

# 분산 빔포밍을 이용한 시스템에서 동기예러에 의한 시스템 성능 영향 분석

김해수<sup>†</sup>, 권성근<sup>††</sup>

## System Performance with Synchronization Errors in Distributed Beamforming Systems

Haesoo Kim<sup>†</sup>, Seong-Geun Kwon<sup>††</sup>

### ABSTRACT

Three synchronization issues, i.e., phase, frequency, and symbol time, have to be properly controlled to achieve distributed beamforming gain. In this paper, the impacts of synchronization errors in distributed beamforming are analyzed for both single-carrier and OFDM systems. When the channel is constant over a symbol duration, the performance degradation due to phase offset is the same for both single-carrier and OFDM systems. For symbol timing offset in OFDM systems, high frequency subcarriers are more susceptible as compared to low frequency ones. Frequency offset is critical in OFDM systems since it leads to interference from the other subcarriers as well as power loss in the desired signal.

**Key words:** Cooperative Communications, Distributed Beamforming, Synchronization Errors

### 1. 서 론

협력통신(cooperative communications)은 소형 이동통신 단말에서 장착 안테나의 수나 전력의 한계를 극복할 수 있는 방법으로 관심을 받고 있는 통신 방식이다. 협력통신의 기본 개념은 다수의 단말에 장착된 안테나들을 이용하여 가상의 다중 안테나 통신 방식을 구현하는 것이다[1-3]. 분산 빔포밍(distributed beamforming)은 협력통신에 참여하는 다수의 단말을 이용하여 시스템의 성능을 높이는 방법 중의 하나로, 다수의 협력노드(cooperating nodes)에서 송수신한 동일한 신호를 적절한 신호처리를 통해 빔포밍 이득을 얻는 방법이다.

기존의 단일 단말을 이용한 송신 빔포밍 방법에서는 송신단에서 하나의 발진기(oscillator)를 사용하고 안테나 사이의 간격이 크지 않기 때문에 각 안테나에서 전송되는 신호의 위상 동기만을 주로 고려하였다. 그러나 분산 빔포밍의 경우 서로 다른 위치에 있는 다수의 단말들이 각각의 발진기를 사용하여 동일한 신호를 전송하기 때문에 빔포밍 이득을 얻기 위해서는 위상 동기뿐만 아니라 주파수 및 시간 동기까지 고려해 주어야 한다.

주파수 및 위상 동기를 얻기 위한 방법으로 기준 신호나 피드백 신호를 이용하는 방법들이 연구되었다[4-7]. 그리고 송수신단의 신호전송 과정에서 수신 패킷에 에러가 발생한 경우 이를 재전송하는 과정에

※ Corresponding Author : Seong-Geun Kwon, Address: (712-701) Gamasil-gil 50, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongbuk, Korea, TEL : +82-53-600-5544, FAX : +82-53-600-5559, E-mail : sgkwon@kiu.ac.kr

Receipt date : Mar. 10, 2015, Approval date : Mar. 30, 2015

<sup>†</sup> Dept. of Electronics Engineering, Kyungil University (E-mail : haesookim@kiu.ac.kr)

<sup>††</sup> Dept. of Electronics Engineering, Kyungil University

※ This research was supported by Fire Fighting and 119 Rescue Technology Research and Development Program from Ministry of Public Safety and Security (2014-NEMA16-007-01010000-2014)

분산 빔포밍을 이용하는 효율적인 협력통신 방식이 제안 되었는데, 이때 분산 빔포밍을 통해 전달되는 신호의 동기는 재전송을 요구하는 패킷을 통해 얻는 방식을 이용하고 있다[8]. 분산 빔포밍을 사용하는 협력통신 방식에서의 채널 용량 및 평균 패킷 전송 지연에 대한 분석이 있었으나, 이는 완전한 동기가 이루어졌다는 가정 하에 이루어졌다[9]. 또한 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 시스템에서 분산 빔포밍을 이용한 경우 동기 어러의 영향에 대한 분석이 진행되었다[10]. 그러나 단일 반송파 (single carrier) 시스템에서의 동기어러 분석 및 OFDM 시스템과의 성능 비교에 대한 분석은 진행되지 않았다.

본 논문에서는 분산 빔포밍을 사용하는 협력통신 방식에서 단일 반송파를 사용하는 경우의 동기어러에 대한 영향을 분석하고, 이를 OFDM 시스템에서의 성능과 비교 분석을 진행하고자 한다. 동기어러의 분석에서는 협력통신에 참여하는 단말들과 수신단 사이의 거리 차이에 의한 수신신호의 시간 동기 차이에 의한 영향, 전송신호들의 채널들에 의한 위상 동기 차이에 의한 영향 및 협력통신에 참여하는 각 단말들의 발진기의 차이에서 발생하는 주파수 동기 차이에 의한 영향을 분석하고, 각각의 동기가 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 그리고 세 가지 동기 차이에 의한 단일 반송파 시스템과 OFDM 시스템의 성능을 분석 및 시뮬레이션을 통해 비교 하였다. 성능 비교 분석 결과 분산 빔포밍을 통해 전송되는 신호들이 비교적 작은 동기 차이를 보이는 경우 단일 반송파 시스템과 OFDM 시스템은 비슷한 성능을 보이나, OFDM 시스템은 주파수 차이가 커질 경우 급속한 성능 감소가 발행함을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려하는 분산 빔포밍 시스템의 모델에 대해서 기술하였다. 3장에서는 단일 반송파 시스템에서 분산 빔포밍 신호들의 시간, 위상, 주파수 차이에 의한 시스템의 성능 영향을 완전 동기 상태와 비교하여 분석하였다. 4장에서는 기존에 분석한 OFDM 시스템에서의 동기 차이에 대한 결과를 간단히 서술하였다. 5장에서는 분산 빔포밍을 이용하는 단일 반송파 시스템과 OFDM 시스템의 성능을 비교 분석하였고, 6장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## 2. 시스템 모델

Fig. 1에서 보이는 바와 같이  $M$ 개의 협력 노드들이 수신 노드에게 동일한 신호를 협력 빔포밍 방식을 통해서 전달하는 시스템을 대상으로 한다. 본 논문의 분석에서는 송신단에서 보낸 신호들이 협력 노드들에게는 정상적으로 전달이 되었고, 해당 신호를 수신한 협력 노드들이 최종 수신단에 분산 빔포밍을 이용하여 전달하는 경우에 한하도록 한다. 수신단에서 협력 노드들이 동시에 보낸 신호들의 합은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \sqrt{\alpha_m} |h_m| x(t - \tau_m) e^{j2\pi f_m t} e^{j\theta_m} + n(t) \quad (1)$$

여기서  $\alpha_m$  과  $h_m$  은  $m$  번째 협력신호의 거리에 따른 신호감쇄 및 채널 특성을 각각 나타낸다.  $x(t)$  는 전송신호를 나타내며,  $\tau_m$ ,  $f_m$ , 그리고  $\theta_m$  은 각각  $m$  번째 협력신호의 심벌 시간 편차(symbol timing offset), 주파수 편차(frequency offset), 위상 편차(phase offset)를 나타낸다. 그리고  $n(t)$  는 수신단에서의 잡음 특성을 나타낸다. 시간 편차는  $-\tau_{\max} \leq \tau_m \leq \tau_{\max}$ , 주파수 편차는  $-f_{\max} \leq f_m \leq f_{\max}$ , 그리고 위상편차는  $-\theta_{\max} \leq \theta_m \leq \theta_{\max}$  의 범위에서 균등하게 분포되어 있다고 가정한다. 또한 전체 수신 전력은 협력통신에 참여하는 노드들의 수에 영향을 받지 않기 위해 협력 노드들의 전체 수로 정규화 하였다. 위의 수신 신호를 기반으로 하여 단일 반송파 및 OFDM 시스템에서 각 동기 어러에 의한 SNR(signal to noise ratio) 감소를 분석한다.

## 3. 단일 반송파 시스템(single carrier system)

### 3.1 심벌 시간 편차에 의한 영향

단일 반송파 시스템에서 심벌 시간 편차만이 있다

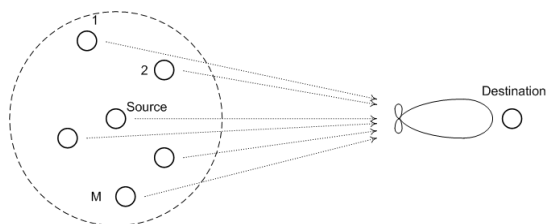


Fig. 1. Cooperative communication system with distributed beamforming.

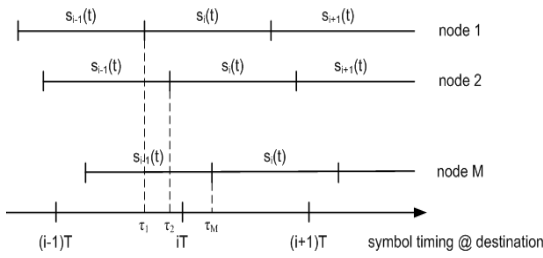


Fig. 2. Symbol timing diagram in distributed beamforming.

고 고려할 때, 식 (1)에 주어진 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \sqrt{\alpha_m} |h_m| x(t - \tau_m) + n(t). \quad (2)$$

협력 신호들 사이에서 수신되는 심벌의 시간 편차가 존재하면, 수신단의 정합필터(matched filter)의 출력에 이웃하여 수신되는 심벌들이 영향을 미치게 된다. Fig. 2에 시간 편차를 가지고 수신되는 협력 신호들에 대한 모델을 보이고 있으며, 심벌의 기간을  $T$ 로 설정하였다.

심벌  $i$ 에 대한 정합 필터의 출력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r(i) = \frac{1}{T} \int_{iT}^{(i+1)T} r(t) x^*(t) dt. \quad (3)$$

$i$ 번째 송신 심벌을  $s_i(t)$ 라 하고, 송신 신호가  $K_s$ 개의 심벌로 구성되었다고 하면,  $s_i(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_i(t) = x(iT+t) \quad 0 < t < T \quad \text{for } i=1, 2, \dots, K_s \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 식 (3)을 다시 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} r(i) &= \frac{1}{T} \int_0^T r(iT+t) s_i^*(t) dt \\ &= \frac{1}{T\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \int_0^T \sqrt{\alpha_m} |h_m| \tau_m s_{i+1}(t) s_i^*(t) dt \\ &\quad + \frac{1}{T\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \int_0^T \sqrt{\alpha_m} |h_m| (T - \tau_m) s_i(t) s_i^*(t) dt \\ &\quad + \frac{1}{T\sqrt{M}} \sum_{m=M_i+1}^M \int_0^T \sqrt{\alpha_m} |h_m| \tau_m s_{i-1}(t) s_i^*(t) dt \\ &\quad + \frac{1}{T} \int_0^T n(iT+t) s_i^*(t) dt \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서  $M_i$ 는 협력 신호 중에서 정합필터의 시간

동기보다 먼저 심벌이 시작되는 협력 신호의 개수를 나타내며 식 (5)의 첫 번째 항에서 보이는 바와 같이 다음 심벌과 ISI(inter-symbol interference)가 발생하게 된다. 동일하게 이전 심벌과의 ISI도 발생하게 되는데 식 (5)의 세 번째 항에 보이고 있다. 위의 분석은 협력 신호들 사이의 최대 시간 편차가 심벌 기간보다 작다는 가정 하에 전개 되었다.

전송 신호가 구형 펄스(square pulse)라고 가정하면, 식 (5)는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} r(i) &= \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^{M_i} \sqrt{\alpha_m} |h_m| \frac{\tau_m}{T} \rho(1) \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \sqrt{\alpha_m} |h_m| \frac{T - \tau_m}{T} \rho(0) \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=M_i+1}^M \sqrt{\alpha_m} |h_m| \frac{\tau_m}{T} \rho(-1) + n(i) \\ &= \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^{M_i} \sqrt{\alpha_m} |h_m| \frac{\tau_m}{T} \rho(1) \\ &\quad + \sqrt{M} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sqrt{\alpha_m} |h_m| \frac{T - \tau_m}{T} \rho(0) \right\} \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=M_i+1}^M \sqrt{\alpha_m} |h_m| \frac{\tau_m}{T} \rho(-1) + n(i) \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서  $\rho(\cdot)$  및  $n(i)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho(k-l) = \int_0^T s_k(t) s_l^*(t) dt \quad (7)$$

$$n(i) = \frac{1}{T} \int_0^T n(iT+t) s_i^*(t) dt. \quad (8)$$

만약  $M$ 이 대수의 법칙(law of large number)를 사용할 수 있을 만큼 충분히 크다면, 식 (6)에 주어진 수식은 다음과 같이 간략화 시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} r(i) &\approx \sqrt{ME} \left[ \sqrt{\alpha_m} |h_m| \frac{T - \tau_m}{T} \rho(0) \right] \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^{M_i} \sqrt{\alpha_m} |h_m| \frac{\tau_m}{T} \rho(1) \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=M_i+1}^M \sqrt{\alpha_m} |h_m| \frac{\tau_m}{T} \rho(-1) + n(i) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $E[x]$ 는  $x$ 에 대한 기대치(expectation)을 나타낸다. 만약 송신 심벌들이 독립적이고 발생할 확률이 동일하다면, 심벌 전력은 다음을 만족한다.

$$E[\rho(i)] = \begin{cases} 1, & i=0 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (10)$$

결과적으로 심벌 시간 편차에 의한 수신 심벌 크기의 평균은 다음과 같다.

$$r_{so} = E[r(i)] = \sqrt{M}E\left[\sqrt{\alpha_m}|h_m|\frac{T-\tau_m}{T}\rho(0)\right] \quad (11)$$

$$= \sqrt{M}E[\sqrt{\alpha_m}]E[|h_m|]E\left[\frac{T-\tau_m}{T}\right]$$

식 (11)에서  $E[\sqrt{\alpha_m}]$ 과  $E[|h_m|]$ 은 무선 채널 환경에 관계된 것으로 심벌의 시간 편차와는 무관하다. 최종적으로 분산 빔포밍을 이용하는 시스템에서 협력 신호들의 심벌 시간 편차가 존재하는 경우, 수신된 신호의 평균 SNR은 다음과 같이 주어진다.

$$SNR = \frac{ME[\sqrt{\alpha_m}]^2 E[|h_m|]^2}{\sigma_n^2} E\left[\frac{T-\tau_m}{T}\right]^2 = SNR_{perf} \cdot L_{so} \quad (12)$$

여기에서  $\sigma_n^2$ 은 잡음 전력,  $SNR_{perf}$ 은 협력 신호들이 완전한 동기를 이루었을 때 얻을 수 있는 최대 SNR을 나타내며 아래와 같이 정의된다.

$$SNR_{perf} = \frac{ME[\sqrt{\alpha_m}]^2 E[|h_m|]^2}{\sigma_n^2} \quad (13)$$

식 (13)에서 보면 분산 빔포밍의 이득은 협력 신호들의 수가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.  $L_{so}$ 은 심벌 시간 편차에 의한 평균 SNR 손실로 다음과 같이 주어진다.

$$L_{so} = E\left[\frac{T-\tau_m}{T}\right] = 20\log\left(\frac{T-\tau_{max}/2}{T}\right) \quad (dB) \quad (14)$$

### 3.2 위상 편차에 의한 영향

협력 신호들 사이에 위상 편차만 있는 상태를 고려하면, 식 (1)에 주어진 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \sqrt{\alpha_m} |h_m| x(t) e^{j\theta_m} + n(t) \quad (15)$$

식 (15)의 수신 신호에 대한 정합필터의 출력은 다음과 같이 주어진다.

$$r(i) = \frac{1}{T} \int_0^T r(iT+t) s_i^*(t) dt \quad (16)$$

$$= \frac{1}{T\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \int_0^T \sqrt{\alpha_m} |h_m| e^{j\theta_m} s_i(t) s_i^*(t) dt + n(i)$$

$$\approx \sqrt{M} E[\sqrt{\alpha_m}] E[|h_m|] E[e^{j\theta_m}] + n(i)$$

식 (16)에서 위상 편차는 패킷 기간 동안 동일하게 유지되는 것으로 가정하였고, 최종 간략화는 시간 편차의 분석에서 사용한 대수의 법칙을 적용하였다. 간략화 된 수식을 사용하여 협력 신호들 사이에 위상

편차가 존재하는 경우의 수신 심벌의 평균 크기는 다음과 같다.

$$r_{po} = \sqrt{M} E[\sqrt{\alpha_m}] E[|h_m|] E[e^{j\theta_m}] \quad (17)$$

최종적으로 분산 빔포밍을 이용하는 시스템에서 협력 신호들의 위상 편차가 존재하는 경우, 수신된 신호의 평균 SNR은 다음과 같이 주어진다.

$$SNR = \frac{ME[\sqrt{\alpha_m}]^2 E[|h_m|]^2}{\sigma_n^2} E[e^{j\theta_m}]^2 = SNR_{perf} \cdot L_{po} \quad (18)$$

여기에서  $L_{po}$ 은 협력 신호들 사이에 존재하는 위상 편차에 의한 평균 SNR 감소로 다음과 같이 주어진다.

$$L_{po} = E[e^{j\theta_m}]^2 = 20\log\left[\frac{\sin(\theta_{max})}{\theta_{max}}\right] \quad (dB) \quad (19)$$

### 3.3 주파수 편차에 의한 영향

분산 빔포밍을 통해 전달되는 협력 신호들 사이에 주파수 편차만이 존재한다고 하면, 식 (1)에 주어진 수신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있고,

$$r(t) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \sqrt{\alpha_m} |h_m| x(t) e^{j2\pi f_m t} + n(t) \quad (20)$$

정합 필터를 통과한 출력은 다음과 같이 주어진다.

$$r(i) = \frac{1}{T} \int_0^T r(iT+t) s_i^*(t) dt \quad (21)$$

$$= \frac{1}{T\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \int_0^T \sqrt{\alpha_m} |h_m| e^{j2\pi f_m i T} e^{j2\pi f_m t} s_i(t) s_i^*(t) dt + n(i)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \sqrt{\alpha_m} |h_m| e^{j2\pi f_m i T} \frac{e^{j2\pi f_m T} - 1}{j2\pi f_m T} + n(i)$$

$$\approx \sqrt{M} E[\sqrt{\alpha_m}] E[|h_m|] E\left[\frac{e^{j2\pi f_m T} - 1}{j2\pi f_m T}\right] + n(i).$$

식 (21)의 최종 간략화에서도 대수의 법칙이 사용되었다. 식 (21)에 주어진 주파수 편차에 따른 수신 심벌의 평균 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$r_{fo} = \sqrt{M} E[\sqrt{\alpha_m}] E[|h_m|] E\left[E_i[e^{j2\pi f_m i T}] \frac{e^{j2\pi f_m T} - 1}{j2\pi f_m T}\right] \quad (22)$$

$$= \sqrt{M} E[\sqrt{\alpha_m}] E[|h_m|] E\left[\frac{e^{j2\pi f_m K_s T} - 1}{j2\pi f_m K_s T} \cdot \frac{e^{j2\pi f_m T} - 1}{j2\pi f_m T}\right].$$

식 (22)에 주어진 수신 심벌의 평균 크기를 이용하여 협력 신호들 사이에 주파수 편차가 존재하는 경우의 평균 SNR을 계산하면 다음과 같고,

$$SNR = \frac{ME[\sqrt{\alpha_m}]^2 E[|h_m|]^2}{\sigma_n^2} E\left[\left[\frac{e^{j2\pi f_m K_s T} - 1}{j2\pi f_m K_s T} \cdot \frac{e^{j2\pi f_m T} - 1}{j2\pi f_m T}\right]^2\right] \quad (23)$$

$$= SNR_{perf} \cdot L_{fo}$$

여기에서  $L_{fo}$ 는 협력 신호들 사이의 주파수 편차에 의한 평균 SNR 감소로 다음과 같이 주어진다.

$$L_{fo} = E \left[ \left| \frac{e^{j2\pi f_m K_s T} - 1}{j2\pi f_m K_s T} \cdot \frac{e^{j2\pi f_m T} - 1}{j2\pi f_m T} \right|^2 \right] = 20 \log \left( \frac{(K_s + 1)Si(\pi f_{\max}(K_s + 1)T)}{2\pi f_{\max} K_s T} - \frac{(K_s - 1)Si(\pi f_{\max}(K_s - 1)T)}{2\pi f_{\max} K_s T} - \frac{\sin(\pi f_{\max} T)\sin(\pi f_{\max} K_s T)}{\pi^2 f_{\max}^2 K_s T^2} \right) \quad (24)$$

여기에서  $Si(x)$ 는 사인 적분(sine integral)으로 다음과 같이 정의된다.

$$Si(x) = \int_0^x \frac{\sin u}{u} du. \quad (25)$$

최종적으로 분산 빔포밍을 이용하는 단일 반송파 시스템에서 협력 신호들의 세 가지 편차를 조합하면 수신 신호의 SNR은 다음과 같이 표현되며,

$$SNR = SNR_{perf} L_{so} L_{po} L_{fo} \quad (26)$$

여기에서 첫 번째 항은 완전한 동기가 이루어졌을 때 얻을 수 있는 최대 SNR을 나타내고, 그 후의 세 항은 각각의 편차에 따른 SNR 손실을 나타낸다.

#### 4. OFDM 시스템

OFDM 시스템에서 분산 빔포밍 방법을 사용한 협력 통신을 사용하는 경우, 심벌 시간 편차 및 주파수 편차에 의한 SNR의 손실은 부반송파 번호(subcarrier number)와 상관관계를 가진다. 각 세 가지 편차에 대한 자세한 분석은 [10]을 참조하고, 본 논문에서는 최종 결과만을 보인다.

OFDM 시스템에서 협력 신호들의 심벌 시간 편차에 의한 부반송파  $k$ 에서의 SNR 손실은 다음과 같이 주어지며,

$$SNR = SNR_{perf} L_{so,k} \quad (28)$$

여기에서  $SNR_{perf}$ 는 단일 반송파 시스템과 동일하고,  $L_{so,k}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$L_{so,k} = 20 \log \left[ \text{sinc} \left( \frac{k\tau_{\max}}{T} \right) \right] \quad (27)$$

위상 편차에 의한 부반송파  $k$ 에서의 SNR 손실은 다음과 같이 주어지며,

$$SNR = SNR_{perf} L_{po,k} \quad (29)$$

여기에서  $L_{po,k}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$L_{po,k} = 20 \log \left[ \frac{\sin(\theta_{\max})}{\theta_{\max}} \right] \quad (30)$$

식 (30)에서 보는 바와 같이, 위상 편차에 의한 시스템의 성능 영향은 부반송파 번호에 무관하고 단일 반송파 시스템과 동일한 영향을 미친다.

OFDM 시스템에서 주파수 편차에 의한 영향은 SNR 손실뿐만 아니라, 부반송파 사이의 간섭을 발생 시키게 된다. 따라서 주파수 편차에 의한 시스템의 영향은 SNIR(signal to interference noise ratio)을 고려해야 하며, 부반송파  $k$ 에서의  $SINR$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$SINR(k) = \frac{SNR_{perf} L_{fo,k}^2}{SNR_{perf} (1 - D_{fo,k})^2 / 4 + 1} \quad (31)$$

여기에서  $D_{fo,k}$ 와  $L_{fo,k}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$D_{fo,k} = \frac{Si(2\pi f_{\max} T)}{2\pi f_{\max} T} \quad (32)$$

$$L_{fo,k} = 20 \log D_{fo,k} \quad (33)$$

#### 5. 시스템 성능 비교

본 절에서는 분산 빔포밍을 이용하는 단일 반송파 시스템과 OFDM 시스템에서 각 편차에 의한 영향을 비교하고, 특정 편차값들을 사용하여 두 시스템에 편차가 미치는 영향을 살펴보기로 한다.

먼저 협력 신호들 사이의 위상 편차에 의한 영향은 식 (19)와 (30)에서 보인 바와 같이 동일하다. Fig. 3

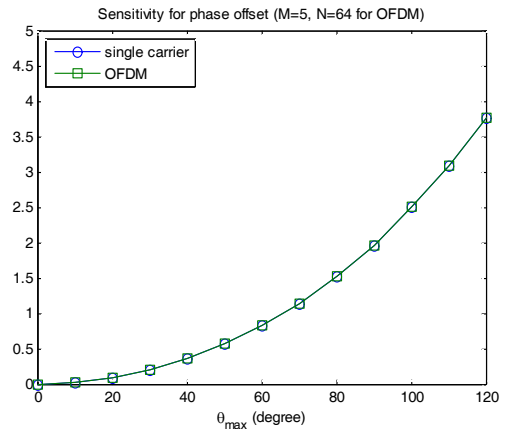


Fig. 3. SNR reduction due to phase offset in distributed beamforming.

는 협력 노드의 수가 5일 때, 즉  $M = 5$ , 두 시스템에서 최대 위상 편차를 변경하면서 SNR 손실 정도를 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 위상 편차가 과도하지 않은 경우에는 성능에 대한 영향은 크지 않으나, 위상 편차를 적절하게 제어하지 않으면 급격하게 성능에 영향을 키는 것을 볼 수 있다.

OFDM 시스템은 일반적으로 가드 인터벌(guard interval)에 주기적 전치 부호(cyclic prefix)를 사용하여 심벌의 시간 오차가 가드 인터벌보다 작은 경우에는 단순히 위상을 보상해 주는 방법으로 시간 오차에 의한 영향을 제거할 수 있는 장점이 있다. 그러나 분산 빔포밍을 사용하는 경우에는 협력 신호들 사이의 시간 편차가 상이하기 때문에 이러한 장점을 살릴 수가 없는 문제가 발생하게 된다. Fig. 4는 단일 반송파 및 OFDM 시스템에서 심벌 시간 편차에 따른 SNR 손실을 보이고 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 OFDM 시스템의 낮은 번호의 부반송파에서는 심벌 시간 편차에 대한 영향이 크지 않으나 높은 번호의 부반송파에서는 시간 편차에 의한 위상 변이 정도가 커짐에 따라 영향이 크게 나타나고 있다.

OFDM 시스템은 적절한 심벌 시간 편차에 대해서는 단일 반송파 시스템보다 일반적으로 우수한 성능을 보이나 주파수 편차가 있는 경우에는 성능에 민감한 영향을 나타낸다. 이는 주파수 편차에 의한 SNR 손실뿐만 아니라 이에 따른 부반송파간 간섭(inter-carrier interference)에 의한 것이다[10]. Fig. 5는

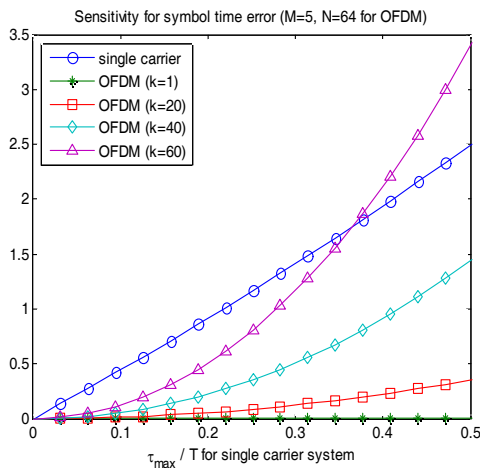


Fig. 4. SNR reduction due to symbol timing offset in distributed beamforming.

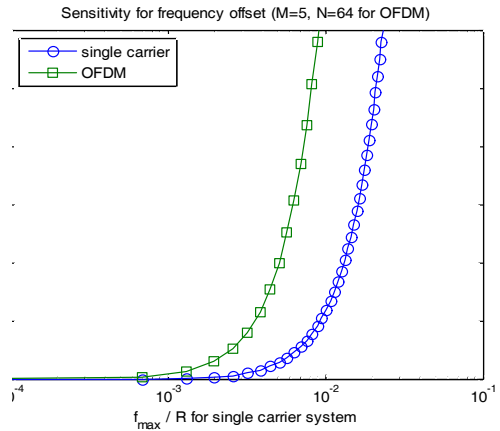


Fig. 5. SNR reduction due to frequency offset in distributed beamforming.

OFDM 시스템에서는 64개의 부반송파를 이용하고, 단일 반송파 시스템에서는 동일 시간동안 64개의 심벌( $K_s = 64$ )을 전송한다고 할 때 주파수 편차에 따른 SNR 손실을 보인 것이다.

Fig. 6은 특정 편차를 선택하여 협력 신호의 수를 변경하면서 얻을 수 있는 SNR(OFDM 시스템에서는 SINR)을 나타낸 것이다. 분석 및 모의실험에서 협력 신호의 평균 수신 SNR은 5 dB, 무선 채널은 Rayleigh 분포를 따르는 것을 가정하였다. 그 밖의 모의실험 변수들은 Table 1에 명시하였다. 분석 결과는 모의실험 결과와 잘 일치하고 있으나, 협력 신호의 수가 적은 부분에서는 일부 차이가 발생하고 있

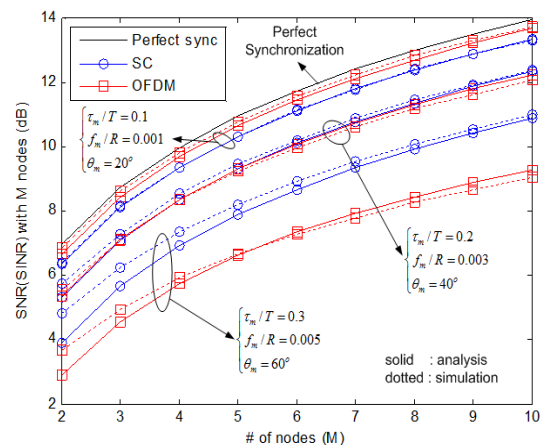


Fig. 6. Achievable SNR(SINR) with various number of cooperating signals and offset values.

Table 1. Simulation parameters

Parameters	Values
Data rate (R)	1, 2 Mbps
Number of subcarriers	64
OFDM symbol duration	64 $\mu$ s
Cyclic prefix	8 $\mu$ s
Number of simulation packets	4000
Number of cooperating signals	2-10
Average SNR of cooperating signals	5 dB

다. 이는 분석 결과를 얻는 과정에서 대수의 범칙을 사용하였기 때문에 충분한 협력 신호의 수가 확보되지 않는 경우에 오차가 발생한 것으로, 편차들의 값들이 크지 않는 경우에는 이에 따른 영향이 적은 것을 그림에서 확인할 수 있다. 분석 및 모의실험 결과 적절한 편차를 가지는 경우, 분산 빔포밍 방식은 단일 반송파 및 OFDM 시스템에서 우수한 성능을 얻을 수 있을 것으로 보인다. 그러나 OFDM 시스템의 경우 협력 신호들의 주파수 편차가 크게 발생하는 경우 시스템의 성능이 급격히 저하되는 현상을 보이기 때문에 이의 적절한 제어가 필요할 것으로 보인다.

## 6. 결 론

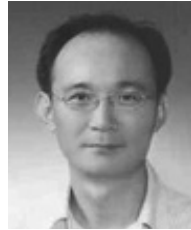
본 논문은 분산 빔포밍을 사용하는 협력 통신 방식에서 협력 신호들 간의 심벌 시간 편차, 위상 편차 및 주파수 편차에 의한 시스템의 성능 영향을 분석한 것으로, 단일 반송파 및 OFDM 시스템에서 각각의 편차가 미치는 영향을 분석하였고, 특정 편차 값들을 선정한 모의실험을 통해 두 시스템의 성능을 비교하였다. 협력 신호들의 위상 편차에 의한 영향은 두 시스템에 동일하게 적용 되었으며, 심벌 시간 편차는 OFDM 시스템의 상위 부반송파에 보다 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 주파수 편차의 경우는 OFDM 시스템에서 영향이 큰 것으로 나타났으며, 이는 단순한 SNR 손실뿐만 아니라 부반송파간의 간섭을 야기하기 때문에 발생하는 것으로 분산 빔포밍을 사용하는 OFDM 시스템에서는 주파수 편차에 대한 주의가 필요하다.

## REFERENCE

- [ 1 ] J.N. Laneman, D.N.C. Tse, and G.W. Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 50, No. 12, pp. 3062-3080, 2004.
- [ 2 ] T.E. Hunter and A. Nosratinia, "Diversity through Coded Cooperation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 5, No. 2, pp. 283-289, 2006.
- [ 3 ] R. Mudumbai, G. Barriac, and U. Madhow, "On the Feasibility of Distributed Beamforming in Wireless Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 6, No. 5, pp. 1754-1763, 2007.
- [ 4 ] D.R. Brown III, G. Prince, and J. McNeil, "A Method for Carrier Frequency and Phase Synchronization to a Distant Stationary Antenna through AWGN Channel," *Proceeding of IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, pp. 278-282, 2005.
- [ 5 ] D.R. Brown III and H.V. Poor, "Time-slotted Round-Trip Carrier Synchronization for Distributed Beamforming," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 56, No. 11, pp. 5630-5643, 2008.
- [ 6 ] R. Mudumbai, J. Hespanha, U. Madhow, and G. Barriac, "Scalable Feedback Control for Distributed Beamforming in Sensor Networks," *Proceeding of IEEE International Symposium on Information Theory*, pp. 137-141, 2005.
- [ 7 ] J. Kim, "Bandwidth Requirement and Priority-based Synchronization Methods in Hybrid Client-Server Architecture for Mobile Multi-player Games," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 17, No. 4, pp. 526-534, 2014.
- [ 8 ] H. Kim and R.M. Buehrer, "A Technique to Exploit Cooperation for Packet Retransmis-

sion in Wireless Ad Hoc Networks,” *Journal of Communications and Networks*, Vol. 10, No. 2, pp. 148-155, 2008.

- [ 9 ] H. Kim, “Throughput and Delay Performance with a Cooperative Retransmission Scheme Using Distributed Beamforming,” *Journal of Communications and Networks*, Vol. 13, No. 4, pp. 306-312, 2011.
- [10] H. Kim and K. Lee, “Effect of Synchronization Errors with Distributed Beamforming in OFDM Systems,” *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 51, No. 1. pp. 3-10, 2014.



김 해 수

1993년 고려대학교 전자공학과  
학사

1995년 고려대학교 전자공학과  
석사

2008년 Virginia Tech. ECE 박사

1995년~2000년 삼성전자 정보통신  
신연구소 선임연구원

2009년~2010년 LG전자 MC연구소 책임연구원

2010년~현재 경일대학교 전자공학과 부교수

관심분야 : 무선통신, 협력통신, 인지통신, 센서네트워크



권 성 근

1996년 경북대학교 전자공학과  
학사

1998년 경북대학교 전자공학과  
석사

2002년 경북대학교 전자공학과  
박사

2002년~2011년 삼성전자 무선사업부 책임연구원

2011년~현재 경일대학교 전자공학과 부교수

관심분야 : 멀티미디어 암호, 모바일 방송, 워터마킹