노드간의 로컬 시간 오류는

$$\hat{e}_{kr}^{(j)} = e_{r,1}^{(j-1)} + w_{kr}^{(j)} + \bar{\xi}_r^{(j-1)} + \tau^{(j)}$$

로 표현된다. 여기서  $\bar{\xi}_r^{(j-1)}$ 은  $R_r^{(j-1)}$  송신자가  $T_{proc}$ 을 기다릴 때 발생하는 시간 오류이며, 두 번째의 홉의 노드와 마찬가지로  $R_r^{(j-1)}$  노드들은 결합된 SOP 및 EOP 시간을 이용하여  $T_{proc}$ 를 보정하기 때문에  $\bar{\xi}_r^{(j-1)} = T_{proc} \times f_s \times (w_r^{(j-1)} + \phi_r^{(j-1)})/B_s$ 로 정의되어 진다. 여기서

$$\tilde{w}_r^{(j-1)} = \sum_{p=1}^N \alpha_{rp}^{(j-1)} w_{rp}^{(j-1)} \text{와 } \tilde{\phi}_r^{(j-1)} = \sum_{p=1}^N \alpha_{rp}^{(j-1)} \phi_{rp}^{(j-1)}$$

는 각각 결합된 SOP 및 EOP 예측오류이다.

따라서, 로컬 클럭  $T_{k,1}^{(j)}$ 의 결합된 시간 오류는

$$\begin{aligned} e_{k,1}^{(j)} &= \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^{(j)} \hat{e}_{kr}^{(j)} \\ &= \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^{(j)} e_{r,1}^{(j-1)} + \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^{(j)} w_{kr}^{(j)} + \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^{(j)} \bar{\xi}_r^{(j-1)} + \tau^{(j)} \end{aligned}$$

로 표현된다.

### 3.2. 제 2단계 : 아날로그

첫 번째 클러스터내의 노드들이 TS 패킷을 두 번째 클러스터로 전송할 때 소스노드 또한 그 TS 패킷을 엿들음(overhear) 수 있다. CANDI 프로토콜이 시작되면서 소스노드가 첫 번째 클러스터로 전송한 TS 패킷을 역의 방향으로 소스노드가 되받는 이 과

정은 기존의 시간 동기화 방식인 TPSN의 pair-wire 동기화처럼 hand-shake가 이루어졌다고 볼 수 있다<sup>[5]</sup>. 따라서 소스노드는 TS 패킷이 전달되는데 소요된 전파(propagation) 시간에 대한 예측값  $\hat{\tau}_1^{(1)} = (\hat{T}_1^{(1)} - t)/2$  을 구할 수 있다. 여기서  $\hat{T}_1^{(1)}$ 은 소스노드가 TS 패킷을 수신한 실제 시간이다. 더욱 구체적으로 표현하면,

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_1^{(1)} &= \left( \sum_{r=1}^N \alpha_{1r}^{(0)'} e_{r,1}^{(0)'} \right) \\ &= \left( \sum_{r=1}^N \alpha_{1r}^{(0)'} w_{r,1}^{(1)} + \sum_{r=1}^N \alpha_{1r}^{(1)'} w_{1r}^{(0)'} + \sum_{r=1}^N \alpha_{1r}^{(0)'} \xi_r^{(1)} \right) / 2 + \tau^{(1)} \end{aligned}$$

와 같이 전개될 수 있으며, 여기서  $\hat{e}_{1r}^{(0)'}$ 은 첫 번째 클러스터내의 노드  $R_r^{(1)}$ 로부터 소스노드간의 각 채널에서 발생하는 역방향 로컬 시간 오류이며,  $\alpha_{1r}^{(0)'} = |h_{1r}^{(0)'}|^2 / \sum_{r=1}^N |h_{1r}^{(0)'}|^2$ 는 역방향 BLUE 계수이다. 그리고  $w_{1r}^{(0)'}$ 은 노드  $R_r^{(1)}$ 이 보낸 패킷에 대한 역방향 SOP 예측오류이다.  $w_{r,1}^{(1)}$ ,  $w_{1r}^{(0)'}$ , 그리고  $\xi_r^{(1)}$ 이 모두 평균이 0인 정규분포를 따르고 있기 때문에, 그것들의 선형합인  $\hat{\tau}_1^{(1)}$ 는  $\hat{\tau}_1^{(1)} \sim N(\tau^{(1)}, \sigma_{\tau_1}^2)$ 와 같은 정규분포를 따르고 있음을 알 수 있다.

그 다음에 소스노드는 예측한 전파시간  $\hat{\tau}_1^{(1)}$ 을 첫 번째 클러스터내의 노드  $R_k^{(1)}$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ )들에게 전송한다. 노드  $R_k^{(1)}$ 는 그들의 로컬 시계  $T_{k,1}^{(1)}$ 을  $T_{k,2}^{(1)} = T_{k,1}^{(1)} + \hat{\tau}_1^{(1)}$ 로 수정하여 전파 시간으로 인해 발생하였던 시간 오차를 줄일 수 있다. 따라서 2번째 단계인 아날로그 단계에서의 로컬 시계  $T_{k,2}^{(1)}$ 가 가지고 있는 시간 오류는

$$\begin{aligned} e_{k,2}^{(1)} &= e_{k,1}^{(1)} - \hat{\tau}_1^{(1)} \\ &= w_{k1}^{(1)} - \left( \sum_{r=1}^N \alpha_{1r}^{(0)'} w_{1r}^{(1)} + \sum_{r=1}^N \alpha_{1r}^{(0)'} w_{1r}^{(0)'} + \sum_{r=1}^N \alpha_{1r}^{(0)'} \xi_r^{(1)} \right) / 2 \end{aligned}$$

와 같이 표현된다. 여기서 전파 시간에 대한 시간 오류가 제거되었음을 확인 할 수 있다.

또한 첫 번째 클러스터내의 노드  $R_k^{(1)}$ 들은 소스

노드가 했던 것처럼 두 번째 클러스터의 노드들이 전송한 TS 패킷을 CCT의 방식으로 엮들어 두 번째 홉에 대한 전파 시간  $\tau^{(2)}$ 을  $\hat{\tau}_k^{(2)} = (\hat{T}_k^{(2)} - T_{k,1}^{(1)})/2$ 의 방법으로 계산 할 수 있다. 여기서  $\hat{T}_k^{(2)}$ 는  $R_k^{(1)}$ 가 TS패킷을 엮들은 시간이다. 따라서 예측값  $\hat{\tau}_k^{(2)}$ 는

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_k^{(2)} &= \left( \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^{(1)'} e_{kr}^{(2)'} - e_{k,1}^{(1)} \right) / 2 \\ &= \left( \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^{(1)'} (e_{r,1}^{(2)} + w_{kr}^{(1)'} + \xi_r^{(2)} + \tau^{(2)}) - e_{k,1}^{(1)} \right) / 2 \end{aligned}$$

로 표현될 수 있다. 여기서  $\hat{\tau}_k^{(1)}$ 는 정규분포를 따르고 있는 확률변수들의 선형 합이며, 평균값은

$$\begin{aligned} E[\hat{\tau}_k^{(2)}] &= E \left[ \left( \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^{(1)'} (e_{r,1}^{(2)} + w_{kr}^{(1)'} + \xi_r^{(2)} + \tau^{(2)}) - e_{k,1}^{(1)} \right) / 2 \right] \\ &= \left( E \left[ \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^{(1)'} e_{r,1}^{(2)} \right] + \tau^{(2)} - E[e_{k,1}^{(1)}] \right) / 2 \\ &= \left( \sum_{k=1}^2 \tau^{(k)} + \tau^{(2)} - \tau^{(1)} \right) / 2 = \tau^{(2)} \end{aligned}$$

이므로,  $\hat{\tau}_k^{(1)} \sim N(\tau^{(2)}, \sigma_{\tau_k}^2)$ 임을 알 수 있다. 그런 다음  $R_k^{(1)}$ 는 전 홉의 전파 시간에 대한 예측값과 수신한 현재 홉에 대한 예측값을 합한  $D_k^{(2)} = \hat{\tau}_1^{(1)} + \hat{\tau}_k^{(2)}$ 를  $R_k^{(2)}$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ )노드들에게 전송한다. 이 때  $D_k^{(2)}$ 값은  $k$ 에 따라 그 값이 약간씩 상이하기 때문에 SCSF 전송방식을 사용하여 전송한다. 그러므로  $D_k^{(2)}$ 에 관한 정보들은 전송된 신호의 주파수에 서로 중첩되어 전파되어지고,  $R_k^{(2)}$ 는 이 신호를 수신하여 식 (1)을 이용하여  $D_k^{(2)}$ 의 평균값에 대한 예측값  $\tilde{D}_k^{(2)}$ 을 계산할 수 있다.  $\tilde{D}_k^{(2)}$ 를 이용하여  $R_k^{(2)}$ 는 로컬 시계를  $T_{k,2}^{(2)} = T_{k,1}^{(2)} + \tilde{D}_k^{(2)}$ 와 같이 조정한다.

이 과정은 네트워크 전반에 걸쳐서 수행되며, 이 과정을 통하여 모든 노드들이 소스노드의 시간에 동기화할 수 있게 된다. CADNI 시간 동기화 방법은 디지털 및 아날로그 방식을 합한 단 두 번의 시간정보에 대한 전달(sweep)을 요구하기 때문에 시간 동기화에 소요되는 시간은 홉수( $H$ )에 비례하게 된다. 이는 전체 노드의 수에 비례하는 non-CT에 비해 상당히 짧다.

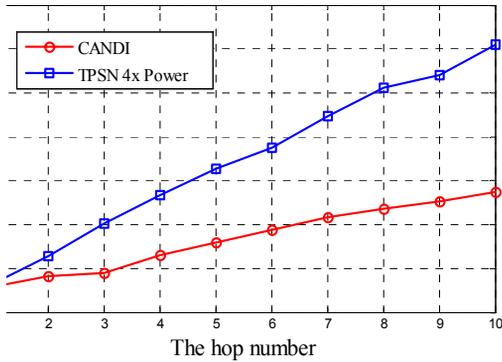


Fig. 3. Candi vs TPSN in the co-located line network

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

이 장에서는 MATALB을 이용한 Candi 프로토콜의 성능에 대해서 TPSN과 비교하여 제시하고자 한다. 시뮬레이션에서 SOP 상수  $m = 6.039 \times 10^{-9}$ 을 사용하였고<sup>[8]</sup>, pathloss에 대한 상수는  $\alpha = 3$ 으로 설정하였다. CCT의 데이터 전송률은 64kHz, 표본화율은 1MHz를 사용하였으며,  $T_{proc}$ 은 20ms로 설정하여 4kB의 블록 버퍼에 대한 충분한 시간을 보장하였다<sup>[7]</sup>. SCSF의 경우에는 캐리어 주파수와 표본화 주파수를 각각  $f_c = 512kHz$ 와  $f_s = 128kHz$ 로 설정하였고, DFT의 크기는 128로 설정하였다. 마지막으로 수신 노드가 수신된 패킷을 해독하기 위한 SNR 최소값 (threshold)을 SISO링크일 때 95%의 QoS를 보장하는 6.22dB로 설정하였다<sup>[15]</sup>.

##### 4.1. Co-located 라인 네트워크

Co-located 된 클러스터가 구성하고 있는 라인 네트워크에서의 Candi 프로토콜의 성능 분석을 위해 각 4개의 노드( $N = 4$ )로 구성된 클러스터들을 각각 100m 떨어진 곳에 나열하였다. 이때 소스 노드로부터 첫 번째 클러스터내의 한 노드까지의 평균 수신  $SNR_1$ 은 25dB로 설정하였고, 각 클러스터내의 노드들이 100m 떨어진 다른 노드에게 전송하는 평균 수신  $SNR_j$ 를 10dB로 설정하였다. 일반적으로 소스노드가 센서노드로부터 데이터를 수집하고 처리하기 기능을 담당하기 때문에 다른 센서노드들에 비해 배터리의 제한이 없고, 안테나의 송수신 전력 세기가 상대적으로 크다고 가정하였다.

TPSN의 경우에는 Candi에서 각 클러스터가 위치한 자리에 하나의 노드만을 위치시켜 라인 네트

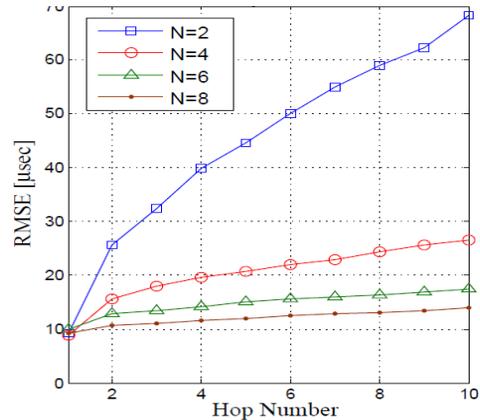


Fig. 4. Candi RMSE by cluster size

워크를 구성하였다. 이 때 Candi 프로토콜과 비교하여 네트워크가 소비하는 전력을 동일하게하기 위하여 센서노드들의 안테나 출력을 Candi의 센서 노드보다 4배( $N = 4$  이므로) 크게 설정하였다. 따라서 TPSN에서 100m 떨어진 센서노드 간의 평균 수신  $SNR$ 은 16.02dB가 된다.

그림 3에서는 라인 네트워크에서 Candi와

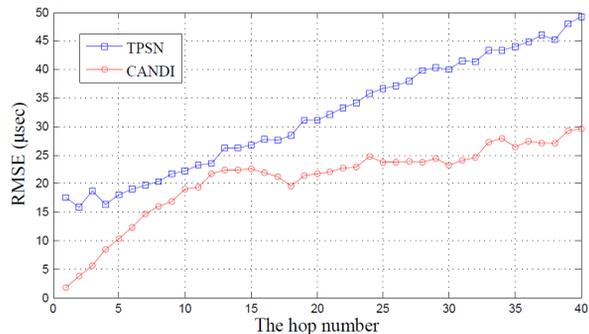


Fig. 5. Candi vs TPSN in the line network

TPSN의 홉의 증가에 따른 시간 오류를 보여주고 있다. 가로축은 홉수를 의미하며 세로축은 홉의 증

$$RMSE(j) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N |e_k^{(j)}|^2}$$

가에 따른 의미한다. 위 결과에서 홉 수가 증가함에 따라 Candi의 시간 오류가 TPSN의 경우보다 더 작은 비율로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 10번째 홉의 경우에는 TPSN의 시간오류가 Candi에 비해 1.5 배가 높다. 홉 수가 동일함에도 Candi의 시간오류가 더 작은 이유는 수신 노드가 CCT를 이용하여 여러개의 TS 패킷을 수신하면서 SOP 시간에 대한 예측값을 BLUE 계수를 이용하여 융합, 즉 평균화 (averaging)하기 때문이다. 여기서 BLUE 계수는 채

널 이득에 따라 가중치가 부여되기 때문에 수신 SNR이 높은 예측값에 보다 많은 가중치를 부여함으로써 시간 오류를 최소화 할 수 있다. 게다가 수신노드는 BLUE 계수를 계산할 필요없이 CCT 패킷을 수신하는 과정에서 물리계층에서 자동으로 반영된다는 점에서 시스템에 추가적인 부하를 주지 않는다는 장점이 있다<sup>8)</sup>.

그림 4은 클러스터내의 노드들의 수, 즉 클러스터의 크기를 변화시키면서 시간 오류에 대한 시물레이션 값을 도시하였다. 여기서 우리는 클러스터의 크기가 증가할수록 시간 오류는 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 수신 노드가 보다 많은 TS 패킷을 수신할수록 그것들을 융합하는 과정에서 averaging의 품질을 더 좋게하여 시간 오류를 최소화 할 수 있다는 것을 의미한다.

#### 4.2. 라인 네트워크

노드들이 일렬로 배치되어 있는 동일한 라인 네트워크에 대해서 CANDI와 TPSN의 성능을 비교하기 위해 소스노드를 기준으로 각 25m 간격으로 총 40개의 노드를 일렬로 배치하였다. 따라서 이 네트워크의 총 길이는  $25m \times 40 = 1000m$ 가 된다. 앞의 시물레이션의 네트워크 환경과 다른점은 노드들이 서로 co-located 되어 있지 않고 일렬로 늘어서 있다는 점이다. 송신노드는 100m 거리에 위치한 노드에 대해 평균 수신 SNR이 25dB가 되도록 송신 전력을 설정하였고, 나머지 모든 센서 노드들은 10dB가 되도록 설정하였다.

그림 5에서는 동일한 라인 네트워크에 대해서 CANDI와 TPSN의 시간오류(RMSE)를 보여주고 있다. 결과로부터 알 수 있듯이, 여전히 CANDI가 TPSN에 비해 더 좋은 성능을 보여주고 있음을 알 수 있다. 비록 클러스터내의 노드들이 co-located 되어 있지 않아 아날로그 단계에서 전파시간에 대한 예측값과 실제 전파시간의 차이가 존재하지만, CT의 range extension으로 인한 흡수의 감소와 CCT의 averaging 효과는 여전히 CANDI 시간 오류를 TPSN에 비해 상당히 적게 유지 할 수 있도록 하게 한다.

### V. 결 론

본 논문에서는 새로운 시간 동기화 방법인 CANDI 프로토콜을 제안하였다. CANDI 프로토콜이 CCT가 가지고 있는 averaging 및 range

extension 효과를 이용하여 시간 오류를 최소화함과 동시에, SCSF 전송 방식을 이용하여 클러스터간의 전파시간을 예측하여 시간을 수정함으로써 기존의 전통적인 시간 동기화 방법과 비교하여 시간 오류를 상당히 줄일 수 있었다.

CANDI를 이용하여 시간 동기화하는 과정은 단 두 번의 디지털 및 아날로그 전송을 필요로 하기 때문에, 모든 노드들이 non-CT의 방법으로 패킷을 교환하여 시간을 공유했던 방식에 비해 시간 동기화에 소요되는 시간을 현저하게 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그 이유는 CANDI의 경우에는 동기화에 소요되는 시간이 흡수에 비례하지만, 기존의 non-CT 방식은 노드의 수에 비례함과 동시에 MAC layer에서의 충돌을 수반하기 때문에 소요되는 시간은 더욱 길어지게 된다. 이러한 사실은, 본 논문에서는 자세히 고려되지 않았지만, WSNs에서의 노드들의 clock rate가 일정하지 않아 시간이 지나면서 점점 커지는 clock skew 오류 또한 CANDI 방식을 이용하여 최소화 할 수 있다는 것을 의미한다.

이러한 장점들로부터 본 논문에서는 CANDI가 군 및 민간 분야에서 WSNs을 포함한 다양한 거대 네트워크를 동기화하는데 효율적이며 좋은 성능을 보이고 있음을 증명 되었다.

우리는 추후 연구과제로서 다른 네트워크 환경, 특히 전파시간과 다른 시간 오류와의 상대적인 크기에 따라 CANDI가 어떠한 성능을 가지는지에 대한 분석이 필요하다. 전파시간이 다른 시간 오류에 비해서 상당히 짧은 경우 우리는 두 번째 단계를 생략하는 것이 더 좋은 성능을 가질 수 있다는 것을 예측할 수 있기 때문이다.

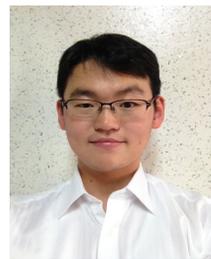
### References

[1] C.-Y. Lin, W.-C. Peng, and Y.-C. Tseng, "Efficient in-network moving object tracking in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 5, no. 8, pp. 1044-1056, Aug. 2006.

[2] S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fennes, S. Glaser, and M. Turon, "Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks," *6th International Symposium on IPSN*, pp. 254-263, April 2007.

- [3] Arendg. Westra, "Radar versus Stealth : Passive Radar and the Future of U.S. Military Power," *NDU Press, JFQ*, issue 55, 4th quarter, 2009.
- [4] J. Laneman and G. Wornell, "Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415-2425, Oct 2003.
- [5] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts," *5th Symp. OSDI*, pp. 147-163, 2002.
- [6] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. B. Srivastava, "Timing-sync protocol for sensor networks," *1st Intl. Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 138 - 149, Nov. 2003.
- [7] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon, and A. Ledeczi, "The flooding time synchronization protocol," *2nd Intl. Conf. on Embedded networked sensor systems*, pp. 39 - 49, Nov. 2004.
- [8] Y. J. Chang, M. Ingram, and R. Frazier, "Cluster transmission time synchronization for cooperative transmission using software-defined radio," *IEEE ICC*, pp. 1 - 5, May 2010.
- [9] Z. Gao, Y. J. Chang, and M. Ingram, "Synchronization for cascaded distributed mimo communications," *MILCOM*, pp. 387 - 392, 3 2010.
- [10] Y. J. Chang and M. Ingram, "Convergence property of transmit time pre-synchronization for concurrent cooperative communication," *IEEE GLOBECOM*, pp. 1 - 5, Dec. 2010.
- [11] Y.-W. Hong and A. Scaglione, "A scalable synchronization protocol for large scale sensor networks and its applications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 5, pp. 1085 - 1099, May 2005.
- [12] A. Tyrrell, G. Auer, and C. Bettstetter, "On the accuracy of firefly synchronization with delays," *1st Intl. Symposium on ISABEL*, pp. 1 - 5, Oct 2008.
- [13] A. Scaglione and Y.-W. Hong, "Opportunistic large arrays: cooperative transmission in wireless multihop ad hoc networks to reach far distances," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 51, no. 8, pp. 2082 - 2092, Aug. 2003.
- [14] A. Akanser and M. Ingram, "Semi-cooperative spectrum fusion (SCSF) for aerial reading of a correlated sensor field," *1st Intl. Conf. on Wireless VITAE*, pp. 732 - 736, May 2009.
- [15] H. Jung, Y. J. Chang, and M. Ingram, "Experimental range extension of concurrent cooperative transmission in indoor environments at 2.4ghz," *IEEE MILCOM*, pp. 148 - 153, Nov. 2010.

조 성 환 (Sung-hwan Cho)



2007년 3월 육군사관학교 전자공학과 졸업  
 2011년 12월 미.조지아공대 전자공학과 석사  
 2012년 2월~현재 육군사관학교 전자정보학과 강사  
 <관심분야> 시간동기화, MAC

QoS

Mary Ann Ingram



1983년 6월 미.조지아공대 전자공학과 졸업  
 1989년 6월 미.조지아공대 전자공학과 박사  
 1989년~현재 미.조지아공대 전자공학 교수  
 <관심분야> 무선통신, 협동통신, Virtual MIMO

신, Virtual MIMO