

셀룰러 네트워크에서의 대규모 D2D 통신의 실현 가능성 연구

황 영 주*, 성 기 원*, 김 성 룬°

Feasibility of Massive Device-to-Device Communications in Cellular Networks

YoungJu Hwang*, Ki Won Sung*, Seong-Lyun Kim°

요 약

Device-to-device (D2D) 통신은 짧은 전송 거리를 적은 전송 전력으로 인프라를 거치지 않고 직접 통신하여 근거리 서비스를 제공할 수 있는 통신 방법으로 기대되고 있다. 이러한 장점들로 인해, 대규모 D2D 시스템에 대한 수요가 존재할 것이다. D2D 통신 자원이 셀룰러 망에 의해 관리되는 네트워크 지원형 D2D 시스템은 제어 신호를 위한 시그널링 오버헤드 때문에 많은 수의 D2D 기기들을 지원하는 것이 불가능하다. 이런 경우에는 오히려 네트워크 조정을 전혀 하지 않는 것이 하나의 해결책이 될 수 있다. 본 논문에서는 이러한 uncoordinated D2D 시스템을 고려하는데, 이는 많은 수의 D2D 기기들이 대규모로 배치되어 네트워크 조정 없이 동작하는 D2D 시스템을 의미한다. D2D 시스템의 전송 용량을 분석하여, uncoordinated D2D 시스템이 셀룰러 네트워크 내에서 상향링크 스펙트럼을 공유하면서 공존할 수 있는 타당성 조건을 도출한다. 또한, 이러한 D2D 시스템의 적절한 전송 전력 수준 및 링크 거리에 관한 연구 결과를 제시함으로써, 대규모 D2D 통신의 운용점에 관한 가이드라인을 제공한다.

Key Words : device-to-device, spectrum sharing, underlay, capacity, feasibility

ABSTRACT

Device-to-device (D2D) communication is expected to offer local area services with low transmit power and short link distance, even not via any infrastructures. These advantages will lead to the deployment of D2D systems in a massive scale, where the order of magnitude of D2D user density is higher than that of cellular user density. Network-assisted D2D systems, where D2D resources are managed by cellular networks, are unable to support the large number of D2D devices, due to the signaling overhead for control signals. In this case, no coordination can be an answer. This paper considers uncoordinated D2D systems, which is implemented with a number of D2D devices in a large scale. By analyzing the transmission capacity of D2D systems, we found a feasibility condition under which the uncoordinated D2D communications possibly coexist within cellular networks, sharing the uplink spectrum. In addition, we provide guidelines for the operational points of massive D2D communications, giving some knowledge about proper transmit power level and link distance of uncoordinated D2D.

※ 본 연구는 방송통신위원회의 방송통신인프라원천기술개발사업의 연구결과로 수행되었음 (KCA-2012-12-911-01-107)

♦ 주저자 : 연세대학교 전기전자공학부 무선자원최적화 연구실, yjhwang@ramo.yonsei.ac.kr, 정회원

° 교신저자 : 연세대학교 전기전자공학부 무선자원최적화 연구실, slkim@yonsei.ac.kr, 종신회원

* KTH Royal Institute of Technology, Sweden, sungkw@kth.se

논문번호 : KICS2012-11-525, 접수일자 : 2012년 11월 9일, 최종논문접수일자 : 2012년 12월 4일

I. 서 론

최근 스마트폰과 태블릿 PC 등 다양한 종류의 모바일 기기들이 보급됨에 따라 무선 데이터 트래픽이 폭발적으로 증가하고 있다. 이처럼 증가하는 모바일 트래픽에 대한 요구는 무선 셀룰러 네트워크에 과부하를 주게 되는데, 최종 사용자 기기들이 어떠한 인프라도 거치지 않고 서로 직접적으로 통신하는 device-to-device (D2D) 통신이 하나의 유망한 해결책으로 여겨지고 있다¹⁻³. 기기간의 직접 통신을 통해, 모든 모바일 트래픽을 처리해야 하는 셀룰러 기지국의 부담을 경감시킬 수 있으며 기기의 홉 지연 (hop delay) 역시 감소시킬 수 있다. D2D 통신에서 소스 기기들은 근거리에 위치한 목적 기기들을 발견하고 그들에게 전송한다. 이 때 기기의 전송 전력은 절약될 수 있으며 그 결과 하나의 셀에서 다수의 D2D 링크들이 동시에 활성화되어 전송할 수 있게 된다. 이것은 무선 셀룰러 네트워크에서의 주파수 재 사용률을 높여 셀 전체 용량 (overall cell capacity)을 증가시킬 수 있다. 또한, 한 D2D 링크에서의 데이터 윌 (data rate) 역시 짧은 전송 거리로 인해 증가될 수 있다⁴.

이러한 장점들로 인해, 셀룰러 망에서 동작하는 많은 수의 D2D 기기들이 존재할 수 있다. 그러나 그들을 지원하는데 있어, 모든 D2D 전송 링크들이 중앙 집중화된 제어 기법을 통해 기지국에 의해 관리되는 네트워크 지원형 (network-controlled) D2D 시스템⁵⁻⁷은 적합하지 않을 수 있다. 이러한 종류의 D2D 시스템에서는 시스템의 복잡도가 D2D 기기의 수에 따라 급격히 증가하게 되므로, 굉장히 많은 수의 D2D 기기들이 존재할 때에 제어 정보를 얻기 위한 시그널링 오버헤드는 엄청난 수준이 된다. 그러면 D2D 통신으로부터의 이점은 아무 것도 얻지 못한 채 셀룰러 시스템과 D2D 기기들 모두 그 성능이 대폭 저하된다.

본 논문에서는, 대규모 uncoordinated D2D 시스템이 어떠한 조건 하에서 타당성을 갖고 동작할 수 있는지를 알아본다. 이를 위해, D2D 기기들이 셀룰러 네트워크의 상향링크 스펙트럼을 underlay 방식으로 공유하는 D2D 시스템을 고려한다. 그리고 확률 기하 이론 (stochastic geometry)을 바탕으로, 셀룰러와 D2D의 불능 확률 (outage probability)을 제약조건으로 하여 D2D 시스템의 전송 용량 (transmission capacity)을 분석한다. D2D 시스템의 가장 큰 특징 중 하나는 근거리 기반의 기기 간 통

신으로, D2D 링크 거리가 D2D 전송 전력과 더불어 중요한 시스템 파라미터가 된다. 따라서 D2D 시스템의 전체적인 성능을 D2D 링크 거리에 따라 분석하여 보이고, 또한 셀룰러 상향링크 전송 거리에 대비한 D2D 링크 거리와 셀룰러 전송전력에 대비한 D2D 전송 전력 간의 관계를 보임으로써, uncoordinated D2D 시스템의 최적 운용점을 구하고 D2D 기기들의 전송 전력 및 링크 거리 관점에서 feasibility condition을 도출한다. 이 때, 셀룰러 기지국들은 네트워크 내에 랜덤하게 분포하는 것으로 가정한다. 기존 연구들에서 기지국의 위치는 이상적으로 배치된 deterministic hexagonal grid 형태로 대개 가정되어 왔으나, 이러한 grid model은 네트워크 상황에 맞게 필요에 의해 배치되어 가면서 매우 다양한 셀 크기를 보이게 된 오늘날의 셀룰러 기지국 분포를 반영하기 어렵다⁸⁻⁹. 따라서 랜덤한 특성을 갖는 네트워크 토폴로지를 반영하기 위해 (Poisson) point process를 바탕으로 셀룰러 기지국의 분포를 모델링 하는 방법이 최근 연구들에서 고려되어 왔으며¹⁰⁻¹², 본 논문 역시 그러한 접근법을 취하고자 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 네트워크 모델에 대해 설명하고 D2D 전송 용량 최적화 문제를 정의한다. III 장에서는 uncoordinated D2D 시스템의 성능을 분석하고 주어진 D2D 링크 거리에 대해 최적 전송 전력을 유도한다. 이후 IV 장에서는 대규모 D2D 통신이 네트워크 조정 없이 어떻게 동작하는지 수학적 예제와 모의실험을 통해 보이고, uncoordinated D2D 시스템이 타당성을 갖고 동작할 수 있는 조건을 도출해낸다. 마지막으로 V 장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

2.1. 네트워크 모델

Primary 셀룰러 네트워크가 주변의 다수 D2D 기기들과 상향링크 주파수를 공유하는, underlay 방식의 스펙트럼 공유 (spectrum sharing) 네트워크를 고려하자. 이 네트워크에서, 셀룰러 기지국 (base station, BS)들은 λ_{BS} 의 밀도를 갖는 homogeneous Poisson point process (PPP) Φ_{BS} 에 따라 분포한다. 각 이동국 (mobile station, MS)은 가장 가까운 BS와 통신하며 셀 경계는 Voronoi tessellation¹³을 이루게 된다. MS들은 그들의 상향링크 전송을 위해

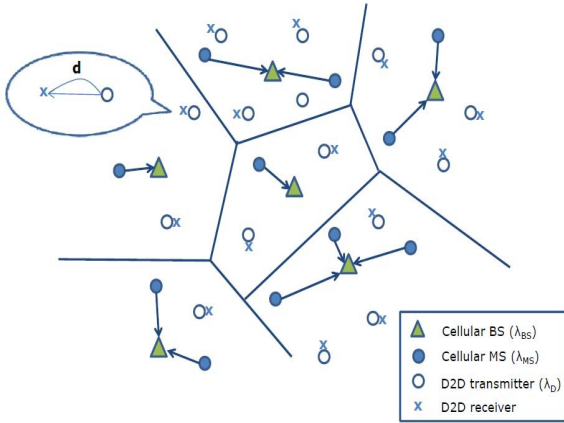


그림 1. 공존하는 셀룰러 네트워크와 다수의 D2D 기기들. 화살표는 셀룰러 MS들의 상향링크 전송을 나타내며, D2D 전송 기기들은 전송 거리 d 만큼 떨어진 그들의 수신 기기들과 통신하고 있다.
Fig. 1. The coexisting cellular network and multiple D2D devices. The arrows represent the uplink transmissions of cellular MSs, and D2D transmitters are communicating with their receivers over the transmission distance d .

어떠한 다중 접속 기법을 바탕으로 채널에 접속하게 되는데, 이러한 다중 접속 기법을 통해 동시에 전송하게 되는 MS들의 공간 분포는 BS의 분포와는 독립적인 것으로, λ_{MS} 의 밀도를 갖는 homogeneous PPP Φ_{MS} 를 따르는 것으로 가정한다. D2D 전송 기기들 역시 λ_D 의 밀도를 갖는 PPP Φ_D 를 따라 분포하고 있으며, 그림 1에서 보여지는 것처럼 각 D2D 수신 기기들이 해당 전송 기기로부터 거리 d 만큼 떨어진 곳에 위치하는 bipolar model^[14]을 고려한다.

분석의 편의를 위해 하나의 무선 채널을 가정하고, 많은 수의 D2D pair들이 셀룰러 네트워크 내에서 공존하는 경우, 즉 $\lambda_D > \lambda_{MS}$ 인 시스템을 생각한다. 이 네트워크는 간섭 제한적 (interference-limited)이며 수신단에서의 열 잡음 (thermal noise)은 무시될 수 있다. MS와 D2D 전송 기기들의 전송 전력은 각각 P_C 와 P_D 이며, 무선 채널의 감쇠는 레일리 페이딩 (Rayleigh fading)과 경로 손실을 따른다고 할 때, 셀룰러 시스템과 D2D 시스템에서의 신호 대 간섭 비 (signal-to-interference ratio, SIR)는 각각 다음과 같이 주어진다):

$$SIR_C = \frac{h R^{-\alpha}}{I_C}, \quad SIR_D = \frac{g d^{-\alpha}}{I_D} \quad (1)$$

h 와 g 는 평균이 각각 $\mu_C = 1/P_C$ 와 $\mu_D = 1/P_D$ 인, 독립적이고 동일한 분포를 갖는 (independently and identically distributed, i.i.d) 지수분포 (exponential distribution)를 따르며, $\alpha (> 2)$ 는 경로 손실 지수 (path-loss exponent)를 의미한다. R 은 각 MS의 상향링크 전송 거리를 나타내며, 다음과 같은 확률 밀도 함수 (probability density function, PDF)를 갖는다.

$$f_R(r) = 2\pi\lambda_{BS} r e^{-\lambda_{BS}\pi r^2}, \quad r \geq 0 \quad (2)$$

주파수를 공유하면서, 셀룰러 네트워크와 D2D pair들 모두 시스템 내의 간섭뿐만 아니라 시스템 간의 간섭으로부터도 영향을 받는다. 따라서 각 시스템에서의 전송 노드를 b_0 로 나타낼 때, (1)에서의 각 간섭 I_C 와 I_D 는 그러한 두 가지 종류의 간섭 합으로 구성 된다:

$$I_C = \sum_{i \in \Phi_{MS} \setminus \{b_0\}} h_i |X_i|^{-\alpha} + \sum_{j \in \Phi_D} g_j |X_j|^{-\alpha} \quad (3)$$

$$I_D = \sum_{i \in \Phi_{MS}} h_i |X_i|^{-\alpha} + \sum_{j \in \Phi_D \setminus \{b_0\}} g_j |X_j|^{-\alpha} \quad (4)$$

여기서 $|X_i|$ ($|X_j|$)는 각 시스템의 i (j) 번째 간섭 노드로부터 원점에 위치한 대상 수신기 (target receiver)까지의 거리를 가리킨다.

2.2. 문제 정의

D2D pair들의 성능을 전송 용량 (transmission capacity) 관점에서 분석함으로써, uncoordinated D2D 시스템의 feasibility condition을 도출한다. 전송 용량은 불능 확률 제약 (outage probability constraint) 하에서 단위 면적 당 성공적인 전송의 공간 밀도로 정의 된다^[15]. 본 논문은, 셀룰러 스펙트럼을 공유하는 대규모 D2D 전송에 초점을 맞춘다. 그러므로 셀룰러 네트워크의 서비스 품질 (quality of service, QoS)을 보장하기 위해서는 D2D 전송 용량 최대화 문제에 있어 MS 상향링크 전송에 대한 불능 확률 제약 역시 고려되어야 한다.

1) 여기서부터 아래첨자 C 와 D 는 각각 셀룰러 시스템과 D2D 시스템을 가리킨다.

$$\begin{aligned} \max_{\lambda_D, P_D} \quad & \lambda_D P_{suc,D} & (5) \\ \text{s.t.} \quad & P_{out,C} \leq \theta_C \\ & P_{out,D} \leq \theta_D, \end{aligned}$$

θ_C 와 θ_D 는 각각 셀룰러 네트워크와 D2D 시스템의 목적 불능 확률 (target outage probability)을 의미한다.

D2D pair들에게 있어, 셀룰러 네트워크뿐만 아니라 D2D 시스템 자체의 성능을 결정하는 세 가지 중요한 파라미터들이 존재 한다. D2D 전송기기 밀도 λ_D , 전송 전력 P_D , 그리고 전송 거리 d . 각 D2D 서비스 모델에 따라 평균적인 전송 거리가 존재한다고 할 때, 하나의 D2D 전송 거리 값은 어떠한 D2D 서비스 응용을 대표한다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는, 먼저 주어진 전송 거리 d 에 대하여 D2D pair들의 전송 용량을 찾고, 이후 다양한 전송 거리에 대하여 D2D pair들의 용량 변화를 확인한다.

III. Uncoordinated D2D 시스템의 성능 분석

Uncoordinated D2D 시스템의 성능을 분석하기 위해, 먼저 각 시스템의 불능 확률을 계산한다. γ_C^t 와 γ_D^t 를 각각 셀룰러 네트워크와 D2D pair의 목적 SIR이라 정하자. 셀룰러 네트워크의 불능 확률은 다음의 Proposition과 같이 도출된다.

Proposition 1. Uncoordinated D2D 시스템에서 셀룰러 네트워크의 불능 확률은

$$P_{out,C} = 1 - P_{suc,C} = 1 - \frac{\lambda_{BS}}{\lambda_{MS}\rho_1 + \lambda_D\rho_2 + \lambda_{BS}} \quad (6)$$

여기서

$$\begin{aligned} \rho_1(\gamma_C^t, \alpha) &= (\gamma_C^t)^{2/\alpha} \int_0^\infty \frac{1}{1+u^{\alpha/2}} du, \\ \rho_2(\gamma_C^t, \alpha, k) &= (\gamma_C^t)^{2/\alpha} \int_0^\infty \frac{1}{1+k^{-1}u^{\alpha/2}} du, \end{aligned}$$

이고 $k = \mu_C/\mu_D = P_D/P_C$ 는 MS 전송 전력에 대한 D2D 전송 전력의 비를 나타낸다.

Proof. 셀룰러 네트워크의 전송 성공 확률은

$$\begin{aligned} P_{suc,C} &= E_R[\Pr\{SIR_C \geq \gamma_C^t | R=r\}] \\ &= \int_{r \geq 0} \Pr\{h \geq \gamma_C^t r^\alpha I_C | r\} f_R(r) dr \\ &= \int_0^\infty L_{I_C}(\mu_C \gamma_C^t r^\alpha) f_R(r) dr \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $L_{I_C}(s)$ 는 s 에 대해 계산된 랜덤 변수 I_C 의 Laplace transform으로, 가장 가까운 BS까지의 전송 거리를 조건부로 하는 한 전송 MS의 전송 성공 확률을 이것으로부터 계산할 수 있다^[8]. 수식 (3)에서 보이는 바와 같이, 대상 BS에 미치는 간섭 I_C 는 다른 전송 MS들로부터의 간섭과 D2D 전송 기기들로부터의 간섭, 두 가지 독립적인 부분으로 이루어져 있다. 이러한 독립성과 PPP의 probability generating functional (PGFL)을 이용하여^[8], b_0 로 표시되는 주어진 전송 MS에 대해 $L_{I_C}(s)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} L_{I_C}(s) &= E_{I_C}[e^{-sI_C}] \\ &= E_{I_C}\left[e^{-s\left(\sum_{i \in \Phi_{MS} \setminus \{b_0\}} h_i |X_i|^{-\alpha} + \sum_{j \in \Phi_D} g_j |X_j|^{-\alpha}\right)}\right] \\ &= E_{\Phi_{MS}}\left[\prod_{i \in \Phi_{MS} \setminus \{b_0\}} E_h[\exp(-sh_i |X_i|^{-\alpha})]\right] \\ &\quad \cdot E_{\Phi_D}\left[\prod_{j \in \Phi_D} E_g[\exp(-sg_j |X_j|^{-\alpha})]\right] \\ &= \exp\left(-2\pi\lambda_{MS} \int_0^\infty \left(1 - \frac{\mu_C}{\mu_C + sx^{-\alpha}}\right) x dx\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-2\pi\lambda_D \int_0^\infty \left(1 - \frac{\mu_D}{\mu_D + sy^{-\alpha}}\right) y dy\right) \end{aligned} \quad (8)$$

$s = \mu_C \gamma_C^t r^\alpha$ 을 (8)에 대입하고 적분식의 변수를 바꾸어 계산하면, $L_{I_C}(\mu_C \gamma_C^t r^\alpha)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{I_C}(\mu_C \gamma_C^t r^\alpha) &= \exp\left(-\pi r^2 \lambda_{MS} (\gamma_C^t)^{2/\alpha} \int_0^\infty \frac{1}{1+u^{\alpha/2}} du\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\pi r^2 \lambda_D (\gamma_C^t)^{2/\alpha} \int_0^\infty \frac{1}{1+k^{-1}u^{\alpha/2}} du\right) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $k = \mu_C/\mu_D = P_D/P_C$ 는 MS 전송 전력에 대한 D2D 전송 전력의 비를 의미한다. (9)의

식을 (7)에 대입하고 수식 (2)에서 주어진 전송 거리 R 에 대한 pdf를 이용하면 결과를 얻는다.

한편, bipolar model을 바탕으로 D2D pair들의 불능 확률 역시 다음과 같이 유도된다.

Proposition 2. Uncoordinated D2D 시스템에서 D2D pair들의 불능 확률은

$$P_{out, D} = 1 - \exp(-\pi d^2(\lambda_{MS}\beta_1 + \lambda_D\beta_2)), \quad (10)$$

여기서

$$\beta_1(\gamma_D^t, \alpha, k) = (\gamma_D^t)^{2/\alpha} \int_0^\infty \frac{1}{1 + ku^{\alpha/2}} du,$$

$$\beta_2(\gamma_D^t, \alpha) = (\gamma_D^t)^{2/\alpha} \int_0^\infty \frac{1}{1 + u^{\alpha/2}} du.$$

Proof. 한 D2D pair의 전송 성공 확률은

$$P_{suc, D} = \Pr\{SIR_D \geq \gamma_D^t\} = L_{I_D}(\mu_D \gamma_D^t d^\alpha). \quad (11)$$

(8)을 유도할 때와 유사하게, $L_{I_D}(s)$ 는

$$\begin{aligned} L_{I_D}(s) &= E_{I_D}[e^{-sI_D}] \\ &= \exp\left(-2\pi\lambda_{MS} \int_0^\infty \left(1 - \frac{\mu_C}{\mu_C + sx^{-\alpha}}\right) x dx\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-2\pi\lambda_D \int_0^\infty \left(1 - \frac{\mu_D}{\mu_D + sy^{-\alpha}}\right) y dy\right) \end{aligned} \quad (12)$$

$s = \mu_D \gamma_D^t d^\alpha$ 를 (12)에 대입하고 적분 변수들을 바꾸어 계산하면, (11)의 $L_{I_D}(\mu_D \gamma_D^t d^\alpha)$ 를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{I_D}(\mu_D \gamma_D^t d^\alpha) &= \exp\left(-\pi d^2 \lambda_{MS} (\gamma_D^t)^{2/\alpha} \int_0^\infty \frac{1}{1 + ku^{\alpha/2}} du\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\pi d^2 \lambda_D (\gamma_D^t)^{2/\alpha} \int_0^\infty \frac{1}{1 + u^{\alpha/2}} du\right) \end{aligned} \quad (13)$$

이를 이용하여 (10)의 결과를 얻을 수 있다.

(5)의 최적화 문제를 바탕으로 uncoordinated D2D 시스템의 최대 성능을 구하기 위해, 먼저 D2D 전송 전력 P_D 에 대한 D2D 전송기기 밀도 λ_D 를 부분 최적화 (partial optimization)한다. 주어진 P_D 에 대해, 각 시스템의 불능 확률 제약식을

$$\text{등호로 만족하는 D2D 밀도 값을 각각 } \lambda_D^{\theta_D} \text{ 와 } \lambda_D^{\theta_C} \text{ 라 하자: } \lambda_D^{\theta_C} = \frac{\lambda_{BS}\theta_C - \lambda_{MS}(1 - \theta_C)\rho_1}{(1 - \theta_C)\rho_2},$$

$$\lambda_D^{\theta_D} = \frac{-\ln(1 - \theta_D) - \pi d^2 \lambda_{MS} \beta_1}{\pi d^2 \beta_2} \text{ 이고 이들은}$$

각각 Proposition 1과 2로부터 얻어진다. 그러면, λ_D 의 feasible region은 이들 두 밀도 값의 최소값에 의해 결정된다.

주어진 하나의 P_D 값에 대해, 목적 함수 $f(\lambda_D) = \lambda_D \exp(-\pi d^2(\lambda_{MS}\beta_1 + \lambda_D\beta_2))$ 에 는 D2D 밀도와 그것의 전송 성공 확률 간의 trade-off가 존재하며, 어떠한 제약 조건이 없는 경우 $\lambda_D = (\pi d^2 \beta_2)^{-1}$ 에서 해당 목적 함수는 최대값을 갖는다. 타당한 값의 목적 불능 확률 $\theta_D (< 0.5)$ 에 대해서 $\lambda_D^{\theta_D}$ 는 항상 $(\pi d^2 \beta_2)^{-1}$ 보다 작으므로, λ_D 의 feasible region은 이 최대값을 포함하지 않게 된다. 따라서 주어진 D2D 전송 전력에 대한 D2D 밀도의 부분 최적값은 $\lambda_D^{\theta_D}$ 와 $\lambda_D^{\theta_C}$ 의 최소값에서 결정된다.

Corollary 1. 주어진 전송 전력 P_D 에 대해, D2D pair들의 최적 밀도는

$$\lambda_D^{opt} = \min\{\lambda_D^{\theta_D}, \lambda_D^{\theta_C}\} \quad (14)$$

이고 이것은 feasible region 내의 가장 큰 λ_D 값과 같다.

P_D 가 작을 때, 각각의 D2D pair는 그들이 primary 셀룰러 시스템에 미치는 간섭 정도가 작고 할지라도 그 자신의 전송에 있어 성공하기 어렵다. 이러한 경우, 최대 D2D 전송 용량에 있어 D2D 불능 확률에 대한 제약조건이 매우 중요하게 된다. 그러나 P_D 가 증가하면, D2D 전송 기기들은 셀룰

러 시스템에 심각한 간섭을 일으키게 되고 이것은 λ_D 의 feasible region이 셀룰러 불능 확률에 대한 제약 조건에 의해 결정되도록 만든다. 그러므로 최적의 D2D 밀도와 전송 전력 (λ_D^*, P_D^*)은 $\lambda_D^{\theta_D} = \lambda_D^{\theta_C}$ 일 때 구해지고 $\alpha = 4$ 에 대해 다음과 같은 closed-form을 갖는다.

Corollary 2. $\alpha = 4$ 에 대해, uncoordinated D2D pair들의 최적 밀도 λ_D^* 와 최적 전송 전력의 비 $k^* = P_D^*/P_C$ 는 각각

$$\lambda_D^* = \frac{\ln(1-\theta_D)}{\pi d^2 \sqrt{\gamma_D^t}} \left\{ \frac{1-\theta_C}{\theta_C} \frac{\lambda_{MS}}{\lambda_{BS}} \sqrt{\gamma_C^t} - \frac{2}{\pi} \right\}, \quad (15)$$

$$k^* = \frac{P_D^*}{P_C} = \left(\frac{\theta_C}{1-\theta_C} \frac{-\pi d^2 \lambda_{BS}}{\ln(1-\theta_D)} \right)^2 \frac{\gamma_D^t}{\gamma_C^t}, \quad (16)$$

이고 D2D pair들의 최대 전송 용량은 $C_{D2D}^* = \lambda_D^* P_{suc,D}^* = \lambda_D^* (1-\theta_D)$ 이다.

Corollary 1과 2에서의 결과는 평균 전송 거리가 d 인 어떠한 D2D 서비스 응용에 관한 것이다. 다양한 파라미터들을 가진 최적화 문제의 복잡성 때문에, 다음 장에서는 최대 D2D 전송 용량을 모의실험 및 수학적 예제를 통해 확인한다.

IV. 실험 및 결과 분석

이 장에서는, III 장에서의 이론적인 분석 결과들을 바탕으로, uncoordinated D2D 시스템의 성능을 보인다. 수학적 예제와 모의실험 결과들로부터 대규모의 D2D 기기들이 네트워크 조정 없이 동작할 수 있는 조건을 찾고, 최적의 전송 전력과 D2D 밀도가 D2D 링크 거리에 따라 어떻게 변화하는지 살펴본다. 실험을 위한 시스템 파라미터들은 다음과 같이 주어진다: $\lambda_{BS} = 10^{-5}$, $\lambda_{MS} = 10^{-6}$, $\gamma_C^t = \gamma_D^t = 0$ dB, $P_C = 27$ dBm, 그리고 $\alpha = 4$. II 장의 시스템 모델에서 설명된 바와 같이, 전체 네트워크의 셀룰러 이동국 및 D2D 기기들이 하나

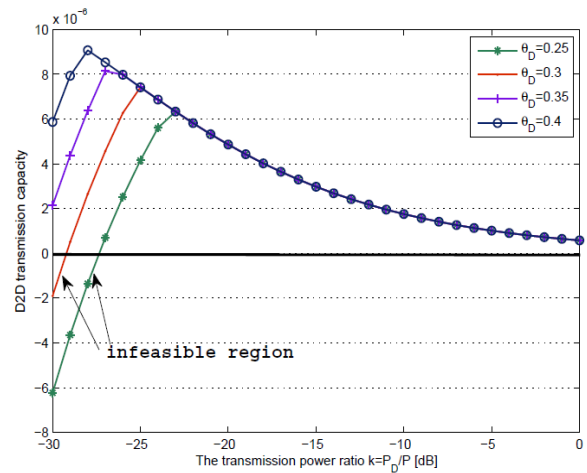


그림 2. 셀룰러 시스템의 목적 불능 확률이 $\theta_C = 0.2$ 인 경우, 전송 전력의 비 $k = P_D/P_C$ 의 함수로 나타내어진 D2D 전송 용량. D2D 목적 불능 확률 θ_D 에 따라, 주어진 D2D 전송 전력으로는 D2D pair들이 자신의 불능 확률 제약을 만족시킬 수 없는 infeasible region이 존재하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 2. The D2D transmission capacity as a function of the transmission power ratio $k = P_D/P_C$, in case that the target outage probability of cellular system is $\theta_C = 0.2$. Depending on the D2D target outage probability θ_D , there exist infeasible regions where the D2D pairs can not satisfy its outage constraint with the given D2D transmission power.

Proposition 3. Uncoordinated D2D 시스템은 D2D 전송기기의 밀도, 전송 전력, 그리고 링크 거리가 다음의 조건을 만족할 때에 feasible하다.

$$\lambda_D^{\theta_D} = \frac{-\ln(1-\theta_D) - \pi d^2 \lambda_{MS} \beta_1}{\pi d^2 \beta_2} > 0, \quad (17)$$

여기서 β_1 과 β_2 는 (10)에서와 같다. $\alpha = 4$ 에 대해, 위의 feasible condition은 다음과 같은 형태로 정리된다. 무선 채널을 공유하고 있을 때 위와 같은 파라미터들에 대해 주어진 셀룰러 네트워크 ($\lambda_D = 0$)의 불능 확률은 약 0.1358이며, 이러한 셀룰러 네트워크 내에 uncoordinated D2D 시스템이 공존하는 경우 D2D 시스템의 상대적인 성능 분석을 보이고자 한다. II장 2절에 앞서 언급된 바와 같이, 어떠한 D2D 서비스 응용을 의미하는 고정된 D2D 링크 거리값에 대해 먼저 최대 D2D 전송 용량을 유도한 다음, 링크 거리를 변화시키면서 어떤 종류의 D2D 서비스 응용이 네트워크 조정 없이 셀룰러 시스템 내에서 공존하기에 적합한지에 대해 알아본다.

그림 2-4는, D2D 링크 거리 $d = 50\text{m}$ 에 대해, uncoordinated D2D 시스템의 성능을 전송 전력의 비 k 의 함수로 보여주고 있다. 그림 상의 각 점들은 주어진 $k = P_D/P_C$ 에서 λ_D 를 부분 최적화하여 얻어진 것들이다. 그림 2는 최대 D2D 전송 용량이 주어진 D2D 불능 확률 한계 θ_D 에 따라 달라지는 것을 보여주고 있는데, θ_D 가 증가할수록 더 적은 전송 전력에서 동일한 전송 용량에 도달할 수 있음을 알 수 있다. 이것은, D2D 불능 확률에 대한 제약이 엄격하지 않을수록 더 많은 D2D pair들이 전송에 있어 성공할 수 있기 때문이다. 또한, D2D 전송 전력이 링크 거리에 비해 너무 적어서 그러한 전력 수준으로는 불능 확률 제약을 만족시킬 수 없는 경우에는 infeasible region이 나타난다. 그러한 경우, $\lambda_D^{\theta} < 0$ 이 되어 feasible한 λ_D 가 존재하지 않게 된다. 이와 같이, uncoordinated D2D 시스템의 타당성 조건을 그들의 동작 파라미터 λ_D , P_D , 그리고 d 에 대하여 찾을 수 있다.

$$\frac{(\pi d)^2}{2} \frac{\sqrt{P_C}}{\sqrt{P_D}} \sqrt{\gamma_D^t} \lambda_{MS} < -\ln(1 - \theta_D), \tag{18}$$

여기서 $\theta_D < 0.5$ 에 대해 $0 < -\ln(1 - \theta_D) < 0.6931$ 이다.

그림 3은 주어진 파라미터들에 대해 최대 D2D 전송 용량이 수식 (16)에 나타난 k^* 에서 얻어지는 것을 보여주고 있으며, 그림 4는 그에 해당하는 최적 D2D 밀도 λ_D^* 가 $\lambda_{MS} = 10^{-6}$ 보다 훨씬 높은 값인 것을 보여주면서 $\lambda_D > \lambda_{MS}$ 인 대규모 D2D 통신이 가능함을 입증하고 있다. 그림 3과 4의 왼쪽 부분에서 보여 지는 것과 같이 P_D 가 셀룰러 시스템의 전송 전력에 비해 적을 때에는, P_D 가 증가할수록 D2D의 최대 불능 확률이 한계값과 같아진 상태로 동시에 전송 가능한 D2D 밀도가 증가하게 되고, 이에 따라 최적 D2D 전송 용량이 증가하게 된다. 한편, 그림 3과 4의 오른쪽 부분과 같이 P_D 가 어느 정도 이상 큰 값을 갖는 경우에는, D2D 통신에 의해 발생하는 간섭으로 인해 셀룰러 네트워크의 최대 불능 확률 한계가 보다 중요하게 된다.

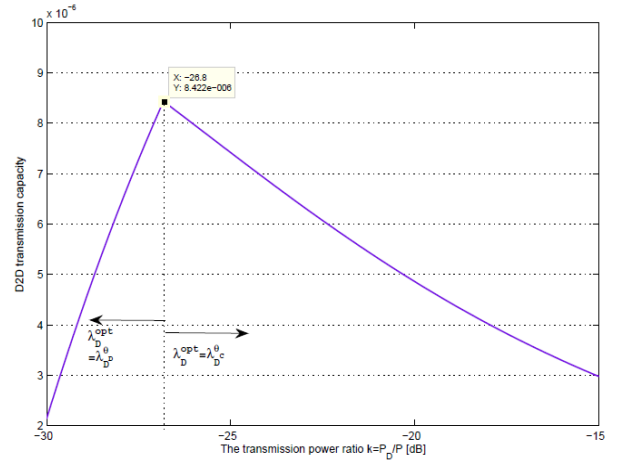


그림 3. $\theta_D = 0.35$ 에 대해, D2D 전송 전력 P_D 의 함수로 나타내어진 D2D 전송 용량의 (부분) 최적값. Fig. 3. The (partial) optimal D2D transmission capacity as a function of the D2D transmission power P_D , for $\theta_D = 0.35$.

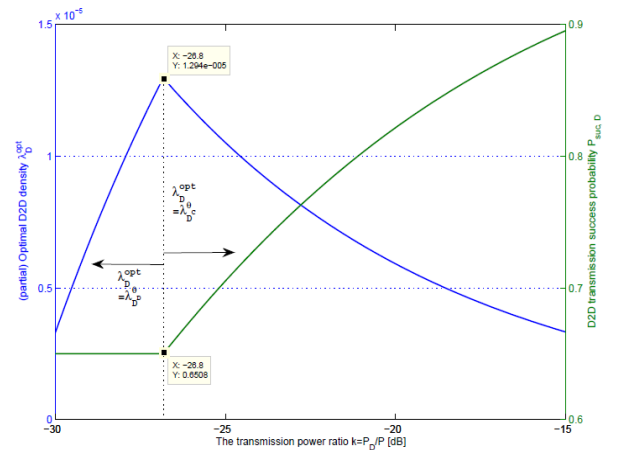


그림 4. $\theta_D = 0.35$ 에 대해, D2D 전송 전력 P_D 의 함수로 나타내어진 D2D 밀도의 (부분) 최적값 λ_D^{opt} (왼쪽 y축)와 D2D 전송 성공 확률 $P_{suc,D}$ (오른쪽 y축). Fig. 4. The (partial) optimal D2D density λ_D^{opt} (left y-axis) and the D2D transmission success probability $P_{suc,D}$ (right y-axis) as functions of the D2D transmission power P_D .

그러므로 그림 4에 나타난 것과 같이, 개별 D2D 링크의 성공 확률은 P_D 가 증가함에 따라 크게 증가할지라도, 셀룰러 네트워크의 QoS를 보장하기 위해서는 허용 가능한 D2D 밀도가 D2D 전송 전력에 따라 급격히 감소하게 된다.

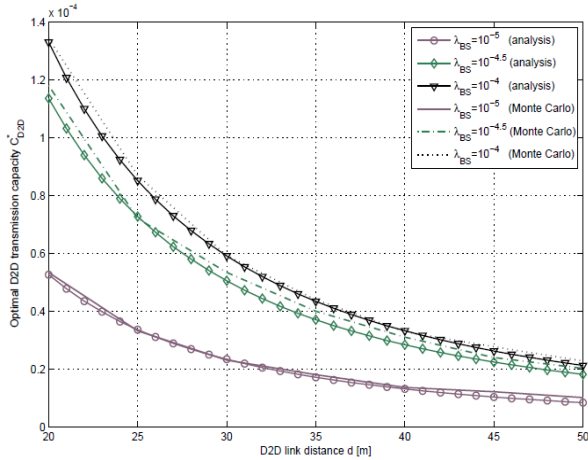


그림 5. 다양한 BS 밀도에 대한, D2D 링크 거리 d 에 따른 uncoordinated D2D 시스템의 최적 전송 용량. BS 밀도는 평균적인 셀룰러 상향링크 전송거리 d_{cell} 을 결정한다. $d_{cell} \approx 158m$ for $\lambda_{BS} = 10^{-5}$, $d_{cell} \approx 89m$ for $\lambda_{BS} = 10^{-4.5}$, 그리고 $d_{cell} \approx 50m$ for $\lambda_{BS} = 10^{-4}$.
 Fig. 5. The optimal transmission capacity of uncoordinated D2D systems according to D2D link distance d for various BS densities, which determine the average cellular uplink distance d_{cell} : $d_{cell} \approx 158m$ for $\lambda_{BS} = 10^{-5}$, $d_{cell} \approx 89m$ for $\lambda_{BS} = 10^{-4.5}$, and $d_{cell} \approx 50m$ for $\lambda_{BS} = 10^{-4}$.

위와 같은 부분 최적화 결과를 바탕으로 하여, 그림 5-7은 uncoordinated D2D 시스템의 운용점을 개괄적으로 보여주고 있다. D2D pair들의 전송 거리 d 는 그들이 존재하는 셀룰러 시스템의 평균적인 셀 크기 및 MS-BS간 전송 거리와 많이 연관되어 있기 때문에, D2D 전송 전력과 셀룰러 전송 전력과의 비율이 중요한 것처럼, D2D 전송 거리 역시 한 셀에서의 평균적인 상향링크 전송 거리와의 상대적인 비율이 중요하다. 평균적인 상향링크 전송 거리는 주어진 셀룰러 BS 밀도에 따라 다르게 주어진다: $d_{cell} \equiv E[R] = \frac{1}{2\sqrt{\lambda_{BS}}}$. 그러므로 그림

5-7은 각기 다른 BS 밀도에 대해 최적 D2D 성능을 D2D 링크 거리 d 의 함수로 나타내고 있다. 이때, 그림 5의 D2D 전송 용량은 시뮬레이션 값이 분석된 값보다 다소 높게 나타난다. 이것은 Proposition 1에서의 셀룰러 네트워크의 불능 확률이, 주어진 전송 MS보다 간섭 MS들이 목적 BS 근처에 더 가까이 위치할 수 있는 상황을 보수적으로 반영하고 있어, 실제 가능한 최적 D2D 밀도는

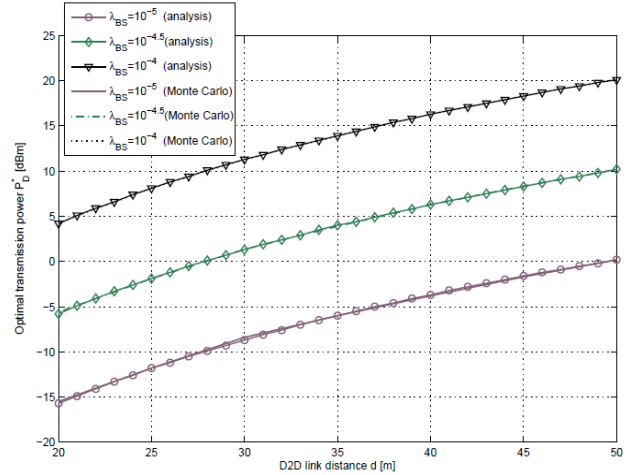


그림 6. 그림 5의 최적 전송 용량에 해당하는 최적 D2D 전송 전력 P_D^* .

Fig. 6. The optimal D2D transmission power P_D^* corresponding to the optimal transmission capacity in Fig. 5.

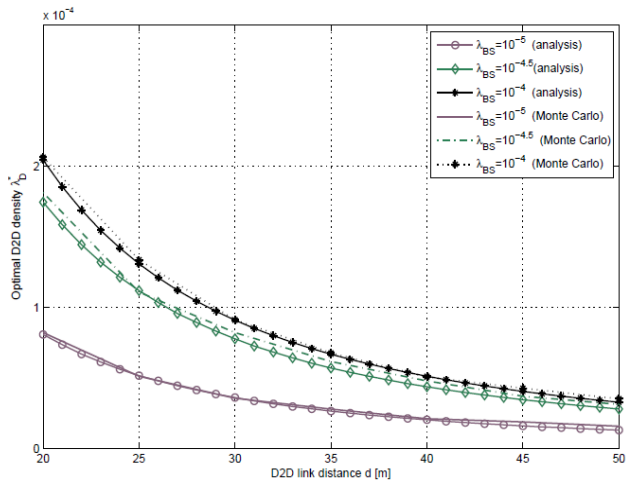


그림 7. 그림 5의 최적 전송 용량에 해당하는 최적 D2D 밀도 λ_D^* .

Fig. 7. The optimal D2D density λ_D^* corresponding to the optimal transmission capacity in Fig. 5.

그림 7에 나타난 것과 같이 분석된 값보다 약간 높게 나타나기 때문이다.

그림들로부터, 가능한 한 짧은 전송 거리를 갖는 D2D 서비스 응용이 셀룰러 스펙트럼을 underlay 방식으로 공유하는 대규모 D2D 시스템에 적합하며, 그 때의 전송 전력은 셀룰러 네트워크의 전송 전력에 비해 다소 적은 값으로 주어질 수 있다. 그림 5에서 $\lambda_{BS} = 10^{-5}$ 인 경우, D2D 링크 거리가 20m에서 30m로 증가할 때 D2D 시스템의 전송 용량은 50%로 감소하게 되며, 평균적인

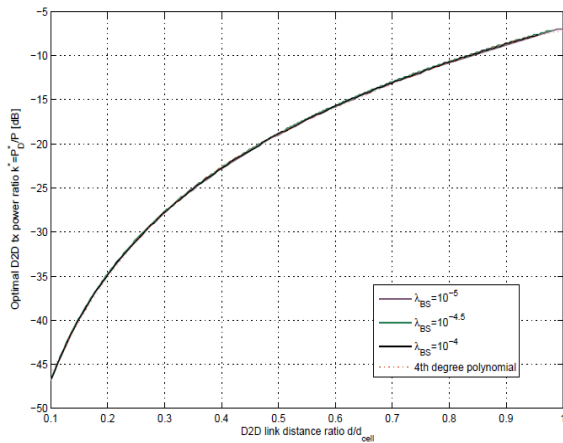


그림 8. 평균적인 셀룰러 상향링크 전송거리 d_{cell} 에 대한 D2D 링크 거리 d 의 비율에 따른 최적 D2D 전송 전력의 비 $k^* = P_D^*/P_C$. k^* 와 d/d_{cell} 의 관계식은 다음과 같은 4차 다항식의 형태로 근사화된다. 이 그림의 경우, $y = p_4x^4 + p_3x^3 + p_2x^2 + p_1x + p_0$, where $p_4 = -110$, $p_3 = 307.94$, $p_2 = -332.06$, $p_1 = 188.84$, and $p_0 = -61.919$.

Fig. 8. The optimal D2D power ratio $k^* = P_D^*/P_C$ according to the ratio of the D2D link distance d to the average cellular uplink distance d_{cell} . The relationship between k^* and d/d_{cell} is approximated to 4th degree polynomial $y = p_4x^4 + p_3x^3 + p_2x^2 + p_1x + p_0$, where $p_4 = -110$, $p_3 = 307.94$, $p_2 = -332.06$, $p_1 = 188.84$, and $p_0 = -61.919$ in this figure.

MS-BS 간 거리 d_{cell} 이 작아질수록 이러한 D2D 링크 거리 증가에 따른 전송 용량 감소 정도가 보다 심한 것을 알 수 있다. 이것은 셀 크기가 감소할수록 대규모 D2D 시스템이 실질적으로 동작하기 위해서는 D2D 링크 거리가 훨씬 더 짧아져야 한다는 것을 의미한다. D2D 시스템은 전반적으로 다음과 같이 동작한다. 한 D2D pair 간 전송 거리가 증가할수록 D2D의 불능 확률 제약을 만족시키기 위해서는 D2D 전송 전력 역시 그에 따라 증가하여야 한다 (그림 6). 그러면, 셀룰러 불능 확률 제약에 의해, D2D 기기들로부터의 간섭이 허용 가능한 수준으로 유지될 수 있도록 D2D 전송 기기들의 밀도는 급격히 감소한다 (그림 7). 그 결과, 최대 도달 가능한 D2D 시스템의 전송 용량은 감소하는 D2D 밀도와 함께 역시 줄어들게 된다 (그림 5).

그림 6과 7로부터, 수식 (15)와 (16)에 나타난 것처럼, 링크 거리가 두 배가 될 때 최적의 전송 전

력 P_D^* 는 약 12dB (2^4 배) 증가하게 되며 최적 밀도 λ_D^* 는 1/4로 감소하는 것을 볼 수 있다.

한편, D2D 링크 거리를 평균적인 상향링크 전송 거리로 정규화하게 되면, 각각의 주어진 셀룰러 네트워크에 대한 최적의 D2D 전송 전력 (그림 6)은 수식 (16)에 의해 동일한 동작을 보이게 되고, 그림 8과 같이 BS 밀도와 관계없이 모든 그래프가 하나로 합쳐지게 된다. 이 때 최적 전송 전력의 비 k^* 는 목적 SIR과 불능 확률 한계와 같은 주어진 시스템 파라미터들에 대해 수식 (16)에 따라 d 에 관한 4차 다항식 함수의 형태로 계산될 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는, uncoordinated D2D 통신이 셀룰러 네트워크 내에 대규모로 공존하며 동작할 수 있는 feasibility condition을 도출하였다. D2D 전송 기기들의 밀도가 셀룰러 사용자 밀도보다 10배 이상 많을 때 이를 대규모 D2D 시스템인 것으로 여기는데, 특히, D2D 기기들이 직접 통신을 위해 셀룰러 상향링크 스펙트럼을 사용하는 underlay 방식의 스펙트럼 공유 네트워크에 초점을 두었다. D2D 시스템의 전송 용량을 분석함으로써, D2D 기기들의 최적 운용 파라미터들 간의 수학적 관계를 유도하였고, 네트워크 조정 없이 D2D 기기들이 동작할 수 있는 조건을 밝혔다. 모의실험 및 분석 결과들로부터, D2D 기기들의 전송 전력은 일반적인 셀룰러 모바일 기기들의 전송 전력보다 20dB 정도 낮아야 하며, 이러한 전력 수준과 함께 D2D pair 간의 링크 거리는 D2D 시스템이 존재하는 셀룰러 네트워크에서의 평균적인 상향링크 전송 거리의 40%를 넘지 않는 것이 좋다는 것을 알 수 있었다. 본 연구의 결과는 대규모 uncoordinated D2D 통신의 동작 가능한 조건에 관한 insight를 제공하며, 시그널링 부하를 최소화하면서 D2D 시스템의 성능을 개선할 수 있는 효율적인 네트워크 조정 기법은 앞으로의 흥미로운 연구 주제일 것으로 생각된다.

References

[1] M. S. Corson, R. Laroia, J. Li, V. Park, T. Richardson, and G. Tsirtsis, "Toward proximity-aware internetworking," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 17, no. 6, pp. 26-33,

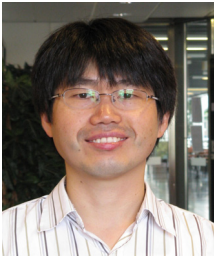
- Dec. 2010.
- [2] G. Fodor, E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, N. Reider, G. Miklós, and Z. Turányi, "Design aspects of network assisted device-to-device communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 3, pp. 170-177, Mar. 2012.
- [3] Hyunkee Min, Woohyun Seo, Sungsoo Park, and Daesik Hong, "Outage probability of the device-to-device communication according to the interference-to-signal-ratio generated by cellular networks," *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol. 48-TC, no. 1, pp. 55-61, Jan. 2011.
- [4] K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. Ribeiro, and K. Hugl, "Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks". *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 12, pp. 42-49, Dec. 2009.
- [5] C. H. Yu, K. Doppler, C. Ribeiro, and O. Tirkkonen, "Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 2752-2763. Aug. 2011.
- [6] S. Hakola, T. Chen, J. Lehtomäki, and T. Koskela, "Device-to-device (D2D) communications in cellular network - performance analysis of optimum and practical communication mode selection," in *Proc. IEEE WCNC*, Sydney, Australia, Apr. 2011.
- [7] P. Jänis, V. Koivunen, C. Ribeiro, J. Korhonen, K. Doppler, and K. Hugl, "Interference-aware resource allocation for device-to-device radio underlying cellular networks," in *Proc. IEEE VTC Spring*, Barcelona, Spain, Apr. 2009.
- [8] J. G. Andrews, F. Baccelli, and R. K. Ganti, "A tractable approach to coverage and rate in cellular networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 11, pp. 3122-3134, Nov. 2011.
- [9] T. D. Novlan, H. S. Dhillon, and J. G. Andrews, "Analytical modeling of uplink cellular networks," submitted to *IEEE Trans. Wireless Commun.* (2012), Retrieved Nov., 29, 2012, from <http://arxiv.org/abs/1203.1304>.
- [10] F. Baccelli, M. Klein, M. Lebourges, and S. Zuyev, "Stochastic geometry and architecture of communication networks," *J. Telecommun. Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 209-227, Jun. 1997.
- [11] T. X. Brown, "Cellular performance bounds via shotgun cellular systems," *IEEE J. Sel. Area. Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 2443-2455, Nov. 2000.
- [12] H. S. Dhillon, R. K. Ganti, F. Baccelli, and J. G. Andrews, "Modeling and analysis of K-tier downlink heterogeneous cellular networks," *IEEE J. Sel. Area. Commun.*, vol. 30, no. 3, pp. 550-560, Apr. 2012.
- [13] D. Stoyan, W. Kendall, and J. Mecke, *Stochastic geometry and its applications*, 2nd Ed., John Wiley and Sons, 1996.
- [14] J. G. Andrews, R. K. Ganti, M. Haenggi, N. Jindal, and S. Weber, "A Primer on spatial modeling and analysis in wireless networks," *IEEE Commun. Mag.* vol. 48, no. 11, pp. 156-163, Nov. 2010.
- [15] S. Weber, J. G. Andrews, and N. Jindal, "An overview of the transmission capacity of wireless networks," *IEEE Trans. Commun.* vol. 58, no. 12, pp. 3593-3604, Dec. 2010.

황 영 주 (YoungJu Hwang)



2006년 2월 연세대학교 전기
전자공학부 공학사
2008년 2월 연세대학교 전기
전자공학부 공학석사
2008년 3월~현재 연세대학교
전기전자공학부 박사과정
<관심분야> Radio resource
management, dynamic spectrum sharing and
interference networks, device-to-device
communications, capacity of wireless networks

성 기 원 (Ki Won Sung)



2005년 8월 KAIST 공학박사
2005년-2007년 삼성전자 디지
털연구소 선임 연구원
2008년 영국 University of
Edinburgh, Institute for
Digital Communications, 방
문 연구원

2009년-현재 스웨덴 KTH Dept. Communication
Systems, tenured researcher

<관심분야> Dynamic spectrum access,
energy-efficient wireless networks, cost-effective
deployment and operation, future wireless
architecture

김 성 루 (Seong-Lyun Kim)



1994년 8월 KAIST 공학박사
1994년~1998년 ETRI 이동통
신기술연구단 선임 연구원
1998년~2000년 스웨덴 KTH
Dept. Signal, Sensor &
System 조교수
2000년~2004년 ICU 조교수,

부교수

2004년~현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수,
교수

<관심분야> Wireless multihop networks, radio
resource management, information theory,
robotic network, economics of wireless systems