

전송전력과 액세스 포인트 선정 알고리즘: AT 링크와 TA 링크

오창윤*

Transmit Power and Access Point Selection Algorithm: TA Link and AT Link

Changyoon Oh*

*Associate Professor, Department of Information and Communication Engineering Computer Engineering, Inha Technical College, Incheon, 22212 Korea

요약

다중 액세스 포인트 환경에서 전송전력과 최적의 액세스 포인트를 선택하는 문제를 연구한다. 본 연구는 지난 연구결과를 확장하여 TA 링크와 AT 링크에서 전송전력과 액세스 포인트를 함께 최적화한다. 목적은 모든 단말이 요구하는 최소의 신호대 간섭비를 유지하면서, 총 전송전력을 최소화하는 것이다. TA 링크와 AT 링크 모두에서 제안하는 반복적 기법을 통해서 최적화된 결과값에 수렴함을 증명한다. 실험결과를 통해 1) 전송전력과 액세스 포인트를 동시에 최적화하는 방법이 전송전력만을 최적화하는 방법보다 전송전력 소모에 이득이 있음을 확인하였다. 또한, 2) 다중 액세스 포인트 환경에서는 TA 링크와 AT 링크에서의 알고리즘의 결과값인 전송전력 벡터와 액세스 포인트 벡터는 쌍대성이 성립하지 않음을 확인하였다.

ABSTRACT

We investigate the joint selection problem of the transmit power level and the best access point for multi-access points. We further reduce the transmit power by jointly optimizing the transmit power and the access point selection. Our aim is to minimize the total transmit power, while each terminal maintains minimum signal to interference ratio requirement. We observe that the optimum solution can be achieved through proposed iterative algorithm for both TA link and AT link. Simulation results show that proposed algorithm (joint optimization of transmit power level and access point) outperforms the algorithm which optimizes the transmit power only. We also observe that the duality between the TA link and AT link does not hold in multi-access points environment. Accordingly, the resulting power vectors and the access point vectors for TA link and AT link are different in general.

키워드 : 액세스 포인트, 쌍대성, 전력제어, 신호대 간섭비, 전송전력

Keywords : Access Point, Duality, Power Control, SIR, Transmit Power

Received 8 April 2020, Revised 14 May 2020, Accepted 1 July 2020

* Corresponding Author Changyoon Oh(E-mail:changyoonoh@inhac.ac.kr, Tel:+82-32-870-2227)

Associate Professor, Department of Information and Communication Engineering, Inha Technical College, Incheon, 22212 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.8.1022>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

주파수 재사용이 시스템 용량증대에는 효과적이지만, 통신시스템끼리 간섭을 발생시킨다. 따라서, 단말의 서비스 품질을 보장하기 위하여 간섭관리 기술이 필요하다. 본 연구는 액세스 포인트(Access Point)끼리 인접하게 위치하여 간섭영향을 서로에게 줄 수 있는 환경을 살펴본다.

간섭관리 방법인 스케줄링을 이용해 간섭문제를 해결할 수 있다[1-4]. 예를 들어, MAC 레벨[1]에서 간섭문제를 처리할 수도 있다. Load Balancing 기법[2, 3]을 적용하여 시스템 로드를 전체적으로 분산할 수도 있다. 슬립모드를 활용[4]하는 방안도 간섭관리의 다른 방법이다. 간섭관리를 위하여 스케줄링과 PHY/MAC 기술을 이용할 수도 있다[5, 6]. 이상에서 언급한 연구결과[1-6]에서는 하나의 액세스 포인트에 접속하는 다수 개의 단말을 고려하였다. [7]에서는 단말이 액세스 포인트에 전송하는 TA 링크에서 다수 개의 액세스 포인트가 운용되도록 간섭을 효과적으로 제어할 수 있는 전송전력제어 알고리즘을 제안하였다. 또한, 액세스 포인트가 증가할수록 단말들이 소모하는 총전송전력은 감소함을 실험을 통하여 확인하였다. 하지만, [7]에서는 단말이 최적의 액세스 포인트를 고려하지 않고, 단말의 전송전력만을 최적화하였다. 본 논문에서는 1) 전송전력과 액세스 포인트를 함께 최적화한다. 구체적으로, TA 링크와 액세스 포인트가 단말에게 전송하는 AT 링크에서 최적화 알고리즘을 제안한다. 2) 또한, 다수 개의 액세스 포인트 환경에서는 AT 링크와 TA 링크에서 전송전력 소모관점에서 쌍대성이 성립하지 않음을 확인한다.

II. 본론

시스템에는 L 개의 액세스 포인트가 존재하며, G_l ($l = 1, \dots, L$)는 단말 i 가 포함된 l 번째 액세스 포인트 그룹에 접속하는 단말들의 그룹이다. $a(i)$ 는 단말 i 가 접속한 액세스 포인트이다. 두 개의 링크(Link)를 정의한다. 그림 1은 단말이 액세스 포인트에게 신호를 전송하는 TA(Terminal to Access Point) 링크이다. 그림 2는 액세스 포인트가 단말에게 신호를 전송하는 AT(Access Point to Terminal) 링크이다. 신호는 실선으로, 간섭은

점선으로 표시하였다. 프로세싱 이득 N 을 가지는 DS-SS-CDMA (Direct Sequence Code Division Multiple Access) 시스템을 고려한다. 단말 i 의 시스너처 시퀀스(Signature Sequence)는 s_i 이다. 인접심볼간의 간섭(Inter symbol Interference)은 없다고 가정한다.

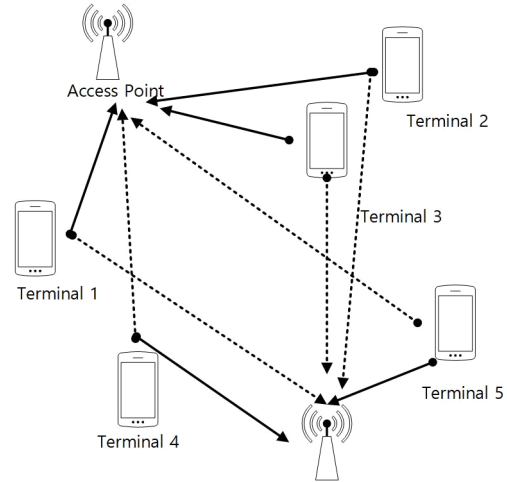


Fig. 1 TA Link System Model

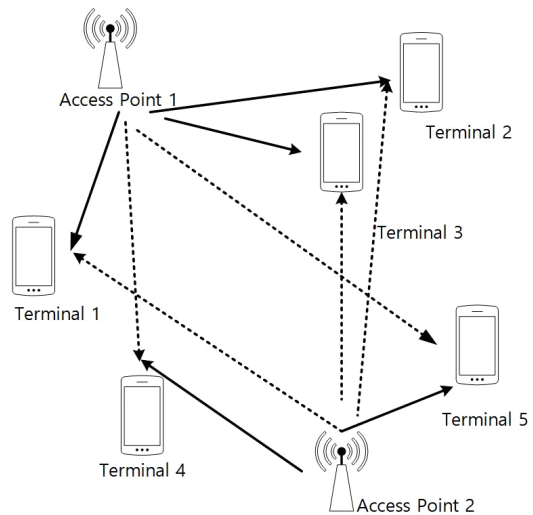


Fig. 2 AT Link System Model

2.1. TA 링크

단말 i 의 액세스 포인트에서의 수신 신호는 식 (1)과 같다.

$$r_i = \sqrt{p_i h_{ia(i)}} b_i s_i + \sum_{j \in G_i} \sqrt{p_j h_{ja(i)}} b_i s_j + \sum_{k \notin G_i} \sqrt{p_k h_{ka(i)}} b_k s_k + n \quad (1)$$

여기서, p_i , $h_{ia(i)}$, b_i 는 각각 단말 i 의 전송전력, 단말 i 에서 액세스 포인트 $a(i)$ 채널이득, 단말 i 가 전송하는 정보비트($b_i = \pm 1$)이다. 단말 i 은 시그너처 시퀀스로 s_i 를 사용한다. 시그너처 시퀀스의 길이는 N 이다. n 은 평균 0과 $E(nn^T) = \sigma^2 I_N$ 을 가진다. 또한, 길이는 N 인 가우시안 벡터이다. TA 링크에서의 목적은 단말이 액세스 포인트에 신호를 보내고, 수신단인 액세스 포인트에서 요구하는 신호대 간섭비 γ^* 를 만족하면서 단말들의 총 전송전력을 전송전력 벡터 P 와 액세스 포인트 벡터 A 로 최적화하는 것이다. 이를 수식화하면 식 (2), (3), (4) 와 같다.

$$\min_{P, A} \sum_{i=1}^K p_i \quad (2)$$

$$\text{s.t. } SIR_i = \quad (3)$$

$$\frac{p_i h_{ia(i)} (s_i^T s_i)^2}{\sum_{j \in G_i} p_j h_{ja(i)} (s_i^T s_j)^2 + \sum_{k \notin G_i} p_k h_{ka(i)} (s_i^T s_k)^2 + \sigma^2 (s_i^T s_i)^2} \geq \gamma^* \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, K$$

$P = [p_1, \dots, p_K]$ 는 단말들의 전송전력 벡터이다. $A = [a(1), \dots, a(K)]$ 단말들이 선택한 액세스 포인트 벡터이다. 식 (2)의 단말들의 총 전송전력을 최소화한다. 그 결과는 전송전력 벡터 $P = [p_1, \dots, p_K]$ 와 액세스 포인트 벡터 $A = [a(1), \dots, a(K)]$ 이다. γ^* 는 목표로 하는 신호대 간섭비이다. 식 (2)에서 액세스 포인트 벡터는 식 (3)의 제한조건으로 이동하고, 단말 i 의 전송전력 관점에서 최적화 문제를 나타내면 식 (5), (6), (7)과 같다.

$$\min_P \sum_{i=1}^K p_i \quad (5)$$

$$\text{s.t. } p_i \geq \frac{1}{a(i) h_{ia(i)} (s_i^T s_i)^2} \left[\sum_{j \in G_i} p_j h_{ja(i)} (s_i^T s_j)^2 + \sum_{k \in G_i} p_k h_{ka(i)} (s_i^T s_k)^2 + \sigma^2 (s_i^T s_i)^2 \right] \gamma^* \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, K \quad (7)$$

식 (6)에서 오른쪽 항을 식 (8)과 같이 정의한다.

$$I_i(P, a(i)) = \frac{\sum_{j \in G_i} p_j h_{ja(i)} (s_i^T s_j)^2 + \sum_{k \in G_i} p_k h_{ka(i)} (s_i^T s_k)^2 + \sigma^2 (s_i^T s_i)^2}{h_{ia(i)} (s_i^T s_i)^2} \gamma^* \quad (8)$$

식 (8)을 $a(i)$ 으로 최적화한 함수는 식 (9)와 같다,

$$I_i(P) = I_i(P, a^*(i)) = \min_{a(i)} I_i(P, a(i)) \quad (9)$$

$a^*(i)$ 는 $I_i(P, a(i))$ 를 최소화하는 액세스 포인트이다. 식 (9)를 단말 i 의 간섭함수(Interference Function)로 정의한다. 간섭함수 벡터는 식 (10) 과 같다.

$$I(P) = [I_1(P), \dots, I_K(P)] \quad (10)$$

따라서, 전송전력 제한조건인 식 (6)은 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$p_i \geq I_i(P) \quad (11)$$

전송전력을 최소화한다는 것은 전송전력 제한조건인 식 (11)이 등호가 성립할 때이다.

식 (11)을 최소화하기 위하여 반복적 알고리즘을 제안한다. [8]에서는 간섭함수가 최소전력에 수렴하기 위한 세 가지 조건들을 수학적으로 증명하였으며, 이를 Standard Interference Function이라고 부른다.

$$P(n+1) = I(P(n)) \quad (12)$$

식 (12)에서, $P(n)$ 는 n 번째 Iteration 이후 전송전력 벡터이다. Standard Interference Function의 성립조건은 다음과 같다.

1. Positivity $P(n+1) = I(P) > 0$
2. Monotonicity, If $P \geq \bar{P}$, then $I(P) \geq I(\bar{P})$
3. Scalability, For all $\alpha > 1$, $\alpha I(P) \geq I(\alpha P)$

본 논문이 정의한 Interference Function인 식 (10)이 위의 세 가지 조건을 성립하면, 식 (10)은 Standard Interference Function이 되며, 식 (12)의 반복과정을 통해 본 논문이 목표로 하는 전송전력의 최적화인 식 (2)를 최적화할 수 있게 된다. 다음은 증명을 통해 세 가지 조건이 성립함을 보인다.

Proposition 1. 식 (10)은 Positivity 조건이 성립된다. i.e., $I(P) > 0$ 이다.

증명) 식 (8)에서 $\sigma^2(s_i^T s_i) > 0$ 이다. 또한, $\gamma^* > 0$ 이므로, 항상 식 (13) 인 $I_i(P) > 0$ 이 성립한다.

$$I_i(P) = \frac{A}{h_{ia^*(i)}(s_i^T s_i)^2 \gamma^*} > 0 \quad (13)$$

여기서,

$$A = \sum_{j \neq i, j \in G_i} p_j h_{ja^*(i)}(s_i^T s_j)^2 + \sum_{k \neq i, k \in G_i} p_k h_{ka^*(i)}(s_i^T s_k)^2 + \sigma^2(s_i^T s_i)^2$$

Proposition 2. 식 (10)은 Monotonicity 조건이 성립된다. 만약 $P \geq \bar{P}$ 이면, $I(P) \geq I(\bar{P})$.

증명) P 와 \bar{P} 는 각각 식 (14), (15) 과 같다.

$$P = [p_1, \dots, p_i, \dots, p_K] \quad (14)$$

$$\bar{P} = [\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_i, \dots, \bar{p}_K] \quad (15)$$

$P \geq \bar{P}$ 이므로, 식 (16)이 성립한다.

$$p_k \geq \bar{p}_k \quad (16)$$

엑세스 포인트 $a(i)$ 가 정해졌다고 가정한다. 전송전력 벡터 P 에 대하여

$$I_i(P, a(i)) = \frac{\sum_{j \in G_i} p_j h_{ja(i)}(s_i^T s_j)^2 + \sum_{k \in G_i} p_k h_{ka(i)}(s_i^T s_k)^2 + \sigma^2(s_i^T s_i)^2}{h_{ia(i)}(s_i^T s_i)^2} \gamma^* \quad (17)$$

전송전력 벡터 \bar{P} 에 대하여

$$I_i(\bar{P}, a(i)) = \frac{\sum_{j \in G_i} \bar{p}_j h_{ja(i)}(s_i^T s_j)^2 + \sum_{k \in G_i} \bar{p}_k h_{ka(i)}(s_i^T s_k)^2 + \sigma^2(s_i^T s_i)^2}{h_{ia(i)}(s_i^T s_i)^2} \gamma^* \quad (18)$$

식 (17), (18)을 비교하면 $p_k \geq \bar{p}_k$ 이므로,

$$I_i(P, a(i)) \geq I_i(\bar{P}, a(i)) \quad (19)$$

전송전력 벡터가 P, \bar{P} 일 때, 각각의 전송전력 벡터

에 대한 간섭함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_i(P) &= \min_{a(i)} I_i(P, a(i)) \\ &= I_i(P, a^*(i)) \\ &\geq I_i(\bar{P}, a^*(i)) \\ &\geq \min_{a(i)} I_i(\bar{P}, a^*(i)) = I_i(\bar{P}, c_i^*) = I_i(\bar{P}) \end{aligned} \quad (20)$$

그러므로, 식 (23)에 의하여 $I(P) \geq I(\bar{P})$ 이 성립한다.

Proposition 3. 식 (10)은 Scalability 조건이 성립된다. 모든 $\alpha > 1$ 에 대하여, $\alpha I(P) > I(\alpha P)$.

증명) 엑세스 포인트 $a(i)$ 가 결정되었다고 가정한다. $\alpha > 1$ 에 대하여,

$$\alpha I_i(P, a(i)) = \quad (21)$$

$$\frac{\sum_{j \in G_i} \alpha p_j h_{ja(i)}(s_i^T s_j)^2 + \sum_{k \in G_i} \alpha p_k h_{ka(i)}(s_i^T s_k)^2 + \alpha \sigma^2(s_i^T s_i)^2}{h_{ia(i)}(s_i^T s_i)^2} \gamma^*$$

$$I_i(\alpha P, a(i)) = \quad (22)$$

$$\frac{\sum_{j \in G_i} \alpha p_j h_{ja(i)}(s_i^T s_j)^2 + \sum_{k \in G_i} \alpha p_k h_{ka(i)}(s_i^T s_k)^2 + \sigma^2(s_i^T s_i)^2}{h_{ia(i)}(s_i^T s_i)^2} \gamma^*$$

$\alpha > 1$ 이므로, $\alpha \sigma^2(s_i^T s_i)^2 > \sigma^2(s_i^T s_i)^2$.

$$\alpha I_i(P, a(i)) > I_i(\alpha P, a(i))$$

따라서,

식 (14)의 간섭함수 정의와 식 (4)에 의하여

$$\begin{aligned} \alpha I_i(P) &= \min_{a(i)} \alpha I_i(P, a(i)) \\ &= \alpha I_i(P, a^*(i)) \\ &> I_i(\alpha P, a^*(i)) \geq \min_{a(i)} I_i(\alpha P, a^*(i)) = I(\alpha P) \end{aligned} \quad (23)$$

그러므로, 식 (23)에 의하여 $\alpha I(P) > I(\alpha P)$ 이 성립한다.

2.2. TA 링크

l 번째 엑세스 포인트는 그룹내 단말들에게 식 (24)와 같이 신호를 전송한다.

$$X = \sum_{i \in G_i} \sqrt{p_i} b_i s_i \quad (24)$$

p_i, b_i, s_i 는 각각 액세스 포인트가 단말 i 에게 전송하는 전송전력, 정보비트, 시그너처 시퀀스이다. 단말 i 가 수신한 신호 및 간섭은 식 (25)와 같다.

$$y_i = \sqrt{p_i h_{a(i)i}} b_i s_i + \sum_{j \neq i, j \in G_i} \sqrt{p_j h_{a(i)i}} b_j s_j + \sum_{k \in G_i} \sqrt{p_k h_{a(k)i}} b_k s_k + n \quad (25)$$

식 (25) 우측 항은 각각 순서대로 단말 i 의 수신신호, 단말 i 와 동일한 액세스 그룹에 해당하는 단말들로부터의 간섭, 단말 i 와 다른 액세스 그룹에 해당하는 단말들로부터의 간섭, 그리고 노이즈이다. AT 링크에서의 목적은 액세스 포인트가 신호를 보내고, 수신 단말에서 요구하는 신호대 간섭비 γ^* 를 만족하면서 액세스 포인트들이 소모하는 총 전송전력을 최적화하는 것이다. 이를 수식화하면 식 (26), (27)과 같다.

$$\min_{p, A} \sum_i p_i \quad (26)$$

s.t. SIR_i

$$\geq \frac{p_i h_{a(i)i} (s_i^T s_i)^2}{\sum_{j \in G_i} p_j h_{a(i)i} (s_i^T s_j)^2 + \sum_{k \in G_i} p_k h_{a(k)i} (s_i^T s_k)^2 + \sigma^2 (s_i^T s_i)^2}$$

$$i = 1, \dots, K \quad (27)$$

식 (27)의 제한조건을 전송전력에 관해 표현하면, 식 (28), (29)와 같다.

$$\min_{p, A} \sum_i p_i \quad (28)$$

$$\text{s.t. } p_i \geq \frac{B}{a(i) h_{a(i)i} (s_i^T s_i)^2} \gamma^*$$

$$i = 1, \dots, K \quad (29)$$

여기서,

$$B = \sum_{j \in G_i} p_j h_{a(i)i} (s_i^T s_j)^2 + \sum_{k \in G_i} p_k h_{a(k)i} (s_i^T s_k)^2 + \sigma^2 (s_i^T s_i)^2$$

식 (28)에서 우측 항을 식 (30)과 같이 정의한다.

$$I_i(P, a(i)) = \frac{B}{h_{a(i)i} (s_i^T s_i)^2} \gamma^* \quad (30)$$

식 (30)을 단말 i 의 간섭함수(Interference Function)로 정의한다. 식 (30)을 액세스 포인트 $a(i)$ 로 최적화하면 식 (31)과 같다.

$$I_i(P) = I_i(P, a^*(i)) = \min_{a(i)} I_i(P, a(i)) \quad (31)$$

$a^*(i)$ 는 $I_i(P, a(i))$ 를 최소화하는 액세스 포인트이다. AT 링크에서의 Interference Function 벡터 $I(P) = [I_1(P), \dots, I_K(P)]$ 는 TA 링크에서와 마찬가지로 Standard Interference Function이 되기 위한 세 가지 조건을 충족한다. 증명은 AT 링크와 동일하므로 생략한다.

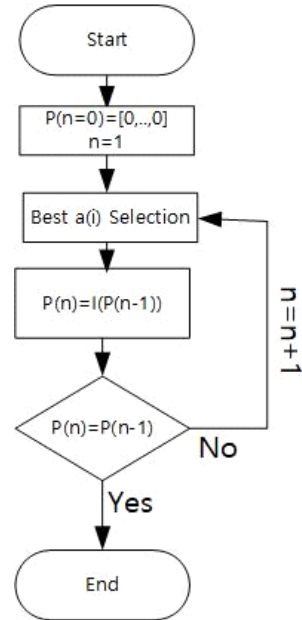


Fig. 3 Proposed Algorithm

III. 제안하는 알고리즘

제안하는 알고리즘은 그림 3과 같다.

알고리즘은 1) 최적의 액세스 포인트 선택과정과 2) 전송전력의 최적화 과정으로 진행되며, 전송전력 벡터가 수렴할 때까지 1), 2) 과정이 반복된다.

Step 1. 알고리즘 초기 단말들의 전송전력은

$$P = [0, 0, \dots, 0] \text{이다.}$$

Step 2. 개별 단말들은 최적의 액세스 포인트를 선택한다. 특히, Interference Function을 최소화하는 액세스 포인트를 선택한다.

$$I_i(P(n-1), a^*(i)) = \min_{a(i)} I_i(P(n-1), a(i))$$

Step 3. 선택된 $a^*(i)$ 에 대하여 개별 단말들은 최적의 전송전력을 선택한다. 특히, 아래 Interference Function을 이용해 전송전력 업데이트한다.

$$P(n) = I(P(n-1))$$

Step 4. 만약 전송전력 벡터가 이전 전송전력 벡터와 동일한 경우, $P(n) = P(n-1)$, 이는 수렴되었음을 의미한다. 만약, $P(n) \neq P(n-1)$ 이라면, Step 2, Step 3 과정을 반복한다.

IV. 실험결과

간섭은 $\sigma^2 = 10^{-13}$ 이다. 프로세싱 이득(Processing Gain) $N = 128$, 대역폭(Spreading Bandwidth) $W = 1.228 \text{ MHz}$ 으로 설정한다. 단말에게 요구되는 신호대 간섭비(SIR)는 $\gamma^* = 5$ 이다. 채널이득은 $\frac{r}{d^4}$ 이며, d 는 송신기와 수신기 사이의 거리이다. r 은 variance 8 dB 을 적용하는 log normal fading이다. 액세스 포인트는 200 m 간격으로 위치한다. 송신기와 액세스 포인트 사이의 거리는 200 m 안에서 균등하게 분포한다. 액세스 포인트는 $L = 3$ 으로 설정한다. $K = 20$ 개의 단말기에 대해 실험하였다.

그림 4는 Proposed Algorithm을 TA 링크에 적용한 수렴도에 대한 실험결과이다. 모든 단말의 SIR는 요구하는 SIR에 빠르게 수렴함을 확인할 수 있었다. 알고리즘에서 초기 전송전력은 모든 단말 0에서 시작한다. 이때, 단말들의 SIR은 0이다. 알고리즘이 반복적으로 진행하면서 단말들의 전송전력은 업데이트된다. 개별 단말들의 SIR 값도 업데이트된다. 알고리즘의 반복과정을 거쳐 전송전력이 수렴하게 되면 단말들의 SIR은 목표값에 도달하게 된다. Algorithm 1과 Algorithm 2의 SIR 수렴도도 전반적으로 그림 4와 유사하다.

그림 5는 제안하는 알고리즘은 AT 링크에 적용한 수렴도에 대한 실험결과이다. AT 링크에서와 마찬가지로 모든 단말의 신호대 간섭비는 요구하는 SIR 값에 빠르게 수렴함을 확인하였다. AT 링크에서의 알고리즘 반복 수행 동작 과정은 TA 링크에서와 동일하다. 하지만, AT 링크에서는 단말이 수신하는 신호와 간섭이고, TA 링크에서는 액세스 포인트가 수신하는 신호와 간섭이므로 각각의 링크가 받게 되는 간섭량은 다르다. 따라서, SIR가 수렴하는 과정은 다른 경향을 보인다.

표 1은 TA 링크와 AT 링크에서 소모되는 총 전송전력 결과이다. TA 링크와 AT 링크의 쌍대성을 확인하기 위하여 액세스 포인트는 먼저 $L = 1$ 으로 설정한다. $K = 20$ 개의 단말이 하나의 액세스 포인트에 접속한다. 세 가지 알고리즘을 비교 분석하였다. 1. 전송전력과 액세스 포인트 최적화(Proposed Algorithm) 2. 전송전력만을 최적화(Algorithm 1) 3. 전송전력 최적화와 근접 액세스 포인트 선택(Algorithm 2). 전송전력만을 최적화하는 Algorithm 1 무작위로 액세스 포인트를 선택하며, Algorithm 2에서는 가장 근접한 액세스 포인트를 선택한다. 액세스 포인트가 하나인 경우, $L = 1$ 에는 액세스 포인트를 선택할 필요가 없다. 따라서, 세 가지 알고리즘인 Proposed Algorithm, Algorithm 1, Algorithm 2는 결과가 같다. 표 1에서 확인할 수 있는 것처럼 AT 링크에서 소모되는 총 전송전력은 TA 링크에서 소모되는 총 전송전력과 같다. 즉, 총 전송전력 측면에서 AT 링크와 TA 링크는 쌍대성(Duality)이 성립한다.

표 1에서 액세스 포인트가 $L > 1$ 인 경우에도 쌍대성이 성립하는지를 확인하기 위하여, 액세스 포인트는 $L = 3$ 으로 설정하였다. $K = 20$ 개의 단말기에 대해 실험하였다. 마찬가지로, 세 가지 알고리즘 1) Proposed Algorithm, 2) Algorithm 1, 3) Algorithm 2를 비교 분석하였다. 총 전송전력 소모량은 Proposed Algorithm < Algorithm 2 < Algorithm 1 순으로 증가하고 있다. Proposed Algorithm은 전송전력과 액세스 포인트를 함께 최적화하고 있기에 소모하는 전송전력량이 가장 적다. Algorithm 2에서는 단말에서 가장 근접한 액세스 포인트를 선택하고 있으며, Algorithm 1에서는 load balancing을 적용하여 액세스 포인트에 균등하게 단말을 분배하였다. 실험결과 균등분배보다는 단말로부터 근접한 액세스 포인트에 접속하는 Algorithm 2가 전송전력 소모량 측면에서 유리한 경향을 보였다. 표 1에서

확인할 수 있는 것처럼, 액세스 포인트가 $L > 1$ 인 경우에는 AT 링크에서 소모되는 총 전송전력 값은 일반적으로 TA 링크에서의 전송전력과 다르다. 이는 AT 링크와 TA 링크의 수신단에서 받는 간섭량이 다르기 때문이다. 즉, AT 링크와 TA 링크가 쌍대성(Duality)이 성립하지 않는다.

V. 결론

본 연구에서는 소모하는 총 전송전력을 최적화하기 위하여, 전송전력 최적화와 액세스 포인트 최적화를 함께 고려하였다. TA 링크와 AT 링크에서 모두 적용이 가능한 Joint optimization 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 동작 과정과 실험적 성능을 요약하면 1)~4)와 같다. 1) 제안하는 알고리즘은 두 단계 스텝으로 구성된다. 즉, Step 1에서 최적의 액세스 포인트를 선택하고, Step 2에서 전송전력 최적화를 수행한다. 2) 제안하는 알고리즘은 10회 이하 반복수행하면 항상 최소의 전송전력에 수렴한다. 3) 전송전력을 최소화하기 위해서는 채널이득이 좋은 액세스 포인트를 선택하는 것이 일반적이다. 하지만, 실험결과에 의하면, 간섭이 큰 환경에서는 꼭 채널이득이 가장 좋은 액세스 포인트를 선택하지는 않는다는 점을 확인하였다. 즉, Proposed Algorithm과 Algorithm 2의 성능 차이는 바로 이 부분에 있다. 4) 다중 액세스 포인트 환경에서 TA 링크와 AT 링크에서 소모되는 총 전송전력은 다르다. 이것은 두 개 이상의 액세스 포인트 환경에서는 AT 링크와 TA 링크가 간섭환경이 서로 다르기 때문이다. 본 논문에서는 송신단 전송전력과 액세스 포인트를 최적화하여 소모하는 총 전송전력을 최적화하였다. 전송전력을 추가적으로 최적화하고자 다양한 방법을 연구해 볼 수 있다. 예를들어, 수신단에서 필터최적화를 통해서 소모하는 전송전력이 감소할 수 있을 것으로 예상된다. 향후에는 전송전력, 수신단 필터, 그리고 액세스 포인트를 동시에 최적화할 예정이다.

Table. 1 Total Transmit Power Consumption [Unit:W] <Number of Access Points: L=1, L=3>

	TA Link	AT Link
Proposed Algorithm(L=1)	14.03	14.03
Algorithm 1(L=1)	14.03	14.03
Algorithm 2(L=1)	14.03	14.03
Proposed Algorithm(L=3)	1.65	1.56
Algorithm 1(L=3)	2.11	1.98
Algorithm 2(L=3)	1.78	1.71

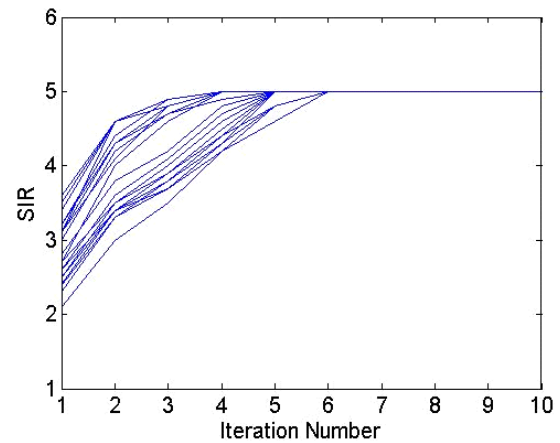


Fig. 4 SIR Convergence: TA Link

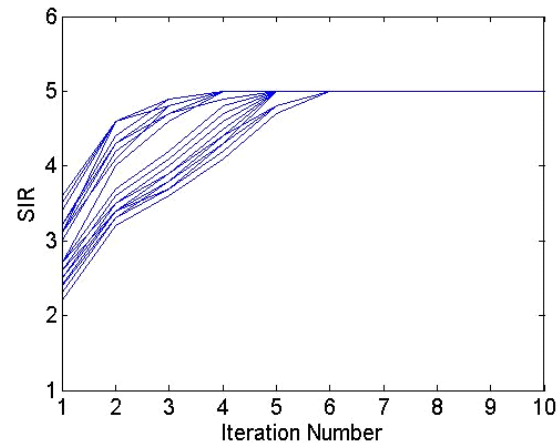


Fig. 5 SIR Convergence: AT Link

REFERENCES

- [1] R. Hermeto, A. Gallais, and F. Theoleyre, "Scheduling for IEEE802.15.4-TSCH and slow channel hopping MAC in low power industrial wireless networks: A survey," *Comput. Commun.*, vol. 114, pp. 84-105, Dec. 2017.
- [2] K. Kravetska, D. J. Vergados, Y. Jiang, and A. Michalas, "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, Sep. 2018.
- [3] R. H. Hwang, C. C. Wang, and W. B. Wang, "A Distributed Scheduling Algorithm for IEEE 802.15.4e Wireless Sensor Networks," *Computer Standards & Interfaces*, vol. 52, pp. 63-70, May 2017.
- [4] G. Lu, N. Sadagopan, B. Krishnamachari, and A. Goel, "Delay efficient sleep scheduling in wireless sensor networks," *In Proceedings of IEEE INFO COM*, vol. 4, no. C, pp. 2470-2481, 2005.
- [5] Q. Hua, and F. Lau, "Joint Link Scheduling and Topology Control for Wireless Sensor Networks with SINR Constraints," *In Handbook of Research on Developments and Trends in Wireless Sensor Networks: From Principle to Practice, IGI Global*, pp. 184-208, 2010.
- [6] M. Barcelo, A. Correa, J. L. Vicario, and A. Morell, "Joint routing, channel allocation and power control for real life wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 26, no. 5, pp. 945-956, May 2015.
- [7] C. Oh, "Transmit Power Control for Multi Access Points Environment," *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, vol. 25, no. 2, pp. 49-56, Apr. 2020.
- [8] R. Yates, "A framework for uplink power control in cellular radio systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, no. 7, pp. 1341-1347, Sep. 1995.



오창윤(Changyoon Oh)

1999년 2월 연세대학교 전기공학과 학사
 2001년 5월 Pennsylvania State University, Electrical Engineering, M.S.
 2005년 8월 Pennsylvania State University, Electrical Engineering, Ph.D.
 ※관심분야 : 이동통신 PHY/MAC 표준화, D2D Communications