

OFDMA 셀룰러 네트워크에서의 D2D 통신을 위한 모드 선택 및 자원 할당 기법

김태형*, 민경식*, 최수용°

Joint Mode Selection and Resource Allocation for Device-to-Device Communication Underlying OFDMA Cellular Networks

Taehyoung Kim*, Kyungsik Min*, Sooyong Choi°

요약

본 논문은 OFDMA 셀룰러 네트워크 기반 최적 D2D 통신을 위한 모드 선택 및 자원할당 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 단말의 채널 정보를 바탕으로 QoS를 만족하는 D2D-모드 가능 영역을 판별하고, Primal-Dual 알고리즘을 이용하여 최적의 해를 구한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법이 기존 기법 대비 시스템 수율을 크게 개선함을 확인하였다.

Key Words : D2D, OFDMA, Primal-Dual Algorithm

ABSTRACT

In this letter, the joint mode selection and resource allocation method is proposed for D2D communication underlying OFDMA based cellular networks. In the proposed scheme, D2D mode possible region is determined which satisfies QoS. Then we solve the optimization problem utilizing primal-dual algorithm. The proposed scheme shows better performance than conventional schemes.

1. 서론

최근, 스펙트럼 효율을 증가시키고 기지국의 load

를 이양하기 위하여, 가까운 거리에 위치한 두 단말이 기지국을 거치지 않고 직접 통신하는 D2D (Device-to-Device) 통신 기법이 제안되었다.^[1-3] D2D 통신을 수행하는 두 단말은 셀룰러 주파수 자원을 재사용하기 때문에, 셀룰러 단말과 D2D 단말 사이의 간섭 조정이 필수적이다. 이러한 간섭 문제를 해결하고, 동시에 시스템 수율을 최대화하기 위해 D2D 통신 모드 선택^[1], 자원 할당^[2], 전력 할당^[3]에 대한 연구가 진행되어 왔다.

본 논문에서는 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 셀룰러 네트워크 기반의 최적 D2D 통신을 위한 모드 선택 및 자원 할당 기법을 제안한다. 먼저, 기지국은 단말의 채널 정보를 바탕으로 DMPR (D2D-Mode-Possible Region)을 설정하고, DM (D2D Mode)으로 동작할 후보 단말들을 설정한다. DMPR은 단말의 최소 QoS (Quality of Service) 요구량과 시스템 수율에 기반하여 결정된다. 다음으로, 최적화 문제의 목적 함수를 LP (Linear Programming) 문제로 변환한 후 Primal-Dual 알고리즘^[4]을 이용하여 최적의 해를 구한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 단일 셀 TDD (Time Division Duplex) 기반 OFDMA 셀룰러 네트워크를 고려한다. D2D 후보 단말은 DM으로 동작할 시, 최대 하나의 셀룰러 단말의 상향링크 자원을 공유한다고 가정한다.^[1] 모든 D2D 후보 단말이 CM (Cellular Mode)로 동작할 경우 시스템 수율은 다음과 같이 표현된다.

$$R^{cm} = \sum_{k=1}^{N_c} R_{c_k}^{cm} + \sum_{k=1}^{N_d} R_{d_k}^{cm} \tag{1}$$

$$= \sum_{k=1}^{N_c} \log_2(1 + \rho_c r_{c_k}^{-\alpha}) + \sum_{k=1}^{N_d} \log_2(1 + \rho_c r_{d_k}^{-\alpha})$$

식 (1)에서 N_c 는 셀룰러 단말의 수, N_d 는 D2D 후보 단말의 수, $\rho_c = p/\sigma^2$ 는 CM으로 동작하는 단말의 송신 SNR (Signal-to-Noise Ratio)이다. p 는 송신 전력, σ^2 은 잡음 분산이다. 또한, r_{ij} 는 두 노드 i 와 j 사이의 거리를 나타내고, α 는 경로 손실 지수, b 는 기지

* 본 연구는 서울특별시의 서울 벨 연구소 사업(서울시 산학연 협력사업(WR080951)) 및 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(no.2012R1A1A2041906).

• First Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, khotdog@yonsei.ac.kr, 정희원

° Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, csyong@yonsei.ac.kr, 종신희원

* School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, minkyungsik@yonsei.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2014-09-356, Received September 19, 2014; Revised October 8, 2014; Accepted October 8, 2014

국을 뜻한다. $R_{c_k}^{cm}$ 과 $R_{d_k}^{cm}$ 는 각각 CM으로 동작하는 k 번째 셀룰러 단말과 k 번째 D2D 후보 단말의 전송률을 나타낸다.

반면, D2D 후보 단말의 일부가 DM으로 동작할 경우 시스템 수율은 다음과 같이 표현된다.

$$R^{dm} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \notin \mathbf{m}_c}}^{N_c} R_{c_k}^{cm} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \notin \mathbf{m}_d}}^{N_d} R_{d_k}^{cm} + \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_d} m_{ij} (R_{c_i}^{dm} + R_{d_j}^{dm}) \quad (2)$$

식 (2)에서 m_{ij} 는 단말의 통신 모드를 나타내는 $N_c \times N_d$ 지표 행렬 \mathbf{M} 의 (i, j) 성분을 나타낸다. i 번째 셀룰러 단말과 j 번째 D2D 단말이 DM으로 동작할 경우 $m_{ij} = 1$, CM으로 동작할 경우 $m_{ij} = 0$ 이다. 마찬가지로, \mathbf{m}_c 와 \mathbf{m}_d 는 지표 벡터로써 $\mathbf{m}_c = \{k | m_{kj} = 1, \forall j\}$, $\mathbf{m}_d = \{k | m_{ik} = 1, \forall i\}$ 이다. $R_{c_i}^{dm}$ 과 $R_{d_j}^{dm}$ 는 DM으로 동작할 때의 전송률로써 다음과 같이 정의된다.

$$R_{c_i}^{dm} = \log_2 \left(1 + \frac{\rho_c r_{c_i b}^{-\alpha}}{\rho_d r_{d_j b}^{-\alpha} + 1} \right), \quad (3)$$

$$R_{d_j}^{dm} = \log_2 \left(1 + \frac{\rho_d r_{d_j d}^{-\alpha}}{\rho_c r_{c_i d}^{-\alpha} + 1} \right). \quad (4)$$

식 (4)에서 ρ_d 는 DM으로 동작하는 D2D 단말의 송신 SNR로써 셀룰러 단말로의 간섭을 고려해 $\rho_d = \eta \sigma^2 a_{db}^\alpha$ 와 같이 조정된다. η 는 Target 간섭 대비 잡음비이다.

III. 제안 모드 선택 및 자원 할당 기법

식 (1)과 (2)로부터, 시스템 수율을 최대화하기 위한 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M}^* = \arg \max_{\mathbf{M}} R^{dm} \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{\rho_c r_{c_i b}^{-\alpha}}{\rho_d r_{d_j b}^{-\alpha} + 1} \geq \gamma_c, \quad \frac{\rho_d r_{d_j d}^{-\alpha}}{\rho_c r_{c_i d}^{-\alpha} + 1} \geq \gamma_d \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{N_c} m_{ij} \leq 1, \quad \sum_{j=1}^{N_d} m_{ij} \leq 1, \quad \forall i, j. \quad (7)$$

식 (6)에서 γ_c 와 γ_d 는 각각 셀룰러 단말과 D2D 단말이 달성해야 하는 최소 QoS이다. 제약 조건 (7)에

따라 하나의 자원은 최대 한 쌍의 셀룰러 단말과 D2D 단말만 공유할 수 있다. 위 최적화 문제는 MINLP (Mixed Integer Non-Linear Programming)로써 최적의 해를 구하기 위해서는 단말 수에 따라 계산량이 지수적으로 증가하는 높은 복잡도의 전수 조사가 필요하다.

3.1 제안 DMPR

단말들의 채널 정보를 바탕으로 기지국은 각 D2D 후보 단말에 대한 DMPR을 연산한다. 임의의 D2D 후보 단말은 자신의 위치에 의해 결정되는 DMPR내에 다른 셀룰러 단말이 존재할 경우에만, DM으로 동작할 수 있다.

주어진 j 번째 D2D 후보 단말이 임의의 i 번째 셀룰러 단말과 자원을 공유하여 DM으로 동작하기 위해서는 우선 아래의 조건을 만족해야 한다.

$$R^{cm} \leq R_{i,j}^{dm} = \sum_{k \neq i} R_{c_k}^{cm} + \sum_{k \neq j} R_{d_k}^{cm} + R_{c_i}^{dm} + R_{d_j}^{dm} \quad (8)$$

식 (8)을 셀룰러 단말과 D2D 단말 사이의 거리에 대한 식으로 정리하면 아래와 같다.

$$r_{c_d j} \geq r_{out_1} = r_{d_j} \left(SNR_{d_j} \right)^{\frac{3}{2\alpha}} \frac{R^{cm}}{(N_c + N_d)^\alpha} \quad (9)$$

식 (9)에서 SNR_{d_j} 는 CM으로 동작할 때의 D2D 단말의 수신 SNR이다. 또한 제약 조건 (6)으로부터 다음과 같은 부등식을 유도할 수 있다.

$$r_{c_b} \leq r_{inn} = \left(\frac{\rho_c}{(\eta + 1)\gamma_c} \right)^{1/\alpha} \quad (10)$$

$$r_{c_d j} \geq r_{out_2} = \left(\frac{\rho_c \gamma_d}{\eta} \right)^{1/\alpha} \frac{r_{d_j}}{r_{d_j b}} \quad (11)$$

식 (9), (10), 그리고 (11)로부터 DMPR은 다음과 같이 주어진다.

$$r_{c_b} \leq r_{inn}, \quad r_{c_d j} \geq r_{out} = \max(r_{outer_1}, r_{outer_2}) \quad (12)$$

식 (12)에 따라, 모든 D2D 후보 단말에 대하여 DMPR에 대한 지표 행렬 $\tilde{\mathbf{M}}$ 을 생성한다.

3.2 제안 모드 선택 및 자원 할당 기법

문제 (5)의 목적 함수를 다음과 같이 변형한다.

식 (13)에서 Δ_{ij} 는 DM에 따른 CM 대비 성능 이득이다. 따라서 최적화 문제 (5)는 다음과 같이 LP 문제의 형태로 다시 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 R^{dm} &= \sum_{\substack{k=1 \\ k \notin \mathbf{m}_c}}^{N_c} R_{e_k}^{cm} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \notin \mathbf{m}_d}}^{N_d} R_{d_k}^{cm} + \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_d} m_{ij} (R_{e_i}^{dm} + R_{d_j}^{dm}) \\
 &= R^{cm} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \mathbf{m}_c}}^{N_c} R_{e_k}^{cm} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \mathbf{m}_d}}^{N_d} R_{d_k}^{cm} + \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_d} m_{ij} (R_{e_i}^{dm} + R_{d_j}^{dm}) \\
 &= R^{cm} + \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_d} m_{ij} \Delta_{ij}
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\mathbf{M}^* = \arg \max_{\mathbf{M}} \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_d} m_{ij} \Delta_{ij} \tag{14}$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^{N_c} m_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^{N_d} m_{ij} \leq 1, \forall i, j. \tag{15}$$

제약 조건 (6)은 알고리즘 내 DMPR 지표 행렬 $\tilde{\mathbf{M}}$ 을 이용한 초기값 설정 과정에서 만족시킬 수 있다.

최적화 문제 (14)는 Primal-Dual 알고리즘^[4]을 이용하여 최적의 해를 구할 수 있다. 식 (14), (15)에 대한 Lagrange Relaxation은 다음과 같다.

$$L(m, \lambda, \mu) = \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_d} (\Delta_{ij} - \lambda_i - \mu_j) m_{ij} + \sum_{i=1}^{N_c} \lambda_i + \sum_{j=1}^{N_d} \mu_j$$

여기서 λ_i 와 μ_j 는 식 (15)의 두 제약 조건에 대한 Lagrange Multiplier이다. 따라서, (14)에 대한 Dual 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \min_{\lambda, \mu} \max_m L(m, \lambda, \mu) \\
 \text{s.t.} \lambda_i, \mu_j \geq 0, \forall i, j
 \end{aligned}$$

위 문제는 반복 알고리즘을 통해 해를 구할 수 있다. LP 문제의 특성상 n 번째 반복에서의 해는 다음과 같이 closed 형태로 표현된다.

$$m_{ij}^{(n)} = \begin{cases} 1, & \Delta_{ij} - \lambda_i^{(n)} - \mu_j^{(n)} \geq 0 \\ 0, & \Delta_{ij} - \lambda_i^{(n)} - \mu_j^{(n)} < 0 \end{cases} \tag{16}$$

$$\lambda_i^{(n+1)} = \max \left(\lambda_i^{(n)} - \epsilon \left(1 - \sum_{j=1}^{N_d} m_{ij}^{(n)} \right), 0 \right) \tag{17}$$

$$\mu_j^{(n+1)} = \max \left(\mu_j^{(n)} - \epsilon \left(1 - \sum_{i=1}^{N_c} m_{ij}^{(n)} \right), 0 \right) \tag{18}$$

식 (17)과 (18)에서 ϵ 은 반복을 위한 step 크기 이다. 초기 지표 행렬은 다음과 같이 설정한다.

$$\mathbf{M}^{(0)} = \mathbf{P} \circ \tilde{\mathbf{M}} \tag{19}$$

식 (19)에서 \mathbf{P} 는 임의의 양의 성분을 가진 $N_c \times N_d$ 행렬, \circ 는 Hadamard 곱 연산이다. 제안하는 기법의 계산량은 단말 수에 선형적으로 증가한다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 셀 반경 500m 내에 각 노드들을 균등하게 분포시켰다. D2D 수신 단말은 D2D 송신 단말을 기준으로 100m 내에 임의로 배치시켰다.

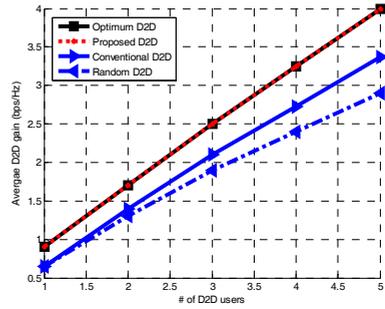


그림 1. D2D 단말 수에 따른 평균 D2D 이득
Fig. 1. Average D2D gain according to N_d

$P = 20\text{dBm}$, $\alpha = 4$, $\gamma_c = \gamma_d = 5\text{dB}$, $\eta = 15\text{dB}$ 로 설정하였다. 그림 1은 $N_c = 10$ 일 때의 D2D 단말 수에 따른 평균 D2D 이득을 보여준다. 기존 기법^[2]에서는 MINLP 문제를 해결하기 위해, 간단한 Greedy 알고리즘을 사용하였다. 제안하는 기법은 전수 조사를 통해 얻은 최적 값과 동일한 성능을 보이며, 기존 기법^[2] 및 임의 기법 대비 20%~30% 향상된 성능을 보인다.

V. 결론

본 논문은 OFDMA 셀룰러 네트워크 기반 최적 D2D 통신을 위한 모드 선택 및 자원할당 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 DMPR을 설정하고 Primal-Dual 알고리즘으로 최적의 해를 찾음으로써 기존 기법 대비 우수한 성능을 보인다.

References

- [1] C.-H. Yu, K. Doppler, C. Ribeiro, and O. Tirkkonen, "Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 2752-2763, Aug. 2011.
- [2] M. Zulhasnine, C. Huang, and A. Srinivasan, "Efficient resource allocation for device-to-device communication underlying LTE network," in *Proc. IEEE WiMob 2010*, pp. 368-375, Niagara Falls, Canada, Oct. 2010.
- [3] M. Jung and S. Choi, "Analysis of energy efficiency for device-to-device (D2D) communication underlying cellular networks," *J. KICS*, vol. 38, no. 7, pp. 571-579, Jul. 2013.
- [4] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, 2004.