

디스퍼시브 리시안 다중경로 페이딩 채널에서 동기식 셀룰라 DS-CDMA 네트워크의 역방향링크 성능

정희원 황 승 훈*, Lajos Hanzo**

Reverse-Link Performance of Synchronous Cellular DS-CDMA Networks in Dispersive Rician Multipath Fading Channels

Seung-Hoon Hwang*, Lajos Hanzo** *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 리시안 다중경로 페이딩 환경에서 동기식 DS-CDMA 셀룰라 네트워크의 역방향링크 성능을 고찰하고자 한다. 시스템 성능은 단일 셀과 다중 셀의 두 가지 네트워크 레이아웃에서 성취 가능한 평균 비트오류율과 사용자 수용용량으로 계산된다. 특히 다중 셀 환경에서는 다른 셀 간섭이 동기식 DS-CDMA 업링크의 성취 가능한 수용용량에 미치는 영향을 살펴본다. 연구 결과를 보면 기존의 비동기식 CDMA 시스템과 비교할 때, 동기식 업링크 전송은 상응하는 비동기식 전송 시나리오보다 BER=10⁻³에서 25%부터 56%까지 성취 가능한 사용자 수용용량 측면의 이득을 보인다.

Key words : Reverse-link, synchronous cellular DS-CDMA, dispersive Rician fading channels

ABSTRACT

In this paper, the reverse-link performance of synchronous DS-CDMA cellular networks is investigated in Rician multipath fading environments. The system's performance is evaluated in terms of the achievable average bit error rate (BER) and the user capacities of two different network layouts, namely those of a uniform grid of hexagonal multiple cells and a single isolated cell. In the multiple-cell scenario, the impact of the other cells' interference on the attainable capacity of the synchronous DS-CDMA uplink is investigated. Upon comparing both networks to a conventional asynchronous CDMA system, we demonstrate an achievable user capacity gain of 25% to 56% for synchronous uplink transmissions over that of the corresponding asynchronous transmission scenario at BER = 10⁻³.

I. 서 론

직접수열 부호분할 다중접속(DS-CDMA) 시스템의 성능은 주로 다중접속 간섭(MAI)에 의해 제한된다. 따라서 현재 MAI를 감소시키는 다중사용자 검출기, 간섭 제거기와 같은 기술들이 많은 관심을 끌

고 있다^{[1],[2],[3]}. 특히 역방향링크를 위해 고안되는 기술들이 특히 많은 관심을 끌고 있는데 그 이유는 셀룰라 음성 네트워크의 역방향링크 수용용량이 순방향링크보다 일반적으로 낮기 때문이다^[4]. 이는 확산부호의 직교성이 유지되지 못해서인데, 그 이유는 셀 내의 이동국들이(MSs) 무작위적인 지리적 분포

* 동국대학교 공과대학 전자공학과 (shwang@dongguk.edu)

** School of Electronics and Computer Sciences, University of Southampton, United Kingdom (lh@ecs.soton.ac.uk)

논문번호 : KICS2005-04-155, 접수일자 : 2005년 4월 13일

※ 이 논문은 2004년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2004-214-D00131)

를 이루는 경우 역방향링크에서는 이동국들에 의해 전송되는 신호들의 수신 타이밍이 각기 다르기 때문이다.

동기식 DS-CDMA 업링크 전송은 지상 이동 시스템에서 MAI의 영향을 감소시키기 위해서 제안되었는데^{[5],[6]}, 이는 비동기식 시스템보다 낮은 복잡도를 가지고 다중 사용자 검출이나 간섭 제거기 구현이 가능하다는 추가적인 장점을 가진다^[7]. 따라서 업링크 동기식 DS-CDMA는 미래 이동 통신 시스템^[8] 또는 이동 광대역 무선 접속 시스템^[9]에서 채용될만한 매력적인 기술로 고려되고 있다. 이와 같은 응용에서, 동기식 업링크 DS-CDMA는 정확한 적응적 타이밍 제어가 요구되는데, 이는 낮은 이동성을 가지는 실내 내지는 보행자 환경에서 쉽게 적용될 수 있다. 그러나 이전에 행해진 연구들^{[5],[6]}은 레일리 페이딩만을 가정하였고 직접 성분이 존재하는 경우의 잠재적인 성능의 이점을 고려하지 못했다. 실제 실내 채널은 종종 강한 직접 성분을(LOS) 보인다^[10]. 더욱이, 이 때 다중 셀 환경의 인접 셀들에 의해 부과되는 비동기식 MAI의 영향은 정량화된 적이 없다.

본 논문에서는 직접 경로를 가지는 리시안 다중 경로 페이딩이란 특정한 시나리오에서 동기식 DS-CDMA 셀룰라 네트워크의 역방향링크 성능을 분석한다. 참고문헌 [6]의 유도를 확장하여, 두 다른 네트워크 레이아웃, 즉 다중 셀 및 단일 셀에서 동기식 DS-CDMA의 역방향링크 성능으로 성취 가능한 평균 비트오류확률(BER)을 계산하고 성취가능한 수용 용량을 정량화한다. 특히 다중 셀 시나리오에서 인접 셀 간섭이 동기식 DS-CDMA 업링크 성능에 미치는 영향을 고찰한다. 또한, 결과를 일반적인 비동기식 CDMA와 비교하면서, 동기식 업링크 전송이 비동기식 전송보다 높은 수용 용량을 가짐을 보이고자한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어있다. II 장에서는 채널과 시스템 모델의 개괄이 소개된다. 다중 셀과 단일 셀 시나리오에서 성능 분석은 III장에서 보이고, 수치결과는 IV장에서 토의된다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺도록 한다.

II. 채널과 시스템 모델

각 사용자의 협대역 변조된 신호는 먼저 짧은 직교 부호열에 의해 확산되고 의사잡음(PN) 신호열에 의해 랜덤화된다고 가정한다. 또한 K명의 사용

자가 존재한다고 가정하면 ($k=1, 2, \dots, K$), k번째 사용자의 송신신호는 다음과 같다.

$$s^k(t) = \sqrt{2P_k} a(t) W^{(k)}(t) b^{(k)}(t) \cos[\omega_c t + \phi^{(k)}] \quad (1)$$

여기서 P_k 는 평균 송신 전력, ω_c 는 공통 반송파 주파수, $\phi^{(k)}$ 는 $[0, 2\pi)$ 에서 균일 분포되어있다고 가정하는 k번째 변조기의 위상각이다. 또한, $a(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j p_T(t - jT_c)$, $a_j \in \{-1, 1\}$ 는 셀 내의 모든 사용자에게 공통인 PN 랜덤화 부호열이다^[5]. 여기서 $p_T(t)$ 는 사각의 칩 파형이다. 모든 업링크 사용자를 구분하는 직교 채널화 부호열 $W^{(k)}(t)$ 은 아래와 같다.

$$W^{(k)}(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} w_j^{(k)} p_{T_w}(t - jT_w), w_j^{(k)} \in \{-1, 1\} \quad (2)$$

사용자 k의 데이터 파형, $b^{(k)}(t)$ 은 다음과 같다.

$$b^{(k)}(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} b_j^{(k)} p_T(t - jT), b_j^{(k)} \in \{-1, 1\} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서, T_w 는 사용자마다 다른 직교 업링크 부호열의 칩 길이, $p_T(t)$ 는 단일 높이와 길이 T를 가지는 사각 펄스이다. PN 칩 길이 T_c 는 데이터 비트 길이 T와 처리 이득 $N = T/T_c$ 로 관련되어있다. 간략화를 위해, T_w 는 T_c 와 같다고 가정한다.

k번째 사용자의 대역통과 채널의 기저대역 임펄스 응답은 다음과 같이 표현될 수 있다^[11].

$$h_k(\tau) = \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \beta_l^{(k)} e^{j\phi_l^{(k)}} \delta[\tau - \tau_l^{(k)}]. \quad (4)$$

각 경로는 세 가지 변수 즉 크기 $\beta_l^{(k)}$, 위상천이 $\theta_l^{(k)}$, 전파지연 $\tau_l^{(k)}$ 에 의해 특성화된다. 탭 지연선 모델은 k번째 사용자의 l번째 다중경로지연을 가지는 주파수 선택적 채널을 $\tau_l^{(k)} = \tau_0^{(k)} + lT_c$ 로 나타낸다^[12]. 레일리 페이딩 채널 모델은 기지의 상수 값인 직접 경로성분을(LOS) $\alpha e^{j\theta}$ 을 채널의 탭 지연선 표현의 첫 번째 탭에 추가함으로써 수정될 수 있는데 따라서 본 모델의 최초 경로는 리시안 페이딩을 나타낸다^[13]. 다른 경로들이 레일리 페이딩을 겪는다고 가정하면, l번째 전파경로에 있어 ($l=1, \dots, L^{(k)}-1$) k번째 사용자의 수신 신호 세기는 다음과 같은 확률 밀도 함수를(pdf) 가진다^[11].

$$p(\beta_l^{(k)}) = (2\beta_l^{(k)}/\Omega_l^{(k)}) \exp(-(\beta_l^{(k)})^2/\Omega_l^{(k)}). \quad (5)$$

파라미터 $\Omega^{(k)}$ 는 $\beta^{(k)}$ 의 이차 모멘트로 $\sum \Omega = 1$ 이다. (즉, $\Omega^{(k)} = E[(\beta^{(k)})^2]$). 또한, $\Omega^{(k)}$ 는 지수적으로 감소하는 다중경로 밀도 프로파일 (MIP)의 주 탭 $\Omega_0^{(k)}$ 의 이차 모멘트와 아래와 같은 관계를 가진다.

$$\Omega_l^{(k)} = \Omega_0^{(k)} e^{-l\delta}, \delta > 0, \text{ for } 0 < l \leq L^{(k)} - 1. \quad (6)$$

파라미터 δ 는 평균 경로 크기의 감쇠율을 경로 지연의 함수로 나타낸다. 보다 실제적인 모델은 주경로가 전체 수신 신호 전력의 절반이상을 포함하는 지수적으로 감쇠하는 MIP임을 주목하자^{[11], [14], [15]}.

III. 성능 분석

동기식 업링크의 단일 셀 시나리오에서 첫 번째 RAKE 수신기 가지에 도착하는 신호의 타이밍은 동기화되어있다고 가정할 수 있다. 이는 강력한 동기 기법에 의해 비교적 용이하게 얻어질 수 있기 때문이다^[7]. 반면, 나머지 가지의 신호들은 비동기식이다. 그러므로 첫 번째 RAKE 수신기 가지에서 경로의 수신 타이밍은 동기화되어있다고 모델링하는 반면 나머지 가지에서는 비동기화되어 있다고 모델링한다. 가우시안 근사화를 사용하여 첫 번째 가지와 나머지 가지의 MAI 항목들의 분산은 $n=0$ 과 $n=1$ 일 때 각각 MAI 분산과 같은 가우시안 프로세스로 모델링된다. BER 계산 시 가우시안 가정의 채용은 일반적으로 BER이 10^{-3} 또는 보다 높은 값이라고 하면, 작은 K (< 10)에 대해서조차 매우 정확한 값을 가진다고 알려져 있다^[12]. 고려되는 코히어런트 RAKE 수신기에서 탭의 수 L_r 는 변수로서 $L^{(k)}$ 와 같거나 작은 값이다. 이때 탭 가중치와 위상은 채널 파라미터의 정확한 추정값이며, 정확한 전력제어라고 가정한다. 또한 첫 번째 분별 가능한 경로의 RAKE 수신기 핑거는 단지 직접 경로 성분만을 추적하고, 레일리 페이딩을 겪는 다중경로 성분은 간섭으로 작용한다고 가정한다^[13].

3.1 다중 셀 시나리오

다중 셀 환경에서 주위 셀에 의한 비동기 간섭의 영향이 고려되어야 하는데, 이는 어느 정도의 성능 열화를 가져오기 때문이다. 셀룰라 CDMA 채널은 4차 전파 경로 손실을 가지는 주파수 선택적 리시안 페이딩을 경험한다고 가정한다. 또한 각 셀에 K 사용자가 존재한다고 가정한다. 따라서 레퍼런스 셀에는 $K-1$ 간섭 사용자와 레퍼런스 사용자가 존재하고 각 이웃 셀에는 K 간섭 사용자들이 존재한다고

생각한다. 레퍼런스 기지국 (BS) 에서 수신되는 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{2P_k^s(r_k)g(r_k)} \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \beta_l^{(k)} a[t-\tau_l^{(k)}] \cdot W^{(k)}[t-\tau_l^{(k)}] b^{(k)}[t-\tau_l^{(k)}] \cos[\omega_c t + \phi_l^{(k)}] + m \sum_{j=1}^K \sqrt{2P_k^s(r_j)g(r_j)} \sum_{l=0}^{L^{(j)}-1} \beta_l^{(j)} a[t-\tau_l^{(j)}] \cdot W^{(j)}[t-\tau_l^{(j)}] b^{(j)}[t-\tau_l^{(j)}] \cos[\omega_c t + \phi_l^{(j)}] + n(t) \quad (7)$$

여기서 $\beta_0^{(k)} = \alpha$, $\phi_1^{(k)}$ 는 k 번째 반송파의 l 번째 경로의 위상이며 $n(t)$ 는 양단 전력 스펙트럴 밀도 $n_0/2$ 를 가지는 부가 백색 가우시안 잡음(AWGN) 이다. 식 (7)의 첫 번째항은 BS로부터 r_k 떨어져있는 레퍼런스 셀 내의 사용자로부터의 신호를 의미하며, 두 번째 항은 이웃 간섭 셀로부터의 간섭 신호를 나타내는데, 여기서 r_j 는 레퍼런스 BS로부터 간섭 사용자까지의 거리를 나타내고 m 은 고려되는 이웃 셀의 수를 의미한다. $g(r_k)$ 는 전파 경로 손실의 함수로 $g(r_k) = 1/r_k^4$ 와 같다. 더욱이 $\xi(r) = (r/R)^4$ 는 경로 손실의 영향을 나타내는 함수이다. 관심 사용자 ($K=1$)에 있어서, RAKE 수신기의 출력은 다음과 같다.

$$U = \sum_{n=0}^{L_r-1} \int_{nT_c}^{T+nT_c} r(t) \beta_n^{(1)} a(t-nT_c) \cdot W^{(1)}(t-nT_c) \cos[\omega_c t + \phi_n^{(1)}] dt, \quad (8)$$

$$= \sum_{n=0}^{L_r-1} \{ S^{(n)} + I_{mai}^{(n)} + I_{si}^{(n)} + I_{ni}^{(n)} + I_{oc}^{(n)} \}$$

여기서

$$S^{(n)} = \begin{cases} \sqrt{\frac{bg(r_1)}{2} \left(\frac{r_1}{R}\right)^4} b_0^{(1)} T \alpha^2, & n=0 \\ \sqrt{\frac{bg(r_1)}{2} \left(\frac{r_1}{R}\right)^4} b_0^{(1)} T \beta_n^{(1)2}, & n \geq 1 \end{cases}, \quad (8a)$$

$$I_{mai}^{(n)} = \begin{cases} \sum_{k=2}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \sqrt{\frac{bg(r_k)}{2} \left(\frac{r_k}{R}\right)^4} \alpha \beta_l^{(k)} \cdot \{ b_{-1}^{(k)} RW_{kl}[\tau_{nl}^{(k)}] + b_0^{(k)} RW_{kl}[\tau_{nl}^{(k)}] \} \cos[\phi_{nl}^{(k)}], & n=0 \\ \sum_{k=2}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \sqrt{\frac{bg(r_k)}{2} \left(\frac{r_k}{R}\right)^4} \beta_n^{(1)} \beta_l^{(k)} \cdot \{ b_{-1}^{(k)} RW_{kl}[\tau_{nl}^{(k)}] + b_0^{(k)} RW_{kl}[\tau_{nl}^{(k)}] \} \cos[\phi_{nl}^{(k)}], & n \geq 1 \end{cases}, \quad (8b)$$

$$I_{si}^{(n)} \approx \sqrt{\frac{bg(r_1)}{2} \left(\frac{r_1}{R}\right)^4} \sum_{l=0}^{L^{(1)}-1} \beta_n^{(1)} \beta_l^{(1)} \cdot \{ b_{-1}^{(1)} RW_{1l}[\tau_{nl}^{(1)}] + b_0^{(1)} RW_{1l}[\tau_{nl}^{(1)}] \} \cos[\phi_{nl}^{(1)}] \quad (8c)$$

$$I_{ni}^{(n)} = \int_{nT_c}^{T+nT_c} n(t)\beta_n^{(1)} a(t-nT_c) \cdot W^{(1)}(t-nT_w) \cos[\omega_c t + \phi_n^{(1)}] dt, \quad (8d)$$

$$I_{oc}^{(n)}(t) = m \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \sqrt{\frac{E_b T_c}{2} \left(\frac{r_i}{R}\right)^4} \beta_n^{(1)} \beta_l^{(j)} \cdot \{b_{-1}^{(j)} RW_{\beta l}[\tau_{nl}^{(j)}] + b_0^{(j)} \widehat{RW}_{\beta l}[\tau_{nl}^{(j)}]\} \cos[\phi_{nl}^{(j)}] \quad (8d)$$

위 수식에서 $\beta_0^{(1)} = a$ 이며, $b_0^{(1)}$ 는 검출할 정보비트, $b_{-1}^{(1)}$ 는 이전 비트, 반면 $\tau_{nl}^{(k)} = \tau_l^{(k)} - \tau_n^{(1)}$, $\phi_{nl}^{(k)} = \phi_l^{(k)} - \phi_n^{(1)}$, 이고 RW 와 \widehat{RW} 는 업링크에 사용되는 윌쉬-하다마드 PN 부호열의 연속 부분 교차상관 함수로 다음과 같이 정의된다. $RW_{kl}(\tau) = \int_0^\tau a(t-\tau)W^{(k)}(t-\tau)a(t)W^{(1)}(t)dt$ 와 $\widehat{RW}_{kl}(\tau) = \int_\tau^T a(t-\tau)a(t)W^{(1)}(t)dt$.

식 (8)로 부터, n 번째 RAKE 수신기 가지, $n=0, 1, \dots, L_r-1$ 의 출력은 다섯 항으로 이루어진다. 첫 번째 항은 검출하려는 신호 성분, 두 번째 항은 레퍼런스 셀내의 $(K-1)$ 타 사용자에게 의해 부가되는 MAI 성분, 세 번째 항은 레퍼런스 사용자에게 의한 자기 간섭(SI), 네 번째 항은 AWGN을 나타낸다. 마지막으로, 식 (8e)은 다른 주변 셀들로 부터의 간섭을 나타낸다. 각 사용자의 페이딩 통계는 같다고 가정하고 각 분해 가능한 경로의 평균 수신 전력은 모든 사용자에게 대해 동일하다고 가정하여 $E[\beta_n^{(k)2}] = E[\beta_n^2]$ 라고 한다.

식 (8)로부터, $\beta_n^{(1)}$ 을 조건부로 하는 $n=0$ 에 대한 MAI의 분산은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_{mai,0}^2 = \frac{P}{2} \sum_{k=2}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} a^2 E[(\beta_l^{(k)})^2] E[\cos^2(\phi_{0l}^{(k)})] \cdot E[\{b_{-1}^{(k)} RW_{\beta l}(\tau_{0l}^{(k)}) + b_0^{(k)} \widehat{RW}_{\beta l}(\tau_{0l}^{(k)})\}^2] \quad (9)$$

$$= \frac{E_b T_c (2N-3)}{12N(N-1)} a^2 \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \Omega_l^{(k)}$$

여기서 $E_b/N_0 = PT$ 는 비트당 신호 에너지이다. $n \geq 1$ 에서 MAI의 분산은 다음과 같이 나타난다^[5].

$$\sigma_{mai,n}^2 = \frac{E_b T_c (N-1)}{6N^2} \{\beta_n^{(1)}\}^2 \cdot \sum_{k=2}^K \left(a^2 + \sum_{l=1}^{L^{(k)}-1} \Omega_l^{(k)} \right), n \geq 1 \quad (10)$$

$\sigma_{si,n}^2$ 의 조건부 분산은 간략화되어 다음과 같다^[8].

$$\sigma_{si,n}^2 \approx \frac{E_b T_c}{4N} \{\beta_n^{(1)}\}^2 \sum_{l=1}^{L^{(k)}-1} \Omega_l^{(1)}, \quad (11)$$

반면 AWGN의 분산은 다음과 같다.

$$\sigma_{ni,n}^2 = \frac{TN_0}{4} \{\beta_n^{(1)}\}^2. \quad (12)$$

참고문헌 [16]와 유사하게, 다른 셀 간섭 항의 분산은 균일 트래픽 밀도에 대해서 다음과 같다.

$$\sigma_{oc,n}^2 = \frac{E_b T_c}{6N} \{\beta_n^{(1)}\}^2 \sum_{j=1}^K \sum_{l=0}^{L^{(j)}-1} \Omega_l^{(j)} \cdot \int \int \left(\frac{r_j}{r_j' (r_j, \Theta)} \right)^4 \mathcal{K}(r_j, \Theta) dr_j d\Theta \quad (13)$$

$$= \frac{E_b T_c}{6N} \left(12 \log e \left(\frac{3}{2} \right) - \frac{19}{4} \right) \{\beta_n^{(1)}\}^2 \cdot \sum_{j=1}^K \left(a^2 + \sum_{l=1}^{L^{(j)}-1} \Omega_l^{(j)} \right)$$

$\beta_n^{(1)}$ 조건부의 수신기 출력은 가우시안 랜덤 프로세스로 평균은 다음과 같고

$$U_s = \sqrt{\frac{E_b T_c}{2} \left(a^2 + \sum_{n=1}^{L_r-1} \{\beta_n^{(1)}\}^2 \right)}, \quad (14)$$

전체 간섭의 분산은 아래와 같다.

$$\sigma_T^2 = \sum_{n=0}^{L_r-1} (\sigma_{mai,n}^2 + \sigma_{si,n}^2 + \sigma_{ni,n}^2 + \sigma_{oc,n}^2)$$

$$= (E_b T_c \Omega_0) \left\{ \frac{N_0}{4E_b \Omega_0} + \frac{q(L^{(k)}, \delta) - 1}{4N} \right.$$

$$+ \frac{K(a^2 + q(L^{(k)}, \delta) - 1)}{6N} \left(12 \log e \left(\frac{3}{2} \right) - \frac{19}{4} \right)$$

$$+ \frac{(2N-3)Kq(L^{(k)}, \delta) - 1}{12N(N-1)} \frac{a^2}{a^2 + \sum_{n=1}^{L_r-1} \{\beta_n^{(1)}\}^2}$$

$$+ \frac{(N-1)(K-1)(a^2 + q(L^{(k)}, \delta) - 1)}{6N^2}$$

$$\cdot \left. \frac{\sum_{n=1}^{L_r-1} \{\beta_n^{(1)}\}^2}{a^2 + \sum_{n=1}^{L_r-1} \{\beta_n^{(1)}\}^2} \right\} \left(a^2 + \sum_{n=1}^{L_r-1} \{\beta_n^{(1)}\}^2 \right) \quad (15)$$

여기서,

$$q(L^{(k)}, \delta) = \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} e^{-l\delta} = (1 - e^{-L^{(k)}\delta}) / (1 - e^{-\delta}).$$

지수적 MIP에서 오류 확률은 아래와 같다.

$$P_e^l = \int_0^\infty Q\left(\sqrt{\frac{U_s^2}{\sigma_T^2}}\right) p(x) dx \quad (16)$$

$$= \int_0^\infty Q\left(\sqrt{\frac{U_s^2}{\sigma_T^2}}\right) \sum_{k=1}^{L-1} \frac{\pi_k}{\Omega_k} e^{-x/\Omega_k} dx$$

여기서 $X = \sum_{n=1}^{L-1} \{\beta_n^{(1)}\}^2$, $Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty \exp$

$$(-u^2/2) du, \quad \pi_k = \prod_{i=1}^{L-1} \frac{x_k - x_i}{x_k - x_i} = \prod_{i=1}^{L-1} \frac{\Omega_k - \Omega_i}{\Omega_k - \Omega_i},$$

식 (16)에서 적분은 해석적으로 쉽게 계산될 수 있다.

3.2. 단일 셀 시나리오

이전 섹션에서 $m=0$ 이라고 가정하면 단일 셀 시나리오는 다중 셀 시나리오의 특수한 경우가 된다. 식 (15)로부터, 전체 간섭의 분산은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_T^2 &= \frac{E_b T(2N-3)}{12N(N-1)} a^2 \sum_{k=2}^K \sum_{l=1}^{L^{(k)}-1} \Omega_l^{(k)} \\ &+ \frac{E_b T(N-1)}{6N^2} \sum_{n=1}^{L_r-1} \{\beta_n^{(1)}\}^2 \sum_{k=2}^K \left(a^2 + \sum_{l=1}^{L^{(k)}-1} \Omega_l^{(k)} \right) \\ &+ \frac{E_b T}{4N} \left(a^2 + \sum_{n=1}^{L_r-1} \{\beta_n^{(1)}\}^2 \right) \sum_{l=1}^{L^{(k)}-1} \Omega_l^{(1)} \\ &+ \frac{T\eta_0}{4} \left(a^2 + \sum_{n=1}^{L_r-1} \{\beta_n^{(1)}\}^2 \right) \end{aligned} \quad (17)$$

그리고 오류 확률은 식 (16)과 (17)로부터 얻을 수 있다.

IV. 수치 결과

본 절은 지수적 MIP를 가지는 리시안 페이딩 채널에서 업링크 동기식 DS-CDMA 시스템의 시스템 파라미터 선택이 코히어런트 BPSK RAKE 수신기의 성취 가능한 BER 성능에 미치는 영향을 고찰해 보고자 한다. $L^{(k)}$ 는 k 번째 사용자의 수신기에 도달하는 전파 경로의 수라고 가정하며, 처리 이득 N 과 RAKE 수신기 가지의 수 L_r 은 고정되며 사용자 수 K 는 변화한다고 가정한다. 성능 그래프에서, α^2/Ω_0 는 직접경로 전력 대 최초 분산 경로의 평균 전력 비로서 참고문헌[17]에서 사용되어져왔다. 실내 무선 채널 측정은 리시안 분포가 2dB로부터 7dB까지에 이르는 K 요소 값을 가짐을 보인다[13]. α^2/Ω_0 과 δ 의 다른 값들이 전체 시스템 수용 용량에 미치는 영향은 그림 1과 2, 표 1과 2에서 요약될 것이다. 여기서 성취 가능한 시스템 성능은 성취 가능한 평균 BER과 지원가능한 사용자 수로 계산된다. 레일리과 리시안 다중 경로 페이딩 채널에서 최대비 결합(MRC)을 사용하는 비동기식 CDMA 시스템의 BER 분석은 참고문헌 [11], [12]과 [17]에서 참고할 수 있다.

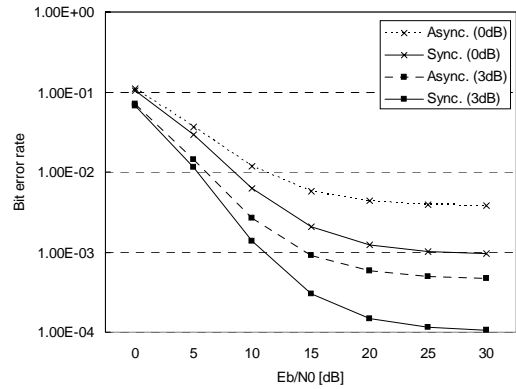


Fig. 1. Uncoded BER vs. E_b/N_0 in multiple cells ($K=24$, $\alpha^2/\Omega_0=0$ or 3dB, $\delta=0.2$)

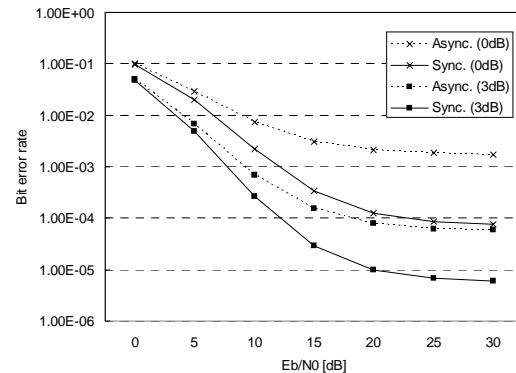


Fig. 2. Uncoded BER vs. E_b/N_0 in multiple cells ($K=24$, $\alpha^2/\Omega_0=0$ or 3dB, $\delta=1.0$)

그림 1과 2는 성취 가능한 평균 BER 성능을 E_b/N_0 의 함수로 보이는데 $\alpha^2/\Omega_0=0$ dB와 $\alpha^2/\Omega_0=3$ dB을 각기 다른 MIP에 대해 ($\delta=0.2$ 와 $\delta=1.0$) 가정한다. 참고문헌 [18]에서의 도심환경에서의 측정값은 MIP는 전형적으로 지수적으로 감소함을 보인다. 시스템 성능을 보기위해서 $K=24$, $N=128$, $L^{(k)}=L_r=3$ and $m=6$ 의 파라미터를 선택했다. 그림 1과 2로부터, $\delta=1.0$ 인 리시안 페이딩에서 α^2/Ω_0 이 2로 증가할 때 동기식 업링크 DS-CDMA는 성취 가능한 시스템 성능 면에서 $\delta=0.2$ 에서 보다 큰 장점이 있음을 보인다. 즉 최초 경로의 다중 접속 간섭의 감소가 다른 RAKE 수신기 가지에서 보다 성취 가능한 시스템 성능에 더 큰 영향을 미치기 때문에, 보다 나은 BER을 얻을 수 있다. 직관적으로 MIP 감소량 δ 이 증가함에 따라 직접 경로 성분을 포함하는 최초 경로의 수신 전력은 증가하고 이는 보다 높은 신호 대 잡음비(SNR)를 보인다. 이는 동기식 시스템의 성취 가능한 성능을 크게 개선한다. 직접 경로 성분

Table 1. User capacity. ($E_b/N_0=10\text{dB}$, $\delta=0.2$)

BER	α^2/Ω_0	User capacity			
		Multiple-Cell Scenario		Single-Cell Scenario	
		0 dB	3dB	0dB	3dB
10^{-3} (Voice)	Sync	24	35	42	67
	Async	18	28	26	47
10^{-6} (Data)	Sync	<12	14	12	25
	Async	<12	<12	<12	17

Table 2. User capacity. ($E_b/N_0=10\text{dB}$, $\delta=1.0$)

BER	α^2/Ω_0	User capacity			
		Multiple-Cell Scenario		Single-Cell Scenario	
		0dB	3dB	0dB	3dB
10^{-3} (Voice)	Sync	36	48	78	>84
	Async	23	37	35	61
10^{-6} (Data)	Sync	12	21	30	53
	Async	<12	15	12	24

전력과 MIP 감쇠항 δ 이 증가함에 따라, SNR이 높아지고 또한 다이버시티 이득이 감소함으로써 최소 경로를 제외한 모든 다른 경로의 영향은 줄어든다.

고정된 BER을 목표로 할 때, 시스템이 수용 가능한 사용자의 수는 시스템 수용 용량의 성취 가능한 상한을 결정하는 중요한 설계 항목이다. BER= 10^{-3} 또는 10^{-6} 에서 $E_b/N_0=10\text{dB}$ 일 때 MIP 감쇠항이 $\delta=0.2$ 와 $\delta=1.0$ 인 경우, 사용자 수용용량을 나타내기 위한 사용자 수는 표 1과 2에 요약되어있다. 같은 BER 값을 가질 때를 기준으로 표 1과 2를 비교하면 업링크 동기화가 사용될 때 $\delta=1.0$ 인 지수 MIP를 가지는 채널은 $\delta=0.2$ 에서 보다 높은 수용용량 이득을 가진다. 비교를 위해 $m=0$ 인 경우 단일 셀 시나리오의 성취 가능한 성능도 제시된다. 셀룰라 환경의 특성이 시스템에 의해 지원되는 사용자 수에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 예를 들어, 표 1에서 BER= 10^{-3} 에 대해 단일 셀 시나리오에서 성취 가능한 수용 용량 개선은 60%인 반면, 다중 셀 상황에선 그 개선의 정도가 33%로 감소한다. 그럼에도 불구하고 동기식 다중 셀 시나리오는 비동기식 업링크 시나리오에 비해 여전히 40%정도의 사용자 수용 용량 이득을 성취할 수 있다. 표 2의 단일 셀 시나리오에서 $\alpha^2/\Omega_0=0\text{dB}$ 일 때의 동기식 전송 시나리오가 $\alpha^2/\Omega_0=3\text{dB}$ 일 때의 비동기식 시스템보다 훨씬 더 나은 성능을 보인다. 이는 리시안 페이딩

채널에서 동기식 통신을 유지하는 것이 시스템 성능 측면에서 다른 페이딩 파라미터 값을 변화시키는 것보다 더 큰 이득이 됨을 보여준다.

V. 결론

리시안 다중 경로 페이딩 채널에서 다른 셀 간섭, 직접 경로 성분의 전력 α , MIP 감쇠항 등이 셀룰라 네트워크의 동기식 DS-CDMA 업링크의 성능에 미치는 영향을 고려했다. 채널 모델에서 직접 경로 성분의 포함이 동기식과 비동기식 역방향링크 시스템 간의 성능 차를 증가시킴을 보였다. 또한, 지수적 MIP의 감쇠항 δ 이 리시안 페이딩 채널에서 성취 가능한 시스템 성능에 큰 영향을 미침도 보였다. 그러므로 동기식 전송에 의해 생기는 BER 개선은 직접 경로 성분의 전력과 채널의 MIP 감쇠항에 의존함을 알 수 있다. 이는 높은 직접 성분의 SNR과 감소된 다이버시티 이득으로 인해, 직접 성분이 있는 주경로를 제외한 모든 다른 경로의 영향이 무시할 만하기 때문이다.

결론적으로, 표 1과 2에서 보듯이 리시안 페이딩 채널의 셀룰라 네트워크에서 코히어런트하게 검출되는 동기식 역방향 링크는 BER= 10^{-3} 에서 25%에서 56%의 수용용량 개선을 보인다. 비록 실제적인 다중 셀 시나리오에서 단일 셀 경우에 비해 사용자 수용용량의 열화가 있지만 시스템은 동기식 DS-CDMA 업링크에서 비동기식 시나리오에 비해 여전히 성능 이득을 보인다. 향후 다중 반송과 전송의 혜택을 받는 시스템의 성능 분석은 좋은 연구과제가 될 것이다.

참고 문헌

- [1] R.A. Iltis, "Performance of constrained and unconstrained adaptive multiuser detectors for quasi-synchronous CDMA," *IEEE Transactions on Commun.*, Vol. 46, pp. 135-143, Jan. 1998.
- [2] H. Sari, F. Vanhaverbeke and M. Moeneclaey, "Extending the capacity of multiple access channels," *IEEE Communication Magazine*, pp. 74-82, Jan. 2000.
- [3] H. Sari, F. Vanhaverbeke and M. Moeneclaey, "Multiple access using two sets of orthogonal signal waveforms," *IEEE Commun. Letter*, Vol. 4, No. 1, pp. 4-6, Jan. 2000.
- [4] R. Padovani, "Reverse link performance of

IS-95 based cellular system," *IEEE Personal Commun.*, vol. 1, no. 3, Third quarter, 1994

[5] E.K. Hong, S.-H. Hwang, K.J. Kim and K.C. Whang, "Synchronous transmission technique for the reverse link in DS-CDMA terrestrial mobile systems," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol. 47, pp. 1632-1635, Nov. 1999.

[6] S.-H. Hwang and D.K. Kim, "Performance of reverse-link synchronous DS-CDMA system on a frequency-selective multipath fading channel with imperfect power control," *EURASIP Journal on APP. Sig. Proc*, Vol. 8, pp.797-806, Aug. 2002.

[7] L. Hanzo, L.-L. Yang, E.-L. Kuan and K. Yen, *Single-and Multicarrier DS-CDMA*. John Wiley & IEEE press, 2003, 1070 pages.

[8] 3GPP TR25.854: *Uplink Synchronous Transmission Scheme*, 3GPP May 2001(<ftp://ftp.3gpp.org>).

[9] IEEE 802.20 C802.20-03/29: *Smart antenna and MC-SCDMA*, April 2003.

[10] T.S. Rappaport, *Wireless communications*. Prentice Hall, 1996.

[11] J.G. Proakis, *Digital Communications*. New York: McGraw-Hill, 1983.

[12] T. Eng and L.B. Milstein, "Coherent DS-CDMA performance in Nakagami multipath fading," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 44, No. 9, pp. 1117-1129, 1996.

[13] J. Wang and L.B. Milstein, "CDMA overlay situations for microcellular mobile communications," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 43, No. 2/3/4, pp. 603-614, 1995.

[14] D. Parsons, *The mobile radio propagation channels*. Addison-Wesley, 1992.

[15] Rec. ITU-R TG8-1, "Guideline for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000," Rec. M.1225, 1997.

[16] O.K. Tonguz and M.M. Wang, "Cellular CDMA networks impaired by Rayleigh fading: System performance with power control," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 43, No. 3, pp. 515-527, 1994.

[17] J.R. Foerster and L.B. Milstein, "Analysis of hybrid, coherent FDMA/CDMA systems in Ricean multipath fading," *IEEE Trans. on*

Commun., vol. 45, pp. 15-18, 1997.

[18] G. Turin, F. Clapp, T. Johnston, S. Fine and D. Lavry, "A statistical model of urban multipath propagation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-9, 1972.

황 승 훈 (Seung-Hoon Hwang)

정회원

1999년 연세대학교 전기공학과 통신시스템 (박사)
1999년~2005년 LG전자 이동통신기술연구소 책임연구원

2003년~2005년 영국 University of Southampton, Research Fellow

2005년~현재 동국대학교 전자공학과 조교수

IEEE Senior Member, IEE Member, IEICE Member
<관심분야> 무선통신, CDMA 이론

Lajos Hanzo

정회원

Fellow of the Royal Academy of Engineering (FREng), received his Master degree in electronics in 1976 and his doctorate in 1983. In 2004 he was awarded the Doctor of Sciences(DSc) degree by the University of Southampton, UK. During his 28-year career in telecommunications he has held various research and academic posts in Hungary, Germany and the UK. Since 1986 he has been a member of academic staff in the School of Electronics and Computer Science, University of Southampton, UK, where he currently holds the Chair in Telecommunications. He has co-authored 10 John Wiley/IEEE Press books totalling about 8000 pages on mobile radio communications, published in excess of 500 research papers, organised and chaired conference sessions, presented overview lectures and been awarded a number of distinctions. He is an enthusiastic supporter of industrial and academic liaison and he offers a range of industrial courses. Lajos is also an IEEE Distinguished Lecturer of both the Communication Society and the Vehicular Society as well as a Fellow of both the IEEE and the IEE.