

하향링크의 오수신 확률을 최소화하는 무선 중계기 위치 결정

Relay Deployment Strategy for Minimizing Outage Probability of Downlink Cellular Systems

Jeong-su Kim

김 정 수

Abstract

The cellular system in the next generation decreases the range of transmission of a signal as well as increases the rate of transmission adapting the method of multi-hop relaying with the relay. However, the fact of decreasing the range of transmission with the method of multi-hop relaying means increasing interferential amount in the outer cell; therefore, the deployment of the relay can affect to the function of the cellular system. In this thesis, the deployment of the relay is determined for the maximum rate of transmission, based on the transmission power of the relay and the variation of interferential amount. The condition to determine the deployment of the relay is analyzed with the mathematical model; in addition, its performance is verified through the result of a simulation. Based on the analysis of this thesis, the established deployment and transmission power of the relay to minimize the average outage probability exist. Furthermore, the relay contributes to enlargement of capacity of cells, decreasing the average outage probability in the situation of less severe interference between cells with reuse of frequency. However, the relay should be restrained in use in the situation of severe interference between cells due to the fact that the outage probability of inter-cells can be increased.

요 약

차세대 셀룰러 시스템은 중계기를 이용한 다중 홉 전송을 사용함으로써 신호의 전달 거리가 감소하고 이를 통한 전송률을 증대시킨다. 그러나 다중 홉 전송을 이용한 전달 거리 감소는 외부 셀 입장에서 간섭량의 증가를 의미하기 때문에 중계기의 위치는 셀룰러 시스템 성능에 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 중계기의 전송 전력과 위치에 따른 간섭량의 변화를 고려하여 최대의 전송률을 내기 위한 중계기 위치를 결정한다. 중계기 위치 결정을 위한 조건은 수학적인 모델로 분석되었고 모의실험 결과를 통해서 그 성능을 검증하였다. 본 논문의 분석에 따르면 하나의 셀의 평균 오수신 확률을 최소화 시킬 수 있는 중계기 설치 지점과 중계기 전송 전력이 존재하며, 주파수 재사용에 따른 셀들 간 간섭이 심각하지 않은 상황에서 중계기는 평균 오수신 확률을 감소시켜줌으로써 셀 용량 증대에 기여하였다. 반면 셀간 간섭이 심각한 경우 중계기의 사용은 오히려 해당 셀의 오수신 확률을 증가시키므로 지양해야 한다는 결론에 도달하였다.

Key words : Multi-hop relay, relay deployment

1. 서론

다중 홉 중계기(Multi-hop relay)의 사용은 신호의

한국사이버대학교 컴퓨터정보통신학부
(Department of Computer Information and
Communication, Korea Cyber University)

接受日:2009年 12月 15日, 修正完了日: 2009年 12月 27日

전달 감소에 의한 신호 감쇄 효과를 경감시킴으로써 수신 단에서 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio)를 향상시킬 수 있으며, 이는 전송률 증대 및 무선 전송의 신뢰성을 향상시킨다. 이러한 중계기의 장점 때문에 현재 많은 셀룰러 이동 통신 표준화 작업에서 중계기의 도입에 대한 논의가 활발하게 이루어지고

있다 [1].

무선 통신에서 기존의 증계기에 대한 연구는 증폭 후 전달 기법(amplified and forward)과 복호 후 전달 기법(decoded and forward)에 대하여 이루어졌으며, 주로 증계기를 통하여 얻을 수 있는 성능 이득이 분석되었다. 하지만 증계기 사용에 따라 추가적으로 발생할 수 있는 간섭(interference)은 고려되지 않았다 [2][3]. 일부 연구에서 간섭을 고려한 경우 동시 전송(concurrent transmission)에 따른 자기 간섭(self-interference)을 고려하거나 외부 셀 간섭을 고려하였으나, 증계기 사용에 따른 간섭량의 변화는 분석되지 않았다 [4][5].

증계기를 이용한 신호 전달 거리 감소에 따른 성능 이득은 다중 셀 시스템 입장에서 보면 셀 밖으로 유출되는 신호의 세기가 강한 것을 의미하므로, 셀룰러 시스템에서 증계기의 사용은 곧 셀 간 간섭량의 증가를 의미한다. 즉 증계기의 전송 전력과 셀 내에서 위치는 외부 셀에 주는 간섭량에 많은 영향을 주게 된다. 따라서 증계기의 위치와 전송 전력의 세기는 증계기가 동작하는 셀에서 증계기에 의한 성능 이득과 외부 셀에 간섭량이 증가하는 부분에 대한 손익을 고려하여 결정되어야 한다.

이 논문에서는 증계기가 사용하는 전송 전력의 세기에 따른 셀 전체의 오수신 확률(outage probability)에 대하여 분석하고, 오수신 확률을 최소화하기 위한 증계기 설치 위치를 결정하고자 한다. 위의 결과를 설명하기 위한 수학적 분석과 모의실험을 통하여 본 연구 결과의 타당성을 검증하였다.

II. 본론

1. 시스템 모델

본 논문은 기본적으로 증폭 후 전달 증계기를 사용하는 2-홉 셀룰러 시스템을 가정한다. 증계기(relay station, RS)는 그림-1에서 볼 수 있는 것과 같이 기지국(base station, BS)로부터 d_{RS} 떨어진 거리에 위치한다. 기지국을 중심으로 증계기가 설치된 반경 d_{RS} 인 원을 본 논문에서는 증계기 띠라고 명명한다. 증계기는 고정식으로 기지국과 증계기 사이에 전파 방해물이 없는 환경(line-of-sight)를 가정한다. 증계기 띠를 기준으로 내부에 있는 단말기(I-MS)는 기지국으로부터 직접 신호를 수신하며 외부에 있는 단말(O-MS)은 증계기에 의하여 증폭된 신호를 수신한다. 내부 및 외부 단말이 사용하는 통신 채널은 주파수로 구분되며, 기지국과 증계기는 동시에 같은 채널을 사용하지 않으므로 셀 내부에서 발생하는 간섭은 없다.

분석상의 편의를 위하여 증계기 띠 위에는 무한개의 증계기가 있다고 가정한다. 이러한 가정은 증계기의 위치와 전송 전력에 따른 성능을 분석하기 위한 다음과 같은 장점을 제공한다. 첫 번째로 증계기 띠의 가정을 통해서 외부 단말들은 기지국과 일직선상의 최단거리에 위치한 증계기에 접속 가능하게 된다. 따라서 유한개의 증계기가 존재할 때 고려해야 하는 증계기 선택 기법에 따른 성능 변화를 배제할 수 있다. 또한 모든 단말은 최단 거리의 증계기에 접속하여 최적의 2-홉 증계 성능을 얻게 되므로, 유한개의 증계기를 사용하여 달성 가능한 최저 오수신 확률에 대한 한계(lower bound)를 제공해 줄 것이다.

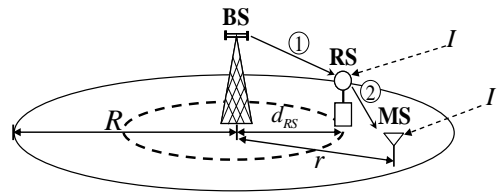
단일 홉 시스템과의 공정한 비교를 위하여, 2-홉 시스템에서 기지국과 증계기가 송신할 수 있는 전송 전력을 각 P_{BS} 와 P_{RS} 라 표기할 때, P_T 는 다음과 같다.

$$P_T = P_{BS} + P_{RS} \quad (1)$$

여기서 P_T 는 단일 홉 시스템의 기지국이 사용할 수 있는 최대 전송 전력량이다. 이를 이용하여 증계기에서 수신하는 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_{RS} = S_{RS} P_{BS} d_{RS}^{-\alpha} + I \quad (2)$$

기지국과 증계기 사이의 무선 전송 채널에서, S_{RS} 는 표준편차 σ_{RS} 인 로그-정규분포(log-normal distribution)에 따르는 웨도우 페이딩 채널이며 α 는 신호의 거리 감쇄 계수(path loss exponent)이고 I 는 외부 셀에서 오는 간섭량을 의미한다. 기지국으로부터 거리 r 에 위치하는 단말이 수신하는 신호는 증계기 띠의 내부와 외부에 존재하는 사용자들에 대하여 각각 다음과 같이 표현된다.



① BS-RS Link ② RS-MS Link

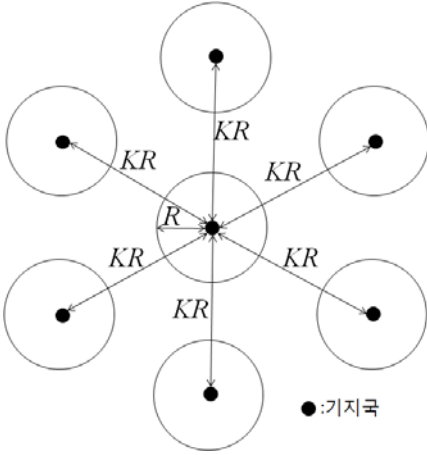


Fig. 1. 2-hop cellular system model with relays
그림 1. 중계기를 사용하는 2-홉 셀룰러 시스템

$$y_{MS}(r) = \begin{cases} S_{MS,I} r^{-\alpha} P_{BS} x + I, & 0 < r \leq d_R \\ S_{MS,O} (r - d_R)^{-\alpha} P_{A} y_{RS} + I, & d_R < r \leq R \end{cases} \quad (3)$$

$S_{MS,I}$ 와 $S_{MS,O}$ 는 중계기 때 내부와 외부에 있는 단말들이 겪는 페이딩을 나타내며, P_A 는 중계기에서 증폭된 전송 전력으로 기지국에서 수신된 원본 신호 x 의 전송 전력을 1로 정규화하면 다음과 같이 표현된다.

$$P_A = \frac{P_{RL}}{S_{RS} d_{RS}^{-\alpha} P_{BS} + I} \quad (4)$$

성능 비교를 위한 단일 홉 전송에서 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{MS}(r) = S_{MS}(r)^{-\alpha} P_T x + I \quad (5)$$

본 논문에서 중계기를 사용하는 셀룰러 시스템의 성능을 평가하기 위하여 오수신 확률을 사용한다. 오수신 확률을 분석하기 위하여 수식 (2)와 (5)에 대해서 외부 셀 간섭량의 효과를 정량적으로 표현할 필요가 있다.

$$y_{MS}(r) = \begin{cases} S_{MS,I} r^{-\alpha} P_{BS} x + I, & 0 < r \leq d_R \\ S_{MS,O} (r - d_R)^{-\alpha} P_{A} y_{RS} + I, & d_R < r \leq R \end{cases} \quad (3)$$

$S_{MS,I}$ 과 $S_{MS,O}$ 는 중계기 때 내부와 외부에 있는 단말들이 겪는 페이딩을 나타내며, P_A 는 중계기에서 증폭된 전송 전력으로 기지국에서 수신된 원본 신호 x 의 전송 전력을 1로 정규화하면 다음과 같이 표현된다.

$$P_A = \frac{P_{RL}}{S_{RS} d_{RS}^{-\alpha} P_{BS} + I} \quad (4)$$

성능 비교를 위한 단일 홉 전송에서 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{MS}(r) = S_{MS}(r)^{-\alpha} P_T x + I \quad (5)$$

본 논문에서 중계기를 사용하는 셀룰러 시스템의 성능을 평가하기 위하여 오수신 확률을 사용한다. 오수신 확률을 분석하기 위하여 수식 (2)와 (5)에 대해서 외부 셀 간섭량의 효과를 정량적으로 표현할 필요가 있다.

2. 최적의 중계기 위치 설정 및 오수신 확률

본 단락에서는 중계기를 사용하는 경우, 간섭량의 변화를 정량적으로 나타내고 이로부터 오수신 확률에 대하여 분석해 보도록 한다.

가. 간섭 신호의 표현

중계기가 기지국으로부터 거리 d_{RS} 에 위치한 육각 셀들이 대칭적으로 분포하고 있는 시스템에서 (1)의 전송 전력 제한을 만족하면서 셀의 중심이 KR 만큼 떨어져 있는 다른 셀에 미치는 평균 간섭량은 다음과 같이 표현된다. K 는 주파수 재사용 거리 계수이다.

$$I(KR) = P_{BS}(KR)^{-\alpha} + P_{RS}(KR - d_{RS})^{-\alpha} \quad (6)$$

기존의 다중 셀 구조에서 오수신 확률 분석과 일관성을 유지하기 위하여, 관심을 두고 있는 셀에 (6)에서 계산된 $I(KR)$ 만큼의 영향을 주는 가상의 셀에서 전송 전력이 $P_E(KR)^{-\alpha}$ 라고 할 때, P_E 는 d_{RS} 의 함수이므로 다음과 같이 표현 가능하다.

$$P_E(d_{RS}) = P_{BS} + P_{RS} \left(1 - \frac{d_{RS}}{KR}\right)^{-\alpha} \quad (7)$$

$d_{RS} > 0$ 인 경우에 대하여 $P_E(d_{RS}) > P_T$ 이므로 중계기의 사용은 결국 외부 셀들에 주는 간섭을 높이는 효과를 보이게 됨을 알 수 있다.

나. 신호 대 간섭 잡음 비

신호 대 간섭 및 잡음 비율 (signal to interference and noise ratio)는 중계기의 위치를 기준으로 내부에 있는 단말과 외부에 있는 단말에 대하여 다르게 표현된다. 본 논문에서는 현재 관심을 두고 있는 셀에 가장 많은 영향을 주는 주파수 재사용 계수 K 인 시스템에서 인접한 여섯 개의 외부 셀의 간섭을 고려한다.

기지국과 중계기 사이 r 에 위치한 단말에 대하여 신호 대 간섭 및 잡음 비율은 다음과 같이 표현된다.

$$SINR_f(r) = \frac{S_{MS,I} P_{BS} r^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^6 S_i P_f(d_i)^{-\alpha} + N_0} \quad (8)$$

(8)에서 r 은 $0 < r < d_{RS}$ 의 범위를 갖는다. i 는 그림1에서와 같이 간섭을 주는 외부 셀을 나타내며 d_i 는 각 외부 셀로부터 r 위치에 있는 단말까지의 거리, $S_{MS,I}$ 는 중계기 때 내부 단말이 기지국으로부터 신호를 수신할 때 겪는 표준편차가 σ_S 인 로그-정규분포를 따르는 섀도우 페이딩이며 S_i 는 외부 셀 i 로부터 수신된 간섭 신호의 표준편차가 σ_S 인 로그-정규분포를 따르는 섀도우 페이딩이다. N_0 는 수신기의 열잡음이다. 여기서 우리의 연구 초점은 중계기를 사용하였을 때 간섭량의 변화에 따른 중계기의 내/외부의 오수신 확률에 대한 분석이다. 따라서 분석상의 편의를 위하여 d_i 는 $KR - d_S$ 으로 대체한다. $d_i > KR - d_S$ 관계가 만족되므로 중계기 내부에 있는 단말에 미치는 영향이 최악의 상황(the worst case)로 반영된다. 모든 셀이 같은 전송 전력을 사용하고, d_{RS} 위치에 중계기가 설치되었다고 가정할 때 P_i 는 (7)에서 구한 $P_E(d_{RS})$ 로 대체할 수 있다. 일반적으로 간섭량이 수신기 열잡음 N_0 보다 매우 크다고 가정할 때, 수식(8)를 다시 표현하면 수식 (9)와 같이 표현된다.

$$SINR_f(r) \approx \frac{S_{MS,I} P_{BS} r^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^6 S_i P_E(d_{RS})(KR - d_{RS})^{-\alpha}} \quad (9)$$

같은 방법으로 중계기 때 외부에 위치하여 중계기로부터 신호를 수신하는 단말의 신호 대 간섭 및 잡음 비율은 다음과 같이 표현된다.

$$SINR_d(r) \approx \frac{S_{MS,O} P_{RS}(r - d_{RS})^{-\alpha}}{S_{MS,O} I_{RS}(d_{RS})(r - d_{RS})^{-\alpha} + \sum_{i=1}^6 S_i P_E(d_{RS})(KR)^{-\alpha}} \quad (10)$$

(10)에서 r 은 $d_{RS} < r < R$ 의 범위를 갖는다. $S_{MS,O}$ 는 중계기로부터 신호를 수신하는 단말이 겪고 있는 로그-정규분포를 따르는 섀도우 페이딩이며, $I_{RS}(d_{RS})$ 는 중계기에서 수신된 간섭량이 증폭된 성분이다. (7)를 이용하여 표현하면 수식 (11)과 같이 된다.

$$I_{RS}(d_{RS}) = P_A \sum_{i=1}^6 S_i P_E(d_{RS})(KR - d_{RS})^{-\alpha} \quad (11)$$

본 논문에서 구하고자 하는 것은 (1)의 전송 전력의 제한조건이 있는 상태에서 셀 전체의 오수신 확률을 최소화하는 중계기 위치 결정이다. 중계기 때 내부와 외부에 위치한 단말의 신호 대 간섭 및 잡음비

에 대한 식 (8)과 (10)으로 부터 오수신 확률을 유도한다.

중계기 때 내부에 위치한 단말의 신호 대 간섭 및 잡음 비 식 (8)에 로그(log) 연산을 취하면 다음과 같이 표현된다.

$$\log(SINR_f(r)) = \log(S_{MS,I} P_{BS} r^{-\alpha}) - \log\left(\sum_{i=1}^6 S_i P_E d_{RS}(KR - d_{RS})^{-\alpha}\right) \quad (12)$$

에서 분자에 해당하는 부분은 평균값이 $\log(P_{BS}) - \alpha \log(r)$ 이고 표준편차가 σ_S 인 정규분포를 따르는 랜덤변수로 표현 된다. 분모에 해당하는 부분은 윌킨슨 기법 (Wilkinson's method)에 의하여 로그-정규 근사화 (log-normal approximation)에 의하여 평균값은 $\log(P_E(d_{RS})) - \alpha \log(KR - d_{RS}) + 1.5 \log(6)$ 이 되고 표준편차는 $\sqrt{\sigma_S^2 - \log(6)}$ 인 정규분포를 따르는 랜덤변수로 나타낼 수 있다[6]. 따라서 $\log(SINR_f(r))$ 는 평균값 μ_I 와 표준편차 σ_I 인 정규분포로 표현 가능하며 μ_I 와 σ_I 는 다음 수식과 같은 값을 가지게 된다.

$$\mu_I = \log\left(\frac{P_{BS}}{P_E(d_{RS})}\right) + \alpha \log\left(\frac{KR - d_{RS}}{r}\right) - \frac{3}{2} \log(6) \quad (13)$$

$$\sigma_I = \sqrt{2\sigma_S^2 - \log(6)}$$

이로부터 유도되는 중계기 때 내부에 위치한 단말들의 오수신 확률은 다음과 같은 수식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$P(\log(SINR_f) < X_{th,I}) = \frac{1}{R^2} \int_0^{d_{RS}} 2r \left(1 - Q\left(\frac{X_{th,I} - \mu_I}{\sigma_I}\right)\right) dr \quad (14)$$

$Q(X) = 1/\sqrt{2\pi} \int_X^\infty e^{-x^2/2} dx$ 이고, $X_{th,I}$ 는 중계기 때 내부에 위치하는 단말이 요구하는 최소한의 신호 대 간섭 및 잡음비이다.

다음으로 중계기 때 외부에 위치한 단말의 오수신 확률을 구해보도록 한다. (10)에서 볼 수 있는 것과 같이 중계기에서 재송신된 신호와 간섭 신호는 같은 전파 경로를 겪게 되므로 분모와 분자에서 거리 감쇄 부분과 섀도우 페이딩에 해당하는 부분을 나누어 주게 되면 (10)식은 다음과 같이 다시 표현이 가능하다.

$$SINR_d(r) = \frac{P_{RS}}{I_{RS}(d_{RS}) + \frac{1}{S_{MS,O}(r - d_{RS})^{-\alpha}} \sum_{i=1}^6 S_i P_E(d_{RS})(KR)^{-\alpha}} \quad (15)$$

(15) 식의 $I_{RS}(d_{RS})$ 는 (11)에서 정의 되었다. 고정형 중계기가 가정되어 있는 상황에서 각 기지국로부터

오는 신호는 중계기에 도달하기 까지 동일한 지형적 특성을 겪게 되므로 $I_{RS}(d_{RS})$ 는 랜덤 변수가 아니며, 중계기에 도달하는 평균적인 간섭량으로 정의하는 것이 타당하다. 따라서 중계기 때 외부에 위치한 단말들의 오수신 확률은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$=P\left(\log\left(\frac{1}{S_{MS,c}(r-d_{RS})^{-\alpha}} \sum_{i=1}^6 S_i P_E d_{RS}(KR)^{-\alpha}\right) > \log\left(\frac{P_{RS}}{e^{X_{a,o}}} - I_{RS}(d_{RS})\right)\right) \quad (16)$$

(16)번 식에서 $\log(1/S_{MS,c}(r-d_{RS})^{-\alpha})$ 는 평균값이 $\alpha \log(r-d_{RS})$ 이고 표준편차는 σ_S 인 정규분포를 따르는 랜덤 변수가 된다. $X_{a,o}$ 는 중계기 때 외부에 위치한 단말이 요구하는 최소한의 신호 대 간섭 및 잡음비이다. $\log(\sum_{i=1}^6 S_i P_E d_{RS}(KR)^{-\alpha})$ 는 같은 방법으로 윌킨슨 기법에 의해서 평균값은

$\log(P_E(d_{RS})) - \alpha \log(KR) + 1.5 \log(6)$ 이며 표준 편차는 $\sqrt{\sigma_S^2 - \log(6)}$ 인 정규분포 분포를 따르는 랜덤 변수로 묘사될 수 있다. 따라서 두 랜덤 변수의 합은 평균값 μ_I 와 표준 편차 σ_O 를 가지는 정규분포로 표현 가능 하다.

$$\mu_O = \log(P_E(d_{RS})) - \alpha \log\left(\frac{KR}{r-d_{RS}}\right) + \frac{3}{2} \log(6) \quad (17)$$

$$\sigma_O = \sqrt{2\sigma_S^2 - \log(6)}$$

(16)과 (17)을 이용하여 중계기 때 외부에 위치한 단말들의 오수신 확률을 구하면 다음과 같다.

$$F(\log(SINR_O) < X_{a,o}) \quad (18)$$

$$= \frac{1}{R^2} \int_{d_{RS}}^R 2r Q\left(\frac{\log\left(\frac{P_{RS}}{e^{X_{a,o}}} - I_{RS}(d_{RS})\right) - \mu_O}{\sigma_O}\right) dr$$

따라서 셀 전체의 오수신 확률은 (14)와 (18)의 합으로 구할 수 있다.

비교를 위하여 단일 홉 전송을 하는 셀의 오수신 확률을 구해보기로 한다. 이 경우 중계기 때 내부에 위치한 단말들의 오수신 확률을 구한 (14)를 이용하여, 현재 관심을 두고 있는 기지국 및 간섭을 주는 기지국들 모두가 P_T 의 전송 전력으로 반경 R 에 대하여 서비스 하는 경우를 계산하면 되므로 오수신 확률은 (14)에서 평균값과 표준편차 값을 다음 (19)의 값으로 대체한 것을 계산하면 된다.

$$\mu_{Single-hop} = \alpha \log\left(\frac{KR-d_{RS}}{r}\right) - \frac{3}{2} \log(6) \quad (19)$$

$$\sigma_{Single-hop} = \sigma_I$$

그림 2는 주파수 재사용 계수 $K=5$ 일 때, 중계기 때의 내/외부의 단말에 요구되는 최소 신호 대 간섭 및 잡음비가 각 10dB인 환경에서 중계기의 전송 전력이 0.1, 0.5 와 0.9인 경우에 대한 오수신 확률을 (14)와 (18)에 근거하여 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 중계기 전송 전력에 따른 최소 오수신 확률 지점이 존재하며 중계기 전송 전력이 증가함에 따라서 최소 오수신 확률이 발생하는 중계기 위치가 셀 안쪽으로 이동하는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 (7)에서 보인 바와 같이 간섭량은 중계기 전송 전력과 d_{RS} 에 비례하는 P_E 에 의하여 결정된다. 따라서 중계기의 전송전력이 클수록 중계기는 셀 안쪽에 위치하여야 간섭의 증가를 피할 수 있다. 한 가지 더 중요하게 보아야 할 것은 그림 2에서 별도로 표시된 선의 값이 650m 이후에 존재하지 않는다는 것이다. 그 이유는 기지국과 중계기 사이에서 이미 오수신이 발생하는 경우를 의미하는데 (18) 식에서 그 이유를 찾을

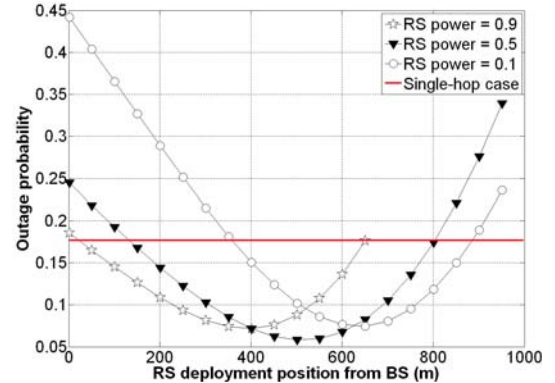


Fig. 2. Outage probability of two-hop cellular system
그림 2. 2-홉 셀룰러 시스템의 오수신 확률

수 있다. (18)에서 $(P_{RS}/I_{RS}(d_{RS})) < e^{X_{a,o}}$ 인 조건에 대해서 $\log(P_{RS}/e^{X_{a,o}} - I_{RS}(d_{RS}))$ 는 실수 값을 가지지 못하게 되고, 이는 중계기에서 기지국으로부터 수신된 신호가 중계기에서 오수신이 발생하여 해당 신호가 중계되어 단말에서 최종 수신하더라도 무조건 오수신이 발생하게 되는 경우이다. 따라서 $(P_{RS}/I_{RS}(d_{RS})) = e^{X_{a,o}}$ 를 만족하는 d_{RS} 는 중계기 설치한계 지점으로 주파수 재사용 계수 K 값과 중계기 전송 전력 P_{RS} 가 주어진 상황에서 기지국으로부터 d_{RS} 보다 먼 거리에 중계기를 설치하여서는 안 된다.

단일 홉 전송의 경우 (19)에 의하여 실선으로 나타내었다. 중계기가 기지국에 너무 가까이 설치되거나 멀리 설치된 경우 2-홉 시스템의 오수신 확률이 단일 홉 전송하는 경우 보다 커지는 경우가 발생한다. 너무 가까이 설치된 중계기의 경우 중계기 띠 이후 지역을 서비스하기에 중계기 전송 전력이 모자라기 때문이며, 최적의 중계기 위치 보다 멀리 설치된 중계기에서 오수신 확률이 증가함은 셀 외부로 벗어나는 간섭량이 증가하기 때문이다. 중계기 전송 전력에 따라서 최소 오수신 확률은 조금씩 차이가 나는 주파수 재사용 계수 K 와 관련하여 다음 장에서 정리하도록 하겠다.

3. 분석 및 실험 결과

중계기의 위치 d_{RS} 중계기의 전송 전력 P_{RS} 간섭을 주는 셀의 거리 KR 에 따른 오수신 확률은 (14)와 (18)을 이용하여 계산할 수 있다. 그러나 (14)와 (18)의 수식이 Q 함수로 구성되어, 추가적인 조작이 불가하다. 차선책으로 P_{RS} , KR , $X_{th,I}$ 와 $X_{th,O}$ 이 주어진 조건 하에서 셀 전체의 오수신 확률을 최소화하는 최적의 중계기 위치 d_{opt} 를 (14)와 (18)을 이용하여 수치적인 방법으로 구할 수 있다.

$$d_{opt} = \arg \min_{d_{RS} \in \Theta} A(\rho(\log(SINR) < X_{th}(\theta))) \quad (20)$$

$$K, P_{RS}, X_{th,I}, X_{th,O} \in \Theta$$

수식 (20)을 이용하여 다양한 K 에 대하여 주어진 P_{RS} , KR , $X_{th,I}$ 와 $X_{th,O}$ 에 따른 최적의 중계기 위치는 그림 3에 도시되었다. 거리 감쇄 계수 $\alpha=3.74$, 로그 정규 분포를 따르는 섀도우 페이딩의 표준편차 $\sigma_s=8dB$ 그리고 셀 반경 R 은 1000m를 가정하였다. 중계기 전송 전력은 0.1에서 0.9까지 0.1 단위로 표기하였고 중계기 설치 위치는 1m에서 999m 사이에 1m단위로 반영하였다.

그림 3에서 최적의 중계기 위치는 K 에 비례하고 중계기 전송 전력에 반비례하는 경향을 나타낸다. K 값은 간섭을 주는 셀들의 거리에 비례하므로 K 값이 작을수록 중계기는 기지국에 가까이 설치되어 중계기에 의해서 추가로 발생하는 간섭량을 줄이는 상태에서 최소 오수신 확률을 실현할 수 있다. K 값이 증가하면 반대의 이유로 최적의 중계기 위치가 점차 셀 외곽으로 이동한다. 중계기 전송 전력의 증가와 최적 중계기 위치 관계도 같은 맥락에서 이해 가능한 것으로 중계기 전송 전력이 클수록 추가적인 간섭량이 증가하므로 최적의 중계기 위치는 셀 내부로 이동하는

경향을 보인다.

그림 4는 중계기 전송 전력이 변화함에 따라 수식 (20)에 의해서 구한 최소 오수신 확률을 도시하였다. 수치적인 분석을 통해서 K 값에 따라 전체 오수신 확률을 최소화 하는 중계기 전송 전력이 변화함을 알 수 있다. 그림 4에서 최소 오수신 확률을 얻을 수 있는 중계기 전송 전력에 대해서 최적의 중계기 위치는 그 값을 그림3의 결과를 이용하여 구할 수 있다. 최종적으로 주어진 K 에 대하여 최소 오수신 확률을 실현 할 수 있는 최적의 중계기 설치 위치는 다음의 표-1에서 정리하였다. 주파수 채널의 재사용 거리에 따라서 최소 오수신 확률을 얻는 중계기 위치와 중계기 전송 전력이 존재한다. 해당 위치에 중계기를 설치하고 최대 전송 전력값을 결정해 주어 K 가 3이상인 경우에 대해서 오수신 확률 이득을 얻을 수 있다. 단 K 가 2인 경우와 같이 인접셀이 가까이 붙어 있는 경우 셀 전체의 평균 오수신 확률을 개선하는 문제에 있어서 중계기의 설치에 오히려 셀룰러 시스템의 용량을 감소시킬 수도 있다는 결론을 얻을 수 있다.

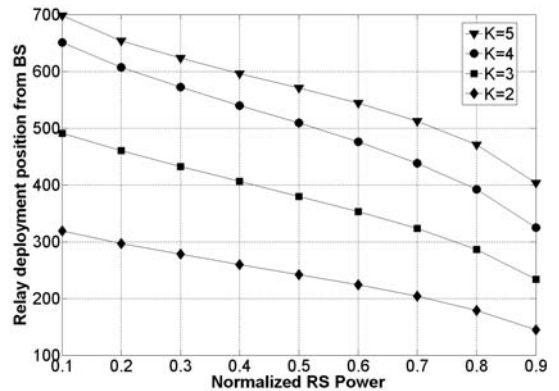


Fig. 3. Optimum relay distances with respect to normalized relay transmission power in two-hop cellular system

그림 3. 2-홉 셀룰러 시스템에서 중계기의 정규화된 전송 전력에 대한 최적의 중계기 설치 거리

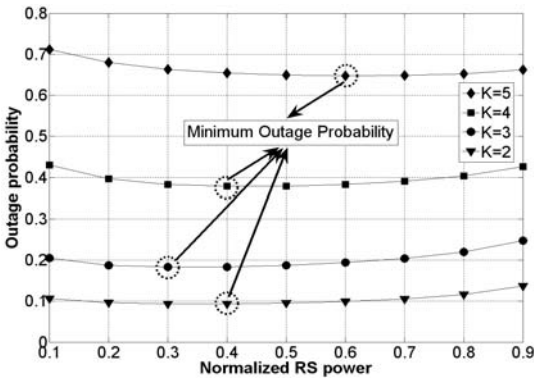


Fig. 4. Relay transmission power with minimum outage probability

그림 4. 우수신 확률을 최소로 하는 중계기 전송 전력

Table 1. Optimum relay deployment position

표 1. 최적의 중계기 위치 선정

	$K=2$	$K=3$	$K=4$	$K=5$
d_{opt}	223m	408m	573m	598m
P_{RS}	0.6	0.4	0.3	0.4
$P_{min, outage}$	64.8%	37.9%	18.3%	9.4%
단일홉 전송 대비 우수신 확률 개선	-5.8%	1.4%	7.4%	8.3%

III 결론

다중 홉 중계기의 사용은 음영지역 해소와 통신 가능 거리 연장을 위한 기존의 전통적 역할에서 셀룰러 시스템의 전송 용량을 증대시키기 위한 역할로 그 활용 영역이 확대되어 가고 있다. 본 논문에서는 기존에 다루어지지 않은 중계기사용에 따른 간섭량 증가 문제에 착안하여 중계기 전송 전력과 주파수 재사용 거리 계수 K 에 따른 최적의 중계기 위치를 결정하였다. 본 논문의 분석에 따르면 2-홉 증폭 후 전달 중계기를 사용하는 셀룰러 시스템에서 K 가 3이상인 경우에 대해서 우수신 확률 이득을 얻을 수 있으며, 이 때 최적의 중계기 설치 거리는 셀 반경 1000m 셀 기준으로 기지국으로부터 408m이다. 그리고 주파수 재사용 거리 계수가 증가함에 따라 최적의 중계기 설치 거리는 셀 외곽 방향으로 이동한다. 반면, 주파수 재사용 거리가 지나치게 가까운 경우 (예: $K=2$) 중계기 사용은 셀 평균 우수신 확률 측면에서 손실이 될 수 있으므로 중계기 사용이 추천되지 않음을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] V. Genc, S. Murpht, Y. Yu, and J. Murphy, "IEEE 802.16j Relay-based Wireless Access Networks: An Overview," IEEE Wireless Communications, pp. 56-63, Oct. 2008
- [2] K. Yamamoto and S. Yoshida, "Capacity Enhancement of CDMA Cellular Systems by Two-hop relaying" Information, Communications and Signal Processing, 2003 and the Fourth Pacific Rim Conference on Multimedia. Proceedings of the 2003 Joint Conference of the Fourth International Conference on. Volume 1, pp. 324 - 328, Dec. 2003
- [3] J. Zhang, C. Shao, Y. Wang, and P. Zhang, "Performance of a Two-hop Cellular System with Different Power Allocation Schemes," IEEE Vehicular Technology Conference, 2004
- [4] Ki-Ho Lee, Ki-Young Han, Jee-Young Song, Dong-Ho Cho, "Capacity enhancement of uplink channel through spatial reuse in multihop cellular networks", IEEE Communications Letters Vol.10, Issue 2, pp. 76 - 78, Feb. 2006
- [5] Jaeweon Cho, Haas, Z.J, "On the throughput enhancement of the downstream channel in cellular radio networks through multihop relaying", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 22, Issue 7, pp. 1206 - 1219, Sept. 2004
- [6] Fortunato Santucci, Marco Pratesi, Marina Ruggieri and Fabio Graziosi, "A General Analysis of Signal Strength Handover Algorithms with Cochannel Interference", IEEE Trans. On Comm., Vol. 48, pp. 231-241, Feb. 2000

저 자 소 개

김 정 수 (정회원)



1996년 : 순천대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1998년 : 전북대학교 대학원 정보통신공학과 (공학석사)
 2003년 : 전북대학교 대학원 컴퓨터공학과 (공학박사)
 2002년 6월~현재 : 한국사이버대학교 컴퓨터정보통신학부 부교수

<주관심분야> 이동통신, 채널코딩, 변복조, 멀티미디어통신