

# 채널추정 에러와 다중 전송률 서비스를 고려한 다수 개의 액세스포인트 전송전력제어 알고리즘

## (Multi-Access Points Transmit Power Control Algorithm in Consideration of the Channel Estimation Error and the Multi Rate Service)

오 창 윤<sup>1)\*</sup>  
(Changyoon Oh)

**요 약** 본 연구에서는 채널추정 에러와 다중 전송률 서비스를 고려하여 다중 액세스포인트 전송전력제어 알고리즘을 제안한다. 실제 통신시스템에서는 1) 채널추정을 위해 사용하는 파일럿심볼의 갯수가 제한적이기 때문에, 수신단에서 채널추정이 완전하지 않으며, 2) 다중 전송률 서비스가 지원된다. 먼저, 제안하는 알고리즘이 다중 전송률 서비스 환경에서도 유일한 최소전력에 수렴함이 보장됨을 이론적으로 증명한다. 제안하는 전송전력제어 알고리즘은 하나의 내부루프와 하나의 외부루프로 구성된다. 실험결과를 통해 1) 내부루프 알고리즘은 전송전력 레벨의 수렴과 다중 전송률 서비스를 보장하고, 2) 외부루프 알고리즘은 채널추정 에러를 보상할 수 있음을 확인하였다.

**핵심주제어:** 액세스포인트, 채널추정, 내부루프, 외부루프, 전송전력제어

**Abstract** We propose a multi-access points transmit power control algorithm in consideration of the channel estimation error and the multi-rate service. In the real communication systems, the channel estimation at the receiver side is imperfect due to limited number of pilot symbol usage. Furthermore, the multi-rate service is supported. We theoretically prove the uniqueness and the convergence of the proposed algorithm in multi-rate service environment. The proposed algorithm composes of one inner loop part and one outer loop part. Simulation results show that 1) the inner loop algorithm guarantees convergence of the transmit power level and the multi-rate service, 2) the outer loop algorithm compensates for the channel estimation error.

**Keywords:** Access point, Channel estimation, Inner loop, Outer loop, Transmit power control

### 1. 서 론

통신링크를 구성하는 송신단과 수신단 사이의 경로손실이 커질수록 전송전력은 증가한다. 일례로, 셀룰라시스템에서 셀중앙에 위치한 단말보다 셀경계에 위치한 단말은 동일한 전송률을

\* Corresponding Author: changyoonoh@inhac.ac.kr  
Manuscript received May 12, 2020 / revised June 15, 2020  
/ accepted June 23, 2020

1) 인하공업전문대학 정보통신과, 제1저자

유지하기 위하여 더 큰 전송전력이 요구된다. 따라서, 전송전력을 효율적으로 줄이는 방법 중 하나는 송신단과 수신단 사이의 경로손실을 줄이는 방법이다.

통신링크들은 주파수를 효율적으로 사용하기 위하여 주파수를 재사용한다. 이러한 주파수재사용은 통신시스템에서 간섭을 일으킨다. 이러한 간섭문제는 전송전력제어를 활용하여 해결이 가능하다. 간섭문제는 다양한 기술적 접근으로 해결하고자 많은 연구가 진행되어 왔다. 간섭관리를 목적으로 매체접근제어계층 (Medium Access Control (MAC) Layer) 관점에서는 매체접근제어 기술 (Hermeto et al, 2017) 을 적용하거나, 부하분산 (Load Balancing) 기법 (Kralevska et al., 2018), 그리고 분산적 기법 (Hwang et al., 2017)을 활용하였다. 물리계층 (Physical Layer) 관점에서는 Chung et al. (2015)은 수신단 빔포밍을 적용하여 간섭을 해결하고자 하였다.

Razali et al. (2014)는 Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) 기술과 전송전력을 함께 고려하여 효율적인 전송전력방안을 제안하였다. Son and Kim (2004)은 라우팅 프로토콜 (Routing Protocol)을 적용하여 효율적으로 에너지를 사용하는 방법을 제안하였다. 간섭문제를 다루기 위하여 두 개 이상의 기법들을 함께 고려하여 연구하기도 한다. 일례로, 스케줄링과 토폴로지 제어 (Hua and Lau, 2010)를 함께 적용하거나, 스케줄링, 라우팅 그리고 채널 할당 (Barceló et al., 2015)을 동시에 적용하기도 하였다. Jayaprakasam et al. (2017)은 전송전력과 빔포밍을 동시에 최적화하고 있다. Du et al. (2018)은 물리계층에서는 빔포밍을 적용하면서, 매체접근제어계층에서는 데이터 라우팅을 동시에 최적화하고 있다. 그 외에 센서네트워크의 프로토콜 (Cha, 2014), 클러스터링 프로토콜 (Choi, 2012), 그리고 센싱알고리즘 (Yoo, 2012)을 적용하여 소프트웨어 프레임워크를 연구하였다.

이상에서 언급한 연구들은 하나의 액세스포인트 환경을 다루고 있다. 인접하는 액세스포인트 끼리는 간섭이 없음을 가정한다. Oh (2020)는 다수 개의 액세스포인트 운용이 단말들이 소모

하는 전송전력을 감소시킴을 연구하였다. 액세스포인트 갯수를 증가시키면 인접한 액세스포인트끼리 간섭을 발생시킨다. 반면, 액세스포인트와 단말사이의 채널이득이 좋아져 소모하는 전송전력을 줄일 수 있다. Oh (2020)는 수신단에서의 채널추정이 완전하다는 가정하에 다수 개의 액세스포인트에서 적용이 가능한 하나의 전송률 서비스를 지원하도록 전송전력 알고리즘을 제안하였다. 하지만, 실제 통신시스템에서는 수신단 채널추정이 완전하지 않다. 일반적으로 통신시스템에서 파일럿 심볼을 사용하여 채널을 추정한다. 채널추정을 위한 파일럿 심볼의 갯수가 제한적이다. 또한, 파일럿 채널과 데이터 채널이 시간적으로 다중화되기 때문에 채널추정에러가 존재한다. 또한, 다수 개의 전송률 서비스를 지원하는 것이 일반적이다.

본 논문에서는 1) 채널추정 에러를 반영하고, 2) 다수 개의 전송률 서비스를 지원하는 다수 개의 액세스포인트 전송전력제어 알고리즘을 제안한다.

## 2. 시스템 모델 및 문제정의

### 2.1 시스템 모델

Fig. 1은 본 연구에 적용할 시스템 모델이다. 구체적으로, Fig. 1에서 각각의 단말은 단말 자신의 액세스포인트에게 신호를 전송한다. 또한,

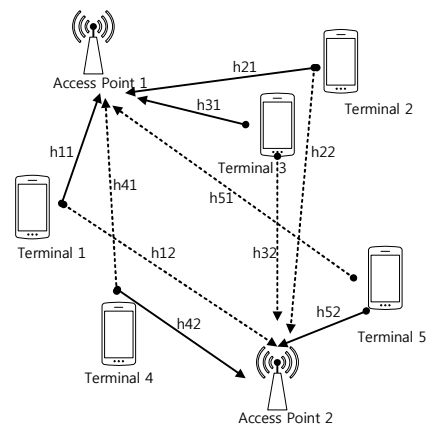


Fig. 1 System Model

나머지 액세스포인트에게는 간섭을 준다. 신호와 간섭을 구분하도록 실선은 신호를 나타내고, 점선은 간섭을 나타내는 것으로 정의한다.  $h_{ij}$ 는 단말  $i$ 와 액세스 포인트  $j$  사이의 채널이득(Channel Gain)을 의미한다.  $l$ 번째 액세스포인트에게 신호를 전송하는 단말들을 그룹화하여  $G_l$  ( $l=1, \dots, L$ )와 같이 표시하기로 한다. 시스템은 프로세싱 이득(Processing Gain)이  $N$ 인 DS-CDMA(Direct Sequence Code Division Multiple Access)을 적용한다.  $n$ 은 크기가  $N$ 인 가우시안 벡터를 나타내며, 이때,  $E(n) = 0$ ,  $E(nn^T) = \sigma^2 I_N$  이 된다. 시스템에서  $L$ 개의 액세스포인트에 단말이 접속하는 것으로 설정한다.

### 2.2 문제 정의

개별 단말들에게 각기 다른 전송률 서비스를 지원하기 위하여, 다른 전송률 서비스에 해당하는 목표 신호대간섭비(Target Signal to Interference Ratio)를 가진다. 구체적으로, 단말  $i$ 의 목표 신호대간섭비(Signal to Interference Ratio: SIR)는  $\gamma_i^*$ 이다. 따라서, 단말  $i$ 의 신호대간섭비  $\gamma_i$ 는 식(1)을 만족해야 한다.

$$\gamma_i \geq \gamma_i^* \quad (1)$$

본 논문은 식 (4)의 모든 단말들이 식 (3)에서와 같이 개별 단말의 목표 신호대간섭비를 만족하면서 모든 단말들이 소모하는 총 전송전력인 식 (2)를 최적화하고자 한다.

$$\min \sum_{l=1}^L \sum_{i \in G_l} p_i \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \gamma_i = \frac{p_i h_{ia(i)} (s_i^T s_i)^2}{P_{i,same} + P_{i,different} + P_{i,noise}} \geq \gamma_i^* \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, K \quad (4)$$

여기서  $p_i$ 는 단말  $i$ 의 전송전력이며,  $h_{ia(i)}$ 는 단말  $i$ 와 액세스포인트  $a(i)$  사이의 채널이득이다.  $a(i)$ 는 단말  $i$ 가 접속한 액세스포인트이다.  $s_i$ 는 단말  $i$ 의 시그너처 시퀀스이며, 길이는  $N$ 이

다. 식 (3)에서 세 가지 간섭이 존재한다.  $P_{i,same}$ 는 단말  $i$ 와 동일그룹 단말 간섭이며,  $P_{i,different}$ 는 단말  $i$ 와 다른그룹 단말 간섭이다. 마지막으로,  $P_{i,noise}$ 는 노이즈이다. 구체적으로,  $P_{i,same}$ ,  $P_{i,different}$ ,  $P_{i,noise}$ 는 각각 식 (5), (6), (7)과 같다.

$$P_{i,same} = \sum_{j \in G_l} p_j h_{ja(i)} (s_j^T s_i)^2 \quad (5)$$

$$P_{i,different} = \sum_{k \notin G_l} p_k h_{ka(i)} (s_k^T s_i)^2 \quad (6)$$

$$P_{i,noise} = \sigma^2 (s_i^T s_i)^2 \quad (7)$$

특히, 개별 단말의 신호대간섭비 요구사항인 식 (3)은 단말의 전송전력으로 표현할 수 있다. 따라서, 식 (2), (3), (4)는 식 (8), (9), (10)으로 표현할 수 있다.

$$\min \sum_{l=1}^L \sum_{i \in G_l} p_i \quad (8)$$

$$\text{s.t. } p_i \geq \frac{P_{i,same} + P_{i,different} + P_{i,noise}}{(s_i^T s_i)^2 h_{ia(i)}} \gamma_i^* \quad (9)$$

$$i = 1, \dots, K \quad (10)$$

식 (8)을 최적화하기 위하여, 식 (10)의 개별 단말들은 개별 단말별로 다른 요구값인 식 (9)을 유지하여야 한다. 단말들의 총전송전력인 식 (8)을 최소화하기 위하여, 본 논문에서는 두 가지 절차를 따른다. 1) 식 (9)에서 오른쪽 항을 최소화하는 것이다. 2) 식 (9)의 개별 단말의 전송전력 요구조건이 등호가 성립하도록 하는 것이다.

식 (8)을 최소화하기 위한 1) 첫 번째 절차를 적용하기 위하여, 식 (9)의 오른쪽 항을 식 (11)과 같이 단말  $i$ 의 간섭함수(Interference Function)로 정의한다.

$$I_i(P) = \frac{P_{i,same} + P_{i,different} + P_{i,noise}}{(s_i^T s_i)^2 h_{ia(i)}} \gamma_i^* \quad (11)$$

$$P = [p_1, \dots, p_{k-1}, p_k, p_{k+1}, \dots, p_K] \quad (12)$$

$$I(P) = [I_1(P), \dots, I_K(P)] \quad (13)$$

식 (11)을 구성하는  $P$ 는 전송전력 벡터이며, 식 (12)와 같다. 전송전력 벡터는 모든 단말들의

전송전력을 포함한다. 식 (11)의 개별 단말의 간섭함수를 포함하여 식 (13)에서와 같이 간섭함수 벡터를 정의한다. 식 (8)을 최소화하기 위한 2) 두 번째 절차를 적용하기 위하여 식 (9)의 전송전력 요구조건을 등호가 성립하도록 하는 것이다. 위에서 언급한 두 가지 절차를 반복적으로 수행하도록 하는 반복적 알고리즘 (Iterative Algorithm)은 식 (14)와 같다.

$$P(n+1) = I(P(n)) \quad (14)$$

여기서  $P(n)$  는  $n$  번째 반복 (Iteration)에서의 전송전력 벡터이다.  $P(n)$  를 식 (11) 의 간섭함수에 적용하여 새로운 전송전력 벡터  $P(n+1)$  을 구하게 된다. 식 (14)의 반복적 알고리즘의 수렴 여부는 세 가지 수렴조건에 충족되면 수렴된 값은 유일한 (Unique) 최소 전력값이다. Yates (1996)는 세 가지 수렴조건을 만족하는 함수를 표준간섭함수 (Standard Interference Function)로 정의하였다. 표준간섭함수가 되기 위한 세 가지 항목은 아래와 같다.

조건 1. Positivity:

$$I(P) > 0 \text{ 이다.}$$

조건 2. Monotonicity:

$$P \geq \bar{P} \text{ 이면, } I(P) \geq I(\bar{P}) \text{ 이다.}$$

조건 3. Scalability:

$$\text{모든 } \alpha > 1 \text{ 에 대하여, } \alpha I(P) \geq I(\alpha P) \text{ 이다.}$$

Oh (2020)에서는 모든 단말이 동일한 목표 신호대간섭비를 가지는 경우 ( $\gamma_i^* = \gamma^*$  ( $i=1, \dots, K$ ))에 대하여 살펴보았다. 본 논문에서는 다중 전송률 서비스를 지원하기 위한 목표 신호대간섭비가 2 가지 이상인 경우를 살펴보기로 한다. 식 (11)의 간섭함수가 위의 세 가지 조건을 성립하고 있음을 증명하도록 한다.

**Proposition 1.** 식(11)의 간섭함수는 조건 1의 Positivity를 만족하므로,  $I(P) > 0$  이다.

증명)

$$\text{식 (5), (6), (7)에 의하여 } P_{i,same} \geq 0,$$

$P_{i,different} \geq 0$ ,  $P_{i,noise} = \sigma^2(s_i^T s_i)^2 > 0$  이다. 목표신호대간섭비  $\gamma^*$ 는 항상  $\gamma^* > 0$  이다. 따라서, 식 (11)은  $I_i(P) > 0$  이며, 식 (15)가 성립한다.

$$I_i(P) = \frac{P_{i,same} + P_{i,out} + P_{i,noise}}{(s_i^T s_i)^2 h_{ia(i)}} \gamma^* > 0 \quad (15)$$

따라서,  $I(P) > 0$ .

**Proposition 2.** 식(11)의 간섭함수는 조건 2의 Monotonicity를 만족한다. 따라서,  $P \geq \bar{P}$  이면,  $I(P) \geq I(\bar{P})$  이다.

증명)

$P$  와  $\bar{P}$  는 식 (16), (17)과 같다.

$$P = [p_1, \dots, p_{k-1}, p_k, p_{k+1}, \dots, p_K] \quad (16)$$

$$\bar{P} = [\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_{k-1}, \bar{p}_k, \bar{p}_{k+1}, \dots, \bar{p}_K] \quad (17)$$

여기서  $P \geq \bar{P}$  이므로, 개별 전송전력에도 성립하므로 식 (18)과 같다.

$$p_k \geq \bar{p}_k \quad (18)$$

전송전력이  $P = [p_1, \dots, p_{k-1}, p_k, p_{k+1}, \dots, p_K]$ 인 경우에 동일그룹 간섭, 다른그룹 간섭, 노이즈는 각각 식 (19), (20), (21)과 같다.

$$P_{i,same} = \sum_{j \in G_i} p_j h_{ja(i)} (s_j^T s_i)^2 \quad (19)$$

$$P_{i,different} = \sum_{k \notin G_i} p_k h_{ka(i)} (s_k^T s_i)^2 \quad (20)$$

$$P_{i,noise} = \sigma^2 (s_i^T s_i)^2 \quad (21)$$

전송전력이  $\bar{P} = [\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_{k-1}, \bar{p}_k, \bar{p}_{k+1}, \dots, \bar{p}_K]$ 인 경우에 동일그룹 간섭, 다른그룹 간섭, 노이즈는 각각 식 (22), (23), (24)와 같다.

$$\bar{P}_{i,same} = \sum_{j \in G_i} \bar{p}_j h_{ja(i)} (s_j^T s_i)^2 \quad (22)$$

$$\bar{P}_{i,different} = \sum_{k \notin G_i} \bar{p}_k h_{ka(i)} (s_k^T s_i)^2 \quad (23)$$

$$\bar{P}_{i,noise} = \sigma^2 (s_i^T s_i)^2 \quad (24)$$

식 (19)와 식 (22)는 모두 동일그룹 간섭을 나

타낸다. 식 (19), (20)을 비교하면 식 (25)와 같다.

$$P_{i,same} = \sum_{j \in NG_i} p_j h_{ja(i)} (s_j^T s_i)^2 \geq \bar{P}_{i,same} = \sum_{j \in NG_i} \bar{p}_j h_{ja(i)} (s_j^T s_i)^2 \quad (25)$$

식 (20)와 식 (23)은 모두 다른그룹 간섭을 나타낸다. 식 (20), 식 (23)을 비교하면 식 (26)와 같다.

$$P_{i,different} = \sum_{k \notin G_i} p_k h_{ka(i)} (s_k^T s_i)^2 \geq \bar{P}_{i,different} = \sum_{k \notin G_i} \bar{p}_k h_{ka(i)} (s_k^T s_i)^2 \quad (26)$$

식 (21)과 식 (24)는 모두 노이즈이며, 동일하다. 식 (25), 식 (26)를 식 (11)에 적용하면 식 (27)이 성립한다.

$$I_i(P) \geq I_i(\bar{P}) \quad (27)$$

따라서,  $P \geq \bar{P}$  이면,  $I(P) \geq I(\bar{P})$ .

**Proposition 3.** 식(11)의 간섭함수는 조건 3의 Scalability를 만족한다. 즉, 모든  $\alpha > 1$  에 대하여,  $\alpha I(P) > I(\alpha P)$  이다.

증명) 간섭함수  $I(\alpha P)$ 와  $\alpha I(P)$ 를 표현하면 각각 식 (28), 식 (29)와 같다.

$$I_i(\alpha P) = \frac{\alpha P_{i,same} + \alpha P_{i,different} + P_{i,noise}}{(s_i^T s_i)^2 h_{ia(i)}} \gamma_i^* \quad (28)$$

$$\alpha I_i(P) = \frac{\alpha P_{i,same} + \alpha P_{i,different} + \alpha P_{i,noise}}{(s_i^T s_i)^2 h_{ia(i)}} \gamma_i^* \quad (29)$$

여기서  $\alpha > 1$  이므로, 항상  $\alpha P_{i,noise} > P_{i,noise}$  이 성립한다. 따라서, 식 (28)와 식 (29)를 비교하면 식 (30)이 항상 성립한다.

$$\alpha I_i(P) > I_i(\alpha P) \quad (30)$$

따라서, 모든  $\alpha > 1$  에 대하여,  $\alpha I(P) > I(\alpha P)$ . 증명을 통하여 식 (11)의 간섭함수가 표준간섭함

수임이 확인되었다. 따라서, 식 (11)을 반복적으로 적용하게 되면, 유일한 전송전력값에 수렴하게 되며, 그 전송전력값은 최소의 전력을 소모하는 전송전력값이다.

제안하는 알고리즘은 내부루프 (Inner Loop) 와 외부루프 (Outer Loop) 로 구성된다. 알고리즘은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 내부루프에서의 동작 과정을 살펴본다. 내부루프에서는 식 (11)의 간섭함수를 적용한다. 먼저 목표로서의 목표 신호대간섭비 (Target SIR)을 설정하고, 초기 전송전력은 0으로 설정한다.

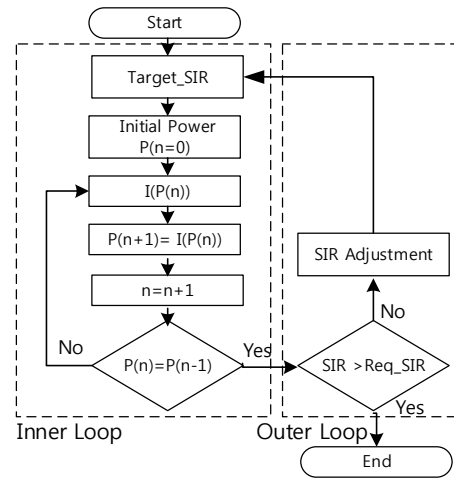


Fig. 2 Proposed Algorithm

식 (14) 에서 간섭함수와 전송전력 업데이트를 반복한다. 구체적으로, 다른 단말들의 전송전력을 적용하여 식 (11)의 간섭함수를 결정하고, 식 (14)를 이용하여 전송전력을 업데이트한다. 이러한 과정은 전송전력이 수렴하여  $P(n) = P(n-1)$ 가 될 때까지 반복된다. 식 (11)은 표준간섭함수이므로, 항상 유일한 최소전송전력에 수렴하는 것이 보장된다.

Fig. 2에서 외부루프 (Outer Loop) 동작을 살펴본다. 외부루프에서는 수렴한 전송전력에 의하여 계산된 신호대간섭비 (SIR)가 목표로 하는 Req\_SIR를 만족하는지를 확인한다. 만약, 목표로 하는 Req\_SIR를 만족한다면 즉,  $SIR > Req_SIR$  이라면 알고리즘은 종료된다. 하지만, 목표로 하는 Req\_SIR를 만족하지 못하면, 목표 신호대간

섭비를 조절하여 내부루프를 다시 진행한다.

### 2.3 채널추정 에러 모델링

채널추정 에러는 가우시안 채널추정 에러를 적용한다. 채널추정 에러  $e$ 가 채널이득  $h$ 에 반영되고, 측정된 채널이득은  $\hat{h}$  이다. 측정된 채널이득은 식 (31)과 같다.

$$\hat{h} = h + e \quad (31)$$

$$\frac{E(\hat{h} - h)^2}{h^2} = \sigma_h^2 \quad (32)$$

식 (32)는 채널추정 에러의 분산  $\sigma_h^2$  이다. 채널추정 에러가 양인가 음인가에 따라 알고리즘 동작과정은 두 가지로 구분된다. 1) 채널추정 에러  $e$ 가 양인 경우에는 채널추정은 실제 채널이득보다 높게 추정된다. 따라서, Fig. 2에서 내부루프를 수행하게 되면, 수렴한 전송전력으로 계산한 SIR ( $\gamma$ )는 목표로 하는 Req\_SIR ( $\gamma^*$ ) 보다 작아진다. 외부루프에서는 신호대간섭비 (SIR)가 Req\_SIR보다 작으므로, 목표 신호대간섭비를 조절하여 내부루프를 다시 수행하도록 한다. 2) 반면, 채널추정 에러  $e$ 가 음인 경우에는 채널추정은 실제 채널이득보다 낮게 추정된다. 따라서, Fig. 2에서 내부루프를 수행하게 되면, 수렴한 전송전력으로 계산한 신호대간섭비 ( $\gamma$ )는 목표로 하는 Req\_SIR ( $\gamma^*$ )보다 커지게 된다. 외부루프에서는 신호대간섭비가 Req\_SIR보다 크므로, 알고리즘은 종료한다.

### 3. 실험결과

간섭은  $\sigma^2 = 10^{-13}$  으로 설정한다. 프로세싱 이득 (Processing Gain)은  $N=128$  이다. 실험에서는 두 개의 전송률 서비스를 지원하도록 하였으며, 목표 신호대간섭비는  $\gamma^* = 5, 7$  이다. 송수신기 사이의 채널이득은  $\frac{r}{d^4}$  으로 결정한다.  $r$ 은 분산 (Variance)  $8dB$  을 가지는 로그노멀페이딩(Log

Normal fading)이다.  $d$ 는 채널이득에서 송수신단 사이의 거리이다. 액세스포인트 갯수와 단말 갯수는 각각  $L=3, K=20$  으로 설정하였다.

Fig. 3는 내부루프 알고리즘 (Inner Loop Algorithm)에 의한 수렴한 전송전력으로 결정된 신호대간섭비의 누적분산함수 (Cumulative Distributive Function)이다. 채널추정 에러 환경에서, 설정한 목표 신호대간섭비와 실제 도달한 신호대간섭비를 확인하기 위한 실험이다. 세 가지 사항이 분석된다. 1) 목표로 하는 신호대간섭비를 높게 설정할수록 실제 신호대간섭비가 Req\_SIR( $\gamma^*$ ) 보다 커질 확률은 높아진다. 2) 동일한 Target SIR에 대하여 노이즈 분산이 커질수록 SIR 이 Req\_SIR( $\gamma^*$ ) 보다 커질 확률은 작아진다. 3) 모든 노이즈 분산값에 대하여 목표로 하는 신호대 간섭비를 Req\_SIR (=5) 로 설정하는 경우, SIR 이 Req\_SIR( $\gamma^*$ ) 보다 커질 확률은 50% 이다.

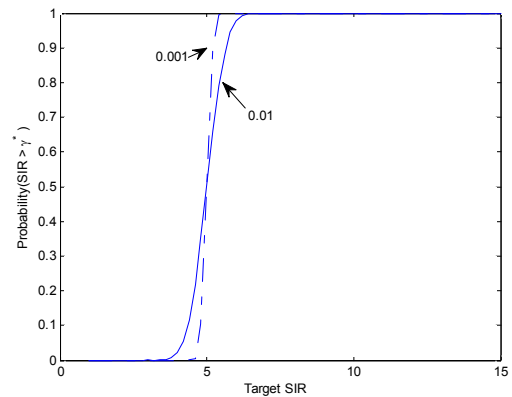


Fig. 3 Cumulative Distributive Function of SIR (Inner Loop Algorithm)

Fig. 4에서는 채널추정 에러가 내부루프 알고리즘에 미치는 영향을 살펴보았다. 모든 단말 ( $K=20$ )들의 목표 신호대간섭비를  $\gamma_i^* = 5$  로 설정하였다. 내부루프에서 설정한 목표 신호대간섭비는  $\gamma_{i, Target}^* = 5$  이다. Fig. 4에서 신호대간섭비가 수렴하는 과정을 살펴보도록 한다. 모든 단말 ( $K=20$ )들의 신호대간섭비가 수렴하는 전반적인 분포를 보고자 하는 것이므로, 개별 단

말들을 구분하지는 않았다. 식 (14)  $P(n+1)=I(P(n))$ 의 간섭함수와 전송전력이 업데이트되는 과정에서 신호대간섭비는 상승한다. 전송전력 업데이트가 완료되어 수렴하게 되면, 신호대간섭비도 수렴하게 된다. 채널추정 에러는  $\sigma_h^2=0.01$ 로 설정하였다. 대략 50%의 단말은 내부루프 알고리즘에 의해 수렴한 신호대간섭비인  $\gamma_i$ 가  $\gamma_i^*=5$ 보다 작았다 ( $\gamma_i < 5$ ). 가우시안 분포에 의해 50%는 양의 에러가 발생한다. 따라서, 50%는 정도는 신호대간섭비가 Req\_SIR를 만족하지 못한다.

Fig. 5는 외부루프 알고리즘 (Outer Loop Algorithm)의 영향을 살펴보기 위하여, 목표로 하는 신호대간섭비를  $\gamma_{i,Target}^*=5.6$ 로 높게 설정

하였다. 특히, Fig. 3의 누적분산함수 데이터  $Probability(\gamma > \gamma^*)$ 을 반영하였다. Fig. 5에서는 모든 단말들의 수렴한 신호대간섭비는 Req\_SIR를 만족하고 있다.

Fig. 6은 제안하는 알고리즘이 다중 전송률 서비스 전송률을 지원함을 확인하기 위하여 10개의 단말에게는  $\gamma_i^*=5$ , 나머지 10개의 단말에게는  $\gamma_i^*=7$ 으로 설정하였다. 목표로 하는 신호대간섭비 (SIR)가 수렴하는 것을 확인하기 위하여, 채널추정 에러는 없는 것으로 설정하였다. 개별 단말들은 제안하는 알고리즘에 의해 목표 신호대간섭비에 수렴하고 있음을 확인하였다.

Fig. 7은 제안하는 알고리즘을 적용하여 세 가지 경우 1) 채널추정 에러가 없는 경우, 2) 채

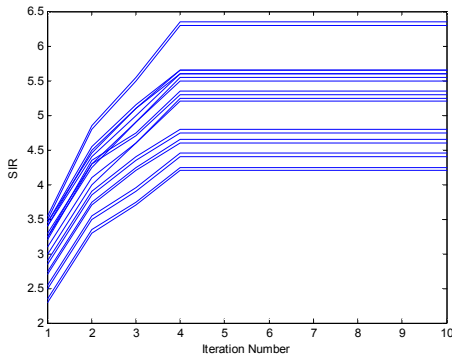


Fig. 4 SIR Convergence for 20 Users  
( $\gamma_i^*=5, \gamma_{i,Target}^*=5, \sigma_h^2=0.01$ )

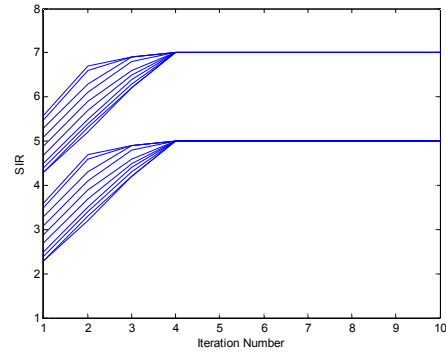


Fig. 6 SIR Convergence for 20 Users  
( $\gamma_i^*=5, 7, \gamma_{i,Target}^*=5, 7$ )

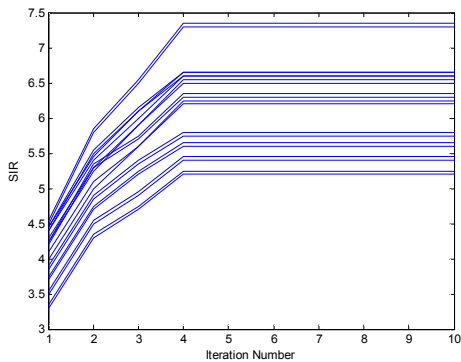


Fig. 5 SIR Convergence for 20 Users  
( $\gamma_i^*=5, \gamma_{i,Target}^*=5.6, \sigma_h^2=0.01$ )

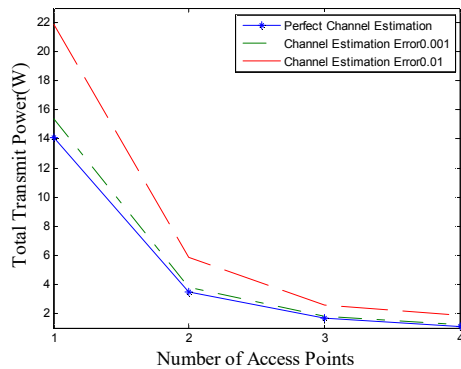


Fig. 7 Total Power Consumption

널추정 에러가  $\sigma_h^2=0.001$  인 경우, 3) 채널추정 에러가  $\sigma_h^2=0.01$  인 경우에 대하여, 액세스포인트 개수가  $L=1,2,3,4$  의 증가에 따른 단말들 ( $K=20$ ) 이 소모하는 총전송전력을 비교하였다. 세 가지 경우 1), 2), 3) 모두에 대하여, 액세스포인트 개수의 증가는 소모하는 전송전력의 감소를 보였다. 채널추정 에러가 있는 경우에는 채널추정 에러가 클수록 더 많은 전송전력을 소모한다. 이는 두 가지 이유에 근거한다. 첫째, 채널추정 에러가 클수록 알고리즘에 적용하는 Target SIR을 더 높게 조정하였다. 둘째, 재전송과정을 포함한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 1) 채널추정 에러를 보상하고, 2) 다중 전송률 서비스를 지원하는 다중 액세스포인트 전송전력제어 알고리즘을 제안하였다. 이론적 기법을 통해 제안하는 알고리즘이 유일한 최소전송전력에 항상 수렴함을 증명하였다. 실험결과를 통해 제안하는 내부루프 알고리즘은 다중 전송률 서비스 환경에서도 목표 SIR 에 수렴함을 확인하였다. 마지막으로, 세 가지 환경 1) 채널추정 에러가 없는 환경, 2) 채널추정 에러 환경  $\sigma_h^2=0.001$ , 3) 채널추정 에러 환경  $\sigma_h^2=0.01$  에서 소모하는 전송전력을 비교 분석하였다. 채널추정 에러환경에서 소모하는 전송전력이 더 많은 이유는 채널추정 에러를 보상하기 위하여 알고리즘의 목표 SIR을 높이기 때문이다. 특히, 채널추정 에러가 클수록 전송전력의 소모는 증가함을 알 수 있다. 또한, 초기 전송시 SIR을 높여서 재전송을 수행하기 때문에 채널추정 에러가 없는 환경과 비교하여 의 추가적인 전송전력이 요구된다.

#### References

Barceló, M., Correa, A., Vicario, J., and Morell, A. (2015). Joint Routing, Channel Allocation

and Power Control for Real Life Wireless Sensor Networks, *IEEE Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 26(5), 945-956.

Cha, H. (2014). A Design of an Energy-Efficient Application Protocol for the Sensor Networks, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 19(2), 23-30.

Choi, H. (2012). CUCE: Clustering Protocol using Node Connectivity and Node Energy, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 17(4), 41-50.

Chung, S., and Joe, I. (2015). Intelligent Transmission Power Allocation for Distributed Beamforming in Wireless Sensor Networks, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(6), 1-10.

Du, R., Özçelikkale, A., Fischione C., and Xiao, M. (2018). Towards Immortal Wireless Sensor Networks by Optimal Energy Beamforming and Data Routing, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(8), 5338-5352.

Hermeto, R., Gallais, A., and Theoleyre, F. (2017). Scheduling for IEEE802.15.4-TSCH and Slow Channel Hopping MAC in Low Power Industrial Wireless Networks: A Survey, *Computer Communications*, 114, 84-105.

Hwang, R. H., Wang, C. C., and Wang, W. B. (2017). A Distributed Scheduling Algorithm for IEEE 802.15.4e Wireless Sensor Networks, *Computer Standards & Interfaces*, 52, 63-70.

Hua, Q., and Lau, F. (2010). *Joint Link Scheduling and Topology Control for Wireless Sensor Networks with SINR Constraints*, Handbook of Research on Developments and Trends in Wireless Sensor Networks: From Principle to Practice, IGI Global, pp. 184-208.



- Jayaprakasam, S., Rahim, S., and Leow, C. (2017). Distributed and Collaborative Beamforming in Wireless Sensor Networks: Classifications, Trends, and Research Directions, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2092-2116.
- Krlevska, K., Vergados, D. J., Jiang, Y., and Michalas, A. (2018). Load Balancing Algorithm for Resource Allocation in IEEE 802.15.4e Networks, *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, pp. 675-680.
- Oh, C. (2020). Transmit Power Control For Multi-Access Points Environment, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 25(2), 49-56.
- Razali, S. M., Mamat, K., Abdul-Basit K., and Ali, F. H. M. (2014). Performance Enhancement of Wireless Sensor Network (WSN) with the Implementation of Hybrid ARQ (HARQ) and Transmission Power Control (TPC), *2014 IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSE)*, pp. 36-40.
- Son, B., and Kim, J. (2004). Energy Efficient Routing Protocol in Wireless Sensor Network, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 9(2), 65-73.
- Yoo, S. (2012). A Software Framework for Verifying Sensor Network Operating and Sensing Algorithms, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 17(1), 63-71.
- Yates, R. (1996). A Framework for Uplink Power Control in Cellular Radio Systems, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13(7), 1341-1347.



**오 창 윤 (Changyoon Oh)**

- 정회원
- 연세대학교 전기공학과 학사
- 펜실베니아주립대학교 전기공학과 석사
- 펜실베니아주립대학교 전기공학과 박사
- (현재) 인하공업전문대학 정보통신과 부교수
- 관심분야: 이동통신 표준화 PHY/MAC, D2D