

논문 2020-15-14

다중 액세스 포인트에서 전송전력과 MMSE 수신필터 알고리즘

(Transmit Power and MMSE Receiver Filter Algorithm for Multi Access Points)

오 창 윤*
(Changyoon Oh)

Abstract : We investigate the optimization problem of transmit power control and MMSE Receiver filter for multi access points environment. Previous work showed that increasing the number of access points decreases the transmit power consumption. Accordingly, transmit power control algorithm was developed in such a way that the transmit power is minimized, while each terminal meets Signal to Interference and Noise Ratio Requirement. In this work, we further reduce the transmit power consumption by optimizing the transmit power level and the MMSE receiver filter together. We showed that the proposed joint optimization algorithm satisfies the necessary and sufficient conditions to be standard interference function, which guarantees convergence and minimum transmit power consumption. We observed that the proposed algorithm outperforms the algorithm which only optimizes the transmit power.

Keywords : Access point, Convergence, MMSE, Power control, Transmit power

1. Introduction

통신시스템에서 송신단과 수신단 사이의 거리가 멀어질수록 소모하는 전송전력은 증가한다. 통신 시스템에서 액세스 포인트의 수를 증가시킴으로 소모하는 전송전력값을 감소시킬 수 있다. 효율적 주파수 사용을 위해서는 주파수 재사용은 필수적이다. 하지만, 주파수를 재사용하는 방법은 동일한 주파수를 재사용하는 통신링크간에 간섭을 주고 받는다. 하나의 통신링크에서 전송전력의 감소는 주파수를 재사용하는 다른 통신링크에게는 간섭이 감소하는 효과를 준다. 따라서, 개별 통신링크의 전송전력제어를 통해 전체 통신링크의 간섭을 감소시킬 수 있다. 통신시스템이 CDMA 방식을 적용하는 경우, 통신링크의 수신단에서 필터를 최적화하는 신호처리 기법을 적용하여 개별 통신링크에서의 간섭을 최소화

할 수 있다. 본 논문에서는 전송전력 레벨과 수신단 필터를 동시에 최적화하여 단말들이 소모하는 전송전력을 최소화하고자 한다.

논문 [1-4]에서는 스케줄링을 이용해 간섭문제를 해결하고자 하였다. 각각 MAC 레벨 [1], Load Balancing 기법 [2], 분산적 기법 [3], 슬립모드 활용 [4]을 적용하기도 하였다. 논문 [5, 6]은 스케줄링과 다른 기술들을 접목하여 간섭문제를 처리하고자 하였다. 논문 [7-10]은 수신단 신호처리 기술인 빔포밍을 활용하여 간섭을 관리하고자 하였다. 구체적으로, 논문 [7-9]은 전송전력과 빔포밍을 함께 적용하고 있으며, 논문 [10]은 빔포밍과 데이터 라우팅을 함께 최적화에 적용하고 있다.

기존 연구들은 액세스 포인트 사이의 거리가 충분히 멀다는 가정하에 하나의 액세스 포인트만을 운용하는 환경에서 전송전력 방안을 연구하였다. [11]에서는 다수 개의 액세스 포인트끼리 서로 간섭을 주는 환경에서 전송전력제어 알고리즘을 제안하였고, 액세스 포인트 개수를 증가시켜 단말들이 소모하는 전송전력이 감소함을 보여주고 있다. 액세스 포인트끼리의 간섭을 고려한 환경에서는 효과적인 간섭관리 기술을 적용하여 소모하는 전송전력을

*Corresponding Author

(changyoonoh@inhac.ac.kr)

Received: Apr. 9, 2020, Revised: May 12, 2020,

Accepted: May 18, 2020.

C. Oh: Inha Technical College (Assoc. Prof.)

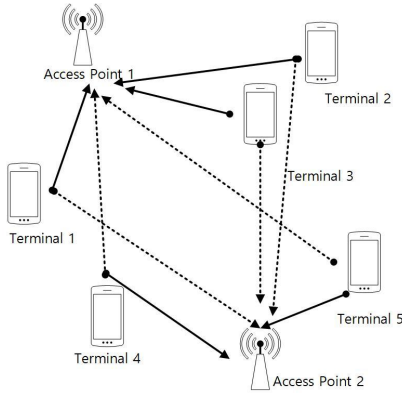


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1 System Model

최소화시킬 수 있다. 본 연구에서는 소모하는 전송전력을 최적화하기 위해 두 가지 간섭관리 기술인 1) 통신링크의 송신단 전송전력 2) 통신링크의 MMSE (Minimum Mean Squared Error) 수신단필터를 함께 최적화하고자 한다.

II. Transmit Power and MMSE Receiver Filter Optimization

1. System Model

그림 1은 프로세싱 이득이 N 인 DS-CDMA (Direct Sequence Code Division Multiple Access)를 운용하는 통신시스템이다. K 개의 단말은 L 개의 액세스 포인트 중 채널이득이 가장 좋은 하나의 액세스 포인트에 접속하여 신호를 전송한다. 신호는 실선으로 간섭은 점선으로 표현한다. 액세스 포인트 l 이 단말 i 의 신호와 간섭을 수신하며, 식 (1)과 같다.

$$r_i = \sqrt{p_i} h_i b_i s_i + \sum_{j \neq i, j \in G_l} \sqrt{p_j} h_j b_j s_j + \sum_{k \in G_l} \sqrt{p_k} h_k b_k s_k + n. \quad (1)$$

p_i , g_i , b_i 는 각각 전송전력 (Transmit Power), 채널이득 (Channel Gain), 정보비트 (Information Bit)이며 스칼라량이다. s_i 는 단말 i 의 시그니처 시퀀스 (Signature Sequence)이며, 크기가 N 인 벡터이다. n 은 크기가 N 인 가우시안벡터이다. 평균은 0이며, $E(nn^T) = \sigma^2 I_N$ 이다. G_l ($l = 1, \dots, L$)는 l

번째 액세스 포인트 그룹을 표시한다. 식 (1)에 오른쪽 항은 각각 순서대로 단말 i 로부터 수신한 신호, 단말 i 와 동일그룹에 속하는 단말로부터 수신한 간섭, 단말 i 와 다른그룹에 속하는 단말로부터 수신한 간섭, 그리고 노이즈이다.

2. Problem Formulation

본 논문의 목적은 제한조건인 식 (3)을 만족하면서 단말들이 소모하는 전송전력량이 최소화되도록 식 (2)에서의 전송전력값과 수신단필터값을 구하는 것이다. 식 (3)의 제한조건은 각각의 단말이 요구하는 신호대간섭잡음비 (Signal to Interference and Noise Ratio (SINR)) γ^* 를 만족하는 것이다.

$$\min_{P, C} \sum_{i=1}^L \sum_{i \in G_i} p_i, \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \\ \text{SINR}_i = \frac{p_i h_i (c_i^T s_i)^2}{P_{i,same} + P_{i,different} + P_{i,noise}} \geq \gamma^*, \quad (3) \\ i = 1, \dots, K.$$

$P_{i,same}$ 는 단말 i 와 동일그룹에 포함되는 단말로부터의 간섭파워이다. $P_{i,different}$ 는 단말 i 와 다른 그룹에 포함되는 단말로부터의 간섭파워이다. $P_{i,noise}$ 는 노이즈파워이다. 구체적으로, 식 (4), (5), (6)과 같다.

$$P_{i,same} = \sum_{j \in G_i} p_j h_j (c_j^T s_i)^2, \quad (4)$$

$$P_{i,different} = \sum_{k \in G_l, k \neq i} p_k h_k (c_k^T s_i)^2, \quad (5)$$

$$P_{i,noise} = \sigma^2 (c_i^T s_i)^2. \quad (6)$$

γ^* 는 서비스 품질을 만족하도록 하는 목표 신호대간섭잡음비 (Target SINR)이다. c_i 는 단말 i 의 수신단필터이다. 전송전력벡터 P 와 수신단필터 벡터 C 는 각각 식 (7), (8)와 같다.

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_K], \quad (7)$$

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_K]. \quad (8)$$

단말 i 의 수신단필터 c_i 는 단말 i 의 신호대간섭잡음비인 SINR_i 에게만 영향을 준다. 따라서, 식 (2), (3)은 식 (9), (10)으로 재구성한다.

$$\min_{P,C} \sum_{l=1}^L \sum_{i \in G_l} p_i, \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \max_{c_i} \text{SINR}_i \geq \gamma^*, \quad (10)$$

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

식 (9), (10)을 단말 i 의 전송전력 p_i 로 표현하면, 식 (11), (12), (13)과 같다.

$$\min_{P,C} \sum_{l=1}^L \sum_{i \in G_l} p_i, \quad (11)$$

$$\text{s.t. } \min_{c_i} p_i \geq \frac{P_{i,same} + P_{i,different} + P_{i,noise}}{(c_i^T s_i)^2 h_i} \gamma^*, \quad (12)$$

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

3. Standard Interference Function

식 (12)의 오른쪽 항을 식 (13)으로 정의한다.

$$I_i(P, c_i) = \frac{P_{i,same} + P_{i,different} + P_{i,noise}}{(c_i^T s_i)^2 h_i} \gamma^*. \quad (13)$$

$I_i(P, c_i)$ 는 전송전력벡터 P 와 단말 i 의 수신단 필터 c_i 의 함수임을 주목한다. 식 (13)을 식 (12)에 적용하고, 단말 i 의 간섭함수 (Interference Function)을 식 (14)로 정의한다.

$$I_i(P) = \min_{c_i} I_i(P, c_i) = I_i(I_i^*). \quad (14)$$

I_i^* 는 $I_i(P, c_i)$ 를 최소화하는 수신단필터이다.

식 (14)에서 단말 i 의 간섭함수인 $I_i(P)$ 는 단말 i 의 수신단필터인 c_i 에 의해 $I_i(P, c_i)$ 이 최소화된 결과값을 의미한다. 각각의 단말의 간섭함수로부터 간섭함수 벡터를 식 (15)과 같이 정의한다.

$$I(P) = [I_1(P), I_2(P), \dots, I_K(P)]. \quad (15)$$

식 (15)의 간섭함수를 최소화하는 방법으로 Iterative Algorithm을 제안한다. [12]에서는 하나의 액세스 포인트에 접속하는 여러 단말들에 대하여 전송전력과 수신단필터를 최적화하는 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서는 [12]의 연구결과를 확장하여 동일 액세스그룹에 포함하는 단말뿐만 아니라, 인접한 액세스 그룹에 포함되는 단말들까지 고려하여 간섭함수를 정의한다. [13]에 의하면 간섭함수가 세 가지 수렴조건을 만족하면 Standard

Interference Function이 된다. [13]에서는 Standard Interference Function은 식 (16)이 성립하며 최소전력값에 수렴함을 보였다.

$$P(n+1) = I(P(n)). \quad (16)$$

$P(n)$ 는 반복과정을 n 번 수행한 전송전력벡터이다. Standard Interference Function의 성립조건은 다음과 같다.

Condition 1. Positivity $P(n+1) = I(P) > 0$

Condition 2. Monotonicity

If $P \geq \bar{P}$, then $I(P) \geq I(\bar{P})$

Condition 3. For all $\alpha > 1$, $\alpha I(P) \geq I(\alpha P)$

이상 세 가지 조건들이 성립하면 Standard Interference Function이다. Iteration power control algorithm은 수렴 (Convergence)이 보장된다. 또한, 수렴한 전송전력벡터는 최소의 전송전력벡터이다. Proposition 1, 2, 3는 식 (15)가 Standard Interference임을 보여준다.

Proposition 1. 식 (14)는 Positivity가 성립한다. 즉, $I(P) > 0$ 이다.

증명) 식 (7)에서 $P_{i,noise} = \sigma^2 (c_i^T s_i)^2 > 0$ 이고, $\gamma^* > 0$ 이므로, $I_i(P) > 0$ 이다. 따라서, 식 (17)이 성립한다.

$$I_i(P) = \min_{c_i} \frac{P_{i,same} + P_{i,out} + P_{i,noise}}{(c_i^T h_i)^2} \gamma^* > 0$$

$$= \frac{P_{i,same} + P_{i,out} + P_{i,noise}}{(c_i^T h_i)^2} \gamma^* > 0. \quad (17)$$

간섭함수벡터에 적용하면, $I(P) > 0$.

Proposition 2. 식 (14)는 Monotonicity가 성립한다. 즉, If $P \geq \bar{P}$, then $I(P) \geq I(\bar{P})$.

증명) P 와 \bar{P} 를 각각 식 (18), (19)로 정의한다.

$$P = [p_1, \dots, p_i, \dots, p_K], \quad (18)$$

$$\bar{P} = [\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_i, \dots, \bar{p}_K], \quad (19)$$

$P \geq \bar{P}$ 를 개별단말에 적용하면, 식 (20)과 같다.

$$p_k \geq \bar{p}_k. \quad (20)$$

전송전력 벡터 $P = [p_1, \dots, p_i, \dots, p_K]$ 에 대한 간섭파워는 식 (21), (22), (23)과 같다.

$$P_{i,same} = \sum_{j \in G_i} p_j h_j (c_j^T s_i)^2, \quad (21)$$

$$P_{i,different} = \sum_{k \in G_i} p_k h_k (c_k^T s_i)^2, \quad (22)$$

$$P_{i,noise} = \sigma^2 (c_i^T s_i)^2. \quad (23)$$

전송전력 벡터 $\bar{P} = [\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_i, \dots, \bar{p}_K]$ 에 대한 간섭파워는 식 (24), (25), (26)과 같다.

$$\overline{P_{i,same}} = \sum_{j \in G_i} \bar{p}_j h_j (c_j^T s_i)^2, \quad (24)$$

$$\overline{P_{i,different}} = \sum_{k \in G_i} \bar{p}_k h_k (c_k^T s_i)^2, \quad (25)$$

$$\overline{P_{i,noise}} = \sigma^2 (c_i^T s_i)^2. \quad (26)$$

고정된 c_i 값에 대하여, (21), (22), (23)과 (24), (25), (26)을 비교하면, 식 (20)에 의하여 식 (27), (28), (29)와 같다.

$$P_{i,same} \geq \overline{P_{i,same}}, \quad (27)$$

$$P_{i,different} \geq \overline{P_{i,different}}, \quad (28)$$

$$P_{i,noise} = \overline{P_{i,noise}}. \quad (29)$$

따라서, 식 (30)이 성립한다.

$$I_i(P, c_i) = \frac{P_{i,same} + P_{i,different} + P_{i,noise}}{(c_i^T s_i)^2 h_i} \gamma^* \quad (30)$$

$$\geq I_i(\bar{P}, c_i) = \frac{\overline{P_{i,same}} + \overline{P_{i,different}} + \overline{P_{i,noise}}}{(c_i^T s_i)^2 h_i} \gamma^*.$$

전송전력 벡터 P, \bar{P} 에 대하여, 간섭함수는 식 (31), (32)와 같다.

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

$$I_i(\bar{P}) = \min_{c_i} I_i(\bar{P}, c_i) = I_i(\bar{P}, c_i^*). \quad (32)$$

$I_i(P)$ 와 $I_i(\bar{P})$ 를 비교하면, 식(30), (31), (32)로부터 식 (33)이 성립한다.

$$\begin{aligned} I_i(P) &= \min_{c_i} I_i(P, c_i) = I_i(P, c_i^*) \\ &\geq I_i(\bar{P}, c_i^*) \geq \min_{c_i} I_i(\bar{P}, c_i) = I_i(\bar{P}). \end{aligned} \quad (33)$$

따라서, 식 (34)가 성립한다.

$$I_i(P) \geq I_i(\bar{P}). \quad (34)$$

간섭함수 벡터에 적용하면, $I(P) \geq I(\bar{P})$.

Proposition 3. 식 (10)은 Scalability가 성립한다. 즉, For all $\alpha > 1$, $\alpha I(P) > I(\alpha P)$.

증명) 고정된 c_i^* 값과 $\alpha > 1$ 에 대하여, 식 (35), (36)을 얻는다.

$$\alpha I_i(P, c_i^*) = \frac{\alpha P_{i,same} + \alpha P_{i,different} + \alpha P_{i,noise}}{(c_i^{*T} s_i)^2 h_i} \gamma^*, \quad (35)$$

$$I_i(\alpha P, c_i^*) = \frac{\alpha P_{i,same} + \alpha P_{i,different} + P_{i,noise}}{(c_i^{*T} s_i)^2 h_i} \gamma^*. \quad (36)$$

식 (35), (36)을 비교하면, $\alpha P_{i,noise} > P_{i,noise}$ 이므로, 식 (37)이 성립한다.

$$\alpha I_i(P, c_i^*) > I_i(\alpha P, c_i^*). \quad (37)$$

식 (14)의 간섭함수 정의와 식 (37)에 의하여 식 (38)이 성립한다.

$$\alpha I_i(P) = \min_{c_i} \alpha I_i(P, c_i) = \alpha I_i(P, c_i^*) \quad (38)$$

$$> I_i(\alpha P, c_i^*) \geq \min_{c_i} I_i(\alpha P, c_i) = I(\alpha P),$$

간섭함수벡터에 적용하면, $\alpha I(P) > I(\alpha P)$.

4. Proposed Iterative Algorithm

제안하는 알고리즘은 2단계로 구성된다.

1) 먼저 주어진 전송전력벡터에서, 간섭함수를 최소화하도록 수신단필터를 최적화한다. 2) 수신단필터가 최적화된 간섭함수를 전송전력 최적화한다. 최적화된 수신단필터 [12]는 식 (39), (40)으로부터 계산할 수 있다.

$$c_i = \frac{\sqrt{p_i}}{1 + p_i s_i^T A_i^T s_i} A_i^{-1} s_i, \quad (39)$$

$$A_i = \sum_{j \neq i} p_j h_{ji} s_j s_j^T + \sigma^2 I. \quad (40)$$

A_i 는 크기가 $N \times N$ 인 간섭성분 행렬이다. 즉, 최적화된 수신단필터를 적용하여 전송전력을 최적화하는 결과값은 식 (41)을 적용하여 계산한다.

$$P_i(n) = \frac{P_{i,same} + P_{i,different} + P_{i,noise}}{(c_i^T s_i)^2 h_i} \gamma^* \quad (41)$$

식 (41)에서 $P_{i,same}$, $P_{i,different}$, $P_{i,noise}$ 는 식 (4), (5), (6)에서 정의한 값들이다.

Iterative Algorithm은 그림 2와 같다.

Step 1. 전송전력 초기값 설정

$$P = [0, 0, \dots, 0]$$

Step 2 수신단필터 최적화

$$I_i(P) = \min_{c_i} I_i(P, c_i)$$

Step 3. Interference Function을 이용해 전송 전력 벡터 업데이트

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

Step 4. 전송전력벡터 수렴 확인

If $P(n+1) \neq P(n)$,

$n = n + 1$;

Go to Step 2

else

Go to Step 4

Step 5. END

Step 1에서 알고리즘은 모든 단말들의 전송전력을 0으로 설정하여 진행한다. Step 2에서 액세스 포인트에서 사용할 수신단필터를 최적화한다. 수신단필터는 이전단계에서 얻어진 모든 단말들의 전송전력값을 기반으로 최적화한다. Step 3에서는 수신단필터 최적화값을 기반으로 Interference Function을 활용하여 단말의 전송전력을 업데이트한다. Step 4에서 전송전력의 수렴여부를 확인하고, Step 2와 Step 3를 반복한다.

알고리즘의 결과값은 단말이 적용할 전송전력과 액세스 포인트에서 적용할 수신단 MMSE 필터이다. 최적화를 포함한 알고리즘의 모든 수행은 액세스 포인트에서 이루어지며, 알고리즘 수행이 종료된 후, 액세스 포인트는 전송전력의 결과값만을 주기적으로 단말에게 전송되는 제어채널 (Control Channel)을 통해 개별 단말에게 통보한다.

III. Numerical Results

실험 환경은 간섭 $\sigma^2 = 10^{-13}$ 이며, 프로세싱 이득 (Processing Gain) $N=128$, 대역폭

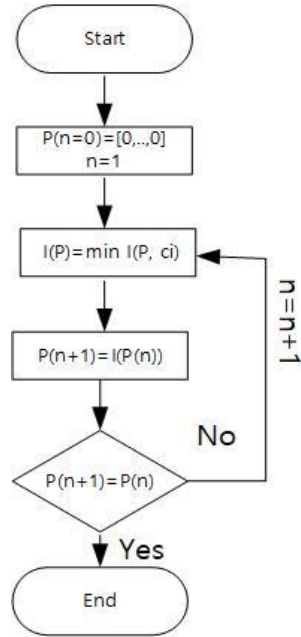


그림 2. 제안하는 알고리즘
Fig. 2 Proposed Algorithm

(Spreading Bandwidth) $W=1.228MHz$ 이다. 액세스 포인트와 단말 사이의 채널 이득은 $\frac{r}{d^4}$ 이다. r 은 variance $8dB$ 의 log normal fading 이며, d 는 액세스 포인트와 단말 사이의 거리이다. Small Scale fading은 고려하지 않았다. 액세스 포인트는 200m 간격으로 위치하며, 송신 단말과 액세스 포인트 사이의 거리는 200m에서 균일하게 분포한다. 액세스 포인트는 $L=3$, 단말은 $K=20$ 이다. 제안하는 알고리즘은 전송전력과 MMSE 수신필터를 최적화한다. MMSE 수신필터 최적화없이 전송전력만을 최적화하는 방법 (Algorithm 1)과 성능비교를 진행하였다.

그림 3에서는 목표로 하는 신호대간섭잡음비 (SINR)를 $\gamma^* = 5$ 로 설정하여 Algorithm 1의 수렴도를 확인하였다. Algorithm 1에서는 수신단필터를 최적화하지 않기 때문에 단말의 시그너처 시퀀스를 수신단필터값으로 사용한다. 즉, $c_i = s_i$. 알고리즘의 반복과정을 거치며 모든 통신링크의 전송전력벡터값이 최적화 값으로 수렴하였으며, 또한 목표로 하는 SINR 값에 도달하였다.

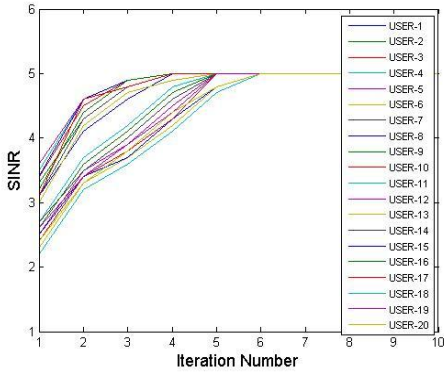


그림 3. 알고리즘 1의 SINR 수렴

Fig. 3 SINR Convergence of Algorithm 1 ($\gamma^* = 5$)

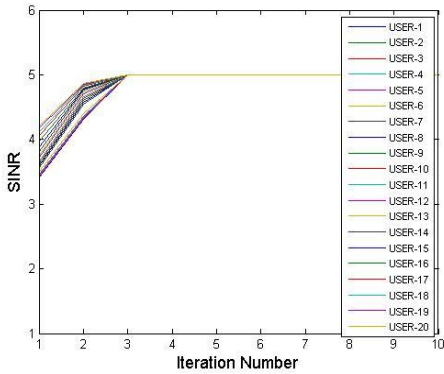


그림 4. 제안하는 알고리즘의 SINR 수렴

Fig. 4 SINR Convergence of Proposed Algorithm 1 ($\gamma^* = 5$)

그림 4 는 목표로 하는 신호대간섭잡음비 (SINR) 를 $\gamma^* = 5$ 로 설정하고, Proposed Algorithm의 수렴도 결과이다. 알고리즘에서는 모든 단말들의 전송전력 초기값은 0으로 설정한다. 수신단 필터의 초기값은 시스템 시퀀스와 동일한 값 즉, $c_i = s_i$ 로 시작한다. 알고리즘이 반복되는 과정에서 전송전력 벡터값과 수신단필터값은 계속 업데이트된다. 실험결과 모든 통신링크에서 알고리즘 반복과정을 통해서 전송전력 벡터값과 수신단필터값이 수렴하였고, 하지만, 그림 3과 비교하면 Proposed Algorithm은 더 빠르게 목표로 하는 SIR 값에 수렴함을 확인할 수 있었다.

그림 5 에서는 목표로 하는 신호대간섭잡음비 $\gamma^* = 5$, $\gamma^* = 7$ 두 가지 조건에서 Proposed

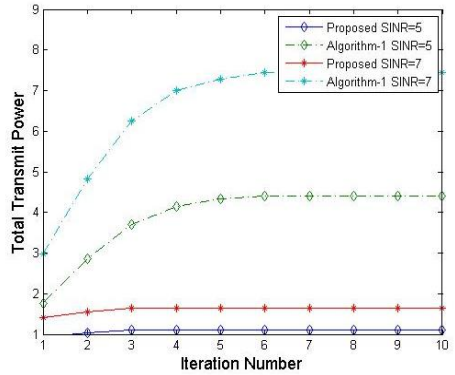


그림 5. 전송전력 수렴

Fig. 5 Transmit Power Convergence

Algorithm (전송전력+ 수신단필터최적화)과 Algorithm 1 (전송전력만을 최적화)의 소모하는 총 전송전력의 수렴을 비교하였다. 두 가지 조건 모두의 경우에서 전송전력만을 최적화하는 Algorithm 1 과 비교하여 제안하는 알고리즘은 대략 40%의 소모전송전력 이득이 있음을 확인하였다. 제안하는 알고리즘은 단말의 개수가 많은 경우에 효과적이다. 예를 들어, 전송전력만을 최적화하는 알고리즘 (알고리즘1)은 단말의 개수가 일정수준 이상으로 증가하면 간섭량의 증가로 알고리즘이 더 이상 목표하는 값에 수렴하지 않는다. 반면, 제안하는 알고리즘은 전송전력과 수신단 필터를 동시에 최적화하기 때문에 단말의 개수가 증가하더라도 수신단필터의 최적화를 통해 간섭을 효과적으로 제어할 수 있다.

IV. Conclusions

여러 개의 액세스 포인트를 운용하는 것은 송신단과 수신단 사이의 거리를 가깝게 하여, 소모하는 전송전력을 줄일 수 있다. 반면, 인접하는 액세스 포인트에 접속하는 단말들로부터 간섭의 영향이 커질 수 있다. 따라서, 효과적인 간섭관리 기술을 적용할 필요성이 커진다. 본 논문에서는 전송전력과 수신단필터를 함께 최적화하여 이러한 문제를 해결하였다. 1) 제안하는 전송전력과 수신단필터 최적화 알고리즘은 전송전력 최적화 벡터에 항상 수렴함을 증명하였다. 2) 실험 결과를 통하여 전송전력만을 최적화하는 알고리즘 대비 전송전력과 수신단필터를 함께 최적화하는 방법이 소모하는 총 전송전력을 대략 30-40% 절감할 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] R. Hermeto, A. Gallais, F. Theoleyre, "Scheduling for IEEE802.15.4-TSCH and Slow Channel Hopping MAC in Low Power Industrial Wireless Networks: A Survey," *Computer Communications*, Vol. 114, pp. 84-105, 2017.
- [2] K. Kravlevska, D.J. Vergados, Y. Jiang, A. Michalas, "A 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, 2018.
- [3] R.H. Hwang, C.C. Wang, W.B. Wang, "A Distributed Scheduling Algorithm for IEEE 802.15.4e Wireless Sensor Networks," *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 52, pp. 63-70, 2017.
- [4] G. Lu, N. Sadagopan, B. Krishnamachari, A. Goel, "Delay Efficient Sleep Scheduling in Wireless Sensor Networks," *Proceedings of IEEE INFO COM*, Vol. 4, No. C, pp. 2470-2481, 2005.
- [5] Q. Hua, F. Lau, "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, 2010.
- [6] M. Barceló, A. Correa, J.L. Vicario, 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, 2015.
- [7] S. Chung, I. Joe, "Intelligent Transmission Power Allocation for Distributed Beamforming in Wireless Sensor Networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks* Vol. 11, No. 6, 510516, 2015.
- [8] D.P. Shetty, M.P. Lakshmi, "Algorithms for Minimizing the Receiver Interference in a Wireless Sensor Network," 2016 IEEE Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER), Mangalore, pp. 113-118, 2016.
- [9] S. Jayaprakasam, S.K.A. Rahim, C.Y. Leow, "Distributed and Collaborative Beamforming in Wireless Sensor Networks: Classifications, Trends, and Research Directions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 19, No. 4, pp. 2092-2116, 2017.
- [10] R. Du, A. Özçelikkale, C. Fischione, M. Xiao, "Towards Immortal Wireless Sensor Networks by Optimal Energy Beamforming and Data Routing," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 17, No. 8, pp. 5338-5352, 2018.
- [11] 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, 2020 (in Korean).
- [12] S. Ulukus, R. Yates, "Adaptive Power Control and MMSE Interference Suppression," *Wireless Networks* 4, pp. 489 - 496, 1998.
- [13] 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, 1996.

Changyoon Oh (오 창 윤)

He received the B.S. degree in Electrical Engineering from Yonsei University, Korea in 1999 and M.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Pennsylvania State University, U.S.A in 2001,2005, respectively. He is currently an associate Professor in the Department of Information & Communications Engineering at Inha Technical College. He is interested in Physical Layer Issue and wireless standard.

Email: changyoonoh@inhatic.ac.kr