

논문 2008-45TC-11-3

# 고속 무선통신 시스템에서 트래픽 부하 예측에 의한 역방향 전송속도 제어

(Reverse link rate control for high-speed wireless systems based on traffic load prediction)

여 운 영\*

(Woon-Young YEO)

## 요 약

1xEV-DO 시스템의 각 단말은 기지국이 전송하는 이진(binary) 제어정보와 고유한 확률모델을 기반으로 자신의 전송속도를 결정한다. 하지만, 이 전송속도 제어방법은 확률적 불확실성으로 인해 동작을 예측하기 어렵고, 역방향 링크의 과부하를 억제할 수 있는 확실한 수단이 없기 때문에, 간섭 제한(interference-limited) 용량을 갖는 CDMA 시스템의 성능을 저하시킬 수 있다. 본 논문에서는 기지국이 역방향 트래픽 부하를 예측하고, 순방향 제어채널을 통해 단말의 전송속도를 효과적으로 제어할 수 있는 방법을 제안한다. 본 논문은 제안한 방법을 다차원 마르코프 프로세스로 모델링하고 기존 방법들과 성능을 비교한다. 분석 결과에 의하면, 제안한 방법은 기존의 방법들과 비교하여 셀에서 지원할 수 있는 최대 전송효율(throughput)을 크게 향상시킴을 알 수 있다.

## Abstract

The cdma2000 1xEV-DO system controls the data rates of mobile terminals based on a binary overload indicator from the base station and a simple probabilistic model. However, this control scheme has difficulty in predicting the future behavior of mobile terminals due to a probabilistic uncertainty and has no reliable means of suppressing the traffic overload, which may result in performance degradation of CDMA systems that have interference-limited capacity. This paper proposes a new traffic control scheme that controls the data rates of mobile terminals effectively by predicting the future traffic load and adjusting the forward-link control channel. The proposed scheme is analyzed by modeling it as a multi-dimensional Markov process and compared with conventional schemes. The numerical results show that the maximum cell throughput of the proposed scheme is much higher than those of the conventional schemes.

**Keywords:** rate control, cdma2000 1xEV-DO, performance analysis, multiple access control

## I. 서 론

1xEV-DO 시스템은 3GPP2(The Third Generation Project Partnership 2)라는 북미지역 표준화 기구에서 승인된 제3세대 이동통신 표준규격이다<sup>[1]</sup>. 초기에는 켈 컴사의 제안에 의해 'HDR(High Data Rate)'이라고 불렸고, 3GPP2와 TTA/EIA(Telecommunications Industry Association and Electronic Industries Alliance)에서는

이 표준규격을 각각 C.S0024와 IS-856으로 명명하였다. 이 시스템은 IS-95와 동일한 주파수 대역폭인 1.25MHz에서 다양한 무선기술들을 기반으로 고속의 패킷 데이터 서비스를 제공한다. 하지만, 음성 및 영상 전화와 같은 실시간 대화형 서비스들의 전송품질은 보장하지 않는다.

1xEV-DO는 순방향 트래픽 채널(forward traffic channel)로 최대 2.4Mbps까지 지원하고, 역방향 트래픽 채널(reverse traffic channel)로는 최대 153.6kbps까지 지원할 수 있다. 특히, 순방향 링크는 셀 내의 모든 단말들이 공유하지만, 역방향 링크는 기존 CDMA 시스템에서와 같이 각 단말에게 하나씩 전용으로 할당된다는

\* 정희원, 세종대학교 정보통신공학과  
(Department of Information and Communication Engineering, Sejong University)  
접수일자: 2008년7월28일, 수정완료일: 2008년11월14일

점을 기억할 필요가 있다. 역방향 링크의 전송속도는 단말 당 최대 153.6kbps까지 지원할 수 있지만, 셀에 다수의 단말들이 존재하면 역방향 링크에 적용되는 전송속도 제어 메커니즘에 의해 적절한 수준에서 조절된다. 비록, 1xEV-DO에서는 순방향 링크의 전송속도 향상에 초점을 맞추었지만, 최근에 소개되고 있는 다양한 P2P(point-to-point) 및 UCC(user created contents) 형태의 무선 데이터 서비스는 역방향 링크의 성능과 밀접한 관련이 있기 때문에 역방향 링크의 중요성은 지속적으로 강조되고 있다.

1xEV-DO 역방향 링크의 가장 큰 특징들 중 하나는 각 단말이 자율적으로 자신의 전송속도를 결정한다는 것이다. 기지국은 역방향 링크의 부하(load)를 이진정보(binary information)의 형태로 모든 단말들에게 전송하고, 각 단말은 이 정보와 고유한 확률모델을 바탕으로 역방향 전송속도를 자율적으로 조절하게 된다. 이러한 전송속도 제어방법을 적용하면 역방향 링크의 부하는 특정한 임계값을 기준으로 오르내리는 특성을 보이게 된다<sup>[2~3]</sup>. 이때, 역방향 링크의 부하가 과도하게 높으면 CDMA 시스템의 특성상 간섭에 의한 성능저하를 초래할 수 있고, 과도하게 낮으면 자원을 낭비하기 때문에, 역방향 링크의 성능향상을 위해서는 이러한 트래픽 부하의 변동을 줄일 수 있는 방안이 요구된다. 하지만, 역방향 링크의 부하 변동은 시스템 파라미터들과 환경적인 요인에 의해 크게 영향을 받기 때문에 이를 예측하고 조절하는데 큰 어려움이 따른다.

이러한 불확실한 전송속도 제어에 의해 발생할 수 있는 문제점들을 해결하기 위하여, 기지국이 단말의 동작정보를 바탕으로 전송속도의 증감 여부를 결정하는 방법이 제안되었다<sup>[4]</sup>. 이 방법에서는 기존의 방법과 비교하여 뚜렷한 성능 향상을 관찰할 수 있었지만, 전송속도 증가를 과도하게 억제하여 동일한 설정에서 전송효율(throughput)이 낮아지는 문제를 보인다. 더불어, 실질적인 성능개선 정도를 파악하기 위한 기준이 마련되지 않아 간접적으로 성능을 비교하였다. 본 논문에서는 역방향 링크의 전송효율을 더욱 개선할 수 있는 전송속도 제어방법을 제안한다. 제안한 방법에서 기지국은 각 단말의 동작정보를 바탕으로 차기 역방향 링크의 부하를 예측하고, 트래픽 부하의 변동이 최소화되도록 제어정보를 설정한다. 더불어, 동일한 조건에서 시스템의 성능을 비교할 수 있도록, 일정한 과부하율(overload probability)을 넘지 않는 최대 전송속도를 성능평가의 기준으로 채택한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 1xEV-DO 역방향 링크의 기본적인 전송속도 제어방법과 기존의 개선방법을 소개한다. III장은 본 논문에서 제안하는 새로운 전송속도 제어방법을 설명하고, IV장은 제안한 시스템의 성능을 분석하기 위한 수학적 분석 모델 및 과정을 다룬다. V장은 수치적 분석 결과를 바탕으로 제안한 방법과 기존 방법들의 성능을 비교한다. 마지막으로, VI장은 제안한 방법의 특징을 정리하고 향후 연구계획에 대하여 고찰한다.

## II. 역방향 전송속도 제어

1xEV-DO 시스템의 역방향 링크는 크게 접속(access) 채널과 트래픽(traffic) 채널로 구성된다. 접속 채널은 단말이 기지국과의 통신을 개시하거나 호출신호에 대한 응답으로 사용된다. 트래픽 채널은 사용자 데이터를 전송할 때 사용되는데, 각 단말에게 개별적인 트래픽 채널이 할당된다.

역방향 트래픽 채널은 파일럿(pilot) 채널, 역방향 전송속도 지시(RRI, reverse rate indicator) 채널, 전송속도 제어(DRC, data rate control) 채널, 응답(ACK, acknowledgement) 채널, 데이터(data) 채널로 구성된다. 파일럿 채널은 각 단말에 대한 동기복조(coherent demodulation)를 지원한다. RRI 채널은 단말이 송신하고 있는 데이터의 전송속도를 지시하여 기지국의 복조 과정을 돕는다. DRC 채널은 순방향 채널의 상태에 따른 적절한 순방향 전송속도를 결정한 후 이 정보를 기지국에 알려주고, ACK 채널은 순방향 트래픽의 전송성공 여부를 전송한다. 사용자 데이터를 전송하는 데이터 채널은 5가지의 전송속도를 가질 수 있고, 전송속도에 따라 파일럿 채널 대비 일정한 이득(gain)으로 송신된다. 역방향 링크의 기본적인 시간 단위는 1.666ms (=2048 chips)의 길이를 갖는 슬롯(slot)이고, 16개의 슬롯이 하나의 프레임(frame)을 구성한다.

1xEV-DO의 역방향 링크는 CDMA 기술을 사용하기 때문에, 기지국이 수신하는 역방향 링크의 부하가 너무 높으면 신호 상호간 간섭에 의해 시스템의 전반적인 성능이 낮아질 수 있다(interference-limited capacity). 하지만, 부하가 너무 낮으면 그만큼 전송효율이 떨어지게 된다. 따라서 트래픽 부하를 일정한 수준 이상으로 유지시키는 동시에 과도한 수준을 넘지 않도록 제어할 필요가 있다. 이를 위해, 기지국은 역방향 링크의 부하 수준을 지시하는 이진(binary) 정보인 RAB(reverse

activity bit)를 순방향 링크의 RA(reverse activity) 채널을 통해 모든 단말들에게 방송하고, 이를 수신한 각 단말은 매 프레임 단위로 고유한 확률모델에 따라 전송 속도를 결정한다.

구현하는 알고리즘에 따라 다를 수 있지만, 기지국이 송신하는 RAB값은 통상적으로 역방향 링크의 부하 수준을 임계값  $L_{th}$ 와 비교한 후 현재의 부하 수준이 이 임계값보다 작으면 0으로 설정하고 임계값보다 크면 1로 설정한다. 역방향 링크의 부하를 측정하기 위한 대상도 다양할 수 있는데, 보통 역방향 데이터 전송속도의 합, 평균 SINR(signal-to-interference ratio), 평균 BLER(block error rate) 등을 고려할 수 있다. 본 논문에서는 기지국이 수신하는 단말들의 데이터 전송속도 합을 기준으로 사용한다. RAB는 매우 중요한 정보이기 때문에 RABLength(8, 16, 32, 64)라는 파라미터가 지시하는 슬롯 동안 연속적으로 전송되고 하나의 슬롯 내에서도 4차례 반복된다.

그림 1은 각 단말의 전송속도 결정방법을 보여주고 있다. 단말이 지원하는 5가지 전송속도를  $R_1, \dots, R_5$ 로 표기하면,  $R_i = 9.6 \cdot 2^{i-1}$  kbps ( $i = 1, \dots, 5$ )가 된다. 단말은 수신된 RAB값에 따라 전송속도를 한 단계씩 높이거나 낮출 수 있지만, 전송속도의 최종적인 증감 여부는 고유한 확률모델을 이용한다. 이 확률모델에서는 전이확률(transition probability)을 사용하는데, 단말의 전송속도  $R_i$ 에 따라 두 종류의 전이확률 집합인  $\{p_i\}$ 와  $\{q_i\}$ 가 있다. 전송속도  $R_i$ 인 단말이 RAB=0을 수신하면 단말은  $p_i$ 의 확률로 전송속도를 한 단계 높이고,  $1 - p_i$ 의 확률로 현 전송속도를 유지한다. 반면에 단말이 RAB=1을 수신하면  $q_i$ 의 확률로 전송속도를 한 단계 낮추고,  $1 - q_i$ 의 확률로 현 전송속도를 유지한다. 전이확률을  $p_1 < p_2 < p_3 < p_4$ 와  $q_2 < q_3 < q_4 < q_5$ 의 관계로 설정하면, 낮은 전송속도의 단말은 RAB=0을 수신할 때 전송속도를 쉽게 높이고, 높은 전송속도의 단말은 RAB=1을 수신할 때 전송속도를 신속하게 줄이도록 유도하여 시스템을 안정적으로 제어할 수 있다<sup>[2~3]</sup>.

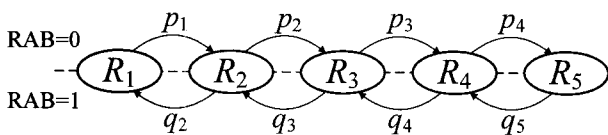


그림 1. 1xEV-DO의 역방향 전송속도 제어  
Fig. 1. Reverse-link rate control for 1xEV-DO systems.

1xEV-DO 시스템에서 채택한 전송속도 제어방법은 역방향 링크의 부하를 일정한 수준에서 유지하려는 목적인 달성하지만, 시스템의 안정성 측면에 대한 배려가 충분하지 못하다. 역방향 링크의 특성과 성능은 전이확률 및  $L_{th}$ 와 같은 다양한 시스템 파라미터들에 영향을 받을 수 있는데, 확률모델의 특성상 역방향 부하가 과도하게 높아질 수 있다. 이러한 불안정한 전송속도 제어의 문제점을 보완하기 위하여, 각 단말이 자신의 차기 동작정보를 기지국으로 전송하고, 기지국은 이에 대한 허용 여부를 결정하는 방법이 제안되었다<sup>[4]</sup>. 여기서 단말이 전송하는 동작 정보는 다음 프레임에서 데이터의 전송속도를 한 단계 높이겠다는 의지를 나타낸다. 기지국은 단말들의 차기 전송속도를 예측한 후 이를 허용할 수 있으면 RAB=0을 전송하고, 허용하지 않는다면 RAB=1을 전송한다. 기지국이 RAB=0을 전송하면, 전송속도를 높이겠다는 의지를 보인 단말들에 한하여 전송속도를 높인다. 반면에 RAB=1을 전송하면, 단말들은 기존의 방법과 동일하게  $\{q_i\}$ 의 확률에 따라 전송속도를 감소시킨다. 이 방법은 현 상태보다 높게 예측되는 부하를 기준으로 전송속도를 제어하기 때문에 전송속도를 불필요하게 감소시키는 문제점을 갖는다.

### III. 제안 방법

제안한 방법은 역방향 부하의 과도한 변동을 줄임으로써 기존 방법의 성능을 더욱 향상시킨다. 제안한 방법에서, 각 단말은 전송속도의 증가 여부를 지시하는 동작정보를 기지국에 전송하고, 기지국은 이 동작정보를 바탕으로 차기 트래픽 부하를 예측한 후 역방향 부하를 최적화할 수 있는 제어정보를 전송한다. 이 제어정보를 수신한 단말들은 이전의 동작정보를 기준으로 자신의 전송속도를 최종적으로 결정한다.

단말이 동작정보를 설정하고 전송하는 방법은 [4]와 유사하다. 단말이 기지국으로 전송하는 동작정보는 1비트로 구성되는데, 이어지는 프레임에서 전송속도의 증가여부를 지시한다. 이 정보를 ERI(extended rate indicator)로 명명하고, 이 정보를 전송하는 채널을 ERI 채널이라고 부른다. ERI=1이면 전송속도를 한 단계 증가하겠다는 의미를, ERI=0이면 현재의 전송속도를 그대로 유지하겠다는 의미를 갖는다. ERI값을 설정하는 방법은 전이확률  $\{p_i\}$ 에 의해 이루어진다. 즉, 현재의 전송속도가  $R_i$ 인 단말은  $p_i$ 의 확률로 ERI=1을 설정하고,

$1 - p_i$ 의 확률로 ERI=0을 설정한다. ERI는 단말이 수신하는 RAB와는 무관하게 결정된다. ERI=1로 설정한 단말을 후보 단말(candidate terminal)이라고 부르고, ERI=0으로 설정한 단말을 비후보 단말(non-candidate terminal)이라고 부른다. ERI 채널은 별도의 채널을 추가할 필요없이, RRI 채널을 확장하여 지원할 수 있다. 즉, 3비트의 RRI 정보는 파일럿 채널과 시간 다중화되고 매 슬롯마다 37회 반복되기 때문에 반복횟수를 줄이면 ERI 정보를 간단히 포함할 수 있다.

이제 기지국은 단말로부터 수신한 ERI와 RRI를 결합하여 차기 전송속도를 알 수 있고, 이로부터 역방향 트래픽 부하를 예측할 수 있다. 예를 들어, RRI값이 19.2kbps를 지시하고 ERI=1이라면, 기지국은 차기 전송속도가 38.4kbps임을 알 수 있다. 제안한 방법은 현 부하 및 예측된 부하를 이용하여 RAB를 설정한다. 예측된 부하는 현재의 부하보다 같거나 크다는 점을 기억하자. 따라서 다음과 같은 3가지 경우들이 가능하다.

- (1) 현 부하 및 예측된 부하가 모두  $L_{th}$ 보다 작은 경우
- (2) 현 부하 및 예측된 부하가 모두  $L_{th}$ 보다 큰 경우
- (3) 현 부하가  $L_{th}$ 보다 작고, 예측된 부하가  $L_{th}$ 보다 큰 경우

먼저, (1)의 경우에는 모든 후보 단말들이 전송속도를 높더라도 트래픽 부하는  $L_{th}$ 를 넘지 않는다. 따라서 기지국이 RAB=0으로 설정하여 전송하면 후보단말들에 한하여 전송속도를 높인다. (2)의 경우, 현재의 역방향 트래픽 부하가 이미  $L_{th}$ 보다 크기 때문에 기지국은 RAB=1로 설정하여 단말들의 전송속도를 감소시킬 필요가 있다. 다만, 과도한 감소를 억제하기 위하여 비후보 단말들에 한하여  $\{q_i\}$ 의 확률로 전송속도를 감소시킨다. 마지막으로, (3)의 경우에는 예측된 부하가  $L_{th}$ 보다 크기 때문에 후보 단말들이 전송속도를 높여서는 안 된다. 그렇지만, 현 부하는  $L_{th}$ 보다 작기 때문에, 가장 이상적인 선택은 단말들이 현재의 전송속도를 그대로 유지하는 것이다. 따라서 기지국은 단말들에게 현재의 전송속도를 그대로 유지하라는 명령을 전송한다. 제안한 방법에서 이 명령은 새로운 물리채널을 사용하지 않고, RAB를 송신하지 않는 방법을 사용한다(NoTx). 앞으로, RAB=NoTx는 기지국이 RAB 정보를 송신하지 않는다는 의미이다.

단말의 관점에서 제안한 전송속도 제어방법을 살펴보자. 각 단말의 전송속도 제어방법을 그림 2의 순서도에 정리하였다. 각 단말은  $\{p_i\}$ 에 의해 ERI를 결정한다

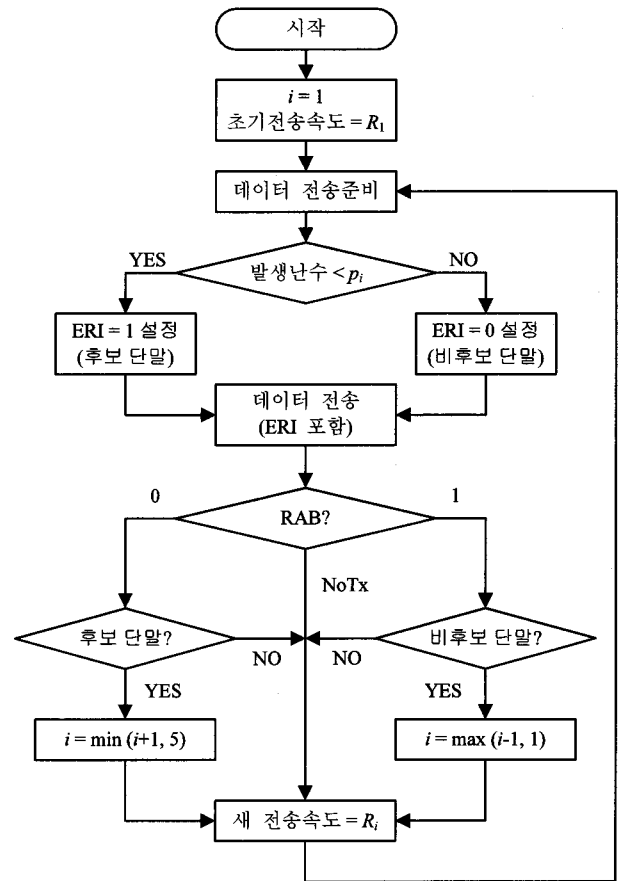


그림 2. 제안한 방법에 따른 단말의 동작 순서도  
Fig. 2. Flow chart of the proposed scheme in a mobile terminal.

후, 이를 RRI와 함께 기지국으로 전송한다. 만약 후보 단말(ERI=1)이 기지국으로부터 RAB=0을 수신하면 다음 프레임에서 전송속도를 증가시킨다. 그리고 비후보 단말이 RAB=1을 수신하면  $\{q_i\}$ 의 확률에 따라 전송속도를 감소시킨다. 하지만, 그 이외의 경우에는 전송속도를 그대로 유지한다. 즉, RAB=1을 수신한 후보 단말과 RAB=0을 수신한 비후보 단말은 전송속도를 그대로 유지한다(RAB=NoTx 포함).

#### IV. 성능분석

이 절은 제안한 방법의 성능을 분석하기 위하여 다차원 마르코프 프로세스(Markov process)에 기반한 시스템 모델을 제안한다. 단일 셀을 가정하고, 셀 내에는  $T$ 개의 단말이 역방향 트래픽 채널을 통해 데이터를 송신하고 있다고 가정한다. 단말이 수신하는 RAB는 수신 오류 확률은 매우 작다고 볼 수 있지만, 무선 채널의 가변 특성을 반영하기 위하여 분석 과정에서 이를 고려한다.

- $z_1$ : RAB=0 또는 RAB=1을 서로 반대 값으로 오판

할 확률

- $z_2$ : RAB=0 또는 RAB=1을 수신하지 못하여 NoTx로 판독할 확률
- $z_3$ : RAB가 송신되지 않았지만(NoTx), 0 또는 1로 판독할 확률

각 단말은 프레임마다 전송속도를 변경할 수 있으므로, 여기서는 매 프레임의 전송속도 변화를 관찰하여 이산시간 마르코프 프로세스로 모델링한다.  $k$ 번째 프레임에서 전송속도가  $R_i$ 인 단말의 수를  $S_i(k)$ 라고 표시하고, 각 전송속도 별 단말의 수를 나타내는 5차원 상태변수  $\mathbf{S}(k) = \{S_1(k), S_2(k), \dots, S_5(k)\}$ 를 정의한다. 본 논문에서 역방향 부하는 셀 내의 모든 단말들이 역방향 링크로 보내는 전송속도의 합이라고 가정하므로, 상태정보  $\mathbf{S}(k)$ 가 주어질 때  $k$ 번째 프레임의 트래픽 부하는  $\sum_{k=1}^5 S_i(k)R_i$ 로 표현된다. 따라서  $\mathbf{S}(k)$ 는 1xEV-DO 시스템의 역방향 링크를 설명할 수 있는 좋은 상태변수가 된다. 또한, 차기 프레임에 대해 예측된 부하는  $\mathbf{S}(k)$ 에서 유도되기 때문에 RAB 역시  $\mathbf{S}(k)$ 에 의해 결정되고, 결국  $k+1$ 번째 프레임의 트래픽 부하는  $k$ 번째 프레임의 상태변수인  $\mathbf{S}(k)$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 따라서 제안한 시스템은 이산시간 다차원 마르코프 프로세스로 모델링될 수 있다.

이와 더불어, 셀 내의 총 단말 수는  $T$ 로 주어지기 때문에,  $S_5(k) = T - \sum_{i=1}^4 S_i(k)$ 로 표현되고, 이는  $S_5(k)$ 가 잉여변수임을 의미한다. 따라서 상태변수는  $\mathbf{S}(k) = \{S_1(k), S_2(k), S_3(k), S_4(k)\}$ 의 형태로 조금 더 간단히 표현될 수 있다.

이제, 이어지는 프레임에서 상태변수  $\mathbf{S}(k+1)$ 로 전이할 상태전이 확률(state-transition probability)을 구해보자. 상태전이 확률을 직접적으로 구하기는 쉽지 않기 때문에, RAB값과 단말들의 동작을 반영한 조건부 확률을 이용하도록 한다. 먼저,  $R_i$ 의 전송속도를 갖는  $S_i(k)$ 개의 단말들 중에서 전송속도를 한 단계 높이는 단말의 수를  $U_i$ , 전송속도를 한 단계 줄이는 단말의 수를  $D_i$ 라고 각각 표현한다. 앞으로 특별한 언급이 없으면 첨자  $k$ 는 생략한다. 또한, 벡터(vector)는 볼드체로, 확률변수(random variable)는 대문자로 표현한다.

$\mathbf{S}(k)$ 는  $k+1$ 번째 프레임의 시작과 동시에 다음 상태인  $\mathbf{S}(k+1)$ 로 천이하는데,  $\mathbf{S}(k)$ 와  $\mathbf{S}(k+1)$ 의 표본 상태를 각각  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ 와  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ 라고 표현하면, 전이확률  $p_{xy} \equiv \Pr(\mathbf{S}(k+1) = \mathbf{y} | \mathbf{S}(k) = \mathbf{x})$

는 [4]의 결과를 응용하여 다음과 같은 조건부 확률로 표현할 수 있다.

$$p_{xy} = \Pr(\mathbf{D} = \mathbf{U} + \mathbf{e} | \mathbf{S}(k) = \mathbf{x}) \quad (1)$$

여기에서, 벡터  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{e}$ 는 각각  $\mathbf{D} = (D_2, D_3, D_4, D_5)$ ,  $\mathbf{U} = (U_1, U_2, U_3, U_4)$ ,  $\mathbf{e} = (e_1, e_2, e_3, e_4)$ ,  $e_i \equiv \sum_{k=1}^i (y_k - x_k)$ 를 의미한다.

전송속도  $R_i$ 를 갖는 단말들의 수를  $X_i$ , 이  $X_i$ 개의 단말들 중 후보 단말(ERI=1)들의 수를  $C_i$ , 이  $C_i$ 개의 단말들 중 RAB=0을 수신한 단말들의 수를  $M_i$ ,  $X_i - C_i$ 개의 비후보 단말(ERI=0)들 중에서 RAB=1을 수신한 단말들의 수를  $N_i$ 라고 가정하자. 식 (1)을  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{N}$ 에 대한 조건부 확률로 표현하면 다음과 같다.

$$p_{xy} = \sum_{\mathbf{c}, \mathbf{m}, \mathbf{n}} \Pr(\mathbf{D} = \mathbf{m} + \mathbf{e} | \mathbf{n}, \mathbf{m}, \mathbf{c}, \mathbf{x}) \times \Pr(\mathbf{N} = \mathbf{n} | \mathbf{m}, \mathbf{c}, \mathbf{x}) \times \Pr(\mathbf{M} = \mathbf{m} | \mathbf{c}, \mathbf{x}) \cdot \Pr(\mathbf{C} = \mathbf{c} | \mathbf{x}) \quad (2)$$

이때,  $\mathbf{C} = (C_1, C_2, C_3, C_4)$ ,  $\mathbf{M} = (M_1, M_2, M_3, M_4)$ ,  $\mathbf{N} = (N_2, N_3, N_4, N_5)$ 를 의미한다. 제안한 방법은 RAB=0을 수신한 후보 단말들( $\mathbf{M}$ )에 한하여 전송속도를 증가시키기 때문에, 식 (2)는  $\mathbf{U} = \mathbf{M}$ 의 관계를 이용하였다. 식 (2)의 각 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pr(\mathbf{D} = \mathbf{m} + \mathbf{e} | \mathbf{n}, \mathbf{m}, \mathbf{c}, \mathbf{x}) \quad (3)$$

$$= \prod_{i=1}^4 \binom{n_{i+1}}{m_i + e_i} q_{i+1}^{m_i + e_i} (1 - q_{i+1})^{n_{i+1} - m_i - e_i}$$

$$\Pr(\mathbf{N} = \mathbf{n} | \mathbf{m}, \mathbf{c}, \mathbf{x})$$

$$= \begin{cases} \prod_{i=1}^5 \binom{x_i - c_i}{n_i} z_1^{n_i} (1 - z_1)^{x_i - c_i - n_i}, & \mathbf{x} \in \{\mathbf{x}_0\} \\ \prod_{i=1}^5 \binom{x_i - c_i}{n_i} (1 - z_1 - z_2)^{n_i} (z_1 + z_2)^{x_i - c_i - n_i}, & \mathbf{x} \in \{\mathbf{x}_1\} \\ \prod_{i=1}^5 \binom{x_i - c_i}{n_i} z_3^{n_i} (1 - z_3)^{x_i - c_i - n_i}, & \mathbf{x} \in \{\mathbf{x}_N\} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Pr(\mathbf{M} = \mathbf{m} | \mathbf{c}, \mathbf{x}) \quad (5)$$

$$= \begin{cases} \prod_{i=1}^5 \binom{c_i}{m_i} (1 - z_1 - z_2)^{m_i} (z_1 + z_2)^{c_i - m_i}, & \mathbf{x} \in \{\mathbf{x}_0\} \\ \prod_{i=1}^5 \binom{c_i}{m_i} z_1^{m_i} (1 - z_1)^{c_i - m_i}, & \mathbf{x} \in \{\mathbf{x}_1\} \\ \prod_{i=1}^5 \binom{c_i}{m_i} z_3^{m_i} (1 - z_3)^{c_i - m_i}, & \mathbf{x} \in \{\mathbf{x}_N\} \end{cases}$$

$$\Pr(C=c|x) = \prod_{i=1}^4 \binom{x_i}{c_i} p_i^{c_i} (1-p_i)^{x_i-c_i} \quad (6)$$

식 (4)-(5)에서  $\{x_0\}$ ,  $\{x_1\}$ ,  $\{x_N\}$ 은 각각 기지국이 생성하는 RAB값이 0, 1, NoTx가 되는 상태변수들의 집합이다. 이와 함께, 각 변수의 유효범위는 다른 변수에 종속되는 특성을 갖기 때문에,  $c$ ,  $m$ ,  $n$ 의 범위는 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{cases} 0 \leq c_i \leq x_i, & i=1, \dots, 4 \\ 0 \leq n_i \leq x_i - c_i, & i=2, \dots, 5 \\ \max(0, -e_i) \leq m_i \leq \min(c_i, n_{i+1} - e_i), & i=1, \dots, 4 \end{cases} \quad (7)$$

이 마르코프 프로세스가 유일한 정상상태 확률 (steady-state probability)인  $\{\pi_x\}$ 를 갖기 위해서는 유한한 상태공간을 가지며, 비주기적(aperiodic)이고, 상태공간을 더 이상 나눌 수 없는(irreducible) 조건들을 만족해야한다<sup>[5]</sup>. 실제로, 식 (1)-(7)에서 모델링한 마르코프 프로세스는 이 조건들을 모두 만족하고 있음을 알 수 있다. 따라서 정상상태 확률  $\{\pi_x\}$ 는 다음의 평형상태 방정식을 만족하는 해가 된다.

$$\pi_y = \sum_{x} p_{xy}, \quad \sum_x \pi_x = 1 \quad (8)$$

식 (8)을 통해 구한 정상상태 확률을 이용하면 제안한 시스템의 성능을 파악할 수 있는 다양한 성능지표들을 구할 수 있다.

## V. 분석 결과

일반적으로 CDMA 시스템은 신호 상호간의 간섭에 의해 용량이 제한되는 특성을 나타낸다. 역방향 트래픽 부하가 커질수록 신호의 품질이 저하되고, 특히 일정한 한계를 넘어서면 그 성능이 급격히 낮아진다. 따라서 기지국은 역방향 트래픽의 부하를 일정한 수준 이하에서 유지되도록 제어할 필요가 있다. 과부하(overload)의 기준이 되는 이 값을  $L_{max}$ 로 표기하면, 역방향 링크의 트래픽 부하는 되도록  $L_{max}$ 를 넘지 않도록 제어되어야 한다. 기존 방법에서는 트래픽 부하가  $L_{max}$ 보다 낮은 수준에서 제어되도록  $L_{th} \leq L_{max}$ 의 관계가 되도록 설정할 필요가 있었다.

이 절에서는 시스템의 과부하율(overload probability)과 전송효율(throughput)을 이용하여 시스템의 성능을

비교한다. 먼저, 시스템의 과부하율은 역방향 트래픽 부하가  $L_{max}$ 를 넘을 확률을 의미하므로, 앞 절의 정상상태 확률을 이용해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{과부하율} = \Pr(\text{과부하 상태}) = \sum_{x \in \{x_o\}} \pi_x \quad (9)$$

여기서  $\{x_o\}$ 는 역방향 링크가 과부하가 되는 상태변수들의 집합을 의미한다. 유사한 방법으로, 역방향 링크의 데이터 전송효율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{전송효율} = \sum_x \left( \sum_{i=1}^5 x_i R_i \right) \pi_x \quad (10)$$

이제, 성능평가에 사용되는 시스템 파라미터들을 결정하자. 성능에 큰 영향을 미칠 수 있는 전이확률  $\{p_i\}$ 와  $\{q_i\}$ 는 시스템의 안정성을 고려하여  $p_1 > p_2 > p_3 > p_4$ 와  $q_2 < q_3 < q_4 < q_5$ 의 관계를 유지한다. 본 논문에서는  $\{p_1, p_2, p_3, p_4\} = \{0.2, 0.1, 0.05, 0.025\}$ ,  $\{q_2, q_3, q_4, q_5\} = \{0.1, 0.3, 0.6, 0.9\}$ 로 설정한다. 다음으로, RAB의 전송주기인 RABLength는 16 슬롯을 가정하여 매 프레임마다 새로운 RAB를 전송한다. 또한, 기존 방법들에서 RAB가 상대편 값으로 오판될 확률을  $z$ 라고 표현한다. 본 분석에서는 제안한 방법에 대하여 좀 더 척박한 조건을 가정하여  $z_1 = z_2 = z = 5\%$ 로 설정한다(오류율은 성능 비교시 큰 영향을 미치지 않음). 일반적인 통신환경을 가정할 때, 송신기가 데이터를 전송하지 않음에도 불구하고 이를 수신할 가능성은 없기 때문에  $z_3 = 0$ 이라고 설정할 수 있다. 마지막으로, 단일 셀 환경에서 기지국이 2개의 수신 안테나를 사용하고 단말이 15개 이하인 경우 지원 가능한 최대 전송속도는 450kbps이므로<sup>[6]</sup>, 이 값을  $L_{max}$ 로 사용한다.

그림 3은 제안한 분석 방법의 적정성을 평가하기 위하여 분석 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한다. 임계값을  $L_{th} = 460\text{kbps}$ 로 고정시킨 후, 셀 내의 단말 수를 변경하면서 역방향 링크의 전송효율과 과부하율을 도시하였다. 우선, 이 그림을 통해 제안한 분석 방법이 적정했음을 알 수 있다. 더불어, 이 그림에서는 각 제어방법의 특징이 그대로 투영되어 있다. 즉, 기존의 1xEV-DO 방법을 기준으로 할 때, [4]에서 제안한 방법은 예상 트래픽이 임계값을 넘으면 전송속도를 줄이기 때문에 상대적으로 낮은 전송효율과 낮은 과부하율을 갖는다. 반면에, 제안한 방법은 전송속도의 불필요한 감소를 방지하기 때문에, 1xEV-DO 보다 높은 전송속도를 유지하면

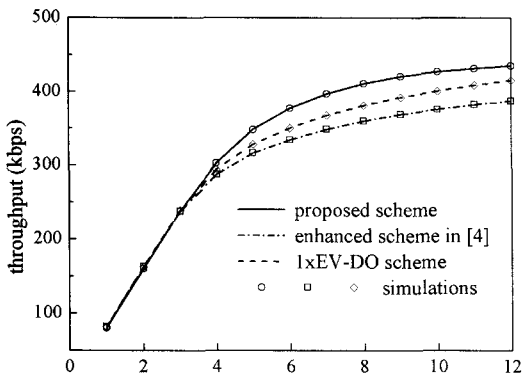


그림 3. 제안 방법과 기존 방법들의 전송효율 및 과부하율 예 ( $L_{th} = 460\text{kbps}$ )

Fig. 3. Examples of cell throughputs and overload probabilities in the proposed and conventional schemes ( $L_{th} = 460\text{kbps}$ ).

서 더 낮은 과부하율을 갖는다. 따라서 [4]에서 제안한 방법과 비교하여 훨씬 높은 전송효율과 약간 높은 과부하율을 보여주고 있다.

비록 결과를 보이지는 않았지만, 제안한 방법의 장점들 중 하나는  $L_{th} \leq 450\text{kbps}$ 로 설정한 경우, 단말수에 관계없이 과부하율이 0이라는 점이다(그림 3에서  $L_{th} = 460\text{kbps}$ 로 설정한 이유이기도 함). 제안한 방법에서는  $RAB=0$ 으로 오관되더라도 후보 단말들에 한하여 전송속도를 높이기 때문에 트래픽 과부하를 초래하지 않고, 과부하가 예상되면  $RAB=NoTx$ 를 사용하여 단말들의 전송속도 증가를 억제하기 때문이다. 따라서 제안한 방법을 이용하면 과부하율 측면에서 최적의 성능을 얻기 위한  $L_{th}$  설정이 매우 간단해질 수 있다. 즉,  $L_{th} = L_{max}$ 로 설정하면 과부하율 0을 만족하는 가장 높은 전송효율을 지원할 수 있다.

제안한 방법과 기존 방법들의 성능을 비교하기 위해

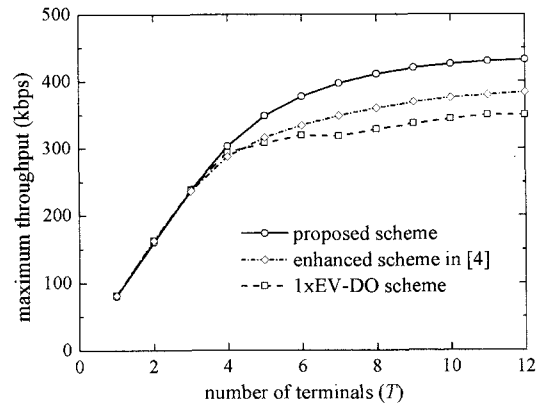


그림 4. 제안한 방법과 기존 방법들의 성능 비교  
Fig. 4. Performance comparison between the proposed and conventional schemes.

서는 보다 객관적인 성능지표가 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 역방향 링크의 과부하율이 1%를 넘지 않으면서 지원할 수 있는 최대 전송효율을 비교한다. 그림 4는 각 방법에 대하여 임계값  $L_{th}$ 를 조절하면서 최대 전송효율을 찾은 후 그 결과를 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 제안한 방법을 이용하면 기존의 방법들과 비교하여 성능이 크게 향상됨을 관찰할 수 있다. 단말 수 4개를 넘으면서 성능의 차이가 뚜렷해지고 있다. 정량적으로, 제안한 방법에서는 기존 1xEV-DO 대비 최대 25%정도의 성능 개선을 관찰할 수 있고, [4]의 방법과 비교하면 최대 14% 정도의 개선이 관찰된다. 제안한 방법은 기존 1xEV-DO와 비교하여 훨씬 높은 성능 개선을 보여주고 있고, 복잡도 측면에서는 [4]의 방법과 유사하기 때문에 제안한 방법은 기존 방법들과 비교하여 훨씬 효율적이라고 생각할 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 기지국이 역방향 트래픽 부하의 변화를 예측하고 부하의 변동이 최소화되도록 순방향 제어 정보인 RAB(reverse activity bit)를 설정하는 방법을 통해 단말의 전송속도를 효율적으로 제어할 수 있는 방법을 제안하였다. 특히, 각 단말은 자신의 차기 동작정보를 기지국으로 전송하여 기지국의 부하 예측을 도와 주고, 기지국은 필요시 RAB를 송신하지 않는 방법을 통해 단말들이 불필요하게 전송속도를 감소시키지 않도록 유도한다. 본 논문에서는 제안한 방법을 다차원 마르코프 프로세스로 모델링하고 기존의 다른 방법들과 성능을 비교하였다. 분석 및 비교 결과에서 알 수 있듯

이, 제안한 전송속도 제어방법은 기존의 방법들과 비교하여 동일 조건에서 최대 25% 정도의 성능향상을 보여준다. 더불어, 과부하율 측면에서 시스템 파라미터의 설정이 매우 간단해지는 장점을 가지고 있다. 특히, 단말의 동작정보는 기존의 역방향 채널에 포함될 수 있고 순방향 채널은 전혀 수정할 필요가 없기 때문에, 상용 시스템에 쉽게 적용할 수 있다. 앞으로 본 논문의 연구 결과를 바탕으로, 1xEV-DO와 유사한 역방향 트래픽 제어방법을 사용하는 HSUPA(high-speed downlink packet access)의 성능을 분석하고 개선할 수 있는 연구를 진행할 계획이다.

### 참 고 문 헌

- [1] 3rd Generation Partnership Project 2, "cdma2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification," 3GPP2 C.S20024 v.4.0, Oct. 2002.
- [2] E. Esteves, "The high data rate evolution of the cdma2000 cellular system," *Proc. Multiaccess, Mobility and Teletraffic for Wireless Communications*, vol. 5, pp. 61-72, Dec. 2000.
- [3] S. Chakravarty, R. Pankaj, and E. Esteves, "An algorithm for reverse traffic channel rate control for cdma2000 High Rate Packet Data systems," *Proc. IEEE Globecom 2001*, pp. 3733-3737, Nov. 2001.
- [4] W.Y. Yeo and D.H. Cho, "Enhanced rate control scheme for 1xEV-DO reverse traffic channels," *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 23, pp. 1677-1679, 2003.
- [5] S. M. Ross, *Stochastic Processes*, 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [6] E. Esteves, "On the reverse link capacity of cdma2000 High Rate Packet Data systems," *Proc. IEEE ICC 2002*, vol. 3, pp. 1823-1828, Apr. 2002.

---

### 저 자 소 개

여 운 영(정회원)

1996년 2월 KAIST 전기및전자공학과 학사

1998년 2월 KAIST 전기및전자공학과 석사

2005년 2월 KAIST 전기및전자공학과 박사

2000년 3월~2003년 3월 LG전자/정보통신 선임연구원

2005년 6월~2007년 8월 SK텔레콤 네트워크연구원 과장

2007년 9월~현재 세종대학교 정보통신공학과 조교수

<주관심분야 : 3G/4G 무선접속 네트워크, 무선자원 관리, 무선 프로토콜 설계>