

전송률 제한을 둔 페이딩 방송채널을 위한 중첩코딩 다중화

준회원 이 민*, 종신회원 오 성 근*, 정회원 정 병 장**

Superposition Coding Multiplexing for Fading Broadcast Channels with Rate Constraints

Min Lee* Associate Member, Seong Keun Oh* Lifelong Member,
Byung Jang Jeong** Regular Member

요 약

이 논문에서는 전송 실효성 극대화를 위하여 사용자 별 최소 및 최대 전송률 제한을 두는 페이딩 방송채널에서 내림차순 전력할당에 기반한 효율적인 SCM (superposition coding multiplexing) 방법을 제안한다. 이 방법은 3단계로 구성되는데, 1단계에서는 전송 가능한 최대의 사용자 집합을 선정하고, 2단계에서는 사용자 별 송신전력의 내림차순으로 해당 사용자의 최소 전송률을 보장하는 최대 허용 간섭전력을 결정하는 방식으로 해당 사용자 별 송신전력을 할당하고 잔여전력을 계산한다. 3단계에서는 2단계에서 잔여전력이 발생하는 경우에 수행하며, 내림차순 마지막 사용자부터 다시 오름차순으로 해당 사용자의 최대 전송률 제공에 필요한 전력 범위까지 최대로 추가 전력을 할당한다. 이 방법은 2단계 내림차순 할당에서 각 사용자가 자신의 최소 전송률 보장을 위하여 이후 사용자들로부터의 최대 허용 간섭전력을 고려하여 전력할당이 이루어졌으며 오름차순 추가 할당으로 인한 해당 사용자 이후 모든 순위 사용자들에 대한 전력 재할당을 필요로 하지 않는다. 따라서, 제안한 방법은 사용자 별 최소뿐만 아니라 최대 전송률 제한을 두는 경우, 특히 사용자 수가 많아질수록 계산이 더욱 효율적이다.

Key Words : Superposition coding, Fading broadcast channel, Rate constraints, Power allocation

ABSTRACT

In this paper, we propose an efficient superposition coding multiplexing (SCM) method based on power allocation in descending order for fading broadcast channels in which per-user minimum and maximum rate constraints are considered in order to maximize the transmission effectiveness. It consists of three steps as follows. In the first step, a user group is selected to maximize the number of users with whom a transmitter can communicate instantaneously. In the second step, per-user power allocation for each user is done in descending order of transmit power by determining a maximum allowable interference power from all subsequent interfering users in order to guarantee its corresponding minimum rate, and then a residual power is calculated. The final step is performed if some power remains even after the second step. In this step, additional power allocation is performed up to the maximum transmit power to provide the maximum rate to the corresponding user, again in ascending order, starting from the last user in descending order. But, this method does not require power reallocation to subsequent users because tentative power allocation in the second step has been performed in descending order to guarantee the minimum rate for each user, taking into account the maximum allowable interference power from all the subsequent users. Therefore, the proposed method gets more efficient in term of computational complexity when per-user minimum as well as maximum rate constraints exist, especially as the number of users increases.

※ 본 연구는 한국전자통신연구원 정보통신연구개발사업의 위탁연구과제의 일환으로 수행되었음.

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 일환으로 수행되었음 (IITA-2008-C1090-0801-0003).

* 이주대학교 전자공학부 통신시스템연구실 (minishow@ajou.ac.kr, oskn@ajou.ac.kr), ** 한국전자통신연구원 (bjjeong@etri.re.kr)

논문번호 : KICS2008-08-339, 접수일자 : 2008년 8월 11일, 최종논문접수일자 : 2008년 10월 15일

I. 서 론

SCM 방법^[1]은 다수의 독립된 신호들을 하나의 통신채널에 중첩하여 전송하고 각 수신기에서 SIC (successive interference cancellation) & decoding을 통하여 신호들을 분리하는 다중 사용자 전송 방법으로, 그 방법은 사용자 신호들간 전력 분할을 통하여 통신자원을 효율적으로 재사용함으로써 채널 용량 영역 경계에 도달하는 전송 효율을 얻을 수 있다. 따라서, SCM 방법은 페이딩 방송채널 및 다중 접속 채널에서 채널 용량 영역을 분석하는 주요한 도구로서 이용되고 있다 ([2] 및 그 참고문헌 참조). 무선 통신시스템에서는 하나의 기본 신호에 overlay 또는 underlay 방식으로 다른 신호의 중첩 전송^[3-4] 또는 협력 릴레이 시스템에서는 다수의 신호들을 중첩하여 전송하는 다이버시티 전송 등 효율적인 통신자원 재사용 수단으로 이용되고 있다^[5-6]. 또한, capacity-achieving constellation design을 위한 변조 방식을 설계하기 위하여 사용되고 있다^[7-8]. 최근에는 SCM이 페이딩 방송채널에서 사용자 별 전송률 제한을 두고 다수의 독립된 사용자 신호들을 전력 분할 다중화함으로써 주어진 통신채널의 채널 용량 영역 경계에 도달하는 총 전송률을 달성하도록 하는 효율적인 다중 사용자 전송 방법으로 그 이용이 확대되고 있다^[2].

사용자 별 전송률 제한을 가지고 다수의 독립된 신호들을 SCM 다중화하는 한 가지 방법에서는 페이딩 방송채널에서의 사용자 별 최소 전송률 제한만을 설정하고 모든 사용자들이 사용자 별 최소 전송률을 만족하도록 사용자 별 요구전력을 할당하고, 잔여전력을 총 전송률 합이 최대가 되도록 채널 특성이 가장 좋은 사용자에게 할당한다^[2]. 그러나, 그 방법에서 채널상태가 좋아 낮은 송신전력을 필요로 하는 사용자부터 시작하여 채널상태가 나빠 높은 송신전력을 필요로 하는 순으로, 즉 송신전력의 오름차순으로 선순위 사용자 신호들의 간섭을 고려하여 해당 사용자의 최소 전송률을 보장하도록 전력을 할당한다. 이 경우, 모든 사용자들에게 최소 전송률을 보장하는 요구전력을 할당하고, 잔여전력으로 전송효율이 가장 높은 오름차순 1순위 사용자에게 모든 잔여전력을 추가로 할당하여 총 전송률 합이 최대가 되게 한다. 이 추가할당 과정에서 오름차순 1순위 사용자의 송신전력 증가로 인하여 나머지 사용자들이 받는 간섭전력이 달라지므로 모든 후순

위 사용자들에 대한 전력 값들을 단계적으로 재할당하여야 한다. 이 외에도 그 방법은 1 순위 사용자에게 필요 이상으로 높은 전력을 할당함으로써 자원의 효율적으로 이용할 수 없을 것이다. 다시 말하면, 해당 사용자의 최대 요구 전송률 또는 최대 허용 전송률^[9-10] 제공을 위한 요구전력보다 높은 전력이 할당되어 낭비될 수 있다. 기존 방법에서 다루어지지 않았지만, 전송 실효성을 위하여 사용자 별 최대 허용 전송률 제한을 가지는 경우로 기존 방법에서의 잔여전력 할당과정을 확장하면, 오름차순 1순위 사용자에게 최대 전송률을 보장하는 범위까지 추가전력을 할당하고 또 다시 잔여전력이 발생하는 경우, 오름차순으로 다음 순위 사용자에게 최대 전송률을 보장하는 범위까지 최대한의 추가전력을 할당하는 방식을 따를 수 있을 것이다. 이 방식을 따르면, 추가전력이 할당되는 매 사용자마다 해당 사용자보다 모든 후순위 사용자들에 대한 전력 값들이 단계적으로 재할당되어야 하므로, 추가전력 할당과정이 매우 복잡하게 될 것이다. 또 다른 방법으로 사용자가 2명인 경우 사용자 별 최소 및 최대 전송률 제한과 총 송신전력 제한에 따른 극점들에서 사용자 별 전력할당을 구하고, 이들 중에서 총 전송률 합이 최대가 되는 전력할당을 선택하는 방법이 있다^[11]. 그러나, 그 방법은 사용자 별 요구전력할당 후 잔여전력을 이용할 수 없으며, 사용자가 3명 이상으로 확장이 어렵다.

이 논문에서는 SCM 전송에서 전송 실효성을 극대화하기 위하여 사용자 별 최소 전송률뿐만 아니라 최대 전송률 제한을 가지는 페이딩 방송채널에서 효율적인 SCM 방법을 제안한다. 이 방법은 3단계로 구성되는데, 먼저 1단계에서는 주어진 자원으로 동시 전송이 가능한 사용자 집합을 선정하고, 2 단계에서는 채널상태가 나쁜 사용자부터 좋은 사용자 순으로, 즉 송신전력의 내림차순으로 해당 사용자 별 최소 전송률을 보장할 수 있는 최대 허용 간섭전력을 결정하는 방식으로 모든 사용자들에게 사용자 별 최소 전송률 제공을 보장하는 요구전력을 할당하고, 잔여전력을 계산한다. 마지막 3단계는 2 단계에서 잔여전력이 발생하면 수행하며, 전송효율이 가장 높은 내림차순 마지막 사용자부터 다시 오름차순으로 해당 사용자의 최대 전송률 제공을 위한 요구전력 범위까지 최대로 추가전력을 할당한다. 이 방법은 사용자 수에 대한 제한 없이 사용자 별 최대 전송률 제한을 설정할 수 있으며, 내림차순 할

당에서 각 사용자는 이후에 할당되는 사용자들을 위한 최대 허용 간섭전력을 결정하고 이후 사용자들에게는 이 범위 내에서만 전력할당이 이루어지며, 오름차순 추가 할당에서도 이러한 조건이 보존되어 해당 사용자 이후의 사용자들에 대한 전력 재할당을 필요로 하지 않는다. 이 논문에서는 제안된 전력 할당 방법의 우수성을 보이기 위하여 복잡도와 전송 효율성을 분석한다.

II. 시스템모델

하나의 페이딩 방송채널에 다수의 독립된 사용자 신호들을 전력분할 방식으로 다중화하여 전송하는 SCM 방법을 다룬다. 이 경우 i -번째 사용자 수신 신호 Y_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_i = h_i \left(\sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} X_k \right) + w_i, \quad i = 1, \dots, K. \quad (1)$$

여기서 X_i 는 i -번째 사용자에게 송신될 신호이며, P_i 는 i -번째 사용자 신호에 할당된 송신전력이다. h_i 는 송신기와 i -번째 사용자 수신기 사이의 채널이득이며, K 는 후보 사용자 수이다. w_i 는 i -번째 사용자 수신기에서 AWGN (additive white Gaussian noise)이며, 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 이다. 송신기는 모든 수신기들로부터 SNR (signal-to-noise ratio) 등의 SCM 전송을 위한 채널상태 정보를 획득할 수 있으며, 각 수신기는 송신기와 자신의 채널이득을 알 수 있다고 가정한다. 마지막으로 실제적인 통신시스템에서의 전송 실효성을 고려하여 각 사용자 별 최소 요구 전송률과 최대 허용 전송률 제한을 둔다.

SCM 방법은 송신기와 수신기의 상호 협력을 통하여 다음과 같은 단계로 이루어진다. 송신기에서는 수신기들의 채널상태 정보를 이용하여, 주어진 페이딩 방송채널에서 총 송신전력으로 사용자 별 전송률 제한을 만족시키면서 다중화 전송이 가능한 사용자 집합을 선정하고, 이들을 대상으로 총 전송률 합이 최대가 되도록 단계적인 전력할당을 수행한다. 이 논문에서는 총 송신전력으로 주어진 자원에 동시에 전송 가능한 사용자 수가 최대가 되는 사용자 집합을 선정한다. SCM 다중화된 신호를 검출하기 위하여 각 사용자 수신기는 송신전력이 높은 사용자 신호부터 단계적으로 검출하고 제거하는 순차적인 수신방법인 SIC & decoding 방법을 사용한다.

III. 최소 및 최대 전송률 제한을 둔 효율적인 SCM 방법

이 절에서는 사용자 별 최소 및 최대 전송률 제한조건 하에서 페이딩 방송채널에 총 송신전력으로 전송 가능한 사용자 수를 최대로 유지하면서 총 전송률 합이 최대가 되도록 다중화하는 효율적인 SCM 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 SCM을 위한 사용자 집합 선정 단계, 사용자 별 최소 요구 전송률 보장을 위한 내림차순 전력할당 단계, 총 전송률 합 극대화를 위한 잔여전력 오름차순 할당 단계로 구성된다. 전개를 위하여, 후보 사용자 집합을 $S = \{1, 2, \dots, K\}$, 후보 사용자들의 사용자 별 최소 및 최대 전송률 제한을 각각 $R^* = \{R_1^*, \dots, R_K^*\}$ 와 $R^\dagger = \{R_1^\dagger, \dots, R_K^\dagger\}$ 로 나타낸다. 아래에서 제안하는 SCM 알고리즘을 단계별로 자세히 기술한다.

3.1 1단계 : 사용자 집합 선정

이 단계에서는 후보 사용자 집합에서 총 송신전력으로 사용자 별 최소 전송률 제한조건 하에서 주어진 자원으로 전송 가능한 사용자 수를 최대로 하는 사용자 집합을 선정한다. 각 사용자는 전력분할 방식으로 다중화되어 독립된 사용자들에게 동시에 전송되는 수신신호로부터 자신의 신호를 SIC & decoding 방법을 이용하여 검출해야 한다. 이 SIC & decoding 방법은 송신전력이 큰 사용자 신호부터 송신전력이 자신보다 낮은 하위 계층 사용자 신호들에 의한 간섭이 존재하는 상황에서 정확히 검출하고 수신신호에서 제거해야 한다. 이 과정에서 각 사용자는 우선 자신보다 높은 전력을 할당 받은 상위 계층 사용자 신호들을 성공적으로 검출하고 제거해야 한다. 이를 위해서는 각 사용자가 경험하는 상위 계층 사용자 신호들의 SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio)이 상위 계층 사용자 자신들이 자신의 신호를 검출할 때 요구되는 SINR보다 같거나 높게 유지되어야 한다. 따라서, SCM을 위한 필수조건은 채널상태가 좋은 사용자에게 낮은 송신전력을, 채널상태가 나쁜 사용자에게 높은 송신전력을 할당해야 한다²⁾.

총 송신전력으로 사용자 별 최소 전송률 제한조건 하에서 사용자 수를 최대로 하는 사용자 집합을 선정을 위해서는 전력 대비 전송 효율성을 가장 높게 유지하여야 한다. 전력 대비 전송 효율성을 극대

화하기 위해서는 채널상태가 좋은 사용자부터 나 빠지는 사용자 순서로 사용자 별 최소 전송률을 보장 하는 최소의 송신전력을 할당해야 한다. 따라서, 채널상태가 좋은 사용자부터 나빠지는 순서로 해당 사용자 이전까지의 모든 사용자 신호들의 간섭전력을 고려하여 해당 사용자의 최소 전송률을 보장하는 최소의 송신전력을 수식 (2)를 이용하여 결정하고, 잔여전력을 구한다.

$$P_{\pi(i)}^* = \left(\frac{\sigma_n^2}{|h_{\pi(i)}|^2} + \sum_{j < i} P_{\pi(j)}^* \right) (2^{R_{\pi(i)}^*} - 1). \quad (2)$$

여기서, $\pi(\cdot)$ 은 채널상태가 나빠지는 사용자 순열로서 $|h_{\pi(1)}|^2/\sigma_n^2 \geq |h_{\pi(2)}|^2/\sigma_n^2 \geq \dots \geq |h_{\pi(K)}|^2/\sigma_n^2$ 를 만족한다. 이때 매 전력할당 과정에서 발생한 잔여전력을 해당 사용자 다음 순서 사용자에게 동일한 방법으로 할당한다. 이 과정에서 잔여전력이 다음 순서 사용자의 최소 전송률 보장을 위하여 필요한 최소 전력에 미치지 못하면, 전력할당을 중단하고 지금까지 전력할당이 이루어진 사용자들로 사용자 집합을 구성한다. 결론적으로 채널상태가 좋은 사용자부터 나빠지는 사용자 순서로 사용자들을 정렬하고, 이 순서에 따라 해당 사용자 이전까지의 모든 사용자 신호들에 의한 간섭전력을 고려하여 해당 사용자의 최소 전송률을 보장하는 최소 송신전력을 결정하고, 총 송신전력으로 해당 사용자의 수용 여부를 판단하여 사용자 별 최소 전송률 보장이 가능한 L 명의 사용자 집합(G)을 선정한다.

3.2 2단계 : 내림차순 사용자 별 최소 전송률 보장 최소 전력 할당

이 단계에서는 1단계에서 선정된 사용자 집합(G)에 포함된 사용자들을 대상으로 사용자 별 최소 전송률을 보장하는 최소의 송신전력을 송신전력의 내림차순으로 할당한다. 먼저 다음과 같이 채널상태가 나빠 높은 전력을 필요로 하는 순으로 사용자들을 정렬한다.

$$|h_{v(1)}|^2/\sigma_n^2 \leq |h_{v(2)}|^2/\sigma_n^2 \leq \dots \leq |h_{v(L)}|^2/\sigma_n^2, \\ G = \{v(1), v(2), \dots, v(L)\}, \quad L \leq K. \quad (3)$$

여기서, $v(\cdot)$ 은 내림차순 사용자 순열이다. 다음으로 내림차순으로 각 사용자에게 사용자 별 최소 전송률 제공을 보장하는 최소의 송신전력을 할당한다. 이때 각 순위 사용자에게 대한 전력할당은 해당

사용자의 최소 전송률 제공을 보장하는 최대 허용 간섭전력을 결정하는 방식으로 아래 식에 따라 이루어진다.

$$P_{v(i)} = \frac{(2^{R_{v(i)}^*} - 1)}{2^{R_{v(i)}^*}} \left\{ \frac{\sigma_n^2}{|h_{v(i)}|^2} + \left(P_T - \sum_{j < i} P_{v(j)} \right) \right\}. \quad (4)$$

여기서 P_T 는 총 송신전력이다. 상기 각 순위에서 최대 허용 간섭전력은 총 송신전력에서 1순위부터 해당 순위까지의 사용자들에게 할당된 총 전력 합을 뺀 잔여전력으로 해당 순위 이후의 사용자들에게 할당 가능한 총 전력이며 해당 순위 사용자에게 미칠 수 있는 최대 간섭전력이다. 이 단계에서는 이러한 과정을 내림차순으로 반복하여 모든 사용자들에게 사용자 별 최소 요구 전송률 제공을 보장하는 최소의 전력을 할당하고, 잔여전력을 계산한다.

3.3 3단계 : 오름차순 잔여전력 추가 할당

이 단계에서는 2단계 잔여전력으로 총 전송률 합을 극대화하기 위하여 전력 대비 전송효율이 가장 높아지도록 전력할당을 수행한다. 따라서, 내림차순 마지막 사용자부터 다시 오름차순으로 총 송신전력으로 수용 가능한 범위까지 해당 순위 사용자의 최대 전송률을 보장하는 범위 내에서 최대의 전력을 추가로 할당한다. 만약, 잔여전력이 해당 순위 사용자의 최대 전송률 보장을 위하여 추가로 요구되는 전력을 초과하면, 해당 순위 사용자에게는 최대 전송률 보장을 위한 전력을 아래의 식에 따라 제한당한다.

$$P_{v(i)}^* = \left(\frac{\sigma_n^2}{|h_{v(i)}|^2} + \sum_{j < i} P_{v(j)} \right) (2^{R_{v(i)}^*} - 1). \quad (5)$$

이러한 과정은 잔여전력이 해당 순위 사용자의 최대 전송률 보장을 위하여 필요한 추가 전력에 미치지 못하여 잔여전력을 해당 순위 사용자에게 모두 할당하고, 따라서 총 송신전력이 모두 소진될 때까지 반복된다. 이 경우, 각 순위에서 추가적인 전력할당은 해당 순위 이후의 사용자의 최소 전송률 보장을 위한 최대 허용 간섭전력 내에서만 이루어지기 때문에 모든 후순위 사용자들에 대한 전력 할당은 필요하지 않다.

3.4 알고리즘

제안하는 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

여기서, $\text{size}(G)$ 는 집합 G 에 속한 원소 수를 나타낸다.

Initialize

$$S = \{1, 2, \dots, K\}, \mathbf{R}^* = \{R_1^*, \dots, R_K^*\},$$

$$\mathbf{R}^\dagger = \{R_1^\dagger, \dots, R_K^\dagger\}, \mathbf{G} = \phi,$$

$$M_i = (2^{R_i^\dagger} - 1), N_i = (2^{R_i^*} - 1),$$

$$Y_i = (2^{R_i^*} - 1) / 2^{R_i^*}, n_i = \frac{\sigma_n^2}{|h_i|^2}, \text{ for } i = 1, \dots, K$$

$l = 0$

1st step: While

$$l = l + 1$$

$$\pi(l) = \arg \min_{i \in S} n_i$$

$$P_{\pi(l)}^* = \left(n_{\pi(l)} + \sum_{k=l} P_{\pi(k)}^* \right) N_{\pi(l)}$$

$$S = S - \{\pi(l)\}, \mathbf{G} = \mathbf{G} \cup \{\pi(l)\}$$

Until $\sum_{i \in G} P_{\pi(i)}^* > P_T$ or $S = \phi$

$$\mathbf{G} = \mathbf{G} - \{\pi(l)\}$$

2nd step: $L = \text{size}(\mathbf{G})$

For $i = 1, \dots, L$

$$v(i) = \arg \max_{i \in G} n_i$$

$$P_{v(i)} = Y_{v(i)} \left\{ n_{v(i)} + \left(P_T - \sum_{j < i} P_{v(j)} \right) \right\}$$

End

$$P_{\text{res}} = P_T - \sum_{j=1}^L P_{v(j)}$$

3rd step: $m = L$

While

$$P_{v(m)} = P_{v(m)} + P_{\text{res}}$$

$$P_{v(m)}^\dagger = \left(n_{v(m)} + \sum_{j>m} P_{v(j)} \right) M_{v(m)}$$

If $P_{v(m)} > P_{v(m)}^\dagger$

$$P_{v(m)} = P_{v(m)}^\dagger$$

End if

$$P_{\text{res}} = P_T - \sum_{j=1}^L P_{v(j)}$$

$$m = m - 1$$

Until $P_{\text{res}} = 0$ or $m = 0$

IV. 복잡도, 총 전송률 합, 사용자 별 전송률

이 절에서는 제안하는 효율적인 SCM 방법에 대한 복잡도와 전송 효율성을 분석한다. 여기서 계산적인 복잡도 분석을 위하여 곱셈 연산만을 고려한다.

최소 전송률 제한조건만 존재하는 경우, 제안하는 방법에서 먼저 사용자 집합을 선정하고, 이들을 대상으로 송신전력의 내림차순으로 모든 사용자에게 사용자 별 최소 전송률을 보장하는 최소 전력을 할당하고, 잔여전력을 내림차순 마지막 사용자에게 모두 할당하는 것이다. 이를 위하여 오름차순으로 사용자 수 L 만큼 수식 (2)를 반복 수행하고, 다시 내림차순으로 수식 (4)를 L 만큼 반복 수행하므로 총 $2L$ 만큼의 곱셈이 필요하다. 기존 방법에서는 먼저 오름차순으로 수식 (2)를 사용자 수 L 만큼 반복 수행하여 사용자 별 최소 전송률 보장을 전력을 할당하고, 잔여전력을 채널상태가 가장 좋은 오름차순 1순위에게 모두 할당한다. 이 경우 오름차순 1순위 사용자 전력의 변화로 2순위 이후 모든 사용자에게 대한 간섭전력이 변하게 되어 2순위 이후 모든 사용자들을 위한 전력 재할당이 필요하다. 따라서, 수정된 방법에서는 총 $(L^2 + L + 2)/2$ 만큼의 곱셈이 필요하게 된다^[2].

다음으로 최소뿐만 아니라 최대 전송률 제한조건도 두는 경우, 제안한 방법은 사용자 집합을 선정하고, 이 집합에 대하여 내림차순으로 모든 사용자에게 사용자 별 최소 전송률 보장을 위한 전력을 할당하고, 잔여전력으로 수식 (5)에 따라 다시 오름차순으로 총 송신전력이 모두 소진될 때까지 사용자 별 최대 전송률 범위까지 추가 전력을 할당한다. 이 과정은 해당 순위 이후의 사용자들에 대한 전력 재할당을 필요로 하지 않기 때문에, N 명 사용자에게 전력이 추가로 할당되었다면, N 번의 곱셈만 추가로 필요하다. 반면 기존 방법^[2]에서 최대 전송률 제한을 가지는 문제를 다루지 않았지만, 잔여전력 할당 과정을 사용자 별 최대 허용 전송률 제한을 가지는 경우로 확장하면, 오름차순 1순위 사용자에게 최대 전송률을 보장하는 범위까지 추가전력을 할당하고 또 다시 잔여전력이 발생하는 경우, 오름차순으로 다음 순위 사용자에게 최대 전송률을 보장하는 범위까지 최대한의 추가전력을 할당하는 방식을 따를 수 있을 것이다. 따라서 수정된 방법에서는 N 명 사용자에게 오름차순으로 전력을 추가로 할당한다면, 추가전력이 할당되는 매 사용자마다 해당 순위 이

표 1. 제안하는 방법과 기존 방법^[11]의 전력 할당 계산을 위한 곱셈 수

	제한된 방법	기존 방법
최소 전송률 제한만 두는 경우	$2L$	$\frac{L^2+L+2}{2}$
최소 및 최대 전송률 제한을 동시에 두는 경우	$2L+N$	$\frac{L^2+L+2}{2} + \sum_{n=1}^N \{3(L-n)-1\}$

후의 모든 사용자들에 대한 이미 할당된 전력 값들을 재할당해야 하므로, 각 순위 n 에 대하여 $\{3(L-n)-1\}$ 만큼, 총 $\sum_{n=1}^N \{3(L-n)-1\}$ 번의 추가적인 곱셈이 필요하게 된다.

제안한 방법과 기존 방법의 계산 복잡도를 표 1에 정리하였다. 표1에서 보는 바와 같이, 제안한 방법은 기존 방법에 비하여 전력할당을 위한 계산이 간단하다는 것을 알 수 있으며, 특히 최소뿐만 아니라 최대 전송률 제한도 있는 경우 복잡도 개선 효과가 매우 크다.

이 논문에서는 최소뿐만 아니라 최대 전송률 제한조건을 가지는 경우에 전송 효율성을 비교하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 이 모의실험에서 송신기와 각 사용자 수신기 사이에 평균이 0이고 분산이 1인 i.i.d. 레일리 페이딩 채널을 형성하는 4명의 사용자들에게 SCM을 수행하였으며, 모든 사용자들의 평균 수신 SNR은 40dB로 설정하였다. 또한, 사용자 별 최소 및 최대 전송률 제한은 모든 사용자들에 동일하게 각각 1.5 bps/Hz와 4.5 bps/Hz로 설정하였다^[10]. 모의실험은 1000번의 독립적인 채널에 대하여 사용자 별 전송률과 총 전송률 합을 구하고 평균을 취하였다. 모의실험 결과 표2는 최소 및 최대 전송률 제한을 동시에 고려하는 경우가 최소 전송률 제한만을 고려하는 경우에 비하여 총 전송률 합에서는 거의 일치하면서도 사용자 별 전송률을 고르게 분포시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 전송 실효성과 사용자 간 공평성이 크게 증가한다.

V. 결 론

이 논문에서는 전송 실효성 극대화를 위하여 사용자 별 최소 및 최대 전송률 제한조건을 두는 경우 페이딩 방송채널에서 내림차순 전력할당에 기반한 효율적인 SCM 방법을 제안하였다. 제안된 방법

표 2. 최소 및 최대 전송률 제한을 동시에 두는 경우와 최소 전송률 제한만 두는 경우에 대한 총 전송률 합과 사용자 별 전송률 [bps/Hz].

	최소 및 최대 전송률 제한을 동시에 두는 경우	최소 전송률 제한만 두는 경우
사용자1의 전송률	4.5000	9.6061
사용자2의 전송률	4.4928	1.5000
사용자3의 전송률	3.4921	1.5000
사용자4의 전송률	1.5296	1.4984
총 전송률 합	14.015	14.104

은 주어진 자원으로 전송 가능한 최대의 사용자 집합을 선정하고, 송신전력의 내림차순으로 사용자 별 최소 전송률을 보장하는 최대 허용 간섭전력을 결정하는 방식으로 사용자 별 최소 요구전력을 할당한다. 마지막으로 잔여전력으로 내림차순 최종 사용자부터 다시 오름차순으로 사용자 별 최대 전송률 제한을 만족하는 최대한의 전력을 추가로 할당한다. 제안된 방법은 내림차순 전력할당 단계에서 모든 사용자들이 이미 자신의 최소 요구 전송률을 보장하도록 이후 사용자들에게 허용되는 최대 간섭전력을 고려하여 전력할당이 이루어지기 때문에, 추가적인 오름차순 전력할당으로 인한 해당 순위 이후의 모든 사용자들에 대한 전력 재할당을 필요로 하지 않는다. 따라서, 제안한 방법은 전송 실효성 극대화를 위하여 사용자 별 최소뿐만 아니라 최대 전송률 제한이 동시에 두는 경우에, 특히 사용자 수가 많아질수록 계산이 효율적이다.

참 고 문 헌

- [1] T. M. Cover, "Broadcast channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.IT-18, No.1, pp.2 - 14, Jan. 1972.
- [2] N. Jindal and A. Goldsmith, "Capacity and optimal power allocation for fading broadcast channels with minimum rates," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.49, No.11, pp.2895 - 2909, Nov. 2003.
- [3] D. Kim, F. Khan, C. V. Rensburg, Z. Pi, and S. Yoon, "Superposition of broadcast and unicast in wireless cellular systems," *IEEE Commun. Mag.*, Vol.46, No.7, pp.110-117, July 2008.

- [4] B. Li, Z. Ruan, X. Zhang, Y. Chang, and D. Yang, "Throughput analysis of TDMA system forward link with superposition coding for location-based sets of users," in *Proc. IEEE WCNC 2008*, Apr. 2008.
- [5] Z. Ding, T. Ratnarajah, and C. Cowan, "On the diversity-multiplexing tradeoff for wireless cooperative multiple access systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol.55, No.9, pp.4627-4638, Sept. 2007
- [6] C. Wang, Y. Fan, I. Krikidis, J. S. Thompson, and H. V. Poor, "Superposition-coded concurrent decode-and-forward relaying," in *Proc. IEEE ISIT 2008*, July 2008.
- [7] X. Wang and M. T. Orchard, "Design of superposition coded modulation for unequal error protection," in *Proc. IEEE ICC 2001*, Jun. 2001.
- [8] H. S. Cronie, "Superposition coding for power- and bandwidth efficient communication over the Gaussian channel," in *Proc. IEEE ISIT 2007*, Jun. 2007.
- [9] 3GPP TS 25.308, "High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) Overall Description," Mar. 2008.
- [10] IEEE 802.16 WG, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems," IEEE STD 802.16e, Dec. 2005.
- [11] C. Ng and A. Goldsmith, "Capacity of fading broadcast channels with rate constraints," in *Proc. 42nd Allerton Conference on Communications, Control, and Computing*, Oct. 2004.

이 민 (Min Lee)

준회원



2006년 8월 이주대학교 전자공학부 졸업(학사)
2006년 9월~현재 이주대학교 전자공학부 석사과정
<관심분야> MU-MIMO precoding, superposition coding, resource management

오 성 근 (Seong Keun Oh)

종신회원



1983년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(학사)
1985년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사)
1990년 8월 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(박사)
1993년 9월~현재 이주대학교 전자공학부 교수
<관심분야> 4G 시스템, MIMO 시스템, 동적 간섭 및 자원 관리

정 병 장 (Byung Jang Jeong)

정회원



1988년 2월 경북대학교 전자공학과 학사
1992년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
1997년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사
1994년 5월~2003년 5월 삼성종합기술원 전문연구원

2003년 6월~현재 ETRI 이동통신연구단 선임연구원
<관심분야> 통신신호처리, 무선통신, MIMO