

DS-CDMA 셀룰러 시스템에서 통화 부하에 의한 소프트 핸드오프의 영향

정회원 김 남 수*

Effect of the traffic load on soft handoff in DS-CDMA cellular systems

Nam-Soo Kim* *Regular Member*

요 약

하드 핸드오프를 하는 애널로그 셀룰러 시스템에서는 수신된 신호의 세기만을 가지고 핸드오프를 결정하며, 대부분의 논문들도 수신신호의 세기를 기준으로 할 때의 평균 핸드오프 수를 유도하고있다. 그러나 동일한 송신 주파수를 사용하는 DS-CDMA(direct-sequence code division multiple access) 셀룰러 시스템에서는 수신된 신호 대 간섭전력의 비로 소프트 핸드오프를 하고있다. 본 논문에서는 셀의 통화 부하를 함수로 하는 파일럿 신호 대 간섭비를 유도하였고, 이때의 평균 핸드오프의 수를 해석적으로 유도하였다. 계산 결과 통화부하가 작을 때에는 핸드오프 수에 큰 영향을 미치지 않았으나, 통화 부하가 증가하면 소프트 핸드오프의 수에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Analog cellular systems with hard handoff determine the handoff based on the received signal strength only. And most of the handoff related researches are focused on the average numbers of handoff as a function of the received signal strength. However DS-CDMA cellular systems which use same carrier frequency in every cells, soft handoff based on the received pilot signal-to-interference ratio is utilized. The main objective of this paper, we derive the received pilot signal-to-interference ratio which is a function of traffic load, and obtained the mean numbers of soft handoffs numerically. We notice that the mean numbers of soft handoff are not affected by the light traffic load, while strongly affected by the heavy traffic load.

I. 서 론

셀룰러 이동통신 시스템에서 이동국이 셀간을 이동할 때 통화를 계속해서 유지하기 위한 핸드오프는 시스템 요구사항의 필수적인 요소중의 하나이다. 애널로그 이동통신 시스템인 FDMA(Frequency division multiple access)방식에서는 핸드오프를 위해서는 기존의 통화하던 채널을 절단 한 후 새로이 통화를 하고자 하는 셀의 새로운 주파수로 채널을 변경한 후 통화를 계속하는 선절단 후연결 방식인 하드 핸드오프(Hard handoff)를 하고있다.

한편 DS-CDMA(Direct sequence-code division multiple access) 셀룰러 시스템에서는 송신 캐리어 주파수를 인접 셀에서도 공통으로 사용하기 때문에 핸드오프시에 먼저 통화 채널을 인접 셀과 연결한 후 수신된 신호의 세기가 일정 임계값 이하가 되면 기존의 홈셀(Home cell)에서 새로운 셀로 호를 전환하는 선연결, 후절단 방식인 소프트 핸드오프(Soft handoff)를 택하고있다^[1].

핸드오프에 관한 연구는 주로 수신된 신호의 세기를 기준으로 하여 평균 핸드오프의 수를 해석하였는데, R. Vijayan 과 M. Holtzman은 수신된 신호의

* 청주대학교 정보통신공학과

논문번호: 00286-0726, 접수일자: 2000년 7월 26일

* 본 연구는 과학기술부 한국과학재단지정 청주대학교 정보통신연구센터의 지원에 의한 것입니다.

세기가 임계값을 차단하는 율을 포아송(Poisson) 프로세스로 가정하고, 히스테리시스 레벨을 함수로하는 평균 핸드오프수를 유도하였다^[2]. 한편 N. Zhang 과 M. Holtzman은 Vijayan의 논문을 확장하여 수신된 신호의 세기가 절대레벨보다 크다면 핸드오프를 하지 않는 조건을 첨가하여 히스테리시스 레벨 및 절대레벨을 함수로하는 평균 핸드오프 수를 유도하였다^[3]. 그 외에도 핸드오프에 관한 대부분의 연구는 수신신호의 세기를 기준으로 핸드오프를 수행하는 방식의 분석이 주류를 이루고있다^[4,5].

한편 동일한 주파수를 사용하는 DS-CDMA 셀룰러 시스템에서 수신된 신호의 세기는 회파와 간섭파의 합이 되므로 수신된 신호의 세기가 크다고 하더라도 항상 신호 대 간섭비가 큰 것은 아니며, 반대로 수신된 신호의 세기가 작다고 해서 항상 신호 대 간섭비가 작은 것은 아니다. 이와 같은 이유 때문에 현재 사용되고 있는 DS-CDMA 셀룰러 시스템에서는 순방향 채널의 파일럿 신호세기 와 간섭 신호세기의 비, E_c/I_0 ,를 기준으로 핸드오프를 하고있다. 여기서 간섭전력은 홈 셀 및 타 셀로부터의 간섭을 모두 포함하는데, 홈 셀에서는 파일럿 전력 이외의 모든 송신전력이 간섭전력이 되고, 타 셀에서는 모든 송신전력이 간섭이 된다. 특히 기지국은 통화량이 계속하여 가변 되므로, 이동국이 수신하는 E_c/I_0 는 기지국의 통화 부하(Traffic load)에 따라서 변하게 된다.

그러므로 본 논문에서는 통화량의 변화에 따른 순방향 E_c/I_0 를 유도하고, 이때의 평균 핸드오프의 수를 유도한다. 본 논문의 구성은 제2장에서 해석하고자 하는 DS-CDMA 셀룰러 시스템의 모델을 설정하고, 제3장에서는 핸드오프 수를 이론적으로 유도 및 분석한다. 제4장에서 실제 예를 수치 해석적으로 분석한 후, 제5장에서 결론 및 향후 연구방향에 관하여 서술한다

II. 시스템 모델

이 논문에서 해석하고자 하는 시스템 모델을 그림1에 나타내었는데, 이동국은 홈셀(Home cell)로부터 목표셀(Target cell)로 이동하는 상황을 가정한다. 여기서 홈셀은 현재 이동국이 통화를 하고있는 셀이며, 목표셀은 핸드오프를 하고자 하는 셀을 의미한다.

이동국이 홈 기지국으로부터 수신하는 파일럿 신호 대 간섭비 (E_c/I_0)₀는 다음식과 같이 쓸 수 있다.

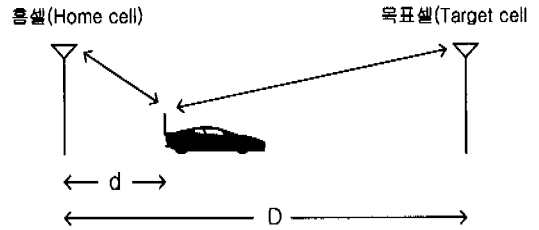


그림 1. 시스템 모델

$$\left(\frac{E_c}{I_0}\right)_0 = \frac{\beta P_0}{(1-\beta) \sum_{i=1}^k v_i \phi_i P_0 + \beta P_1 + (1-\beta) \sum_{i=1}^k v_i \phi_i P_1} \quad (1)$$

이 식에서 분자는 파일럿 수신전력이며, 분모의 첫 번째 항은 홈 셀의 통화채널로부터의 간섭, 두 번째 항은 목표셀의 파일럿 간섭, 세번째 항은 목표셀의 통화채널 간섭을 의미한다. 그리고 P_0 와 P_1 은 각각 홈 기지국과 목표 기지국으로부터 수신하는 총 수신전력이다. 이미 잘 알려져 있는 바와 같이 IS-95 DS-CDMA 셀룰러 시스템의 기지국으로부터 송출하는 신호는 파일럿 채널, 동기채널, 호출채널, 그리고 통화채널의 신호를 포함하고있다^[6]. 여기서는 수신된 신호는 파일럿 채널의 신호와 통화채널의 신호로 이루어져 있다고 가정하였다 만일 동기채널, 호출채널의 신호를 송출신호에 포함한다면 단순히 P_0 및 P_1 을 증가시키면 된다^[7]. 그리고 β 는 기지국 총 전력중 파일럿 채널에 할당된 전력비이고, $1-\beta$ 는 통화채널에 할당된 전력비이다. k 는 셀당 사용자의 수인데, 평균이 λ/μ [Erlang]인 포아송(Poisson) 랜덤변수이다; λ [calls/sec]는 호의 도착율이고 $1/\mu$ [sec/calls]는 서비스 시간이다. v_i 는 i 번째 사용자의 음성 활성화율(voice activity factor)이다. 그리고 음성이 활성화될 확률은 $P(v=1)=\rho$ [8]이다. ϕ_i 는 $1-\beta$ 중 i 번째 사용자에게 할당된 전력비이며^[7]

$$\sum_{i=1}^M \phi_i = 1 \quad (2)$$

이다. 여기서 M 은 기지국의 통화채널의 수이다. 이동국이 홈 기지국으로부터 떨어진 거리가 d 미터이고, 수신된 신호전력을 홈 기지국 및 목표 기지국으로부터 각각 $P_{0_dB}(d)$ 및 $P_{1_dB}(d)$ 라고 한다면

$$\begin{aligned} P_{0_dB}(d) &= T_1 - \gamma_1 0 \log(d) + u(d) \\ P_{1_dB}(d) &= T_2 - \gamma_1 0 \log(D-d) + v(d) \end{aligned} \quad (3)$$

이며, 여기서 T_1 및 T_2 는 각각 홈 기지국 및 목표 기지국의 송신전력이다. 그리고 γ 는 경로손실 감쇄 지수로 3에서 5사이의 값을 갖는다^[3]. D 는 두 기지국 사이의 거리이며, $u(d)$ 및 $v(d)$ 는 서로 독립이며, 동일한 분포를 갖는 평균이 영인 가우시안 랜덤 과정이다. 식(1)의 P_0 및 P_1 은 $P_{0,db}$ 및 $P_{1,db}(d)$ 와 각각 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned} P_0 &= 10^{P_{0,db}/10} \\ P_1 &= 10^{P_{1,db}/10} \end{aligned} \quad (4)$$

한편 이동국이 목표 셀로부터 수신하는 파일럿 신호대 간섭비 $(E_c/I_0)_1$ 는 식(1)로부터 P_0 는 P_1 으로, P_1 은 P_0 로 대치하면 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{E_c}{I_0}\right)_1 = \frac{\beta P_1}{(1-\beta)\sum_{i=1}^K v_i \phi_i P_1 + \beta P_0 + (1-\beta)\sum_{i=1}^K v_i \phi_i P_0} \quad (5)$$

예측할 수 있듯이, 이동국이 목표셀로 근접함에 따라서 목표셀로부터 수신된 파일럿 신호 대 간섭비 $(E_c/I_0)_1$ 은 점차 증가하고, 홈 기지국으로부터 수신한 $(E_c/I_0)_0$ 는 점차 감소한다.

III. 평균 핸드오프의 수

무선채널을 통하여 수신된 파일럿 신호 대 간섭비는 대수정규분포(Log-normal) 분포를 갖는다^[8]. 그러므로 식(1)의 평균과 표준편차를 구하기 위하여 파일럿 신호 대 간섭비를 랜덤변수 W , $W = Y/Z$, 로 나타내자. 여기서 Y 와 Z 는 각각 식(1)의 분자 및 분모인데, 랜덤변수 Y 와 Z 가 상호 독립이므로 식(1)의 평균값은

$$\begin{aligned} E[W] &= E\left[\frac{Y}{Z}\right] = E[Y] \int_z f(z) dz \\ &\approx \beta \exp\left\{\frac{(\alpha\sigma_0)^2}{2} + \alpha m_0\right\} \left\{\frac{1}{\alpha-1} + \frac{\text{var}(z)}{\alpha}\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

으로 유도할 수 있으며(부록), 여기서 σ_0 및 m_0 는 각각 대수정규 랜덤변수 P_0 의 지수의 표준편차 및 평균값이다. 그리고 α 는 $\ln 10/10$ 이다. $E[z]$ 및 $\text{var}(z)$ 는 각각 랜덤변수 Z 의 평균과 표준편차이다.

W 의 2차 모멘트는 다음식과 같다(부록)

$$\begin{aligned} E[W^2] &= E[y^2] \int_z \frac{1}{z^2} f(z) dz \\ &\approx \beta^2 \exp[2(\alpha\sigma_0)^2 + 2\alpha m_0] \left\{\frac{1}{E^2(z)} + \frac{3 \text{var}(z)}{E^4(z)}\right\} \end{aligned} \quad (7)$$

순방향 전력제어 범위는 역방향 전력제어범위보다 적으므로, 기지국은 M 개의 통화채널을 갖고있고 가입자 i 에 할당되는 전력율, ϕ_i 은 $1/M$ 로 일정하다고 가정하자. P_0 및 P_1 이 서로 독립이므로^[8], 랜덤변수 Z 의 평균은

$$\begin{aligned} E[z] &= E\left[\frac{(1-\beta)}{M} \sum_{i=1}^K v_i P_0\right] + E\left[\left(\beta + \frac{1-\beta}{M} \sum_{i=1}^K v_i\right) P_1\right] \\ &= \frac{\lambda}{\mu} \rho \frac{1-\beta}{M} E[P_0] + \left[\beta + \frac{\lambda}{\mu} \rho \frac{1-\beta}{M}\right] E[P_1] \end{aligned} \quad (8)$$

이고, Z 의 분산은

$$\begin{aligned} \text{var}(z) &= \text{var}\left(\frac{1-\beta}{M} \sum_{i=1}^K v_i P_0\right) + \text{var}\left(\beta + \frac{1-\beta}{M} \sum_{i=1}^K v_i\right) P_1 \\ &= \left(\frac{1-\beta}{M}\right)^2 \frac{\lambda}{\mu} \rho E(P_0^2) \\ &\quad + E\left[\left(\beta + \frac{1-\beta}{M} \sum_{i=1}^K v_i\right) P_1\right]^2 - E^2\left[\left(\beta + \frac{1-\beta}{M} \sum_{i=1}^K v_i\right) P_1\right] \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 목표 셀로부터 수신한 $(E_c/I_0)_1$ 의 평균과 분산은 상기와 동일한 과정으로 구할 수 있다.

한편 수신된 파일럿 신호 대 간섭비, $(E_c/I_0)_1$ 는 실험 및 시뮬레이션에 의하여 대수 정규분포를 하므로^[8], 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W = \left(\frac{E_c}{I_0}\right) = e^{\alpha s} = 10^{s/10} \quad (10)$$

여기서 W 가 대수 정규분포를 하므로, s 는 가우시안 분포를 갖는다. 그리고 $\alpha = (\ln 10)/10$ 이며, s 의 평균을 m_s [dB], 표준편차를 σ_s [dB] 라고 하면, 평균

$$m_s = \frac{1}{\alpha} \left\{ \ln E[W] - \frac{(\alpha\sigma_s)^2}{2} \right\} \quad (11)$$

이고, 분산은

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{\alpha^2} \left\{ \ln E[W^2] - 2 \ln E[W] \right\} \quad (12)$$

이 된다^[9]. 이 관계 식으로부터 홈 기지국에서 수신한 파일럿 신호 대 간섭비 (E_c/I_0)₀의 평균 및 분산은 각각 m_{s0} [dB] 및 σ_{s0}^2 [dB] 로 표시하고, 목표 기지국으로부터 수신한 (E_c/I_0)₁의 평균과 분산은 각각 m_{s1} [dB] 및 σ_{s1}^2 [dB] 로 쓰자.

이제 수신된 신호의 세기에 근거를 두고 평균 핸드오프 수를 유도한 Holtzman[3]의 방식을 이 논문에 적용하자. 여기서는 논문을 간략히 하기 위하여 참고문헌 [3]을 다시 서술하지 않겠다. 참고문헌 [3]과 가장 큰 차이점은 수신된 신호세기를 수신된 파일럿 신호 대 간섭비로 치환하는 것이며, 수신된 파일럿 신호 대 간섭 비는 셀 통화량의 함수가 된다는 것이다. 그러므로 참고문헌 [3]을 다음과 같이 치환하자: (가) 수신된 평균신호의 세기를 파일럿 신호대 간섭비 (dB)의 평균값으로 치환, (나) 홈 셀 및 목표 셀로부터 수신한 신호세기의 $x(d)$ 차 를 홈 셀 및 목표셀로부터 수신한 파일럿 신호대 간섭비 (dB)의 차로 치환.

따라서 홈 셀 및 목표셀로부터 수신한 파일럿 신호대 간섭비(dB)의 분산은 위와 같이 치환하면 다음과 식과 같다^[4]:

$$\sigma_x^2(d) = \frac{(\sigma_{s0}^2(d) + \sigma_{s1}^2(d))d_0}{d_0 + d_{av}} \quad (13)$$

그리고, 홈 셀 및 목표 셀로부터 수신한 신호 대 간섭비의 평균에 대한 분산은 각각 다음식과 같다^[4]:

$$\sigma_{E_c/I_0_0}^2 = \frac{\sigma_{s0}^2(d)d_0}{d_0 + d_{av}} \quad (14)$$

그리고

$$\sigma_{E_c/I_0_1}^2 = \frac{\sigma_{s1}^2(d)d_0}{d_0 + d_{av}} \quad (15)$$

여기서 d_0 는 수신된 신호의 상판 거리이고, d_{av} 는 평균을 취하기 위한 필터의 평균 상수이다^[3].

수신된 신호의 세기를 기준으로 핸드오프가 일어날 확률을 유도한 참고문헌 [3]을 이 논문에 적용하기 위해서 핸드오프는 다음의 경우에 일어난다고 가정한다: (가) 이동국과 기지국과의 거리 d_{k-1} 에서 이동국은 홈 기지국 BS0와 통화를 하고있는데, 거리가 d_k 가 되면 $m_{s0} < T$ 이고 $x(d_k) < -h$ 되는 경우 또는, (나) 이동국이 d_{k-1} 에서 이동국은 목표 기

지국 BS1과 통화를 하고있는데, d_k 에서 $m_{s1} < T$ 이고 $x(d_k) > h$ 인 경우. 여기서 T는 절대 임계치이고, h는 히스테리시스 레벨, 그리고 d_k 및 d_s 는 각각 [3]에 정의되어있다.

따라서 평균 핸드오프의 수, $E(N_{ho})$ 는 다음과 같다^[3]

$$E(N_{ho}) = \sum_{k=1}^N p_{ho}(k) \quad (16)$$

여기서 $p_{ho}(k)$ 는 k 번째 간격에서 핸드오프가 일어날 확률[3]이다.

IV. 수치계산 결과 및 분석

이 장에서는 현실적인 예로서 홈 셀과 목표셀간의 거리 D 가 2 Km이고, 상관거리가 d_0 는 20 m, 그리고 필터의 평균상수 d_{av} 가 30 m, 샘플링 거리 $d_s = 1$ m, 표준편차 $\sigma_0 = \sigma_1 = 6$ dB, 기지국 송신전력 $T_1 = T_2 = 0$ dBm, 경로손실 상수 $\gamma = 3$ 을 설정하였다. 그리고 순방향 채널에서는 파일럿 채널, 통화채널은 항상 송신하므로 ρ 는 1로하였다.

그림 2는 이동국이 홈 셀로부터 목표셀로 이동하면서 수신한 평균 파일럿 신호 대 간섭비, E_c/I_0 를 거리의 함수로 나타낸 것이다. 이동국이 홈 셀과 근접한 경우에는 거리에 따른 파일럿 신호 대 간섭비는 서서히 감소하나, 점차 목표셀에 근접함에 따라서 그 값은 급격히 감소함을 알 수 있다.

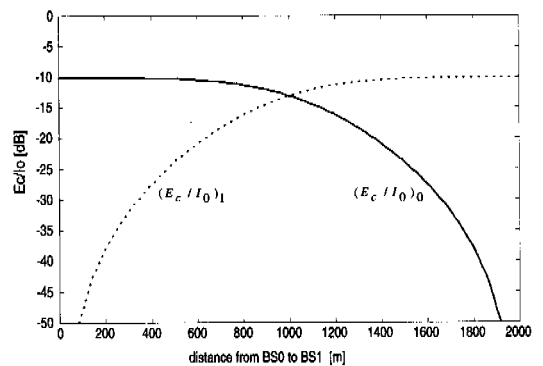


그림 2. 거리에 따른 평균 파일럿 신호 대 간섭비 (Erlang=50, $\beta = 0.2$, $M=63$).

히스테리시스 레벨 및 통화량에 따른 평균 핸드오프 수는 그림 3에 나타내었는데, 통화량의 증가에 따라서 핸드오프 수는 증가하나, 히스테리시스 레벨

이 12 dB 이상으로 큰 경우에는 통화량과 무관하게 핸드오프 수는 1로 접근함을 알 수 있다. 그러나 히스테리시스 레벨이 낮은 경우에는 통화량의 변화에 따라서 많은 영향을 받음을 알 수 있다. 그러니 핸드오프 수를 줄이기 위하여 히스테리시스 레벨을 높이면, 두 기지국과 동시에 통화를 하게 되므로, 네트워크 측면에서 보면 두 개의 통화 채널이 할당되어 채널자원의 효율적 이용이 어렵게 된다.

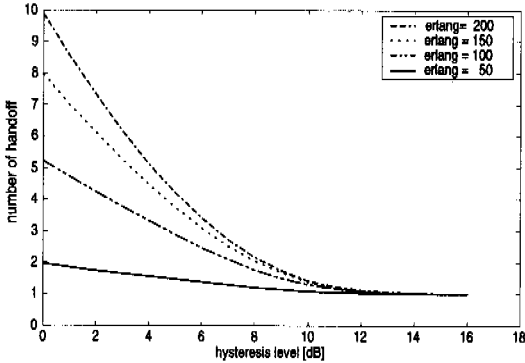


그림 3. 히스테리시스 레벨 및 통화량에 따른 평균 핸드오프의 수 ($T=17$ dB, $\beta=0.15$).

그림4는 히스테리시스 및 절대 레벨에 따른 평균 핸드오프 수를 나타내었다. 절대레벨 T 가 높을수록 핸드오프 수는 증가함을 알 수 있다. 그러나 핸드오프 수를 줄이기 위해서 절대레벨을 낮추면, 파일럿 신호대 간섭비를 낮추는 결과가 되므로 이는 결국 통화 품질에 영향을 미치게 된다. 그러나 히스테리시스 레벨이 12 dB 이상으로 크면 역시 절대레벨과 무관하게 핸드오프 수는 1회에 접근한다.

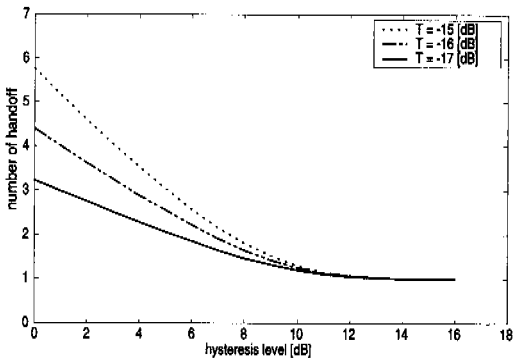


그림 4. 히스테리시스 레벨 및 절대레벨에 따른 평균 핸드오프의 수 ($Erlang=70$, $\beta=0.15$).

그림5는 파일럿 신호에 할당하는 전력비 β 가 β

$=0.1, 0.2,$ and 0.3 일 때에 핸드오프의 수를 보여주고 있는데, 이 그림에서 평균 핸드오프의 수는 절대레벨 T 보다 β 값에 훨씬 더 민감함을 알 수 있다.

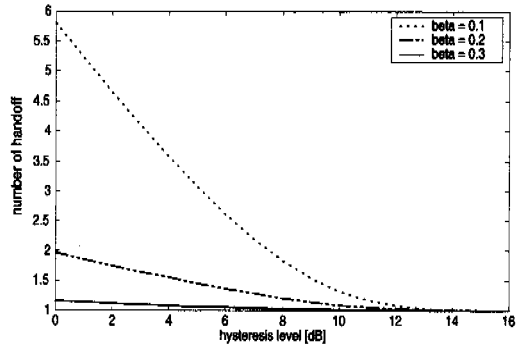


그림 5. 히스테리시스 레벨 및 β 값에 따른 평균 핸드오프의 수 ($Erlang=70$, $T=17$ dB).

V. 결 론

이 논문에서는 기존의 수신 신호의 세기를 기준으로 핸드오프를 해석하는 방식에서 수신된 파일럿 신호 대 간섭비를 기준으로 하는 소프트 핸드오프를 해석하였다. 애널로그 시스템에서는 수신된 신호의 세기는 일반적으로 신호 대 잡음비와 비례하지만, DS-CDMA 시스템에서는 동일 주파수를 사용하므로 신호 대 간섭비를 기준으로 소프트 핸드오프를 결정한다.

셀의 통화량이 신호 대 간섭비에 미치는 영향을 유도하였고, 유도한 신호 대 간섭비를 기준으로 절대 임계치 및 히스테리시스 레벨을 함수로 하는 평균 핸드오프 수를 유도하였다. 평균 핸드오프 수를 유도할 때에는 Holtzman[3]이 수신된 신호 강도를 기준으로 유도한 방식을 수정하여 적용하였다.

분석결과 통화량이 작을 때에는 핸드오프의 수에는 큰 영향을 미치지 않으나, 통화량이 증가하면 핸드오프 수는 증가한다. 통화량과 더불어 히스테리시스 레벨도 핸드오프 수에 영향을 미치는데, 히스테리시스 레벨이 12 dB 이상으로 큰 경우에는 통화량과 무관하게 핸드오프 수는 1회로 접근함을 알 수 있다. 그리고 절대레벨 T 가 높을수록 핸드오프 수는 증가하였는데 이는 절대레벨이 높을수록 수신된 파일럿 신호 대 간섭비가 좋은 것을 의미한다. 또한 기지국에서 파일럿 할당 전력비 β 가 커질수록 평균 핸드오프 수는 급격히 감소하였는데, 이는 파일럿 신호 대 간섭비중 파일럿 신호의 레벨이 증가함

을 의미하는데 결국 수신된 파일럿 신호 대 간섭비가 높아지므로 핸드오프의 수는 감소하게 된다는 것을 나타낸다. 히스테리시스 레벨이 10이하에서는 평균 핸드오프의 수는 β 의 값에 선형적으로 비례하여 증가하지 않고 0.1에서 0.2로 증가할 때보다 0.2에서 0.3으로 증가할 때 핸드오프는 히스테리시스 레벨이 0일때 2회에서 5.7회로, 2일때 1.7회에서 4.6회로, 4일때 1.6회에서 3.5회로 각각 증가하였다. 결국 평균 핸드오프의 수는 절대레벨 T 보다 β 값에 훨씬 더 민감함을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] Qualcomm, CDMA system engineering training handbook, Qualcomm, 1993.

[2] R. Vijayan and M. Holtzman, "A model for analyzing handoff algorithms," IEEE Trans. on Vehicular Technol., vol.42, no.3, pp.351-356, Aug. 1993.

[3] N. Zhang and J. Holtzman, "Analysis of handoff algorithms using both absolute and relative measurements," IEEE Trans. on Veh. Technol., vol.45, no.1, pp.174-179, Feb. 1996.

[4] M. D. Austin, G. L. Stuber, "Cochannel interference modeling for signal strength based handoff analysis," Electronic letters, vol.30, no.23, pp.1914-1915, Nov. 1994.

[5] Nevio Benvenuto, Fortunato Santucci, "A least square path-loss estimation approach to handover algorithms," IEEE Trans. on Veh. Technol., vol.48, no. 2, pp.437-447, Mar. 1999.

[6] TIA, "Mobile station-base station compatibility standard for dual-mode wideband spread spectrum cellular system," July 1993.

[7] K. Gilhousen, I. Jacobs, R. Padovani, A. Viterbi, L. Weaver, and C. Wheatley III, "On the capacity of a cellular CDMA system," IEEE Trans. on Veh. Technol., vol.40, no.2, pp.303-312, May 1991.

[8] Audrey M. Viterbi and Andrew J. Viterbi, "Erlang capacity of a power controlled CDMA system," IEEE Journal on selected Areas in communi., vol.11, no.6, pp.892-900, Aug. 1993.

[9] G. Cooper, C. McGillem, Probablistic methods

of signal and system analysis, 3rd ed., Oxford university press, 1999.

[10] Papoulis, Probability, random variables, and stochastic processes, 3rd ed., McGraw-Hill, Inc., 1991.

부 록

식(1)로부터 분자 및 분모의 평균과 분산을 구하자.

A.1 분자

식(1)에서 P_0 는 대수 정규 분포를 하고, 상수 β 가 곱해졌으므로 분자 y 의 평균은

$$E[y] = E[\beta]E[P_0] = \beta E[P_0] = \beta \exp[(\alpha\sigma_0)^2 / 2] \exp(\alpha m_0) \tag{A1}$$

이고, 여기서 σ_0^2 [dB]와 m_0 [dB]는 각각 P_0 [dB]의 분산 및 평균이다. 그리고 분자의 분산은

$$\text{var}(y) = \text{var}(\beta P_0) = \beta^2 \{E[P_0^2] - E^2[P_0]\} \tag{A2}$$

이며,

$$E[y^2] = E[(\beta P_0)^2] = E[\beta^2]E[P_0^2] = \beta^2 \exp[2(\alpha\sigma_0)^2] \exp(2\alpha m_0) \tag{A3}$$

이다.

A.2 분모

기지국의 통화 채널 수가 M개 일때, 순방향 전력 제어는 전력제어의 범위가 역방향에 비하여 현저히 적으므로 각 통화 채널의 전력 할당비 ϕ_i 를 $1/M$ 으로 일정하다고 가정하자. 그러면 분모 z 는

$$\begin{aligned} z &= (1-\beta) \sum_{i=1}^K v_i \phi_i P_0 + \beta P_1 + (1-\beta) \sum_{i=1}^K v_i \phi_i P_1 \\ &= \frac{(1-\beta)}{M} \sum_{i=1}^K v_i P_0 + \left\{ \beta + \frac{(1-\beta)}{M} \sum_{i=1}^K v_i \right\} P_1 \\ &= z_1 + z_2 \end{aligned} \tag{A4}$$

여기서

$$z_1 = \frac{(1-\beta)}{M} \sum_{i=1}^K v_i P_0 \tag{A5}$$

$$z_2 = \left\{ \beta + \frac{(1-\beta)}{M} \sum_{i=1}^K v_i \right\} P_1 \quad (A6)$$

이다.

A.2.1 분모의 첫째 및 둘째항
Viterbi의 논문[8]으로부터 z_1 의 평균값은

$$E[z_1] = E\left[\frac{(1-\beta)}{M} \sum_{i=1}^K v_i P_0 \right] = E[K]E\left[v \frac{1-\beta}{M} P_0 \right] = \frac{\lambda}{\mu} \rho \frac{1-\beta}{M} E[P_0] \quad (A7)$$

이다. 한편

$$\begin{aligned} \text{var}\left[\sum_{i=1}^K v_i P_0 \right] &= E[k] \text{var}[vP_0] + \text{var}(k) E^2(vP_0) \\ &= \frac{\lambda}{\mu} [\text{var}(vP_0) + E^2(vP_0)] \end{aligned} \quad (A8)$$

이며, k 는 Poisson분포를 하므로 $E(k) = \text{var}(k) = \frac{\lambda}{\mu}$ 이다. 이 식(A8)의 괄호 안의 첫 번째 항은 다음과 같다.

$$\text{var}(vP_0) = E[(vP_0)^2] - E^2[vP_0] = E(v^2)E(P_0^2) - E^2(vP_0) \quad (A9)$$

이 식을 (A8)에 대입하면

$$\begin{aligned} \text{var}\left[\sum_{i=1}^K v_i P_0 \right] &= \frac{\lambda}{\mu} [\text{var}(vP_0) + E^2(vP_0)] \\ &= \frac{\lambda}{\mu} [E(v^2)E(P_0^2) - E^2(vP_0) + E^2(vP_0)] \\ &= \frac{\lambda}{\mu} \rho E(P_0^2) \end{aligned} \quad (A10)$$

이다. 그러므로 이 식을 적용하면 z_1 의 분산은

$$\text{var}(z_1) = \text{var}\left(\frac{1-\beta}{M} \sum_{i=1}^K v_i P_0 \right) = \left(\frac{1-\beta}{M} \right)^2 \frac{\lambda}{\mu} \rho E(P_0^2) \quad (A11)$$

이 된다.

같은 방법으로 z_2 의 평균은

$$\begin{aligned} E[z_2] &= E\left\{ \beta + \frac{(1-\beta)}{M} \sum_{i=1}^K v_i \right\} P_1 = E\left\{ \beta + \frac{(1-\beta)}{M} \sum_{i=1}^K v_i \right\} E(P_1) \\ &= [E(\beta) + E\left\{ \sum_{i=1}^K v_i \frac{(1-\beta)}{M} \right\}] E(P_1) \\ &= [\beta + E(K)E\left\{ v_i \frac{1-\beta}{M} \right\}] E(P_1) \\ &= [\beta + \frac{\lambda}{\mu} \rho \frac{1-\beta}{M}] E(P_1) \end{aligned} \quad (A12)$$

이고, z_2 의 분산은

$$\begin{aligned} \text{var}(z_2) &= \text{var}\left\{ \beta + \frac{1-\beta}{M} \sum_{i=1}^K v_i \right\} P_1 \\ &= E\left\{ \left(\beta + \frac{1-\beta}{M} \sum_{i=1}^K v_i \right) P_1 \right\}^2 - E^2\left\{ \beta + \frac{1-\beta}{M} \sum_{i=1}^K v_i \right\} P_1 \end{aligned} \quad (A13)$$

A.2.2 분모전체

그러므로 분모 전체의 평균은

$$E[z] = E[z_1 + z_2] = E[z_1] + E[z_2] \quad (A14)$$

가 되고, 그리고 분모 전체의 분산은

$$\text{var}(z) = \text{var}(z_1 + z_2) \quad (A15)$$

여기서 랜덤변수 z_1 과 z_2 가 가우시안 분포를 하고, 서로 독립이므로

$$\text{var}(z) = \text{var}(z_1 + z_2) = \text{var}(z_1) + \text{var}(z_2) \quad (A16)$$

이 된다.

A.3 $(E_c/I_0)_0$ 의 평균과 분산

먼저 $(E_c/I_0)_0$ 를 W 라고하면, W 의 평균은

$$\begin{aligned} E[W] &= E\left[\frac{Y}{Z} \right] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y}{z} f(y) f(z) dy dz = \int_{-\infty}^{\infty} y f(y) dy \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{z} f(z) dz \\ &= E[Y] \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{z} f(z) dz = \beta \exp\left\{ -\frac{(\alpha\sigma_a)^2}{2} + \alpha m_a \right\} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{z} f(z) dz \end{aligned} \quad (A17)$$

이다. 여기서 $g(Z) = 1/Z$ 로 놓으면, $g(Z)$ 에 대한 평균값은 다음식과 같이 쓸 수 있다

$$E\{g(Z)\} = \int_{-\infty}^{\infty} g(z) f(z) dz \quad (A18)$$

여기서 함수 $g(Z)$ 를 Taylor 급수로 전개 하면,

$$g(z) \approx g(\eta) + g'(\eta)(z-\eta) + \dots + g^{(n)}(\eta) \frac{(z-\eta)^n}{n!} \quad (A19)$$

이 되고 여기서 η 는 z 의 평균값이다. 여기서 $f(z)$ 는 가우시안 확률 밀도 함수를 갖으며^[8], 랜덤변수 Z 가 평균값을 중심으로 분포되어 있으므로 (A19)를 (A18)에 대입하여 다음과 같이 쓸 수 있다^[10].

$$E\{g(Z)\} \approx g(\eta) + g''(\eta) \frac{\sigma_z^2}{2} + \dots + g^{(n)}(\eta) \frac{\mu_n}{n!} \quad (A20)$$

여기서 μ_n 은 랜덤 변수 z 의 n 차 모멘트이다. 고차 미분항을 무시하고 제2항까지만 고려하면,

$$E\{g(z)\} \approx g(\eta) + g''(\eta) \frac{\sigma^2}{2} \quad (A21)$$

그리고 분산은[10]

$$\text{var}\{g(z)\} = |g'(\eta)|^2 \sigma^2 \quad (A22)$$

으로 쓸 수 있으므로, 식 (A17)은

$$\begin{aligned} E[W] &= \beta \exp\left[\frac{(\alpha\sigma_a)^2}{2} + \alpha m_a\right] \int \frac{1}{z} f(z) dz \\ &\approx \beta \exp\left[\frac{(\alpha\sigma_a)^2}{2} + \alpha m_a\right] \left[g(\eta) + g''(\eta) \frac{\sigma_z^2}{2} \right] \\ &= \beta \exp\left[\frac{(\alpha\sigma_a)^2}{2} + \alpha m_a\right] \left\{ \frac{1}{E[z]} + \frac{\sigma_z^2}{E^3[z]} \right\} \quad (A23) \end{aligned}$$

그리고 W 의 분산은

$$\text{var}(W) = E[W^2] - E^2[W] \quad (A24)$$

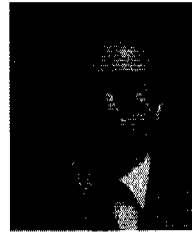
이므로 $E^2[W]$ 는 식(A23)의 결과를 제곱하여 대입하면 되고, $E[W^2]$ 은

$$\begin{aligned} E[W^2] &= \int \left(\frac{Y}{Z}\right)^2 f(W) dw = \iint \left(\frac{Y}{Z}\right)^2 f(y) f(z) dy dz \\ &= \int y^2 f(y) dy \int \frac{1}{z^2} f(z) dz \\ &= E[y^2] \int \frac{1}{z^2} f(z) dz = \exp[2(\alpha\sigma_a)^2 + 2\alpha m_a] \int \frac{1}{z^2} f(z) dz \quad (A25) \end{aligned}$$

인데, 역시 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} E[W^2] &= \exp[2(\alpha\sigma_a)^2 + 2\alpha m_a] \int \frac{1}{z^2} f(z) dz \\ &= \exp[2(\alpha\sigma_a)^2 + 2\alpha m_a] \left\{ \frac{1}{E^2(z)} + \frac{3 \text{var}(z)}{E^4(z)} \right\} \quad (A26) \end{aligned}$$

김 남 수(Nam-Soo Kim)



1981년 2월: 광운대학교 전자공학과 졸업 (공학사)

1983년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사)

1991년 3월: 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학박사)

1986년 7월~1994년 2월: 한국전자통신연구소 무선 기술 연구실 선임연구원, 실장역임

1991년 1월~10월: BNR(Bell Northern Research) 방문연구원

1994년 3월~현재: 청주대학교 정보통신공학과 교수 <주관심 분야> 디지털 이동통신, 무선시스템