

Study on the Transmit Power, MMSE Receiver Filter, and Access Point Selection Optimization Algorithm

Changyoon Oh*

*Professor, Dept. of Information and Communication Engineering, Inha Technical College, Incheon, Korea

[Abstract]

We consider the joint optimization problem of transmit power level, MMSE receiver filter and access point(AP) selection for multi access points environment. In the previous work, transmit power and MMSE receiver filter were jointly optimized[1] and transmit power and best access point were optimized jointly[2]. For each case, the algorithm was proposed and its convergence which guarantees the minimum total transmit power was proved. In this paper, we further improve the algorithm by jointly optimizing three parameters. More specifically, 1) we propose the algorithm by considering transmit power, MMSE receiver filter and access point selection jointly. 2) we prove that the proposed algorithm guarantees convergence with minimum transmit power consumption. In the simulation results, it is shown that proposed algorithm outperforms two other algorithms, i.e., 1) algorithm with transmit power and MMSE receiver filter, and 2) algorithm with transmit power and best access point selection.

▶ **Key words:** Access Point Selection, Minimum Mean Squared Error(MMSE), Optimization, Power Control, Transmit Power

[요 약]

다중 액세스포인트에 적용하는 전송전력, 최소평균제곱오차(MMSE) 수신필터와 최적의 액세스포인트 선택 최적화문제를 살펴본다. 지난 연구에서는 전송전력과 MMSE 수신필터 최적화문제[1]와 전송전력과 최적의 액세스포인트 선택문제[2]를 다루었다. 각각의 문제에 대한 알고리즘을 제안하고 알고리즘의 전송전력의 최소값에 수렴함을 증명하였다. 본 논문에서는 세 가지 변수를 함께 최적화하여 알고리즘의 성능을 개선한다. 구체적으로, 1) 전송전력, MMSE 수신필터, 액세스포인트 선정을 동시에 고려하여 알고리즘을 제안한다. 2) 또한, 제안하는 알고리즘이 최적화 전송전력값에 수렴하는 것이 보장하는 것을 증명한다. 제안하는 알고리즘이 기존에 제안되었던 두 개의 알고리즘인 1)전송전력과 MMSE 수신필터 최적화 알고리즘, 2) 전송전력 최적화 알고리즘보다 전송전력 소모량에서 성능이 우수함을 실험을 통해서 확인하였다.

▶ **주제어:** 액세스 포인트 선택, 최소평균제곱오차, 최적화, 전력제어, 전송전력

-
- First Author: Changyoon Oh, Corresponding Author: Changyoon Oh
 - Changyoon Oh (changyoonoh@inhatc.ac.kr), Dept. of Information and Communication Engineering, Inha Technical College
 - Received: 2021. 06. 23, Revised: 2021. 08. 24, Accepted: 2021. 08. 25.
 - This work was published in part in the Proceedings of the Korean Society of Computer Information Conference, July 2021.

I. Introduction

주파수 재사용은 용량증대를 위하여 주로 사용하는 기법이다. 하지만, 주파수 재사용은 동일 주파수를 사용하는 링크간의 간섭을 초래하고, 이는 시스템 용량을 저하시키기도 한다. 효과적인 간섭관리는 통신시스템의 용량증대와 직접적인 관련을 가지기 때문에 간섭관리 기법을 연구할 필요가 있다. 본 논문에서는 통신시스템이 CDMA 방식을 적용하는 환경에서 송신단 전송전력레벨, 수신필터, 그리고 최적의 액세스 포인트 선정을 동시에 고려하여 전송전력 최적화 문제를 살펴보고자 한다.

II. Preliminaries

1. Related works

1.1 국내 동향

통신시스템에서 송신단과 수신단 사이의 거리가 멀어질수록 소모하는 전송전력은 증가한다. 통신시스템에서 액세스 포인트의 수를 증가시킴으로 소모하는 전송전력값을 감소시킬 수 있다. 주파수 자원의 효율적인 사용 방법으로 주파수 재사용이 대표적이다. 하지만, 주파수를 재사용하는 방법은 통신시스템에서 동일한 주파수를 재사용하는 통신링크간에 서로 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 수신 필터를 최적화하는 신호처리 기법을 적용하여 개별 통신링크에서의 간섭을 최소화할 수 있다. 본 논문에서는 전송전력 레벨과 수신단 필터, 그리고 최적의 액세스 포인트를 동시에 최적화하여 소모하는 단말들이 소모하는 총 전송전력을 최소화하고자 한다.

간섭문제를 해결하기 위하여 스케줄링 기법을 적용하는 연구들이 진행되어져 왔다 [3-6]. 구체적으로, MAC 레벨에서 스케줄링 기법을 적용하거나 [3], Load Balancing 기법을 적용하여 간섭의 양을 분산시키는 방법[4-5], 슬립 모드 활용[6]을 적용하기도 하였다. 간섭문제의 성능 개선을 위하여 스케줄링과 다른 기술들을 접목하여 간섭문제를 처리하는 방법도 연구되어져 왔다 [7-8].

신호처리 기법이 간섭관리에 적용되기도 하는데, 수신단 신호처리 기술인 빔포밍을 활용하여 간섭을 관리할 수도 있다 [9-12]. 구체적으로, 전송전력과 빔포밍을 함께 적용

하여 모든 사용자들이 전송하는 전력량을 제어하여 간섭을 관리할 수 있다[10-11]. 라우팅을 빔포밍에 접목하여 전송전력을 최적화에 적용할 수도 있다 [12]. 일반적으로 전송전력은 간섭을 제어하는 대표적인 제어기술이다 [13-15]. 초기 전송부터 높은 전송전력을 사용하여 전송하기보다는 재전송을 고려하여 전송전력을 제어할 수 있는데, 전송전력 제어와 함께 물리계층 재전송 기술인 HARQ(Hybrid ARQ) 기술을 적용하여 전송전력을 최소화하는 방법도 연구되어져 왔다 [16]. 간섭 환경에 따라 간섭에 큰 영향을 주는 성분이 있는데, 주요 간섭을 기반으로 전송용량을 높이고자 간섭분석에 대한 방법도 연구되었다 [17].

본 연구에서는 액세스 포인트선택, 수신 필터, 전송전력을 동시에 고려하여 단말들의 전송전력을 최적화한다. 기존 연구에서는 액세스 포인트 선정 최적화없이 MMSE 수신 필터와 전송전력을 동시에 최적화하는 알고리즘[1]을 제안하거나, MMSE 수신필터 최적화없이 전송전력과 액세스 포인트 선정을 최적화하는 알고리즘[2]을 제안하였다. 최적화 알고리즘의 성능 여부는 고려하는 각각의 최적화 변수에 대하여 알고리즘이 최소 전력값에 수렴함을 증명할 수 있는지가 관건이다. 본 연구가 기존 연구와 비교하여 가지는 차별성은 다음과 같다. 1) 세 가지 최적화 변수인 전송전력, MMSE 수신 필터, 액세스 포인트 선정에 대하여 최적화 알고리즘을 제안한다. 2) 또한, 제안하는 알고리즘이 최적의 전송전력값에 수렴함을 증명하였다.

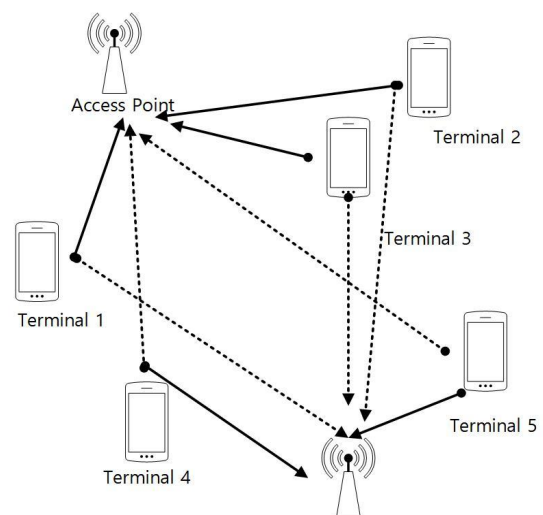


Fig. 1. System Model

III. Joint Optimization of Transmit Power, Receiver Filter and Access Point Selection

3.1 System Model

DS-CDMA (Direct Sequence Code Division Multiple Access) 시스템을 다루며, 프로세싱 이득은 N 으로 정의하도록 한다. 액세스 포인트가 i 번째 단말로부터 신호와 간섭을 수신하며 식 (1)과 같다.

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

식 (1)에서 수신신호 r_i 은 네 개의 성분으로 구성된다. 구체적으로, 네 개의 성분은 순서대로 각각 수신하고자 하는 신호, 동일 액세스 그룹 간섭, 다른 액세스 그룹 간섭, 그리고 노이즈이다. s_i , p_i 는 i 번째 단말의 길이 N 인 시그너처 시퀀스(Signature Sequence)와 전송전력(Transmit Power)이다. g_i , b_i 는 채널이득(Channel Gain)과 정보비트(Information Bit)이다. n 은 길이 N 을 가지는 가우시안 벡터이다. n 의 평균은 0, $E(nn^T) = \sigma^2 I_N$ 이다. 통신시스템은 액세스 포인트 L 개를 운용한다. l 번째 액세스 포인트 그룹을 G_l ($l = 1, \dots, L$)와 같이 표시하도록 한다. 시스템 모델에서 기존 논문들 [1-2]과의 차이점은 다음과 같다. 본 논문에서는 전송전력, MMSE 수신필터, 액세스 포인트 선정을 동시에 고려하므로, 이를 식 (1)의 수신신호에 표현하였다. 반면, [1]에서는 액세스 포인트 최적화없이 MMSE 수신필터와 전송전력만을 포함하고 있으며, [2]에서는 MMSE 수신필터 최적화없이 전송전력과 액세스 포인트 선정 최적화만을 포함하고 있다.

3.2 Proposed Formulation

최적화 문제는 식 (2)와 같으며, 단말들의 전송전력 소모량을 최적화하는 것이다. 제한조건은 식 (3)와 같이 표현되며, 식 (4)에서 처럼 모든 그룹에 적용된다. 단말에게 요구되는 신호대 간섭비는 γ^* 이다.

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

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

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

$P_{i,same}$ 는 i 번째 단말과 동일그룹 단말로부터의 간섭이

다. $P_{i,different}$ 는 i 번째 단말과 다른 그룹 단말로부터의 간섭이다. $P_{i,noise}$ 는 노이즈이다. 구체적으로, 식 (5),(6),(7)과 같다. 문제 구성에서 기존 논문들 [1-2]과의 차이점은 다음과 같다. 식 (2)에서는 최적화 변수로 전송전력, 수신필터, 액세스 포인트인 P , C , A 를 포함하고 있다. 반면, [1]에서는 전송전력과 수신필터 P , C 만을 포함하고 있으며, [2]에서는 전송전력과 액세스 포인트 P , A 만을 포함하고 있다.

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

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

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

c_i 는 i 번째 단말의 수신 필터이다. $a(i)$ 는 i 번째 단말이 속하는 액세스 포인트이다. 식 (8), (9), (10)의 P , C , A 는 각각 모든 단말 p_i, c_i , $a(i)$ 에 대하여 벡터로 표현한 것이다.

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_K] \quad (8)$$

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_K] \quad (9)$$

$$A = [a(1), a(2), \dots, a(K)] \quad (10)$$

식 (3)의 SIR 제한 조건을 개별 단말의 전송전력에 관하여 표현하면 식 (11)과 같다.

$$p_i \geq \frac{P_{i,same} + P_{i,different} + P_{i,noise}}{(c_i^T s_i)^2 h_{ia(i)}} \gamma^* \quad (11)$$

식 (2)에서 액세스 포인트 A 의 최적화를 식 (2) 또는 식 (11)의 조건식으로 옮기면 식 (12),(13),(14)과 같이 표현할 수 있다.

$$\min_{P, C} \sum_{l=1}^L \sum_{i \in G_l} p_i \quad (12)$$

$$\text{s.t. } p_i \geq \min_{a(i)} \frac{P_{i,same} + P_{i,different} + P_{i,noise}}{(c_i^T s_i)^2 h_{ia(i)}} \gamma^* = I_i(P, c_i, a^*(i)) \quad (13)$$

$$i = 1, \dots, K \quad (14)$$

특히, 식 (13)에서 우항을 식 (15)와 같이 정의한다.

$$I_i(P, c_i, a^*(i)) = \min_{a(i)} I_i(P, c_i, a(i)) \quad (15)$$

$a^*(i)$ 는 i 번째 단말이 액세스 포인트 최적화 결과 선택한 최적의 액세스 포인트이다. 식 (12), (13), (14)에서 수신단 필터 C 최적화를 조건식으로 옮기면 식 (16), (17), (18)으로 표현할 수 있다.

$$\min_P \sum_{i=1}^L \sum_{i \in G_i} p_i \quad (16)$$

$$\text{s.t. } p_i \geq \min_{c_i} I_i(P, c_i, a^*(i)) = I_i(P, c_i^*, a^*(i)) \quad (17)$$

$$i = 1, \dots, K \quad (18)$$

c_i^* 는 i 번째 단말의 최적화된 수신단 필터이다. 식 (17) 에서 우항을 식 (18)과 같이 정의하며, 이를 i 번째 단말의 간섭 함수(Interference Function)로 정의한다

$$I_i(P) = I_i(P, c_i^*, a^*(i)) = \min_{c_i} I_i(P, c_i, a^*(i)) \quad (19)$$

식 (19)의 개별 단말들의 간섭함수를 벡터로 나타내면 식 (20)과 같다.

$$I(P) = [I_1(P), \dots, I_K(P)] \quad (20)$$

식 (16)의 최적화 문제에서 각각의 단말은 자신의 간섭 함수보다 큰 값 중에서 가장 작은 값을 자신의 전송전력으로 선택하면 이는 최적화 문제의 해법이 된다. 즉, 식 (17)의 제한조건이 식 (21)와 같이 등호가 성립할 때, 전송전력을 최적화할 수 있다.

$$p_i = I_i(P) \quad (21)$$

식 (21)를 기반으로 식 (22)과 같은 전송전력의 반복적 알고리즘을 제안한다.

$$P(n+1) = I(P(n)) \quad (22)$$

본 논문에서 정의한 간섭함수인 식 (19)은 수렴조건을 만족하면서 동시에 최적화가 보장된다[18]. 이러한 간섭 함수를 [18]에서는 Standard Interference Function 으로 정의한다. Standard Interference Function을 판단 하는 조건은 다음과 같다.

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

Proposition 1,2,3 에서는 증명을 통해 제안하는 간섭 함수가 Standard Interference Function 임을 확인하도록 한다.

Proposition 1. 식 (22) 은 Positivity가 성립한다. i.e., $I(P) > 0$ 이다.

증명) 식(7)로부터 $P_{i,noise} = \sigma^2(c_i^T s_i)^2 > 0$, $\gamma^* > 0$ 이다.

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

$$= \frac{P_{i,same} + P_{i,out} + P_{i,noise}}{(c_i^T h_i)^2} \gamma^* > 0 \quad (23)$$

$I_i(P) > 0$ 이므로, $I(P) > 0$.

Proposition 2. 식 (20)은 Monotonicity 가 성립한다. i.e., 만약 $P \geq \bar{P}$ 이면, $I(P) \geq I(\bar{P})$.

증명) $P = [p_1, \dots, p_i, \dots, p_K]$ 와 $\bar{P} = [\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_i, \dots, \bar{p}_K]$ 에서 $P \geq \bar{P}$ 이므로, 개별 단말 각각에 대하여도 식 (24)가 성립한다.

$$p_k \geq \bar{p}_k \quad (24)$$

$P = [p_1, \dots, p_i, \dots, p_K]$ 로부터의 간섭은 식 (25), (26), (27) 과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{i,same} = \sum_{j \in G_i} p_j h_j (c_i^T s_j)^2 \quad (25)$$

$$P_{i,different} = \sum_{k \notin G_i} p_k h_k (c_i^T s_k)^2 \quad (26)$$

$$P_{i,noise} = \sigma^2 (c_i^T s_i)^2 \quad (27)$$

$\bar{P} = [\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_i, \dots, \bar{p}_K]$ 로부터의 간섭은 식 (28), (29), (30)과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{P}_{i,same} = \sum_{j \in G_i} \bar{p}_j h_j (c_i^T s_j)^2 \quad (28)$$

$$\bar{P}_{i,different} = \sum_{k \notin G_i} \bar{p}_k h_k (c_i^T s_k)^2 \quad (29)$$

$$\bar{P}_{i,noise} = \sigma^2 (c_i^T s_i)^2 \quad (30)$$

임의의 $c_i, a(i)$ 에 대하여, 식(25), (26), (27) 와 식(28), (29), (30)을 비교하면 식 (31), (32), (33)와 같다.

$$P_{i,same} \geq \bar{P}_{i,same} \quad (31)$$

$$P_{i,different} \geq \bar{P}_{i,different} \quad (32)$$

$$P_{i,noise} = \bar{P}_{i,noise} \quad (33)$$

따라서, 전송전력 벡터 P, \bar{P} 에 대한 간섭함수를 비교하면 식 (34)와 같다.

$$I_i(P, c_i, a(i)) = \frac{P_{i,same} + P_{i,different} + P_{i,noise}}{(c_i^T s_i)^2 h_{ia(i)}} \gamma^* \geq I_i(\bar{P}, c_i, a(i)) = \frac{\bar{P}_{i,same} + \bar{P}_{i,different} + \bar{P}_{i,noise}}{(c_i^T s_i)^2 h_{ia(i)}} \gamma^* \quad (34)$$

특히, P, \bar{P} 각각에 대하여, 간섭함수는 식 (35), (36)과 같다.

$$I_i(P) = \min_{c_i} I_i(P, c_i, a^*(i)) = I_i(P, c_i^*, a^*(i)) \quad (35)$$

$$I_i(\bar{P}) = \min_{c_i} I_i(\bar{P}, c_i, a^*(i)) = I_i(\bar{P}, c_i^{**}, a^{**}(i)) \quad (36)$$

여기서, $c_i^*, a^*(i)$ 는 P 에 대한 최적화 값이고, $c_i^{**}, a^{**}(i)$ 는 \bar{P} 에 대한 최적화 값이다.

$I_i(P)$ 와 $I_i(\bar{P})$ 를 비교해보면 식 (37)과 같다.

$$\begin{aligned} I_i(P) &= I_i(P, c_i^*, a^*(i)) \geq I_i(\bar{P}, c_i^*, a^*(i)) \\ &\geq \min_{c_i} I_i(\bar{P}, c_i, a^*(i)) = I_i(\bar{P}, c_i^{**}, a^{**}(i)) \\ &\geq \min_{a(i)} I_i(\bar{P}, c_i^{**}, a^*(i)) = I_i(\bar{P}, c_i^{**}, a^{**}(i)) \\ &= I_i(\bar{P}) \end{aligned} \quad (37)$$

$$I_i(P) \geq I_i(\bar{P}) \text{이므로, } I(P) \geq I(\bar{P}).$$

Proposition 3. 식 (20)은 Scalability 가 성립한다. 모든 $\alpha > 1$ 에 대하여, $\alpha I(P) > I(\alpha P)$.

증명) $c_i^*, a^*(i)$ 와 $\alpha > 1$ 에 대하여, 식 (38), (39)와 같다.

$$\alpha I_i(P, c_i^*, a^*(i)) = \frac{\alpha P_{i,same} + \alpha P_{i,different} + \alpha P_{i,noise}}{(c_i^* s_i)^T h_{ia^*(i)}} \gamma^* \quad (38)$$

$$I_i(\alpha P, c_i^*, a^*(i)) = \frac{\alpha P_{i,same} + \alpha P_{i,different} + P_{i,noise}}{(c_i^* s_i)^T h_{ia^*(i)}} \gamma^* \quad (39)$$

식 (38),(39)에 의하여, $\alpha P_{i,noise} > P_{i,noise}$ 이므로, 식 (40)에 성립한다.

$$\alpha I_i(P, c_i^*, a^*(i)) > I_i(\alpha P, c_i^*, a^*(i)) \quad (40)$$

식 (40)로부터, 식 (41) 이 성립한다.

$$\begin{aligned} \alpha I_i(P) &= \min_{c_i} \alpha I_i(P, c_i, a^*(i)) = \alpha I_i(P, c_i^*, a^*(i)) \\ &> I_i(\alpha P, c_i^*, a^*(i)) \geq \min_{c_i} I_i(\alpha P, c_i, a^*(i)) \\ &= I_i(\alpha P, c_i^+, a^*(i)) \geq \min_{a(i)} I_i(\alpha P, c_i^+, a^*(i)) \\ &= I_i(\alpha P, c_i^+, a^+(i)) = I(\alpha P) \end{aligned} \quad (41)$$

여기서, $c_i^+, a^+(i)$ 는 P 에 대한 최적화 값이고, $c_i^+, a^+(i)$ 는 αP 에 대한 최적화 값이다.

그러므로, $\alpha I(P) > I(\alpha P)$.

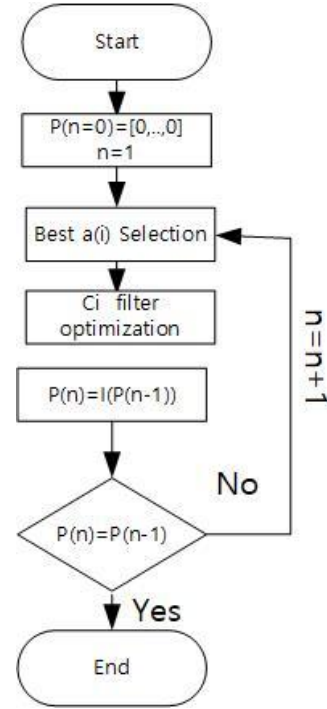


Fig. 2. Proposed Algorithm

3.3 Proposed Algorithm

Step 1. 초기 전송전력, 초기 수신필터값 설정

$$P = [0, 0, \dots, 0], \quad c_i = s_i$$

Step 2. 각 단말($i=1, \dots, K$)은 최적의 액세스 포인트 $a^*(i)$ 선택

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

Step 3. 최적의 수신단 필터 c_i^* 선택

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

Step 4. 전송전력 업데이트

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

Step 5. 전송전력벡터 수렴 확인

$$\text{If } P(n) \neq P(n-1),$$

$$n = n + 1;$$

Go to Step 2

else

Go to Step 6

Step 6. END

제안하는 알고리즘을 수행하는 과정에서 세 가지 최적화 변수인 전송전력, MMSE 수신필터, 액세스 포인트 선정이 업데이트된다. 세 가지 변수는 전송전력-액세스 포인트 선정-MMSE 수신필터를 업데이트하는 순서로 진행된다.

Step 1에서 모든 단말들의 초기 전송전력값은 임의의 값으로 설정해도 되지만, 본 실험에서는 모든 단말들의 초기 전송전력을 0으로 설정한다. 모든 단말들의 초기 수신 필터값은 단말의 시그너처 시퀀스로 설정한다.

Step 2에서 개별 단말은 이전 단계에서 얻어진 전송전력과 수신필터를 기반으로 최적의 액세스 포인트를 선정한다. 즉, Step 1에서의 초기 전송전력, 초기 수신필터값 또는 Step 3, Step 4에서 업데이트된 전송전력, 수신필터값이다. 최적의 액세스 포인트를 선정하는 기준은 주어진 전송전력과 수신필터를 기반으로 간섭함수가 최소가 되는 액세스 포인트를 선정한다.

Step 3에서 개별 단말은 Step 2에서 선정한 액세스 포인트와 Step 1 또는 Step 4에서 얻어진 전송전력을 기반으로 최적의 수신필터를 결정한다. 최적의 수신필터를 선정하는 기준은 주어진 전송전력과 액세스 포인트를 기반으로 간섭함수가 최소가 되는 수신필터를 선정한다.

Step 4에서 Step 2와 Step 3에서 얻은 액세스 포인트, 수신필터를 기반으로 전송전력을 업데이트한다. 전송전력 업데이트 기준은 Step 2와 Step 3에서 얻은 액세스 포인트, 수신필터와 Step 2에서 얻은 전송전력으로부터 얻은 간섭함수값을 현재의 전송전력으로 선정한다.

Step 5에서 전송전력의 수렴 여부를 확인하고, 수렴할 때까지 Step 2, 3, 4 과정을 반복한다.

IV. Numerical Results

실험에 적용할 노이즈는 $\sigma^2 = 10^{-13}$ 으로 설정하였다. DS-CDMA 프로세싱 이득(Processing Gain)은 $N=128$, 대역폭(Spreading Bandwidth)은 $W=1.228MHz$ 이다. 송신기와 수신기에서의 채널이득은 $\frac{r}{d^4}$ 으로 모델링한다.

d 는 송신기와 수신기 사이의 거리를 나타낸다. r 은 log normal fading을 적용하였다. 분산 (variance)은 $8dB$ 로 설정하였다. 액세스 포인트는 200m 마다 균등하게 위치하였다. 본 실험에서는 $L=3$ 개의 액세스 포인트가 200m 마다 균등하게 위치하고, 세 개의 액세스 포인트 주변에 $K=20$ 개의 단말이 균일하게 분포하는 것을 가정한다.

Fig. 3 는 제안하는 알고리즘 (전송전력, MMSE 수신필터, 액세스 포인트 최적화 알고리즘)의 신호대 간섭비(SIR) 수렴도이다. 목표 신호대간섭비(SIR) 는 $\gamma^* = 5$ 이다.

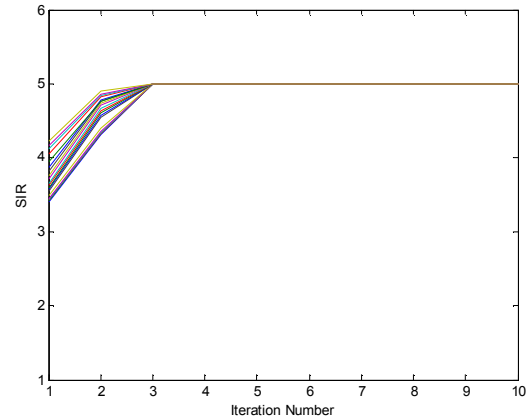


Fig. 3. SINR Convergence of Proposed Algorithm ($\gamma^* = 5$)

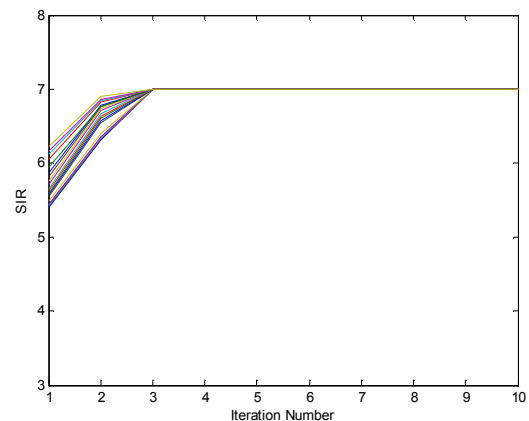


Fig. 4. SINR Convergence of Proposed Algorithm(Loaded Environment, $\gamma^* = 7$)

Table 1. Total Power Consumption [Units:Watts]

	Target SIR=5	Target SIR=7
Proposed Algorithm	1.02	4.18
Algorithm 1	1.10	4.41
Algorithm 2	1.65	6.27

대부분의 단말들은 알고리즘을 2회 반복하면 목표 SIR에 도달하였다. 알고리즘을 한 번 수행하면 전송전력, MMSE 수신필터, 그리고 액세스 포인트 선택 최적화가 이루어지기 때문에 빠르게 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4 는 LOADED(부화) 환경에서 제안하는 알고리즘의 신호대간섭비(SIR) 수렴도를 확인하였다. LOADED 환경을 위하여 목표 신호대 간섭비(SIR)는 $\gamma^* = 7$ 로 높여 설정하였다. 대부분의 단말들은 알고리즘을 2회 반복하면 목표 SIR에 도달하고 있음을 확인하였다. 즉, 제안하는 알고리즘은 loaded 환경에 관계없이 빠르게 목표하는 신호대 간섭비에 수렴함을 알 수 있다.

Table 1. 는 소모하는 총 전송전력을 비교하였다. 비교 알고리즘은 1. 제안하는 알고리즘(Proposed Algorithm) 2. 전송전력과 MMSE 수신필터 최적화(Algorithm 1) 3. 전송전력 최적화(Algorithm 2) 이다.

총 전송전력 소모량은 Proposed Algorithm < Algorithm 1 < Algorithm 2 순으로 증가하고 있다. 즉, 제안하는 알고리즘(Proposed Algorithm) 이 다른 두 개의 알고리즘보다 전송전력 측면에서 가장 효율적이다. 구체적으로, 제안하는 알고리즘(Proposed Algorithm)은 Algorithm 1 과 비교하여 5%에서 7% 정도의 전송전력 소모량의 개선을 확인할 수 있었다. Algorithm 1 이 과 Algorithm 2 전송전력 소모 성능 차이가 큰 것을 확인할 수 있었다. 제안하는 알고리즘(Proposed Algorithm)은 액세스 포인트, MMSE 수신필터, 전송전력을 최적화한다. Algorithm 1 은 MMSE 수신필터와 전송전력을 최적화한다. 그리고, Algorithm 2는 전송전력만을 최적화한다. 실험결과와 각각의 알고리즘이 최적화하는 요소를 살펴볼 때, MMSE 수신필터를 최적화할 때, 전송전력 감소 개선 효과가 가장 크게 나타남을 확인할 수 있다.

V. Conclusions

전송전력 소모량을 최적화하고자, 전송전력, MMSE 수신필터, 그리고 액세스 포인트 선택 최적화를 연구하였다. 1) 연구 결과물로 세 가지 최적화 변수를 최적화하여, 반복적 알고리즘(Iterative Algorithm)을 제안하였다. 제안하는 알고리즘을 요약하면 다음과 같다. Step 1에서 초기 전송전력과 초기 수신필터를 설정한다. Step 2에서 최적의 액세스 포인트를 선정하고, Step 3에서 MMSE 수신 필터를 업데이트한다. Step 4에서 Step 2와 Step 3에서 업데이트된 최적의 액세스 포인트와 MMSE 수신필터를 기반으로 전송전력을 업데이트한다. 2) 제안하는 알고리즘(Proposed Algorithm)과 기존에 연구되었던 알고리즘의 성능 분석을 진행하였다. 분석 결과 전송전력 최적화를 기준으로 MMSE 수신필터를 추가적으로 최적화할 때, 소모하는 전송전력 이득이 가장 커짐을 확인하였다. 또한, 액세스 포인트 선정의 최적화도 5%~7% 정도의 소모하는 전송전력을 개선하는 효과를 볼 수 있었다. 제안하는 알고리즘은 최적의 전송전력값에 빠르게 수렴하는 장점을 보이지만, 중앙집중적인 계산 방식을 필요로 한다. 향후에는 단말들 개별적으로 전송전력값을 계산하도록 하는 분산적인 계산방식으로 전송전력 최적화 문제를 연구할 계획이다.

REFERENCES

- [1] C. Oh, "Transmit Power and MMSE Receiver Filter Algorithm for Multi Access Points," Institute of Embedded Engineering of Korea, pp. Vol. 15, no. 3, 111-118, June 2020.
- [2] C. Oh, "Transmit Power and Access Point Selection Algorithm: TA Link and AT Link," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 24, no. 8, pp. 1022-1029, August 2020.
- [3] 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," vol. 114, pp. 84-105, December 2017.
- [4] K. Kravetska, D. J. Vergados, Y. Jiang, 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, September 2018.
- [5] 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, May 2017.
- [6] G. Lu, N. Sadagopan, B. Krishnamachari, A. Goel, "Delay efficient sleep scheduling in wireless sensor networks", Proceedings - IEEE INFO COM, vol. 4, no. C, pp. 2470-2481, 2005.
- [7] Q. Hua, 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.
- [8] M. Barceló, A. Correa, J.L. Vicario, A. Morell, "Joint routing, channel allocation and power control for real-life wireless sensor networks," Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, Vol. 26, Issue 5 pp. 945-956, May 2015.
- [9] S. Chung, I. Joe, "Intelligent Transmission Power Allocation for Distributed Beamforming in Wireless Sensor Networks," International Journal of Distributed Sensor Networks Vol. 11, Issue 6, June 2015.
- [10] D. P. Shetty and 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.
- [11] S. Jayaprakasam, S. K. A. Rahim and C. Y. Leow, "Distributed and Collaborative Beamforming in Wireless Sensor Networks: Classifications, Trends, and Research Directions," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 4, pp. 2092-2116, Fourthquarter 2017.
- [12] R. Du, A. Özçelikkale, C. Fischione and M. Xiao, "Towards Immortal Wireless Sensor Networks by Optimal Energy Beamforming and Data Routing," in IEEE Transactions on

- Wireless Communications, vol. 17, no. 8, pp. 5338-5352, Aug. 2018.
- [13] D. Goyal and Sonal, "Power management in Wireless Sensor Network," 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, pp. 598-601, 2016.
- [14] P. P. Priyesh and S. K. Bharti, "Dynamic transmission power control in wireless sensor networks using P-I-D feedback control technique," 2017 9th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), Bangalore, pp. 306-313, 2017.
- [15] M. Abo-Zahhad, M. Farrag, A. Ali and O. Amin, "An energy consumption model for wireless sensor networks," 5th International Conference on Energy Aware Computing Systems & Applications, Cairo, pp. 1-4, 2015.
- [16] S. M. Razali, K. Mamat, K. Abdul-Basit and F. H. M. Ali, "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), Subang, pp. 36-40, 2014.
- [17] C. Oh, "Analysis of D2D Utility Function with the Interference Majorization," Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol. 25 Issue 7, pp. 75-83, July 2020.
- [18] R. Yates, "A framework for uplink power control in cellular radio systems," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 13 Issue 7, pp. 1341-1347, September 1996.

Authors



Changyoon Oh 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. Dr. Oh joined the faculty of the Department of Information & Communications Engineering at Inha Technical College, Incheon, Korea in 2011. He is a Professor in the Department of Information & Communications Engineering at Inha Technical College. He is interested in Physical Layer Issue and wireless standard.