협력 전송 OFDMA 시스템에서 QoS 기반 서브캐리어 및 전력 할당에 관한 연구

QoS-based Subcarrier and Power allocation in User-cooperative OFDMA Systems

한영구, 김세헌
KAIST 산업공학과 통신시스템 연구실
E-mail : yghan@tmlab.kaist.ac.kr;shkim@kaist.ac.kr

초록

협력전송 시스템은 과거 애드 혹 네트워크나 블루투스 등 무선 통신 시장의 특별한 분야에서 널리 사용되던 기술로써 기지국과 단말 간의 통신효율을 높이기 위한 방안으로 주목받고 있다. 협력 전송 시스템은 무선 환경이 나쁜 상황에 있는 사용자가 relay를 통해 더 나은 무선 환경을 얻을 수 있으며 전송 다이버시티를 이용해 통신 품질을 개선할 수 있다는 장점을 가진다. 본 연구는 OFDMA 시스템에서 협력전송 방식을 이용하여 각 사용자들 간의 QoS를 보장하고 통신 성능을 극대화시키는 문제를 수리계획 모형을 통해 수식화하고 이를 풀기 위한 효율적인 기법을 제안한다.

Keywords: OFDMA. Cooperative network

I. 서론

협동 전송시스템은 과거 애드 혹 네트워크나 블루투스 등 무선 통신 시장의 특별한 분야에서 널리 사용되던 기술로써 최근 기지국과 단말 간에 통신 효율을 높일 수 있다는 장점이 인식됨에 따라 셀 기반 통신에서 차세대 기술의 하나로 주목받고 있다.[1]

본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음
(IITA-2008-(C1090-0801-0016))

협동 전송 시스템은 기존의 셀 기반 무선 통신 시스템이 기지국과 이용자 단말 간의 메시지 교환을 통해 통신이 이루어지는 방식과 달리 단말과 단말 간의 relay를 통해 통신을 하는 방식이다. 협동 전송방식은 송하고자 하는 단말과 기지국 사이의 무선 환경이 나쁜 상황에서도 relay를 통해 나은 무선 환경을 이용할 수 있으며 협력 전송을 할 경우 전송 다이버시티를 얻음으로써 통신 품질을 개선할 수 있다는 장점을 가진다.[2]

셀 기반 통신 시스템에서 협동 전송방식에 관한 연구는 주로 물리 계층 기반의 무선 환경 이득 분석에 관한 연구가 수행되었다. Hasna et al.[3]은 하나의 전송 단말과 하나의 relay 단말이 존재할 때 협동 전송이 신호 대 잡음비(Signal to noise ratio)에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 Anghel et al.[1]은 복수의 relay 단말이 존재하는 환경에서 신호 대 잡음비를 계산하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 바탕으로 전송자-relayer 쌍에서 최적화된 전력 제어에 관한 연구도 수행되어 왔다. Hasna et al.은 하나의 전송자-relayer 쌍에서 전송 오류를 최소화하는 전력 제어를 계산하고 시뮬레이션을 통해 전송자와 relayer 간의 전력 분배의 특성을 분석하였다. Anghel et al.은 동일한 문제를 전송 속도를 최소화하는 관점에서 접근한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 협력 전송 방식을 OFDMA

시스템에 도입한 환경을 대상으로 하고 있다. OFDMA 시스템은 미래의 광대역 무선 통신 시스템 다중 접속 방식으로 주목받고 있다.[4] OFDMA 시스템은 사용자의 데이터를 다중직교 채널을 이용하여 병렬로 전송하는 방식으로서 고속 서비스의 가장 큰 장애요인 중 하나인 심볼 간 간섭문제를 해결할 수 있으며 주파수 선택적 페이딩을 극복할 수 있다.[5]

본 연구에서는 협력 전송방식을 도입한 OFDMA 시스템에서 셀 내 이용자들의 QoS를 고려한 주파수 및 전력 자원 관리를 수행한다. 실시간으로 전송되어야 하는 멀티미디어 데이터의 요구가 증가함에 따라 이용자의 전송 속도 요구사항을 보장하는 것이 중요한 이슈로 부각되고 있다.[6] 하지만 기존의 협력 전송방식 기반 OFDMA 시스템에 관한 연구에서는 시스템 전체의 성능 향상에 초점을 맞추어 통신 환경이 좋지 않은 이용자들의 데이터 전송을 보장하지 못하는 한계를 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 QoS 제약식을 포함한 주파수 및 전력 할당 문제를 수식화하고 이를 풀기 위한 효율적인 알고리즘을 제시한다.

II. 시스템 모델

이 연구에서는 기지국과 이용자들 간에 협력 전송을 허용하는 OFDMA 상향전송 시스템을 고려한다. 대상 셀은 M 명의 이용자와 N 개의 서브캐리어를 가지고 있으며 각 노드는 단일 안테나를 가지고 있다고 가정하였다. 이 연구에서는 릴레이 방법으로 amplify-and-forward 방식만을 고려하였으며 각 전송에 있어서 하나의 릴레이만 사용하는 two-hop 전송만을 고려하였다. 그리고 각 이용자가 신호를 직접 기지국에 보내거나 다른 이용자의 신호를 기지국으로 전달해주는 두 가지 방식의 전송을 하는 환경을 가정하였다. 셀 내 간섭을 배제하기 위해 OFDMA 시스템에서 하나의 서브캐리어에는 하나의 전송만 할당되도록 가정하였다. 또한 송신 노드와 릴레이 노드는 협력 전송에 있어 단일 서브캐리어를 이용하였다. 최종적으로 채널 상황은 스케쥴링 기간 동안 동일하며 채널 정보가 완벽히 알려져 있는 상황을 가정하였다.

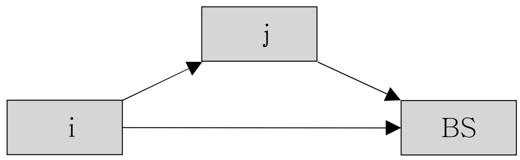

그림 1. Two-user case

그림 1와 같이 하나의 송신 노드와 하나의 릴레이 노드가 있는 상황을 고려해 보자. 릴레이 노드 j가 송신 노드 i의 정보를 릴레이한다고 할 때 기지국과 노드 i간에는 직접 경로 $(i-BS)$와 릴레이 경로 $(i-j-BS)$의 두 가지 경로가 생성된다. 각 링크 (i,BS), (j,BS), (i,j)의 서브캐리어 k에서의 채널을 g_i^k, g_j^k, g_{ij}^k로 표현하면 직접 경로와 릴레이 경로의 SNR은 다음과 같다.

$$SNR(i-BS) = g_i^k p_i^k$$

$$SNR(i-j-BS) = \frac{g_{ij}^k p_i^k \cdot g_j^k p_j^k}{g_{ij}^k p_i^k + g_j^k p_j^k}$$

위의 수식에서 p_i^k, p_j^k는 서브캐리어 k에서 노드 i와 노드 j의 전송 전력을 나타낸다.

협력 전송에서 각 노드는 두 가지 경로로부터 받은 신호를 결합하고 이를 통해 신호 대 잡음비를 개선할 수 있다. Maximal ratio combining을 이용하면 협력 전송의 신호 대 잡음비는 다음과 같다.[7]

$$SNRC(p_i^k, p_j^k) = g_i^k p_i^k + \frac{g_{ij}^k p_i^k \cdot g_j^k p_j^k}{g_{ij}^k p_i^k + g_j^k p_j^k} \qquad (1)$$

III. 최적화 모형 수립

본 연구에서는 BS가 데이터를 전송하고자 할 때 직접 전송을 사용할 것인지, 협력 전송을 사용할 것인지를 선택할 수 있도록 하기 위해 다음과 같은 두 개의 이산(binary) 변수를 정의하였다.

$$w_i^k = \begin{cases} 1, \text{노드 } i\text{가 기지국으로 직접 전송} \\ 0, \text{그 외} \end{cases}$$

$$\delta_{ij}^k = \begin{cases} 1, \text{노드 } i\text{가 노드 } j\text{를 거쳐 기지국으로 전송} \\ 0, \text{그 외} \end{cases}$$

따라서 우리는 w_i^k와 δ_{ij}^k 중에 하나를 1로 놓음으로써 직접 전송과 협력 전송을 표현할 수 있게 된다. 기지국이 노드 i로 p_i^k의 전력으로 직접 전송할 때 신호 대 잡음비는 $g_i^k p_i^k$이며 협력 전송의 신호 대 잡음비는 수식 (1)과 같다.
이 때 Shannon capacity 공식을 이용하면 노드 i가 서브캐리어 k를 이용하여 전송할 때의 데이터 전송속도 r_i^k를 다음과 같이 나타낼 수 있다.[8]

$$r_i^k = w_i^k \log(1 + g_i^k p_i^k) + \sum_{j=1, j \neq i}^{M} \frac{\delta_{ij}^k}{2} log\left(1 + g_i^k p_i^k + \frac{g_{ij}^k p_i^k \cdot g_j^k p_j^k}{g_{ij}^k p_i^k + g_j^k p_j^k}\right)$$

이용자 QoS를 만족시키기 위해서는 각 이용자들이 서브캐리어를 통해 전송하는 총 데이터 전송속도의 합이 전송속도의 최고 전송속도 요구조건을 만족시켜야 한다. 따라서 노드 i의 QoS 제약식을 세울 수 있다.

$$\sum_{k=1}^{N} r_i^k \geq R_i$$

위의 식에서 R_i는 노드 i의 전송속도 최소 요구조건을 의미한다.
본 연구에서는 이용자 간의 QoS를 만족시키면서 전체 시스템의 전송량을 최대화하는 문제를 최적 자원관리 문제로 수식화하였다. 위의 식들로부터 협력전송 기반 OFDMA 상향 시스템에서의 전송량 최대화 문제를 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$Max \sum_{i=1}^{M} \sum_{k=1}^{N} r_i^k$$

$$s.t. \sum_{k=1}^{N} r_i^k \geq R_i \quad , \forall i \qquad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{M} w_i^k + \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1, j \neq i}^{M} \delta_{ij}^k \leq 1 \quad , \forall k \qquad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{N} p_i^k \leq P_i \quad , \forall i \qquad (4)$$

$$w_i^k, \delta_{ij}^k \in \{0,1\} \quad , \forall i,k \qquad (5)$$

$$p_i^k \geq 0 \quad , \forall i,k \qquad (6)$$

위의 최적화 문제에서 제약식 (3)는 각 서브캐리어에서 직접 전송 또는 간접 전송 중 오직 하나만 할당되어야 한다는 것을 의미한다. 제약식 (4)은 각 이용자에게 할당되는 전력은 단말에서 허용되는 최대 전력 P_i를 넘을 수 없다는 것을 의미한다. 제약식 (5)는 w_i^k와 δ_{ij}^k가 이산변수임을 나타내고 제약식 (6)는 모든 전력이 양의 값을 가짐을 나타낸다.

IV. 주파수 및 전력 할당 알고리즘

위의 전송량 최대화 문제는 조합적 최적화 문제이므로 최적해를 찾기가 매우 어려우며 최적해를 찾기 위해서는 가능한 모든 조합에서 해를 비교해 보아야 한다. 따라서 이 문제를 실시간으로 해를 찾고 스케쥴링을 하는 것은 불가능하다. 이 연구에서는 Lagrangean relaxation technique[9]을 통해 위 전송량 최대화 문제의 부최적해(sub-optimal solution)을 찾고자 한다.
위의 전송량 최대화 문제에서 제약식 (2)와 (4)를 완화했을 경우 완화된 문제 (LR)은

다음과 같이 표현할 수 있다.

$$LR = Max\sum_{i=1}^{M}\sum_{k=1}^{N}r_i^k + \sum_{i=1}^{M}\mu_i\left(\sum_{k=1}^{N}r_i^k - R_i\right) - \sum_{i=1}^{M}\lambda_i\left(\sum_{k=1}^{N}p_i^k - P_i\right)$$
$$= Max\sum_{k=1}^{N}\left[\sum_{i=1}^{M}\left\{(1+\mu_i)r_i^k - \lambda_i p_i^k\right\}\right] - \sum_{i=1}^{M}\mu_i R_i + \sum_{i=1}^{M}\lambda_i P_i$$

s.t. (3), (5), (6)

위 문제에서 μ_i와 λ_i는 Lagrangean multiplier이다. 위의 완화된 문제(LR)은 각 서브캐리어에 따라 N개의 sub-problem으로 분해 가능하다. 각 서브캐리어 $k(1 \le k \le N)$에 대해서 sub-problem은 다음과 같이 표현된다.

(SUB-k)

$$Max\sum_{i=1}^{M}\left\{(1+\mu_i)r_i^k - \lambda_i p_i^k\right\}$$
$$= Max\left[\sum_{i=1}^{M}(1+\mu_i)w_i^k\log(1+g_i^k p_i^k) + \sum_{j=1, j\neq i}^{M}\frac{\delta_{ij}^k}{2}log\left(1+g_i^k p_i^k + \frac{g_{ij}^k p_i^k \bullet g_j^k p_j^k}{g_{ij}^k p_i^k + g_j^k p_j^k}\right) - \lambda_i p_i^k\right]$$
$$= Max\sum_{i=1}^{M}(1+\mu_i)w_i^k\log(1+g_i^k p_i^k) + \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1, j\neq i}^{M}\frac{\delta_{ij}^k}{2}log\left(1+g_i^k p_i^k + \frac{g_{ij}^k p_i^k \bullet g_j^k p_j^k}{g_{ij}^k p_i^k + g_j^k p_j^k}\right) - \sum_{i=1}^{M}\lambda_i p_i^k$$

$s.t.$

$$\sum_{i=1}^{M}w_i^k + \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1, j\neq i}^{M}\delta_{ij}^k \le 1$$
$$w_i^k, \delta_{ij}^k \in \{0,1\} \quad , \forall i$$
$$p_i^k \ge 0 \quad , \forall i$$

위의 sub-problem에서는 서브캐리어에 오직 하나의 전송만이 할당될 수 있다. 따라서 w_i^k와 δ_{ij}^k 중 하나만이 1이 될 수 있다. w_i^k와 δ_{ij}^k는 다음과 같이 결정된다.

(i)

$$\max(1+\mu_i)w_i^k\log(1+g_i^k p_i^k) - \lambda_i p_i^k \ge \max\frac{\delta_{ij}^k}{2}log\left(1+g_i^k p_i^k + \frac{g_{ij}^k p_i^k \bullet g_j^k p_j^k}{g_{ij}^k p_i^k + g_j^k p_j^k}\right) - \lambda_i p_i^k - \lambda_j p_j^k$$

일 때

$$i^* = \mathrm{arg}max\left\{(1+\mu_i)w_i^k\log(1+g_i^k p_i^k) - \lambda_i p_i^k\right\}$$

에 대해 $w_{i^*}^k = 1$이며 그 외의 모든 w_i^k, δ_{ij}^k은 0이다.

(ii)

$$\max(1+\mu_i)w_i^k\log(1+g_i^k p_i^k) - \lambda_i p_i^k < \max\frac{\delta_{ij}^k}{2}log\left(1+g_i^k p_i^k + \frac{g_{ij}^k p_i^k \bullet g_j^k p_j^k}{g_{ij}^k p_i^k + g_j^k p_j^k}\right) - \lambda_i p_i^k - \lambda_j p_j^k$$

일 때

$$(i^*, j^*) = \mathrm{arg}max\left\{\frac{\delta_{ij}^k}{2}log\left(1+g_i^k p_i^k + \frac{g_{ij}^k p_i^k \bullet g_j^k p_j^k}{g_{ij}^k p_i^k + g_j^k p_j^k}\right) - \lambda_i p_i^k - \lambda_j p_j^k\right\}$$

에 대해 $\delta_{i^*j^*}^k = 1$이며 그 외의 모든 w_i^k, δ_{ij}^k은 0이다.

위 (i)와 (ii)를 통해 각 서브캐리어를 이용자에게 할당할 수 있다. 이 때 최적 전력은 $\max(1+\mu_i)\log(1+g_i^k p_i^k) - \lambda_i p_i^k$와 $\max\frac{1}{2}log\left(1+g_i^k p_i^k + \frac{g_{ij}^k p_i^k \bullet g_j^k p_j^k}{g_{ij}^k p_i^k + g_j^k p_j^k}\right) - \lambda_i p_i^k - \lambda_j p_j^k$의 최적해를 구함으로써 얻을 수 있다. 이 두 문제는 안의 함수들이 모두 p_i^k, p_j^k에 대해 convex function이기 때문에 간단히 미분을 통해 최적해를 구할 수 있다.

$(1+\mu_i)\log(1+g_i^k p_i^k) - \lambda_i p_i^k$를 최대화하는 p_i^k는 다음과 같다.

$$p_i^k = \left[\frac{1+\mu_i}{\lambda_i} - \frac{1}{g_i^k}\right]^+$$

위에서 $[\bullet]^+$는 $\max[\bullet, 0]$를 의미한다. 또한

$$\frac{1}{2}log\left(1+g_i^k p_i^k+\frac{g_{ij}^k p_i^k \bullet g_j^k p_j^k}{g_{ij}^k p_i^k+g_j^k p_j^k}\right)-\lambda_i p_i^k-\lambda_j p_j^k \mathrm{f}$$

를 최대화하는 p_i^k와 p_j^k는 다음과 같다.

$$p_i^k=\kappa_{ij}^k p_j^k$$

$$p_j^k=\left[\frac{1+\mu_i}{2\lambda_i(\kappa_{ij}^k+1)}-\frac{1}{\kappa_{ij}^k g_i^k+\frac{\kappa_{ij}^k g_{ij}^k g_j^k}{\kappa_{ij}^k g_{ij}^k+g_j^k}}\right]^+$$

이 때

$$\kappa_{ji}^k=\left[\frac{g_j^k(g_i^k+\sqrt{g_i^k g_j^k-g_i^k g_{ij}^k+g_j^k g_{ij}^k}}{g_{ij}^k(g_j^k-g_i^k)}\right]$$이다.

따라서 이 결과들을 통해서 sub-problem의 최적해를 구할 수 있다.

위와 같이 완화된 문제 (LR)의 최적해를 구할 수 있지만 (LR)의 최적해가 원 문제인 최소 전력 할당 문제에 항상 실행 가능한 것은 아니다. 따라서 (LR)의 최적해로부터 전송량 최대화 문제에 실행 가능한 해를 찾기 위한 heuristic한 알고리즘이 뒷받침되어야 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 Lagrangean heuristic algorithm을 제안한다.

[Lagrangean Heuristic]

Step 1) 각 노드 i에 대해,

제약식 (2), (4)를 모두 만족하면 실행 가능해이므로 종료한다. 그렇지 않으면 Step 5로 이동한다.

Step 2) 만약 제약식 (2), (4)를 둘 다 만족시키지 못하면 실행 불가능하므로 Step 5로 이동한다.

만약 제약식 (4)만을 만족하면 Step 3로 이동한다. 제약식 (2)만을 만족하면 Step 4로 이동한다.

Step 3) $p_i^k(m)$을 m bit를 전송하기 위해 할당한 전력이라 정의한다. 또한 $\triangle p_i^k(m)$를 $\triangle p_i^k(m)=p_i^k(m+1)-p_i^k(m)$으로 정의한다. 노드 i에 할당된 서브캐리어 중 $\triangle p_i^k(m)$이 가장 작은 서브캐리어 k를 찾아 1 bit를 증가시킨다. 제약식 (2)를 만족시킬 때까지 이 과정을 반복한다. 제약식 (2)를 만족하거나 제약식 (4)를 만족시키지 못하게 될 경우 Step 5로 이동한다.

Step 4) 노드 i에 할당된 서브캐리어 중 $\triangle p_i^k(m-1)$이 가장 큰 서브캐리어 k를 찾아 1 bit를 감소시킨다. 제약식 (4)를 만족시킬 때까지 이 과정을 반복한다. 이 후 Step 5로 이동한다.

Step 5) 다음 노드로 변경하여 Step 1로 이동한다. 모든 노드에 대해서 위의 과정을 모두 수행하면 종료한다.

Lagrangean relaxation 과정에서 완화된 문제(LR)은 Lagrangean multiplier μ_i와 λ_i를 반복해서 업데이트시켜주어야 한다. 빠르게 수렴하는 multiplier를 찾는 것은 효율적인 Lagrangean relaxation 과정을 위해 필수적이다. 본 연구에서는 2M개의 Lagrangean multiplier가 존재하므로 multiplier 업데이트를 위해 기존에 알려진 방법인 Subgradient method를 이용한다.

V. 결론

본 연구에서는 협력 전송 기반 OFDMA 시스템에서 QoS를 고려한 전송량 최대화 문제를 수식화하고 이를 풀기 위한 알고리즘을 제시하였다. 전송량 최대화 문제는 조합최적화 문제로서 최적해를 구하기가 매우 어렵기 때문에 Lagrangean relaxation technique을 이용하여 sub-optimal solution을 도출하였다.

차후에는 시뮬레이션을 통해 본 연구에서 제안된 알고리즘의 성능을 평가하고 알고리즘을 수정 및 보완할 것이다.

< References >

[1] P A Anghel and M Kaveh, “Exact Symb

ol Error Probability of a Cooperative Network in a Rayleigh-Fading Environment", IEEE Transactions on Wireless Communications, 3(5), pp.1416-1421, 2004.
[2] I Hammerstrom, J Zhao and A Wittneben, "Temporal Fairness Enhanced Scheduling For Cooperative Relaying Networks in Low Mobility Fading Environments", 2005 IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advanced in Wireless Communications, pp. 525-529, 2005.
[3] M O Hasna, and M S Alouini, “End-to-end performance of transmission systems with relays over rayleigh-fading channel”, IEEE Trans. Wireless. Commun., vol.2, no.6, pp.1126-1131, Nov.2003.
[4] K Kim, Y Han, and SL Kim, "Joint Subcarrier and Power Allocation in Uplink OFDMA Systems", IEEE Communications Letters, 9(6), June, pp. 526-528, 2005.
[5] G Kulkarni, S Adlakha, and M Srivastava, "Subcarrier Allocation and Bit Loading Algorithms for OFDMA-Based Wireless Networks", IEEE Transactions on Moble Computing, 4(6), pp. 652- 662, 2005.
[6] M Ergen, S Coleri and P Varaiya, "QoS Aware Adaptive Resource Allocation Techniques for Fair Scheduling in OFDMA Based Broadband Wireless Access Systems", IEEE Transactions on Broadcasting, 49(4), pp.362-370, 2003.
[7] Z Han, T Himsoon, W P Siriwongpairat, and K J R Liu, "Energy-Efficient Cooperative Transmission over Multiuser OFDMA Networks: who helps whom and how to cooperate", 2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2, March, pp.1030-1035, 2005.
[8] T. M. Cover and J. A. Thomas, Elements of Information Theory, Wiley & Sons, New York, 1991.
[9] D Bersekas, Nonlinear Programming, Athena Scientific, 1995.
[10] M L Fisher, “The Lagrangean relaxation method for solving integer programming problem”, Manage. Sci., vol.27, pp.1-18, 1981.