

레일리 페이딩 채널에서 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의

Throughput 해석

김 영 철*, 노 재 성**, 강 희 조***, 조 성 준****

* 한국항공대학교 항공기술교육원

** 서일대학 정보통신과

*** 동신대학교 전기전자공학과

**** 한국항공대학교 항공통신정보공학과

Throughput Analysis of Multi-Carrier DS-CDMA System in Rayleigh Fading Channels

Young-Chul Kim*, Jae-Sung Roh**, Heau-Jo Kang***, Sung-Joon Cho****

* Hankuk Institute of Aviation Technology, Hankuk Aviation Univ.

** Dept. of Inform. & Comm. Eng., Seoil College

*** Dept. of Electrical & Electronic Eng., Dongshin Univ.

**** Dept. of Telecom. & Inform. Eng., Hankuk Aviation Univ.

E-mail : yckim@mail.hangkong.ac.kr

요 약 문

본 논문에서는 다중경로 레일리 페이딩 채널에서의 슬롯 ALOHA 광대역 DS-CDMA 시스템과 슬롯 ALOHA Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 throughput을 유도하였다. 다중경로 레일리 페이딩 채널을 빠른 (fast) 페이딩과 느린 (slow) 페이딩 채널로 구분하고, 이를 광대역 DS-CDMA 시스템과 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템에서 패킷 길이 (N_p)에 따라 비교, 검토하였다. 그 결과, Multi-Carrier DS-CDMA 시스템은 동일한 대역폭을 사용하는 광대역 DS-CDMA 보다 시스템 용량은 감소하였으나 시스템의 throughput 면에서 보다 좋음을 알 수 있었다. 또한 빠른 레일리 페이딩 채널에서는 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 패킷 길이를 소형화하여 전송함으로써 throughput을 높이는 것이 효과적이며, 느린 레일리 페이딩 환경에서는 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 시스템 용량을 증가시키거나, 패킷 길이를 적정하게 길게 하는 것이 효과적이다.

abstract

In this paper, throughput is derived for slotted ALOHA wideband DS-CDMA and slotted ALOHA Multi-Carrier DS-CDMA systems in the multipath Rayleigh fading channel. The throughput of two systems are compared according to the length of a packet in the fast Rayleigh and the slow Rayleigh multipath fading. As a result, we have known that Multi-Carrier DS-CDMA system has less capacity than wideband DS-CDMA system in the same bandwidth, but throughput of Multi-Carrier DS-CDMA system is higher than that of wideband DS-CDMA system. And in Multi-Carrier DS-CDMA systems, higher throughput can be obtained through shortening the length of packet in the fast Rayleigh fading, and it is efficient to control the length of a packet adequately or increase the system capacity of Multi-Carrier DS-CDMA system in the slow Rayleigh fading.

1. 서론

최근의 CDMA (Code Division Multiple Access) 기술은 이동 통신분야에서 무선 인터넷과 같은

무선 데이터 통신을 제공하고 있으며, 점진적으로 멀티미디어 통신 시스템으로 구축될 전망이다. CDMA 시스템의 다양한 서비스분야는 디지털 영상, 디지털 방송 등의 여러 분야의 통신을 주도하게 될 것이다. 따라서, 초기의 위성통신에서 이동 통신으로 그리고 Wireless LAN (Local Area

Network) 분야까지 응용분야를 넓혀가고 있으며, 이는 실내·외의 무선 환경과 다중사용자간섭을 고려한 패킷 통신을 하게된다[1]-[3].

패킷 통신은 초기에 사용자가 제한되는 ALOHA 방식을 적용하였으나 통신 시스템의 발전으로 CDMA 시스템을 적용하게 되었으며, 근래에 많은 연구가 진전되었다. Wijffels, Misser 그리고 Prasad는 다중 셀 환경에서 부호화 기법과 다이버시티 기법을 적용하여 DS-CDMA의 throughput을 구하였고[4],[5], Abdel-Hafez와 Safak는 Nakagami 페이딩 환경에서 상관된 쉐도잉과 Near-Far 영향에 대하여 슬롯 ALOHA 시스템의 성능을 구하였다[6].

본 논문에서는 Kondo와 Milstein이 제안한 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템을 슬롯 ALOHA 방식에 적용한다. Multi-Carrier DS-CDMA 시스템은 다중경로 페이딩에 강인하고, 협대역 간섭 억제에 효과적이며, 낮은 칩 율로도 DS-CDMA 시스템의 구성이 가능하다는 장점이 있다[7],[8].

본 논문은 실내·외의 무선 환경을 고려하여 레일리 페이딩 채널에서 빠른 (fast) 페이딩과 느린 (slow) 페이딩으로 구분하고, 이를 광대역 DS-CDMA과 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템에 슬롯 ALOHA 방식을 적용하여 throughput 성능을 비교, 분석한다. 파라미터로는 시스템 용량 (C), 패킷 길이 (N_d), 비트에너지 대 잡음전력비 (E_b/n₀) 그리고 반송파 수 (M)와 RAKE 수신기의 가지 수 (L)를 이용하여 비교, 분석한다.

II. 다중경로 페이딩 환경에서 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능 해석

무선 채널은 그림 1과 같이 모델링되며, 다중경로를 통하여 지연 확산이 T_m인 레일리 페이딩 채널로 가정한다. 먼저, RAKE 수신기를 채용한 광대역 DS-CDMA 시스템에서 다중 경로의 수 (L)은 다음과 같다[9].

$$L = \left\lfloor \frac{T_m}{T_c} \right\rfloor + 1 \quad (1)$$

여기서, T_m과 T_c은 각각 지연 확산 시간과 광대역 시스템의 칩 주기는다. 그리고, 주파수 영역의 채널 모델에서 동기 (coherent) 대역폭 (Δf)_c이 다음과 같이 특성 지워진다면 다음과 같게 된다.

$$(\Delta f)_c \approx \frac{1}{T_m} \quad (2)$$

이는 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템에서 반송파의 수 (M)를 선택하기 위한 가정을 할 수 있다. 먼저, 각 반송파의 부 대역은 T_m/(MT_c) ≤ 1 이기 때문에 주파수 선택성이 아니라는 가정과 모든 부 대역은 BW_M ≥ (Δf)_c으로 독립적인 페

이딩을 받는다고 가정한다.

그림 1에서 무선 채널에 관하여 L개의 다이버시티는 상호 독립적이며 채널의 송신 신호 s_{k,L}(t)는 다중경로 페이딩의 영향과 부가적인 가우스 잡음 n_k(t)에 의하여 왜곡되어진다. 여기서, a_{k,L}e^{jkφ_L}는 k 번째 사용자에서의 L번째 가지의 감쇠 지수와 위상 편이다.

본 논문에서는 다중경로 페이딩 환경을 레일리 페이딩채널로 모델링하여 수신 신호 중에는 반사와 성분만이 존재한다고 가정하게된다. 실내·외의 무선환경을 가정하며, L 개의 다중경로를 거쳐 수신된 레일리 페이딩

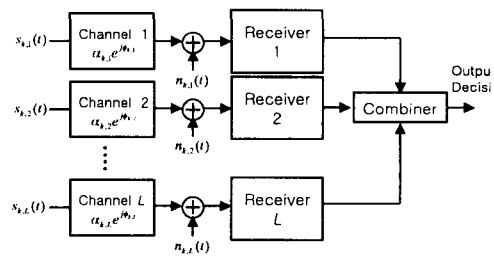


그림 1. 다중 경로 채널을 대한 다이버시티 모델

채널에서 수신 신호 대 잡음 전력비의 확률밀도 함수는 다음과 같다[5],[9].

$$f(\gamma) = \frac{\gamma^{L-1}}{(L-1)! \Gamma^L} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right) \quad (3)$$

여기서, γ는 순시 신호 대 잡음 전력비이며, Γ는 채널의 평균 신호 대 잡음 전력비이다. 그리고 L은 다이버시티 가지이다.

다음으로, 다중경로 레일리 페이딩 채널은 크게 빠른 (fast) 페이딩과 느린 (slow) 페이딩 환경으로 구분하여 해석한다. 빠른 레일리 페이딩 채널에서의 채널 변동은 신호 전송 구간에 관계가 깊으며, 각 신호 심볼은 다른 심볼로부터 독립적으로 페이딩을 받게된다. 따라서 빠른 레일리 페이딩 채널에서 패킷이 전송되어진다면 모든 데이터 비트들은 독립적으로 페이딩을 받게된다. 그리고, 느린 레일리 페이딩 채널은 신호 전송 구간이 긴 주기를 갖으며, 패킷을 전송하였을 때 패킷의 모든 비트들은 동일한 평균 전력으로 수신하게 된다.

다음으로 광대역 DS-CDMA 신호와 Multi-Carrier DS-CDMA 신호의 전체 대역폭은 동일하다고 가정한다면, Multi-Carrier DS-CDMA 시스템에서 하나의 반송파에 대한 대역폭은 다음과 같다[7].

$$BW_M = \frac{BW_{DS}}{M} = \frac{(1+a)}{M \cdot T_c} \quad (4)$$

BW_{DS}는 광대역 DS-CDMA이 대역폭이고, BW_M은 1개의 반송파에 대한 Multi-Carrier

DS-SS-CDMA의 대역폭이다. $M \cdot T_c$ 는 Multi-Carrier DS-SS-CDMA 시스템의 칩 구간이며, M 은 반송파의 수이고, T_c 는 광대역 DS-SS-CDMA 시스템의 칩 구간이다. α 는 $0 < \alpha \leq 1$ 을 갖는 송신 필터의 roll-off factor이다.

여러 명의 사용자를 고려하여 RAKE 수신기에서의 모든 상관기의 신호 출력 (Z)은 다음과 같다 [7],[8].

$$Z = \sum_{i=1}^L g_i Z_i \quad (5)$$

여기서, g_i 는 i 번째 경로에서의 이득이며, Z 가 최대가 되려면 g_i 는 다음과 같다.

$$g_i = \frac{E\{Z_i | \alpha_{1,i}\}}{\text{Var}\{Z_i | \alpha_{1,i}\}} \quad (6)$$

여기서, Z_i 의 조건부 평균과 분산이 추정 가능하다면, DS-SS-CDMA 시스템의 조건부 신호대 잡음 전력 비 (ρ_s)는 다음과 같다.

$$\rho_s = \frac{E^2\{Z | \alpha_1\}}{\text{Var}\{Z | \alpha_1\}} = \frac{N_1^2 E_d \gamma}{L} \quad (7)$$

다음으로 RAKE 수신기를 채용한 광대역 DS-SS-CDMA 시스템의 조건부 신호 대 잡음 전력비 (ρ_s)는 다음과 같다[7],[8].

$$\rho_s = \frac{N_1^2 E_d}{\frac{(k-1)N_1 E_d}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{N_1 \eta_0}{2}} \sum_{i=1}^{L-1} \hat{\alpha}_{1,i}^2 \quad (8)$$

$$= \left\{ \frac{k-1}{2N_1} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{\eta_0}{2N_1 E_d} \right\}^{-1} \sum_{i=1}^{L-1} \hat{\alpha}_{1,i}^2$$

만약, $\sum_{i=1}^{L-1} \hat{\alpha}_{1,i}^2$ 가 Multi-Carrier의 각 가지에서의 $(1/M) \sum_{i=1}^M \alpha_{1,i}^2$ 과 동일한 확률밀도함수라고 가정하면, 비트 에너지 스펙트럼밀도 E_b 는 $L=M$ 이므로 $N_1 = MN$, $N_1 E_d = MNE_c = E_b$ 가 된다. 따라서, RAKE 수신기를 채용한 광대역 DS-SS-CDMA 시스템과 Multi-Carrier DS-SS-CDMA 시스템의 성능차이는 없게 된다.

위의 변환을 이용하여 Multi-Carrier DS-SS-CDMA 시스템의 조건부 신호 대 잡음 전력비 (ρ_m)는 다음과 같다.

$$\rho_m = N^2 E_c \sum_{i=1}^M \frac{\alpha_{1,i}^2}{\frac{(k-1)NE_c}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{N\eta_0}{2}} \quad (9)$$

$$= \left\{ \frac{k-1}{2MN} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{\eta_0}{2MNE_c} \right\}^{-1} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \alpha_{1,i}^2$$

III. 슬롯 ALOHA DS-SS-CDMA 시스템의 throughput 해석

CDMA 시스템에서 고려되는 중요한 파라미터로는 시스템 용량 (최대 사용자 수, C)이다. 단일 셀 내의 기지국은 무선 데이터 패킷을 시간 슬롯 중에 k 명이 동시에 전송된다고 가정하며, 각 사용자는 고유한 의사잡음 부호를 할당하여 구분하게 된다. 그러나 동시에 많은 사용자가 기지국에 접속한다면 시스템 용량 (C)를 초과하게 되고, 각 사용자들의 패킷은 오류를 발생하게 된다.

CDMA 시스템에서 정규화 된 throughput은 시간 슬롯 당 평균적으로 성공되는 수신 패킷으로 정의되며, 시스템 용량 (C)으로 정규화 되어진다. 정규화 된 throughput (S)은 다음과 같다[3],[5].

$$S = \frac{1}{C} \sum_{k=1}^C k P_k P_{rk}(k) \quad (10)$$

여기서, P_k 는 $k-1$ 명의 다른 패킷들이 전송되어지는 패킷 확률이고, $P_{rk}(k)$ 는 패킷의 성공 확률이다. 만약에 송신되는 부하 (offered traffic, G)가 이항 도착 분포 (Binomial arrival distribution) 로 가정한다면, $k-1$ 명의 다른 패킷들이 전송된 경우, 패킷 확률은 다음과 같다[4].

$$P_k = \binom{C}{k} \left[\frac{G}{C}\right]^k \left[1 - \frac{G}{C}\right]^{C-k} \quad (11)$$

여기서, G 는 송신되는 부하이고, 이는 k 번째 사용자에게 대하여 시간 슬롯 당 평균 전송 수이며, 새롭게 발생되어진 패킷과 재전송 패킷을 포함한다. 먼저, 빠른 (fast) 레일리 페이딩 채널에서의 광대역 DS-SS-CDMA와 Multi-Carrier DS-SS-CDMA 시스템의 성능을 알아본다. 이 때 데이터 비트 구간은 채널의 동기 시간보다 매우 크며, 지연 확산은 점진적으로 증가가 된다. k 번째 사용자에게 대한 조건으로 패킷 길이가 N_d 개 비트의 패킷 성공 확률은 다음과 같다[3]-[5].

$$P_{rk}(k) = [1 - P_{er}(\gamma | k)]^{N_d} \quad (12)$$

여기서, γ 는 순시 신호 대 잡음 전력비이고, $P_{er}(\gamma | k)$ 는 DS-SS-CDMA BPSK (Binary Phase Shift Keying) 신호의 비트 오류 확률이 된다. 따라서, 평균 비트 오류 확률은 다음과 같다.

$$P_{er}(\gamma | k) = \int_0^\infty P_e(\gamma | k) p(\gamma) d\gamma \quad (13)$$

여기서, $P_e(\gamma | k) = 1/2 \text{erfc}(\gamma)$ 는 순시 비트 오류 확률이고, $p(\gamma)$ 는 레일리 페이딩에 대한 확률 밀도함수이며, $\text{erfc}(\cdot)$ 는 오류 보함수이다.

또한 느린 (slow) 레일리 페이딩 환경에서의 광대역 DS-SS-CDMA와 Multi-Carrier DS-SS-CDMA 시스템의 성능으로 패킷 성공 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{rk}(k) = \int_0^\infty [1 - P_e(\gamma | k)]^{N_d} p(\gamma) d\gamma \quad (14)$$

IV. 수치 해석 및 결과, 결론

본 논문에서는 레일리 페이딩 채널에서 빠른 (fast) 페이딩과 느린 (slow) 페이딩을 받을 때 광대역 DS-CDMA 시스템에서 무선 데이터 전송시 패킷 전송의 throughput을 알아보고, 또한 이를 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 경우와 비교, 분석한다. 사용되는 파라미터로서는 시스템 용량 (C), 패킷 길이 (N_d), 비트에너지 대 잡음전력비 (E_b/η_0) 그리고 반송파 수 (M)와 RAKE 수신기의 가지 수 (L)를 이용한다.

그림 2는 시스템 용량 (C)이 50 명으로 제한된 레일리 페이딩 채널에서 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 throughput을 나타낸 것이다. 비트 에너지 대 잡음전력비 (E_b/η_0)는 15 dB이고, 패킷 길이 (N_d)는 42 비트이다. 여기서 가장 우수한 성능은 느린 레일리 페이딩 채널에서 8 (= M) 개의 반송파를 갖는 Multi-Carrier DS-CDMA이며, 성능이 열악한 경우는 빠른 레일리 페이딩 채널에서 광대역 DS-CDMA 시스템이다. 따라서 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템에서 반송파 수 (M)를 증가시키므로써, 실내·외에서 반사파만이 존재하는 열악한 페이딩 채널에서도 throughput (S)을 향상시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 3은 빠른 레일리 페이딩 채널에서 비트 에너지 대 잡음 전력비 (E_b/η_0)의 변화에 따른 성능을 나타낸 것으로서 그림 3(a)는 $E_b/\eta_0 = 5$ dB 이고, 그림 3(b)는 $E_b/\eta_0 = 15$ dB이다. 또한 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템에서는 반송파 수 (M)를 증가시키면 처리이득 (M)이 작아지므로 시스템 용량 (C)을 처리이득 (M)과 동일하게 놓았다. 그림 3(a)에서는 반송파 수 (M)를 증가시키더라도 throughput (S)이 0.4를 도달하지 못한다. 이는 패킷 데이터를 재전송하여도 계속적인 충돌로 오류가 발생한다는 것을 뜻한다. 그림 3(b)에서 보면 비트 에너지 대 잡음 전력비 (E_b/η_0)의 증가로 throughput (S)이 개선된다. 여기서, 광대역 DS-CDMA 시스템은 최대 throughput (S)이 0.02를 넘지 못하며, 이것은 시스템 용량 (C)이 512 명을 수용하고 있기 때문에 패킷에 오류가 발생하였을 때, 재전송을 하여도 시스템 용량 (C)이 크기 때문에 지속적으로 패킷 오류가 발생한다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 느린 레일리 페이딩 채널에서 패킷 길이 (N_d)의 변화에 따른 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 throughput (S)으로서, 패킷 길이 (N_d)가 길어지면 throughput (S)이 낮아짐을 알 수 있다 (그림 4(a)는 $N_d = 128$ 비트와 그

림 4(b)는 $N_d = 256$ 비트). 이 때는 그림 2(a)의 빠른 페이딩 채널에서의 패킷 길이 $N_d = 42$ 비트 일 때보다도 더 우수함을 알 수 있다. 따라서 느린 페이딩 채널에서는 충분히 긴 패킷 길이를 수용할 수 있으나, 빠른 페이딩 채널에서는 짧은 패킷이 유용하다는 것을 알 수 있다.

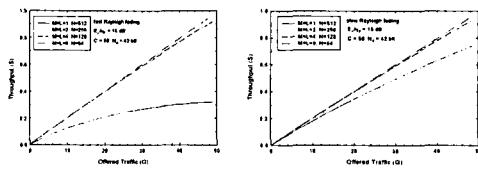
따라서, 이의 결론을 살펴보면, 빠른 레일리 페이딩 채널보다 느린 레일리 페이딩 채널에서 광대역 DS-CDMA 시스템의 throughput (S)이 높았으며, 광대역 DS-CDMA 보다 Multi-Carrier DS-CDMA의 throughput (S)이 우수하였다. 그러므로 빠른 레일리 페이딩 채널에서는 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 패킷 길이 (N_d)를 소형화하여 전송함으로써 throughput (S)을 높이는 것이 효과적이며, 느린 레일리 페이딩 채널에서는 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 시스템 용량 (C)을 증가시키거나, 패킷 길이 (N_d)를 적정히 길게 잡는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] H. Holma, *WCDMA for UMTS*, WILEY, 2000.
- [2] V. K. Garg, *IS-95 CDMA and CDMA2000*, Prentice Hall PTR, 2000.
- [3] R. Prasad, *Universal Wireless Personal Communications*, Artech House Publishers, 1998.
- [4] H. S. Misser, C. A. F. J. Wijffels, and R. Prasad, "Throughput analysis of CDMA with DPSK modulation and diversity in indoor Rician fading radio channels," *Electron. Letter*, vol. 27, pp. 601-602, March 1991.
- [5] C. A. F. J. Wijffels, H. S. Misser, and R. Prasad, "A micro-cellular CDMA system over slow and fast Rician fading radio channels with forward error correcting coding and diversity," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 42, no. 4, pp. 570-580, November 1993.
- [6] Mohammed Abdel-Hafez and Mehmet Safak, "Correlated shadowing and near-far effect on throughput of slotted ALOHA in Nakagami fading environment," *Mediterranean Electrotechnical Conf., MELECON 98*, 9th vol. 2, pp. 721-25, 1998.
- [7] S. Kondo and L. B. Milstein, "Performance of multicarrier DS CDMA systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, no. 2, pp. 238-246,

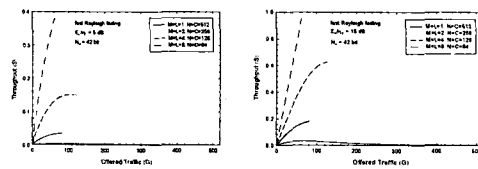
Feb. 1996.

- [8] 김영철, 노재성, 조성준, "라이시안 페이딩 채널에서 Multicarrier DS-CDMA 시스템의 성능 해석", 한국통신학회 하계종합학술발표회 논문집(하) pp. 1049-1052, 2000년 7월.
- [9] J. Proakis, *Digital Communications*, New York: McGraw-Hill, 1989.



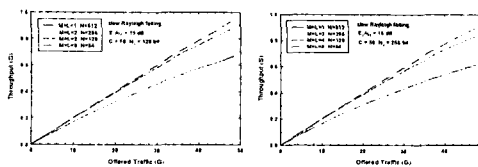
(a) (b)

그림 2. 레일리 페이딩 채널에서 제한된 시스템 용량에 대한 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 throughput ($C = 50$)



(a) (b)

그림 3. 빠른 레일리 페이딩 채널에서 E_b/η_0 의 변화에 따른 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 throughput



(a) (b)

그림 4. 느린 레일리 페이딩 환경에서 패킷 길이에 따른 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 throughput