

한 비트 피드백 분산 빔형성을 위한 이분법 기반 빠른 위상 동기화 알고리즘

이성복*, 이종혁*, 박재현^o

Fast Phase Synchronization Algorithm Based on Bisection for Distributed Beamforming with One-Bit Feedback

Sung-bok Lee*, Jongheok Lee*, Jaehyun Park^o

요 약

본 논문에서는 IoT 환경의 센서 네트워크에서 분산된 센서 노드들이 분산 빔포밍을 하기 위한 빠른 동기화 알고리즘을 제안한다. 분산 빔포밍 기법은 분산되어 있는 여러 개의 노드들에서 송신하는 신호의 주파수와 위상을 동기화시킴으로써, 수신전력을 최대화 하고, 전송거리를 늘일 수 있는 기법이다. 특히 본 논문에서는 one-bit feedback을 기반으로 하는 제한된 네트워크를 고려하고 있으며, 이 분산 네트워크 환경에서 위상 동기화를 효과적으로 수행하기 위해 Bisection method에 기반 한 알고리즘을 제안하였다. 특히 제안하는 알고리즘은 노드의 수가 늘어남에 따라 쉽게 확장할 수 있고, 기존의 분산 위상 동기화 기법에 비해 빠르게 동기화 시킬 수 있다. 모의실험을 통해 제안한 동기화 기법의 동기화에 필요한 계산 복잡도 및 수신 전력의 성능을 분석 및 검증하였다.

Key Words : Distributed Transmit Beamforming, Phase Synchronization, Bisection method

ABSTRACT

In this paper, we present synchronization algorithms for the distributed beamforming, in which the distributed nodes send a signal to a information-receiving base-station (BS). To transmit the signal effectively, the distributed nodes should adjust their transmit signals' phase properly so that their signals are constructively added up at the data collector with a same phase. In the conventional scheme, to synchronize their phases, the nodes can update their phases based on the random perturbation based on one-bit feedback from BS, which incurs a long convergence time. In this paper, we propose a fast synchronization algorithm, where each node finds the optimal phase based on the bisection-based method. In addition, the proposed algorithm can be extended to arbitrary numbers of nodes. Using computer simulations, we verified and compared the performance of the proposed algorithm with the conventional phase synchronization algorithm.

I. 서 론

최근 신호를 전파하면서 겪는 페이딩(fading) 현상

을 줄이기 위해 여러 가지 다이버시티(diversity) 기법들이 연구되고 있으며, 그 중 공간 다이버시티 기법이 여러 응용분야에서 많은 관심을 받아왔다^[1-3]. 그러나

* 이 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1C1A1A01051490).

• First Author : Pukyong National University, Department of Electronics Engineering, pa339@naver.com, 학생회원

o Corresponding Author : Pukyong National University, Department of Electronics Engineering, jaehyun@pknu.ac.kr, 정회원

* Pukyong National University, Department of Electronics Engineering

논문번호 : KICS2017-09-232, Received September 2, 2017; Revised November 6, 2017; Accepted November 6, 2017

여러 개의 안테나를 사용한 시스템을 구현하기 위해서는 복잡도 및 송신 전력의 제한 때문에 어려움이 있다. 특히, 최근 주목 받고 있는 IoT 센서 네트워크에서는 비용 및 복잡도 문제로 인해, 네트워크상의 노드들은 다중안테나를 이용하지 못하는 경우가 많다.

IoT기반의 센서 네트워크에서 채널 페이딩 현상을 극복하기 위해 협력 다이버시티 방법들이 제시되었고^[4,5], 여러 개의 안테나를 이용해 시스템 용량과 전송할 수 있는 거리를 늘일 수 있는 분산 빔포밍 기법이 제시 되었다^[6]. 분산 빔포밍은 노드들이 공간적으로 흩뿌려져 있는 환경에서 높은 다이버시티를 얻을 수 있다는 것과 전송 에너지 효율을 높일 수 있다는 장점이 있다. 이러한 분산 빔포밍 기법에 있어서 빠른 위상 동기화 기법은 매우 중요하다. 특히 위상이 동기화 되지 않으면 높은 빔포밍 이득을 기대 할 수 없고, 모든 노드들이 서로 다른 채널을 겪기 때문에, 매 coherence time 마다 위상동기화 과정을 거쳐야 한다. 따라서 위상동기화 과정이 빠를수록 분산 빔포밍 시스템의 achievable rate을 높일 수 있다^[7]. [8]은 기지국 (base station, BS)에서 매 time-slot마다 one bit 신호를 전송함으로써 위상 동기화 및 채널추정을 수행한다.

[8]의 1-bit feedback 알고리즘은 확장성을 가질 수 있는 유용한 방법이지만, 노드의 수가 커졌을 때에는 received signal strength (RSS)가 local maxima에 수렴할 확률이 높아지게 된다. RSS가 local maxima에 수렴하게 되면, 이론적으로 얻을 수 있는 최대 빔포밍 이득에 비해 빔포밍 이득이 감소하고, 이에 따라 시스템용량 및 데이터 또는 에너지 전송거리 또한 감소하게 된다.

본 논문에서는 여러 개의 노드들이 무작위로 분산되어 있으며, 이 노드들이 BS로 신호를 전송하며, 수신신호의 세기를 최대화 시켜야하는 시스템을 고려하며, 기존 분산 알고리즘들의 문제점인 local maxima에 빠지는 현상을 극복하기 위해 노드들이 순차적으로 위상을 정렬하는 방법을 제안하였으며, 각각의 노드들이 위상을 정렬하는 과정은 bisection 기반의 위상 정렬을 통해 빠르게 위상을 정렬하는 기법을 제시하였다. 모의실험을 통해 기존의 동기화 기법과 제안한 동기화 기법의 동기화에 필요한 계산 복잡도 및 수신 전력을 비교하고, 성능 검증을 검증하였다.

II. 시스템 모델

그림 1은 일반적인 형태의 분산 빔포밍 시스템의 구조를 보여준다. 본 논문에서는 N개의 노드가 1개의 BS와 통신하는 환경을 고려한다. 모든 노드와 BS는 단일안테나환경을 가정하고, 동일한 스펙트럼을 사용한다. BS에서 n번째 노드로부터 i번째 time-slot에서 수신한 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_n [i] = h_{1n} A_n [i] e^{j\phi_n [i] + \theta_n [i]}, \quad (1)$$

여기서 h_{1n} 은 n번째 노드에서 BS로 신호를 보낼 때 겪는 Rayleigh fading 채널을 의미하고, 본 논문에서는 분산이 1인 zero-mean complex Gaussian 분포를 따른다고 가정한다. 또한 일정 time-slot동안에는 변하지 않는다고 가정한다. 이때 $h_{1n} = r_n e^{j\gamma_n}$ 으로 표시할 수 있으며, r_n 은 Rayleigh 분포를 따르며, γ_n 은 0, 2π 사이에서 균일분포를 따르게 된다. $A_n [i]$ 은 n번째 노드에서 전송한 신호의 진폭을 의미하고 $\phi_n [i]$ 은 n번째 노드에서 전송한 신호의 위상 및 자체 oscillator의 위상 등이 복합적으로 고려된 n번째 노드의 고유의 위상오프셋(phase offset)을 의미한다. 끝으로 $\theta_n [i]$ 은 n번째 노드에서 빔포밍을 위해 임의로 회전시킬 수 있는 위상각을 의미한다.

따라서 기지국에서 수신되는 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r[i] = \sum_{n=1}^N s_n [i] + n[i] = \sum_{n=1}^N h_{1n} A_n [i] e^{j\phi_n [i] + \theta_n [i]} + n[i] \\ = \sum_{n=1}^N r_n A_n [i] e^{j\gamma_n + \phi_n [i] + \theta_n [i]} + n[i] \quad (2)$$

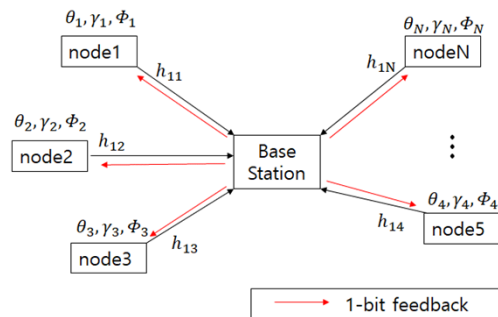


Fig. 1. Distributed beamforming system

여기서 $n[i]$ 분산이 σ_n^2 인 zero mean complex Gaussian noise이다. 수식 (2)에서 높은 빔포밍 이득을 위해서는 노드간의 위상동기화가 필요하다. 즉, 위상 동기화 조건을 수식으로 표현하면 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} (\theta_1[i] + \gamma_1 + \phi_1[i]) &= (\theta_2[i] + \gamma_2 + \phi_2[i]) = \\ \dots &= (\theta_N[i] + \gamma_N + \phi_N[i]) = K \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, K 는 임의의 상수가 된다. 이때, γ_n 와 $\phi_n[i]$ 는 통제할 수 없는 요소이기 때문에, $\theta_n[i]$ 값을 변경하여, 위상 동기화를 진행 할 수 있다.)

그림 2는 기존의 분산 빔포밍을 위한 위상동기화 과정의 동작프레임을 보여준다. 이때 T_{tr} 은 노드가 BS로 신호를 전송하는 시간이며, BS는 T_{tr} 동안에 모든 노드들로부터 신호를 받아 beamforming의 성능을 판단하여 T_{fb} 동안에 feedback신호를 각 노드들에 전송한다. 이 feedback 신호는 구현의 간단성 및 정확한 feedback 수신을 위해 one bit로 이루어져 있으며, 모든 노드들에 broadcasting된다. 참고로 Training구간에는 $\phi_n[i]$ 역시 time-slot에 상관없이 일정한 값을 가진다고 가정한다. 즉 각각의 노드의 고유 위상 오프셋은 변하지 않는다고 가정한다. 참고로 제안하고자 하는 알고리즘은 일반적인 채널 환경에 적용이 가능하며, 채널의 위상 γ_n 은 n번째 노드의 고유의 위상 오프셋(phase offset)에 더해져 두 개의 더해진 위상을 바탕으로 통합적으로 동기화를 진행할 수 있다.

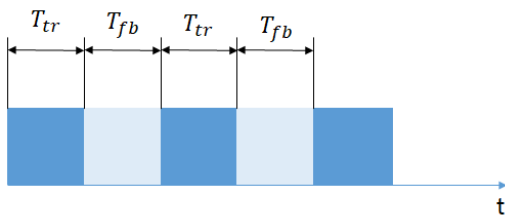


Fig. 2. Frame for the conventional phase synchronization

1) 참고로 수신단(BS)에서 배열안테나를 쓸 경우, 인접한 수신 안테나 간의 수신신호는 일정한 위상차만 유지한 채 수신되기 때문에, 본 논문에서 제시하는 알고리즘을 쉽게 확장할 수 있다. 또한 일반적인 다중안테나를 이용할 경우도 다중 노드들로부터 수신안테나 간의 채널을 $\mathbf{H} (= \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H)$ 이라 두면, 수신 빔포밍 벡터를 \mathbf{u}_1 (\mathbf{U} 의 첫 번째 열)로 두게 되면 다중 노드들로부터 실질 채널은 $\mathbf{u}^H \mathbf{H} (= \sigma_1 \mathbf{v}_1^H)$ 으로 주어지기 때문에 역시 실질 채널을 바탕으로 본 논문에서 제시하는 알고리즘을 쉽게 확장이 가능하다.

III. 위상 동기화 과정

3.1 Random Gradient Search based scheme

본 절에서는 기존의 분산 빔포밍 네트워크에서 one-bit feedback을 가정하였을 때 널리 쓰이는 random gradient search 기반의 알고리즘을 소개 한다⁶⁾. 이 방법은 T_{tr} 동안 모든 노드들이 동시에 BS로 신호를 보내고, BS는 수신한 신호의 강도 (RSS)를 보고 이전 time-slot때 수신된 신호의 강도와 비교하여 feedback bit를 결정한다. T_{fb} 동안 BS가 모든 노드들에게 one bit의 피드백 신호를 브로드캐스팅 한다. 이 알고리즘의 동작을 간략하게 나타내면, 다음과 같이 정리할 수 있다.

Random gradient search 기반 분산 빔포밍 기법	
1)	초기화 노드: $\theta_{best,n} = \theta_n[1]$ 저장 및 $\theta_n[1]$ 이용하여 첫 번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호 전송. BS: 첫 번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호를 수신하여 그 강도를 다음과 같이 저장 및 T_{fb} 동안 feedback bit '1' 송신. $Y_{best} = r[1] $
For $i=2:N_{max}$	
2)	위상 Update 및 피드백 비트 결정 노드: (i-1)번째 T_{fb} 동안 feedback bit '1'을 수신하면 각 노드들의 위상을 다음과 같이 변화시킴. $\theta_n[i] = \theta_n[i-1] + \delta_n \quad (4)$ 이때, δ_n 는 $[-\frac{\pi}{20}, \frac{\pi}{20}]$ 에서 균일하게 분포함. 만약, feedback bit '0'을 수신하면 각 노드들의 위상을 다음과 같이 변화시킴. $\theta_n[i] = \theta_{best,n} \quad (5)$ $\theta_n[i]$ 를 이용하여 i번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호 전송. BS: i번째 time-slot의 T_{tr} 동안 신호를 수신하여 그 RSS를 $Y[i]$ 에 저장하고 이전에 수신된 RSS 중 높은 값 Y_{best} 와 비교하여 feedback bit를 다음과 같이 결정. $feedback\ bit = \begin{cases} '1' & Y[n+1] > Y_{best} \\ '0' & otherwise \end{cases}$

3)	Y_{best} 및 그에 해당하는 위상 $\theta_{best,n}$ Update
	노드: (i-1)번째 T_{fb} 동안 feedback bit 정보에 따라 다음과 같이 $\theta_{best,n}$ 을 Update 함. $\theta_{best,n} = \begin{cases} \theta_n[i-1] & \text{feedback bit '1'} \\ \theta_{best,n} & \text{feedback bit '0'} \end{cases}$ BS: Y_{best} 를 다음과 같이 Update 함. $Y_{best} = \begin{cases} Y[i] & Y[i] > Y_{best} \\ Y_{best} & \text{otherwise} \end{cases}$
4)	빔포밍 알고리즘 종료 조건 검사 BS: 만약 $ Y[i] - Y_{best} < \epsilon_{th}$ 이거나 그 외 종료 조건을 만족하면, 알고리즘 종료

위의 알고리즘은 Step 2)에서 각각의 노드들 마다 현재 최고 RSS을 가질 수 있는 위상 정보에서 random하게 다음 위상을 update하게 되므로, local maxima에 빠져서 원하는 성능이 나오지 않을 수 있다. 이를 해결하기 위해 다음 절에서는 노드별로 순차적으로 위상을 update하는 bisection기반 위상 동기화 알고리즘을 제시한다.

3.2 Bisection based scheme

본 절에서 제안하고 자 하는 위상동기화 방법은 기존 방식과 동일하게 one bit feedback 신호를 이용하면서, 노드들이 하나씩 순차적으로 동기를 맞추어가는 방법이다. 그림 3과 같이 제안하는 방법은 기존의 방법과는 다르게 노드가 연속으로 두 번의 신호를 BS로 전송한 후에 BS가 모든 노드들에게 feedback 신호를 브로드캐스팅 해서 동기화를 진행한다.

이 알고리즘을 간략하게 나타내면, 다음과정을 첫 번째 노드부터 마지막 노드까지 순차적으로 진행하며, 해당 노드 이외의 노드들은 이전의 위상 값을 그대로 유지하며, 신호를 전송한다. 이때 해당 노드는 최적의 위상 값이 포함된 영역을 포함하는 두 개의 경계 위상을 이용해 신호를 연속적으로 T_{tr1} , T_{tr2} 동안 송신한다. BS는 두 경계 위상 중 RSS값이 큰 영역에 해당하는 feedback bit를 송신하면 해당 노드는 다시 최적의

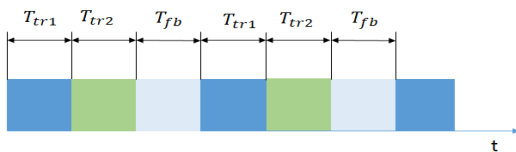


Fig. 3. Frame for the proposed phase synchronization

위상을 포함하는 그 영역의 범위를 줄일 수 있으며, 다시 그 경계 두 부분으로 나누어 최적의 해를 효율적으로 찾아가게 된다. 동작 방식이 bisection method^[9]와 흡사하기 때문에 이를 bisection기반의 방법이라 하였으며, 구체적인 알고리즘은 다음과 같이 정리하였다.

Bisection method 기반의 분산 빔포밍 기법	
For n=1:N	
1)	초기화 노드: $\Delta_n[0] = \frac{\pi}{2}$, $\theta_n[0] = 0$ 설정. 첫 번째 time-slot의 T_{tr1} 동안 $\theta_n[1] = \theta_n[0] + \Delta_n[0]$ 신호를 전송하고, 첫 번째 time-slot의 T_{tr2} 동안 $\theta_n[1] = \theta_n[0] - \Delta_n[0]$ 신호를 전송. BS: 첫 번째 time-slot의 T_{tr1} , T_{tr2} 동안 신호를 수신하여 그 강도를 비교하여 T_{fb} 동안 보낼 feedback bit를 다음과 같이 결정함. $Y_{tr1}[1] = r_{tr1}[1] , Y_{tr2}[1] = r_{tr2}[1] $ $Y_{tr1}[1] > Y_{tr2}[1] \quad \text{feedback bit '1'}$ $Y_{tr1}[1] < Y_{tr2}[1] \quad \text{feedback bit '0'}$
For i=2: N_p	
위상 및 Δ_n update 및 feedback bit 결정 노드: (i-1)번째 T_{fb} 동안 feedback bit '1'을 수신하면, n번째 노드의 위상을 다음과 같이 변화시킴. $\theta_n[i] = \theta_n[i-1] + \Delta_n[i-1]$ 만약, feedback bit '0'을 수신하면 n번째 노드의 위상을 다음과 같이 변화시킴. $\theta_n[i] = \theta_n[i-1] - \Delta_n[i-1]$ $\Delta_n[i]$ 은 다음과 같이 크기를 절반으로 줄임. $\Delta_n[i] = \Delta_n[i-1]/2$ $\theta_n[i] + \Delta_n[i]$ 를 이용하여 i번째 time-slot의 T_{tr1} 동안 신호 전송. $\theta_n[i] - \Delta_n[i]$ 를 이용하여 i번째 time-slot의 T_{tr2} 동안 신호 전송. BS: i번째 time-slot의 T_{tr1} , T_{tr2} 동안의 신호를 수신하여 그 RSS를 $Y_{tr1}[i]$, $Y_{tr2}[i]$ 에 저장하고 이를 비교하여 feedback bit를 결정. $Y_{tr1}[i] > Y_{tr2}[i] \quad \text{feedback bit '1'}$ $Y_{tr1}[i] < Y_{tr2}[i] \quad \text{feedback bit '0'}$	

3)	빔포밍 알고리즘 종료 조건 검사
	$i = N_p$ 및 $n = N$ 을 만족하면 알고리즘 종료

모의실험에 따르면 N_p 는 6~10일 때 각각의 노드는 최적의 해를 찾는 것을 확인 할 수 있었으며, 각각의 노드들이 순차적으로 위상동기화의 조건 수식 (3)을 만족시키기 때문에, 항상 RSS가 global maximum을 가지도록 위상을 정렬할 수 있다. 참고로 제안하는 위상동기화 알고리즘에서 training 신호를 2개를 연속하여 보내기 때문에, 기존 기술에 비해 2배의 training 시간이 소요된다. 기존의 기술과 공정한 비교를 위해 제안한 기술에서의 iteration의 횟수는 한 번의 피드백에 2번의 iteration이 소요되는 것으로 가정하였다. 즉 제안한 알고리즘의 iteration은 $2N(N_p - 1)$ 로 주어지게 된다.

IV. 시뮬레이션

본 장에서는 모의실험을 통하여 노드가 분산되어 독립적인 채널을 가지고 있을 때, random gradient search 기반 위상동기화 기법과 제안한 bisection method기반 위상동기화 기법의 성능을 비교하였다. 위상 동기화로 인한 성능만을 비교하기 위해 주파수 동기화는 완벽하게 이루어 졌다고 가정하였으며, $A_n = 1$ 이고 채널 fading의 amplitude를 1이라 가정하고, 채널의 위상은 각 노드들의 고유 위상 옵셋에 포함되어 통합된 $\gamma_n + \phi_n$ 은 $[0, 2\pi]$ 에서 균일하게 분포한다고 가정하였다. 또한 동기화 방법의 성능을 비교하기 위하여 동기화의 성능을 동기화에 필요한 iteration수와 수렴하는 RSS값을 분석하였다. 이때 random gradient search기반의 방식은 local minimum에 빠지는 경향성이 크기 때문에 simulated annealing과 같은 최적화 방법을 이용하여 사용 할 수 있지만, simulated annealing 역시 수렴까지 많은 iteration이 필요하고, 연산량이 매우 많아 빠르게 동기화를 진행해야 하는 분산 빔포밍 방법에는 적용하기 어렵다¹⁰⁾. 공정한 비교를 위해 수렴 기준 또는 알고리즘 종료 조건에 다음과 같은 조건을 추가하였다.

수렴하는 RSS값: 모든 노드가 완벽하게 동기

- a) 화 되었을 때 (이상적인 경우)의 RSS값의 80% 이상

즉, 위의 조건이 만족할 때 위상 동기화가 완료되었다고 판단하여 그때의 RSS값과 iteration수를 비교하였다.

그림 4는 $N=20$ 일 때 기존의 random gradient search 기반의 위상동기화를 적용했을 때 iteration횟수에 따른 RSS변화를 보여준다. 이를 보면 iteration이 진행됨에 따라 RSS가 증가하는 것을 알 수 있다. 참고로 수식(2)로부터 $A_n = 1$ 이고 $r_n = 1$ 채널 이상적인 빔포밍 이득으로 인한 수신 전력의 최대값은 $N^2 (= 400)$ 으로 주어진다. 하지만 이를 보면 알 수 있듯이 local maxima에 수렴되었을 때 여기서 벗어나지 못하거나 벗어나려면 많은 iteration을 소모해야 하는 경우가 발생한다.

그림 5와 그림 6은 $N=20$ 일 때 제안한 위상동기화 방식을 사용 했을 때 iteration횟수에 따른 RSS 변화와 위상을 동기화 시켰을 때 각각 노드로부터 수신된 신호의 통합된 위상($\theta_n[i] + \gamma_n + \phi_n$)이 특정 값에 수렴되는 것을 보여준다. 그림 5를 보면 수신 RSS가 위상 동기화가 완료될 때까지 꾸준히 증가하는 것을 볼 수 있다. conventional scheme의 경우와 같이 이상

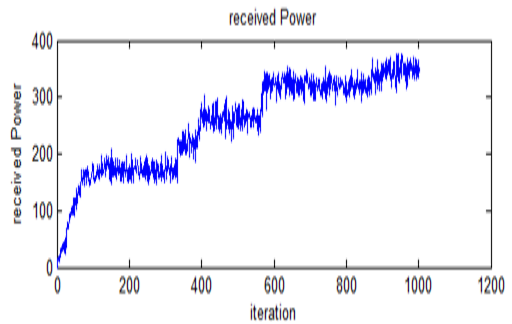


Fig. 4. Received signal power when the conventional scheme is exploited with $N=20$

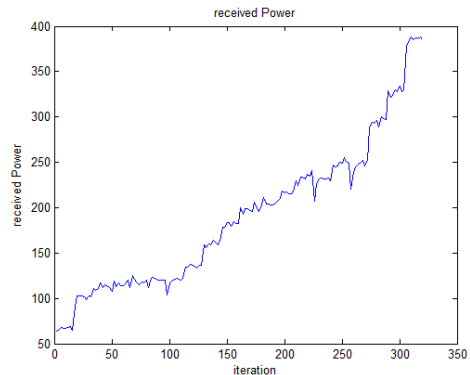


Fig. 5. Received signal power when the proposed scheme is exploited with $N=20$

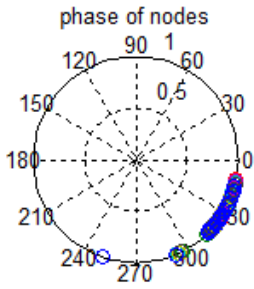


Fig. 6. Convergence of the phase $(\theta_n[i] + \gamma_n + \phi_n)$ when the proposed scheme is exploited with $N=20$

적인 빔포밍 이득으로 인한 수신 전력의 최대값은 $N^2 (= 400)$ 으로 주어진다. 즉, 제안한 알고리즘의 특성상 노드를 순차적으로 동기화시키기 때문에 iteration이 진행됨에 따라 계속적으로 RSS가 증가하며 global optimum값에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. conventional scheme과 비교하여 local maxima에 빠지지 않고 곧바로 RSS의 global optimum 값에 수렴하며 빠르게 동기화가 가능하다.

표 1은 SNR=20dB일 때 노드의 수를 20, 40, 60, 100개로 설정했을 때 동기화에 필요한 iteration수와 그때의 RSS값을 나타낸 것이다. proposed scheme의 $N_p = 8$ 로 설정하고 실험을 진행하였다. 위 결과를 보면 노드의 수가 작을 때는 기존방법과 큰 차이가 나지 않지만, 노드의 수가 많아질수록 제안한 방법이 훨씬 더 빨리 동기화가 되는 것을 확인할 수 있다. 수렴되는 RSS값은 위의 성능분석 기준에 해당하는 값에 가까운 값으로 나타났다.

그림 7은 노드의 개수에 따른 위상동기화에 필요한 iteration수를 그래프로 나타낸 것이다. conventional

Table 1. Performance comparison of the conventional scheme and the proposed scheme

노드의 수(N)		Conventional scheme	Proposed scheme
N=20	iterations	288	320
	RSS	365	376
N=40	iterations	783	640
	RSS	1433	1459
N=60	iterations	1361	960
	RSS	3175	3196
N=100	iterations	4521	1600
	RSS	8766	8610

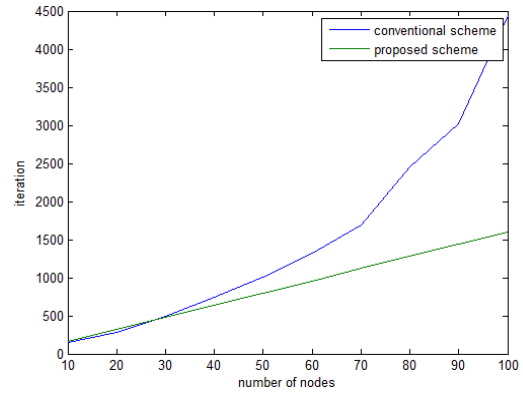


Fig. 7. The number of iterations vs. the number of nodes

scheme은 노드의 수가 많아질수록 필요한 iteration수가 지수적으로 증가하는 반면, proposed scheme은 노드의 수에 비례하여 선형적으로 iteration수가 증가한다. 이는, conventional scheme이 노드의 수가 많을수록 local maxima에 빠질 확률이 증가하기 때문에, 동기화에 더 많은 시간이 걸리는 것이며, proposed scheme은 local maxima에 빠지지 않고 global maximum을 추정해 나가기 때문에 더 빠른 시간에 동기화가 가능하다.

V. 결론

본 논문에서는 IoT 환경의 센서 네트워크에서 분산된 센서 노드들이 분산 빔포밍을 수행하기 위한 빠른 동기화 알고리즘을 연구하였다. 기존의 random gradient search기반의 위상 동기화의 느린 수렴성 문제를 극복하기 위해 bisection기반의 위상동기화기법을 제안하였으며, 제안한 알고리즘은 노드별로 순차적으로 위상을 최적화하기 때문에 local maxima에 빠지는 현상이 없으며, 각 노드별 최적 위상은 bisection 방식으로 빠르게 찾아감을 확인할 수 있었다. 이러한 bisection 방식은 노드의 수가 많을 때 즉, massive IoT network에 분산 빔포밍 알고리즘을 적용할 때 더욱 빠르게 원하는 방향으로 빔을 형성시킬 수 있음을 모의실험을 통해 검증하였다.

References

[1] I. Ahmad and K. Chang, "Analysis on MIMO transmit diversity techniques for ship ad-hoc network under a maritime channel model in

coastline areas,” *J. KICS*, vol. 42, no. 2, pp. 383-385, Feb. 2017.

- [2] J. Paik, “Transmission diversity scheme using antenna array of small cell,” *J. KICS*, vol. 41, no. 3, pp. 301-303, Mar. 2016.
- [3] J. Kim, D. Seo, H. Jeong, and J. Lee, “Delay based cooperative diversity technique for a wireless communication system,” in *Proc. IEIE*, 70-71, Nov. 2007.
- [4] H. Kim and K. Lee, “Effect of synchronization errors with distributed beamforming in OFDM systems,” *J. IEIE*, vol. 51, no. 1, Jan. 2014.
- [5] H. Ochiai, P. Mitran, H. Poor, and V. Tarokh, “Collaborative beamforming for distributed wireless ad hoc sensor networks,” *IEEE Trans. Sign. Process. [see also IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing]*, vol. 53, no. 1053-587X, pp. 4110-4124, 2005.
- [6] R. Mudumbai, D. Brown, U. Madhow, and H. Poor, “Distributed transmit beamforming: challenges and recent progress,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 2, pp. 102-110, Feb. 2009.
- [7] H. Kim and S. Kwon, “System performance with synchronization errors in distributed beamforming systems,” *J. Korea Multimedia Soc.*, vol. 16, no. 4, pp. 452-459, Apr. 2015.
- [8] R. Mudumbai, J. Hespanha, U. Madhow, and G. Barriac, “Scalable feedback control for distributed beamforming in sensor networks,” in *Proc. IEEE Intl. Symp. Inf. Theory, ISIT’05*, pp. 137-141, Sept. 2005.
- [9] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [10] M. Suk, S. Cho, K. Lee, and J. Chun, “A new calibration algorithm for cellular CDMA antenna arrays” in *Proc. IEEE 56th VTC*, pp. 266-269, Vancouver, Canada, Sept. 2002.

이 성 복 (Sung-bok Lee)



2016년 2월 : 부경대학교 전자공학과 졸업
 2016년 3월~현재 : 부경대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 통신공학, OFDM, 인지무선기술

이 종 혁 (Jonghyeok Lee)



2011년 3월~현재 : 부경대학교 전자공학과 학사과정
 <관심분야> 통신공학, 사물인터넷, 인지무선기술

박 재 현 (Jaehyun Park)



2003년 2월 : KAIST 전기 및 전자 공학과 학사
 2010년 2월 : KAIST 전기 및 전자 공학과 박사
 2010년~2013년: 한국전자통신연구원, 선임연구원
 2013년~2014년 : Imperial

College London, Research Associate
 2014년~현재 : 부경대학교 조교수
 <관심분야> 다중안테나 기반 통신 신호처리, 동시 전력 및 정보 전송 기술, 인지무선기술