

기기간 통신과 전력제어 최적화 문제

I. 서론

최근 스마트 폰과 태블릿 PC의 활발한 보급으로 인해 초고속·고용량의 멀티미디어 서비스에 대한 필요성이 크게 증대되고 있다. 그에 따라 개인 사용자의 데이터 사용량이 급증하고 있으며 이는 모바일 트래픽의 증가로 연결되어 통신 서비스 및 망 사업자 입장에서 크나큰 부담으로 다가오고 있다. 이러한 당면한 문제를 해결하기 위해 망 고도화 및 효율화 기법, 설비 증가 및 확충, 협력 통신 및 릴레이 노드 등의 연구와 더불어 beyond 4G의 차세대 이동통신망에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다^[1].

본 고에서 소개하는 단말간 직접 통신 (device-to-device communication: D2D communication)은 이러한 배경을 바탕으로 제안된 기법으로 기지국과 단말간의 링크를 기본으로 하는 일반적인 통신 시스템과는 다르게 개별적인 단말과 단말(node to node) 사이에 링크를 형성시켜 사용자 간 직접 통신을 수행하는 협력 통신 기술이다. D2D 통신의 경우 주파수 재사용을 통한 무선자원의 효율성의 증대와 더불어 디바이스와 네트워크의 소비전력 감소효과 및 네트워크 서비스 커버리지 확장 효과를 얻을 수 있으며 다양한 통신 서비스와 응용에 사용될 수 있을 것이라 예상된다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 아직 많은 기술적 난제가 산적하여 단말기에서의 효율적인 구현 기술과, 단일망 혹은 이중망 내의 신호 간섭문제 및 최적화된 전력제어 문제등 아직 해결해야 할 다양한 문제를 안고 있다^[1,2].

본 고에서는 서론에 이어 II장에서는 D2D 통신관련 기술동향에 대해 소개하고, III장에서는 D2D 통신시스템의 자원 할당 기법 측면에서의 전력 조절 기술에 대해 살펴보도록 한다.

IV장에서는 전력 조절 기술에 최적화 기법을 사용한 경우 D2D 통



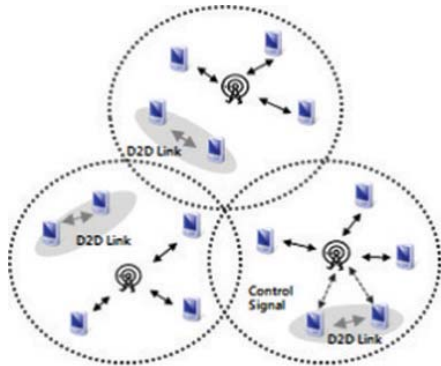
김 선 호
승실대학교



박 태 형
승실대학교



임 성 빈
승실대학교



〈그림 1〉 D2D 네트워크 기본 개념

신시스템의 성능 향상에 대해 논하며, V장에서 결론을 맺는다.

II. 기기간 직접 통신 기술

1. LTE-A 기반 D2D 통신

LTE-Advanced 망을 기반으로 하는 D2D 통신의 경우 동일한 셀 영역, 혹은 인접 셀 영역 내의 단말 간 D2D 링크를 설정한 뒤 기존 무선 네트워크의 기지국을 거치지 않고 데이터를 직접 전달하는 통신 방식으로 Nokia사에 의해 제안된 방식이다^[3]. 그러나 단말 간 통신을 위해서는 LTE-Advanced 망 자원을 사용하며, 기지국은 단말 간 설정된 D2D 통신 링크의 자원 및 전송 상태를 결정하고 관리한다. 이를 위해 단말과 기지국간에는 제어 링크가 형성되어야 하며, 이를 위해서 기존 LTE-Advanced에서 사용하는 세션 초기화 규약 (session initiation protocol : SIP)의 설정 과정에서 기존의 셀룰러 망과 D2D 통신의 세션을 분리하기 위해 새롭게 구성된 SIP를 이용한다. 기지국에서는 전송된 제어신호를 이용하여 D2D 통신 링크의 상태를 분석하고 제어한다.

이는 전통적인 중앙 집중식의 모바일 네트워크의 구성과도 일치하며 면허 대역과 이동 통신사의 관리 아래 있는 주파수 밴드를 사용하므로 편리한 유지 보수가 가능하나 망의 기존 사용자와 동일한 주파수 대역을 사용하는 D2D 사용자간의 신호 간섭을 해결하는 것이 가장 큰 이슈로 떠오르고 있다.

2. FlashLinQ

FlashLinQ는 2011년 MWC에서 공개된 Qualcomm사의 D2D 솔루션으로 이동통신사에 할당된 면허 주파수 대역에서 사용 가능한 기술이다^[4]. FlashLinQ는 동기식 TDD OFDMA 시스템을 기반으로 하여, 전용의 주파수 대역을 이용하여 별도의 네트워크 장비 없이 최대 1Km 반경내에 있는 단말을 자동으로 인식하고 통신을 할 수 있다. 즉 분산 스케줄링 구조를 채택하고, 기존의 이동통신망의 MAC/PHY 구조와는 별개로 새로운 형식의 MAC/PHY 구조를 채택하였다. 가장 큰 특징으로는 최대 반경 내에서는 수천 개 이상의 단말을 동시에 인식하는 것이 가능하고, 현재 국내에서는 SKT와 공동으로 상용화 실험을 진행한 바 있다.

III. 기기간 직접 통신 전력 조절 기법

D2D 통신은 하나의 무선 통신 시스템의 단일 기지국 커버리지 내에 존재하는 underlay 형태의 통신 링크로 기존 통신 시스템의 단말과 동일한 주파수 자원을 사용하므로, 자원 할당 기법 및 전력 조절 기법을 사용하여 통신 용량을 증대시키고 효율적인 망 관리 및 간섭을 최소화 하는 것이 매우 중요한 이슈로 떠오르고 있다.

일반적으로 송신 단말에서 사용하는 전송 전력을 증가시킬수록 수신 단말에서의 SINR이 함께 커져서 통신 링크에서 고차 변복조 기법을 사용함으로써 비트 오류율 (bits error rate : BER) 측면에서 높은 이득을 얻을 수 있다. 그러나 단일 기지국의 셀 커버리지 내에서 기존의 통신 단말과 동일한 주파수 자원을 사용하는 D2D 단말이 존재하는 경우 상호간 간섭에 의한 악영향이 증가하므로 반드시 최대한의 전송 전력을 사용하는 것이 전체 시스템의 성능을 최대화 시킨다는 명제와 일치하지 않는다. 이러한 관점에서 간섭 환경에 대한 영향을 최소화하고 통신망의 성능을 최대화시키기 위해서 전송 전력 제어 (power control) 기법을 사용하는 것이 필수 불가결한 문제이며 그에 걸맞게 다양한 측면에서 연구가 이루어지고 있다. 본 장에서는 전력 제어 기법에 대한 최근의 연구 동향을 소개하고자 한다.

셀룰러 네트워크와 결합되어 있는 D2D 통신의 특성을 감안할 때 통신망에서 주사용 링크 (BS-UE, UE-UE)의 설정을 선택하여 통신 자원의 분배 및 효율적인 전력 제어를 위한 모드 선택 기법은 개별 링크의 이득이나 잡음 레벨, SINR등을 고려할 때 가장 손쉽게 접근할 수 있는 방안이다^[5]. 모드 선택 기법을 사용하기 위해 가장 먼저 고려해야 할 점은 다음과 같다^[6].

- 1) 기기간 통신의 발생 및 수행 확률
- 2) 기기간 전송 채널의 환경과 기지국을 통한 링크의 채널 환경 비교
- 3) 대역 내 셀룰러 통신 이용자에 의한 간섭의 크기

[6]의 연구에서는 Yates 등에 의한 연구^[7] 바탕으로 통신 모드 선택에 따른 통신 시스템의 성능을 분석하기 위한 시스템 방정식을 세우고, 분석된 결과를 활용하여 셀룰러 네트워크와 D2D 통신 모드의 장치간 자원의 공유와 전력 할당 문제를 공동 (jointly) 분배 및 최적화 분배 관점에서 제안하였다. 기기간 통신의 사용량에 따라 네트워크의 성능이 크게 영향을 받는다는 전제에 따라 이러한 모드 선택 기법의 사용을 통한 전력 제어는 네트워크의 설계 관점에서 전체 시스템의 성능을 악화시키는 것을 방지하는 역할을 담당한다.

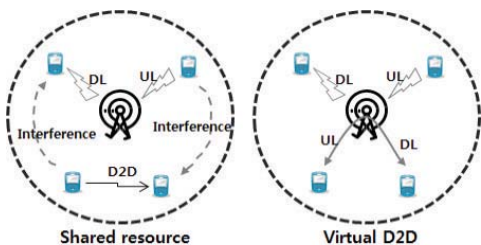
Janis 와 Doppler의 연구^[8]는 셀룰러 통신 링크로부터의 간섭이 허용 수준에서 유지되는 동안 D2D 통신 링크에 하위 밴드 (subband)를 할당하고 전송 링크의 SINR을 최대화 할 수 있게 D2D 송신 전력을 제어하는 것이다. 기존 셀룰러 네트워크에서 기인하는 간섭을 최소화하기 위해서 멀티유저 다이버시티 기법을 이용한

다. <그림 2>는 [8]의 D2D 통신 모드 선택에 따른 셀룰러 네트워크 간섭 모델이다.

또한 성능 향상 측면에 비중을 둔 모드 선택 기법으로는 선탐색 기반의 모드 선택 및 전력 할당 방법이 제안된 바 있다^[9]. [9]의 연구에서는 선택 가능한 모드에 대해서 네트워크 내의 모든 장치간의 링크 가능성 조합을 탐색한다. 제안하는 알고리즘은 크게 두 가지의 단계로 구성되며, 첫 단계에서는 시스템에서 형성될 수 있는 각각의 통신 링크에서 최대화된 전력 효율 (power efficiency)을 얻을 수 있는 최적의 전송 전력값을 계산한다. 두 번째 단계에서는 첫 단계를 통해 얻은 전력 효율에 관한 결과를 바탕으로 하여 최적화된 전송 전력 할당을 수행한다. 실제 전력 효율에 관한 계산과 전력 할당은 준최적 (sub-optimal) 성능을 보인다.

또한 Ericsson의 Fodor와 Reider에 의해 셀룰러 네트워크와 결합된 D2D 통신 환경에서 통신 링크의 SINR 값을 반복 연산과정을 통해 개별적으로 설정하는 분산 전력 제어 기법이 제안된 바 있다^[10]. 구체적으로 전체 전력 소모를 최소화 하는 방향으로 각 단말 별 전송 전력을 분배한다. 송신 전력의 분배는 각 D2D 링크가 SINR 정보를 수신단에서 송신단으로 피드백하며 이루어지고, ALPF (Augmented Lagrangian Penalty Function)를 사용한 최적화 기법을 이용하여 시스템 전체 전력 소모를 최소화 한다. 제안된 알고리즘은 SIMO (Single Input Multiple Output), MIMO (Multiple Input Multiple Output)환경에서 일관성 있게 준최적 (near-optimum) 성능을 보여준다.

또 다른 분산 전력 제어 기법으로 Belleschi와 Fodor의 연구^[11]를 소개한다. [11]의 연구에서는 먼저 기존의 중앙 집중적인 (centralized) 네트워크 환경을 기반으로 통신 모드 선택, 사용자 스케줄링, 전력 제어 작업에 대한 MILP (Mixed Integer Linear Programming) NP-hard 최적화 문제 (optimization problem)를 설정하고 해를 제시하였다. 또한 이를 각각의 D2D 통신 링크에 효율적으로 적용하기 위해서 S-MSRAP (Single cell Mode Selection and Resource Allocation Problem) 알고리즘을 통해 앞서



<그림 2> D2D 통신 모드에 따른 간섭 모델

설정된 문제를 간략화 시킨 또 다른 LP 최적화 문제를 설정하고 이를 해결하여 통신 자원 분배 효율성과 사용자 공정성에 측면에 맞추어 최적화된 방안을 제안하였다.

다음 소개하는 기법은 셀룰러 네트워크와 D2D 통신이 자원을 공유하는 경우 효율적인 전력 분배에 관한 연구이다^[12]. 기존의 단일 네트워크 내에서 자원을 공유하는 환경에서 전력 제어에 관한 연구는 활발하게 진행되어 왔다^[13,14]. 소개하는 연구에서는 [13],[14]의 연구를 확장하여 먼저 셀룰러 네트워크의 통신 링크와 D2D 통신 링크 간 우선권이 없는 경우와, 셀룰러 네트워크가 우선권을 가지는 경우를 각각 상정하여 전력 제어를 수행한다. 첫 번째 환경의 경우 망 전체의 최대 전송 전력을 만족하는 링크 간 개별적인 전송 전력의 합을 최대화하는 기법이고, 두 번째 환경의 경우 우선권을 갖는 통신 링크의 최저 전송률을 보장하는 한도 내에서 개별 링크의 전송 전력의 합을 최대화 하는 전력 제어를 수행하게 된다. 특히 두 번째 방법에 대해서는 개별 링크의 전송 전력의 상한 값(upper bound limit)을 함께 두어 전력 효율을 높이고자 한다.

합리적으로 자원의 스케줄링과 모드의 선택이 가능하다고 간주된 상황에서 페루프 전력 제어 기술은 D2D 통신 링크의 성능을 향상시키는데 매우 도움이 된다^[15]. 다음에 소개하는 기술은 OFPC (Open loop Fractional Power Control) 환경에 기반한 페루프 전력 제어 기법에 관한 연구이다. 부분 개루프 방식의 전력 제어에 조정 단계 (tuning step)를 두어 목표 SINR 값과, 측정되어 피드백 된 SINR 값 사이의 간격에 따라 조정 단계를 조절하여 전력 제어를 수행하며, 이 경우 외부 간섭에 안정적인 환경이 조성된다는 전제 아래 제안 기법은 높은 정확성을 가지면서 빠르게 수렴할 수 있다. [15]의 연구에서는 아래에 제시하는 네 가지 방법의 전력 제어 기법에 대해 단말간의 거리와 간섭에 따른 성능을 비교하였다.

1) 개별 D2D 단말이 동일하게 고정된 전송 전력을 사용

2) 개별 D2D 단말이 고정된 SNR 목표값을 사용

3) 개별 D2D 단말이 OFPC 사용

4) 개별 D2D 단말이 OFPC 기반 환경에서 페루프 전력 제어 사용

IV. 기기간 통신의 전력 최적화 기법

앞서 III장에서는 기기간 통신에서 사용하는 전력조절 기법의 연구 동향을 살펴보았다. IV장에서는 최적화 문제 관점에서 기기간 통신에서의 전력조절 기법의 사용을 소개하도록 한다.

일반적으로 셀룰러 링크와 동일한 시간-주파수 대역에서 D2D 통신을 허용하는 것은 두 통신간의 높은 간섭으로 인하여 어려움을 초래한다. 하향 링크 (downlink :DL)인 경우, 기지국 (basestation :BS)의 높은 전송전력은 D2D 단말기에 높은 간섭을 발생시킨다. 또한 D2D 송신기가 셀룰러 단말기에 근접해 있을 수 있으므로, 심각한 near-far 문제를 야기할 수 있다. 이 경우, D2D 송신의 허용전력은 낮은 범위로 제한되어야 하며, 이렇게 D2D 허용전력이 제한됨에 따라 D2D 링크 범위를 아주 근접한 범위로 제한하여야 한다.

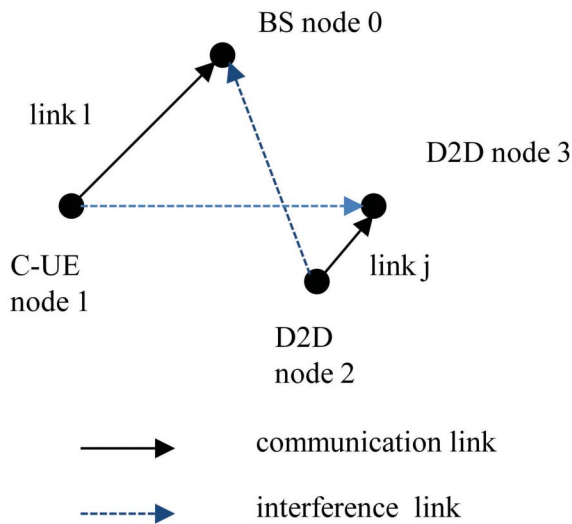
LTE 시스템의 전송대역은 동일한 길이의 resource block (RB)로 나누어지며, 각 RB는 time domain의 0.5 ms slot과 15 KHz 12개로 구성된 180 KHz subcarrier 로 구성된다. 셀룰러 사용자와 D2D 사용자가 LTE 시스템의 자원을 분할하여 사용하는 경우, 두 사용자간 간섭은 발생하지 않으며, 이 경우 sum rate는 최대 전송전력을 사용하는 경우에 도달할 수 있다. D2D 사용자와 셀룰러 사용자간 간섭이 없는 경우의 RB 할당문제를 직교 (orthogonal) RB 할당문제로 부른다. 이 문제의 경우, D2D 와 셀룰러 간 RB 분할 비율의 결정 및 D2D 통신 중 상향 링크 (uplink :UL) 와 하향 링크 RB의 분할 비율의 결정이 필요하다.

D2D 자원배분 및 전력제어문제는 D2D 통신과 셀룰러 통신이 공유하는 기지국의 RB 종류에 따라 다음과 같이 구분된다.



1. 비직교 모드 (non-orthogonal mode) : 이 경우 셀룰러 링크와 같이 모든 자원을 고려한다. 제약 식으로는 셀룰러 링크와 D2D 링크간의 간섭이 발생하는 경우, 셀룰러 통신 링크의 SINR의 하한 조건 (lower bound), D2D 통신 링크 SINR의 상한조건 (upper bound)이 포함된다. 이 경우 목적 함수는 sum rate 용량을 극대화하는 형태로 주어진다.
2. 직교 모드 (orthogonal mode) : 이 경우, D2D 통신 링크와 셀룰러 통신 링크 사이의 간섭은 발생하지 않는다고 가정하고, D2D 통신 링크의 초기화 과정에서 사용할 RB의 범위를 결정한다.
3. 셀룰러 모드 (cellular mode) : D2D 통신이 기지국에 의해 릴레이 (relay) 되는 형태로 두 링크간의 간섭은 고려되지 않는다.

비직교 (non-orthogonal) 환경에서 D2D 통신 링크와 셀룰러 링크가 자원을 공유하는 경우, D2D 통신 링크에서 발생하는 간섭은 셀룰러 네트워크의 최소 보장 성능 (target performance level)이 보호되는 범위로 제한되어야 한다. D2D 단말간의 거리가 먼 경우, D2D 링크의 전력이 커지므로 셀룰러 통신 링크에 간섭이 발생할 수 있다. 하향 링크 단계에서 셀룰러 단말은 D2D



〈그림 3〉 up링크 셀룰러 링크와 D2D 링크

송신기가 동일한 서브밴드를 사용할 경우 간섭을 받을 수 있으며, 또한 D2D 수신기는 기지국 송신단 (BS transmitter)의 간섭을 받을 수 있다. 따라서 간섭의 정도는 D2D 통신링크의 송신 전력 뿐 아니라 D2D 송신기와 셀룰러 단말간의 거리에 의해 결정된다.

비직교 환경 하에서 셀룰러 사용자와 D2D 단말기가 동일한 주파수 대역을 공유하는 경우, 전력제어를 다음과 같은 간단한 예를 통하여 예시한다. 기지국노드 0, 셀룰러 사용자 (c-UE) 노드 1, D2D 단말기 노드 2, 3으로 구성되고, 노드 1과 노드 2가 통신을 수행 할 때의 간섭 환경을 〈그림 3〉에 나타내었다. $l = (1, 0)$, $j = (2, 3)$ 는 송수신 링크를 표시한다.

링크 l 의 송신기로 부터 링크 j 의 수신기까지의 경로 이득 (path gain)을 G_{lj} , 링크 l 의 송신기의 전송전력을 P_l , σ_j 은 잡음전력 (noise power)로 표시한다.

기지국 노드 0에서의 수신 SINR 은 D2D 노드 2의 전송전력으로 부터 발생하는 간섭을 잡음으로 간주하여 다음과 같은 SINR 식을 얻을 수 있다.

$$\Gamma_c(P_l, P_j) \equiv \frac{G_{0l}P_l}{G_{0j}P_j + \sigma_0} \geq \gamma_c \quad (1)$$

상기의 수식에서 γ_c 는 셀룰러 네트워크의 통신을 보장하기 위한 목표 SINR 값이다. 따라서 위 부등식을 만족하기 위해서는 D2D 단말기의 전력 P_j 를 제한해야 한다. 또한 D2D 통신이 가능하려면, 마찬가지로 다음 식이 성립한다.

$$\Gamma_d(P_l, P_j) \equiv \frac{G_{2j}P_j}{G_{2l}P_l + \sigma_2} \geq \gamma_d \quad (2)$$

여기에서 γ_d 는 D2D 통신이 가능한 최소 SNR을 표시한다. 위 두 식으로부터, D2D 통신이 셀룰러 통신 네트워크에 underlay 형태로 공존하기 위해서는 셀룰러 노드 및 D2D 송신 노드의 전송전력에 대한 제어가 필요함을 알 수 있다. 예를 들어, 전송전력 P_l, P_j 가 공통으로

$$0 \leq P_l, P_j \leq P_{\max} \quad (3)$$

일 때, 두 노드의 전송량의 합(sum rate)은 다음과 같은 quasi-convex 함수로 표현된다.

$$\log_2(1 + \Gamma_c(P_l, P_j)) + \log_2(1 + \Gamma_d(P_l, P_j)) \quad (4)$$

이러한 경우, sum rate 최대화 문제는 전송전력에 대한 선형부등식 제약식을 갖는 quasi-convex 최대화 문제가 되고, 최적해는 제약조건식의 extreme point에서 발생한다^[14,17].

[11]에서는 동일 및 인접한 다수의 셀에서의 D2D 통신모드 및 전력결정을 동시에 수행하는 혼합정수계획법 모형을 개발하였다. 아래에서는 모드선택과 동시에 총전력 최소화 및 총전송량 (throughput) 최대화를 수행하는 모형이 혼합정수 선형계획법 (mixed integer linear programming problem: MILP) 모형 및 혼합정수 비선형모형 (mixed integer nonlinear programming problem: MINLP)으로 형성됨을 소개한다.

셀룰러 사용자와 기지국간 형성되는 링크들의 집합을 L_1 , D2D 링크들의 집합을 L_2 , RB의 집합은 F , 링크 l 이 접근 가능한 기지국의 집합을 $n(l)$ 로 각각 표시한다. 각각의 RB는 대역 B 를 갖고, 각각의 통신링크 l 은 최소 1개의 RB 및 기지국 $k \in n(l)$ 에 할당된다고 가정한다. 셀룰러 사용자의 경우, 기지국과의 통신은 셀룰러 모드($q=0$)이지만, D2D 사용자의 경우는 D2D 단말기와 직접 통신을 모드 $q=1$ 로 표시하고, 기지국을 릴레이 노드로 이용하는 통신모드를 $q=0$ 으로 표시한다. 0-1 변수 $x_{lfq} = 1$ 은 링크 l 이 RB f 에 할당되고, 모드 q 로 통신함을 나타낸다. 연속변수 $P_{lfq} \geq 0$ 는 $x_{lfq} = 1$ 일 때, 링크 l 의 전송전력을 표시한다.

위 기호를 사용하여 링크 l 이 RB f 를 사용할 때의 수신 SINR은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{lf}(P_f) = \frac{G_{lff}P_{lf}}{\sum_{j \neq l} G_{jlf}P_{jf} + \sigma_l} \quad (5)$$

여기에서 $P_f = (P_{1f}, \dots, P_{lf})$ 는 전송전력벡터를 나타낸다. 링크 l 이 RB f 에 할당되어 모드 q 로 전송할 때의 SINR 이 SINR 목표치 γ_{lf}^* 의 하한을 갖는 제약식을 0-1

변수 x_{lfq} 와 상수 K 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{lff}P_{lfq} - \gamma_{lf} \sum_{j \neq l, p} G_{lfp}^j P_{jfp} \\ \geq \gamma_{lf} \sigma_l (1 - K(1 - x_{lfq})) \quad \forall l, f, q \end{aligned} \quad (6)$$

위 제약조건은 $x_{lfq} = 0$ 인 경우, $K \gg 0$ 이므로 자동적으로 만족되고, $x_{lfq} = 1$ 인 경우에만 유효하다. 또한 $x_{lfq} = 0$ 인 경우, 전력 $P_{lfq} = 0$ 이 됨을 다음 조건으로 나타낸다.

$$P_{lfq} \leq Kx_{lfq} \quad \forall l, f, q \quad (7)$$

모든 사용자가 1개의 BS에 할당되어야 함으로 다음 식이 성립한다.

$$\sum_{k \in n(l)} x_{kfq} \leq 1, \quad \forall l, f \quad (8)$$

셀룰러 사용자의 경우는 셀룰러 모드로 통신하고, D2D 사용자가 셀룰러 모드 혹은 D2D 모드로 통신 링크를 선택하여 통신을 수행하는 것을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_q x_{lfq} \leq 1 \quad \forall l, f \quad (9)$$

$$x_{lf,1} = 0 \quad \forall l \in L_{1,f} \quad (10)$$

이러한 제약식은 전송전력벡터 $P = (P_1, \dots, P_F)$ 와 0-1 변수 $x = (x_{lfq})$ 의 선형부등식 제약식을 나타낸다. 목적함수가 총전송전력 최소화인 경우, 목적식은 다음과 같은 선형식으로 나타낼 수 있다.

$$\sum_{lfq} P_{lfq} \quad (11)$$

따라서 사용자별 기지국 및 RB 배분 및 총전송전력 최소화 문제는 식 (6)-(10)을 제약식으로, 목적함수 (11)로 구성된 MILP로 나타낼 수 있다.

목적함수로 전송량이나 효용함수(utility function)를 0-1 정수변수와 전송전력벡터 P 의 non-convex 목적함수로 나타낸 MINLP 모형은 [9]와 [16]의 연구에서 소개되었다. [9]의 경우, D2D 통신이 WCDMA의 상향링크의 주파수 대역대를 시분할 다중 (time division duplexing: TDD) 모드로 공유하는 시스템에서의 전송

전력 제약식을 갖는 (log,log)-concave 효용함수의 극대화 문제를 고려하였다. [16]에서는 D2D 통신의 모드 선택 문제 중, 각 RB가 D2D 통신 혹은 셀룰러 통신 중 한가지에만 할당되는 경우, SINR 제약식과 할당 제약식을 갖는 MINLP 문제를 소개하였다.

MINLP 모형을 풀기위한 범용소프트웨어 BONMIN (Basic Open-source Nonlinear Mixed Integer Programming)과 일반적인 MINLP 모형에 대한 알고리즘은 [17, 18, 19]에 소개되었다.

V. 결론 및 향후 연구

본 고에서는 향후 넓은 영역에서 사용이 예측되는 대표적인 기기간 통신 기술인 LTE-A 기반의 기기간 통신기술과 FlashLinQ에 대해 소개하고 기기간 통신에서 사용하는 전력 제어기법에 관한 최근의 연구 동향을 다루었다.

또한 최적화 문제 관점에서의 접근을 통해 D2D 자원배분 및 전력제어 문제 중, 셀룰러 통신 및 D2D 통신의 sum rate 문제를 일반적으로 전력에 대한 선형부등식 제약식을 갖는 quasi-convex 함수 극대화문제로 표현됨을 간단한 예제를 통하여 예시하였으며, 다수의 셀에서의 기지국과 자원의 할당 및 사용자 전력제어 문제는 혼합정수계획법 모형으로 형성할 수 있음을 소개하였다. 이 경우 제약식은 SINR 제약식과 자원 및 기지국에 대한 할당제약식으로 구성되고, 목적함수는 총 전송전력 최소화 형태로 구성된다. 전송량 최대화 및 전력의 비선형 효용함수의 극대화 문제의 경우, 정수변수 및 연속변수로 구성된 SINR 및 자원할당 제약식을 갖는 MINLP 모형으로 형성할 수 있다.

본고에서 소개한 혼합정수계획법 모형 및 MINLP 모형의 경우, 다양한 가정을 통한 모델링 중심의 연구에서 벗어나 실제 데이터를 이용한 최대 전송량 및 최소 전력에 대한 모의실험을 향후에 실시하고 그 적합성을 검증할 필요가 있을 것이다.

VI. 감사의 글

이 논문은 2012년도 국방과학연구소(Agency for Defense Development)의 지원으로 수행되었음 (UD100069ED)

참고 문헌

- [1] G. Fodor, E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, N. Reider, Miklo, et al., "Design aspects of network assisted device-to-device communications," *Communications Magazine, IEEE*, Vol. 50, pp. 170-177, 2012.
- [2] K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. Ribeiro, and K. Hugl, "Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks," *Communications Magazine, IEEE*, Vol. 47, pp. 42-49, 2009.
- [3] L. Lei, Z. Zhangdui, L. Chuang, and S. Xuemin, "Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks," *Wireless Communications, IEEE*, Vol. 19, pp. 96-104, 2012.
- [4] W. Xinzhou, S. Tavildar, S. Shakkottai, T. Richardson, L. Junyi, R. Laroia, et al., "FlashLinQ: A synchronous distributed scheduler for peer-to-peer ad hoc networks," in *Communication, Control, and Computing (Allerton), 48th Annual Allerton Conference on*, 2010, pp. 514-521.
- [5] K. Doppler, C.-H. Yu, C. B. Ribeiro, and P. Janis, "Mode Selection for Device-To-Device Communication Underlying an LTE-Advanced Network," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), IEEE*, 2010, pp. 1-6.
- [6] S. Hakola, C. Tao, Lehtoma, x, J. ki, and T. Koskela, "Device-To-Device(D2D) Communication in Cellular Network - Performance Analysis of Optimum and Practical Communication Mode Selection," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), IEEE*, 2010, pp. 1-6.



- [7] R. D. Yates and H. Ching-Yao, "Integrated power control and base station assignment," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, Vol. 44, pp. 638-644, 1995.
- [8] P. Janis, V. Koivunen, C. Ribeiro, J. Korhonen, K. Doppler, and K. Hugl, "Interference-Aware Resource Allocation for Device-to-Device Radio Underlying Cellular Networks," in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE 69th*, 2009, pp. 1-5.
- [9] M. Jung, K. Hwang, and S. Choi, "Joint Mode Selection and Power Allocation Scheme for Power-Efficient Device-to-Device (D2D) Communication," in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE 75th*, 2012, pp. 1-5.
- [10] G. Fodor and N. Reider, "A Distributed Power Control Scheme for Cellular Network Assisted D2D Communications," in *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), IEEE*, 2011, pp. 1-6.
- [11] M. Belleschi, G. Fodor, and A. Abrardo, "Performance analysis of a distributed resource allocation scheme for D2D communications," in *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), IEEE*, 2011, pp. 358-362
- [12] Y. Chia-Hao, O. Tirkkonen, K. Doppler, and C. Ribeiro, "Power Optimization of Device-to-Device Communication Underlying Cellular Communication," in *Communications, ICC '09. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 1-5.
- [13] A. Gjendemsjo, D. Gesbert, G. E. Oien, and S. G. Kiani, "Optimal Power Allocation and Scheduling for Two-Cell Capacity Maximization," in *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, 2006 4th International Symposium on*, 2006, pp. 1-6.
- [14] V. Chandrasekhar and S. Zuckang, "Optimal Uplink Power Control in Two-Cell Systems with Rise-over-Thermal Constraints," *Communications Letters, IEEE*, Vol. 12, pp. 173-175, 2008.
- [15] X. Hongnian and S. Hakola, "The investigation of power control schemes for a device-to-device communication integrated into OFDMA Cellular system," in *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), IEEE 21st International Symposium on*, 2010, pp. 1775-1780.
- [16] M. Zulhasnine, C. Huang, and A. Srinivasan, "Efficient resource allocation for device-to-device communication underlying LTE network," in *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob) IEEE*, 2010, pp.368-375.
- [17] R. Horst and H. Tuy. *Global optimization: Deterministic approaches*. Springer, 2003.
- [18] P. Bonami et al. "An algorithmic framework for convex mixed integer nonlinear programs." *Discrete Optimization*, Vol. 5, pp. 186-204, 2008.
- [19] C. Floudas, *Nonlinear and mixed-integer optimization: fundamentals and applications*. Oxford University Press, USA, 1995.



김선호

2007년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
2009년 2월 숭실대학교 정보통신공학과 석사
2009년 3월~현재 숭실대학교 정보통신학과 박사과정

〈관심분야〉

LTE 시스템, D2D 통신, 통신 신호처리, 필터 이론



박 태 형

1986년 2월 고려대학교 산업공학과 학사.
1989년 2월 고려대학교 산업공학과 석사.
1998년 6월 Virginia Tech 산업공학과 박사.
2001년 9월~현재 송실대학교 산업정보시스템공학과
부교수

〈관심분야〉
통신 네트워크, 정수계획법, 비선형계획법



임 성 빈

1986년 2월 서울대학교 전자공학과 학사.
1988년 2월 서울대학교 전자공학과 석사.
1994년 12월 University of Texas at Austin 전기
및 컴퓨터공학부 박사
1995년 9월~현재 송실대학교 정보통신전자공학부
교수

〈관심분야〉
LTE-advance, D2D 통신, 통신 신호처리, 레이더
시스템