

## 원형 배열 안테나 빔 형성을 위한 안테나 선택 및 제어 방법

### Antenna Selection and Power Control Method for Uniform Circular Array Antennas Beamforming

박 성 호*	박 철**	김 한 니**	정 재 학***
(Seongho Park)	(Chul Park)	(Hanna Kim)	(Jaehak Chung)
(Inha Univ.)	(ETRI)	(ETRI)	(Inha Univ)

· Corresponding author : Jaehak Chung(Inha Univ.), E-mail jchung@inha.ac.kr

#### 요 약

본 논문에서는 원형 배열 안테나를 장착한 차량이 이동하면서 메시 네트워크 환경을 구성할 때 다중 노드 빔 형성을 위한 안테나 선택 방식과 전력 제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 안테나 선택 방법은 안테나의 방사 이득을 고려하여 빔 형성을 위한 안테나를 선택하고, 두 개 이상의 노드가 인접할 경우 배열 이득을 최대화하기 위해 안테나를 중복으로 선택한다. 제안한 전력 제어 알고리즘은 중복 안테나 선택 시 SIR이 최대가 되도록 각 안테나의 전력을 제어한다. 전산 모의 실험을 통하여 제안한 알고리즘을 적용하여 기존의 방식과 비교하여 두 노드가 15° 로 인접했을 때 최대 2.5 dB의 SIR 향상을 보인다.

핵심어 : 무선 메시 네트워크, 전력 제어, 원형 배열 안테나, 패치 안테나, 빔포밍

#### ABSTRACT

This paper proposes the antenna selection scheme and power control algorithms of multiple nodes beamforming when the vehicles equipped with circular array antennas is moving and construct mobile mesh networks. The proposed antenna selection scheme chooses beamforming antenna elements considering antenna radiation gain and allows duplicated antenna selection for multiple adjacent nodes. The proposed power control algorithms maximize SIR for the duplicated antenna selection. The simulation demonstrates that the proposed antenna selection and power control achieve 2.5dB higher SIR gain than that of conventional methods when two nodes are apart from 15°.

**Key words** : Wireless mesh network, power control, uniform circular array antenna, patch antenna, beamforming

† 본 논문은 민군겸용기술사업 (Dual Use Technology Program)의 지원을 받아 작성되었습니다.

\* 주저자 : 인하대학교 전자공학과 석사과정

\*\* 공저자 : 한국전자통신연구원 (ETRI) 연구원

\*\*\* 교신저자 : 인하대학교 전자공학과 교수

† Received 10 November 2014; reviewed 7 January 2015; Accepted 20 January 2015

## I. 서 론

무선 메쉬 네트워크 (Wireless mesh network)는 고정되어 있는 유선 네트워크에 의존하지 않고 무선 망을 이용하여 네트워크를 구축할 수 있는 기술이다. 무선 메쉬 네트워크는 이동하는 차량 간의 정보 교환을 위한 통신 네트워크를 구성할 때 효율적이며 차량 간의 링크가 끊어져도 무선 메쉬 라우팅에 의해 링크가 계속 유지될 수 있는 장점이 있다. 그러므로 무선 메쉬 네트워크 기법은 차량의 긴급 재난 상황, 건설 현장 등 다양한 환경에서 네트워크를 구축하기 위한 방법으로 고려되고 있다<sup>1-3)</sup>.

메쉬 네트워크가 안정적으로 운용되기 위해서는 각각 노드의 물리 계층 링크 성능을 높이는 것이 필요하다. 다중 안테나를 이용한 빔 형성 기법은 이러한 물리 계층의 성능을 높이기 위한 방법 중의 하나이다<sup>4)</sup>. 무선 메쉬 네트워크에서 각 노드들이 이동을 하는 경우 이동하는 노드들이 다양한 위치에 존재하기 때문에 각 노드들의 성능을 유지시켜 주는 방법이 필요하다. 따라서 전 방위에 위치한 노드들에게 균일한 방사 패턴을 제공하기 위해서 원형 배열 안테나가 사용된다.

원형 배열 안테나를 사용하여 다중 노드를 위한 빔 형성을 할 때 각 노드들은 임의의 방향으로 이동할 수 있으며 두 개의 노드들이 유사한 위치에 있는 경우도 발생한다. 이 노드들의 링크를 안정적으로 연결하기 위해서는 다중 빔에 대한 각 노드의 신호 대 잡음 비 (signal to noise ratio: SNR)가 최대화되도록 안테나를 선택해야 한다. 그리고 여러 노드가 서로 인접해 있을 때는 안테나를 중첩하여 선택해야 할 필요가 있다. 다중노드에 대해서 SNR을 최대화하도록 중첩되어 선택된 안테나의 전력 제어가 필요하다. 그러므로 본 논문에서는 원형 배열 안테나를 사용하여 이동성이 있는 다중 노드를 위한 빔 형성에 적용할 경우의 안테나 선택 방법을 제안하고 안테나가 중첩되었을 경우 수신단에서의 SNR이 최대화되도록 안테나의 전력 제어 기법을 세 가지로 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 기본적인

인 빔 형성 기법을 설명하고, 원형 배열 안테나 모델에 대해 설명한다. III장에서 이동 메쉬 네트워크를 위해 제안한 안테나 선택과 전력 제어 방법을 설명한다. IV장에서 전산 모의 실험을 통해 제안된 안테나 선택 및 전력 제어 방법을 적용했을 때에 신호 대 잡음 비가 향상되는 것을 보이고 마지막 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 균일 원형 배열 안테나

### 1. 빔 형성 기법

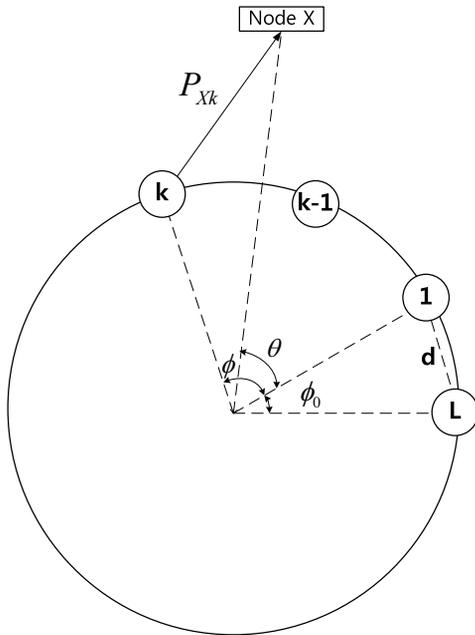
무선 메쉬 네트워크에서 사용되는 빔 형성 기법을 알아보기 위해 본 절에서는 빔 형성의 기법에 대해 설명한다. 빔 형성의 가중치 벡터를 계산하기 위한 다양한 적용형 알고리즘이 있는데, 일반적으로 신호의 도래 방향 (Direction of Arrival: DOA)을 이용하여 가중치 벡터를 구하는 Spatial reference beamforming (SRB)와 기준 신호를 이용하여 가중치 벡터를 구하는 Temporal reference beamforming (TRB)가 있다. SRB 방식의 빔 형성 알고리즘으로는 지연-합 빔 형성, Null-steering 빔 형성 등의 다양한 기법들이 있다<sup>5-7)</sup>. 이러한 빔 형성 방법들은 선형 및 원형 배열 안테나에 적용될 수 있다. 본 논문에서는 무선 메쉬 네트워크에 사용되는 노드들을 위한 빔 형성 기법을 위한 안테나 선택 및 전력 제어 방법을 보이기 위해 빔의 지향성을 위해 지연-합 빔 형성 기법을 사용하고 전력 제어를 위해서는 안테나의 채널 값과 이득 크기를 반영한 Maximum Ratio Transmit (MRT)<sup>8)</sup> 기법을 적용한다.

### 2. 원형 배열 안테나 모델

본 절에서는 다양한 위치에 있는 노드에게 안정적인 물리계층 접속을 위하여 원형 배열 안테나를 사용한다. 그림 1은  $L$ 개의 안테나로 구성된 원형 배열 안테나를 나타낸다<sup>9)</sup>.

그림 1에서 나타내고 있는 원형 배열 안테나 모델에서 안테나 간격은  $d$ 이고  $\lambda/2$ 의 값을 갖는다. 여기서  $\lambda$ 는 반송신호의 파장이다. 노드의 위치는

기준 안테나에서  $\theta$ 의 각을 이루고 있다. 노드와의 거리가 멀리 있는 경우 신호는 평면파로 가정할 수 있다.  $\theta$ 에 위치한 노드  $x$ 에 대해 안테나  $k$ 의 빔 형성 벡터  $W_{xk}(\theta)$ 를 나타내면 식 (1)과 같다.



〈그림 1〉 균일 원형 배열 안테나 모델  
〈Fig. 1〉 Uniform circular array antenna model

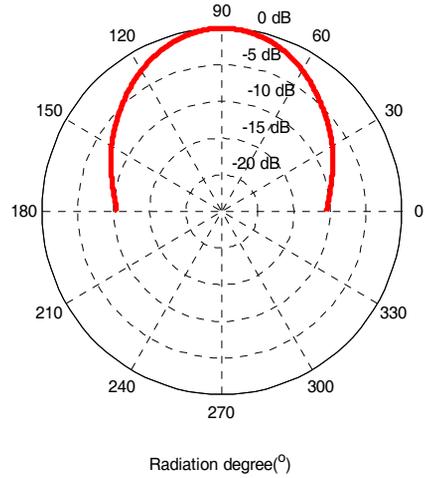
$$W_{xk}(\theta) = P_{xk} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \cos\{(k-1)\phi_0 - \theta\}}, \quad (1)$$

여기서  $P_{xk}$ 는  $x$  노드를 향해 빔을 형성할 때 안테나  $k$ 에 할당되는 전력을 나타낸다.  $\phi_0$ 는 안테나 간의 각도,  $\phi$ 는 기준 안테나와 안테나  $k$ 의 각도,  $\theta$ 는 DOA 측정 기법에 의해 계산된 노드  $x$ 의 각도를 나타낸다.

### III. 안테나 선택 및 제어 방법

#### 1. 원형 배열을 사용한 이동 노드 빔 형성을 위한 안테나 선택 방식

본 논문에서 채용한 원형 배열 안테나는  $L$ 개의 안테나로 구성되어 있으며 각 안테나는 패치 안테



〈그림 2〉 패치 안테나의 방사각에 따른 방사이득(dB)  
〈Fig. 2〉 Radiation gain(dB) for radiation angle of patch antenna

나를 사용한다. 그림 2는 패치 안테나의 수평 방사 패턴을 표시한 것으로써 단일 노드가 각도  $0^\circ$ 의 위치에 있다면 안테나 이득이 제일 크게 되고 노드가  $90^\circ$ 로 갈수록 방사 이득이 줄어들게 된다.  $L$ 개의 안테나로 구성된 원형 배열 안테나에서 단일 노드의 빔 형성을 위해 사용 가능한 안테나 개수는 1개에서 최대  $L/2$ 개이다. 안테나 수가 증가할수록 노드의 수신 전력이 증가하지만 인접한 다중 노드를 위해 빔을 형성하는 경우 각 노드의 신호 크기를 최대로 하는 동시에 다른 노드에 미치는 간섭을 줄이도록 안테나를 선택해야 한다. 그러므로 본 절에서는 노드를 위한 빔 형성 안테나 선택 방식을 제안한다.

안테나를 선택하고 전력을 제어할 때 단일 노드만을 고려하는 경우 모든 안테나의 전력을 최대로 할당하여 최대의 안테나 이득을 기대할 수 있다. 그러나 원형 안테나에 사용된 패치안테나의 각도에 따른 불균등한 방사이득으로 인해, 노드와의 거리가 먼 안테나의 경우 해당 노드에서의 수신 신호의 크기가 작고 해당 안테나와 근접해있는 다른 노드에게는 상대적으로 큰 간섭신호를 생성하게 된다. 그러므로 신호를 전송하려는 노드의 수신 신호 전력을 증가시키고 다른 노드에 미치는 간섭의 크기

를 줄이기 위해서는 신호 전송 노드에 가까운 안테나의 전력을 증가시키고 다른 안테나들의 전력을 감소시켜야 한다.

다중 노드의 경우 한 노드를 위한 적절한 안테나 수를 선택하기 위해서는 안테나 수를 늘려가면서 빔 형성 이득의 증가폭이 평균 이득보다 작아지는 안테나의 수를 선택하면 해당 노드의 전력을 증가시키고 다른 노드에 주는 간섭을 줄일 수 있다. 식 (4)는 한 노드에 대한 빔 형성을 위한 안테나 선택 조건을 나타낸다.

$$P_i = \sum_{k=1}^i P_{mk}, \quad (2)$$

$$P_{average} = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i P_i, \quad (3)$$

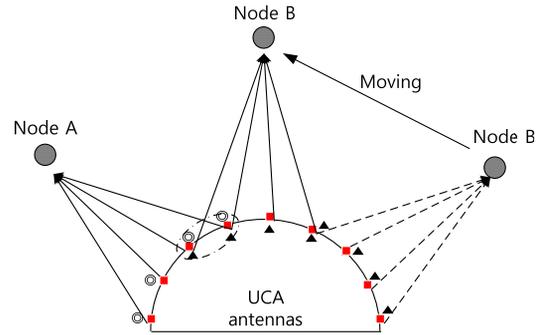
$$\arg \max_i (P_{i+1} - P_i < P_{average}), \quad (4)$$

여기서  $P_{mk}$ 는 안테나  $k$ 에서 노드  $m$ 의 빔 형성을 위해 할당된 전력,  $P_i$ 는  $i$ 개의 안테나를 이용하여 빔 형성을 했을 때 수신노드가 받는 신호의 빔 형성 전력, 그리고  $P_{average}$ 는 1개부터  $i$ 개까지의 안테나를 사용해서 수신된 전력의 평균 전력을 의미한다. 원형 배열 안테나를 사용하는 다중 노드 빔 형성의 경우 많은 수의 안테나를 선택하는 경우 안테나의 방사패턴에 의해서 한 노드에 기여하는 전력이득의 증가폭이 커지지 않고 다른 노드에 주는 간섭이 증가하기 때문에 평균보다 적은 이득을 보이는 안테나는 선택하지 않는다.

## 2. 다중 노드 빔 형성을 위한 전력 제어 방법

본 절에서는 원형 배열 안테나를 사용할 때 다중 노드가 서로 인접한 경우 각각의 노드를 위한 빔 형성 안테나 선택 방법과 각 안테나의 전력 제어하는 세 가지 기법을 제안한다.

먼저 인접한 두 노드를 위한 안테나 선택 방법에 대해서 설명한다. 두 개 이상의 이동 노드를 위해 다중 안테나를 선택하는 경우 단일 노드만을 위한



〈그림 3〉 노드의 이동으로 발생한 인접 상황  
 〈Fig. 3〉 Adjacency situation caused by moving of node

빔 형성의 경우와 달리 두 개의 이동 노드가 인접할 때 각 노드를 위하여 선택된 안테나는 중복되어 선택되는 경우가 존재한다. 그림 3은 4개의 선택된 안테나를 이용하여 빔 형성하는 경우 오른쪽의 노드  $B$ 가 이동하여 노드  $A$ 와 인접하는 경우를 나타낸다. 이때 2개의 안테나가 중복되어 선택된다. 이 경우 두 가지의 빔 형성 방법을 고려할 수 있다. 첫 번째는, 노드가 옆으로 이동하더라도 빔 형성을 해주는 안테나를 계속 고정하는 방법이다. 이 방법은 패치안테나의 방향에 따른 이득변화로 인해 수신되는 안테나의 이득이 감소한다. 두 번째로, 다중 노드 빔 형성을 위해 안테나를 중복으로 선택하여 빔 형성을 하는 것이다. 각 노드의 수신 전력을 최대화하기 위해서는 가장 가까운 안테나에 할당된 전력이 최대가 되어야 한다. 두 노드 간의 각도 차이가 큰 경우에는 중첩하지 않고 안테나 선택을 하여도 최대 전력을 유지할 수 있다. 그러나 두 노드 간의 각도가 감소하는 경우 패치 안테나의 각도에 따른 방사 이득 차이 때문에 안테나를 중첩하여 선택하는 것이 노드의 수신 전력을 크게 할 수 있다.

두 노드가 인접하여 안테나를 중복하여 선택하는 경우 두 노드를 위한 빔 형성을 위해 전력이 중복되어 할당된다. 이 때 할당되는 전력의 합이 고출력 증폭기(High Power Amplifier - HPA)의 최대 출력  $P_{HPA}$ 을 초과하는 문제가 발생된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 세 가지 전력 제어 방법을 제안한다.

첫 번째 전력 제어 방식은  $P_{HPA}$ 를 초과하는 안테나에 할당된 전력에 대해 모든 안테나에 할당된 전력을 정규화함으로써 최대값이  $P_{HPA}$ 를 만족시키고 다른 안테나의 전력은 줄어든 비율만큼 할당시키는 전체 안테나 정규화 (total power normalization) 방법이다. 빔 형태를 유지하기 위해서는 빔 형성 벡터의 비율을 유지해야 한다. 그러므로 각 안테나에 할당된 전력을 중복 선택된 안테나의 최대 전력의 합이 HPA의 최대 전력이 되도록 다른 안테나의 전력을 비율에 맞추어 제어한다.

전력을 일정한 비율로 낮추는 방법은 다음과 같이 구할 수 있다. 만일 원형 배열 안테나에서 총  $M$ 개의 노드가 있으며 이 중 노드  $m$ 에 대한 빔 형성을 위해 총  $L$ 개의 안테나 중  $K$ 개의 안테나가 선택되고 이 중 안테나  $k$ 에 할당된 가중치 값을  $G_{mk}$ 라 하였을 때, 노드  $m$ 을 위해 선택된 안테나 전력할당은 집합  $G_m$ 로 정할 수 있으며 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$G_m = \{G_{m1}, G_{m2}, \dots, G_{mk}, \dots, G_{mK}\}, \quad (5)$$

식 (5)를 노드  $n$ 에 적용하여 전력 할당 집합  $G_n$ 을 구하면 식 (6)과 같다.

$$G_n = \{G_{n1}, G_{n2}, \dots, G_{nk}, \dots, G_{nK}\}, \quad (6)$$

노드  $m$ 과 노드  $n$ 의 빔 형성을 위해 안테나에 전력이  $P_{HPA}$ 를 초과하는 경우가 발생한다. 이 경우 중첩되는 전력의 합이  $P_{HPA}$ 가 되도록  $G_m$ 과  $G_n$ 의 전력을 제어해주어야 한다. 이를 위해 먼저 식 (7), (8)과 같이 각 노드에 할당된 가장 큰 전력  $G_{mk_1}^*$ ,  $G_{nk_2}^*$ 를 찾는다.

$$G_{mk_1}^* = \max_{G_{mk} \in G_m} G_{mk}, \quad (7)$$

$$G_{nk_2}^* = \max_{G_{nk} \in G_n} G_{nk}, \quad (8)$$

노드  $m$ 의 빔 형성을 위해 가장 큰 전력이 할당된 안테나가 안테나  $k_1$ , 노드  $n$ 의 빔 형성을 위해 가장 큰 전력이 할당된 안테나가 안테나  $k_2$ 일 때, 해당 안테나에 할당된 전체 전력인  $G_{mk_1}^* + G_{nk_1}$ ,  $G_{nk_2}^* + G_{mk_2}$ 을 비교하여 이 중 더 큰 값이  $P_{HPA}$ 를 초과하는지 식 (9)과 같이 확인한다.

$$\max(G_{mk_1}^* + G_{nk_1}, G_{nk_2}^* + G_{mk_2}) > P_{HPA}, \quad (9)$$

만일 안테나  $k_1$ 에 할당된 전체 전력인  $G_{mk_1}^* + G_{nk_1}$ 이  $P_{HPA}$ 를 초과한다면  $P_{HPA}$ 를 만족시키기 위해 식 (10), (11)처럼 두 노드의 빔 형성을 위한 할당 전력을  $P_{mk_1}$ ,  $P_{nk_1}$ 로 감소시킨다.

$$P_{mk_1} = \frac{G_{mk_1}}{G_{mk_1}^* + G_{nk_1}} \times P_{HPA}, \quad (10)$$

$$P_{nk_1} = \frac{G_{nk_1}}{G_{mk_1}^* + G_{nk_1}} \times P_{HPA}, \quad (11)$$

기존의 빔 형태를 유지하기 위해서는 빔 형성 벡터의 비율을 유지해야 하므로 노드  $m$ 과 노드  $n$ 을 위해 안테나에 할당된 전력을 안테나  $k_1$ 와  $k_2$ 에 할당된 전력이 감소된 비율에 따라 식 (12), (13)과 같이 재조정한다.

$$P_{mk} = \frac{P_{mk_1}}{G_{mk_1}} \times G_{mk} \quad (k \neq k_1), \quad (12)$$

$$P_{nk} = \frac{P_{nk_1}}{G_{nk_1}} \times G_{nk} \quad (k \neq k_1), \quad (13)$$

그러나 이 방식은 할당된 전력 전체를 감소시키기 때문에 빔 형성 이득을 최대로 얻지 못한다.

두 번째 전력 제어 방법은 첫 번째 방법에 의한 빔 형성 이득 감소를 해결하기 위해  $P_{HPA}$ 를 초과하는 안테나에 대해서만 할당된 전력을 기존에 할당된 전력의 비율을 유지하여 최대값이  $P_{HPA}$ 를 갖는 안테나 당 정규화 (per-antenna power normali-

zation) 방식이다. 이 방식은 식 (14)와 같이 안테나에 할당된 전력의 합이  $P_{HPA}$ 를 넘는 안테나  $k$ 에 대하여 실행된다.

$$G_{mk} + G_{nk} > P_{HPA}, \quad (14)$$

만일 전력의 합이  $P_{HPA}$ 를 초과한다면 안테나  $k$ 에 할당된 전력  $G_{mk}$ 와  $G_{nk}$ 의 비율을 유지하며 총합이  $P_{HPA}$ 가 되도록 전력을 식 (15), (16)과 같이  $P_{mk}$ 와  $P_{nk}$ 로 재할당한다.

$$P_{mk} = \frac{G_{mk}}{G_{mk} + G_{nk}} \times P_{HPA}, \quad (15)$$

$$P_{nk} = \frac{G_{nk}}{G_{mk} + G_{nk}} \times P_{HPA}, \quad (16)$$

세 번째 전력 제어 방법은 중복되어 선택된 안테나에서 전력의 합이 HPA의 최대값을 넘어가는 경우 먼저 첫 번째 전력 제어 기법으로 각 노드에 할당된 전력의 비율을 유지하면서 HPA의 최대값을 유지하도록 전력을 할당한다. 그리고 남은 전력이 발생하면 주위의 안테나에게 순차적으로 전력을 추가 할당하는 방법 (iterative power allocation)이다. 이때 다중 노드 빔 형성에서 한 노드에 대해 방사하는 전력의 합에 대한 전력 제한이  $P_{max}$ 로 주어지기 때문에 이  $P_{max}$ 를 넘지 않도록 전력합의 제한을 주어야한다. 이미 할당된 전력의 비율을 유지하여 각 노드를 위한 빔 형성 전력  $\widehat{P}_{mk}$ 를 식 (17)의 과정을 통해 재할당한다.

$$\widehat{P}_{mk} = \frac{P_{mk}}{\sum_K P_{mk}} \times P_{max}, \quad (17)$$

여기서  $K$ 는 전송하고자 하는 노드  $m$ 의 빔 형성을 위해 선택된 안테나의 수를 의미한다. 식 (17)의 과정을 통해 선택된 안테나에는 감소된 전력  $\widehat{P}_{mk}$ 이 할당되므로  $m$ 번째 노드의 빔 형성을 위해 할당된 전력 중 일부가 남게 된다. 식 (18)는 위 과정을

통해 발생한 잉여 전력  $P_{res-m}$ 을 나타낸다.

$$P_{res-m} = \sum^K (P_{mk} - \widehat{P}_{mk}), \quad (18)$$

빔 형성 이득을 최대로 얻기 위해서 잉여 전력  $P_{res-m}$ 을 안테나 배열 중 중복 사용되지 않은 안테나에 추가로 할당한다. 전력이 추가로 할당될 때는 할당 전력이 큰 안테나에 우선적으로 할당을 한다. 식 (19)은 전력을 추가로 할당할 안테나를 선택하는 방식을 나타낸다.

$$j = \arg \max_{a_k \in A_m} P_{ma_k}, \quad (19)$$

여기서  $j$ 는 추가 전력 할당을 위해 선택된 안테나,  $a_k$ 는 집합  $A_m$ 의 원소로써 노드  $m$ 의 빔 형성을 위해 선택된 안테나를 의미한다. 선택된 안테나에 다른 안테나에서 남은 전력을 추가로 각 노드의 전력 비율만큼 할당하여  $P_{HPA}$ 를 넘지 않도록 재할당하는 전력  $\widehat{P}_{mk}$ 을 구하는 방법은 식 (20)과 같다.

$$\widehat{P}_{mj} = P_{mj} + P_{res-m} \times \frac{P_{mj}}{\sum_{k \in A_m} P_{mk}}, \quad (20)$$

선택된 안테나에 추가 전력 할당이 끝나면 식 (21)과 같이 다음 안테나에 추가 할당하기 위한 잉여 전력을 다시 계산하며 안테나 전력 재할당을 위한 안테나 집합  $A_m$ 을 식 (22)와 같이 다시 정의한다.

$$P_{res-m} \leftarrow P_{res-m} - \widehat{P}_{mj}, \quad (21)$$

$$A_m \leftarrow A_m - \{j\}, \quad (22)$$

노드  $m$ 의 빔 형성을 위해 선택된 모든 안테나에 대한 추가 전력 할당을 위해서 식 (19)~(22)를 반복한다. 그리고 할당이 완료되면 다른 노드에 대하여 전력 제어 과정을 반복한다. IV장에서는 전산모의 실험을 통해 제한한 전력 제어 기법이 다른 기법들과 비교하여 인접한 노드들의 SNR이 향상됨을 보인다.

### IV. 전산모의실험

본 장에서는 다중노드 원형 배열 안테나를 사용한 경우 안테나의 개수를 선택하는 방법과 선택된 안테나가 중첩이 되어 전력할당을 할 경우에 대한 SNR 성능 실험을 하였다. 중첩 노드 선택방법에서 수신 노드의 SNR 성능은 중첩되는 안테나의 전력이 HPA의 최대 전력을 넘지 않는 값으로 정규화를 하였을 경우와 비교하였다.

실험에 사용되는 안테나의 개수는 16개이며 반송 주파수는 2GHz를 사용하였다. 원형의 배열안테나 지름은 2.2미터이며 각 안테나의 간격은 반송주파수 파장의 반인 0.75미터로 설정하였다.

그림 4는 빔 형성 안테나 개수에 따른 수신 신호 전력을 나타낸다. 16개의 원형배열 안테나에서 선택 가능한 안테나 개수는 8개이다. III장에서 제안한 식 (4)에 의해 안테나 개수 선택 방식인 안테나 증가에 의한 이득이 평균 이득보다 작아지는 안테나수를 선택하면 4개의 안테나가 선택되었다.

그림 5는 두 개의 노드가 인접하는 경우 중복하지 않은 안테나 선택 시나리오와 중복된 안테나선택 시나리오를 나타낸다. 그림 5-(a)는 중복하지 않은 안테나 선택 시나리오로써 노드 A와 B는 각각 X와 Y로 구분된 4개의 고정된 안테나로 빔 형성을 한다. 그리고 그림 5-(b)는 기존 방법과 본 논문에서 제안한 안테나를 중첩 선택하여 전력을 할당하는 시나리오를 나타낸다. 실험을 위해 안테나는 노드의 위치정보를 알고 있으며 안테나와 노드 사이의 채널 이득은 모두 1로 같고, 잡음은 -20dB로 가정하였다. 표 1은 그림 5에서 기존의 중첩을 하지 않는 방식과 중복을 하는 제안된 방식에 관한 결과이다. 실험 결과 (a)의 경우 노드 A의 SNR은 24.5, 노드 B의 SNR은 21.4이며 (b)의 경우 노드 A의 SNR은 24.5, 노드 B의 SNR은 24.4로써 안테나 중복 선택을 통해 노드 B가 3dB의 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 6은 노드 B의 위치가 0°로 고정되고 노드 A의 위치가 0~90° 사이에서 이동하는 경우 본 논문에서 제안한 세 가지 전력 제어 방식의 SNR 성

〈표 1〉 인접한 두 노드 빔 형성을 위한 안테나 배열 선택 방식에 따른 신호 대 잡음 비

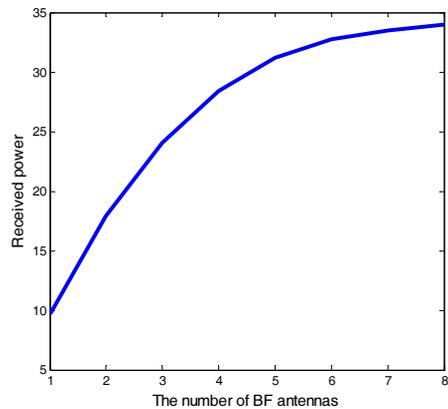
〈Table 1〉 SNR(dB) of Antenna selection methods for adjacent two node beamforming

(a) Selecting antennas without superposition

	Node A	Node B
SNR(dB)	24.5	21.4

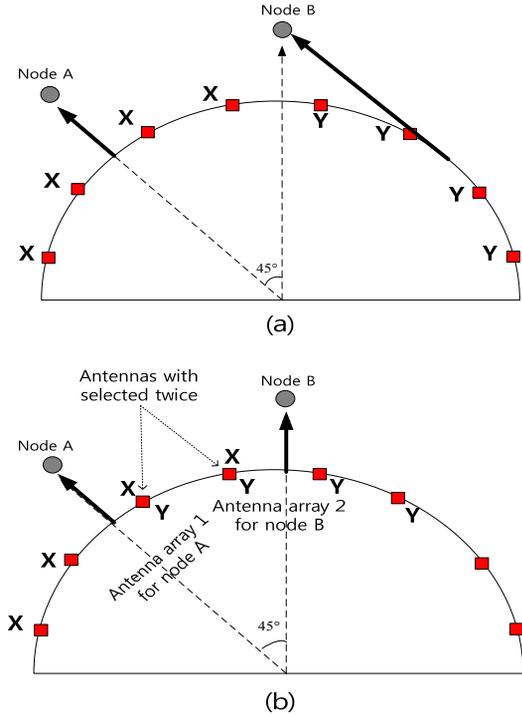
(b) Selecting antennas with superposition

	Node A	Node B
SNR(dB)	24.5	24.4



〈그림 4〉 빔 형성 안테나 개수에 따른 수신 신호 전력  
〈Fig. 4〉 Received signal power for different number of beamforming antennas

능을 비교한다. 앞선 실험과 동일하게 안테나와 노드 사이의 채널 이득은 모두 1로 같고, 잡음은 -20 dB로 가정하였다. 모든 안테나 전력을 비울만큼 감소시킨 첫 번째 방법의 평균 전력은 28.4dB, 중첩 안테나 구조에 전력 비율을 낮춘 두 번째 방법의 평균 전력은 29.3dB, 그리고 순차적으로 최대 전력을 할당하는 세 번째 방법의 평균 안테나 이득은 30.2dB를 나타내었다. 이로부터 세 번째 제안한 방법은 다른 두 가지 방법보다 각각 약 0.9dB와 1.8dB의 평균 이득 향상을 얻었다. 두 노드가 15°로 인접했을 때 세 번째 제안한 방법은 다른 두 가지 방법과 비교할 경우 최대 1.5 dB, 2.5 dB의 이득 향상을 보였다. 이는 세 번째 제안한 전력 제어 방식이 신호를 전송하고자 하는 노드에 방사이득이 큰 안테

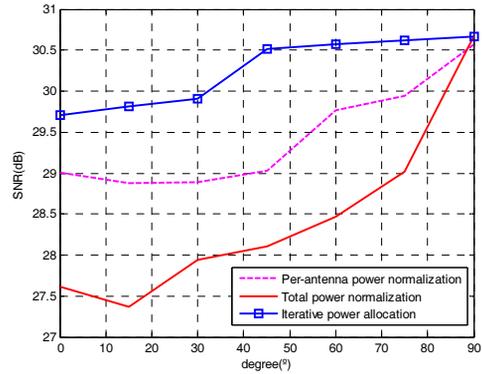


〈그림 5〉 두 인접 노드 빔 형성을 위한 안테나 선택  
 (a) 중복되지 않은 안테나 선택  
 (b) 중복된 안테나 선택  
 〈Fig. 5〉 Antenna selection for two adjacent nodes beamforming  
 (a) Antenna selection without superposition  
 (b) Antenna selection with superposition

나에 최대 전력을 할당하기 때문에 최대 빔 형성 이득을 보였다. 이 결과를 통해 세 번째 제안된 안테나 선택 및 전력 제어 방법이 이동하는 노드들로 네트워크를 안정적으로 구성할 때 적합한 빔 형성 기법임을 보였다.

### V. 결 론

본 논문에서는 원형 배열 안테나를 사용한 다중 노드 빔 형성에서 적용 가능한 안테나의 선택과 세 가지 전력 제어 방식을 제안하였다. 제안된 안테나 선택 방법은 다중 노드 시에 상호 간섭을 줄이고 최대 빔 형성 이득을 얻는 것이다. 이동하는 노드들이 근접할 경우 안테나를 중첩하여 선택하고 수신 단에서 빔 형성 이득이 최대화되도록 세 가지 전력



〈그림 6〉 두 인접 노드의 평균 SNR (dB)  
 〈Fig. 6〉 Average SNR (dB) of two adjacent nodes

할당 기법을 제안하였다. 전산 모의 실험을 통해 순차적으로 최대 전력을 모든 안테나에 할당하는 세 번째 방법이 다른 두 가지 전력 제어 방법보다 수신 단에서의 SNR 이득이 최대 2.5dB 우수함을 보였다.

### REFERENCES

- [1] I. Akyildiz and X. Wang, "A Survey on Wireless Mesh Networks," *IEEE communications Magazine*, vol. 43. no. 9, Sep 2005.
- [2] M. Kim, J. Choi and Y. Cho, "Convergence Analysis of Distributed Time and Frequency Synchronization Algorithm for OFDMA-Based Wireless Mesh Networks Using Bio-Inspired Technique," *The Journal of KICS*, '14- 08, vol. 39A no. 08, 2014.
- [3] Y. Cho, H. Jeong, D. Kim, K. Ryu, "Trajectory Information-based Routing Protocol for Mobile Mesh Router in Wireless Mesh Networks," *The journal of KICS*, '11-11 vol. 36 no. 11, 2011.
- [4] C. Y. Chen and P. P. Vaidyamathan, "Quadratically Constrained Beamforming Robust Against Direction-of-Arrival Mismatch," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 8, pp.4139-4150, 2007.

- [5] R. Roy, and T. Kailath, "ESPRIT : Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques," *IEEE Transactions on Acoust. Speeches Signal Process.*, 39, 242-246, 1991.
- [6] R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, Mar. 1996.
- [7] F. B. Gross, *Smart Antennas for Wireless Communications*, McGrawHill, 2005, Feb. 2003.
- [8] T. K. Y. Lo, "Maximum Ratio Transmission," in ICC '99. *1999 IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, no. 10, Oct. 1999.
- [9] C. P. Mathews and M. D. Zoltowski, "Eigen-Structure Techniques for 2-D Angle of Arrival with Uniform Circular Arrays," *IEEE Transactions on Signal Processing*, 43, 9, pp.2395 - 2407, Sep. 1994.

저자소개



**박 성 호 (Park, Seongho)**

2013년 2월 인하대학교 전자공학과 졸업  
2013년 3월~ 현재 : 인하대학교 전자공학과 석사과정



**박 철 (Park, Chul)**

2000년 ~ 현재 한국전자통신연구원 연구원  
2013년 6월~현재 : 이동형 무선메쉬 백홀 기술 연구  
2008년 1월~2013년 6월 : LTE-Advanced 시스템 개발 및 관련 응용 연구  
2002년 4월~2007년 12월 : WiBro/WiBro Evolution 시스템 개발 및 표준화 연구  
2000년 5월~2002년 3월 : WCDMA 기반 스마트안테나 연구



**김 한 나 (Kim, Hanna)**

2008년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업  
2010년 2월~ 현재 : 영남대학교 정보통신공학과 석사과정  
2010년 7월~ 현재 : 한국전자통신연구원 무선 응용 연구부 연구원



**정 재 학 (Chung, Jaehak)**

1988년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업  
1990년 2월 연세대학교 전자공학과 석사  
2000년 University of Texas at Austin 전기전산학과 박사  
2000년~2001년 Post doctoral fellow, University of Texas at Austin  
2000년~2001년 삼성종합기술원 수석연구원  
2005년~현재 : 인하대학교 전자공학과 교수