

Cell Traffic Intensity에 따른 DS-CDMA 셀룰러 시스템의 최소기간 차단율

Minimum Duration Outage of a DS-CDMA Cellular System Due to Cell Traffic Intensity

김 남 수

Nam-Soo Kim

요 약

셀룰러 시스템에서 최소기간 차단율은 수신된 신호 레벨이 최소기간 이상 계속하여 임계치 이하로 될 확률을 의미한다. 이는 수신 신호만을 대상으로 하여 임계치 이하로 될 때를 오수신으로 정의하는 것보다 더욱 현실적이다. 특히 DS-CDMA 셀룰러 시스템에서는 셀의 통화량에 따라서 수신되는 신호대 간섭비가 계속하여 가변되는데 기존의 해석에서는 셀의 통화량과는 무관하게 최소 기간 차단율을 해석하였으나, 이 논문에서는 셀의 통화량에 따른 최소기간 차단율을 유도한다. 해석 결과 셀의 통화량이 증가할수록 최소기간 오수신율은 급격히 증가함을 알 수 있었다.

Abstract

The minimum duration outage probability of a cellular system is defined the probability that the received signal level is hold under minimum required threshold duration. This definition is more realistic compared to the outage probability which is the received signal strength level is below predefined threshold level. Especially, in a DS-CDMA cellular system the received signal-to-interference ratio is a function of cell traffic, while the former researches are only considered the minimum duration outage probability independent of the cell traffic. We noticed that the minimum outage probability is rapidly increases as cell traffic increase.

I. 서 론

이동통신 가입자의 급증과 다양한 무선 멀티미디어 응용은 차세대 이동통신 방식으로도 DS-CDMA (Direct-sequence code division multiple access) 시스템을 도입하도록 하고 있다. 무선통신 채널을 통하여 수신된 신호는 대수정규 분포를 하는 쉐도우잉과 빠른 페이딩의 영향을 동시에 받는데, DS-CDMA 셀룰러 시스템의 성능을 해석하기 위하여 첫째,

평균 비트/심볼 오류 또는 프레임 오류 등을 유도하는 방법과 둘째, 변조방식과는 무관하게 오수신율 (Outage probability)을 유도하는 방법을 주로 사용해 왔다^{[1]~[4]}. 이 논문들에서 볼 수 있듯이, 오수신율은 수신된 신호의 강도, 신호 대 잡음비, 또는 신호 대 간섭비가 임계치 이하로 되는 확률을 수식적으로 유도하는데, 특히 DS-CDMA 방식에서는 수신된 신호 대 간섭비를 임계값과 비교하여 임계값보다 작을 확률을 구함으로써 오수신율을 유도해왔다.

「이 논문은 2000~2002년도 청주대학교의 학술연구 조성비(특별연구지원 과제)에 의하여 연구되었음.」

청주대학교 전정반 공학부(Computer and Communication Eng., Chungju University)

· 논문 번호 : 20010119-010

· 수정완료일자 : 2001년 3월 26일

그러나 일정 시간동안을 기준으로 하는 오수신율은 임계치 이하가 되는 기간에 대한 정보를 주지 않으므로 무선 채널 전송시에 발생하는 버스트 에러(Burst error)를 랜덤 에러(random error)로 바꾸기 위한 인터리버(Interleaver)의 사이즈를 결정하거나 에러 정정코드를 결정하는 데에 오수신율을 직접 적용하기에는 부족하다^[5].

현실적인 무선 채널에서는 채널이 빠르고 빠른 페이딩의 영향으로 수신된 신호의 레벨이 일시적으로 임계치 이하가 되는 때가 있고, 또한 오랜 기간동안 임계치 이하가 되는 경우가 있다. 일시적으로 수신 신호레벨이 임계치 이하로 되는 경우에는 통화 품질에 커다란 영향을 주지 않지만 오랜 기간동안 수신신호 레벨이 임계치 이하가 되면 호가 절단되는 현상이 발생하게 된다. 그러므로 J. M. Holtzman은 일정기간 이상동안 수신된 신호의 레벨이 임계치 이하가 되는 확률을 최소기간 오수신율(minimum duration outage probability)^[5]이라고 정의하고, 이동통신 환경에서 시스템의 오수신 평균시간, 오수신 빈도, 그리고 오수신 확률을 유도하였다. 이어서 안테나 다이버시티를 적용하였을 때의 최소기간 오수신율에 관한 논문들이 발표되었는데, [6]은 두 개의 안테나에서 수신한 신호 대 간섭비가 임계값 이하로 된 상태에서 최소기간보다도 더 오랫동안 머무는 상태를 이중 오수신율(Double outage)로 정의하고 시뮬레이션 및 해석적인 결과를 유도하였다. 그리고 1999년 F. Graziosi는 무선 채널에서 발생하는 상관(Correlation)을 포함하여 보다 일반적인 최소기간 오수신율을 유도하였다^[7].

그러나 상기의 논문들은 수신된 신호 대 간섭비가 일정하다고 가정하고 최소기간 오수신율을 유도하였으나, 현실적인 이동통신 시스템 특히, DS-CDMA에서는 셀의 통화량에 따라서 시간과 공간적으로 신호 대 간섭비가 계속해서 가변되고 있다^{[4],[8]}.

따라서 본 논문은 시간 및 공간에 따라서 가변되는 통화량의 변화는 수신되는 신호 대 간섭비를 변화시키고, 결국 최소기간 오수신율에 영향을 줄 것이라는 점에 착안을 하였다. 즉, 셀의 통화량이 변화하면 이에 따라서 신호 대 간섭비가 변화하고, 결국 셀의 통화영역이 달라지는 셀 호흡 효과가 나타나

게 된다. 그러므로 통화량의 변화에 따른 신호 대 간섭비가 최소 기간 오수신율에 영향을 미치게 되므로, 본 논문에서는 셀의 통화량 변화에 따른 최소기간 오수신율을 유도하고자 한다. 또한 DS-CDMA 셀룰러 시스템은 전력제어에 의하여 시스템의 용량을 증대시키고 있지만 현실적으로는 완벽한 전력제어가 불가능하므로^{[8]-[10]} 전력제어 오차도 역시 최소기간 오수신율에 영향을 주는 한 파라메타로 유도한다.

본 논문의 구성은 제 2장에서는 시스템 모델을 설명하고, 제 3장에서는 셀의 통화량 변화에 따른 평균 신호 대 잡음비를 구하고 최소 기간 오수신율을 유도한다. 제 4장에서는 유도한 결과에 대한 수식적 계산 결과와 분석을 서술한 후, 마지막으로 제 5장에서 본 논문의 결론을 서술하였다.

II. 시스템 모델

DS-CDMA 셀룰러 시스템에서는 여러 통화채널이 동시에 동일한 송신 주파수를 사용하므로, 기지국이 이동국들로 부터 수신하는 신호는 희망파 뿐만 아니라 타 통화 채널의 신호도 수신하게 된다. 그러므로 기지국에서 수신하는 신호는 희망파 이외의 신호는 모두 간섭파로 작용하게 되므로, 신호 대 간섭비는 통화량이 많을 때는 작고, 통화량이 적을 때에는 상대적으로 크게 되어 기지국에서 수신하는 신호 대 간섭비는 통화량의 다소에 따라서 가변하게 된다. 그림 1은 이 논문에서 고려하고자 하는 역방향 링크(이동국 송신, 기지국 수신)의 시스템 모델을 나타내고 있다.

이 시스템 모델로부터 알 수 있는 바와 같이, 기지국은 자신이 속한 셀(홈셀) 및 인접셀의 간섭 이동국으로부터 간섭 전력을 수신하므로 기지국이 수신하는 신호 대 간섭비는 다음 식과 같이 쓸 수 있다^{[4],[8]}.

$$\frac{S}{I} = \frac{P_0}{\sum_{i=1}^M v_i P_i + \sum_j \sum_{i=1}^M v_{i(j)} P_{i(j)} + N} \quad (1)$$

여기서 P_0 는 희망파의 수신전력이고 P_i 는 i 번째 이동국으로부터 수신한 간섭전력이다. M 는 간섭 셀

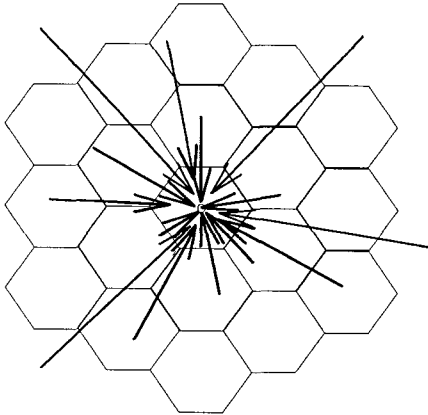


그림 1. 시스템 모델

의 수이며, k 는 섹터 당 사용자의 수인데 평균이 λ / μ [얼량]인 포아손 랜덤 변수이다. 여기서 λ [calls/sec]는 호의 도착율이며 $1/\mu$ [sec/calls]은 서비스 시간이다. 그리고 v_i 는 i 번째 이동국의 음성 활성화율 (voice activity factor)으로써 활성화될 확율은 ρ 이다. k 가 포아손 분포를 하므로 확률 밀도함수^{[8],[11]}는

$$P_r(k \text{ active users/sector}) = \frac{(\lambda/\mu)^k}{k!} \exp\left(-\frac{\lambda}{\mu}\right) \quad (2)$$

이다. 그리고 N 는 잡음 전력을 나타낸다.

한편 DS-CDMA에서 전력제어가 필수적이지만 이동 무선채널의 빠른 페이딩의 영향으로 전력제어 오차가 발생하여 수신 신호 전력은 대수 정규 (log-normal) 분포를 하게 된다^{[8],[9]}. 그러므로 수신 전력 P 는

$$P = 10^{x/10} = e^{\beta x} \quad (3)$$

여기서 x 는 가우시안 랜덤 변수으로써 평균이 m 이며, 분산이 σ^2 이다. 그리고 $\beta = (\ln 10)/10$ 이다. 그러므로 식 (1)로 부터 신호전력의 평균 값(dB)은^[12]

$$E[S] = \frac{\beta\sigma^2}{2} + m \quad (4)$$

이 되며, 한편 간섭 전력의 평균 값(dB)은^[12]

$$\begin{aligned} E[I] &= 10 \log \{ E(k)E(vP)(1+f) \} \\ &= 10 \log \left\{ (\lambda/\mu)\rho(1+f) \exp \left[\frac{(\beta\sigma)^2}{2} + \beta m \right] \right\} \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{\beta} \left[\ln \left\{ \frac{\lambda}{\mu} \rho(1+f) \right\} + \frac{(\beta\sigma)^2}{2} + \beta m \right] \quad (5)$$

이다. 여기서 f 는 다중 셀이 존재할 때의 간섭 증가 계수^[5]이다.

DS-CDMA 셀룰러 시스템에서 비트 에너지 대 간섭 전력밀도의 비인 E_b/I_0 는 신호 대 간섭비와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{S}{I} PG \quad (6)$$

여기서 PG 는 셀룰러 시스템의 처리이득으로 송신 대역폭과 데이터 전송속도의 비이다.

Ⅲ. 통화량에 따른 최소기간 오수신율

이 장에서는 J. Holtzman^[5]이 유도한 최소 기간 오수신 율을 확장하여 셀룰러 시스템의 통화량의 변화에 따른 오수신 율을 유도하고자 한다. 따라서 기본적인 유도 결과는 [5]를 인용하기로 하고 독자의 이해를 돕기 위해 간단히 서술하자.

최소기간 평균이 영이고, 분산 (variance)이 1인 가우시안 과정을 갖는 랜덤 변수 $x(t)$ 가 일정 레벨 이상을 갖는 대략적인 값은 다음과 같이 쓸 수 있다^[13].

$$x(t) \approx \gamma + \zeta t - \gamma \frac{\lambda t^2}{2} \quad (7)$$

이며, 여기서 ζ 는 레일레이 랜덤 변수이며, 다음과 같은 확률 밀도함수(Probability density function)를 갖는다.

$$P_\zeta(z) = \frac{z}{\lambda} \exp\left(\frac{-z^2}{2\lambda}\right), \quad z > 0 \quad (8)$$

이다. 이 가정을 이용하면 최소기간 오수신 확율은 다음과 같이 주어진다^[5].

$$\begin{aligned} P_{out} &= \frac{\tau_m v}{2\pi d_c} e^{-A \left(\tau_m^2 + \frac{4d_c^2}{v^2} \right)} \\ &+ \frac{v}{2d_c \sqrt{\pi A}} Q(\sqrt{2A} \tau_m) e^{-4 \frac{Ad_c^2}{v^2}} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 τ_m 은 최소 기간이고, v 는 이동국의 속도, d_c 는 무선 채널에 의한 신호의 상관거리(correlation

distance)이다. 그리고 A 는

$$A = \frac{(E(s) - E(I) - \gamma)^2 v^2}{8\sigma^2 d_c^2} \quad (10)$$

인데, 여기서 $E[S]$ 및 $E[I]$ 는 각각 식 (4) 및 식 (5)에서 유도한 평균 신호전력 및 평균 간섭 전력이다. 식 (4) 및 식 (5)는 불완전 전력제어에 의한 전력 제어 오차가 함수로 되어 있고, 음성 활성화 및 셀의 통화량이 함수가 되어 있으므로 결국 최소 기간 오수신율은 이들 함수의 값에 따라서 영향을 받게 됨을 알 수 있다. 다음 장에서는 실제 예를 들어서 해석적 방법에 의해서 구한 결과를 비교해 보자.

IV. 계산 결과

이 장에서는 상기 유도한 최소기간 오수신 확률에 대한 계산 예를 서술한다. 먼저 계산을 위하여 간섭 증가 계수 $f=0.55^{[10]}$, 음성 활성화율 $\rho=0.4$ 로 가정하였다. 그리고 IS-95 DS-CDMA 셀룰러 시스템에서 사용하고 있는 처리이득은 128로 가정하였으며, 대수정규 분포의 중앙값은 7 dB로 사용하였다. 셀룰러 시스템이 안정적으로 동작하기 위한 최소한의 E_b/N_0 값은 5 dB로 하였다^[9]. 이들 값들은 각 참고문헌에 나타나 있듯이 현재 사용되고 있는 IS-95 셀룰러 시스템의 현실적인 값들이다. 그리고 이동국의 이동속도는 50 km/h를 가정하였다.

그림 2는 셀룰러 시스템의 전력제어 오차의 변화

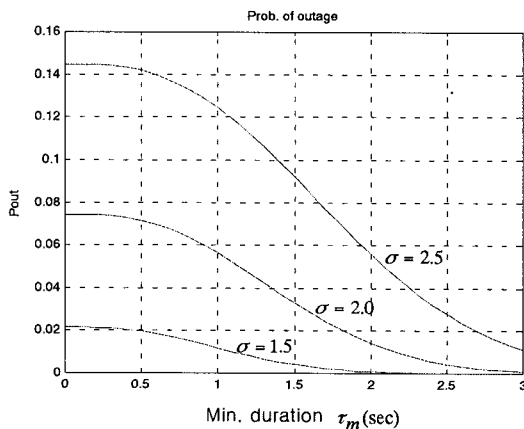


그림 2. 전력제어 오차에 의한 최소기간 오수신 확률

에 따른 최소기간 오수신율을 나타내었는데, 예측할 수 있듯이 전력제어 오차가 커질수록 최소기간 오수신 확률도 역시 증가하는 것을 관찰할 수가 있다. 이는 전력제어 오차가 커지면 중앙 값에서부터 변화가 많고 따라서 최소기간 동안 임계값보다 작아지는 확률이 증가함을 의미한다. 그러나 최소기간이 3초 이상이 되면 전력제어 오차에 대한 오수신율의 변화는 민감하지 않음을 보여준다.

그림 3은 기지국과 통화하는 이동국들의 수가 증가하여 통화 트래픽이 증가할 경우의 최소기간 오수신율을 나타내고 있다. 이는 통화량의 증가에 따라서 간섭이 증가하게 되고 수신되는 신호 전력 대 간섭 전력의 비가 감소됨을 의미한다. 이 그림에서 최소기간이 1초 이하에서는 통화량이 20얼랑에서 30얼랑으로 50 % 증가할 때 최소기간 오수신율 약 4배 증가하였다. 그리고 최소기간이 2초일 때에는 최소기간 오수신율이 약 11배 증가하였다. 이 그림에서 최소기간 오수신율은 통화량에 따라서 민감한 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 무선 채널의 특성에 따른 것인데 상관 거리가 증가하면 할수록 오수신율이 증가하는데, 최소 기간이 1.5초인 경우 상관거리가 10 m에서 30 m로 상관정도가 증가할 때에는 최소기간 오수신율은 약 56 % 증가하였고, 최소기간이 2초로 증가하면 최소기간 오수신율은 145 %로 증가하였다. 따라서 상관이 큰 신호를 수신하였을 때에는 오수신이 증

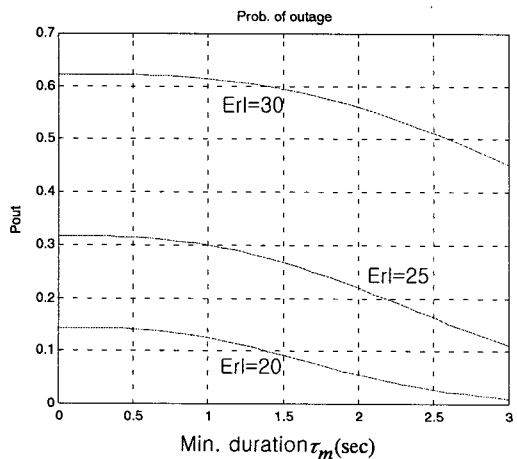


그림 3. 트래픽 통화량에 따른 최소기간 오수신 확률

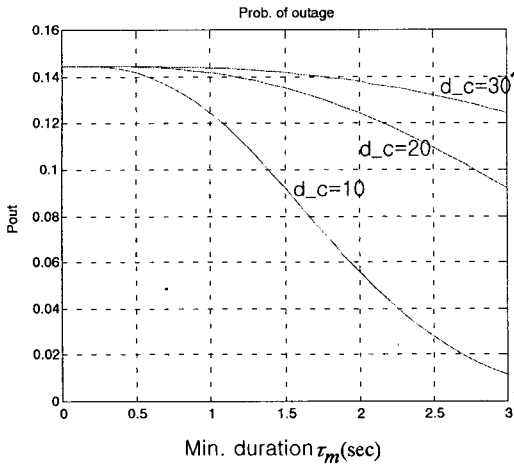


그림 4. 상관거리에 따른 최소기간 오수신 확률
가하는 것을 알 수 있었다.

V. 결 론

지금까지 발표된 최소기간 오수신율 관련 논문들은 신호 대 잡음비가 일정하다고 가정하였으나, 본 논문에서는 이러한 가정을 확장하여 통화용량을 함수로 하는 최소기간 오수신율을 유도하였다. 본 논문에서는 최소기간 오수신율에 영향을 주는 함수로 통화 트래픽량의 변화, 전력제어 오차, 그리고 음성 활성화등의 파라메타를 고려하여 최소기간 오수신율에 미치는 영향을 분석하였다.

유도 결과 셀룰러 시스템의 전력제어 오차의 변화에 따른 최소기간 오수신율은 전력제어 오차가 커질수록 최소기간 오수신 확률도 역시 증가하는 것을 알 수가 있었다. 그러나 최소기간이 3초 이상이 되면 전력제어 오차에 대한 오수신율의 변화는 민감하지 않았다.

트래픽 통화량에 따른 최소기간 오수신 확률은 최소기간이 1초 이하인 경우, 통화량이 50 % 증가할 때 최소기간 오수신율은 약 4배 증가하였다. 그러나 최소기간이 증가함에 따라서 최소기간 오수신율에 미치는 영향은 점차 둔감하게 되었다.

한편 무선 채널의 상관 거리가 증가할수록 오수신율이 증가하는 데, 최소 기간이 1.5초인 경우 상관거리가 10 m에서 30 m로 상관정도가 증가할 때

에는 최소기간 오수신율은 약 56 % 증가하였고, 최소기간이 2초로 증가하면 최소기간 오수신율은 145 %로 증가하였다. 그리고 최소기간이 500 ms 이내에서는 무선 채널의 상관도는 최소기간 오수신율에 큰 영향을 미치지 않았다.

이상의 결과들은 향후 새로운 셀룰러 시스템의 설계에 적용하여 인터리버의 길이, 에러정정 코드의 설계등에 이론적 근거로 활용할 수 있을 것이다. 향후에는 통화량을 고려하여 최소기간 오수신율과 공간 다이버시티의 영향을 해석해야 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] R. P. Narrainen and F. Takawira, "Outage evaluation in a CDMA cellular network employing a distributed channel access control protocol," *Proceedings of IEEE 5th International symposium on spread spectrum techniques and applications*, vol. 1, pp. 287-292, 1998.
- [2] N. S. Kim and D. K. Cho, "Partially coherent MC-CDMA downlink performance in Rayleigh fading channels," *Proceedings of WPMC' 00*, pp. 660-665, Bangkok, Thailand, Nov, 12-15, 2000.
- [3] B. R. Vojcic, L. B. Milstein and R. L. Pickholts, "Outage probability for the uplink of a DS-SS system operating over a LEO mobile satellite channel," *Proceedings of Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, '94, vol. 2, pp. 574-578, 1994.
- [4] N. S. Kim, "Soft handoff under cell breathing in DS-SS cellular networks," *Proceedings of ITC-CSCC' 99*, pp. 410-413, July 13-15, Niigata, Japan, 1999.
- [5] N. B. Mandayam, Pi-Chun Chen and J. M. Holtzman, "Minimum duration outage for cellular systems: A level crossing analysis," *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 879-883, 1996.
- [6] P. C. Chen, N. B. Mandayam, and J. M.

- Holtzman, "Minimum duration outage for cellular systems with reception diversity," *Proceedings of ICUPC' 96*, pp. 245-249, 1996.
- [7] F. Graziosi and F. Santucci, "Duration of outage intervals in macrodiversity cellular systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communi.*, vol. 17, no. 11, pp. 2011-2021, Nov., 1999.
- [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] M. Jansen, R. Prasad, "Capacity, throughput, and delay analysis of a cellular DS CDMA system with imperfect power control and imperfect sectorization," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 94, no. 1, pp. 67-75, Feb., 1995.
- [10] A. J. Viterbi, A. M. Viterbi, and E. Zehavi, "Other-cell interference in cellular power controlled CDMA," *IEEE Trans. on Communi.* vol. 42, no. 2/3/4, Feb./Mar./April, pp. 1501-1504, 1994.
- [11] D. Bertsekas and R. Gallager, *Data network*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987.
- [12] A. J. Viterbi, *CDMA principles of spread spectrum communication*, Addison-Wesley publishing company, 1995.
- [13] M. R. Leadbetter, G. Lindgren, and H. Rootzen, *Extremes and related properties of random sequences and processes*, New York: Springer-Verlag, 1983.

김 남 수



1957년 10월 16일생
 1981년 2월: 광운대학교 전자공학과(공학사)
 1983년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1991년 3월: 연세대학교 대학원 전자공학과(공학박사)

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

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

1994년 3월~현재: 청주대학교 정보통신공학과 교수

[주 관심분야] 디지털 이동통신, 무선시스템