

순방향 WCDMA 채널에서 AMR 음성 코덱 모드 할당방식에 대한 성능 비교

정성환¹ · 홍정완² · 이상천^{3*} · 이창훈¹

¹서울대학교 산업공학과 / ²한성대학교 산업시스템공학과 / ³경상대학교 산업시스템공학부, 공학연구원

Performance Comparison of AMR Codec Mode Allocations in Downlink WCDMA System

S.H. Jung¹ · J.W. Hong² · S.C. Lee³ · C.H. Lie¹

¹Department of Industrial Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742

²Department of Industrial and Systems Engineering, Hansung University, Seoul, 136-792

³Division of Industrial and Systems Engineering, ERI, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701

The Adaptive Multi-Rate (AMR) speech codec is the mandatory for voice service in WCDMA systems. The AMR codec can be used efficiently to provide a balanced trade-off between the capacity and quality of voice by adjusting various service rates.

In this paper, three ways of AMR mode allocation schemes on the downlink in WCDMA system are evaluated. To evaluate users satisfaction efficiently, new system performance measure and analytic models are proposed. The proposed analytic models can be applied to obtain optimal mode allocation ways while considering the system capacity and quality of voice. In numerical examples, the ways of finding optimal parameters are illustrated for the given traffic loads and the performances of three mode allocation schemes are compared.

Keywords: WCDMA, AMR codec, quality of voice, mode allocation scheme

1. 서론

음성 서비스는 2세대 셀룰러 시스템뿐 아니라 다중 클래스를 지원하는 WCDMA와 같은 3세대 시스템에서도 여전히 중요한 서비스 클래스로 남게 될 것이라는 것은 재론의 여지가 없다. 무선망 상황이 가변적으로 변하더라도 안정적인 음성 서비스의 QoS(Quality of Service)를 보장하면서 동시에 서비스 용량을 극대화하는 것은 WCDMA 시스템에서 중요한 문제가 된다. 사용자의 QoS와 서비스 용량 간의 상충(trade-off) 관계를 균형 있게 조정하기 위해서 서비스 출력률의 유연성이 필요하며 이것은 AMR(Adaptive Multi-Rate) 음성 코덱(speech codec)이 가지는 중요한 장점 중의 하나이다. AMR 음성 코덱

은 4.75kbps에서 12.2kbps까지 8개의 가변 출력 모드를 지원하며, 이론적으로 매 20ms마다 모드 전환이 가능하다.

WCDMA의 링크 차원 무선망 상황에서는 SIR(Signal Interference Ratio) 목표치를 획득시켜주는 고속 페루프 전력 제어(fast power control)와 SIR 목표치를 조정해 주는 외부 루프 전력 제어(outer loop power control)를 통해 안정적인 링크 QoS를 보장해 줄 수 있다. 그러나 기지국에서 서비스 받는 사용자 수가 많아지게 되면 기지국의 총 출력이 커지게 되고 이는 각 사용자에게 더 큰 간섭으로 작용하게 되므로 링크 QoS 수준이 떨어지게 된다. 따라서 적절한 한계 이내로 사용자 수를 제한할 수밖에 없게 되며 이것이 시스템의 수용 용량이 되는 것이다. 그러나 각 사용자의 AMR 모드를 망 상황에 따라 조정해

주변 동일한 링크 QoS를 만족시키면서도 상대적으로 낮은 출력률 전송이 가능해져서 수용 용량의 증가를 도모할 수 있다.

이 때 AMR 모드 할당정책을 통해 어느 정도까지 기존 사용자의 출력률을 낮추고 높일 것인지를 결정하는 것이 무선망 제어부(RRC : Radio Resource Controller)의 중요한 역할 중의 하나이다. AMR 모드 할당은 시스템의 부하 수준과 각 사용자의 전력 소모에 근거해서 기지국 제어 시스템(RNC; Radio Network Controller)내의 호 수락 제어(CAC; Call Admission Control)와 출력률 제어(rate control) 알고리즘에 의해서 이루어진다.

순방향(downlink) 채널에서 AMR 코덱은 이동전화교환국(MSC; Mobile Switching Center)에 위치한다. 기지국 제어 시스템에서는 기지국이나 각 단말기에서 측정된 리포트를 근거로 AMR 모드의 출력 모드를 제어하며, 이 과정은 Lu 인터페이스의 inband signaling을 통해서 고속으로 이루어질 수 있다.

WCDMA에서는 트래픽의 비대칭적인(asymmetric) 다운로딩 특성과 단말기보다는 기지국의 수신 안테나 성능이 더 우수하다는 점 등의 특성으로 인해서 역방향(uplink)보다는 순방향 링크의 용량이 더 중요할 것으로 예상된다. 이로 인해 WCDMA의 트래픽 성능분석에 대한 연구도 역방향보다는 순방향 링크를 중심으로 더 많이 진행되고 있다.

기존 연구에서는 WCDMA에서 다중 클래스를 서비스하는 상황에서의 시스템 성능을 시뮬레이션을 통해 분석한 것이 대부분이었으며(Calin *et al.*, 2001; Malik and Zeghlache, 2002), 분석적인 모델을 이용하여 호 수락제어 정책이나 기지국의 최적 출력 분배 등의 연구가 진행되었다(Jeon, 2002; Kim, 2003). 그러나 음성 사용자의 QoS 만족도와 시스템의 용량의 문제를 동시에 고려하여 AMR 모드 전환을 다룬 연구는 많지 않았다. Karlsson(2002)는 AMR 모드 할당에 따른 사용자 만족도와 시스템의 용량의 상충관계를 동시에 고려한 연구를 수행하였다. 그러나 이것은 시뮬레이션 모델을 중심으로 한 것이며, 핸드오프(hand-off) 호에 대한 고려도 이루어지지 못하였다.

본 연구는 AMR 모드 할당방식이 시스템 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션이 아닌 분석적 방법(analytic approach)을 제시하는 데 목표를 두었다. 이것을 통해 특정 시스템 부하에서 어떤 AMR 모드 할당방식을 선택하는 것이 최적인지를 결정할 수 있게 되어 무선망 제어 차원에서 합리적인 의사결정 기준을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 시스템 모형

2.1 시스템 상황

기지국 제어 시스템이 관할하는 셀들은 사용자의 이동 및 사용 시간 패턴이 통계적으로 동질한(homogeneous) 특성을 갖는다고 가정하여 하나의 셀을 분석 대상으로 하는 독립 셀 방

법(isolated cell approach)을 사용하였다. 또한 AMR 모드 할당 방식의 성능 비교에 초점을 두어 계산상의 복잡도를 낮추기 위해 음성 서비스 클래스만을 분석 대상으로 한다.

본 연구에서는 CDMA soft 용량 분석에서 사용하는 일반적인 가정들을 동일하게 사용하였다. 즉, 고속 페루프 전력 제어를 통해 정확한 평균 E_b/N_0 를 획득할 수 있으며, 트래픽 분포가 셀 내에서 균일(uniform)하다고 가정하고, 전송 조건(propagation condition)이 연구기간(study period) 동안 변하지 않는다는 것이다. 이러한 가정하에 기지국에서 송출되는 총 출력은 동일한 이력을 갖는 사용자들을 그룹으로 묶어서 다음과 같이 나타낼 수 있다(Sipila *et al.*, 2000).

$$Power = \frac{P_{CCH} + P_N \sum_{i=1}^I \frac{\beta^{(i)} R^{(i)} v}{W} n_i \bar{L}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{\beta^{(i)} R^{(i)} v}{W} n_i (1 - \alpha + f_{DL})} \quad (1)$$

식 (1)에서 $Power$ 는 기지국에서 요구되는 총 출력, P_{CCH} 는 공통 채널 출력, P_N 은 잡음(noise), W 는 칩 출력률(chip rate), $R^{(i)}$ 는 AMR mode i 의 데이터 전송속도, α 는 사용자의 직교화 요인(orthogonality factor), f_{DL} 은 음성 사용자 그룹에 미치는 평균 간섭률, \bar{L} 는 기지국에서 임의의 사용자까지의 평균 경로 감쇄, $\beta^{(i)}$ 는 AMR 모드 i 의 E_b/N_0 요구값, v 는 음성 사용자의 채널 활용 계수 그리고 n_i 는 AMR 모드 i 로 서비스 받는 사용자 수를 각각 의미한다. 식 (1)의 전송출력에 영향을 미치는 인자들 중에서 호 수락 제어를 통해 제어가 가능하면서 전송출력에 가장 주요한 영향을 미치는 요인은 사용자 수이다(Dimitriou *et al.*, 2000). 다른 인자들의 변동은 추정된 평균값으로 고정할 때, 기지국에서의 전송출력은 각 AMR 모드를 사용하는 사용자 수와 각 AMR 모드에 의존하는 모수들의 함수로 추정될 수 있다.

호 수락제어 정책은 현재 사용중인 출력(P_{now})이 시스템의 허용출력(P^S)을 넘지 않을 때 진입 호를 받아 들이는 단순한 정책을 가정하였다(Knutsson *et al.*, 1998). 또한 신규 호보다 핸드오프 호에 대해 가중치를 더 주기 위해 현재의 전체 출력이 신규 호 수락 임계값(P_{New}^{Th}) 이상이면 신규 호를 차단시키고 핸드오프 호만을 받아들이는 임계값 정책(threshold policy)을 채택하였다.

2.2 트래픽 모델

분석 대상 셀에서 음성 클래스 하나만을 대상으로 했을 때, 시스템 상태 벡터는 $N = (n_1, \dots, n_i, \dots, n_I)$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서 n_i 는 AMR 모드 i 로 서비스 받는 음성 서비스 사용자의 수를 의미한다. i 모드의 전송률은 $(i+1)$ 모드의 전송률보다 크다. 즉 모드 1은 최대, 모드 I 는 최소 전송 비트를 갖는 모드에 대응된다. 신규 호와 핸드오프 호는 λ^{NC} 와 λ^{HC} 를 도착률로 하는 포아송 분포를 따른다. 음성 사용자가 통화

가 끝나거나 핸드오프가 일어나기 전까지 분석 셀에 머무르는 시간은 평균이 $1/\mu$ 인 지수분포를 따른다고 가정한다.

시스템의 상태 벡터가 주어지면, 시스템의 총 출력은 식 (1)로부터 추정할 수 있다. 시스템의 가능 상태 벡터 집합을 Ω 라고 하자. 이 때 Ω 의 부분집합 $\Omega_{HC} = \{M \text{Power}(N) \langle P^S \rangle\}$ 은 핸드오프 호를 받아들일 수 있는 시스템 상태 벡터들의 집합을 의미하며, 또한 $\Omega_{NC} = \{M \text{Power}(N) \langle P_{New}^{Th} \rangle\}$ 은 신규 호가 차단되지 않고 진입할 수 있는 시스템 상태 벡터들의 집합을 의미한다고 하자.

2.3 AMR 모드 할당방식

AMR의 적응성을 활용할 수 있는 여러 가지 모드 할당방법들이 존재할 수 있다. 본 연구에서는 Karlsson(2002)이 제시한 다음의 세 가지 기본적인 AMR 모드 할당방법들을 분석 대상으로 삼았다.

첫째, 정적 모드 할당방식(SMA; Static Mode Allocation)은 최선의 AMR 모드 하나를 선정하고 이를 네트워크 모든 사용자에게 동일하게 적용하는 방식이다. 가장 단순하게 구현될 수 있는 방법이지만 시스템 부하의 변화에 대하여 유연성이 없는 방식이다. 이 방식은 다른 모드 할당방식과의 비교를 위한 방식이라 할 수 있겠다.

둘째, 호 기준 모드 할당방식(PMA; Per call Mode Allocation)에서는 새로운 호에 적용되는 AMR 모드가 현재 무선망의 전체 사용 출력량을 기준으로 하여 선택되며 한번 적용된 모드는 그 호의 사용이 종료될 때까지 변하지 않고 유지된다. <Figure 1>에서 PMA 작동 원리를 보여주고 있다.

셋째, 동적 모드 할당방식(DMA; Dynamic Mode Allocation)은 망의 상황에 따라서 각 호에 적용되는 모드가 동적으로 변하는 방식이다. 본래 AMR이 채택된 취지에 맞는 방식이다. 그러나 이 방식에서는 실제 사용 부하를 정확히 추정해야 하고 그렇지 않을 경우 추정 에러로 인한 손실이 있을 수 있다. 또한 추정된 망 상황에 따라 몇 개의 호를 얼마만큼 변화시킬 것인가 하는 것을 다루는 모드 변환 알고리즘이 포함되어야 한다. 따라서 특정 목적함수를 만족하는 모드 변환 알고리즘

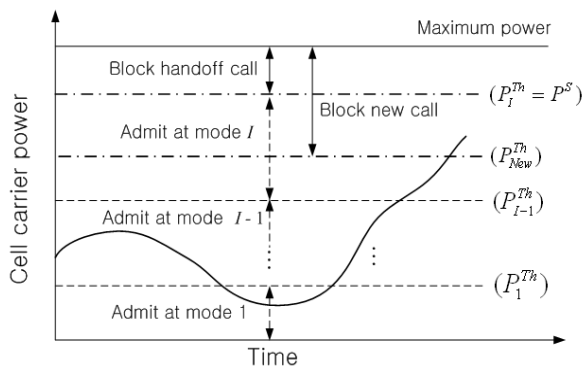


Figure 1. PMA(Per call Mode Allocation).

을 구현하는 것이 새로운 문제가 된다. 이 방식은 제어 복잡도가 큰 만큼 가장 좋은 성능을 낼 것으로 기대되는 방식이다. 본 연구에서는 사용자의 형평성을 보장할 수 있는 모드 변환 알고리즘을 채택하여 분석을 수행하였다.

3. 시스템 성능 평가 척도

본 연구에서는 AMR 모드 할당방식에 따른 시스템 성능을 비교하기 위해서 분석적인 방법으로 도출될 수 있는 새로운 척도 (SP; System Performance)를 제시하였으며 이것은 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$SP = US - c_B \cdot [\omega \cdot NBP + (1 - \omega) \cdot HDP] \quad (2)$$

식 (2)에서 사용자 만족도(US; User Satisfaction)는 서비스 받은 사용자가 느끼는 평균 사용자 만족도로서 할당된 AMR 모드의 종류와 할당 기간, 무선 링크의 FER(Frame Erasure Rate) 값 등에 영향을 받는다. 본 연구에서는 3GPP TR 26.975에서 제시된 결과를 활용하여 링크 전송 에러가 없는 상황에서 사용자가 최대 전송률(12.2 kbps) 모드로 서비스 받는 QoS를 기준값 1로 하여 AMR 모드가 i 일 때의 상대적인 QoS 값인 $Qrel(i)$ 를 계산하였다. 이 값들을 이용하여 각 모드 할당 방식에서의 US 값이 추정될 수 있다.

c_B 는 사용자 만족도의 수익에 대해서 호가 차단되었을 때에 발생하는 비용의 상대값으로 네트워크 운영 정책에 의해 주어지는 값으로 가정한다. 또한 ω 는 호가 차단되었을 때 발생하는 비용 중 신규 호의 차단이 차지하는 비율이다. NBP (New call Blocking Probability)와 HDP (Hand-off call Dropping Probability)는 각각 신규 호와 핸드오프 호의 차단 확률을 나타낸다.

4. 성능 평가 척도의 계산

각 모드 할당방식의 성능을 계산하기 위해서는 식 (2)에서 US, NBP 그리고 HDP의 값을 구하는 것이 필요하다. 신규 호와 핸드오프 호의 차단 확률은 본 연구에서 가정한 호 수락 제어 정책하에서 마코프 체인 모델을 통해 구해질 수 있으나, DMA 방식인 경우 사용자의 AMR 모드가 동적으로 변화하기 때문에 US 를 추정하는 것이 단순하지 않다. 본 연구에서는 사용자의 평균 사용 시간 중 각각의 모드로 서비스 받는 시간 길이 비율을 구하여 US 를 추정하였으며, 이를 위하여 사용자가 시스템을 떠나는 사건을 흡수 상태(absorbing state)로 갖는 마코프 체인을 구성하여 모델링하였다. 각 모드 할당방식에 대한 성능 평가 척도를 제안된 모델을 이용하여 계산하는 절차를 본 장에서 소개한다.

4.1 정적 모드 할당방식 (SMA)

SMA 방식 하에서는 하나의 AMR 모드 i 만이 모든 사용자에게 적용됨으로 시스템 상태변수는 $N=n$ 의 1차원 변수로 정의된다. 이 때 n 은 음성 사용자의 수로써 i 모드로 서비스 받는 사용자 수가 된다. 모드가 i 로 고정되어 있으므로 $US = Qrel(i)$ 로 단순하게 주어진다.

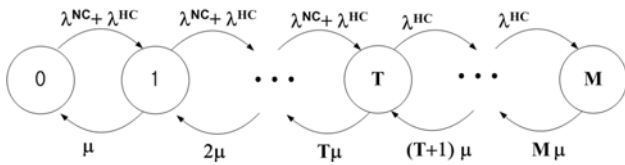


Figure 2. System state transition diagram of SMA.

차단 확률을 구하기 위해서 먼저 핸드오프 허용 상태 벡터 집합 Ω_{HC} 를 찾는다. 이 때 $(M-1) \in \Omega_{HC}$ 이고 $M \notin \Omega_{HC}$ 을 만족하는 정수 M 이 시스템의 수용 용량이 된다. 또한 $T \in \Omega_{NC}$ 이고 $(T+1) \notin \Omega_{NC}$ 을 만족하는 정수 T 가 신규 호를 차단시키는 임계값에 대응되는 사용자 수가 된다. 위에서 구한 M 과 T 값을 이용하여 <Figure 2>와 같이 정적 모드 할당하에서의 시스템의 상태 전이를 나타낼 수 있으며, 이에 따라 안정 상태 확률 $\pi(n)$ 과 NBP 그리고 HDP 는 $M/M/m/m$ Loss system에 의하여 식 (3), (4), (5) 그리고 (6)과 같이 각각 얻어진다.

$$\pi(n) = \begin{cases} \frac{(\lambda^{NC} + \lambda^{HC})^n}{n! \mu^n} \pi(0), & 1 \leq n < T \\ \frac{(\lambda^{NC} + \lambda^{HC})^T (\lambda^{HC})^{n-T}}{n! \mu^n} \pi(0), & T \leq n \leq M \end{cases} \quad (3)$$

$$\pi(0) = \left[1 + \sum_{n=1}^{T-1} \frac{(\lambda^{NC} + \lambda^{HC})^n}{n! \mu^n} + \sum_{n=T}^M \frac{(\lambda^{NC} + \lambda^{HC})^T (\lambda^{HC})^{n-T}}{n! \mu^n} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$NBP = \sum_{n=T}^M \pi(n) \quad (5)$$

$$HDP = \pi(M) \quad (6)$$

4.2 호 기준 모드 할당방식 (PMA)

PMA 방식에서의 시스템 상태 벡터는 $N = (n_1, \dots, n_i, \dots, n_I)$ 로 나타낼 수 있다. 시스템이 N 으로 주어졌을 때, 새로 들어오는 호에 AMR 전송 모드 i 를 적용하여 받아들일 경우의 시스템 벡터를 $N_i^+ = (n_1, \dots, n_i+1, \dots, n_I)$ 로 나타내기로 하자. 또한 모드 i 에서 하나의 호가 나간 상태를 $N_i^- = (n_1, \dots, n_i-1, \dots, n_I)$ 로 나타내면 시스템 상태 전이는 <Figure 3>과 같이 나타낼 수 있다.

여기서 $mode(N)$ 은 시스템 벡터가 N 으로 주어졌을 때, 새롭게 들어오는 호에 적용되는 모드를 나타낸다. 이것은 식 (7)

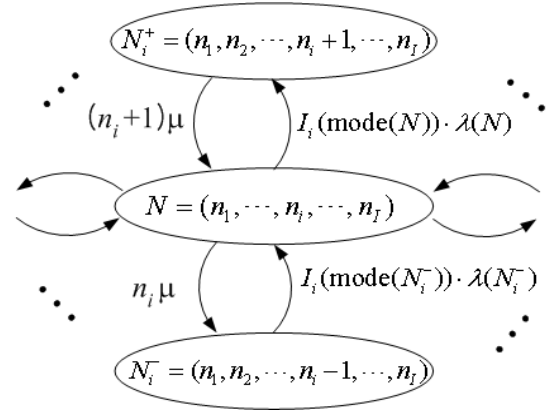


Figure 3. System state transition diagram of PMA.

과 같이 구해질 수 있다.

$$mode(N) = i, P_{i-1}^{Th} \leq Power(N) < P_i^{Th} \quad (7)$$

$$\text{단, } i \in \{1, \dots, I\}, P_0^{Th} = 0, P_I^{Th} = P^S$$

또한 $\lambda(N)$ 은 식 (8)과 같이 호 수락 제어 정책의 신규 호 수락 임계값 (P_{New}^{Th})에 따라 주어지는 입력 트래픽의 발생률이고, $I_i(mode(N))$ 는 다음 식 (9)와 같은 indicator 함수이다.

$$\lambda(N) = \begin{cases} \lambda^{NC} + \lambda^{HC}, & Power(N) < P_{New}^{Th} \\ \lambda^{HC}, & P_{New}^{Th} \leq Power(N) < P^S \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$I_i(mode(N)) = \begin{cases} 1, & mode(N) = i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

위 시스템의 상태 전이도를 이용하여 다중 차원(multi-dimensional)의 상태 전이 행렬 Q 가 구성되며 이에 따라 PMA 상황에서의 시스템 안정상태 확률 $\pi(N)$ 이 계산될 수 있다.

US 의 값은 각 호가 처음 시스템에 들어왔을 때의 시스템 상태에 의존한다. 따라서 모든 가능한 시스템 초기 상태의 확률을 구하여 이를 통해 평균 기대값을 구해야 한다. US 는 시스템의 안정상태 확률인 $\pi(N)$ 이 구해졌다고 가정했을 때, 식 (10)과 같은 기대값 형태로 주어진다.

$$US = \sum_{N \in \Omega} Qrel(mode(N)) \cdot \pi(N) \quad (10)$$

$\Theta = \{MN \in \Omega, N_i^+ \notin \Omega\}$ 로 정의하면 Θ 는 최소 출력 모드 I 로 새로운 호를 받아들였을 경우 시스템 용량을 초과하는 상태 벡터들, 즉 핸드오프 호의 차단이 일어나는 상태 벡터들의 집합이 된다. 위에서 정리한 기호들을 이용하여 신규 호와 핸드오프 호의 차단 확률을 구하면 식 (11), (12)와 같다.

$$NBP = \sum_{N \in \Omega \cap N_i^+ \notin \Omega_{NC}} \pi(N) \quad (11)$$

$$HDP = \sum_{N \in \Theta} \pi(N) \quad (12)$$

PMA 방식에서는 신규 호 차단 임계값뿐 아니라 새로 들어오는 호에 어떤 모드를 할당해 줄 것인지를 기준 영역을 정해 주는 P_i^{Th} , $i=1, \dots, I-1$ 값들도 설정해 주어야 한다. 즉, 시스템의 부하가 주어졌을 때, 시스템 성능을 최대화하는 최적 임계값들을 찾아야 한다. 본 연구에서는 유전 알고리즘 (genetic algorithm)을 통하여 최적 제어변수를 찾는 방법을 실험 예제를 통하여 제시하였다.

4.3 동적 모드 할당방식 (DMA)

DMA 방식에서는 음성 사용자의 수가 정해지면 특정한 목적함수를 만족하도록 각 모드에 해당하는 사용자 수를 정하고 할당해 주게 된다. 따라서 실제 음성 사용자 수 n 과 모드 사용자 분포 (n_1, \dots, n_I) 는 $n = \sum_{i=1}^I n_i$ 을 만족하면서 모드 할당 알고리즘에 의해서 일대일 대응된다고 가정할 수 있다. 실제 시스템에서는 여러 가지 목적함수를 갖는 할당 알고리즘을 사용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 각 사용자들에게 공평하게 전송 모드를 할당해 주는 알고리즘과 이에 대한 분석 모델을 제안한다.

4.3.1 형평성 보장을 위한 모드 할당 알고리즘

각 사용자의 형평성(fairness)을 보장하기 위해서는 시스템 부하에 따라 모든 사용자가 동일한 AMR 모드를 사용하도록 하는 것이 이상적이다. 그러나 이 방법을 적용할 경우 사용자 수의 변화에 따라 너무 빈번한 모드 전환이 발생하고 시스템 출력의 비효율성이 초래하게 될 것이 예상된다. 따라서 본 연구에서는 사용자 수가 정해진 조건하에서 시스템 효율 (utilization)을 극대화하면서 모든 사용자가 동일하거나 또는 차이가 1단계 이상을 넘지 않는 모드를 할당 받고 있을 때 시스템의 형평성이 보장되었다고 하기로 한다. 이러한 조건을 만족하는 형평성 보장 알고리즘 하에서는 시스템이 특정한 시간에 사용자에게 서비스해 주는 AMR 모드의 종류는 1개 또는 2개가 되며 또한 정해진 사용자 수에 따라 유일한 상태 벡터를 갖게 된다. 이 때 사용되는 AMR 모드를 i^* , i^*+1 , $i^* \in \{1, \dots, I\}$ 라 하면 이것은 다음의 식 (13)을 만족하는 정수 x ($x \in \{0, \dots, n\}$)가 존재하는 최소값 i^* 를 찾음으로써 구해질 수 있다. 단, 식 (13)에서 N 은 i 번째 원소가 x , $i+1$ 번째 원소가 $n-x$ 이고 나머지 원소는 0인 상태 벡터이다.

$$\begin{aligned} Power(N) &= Power_{i^*}(N) \cdot x + Power_{i^*+1}(N) \cdot (n-x) + P_\delta, \\ 0 &\leq P_\delta < Power_{i^*}(N), \\ i &\in \{1, \dots, I-1\}, \exists x, x \in \{0, \dots, n\} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서 $Power_{i^*}(N)$ 은 시스템 상태 벡터가 주어졌을 때 AMR i^* 모드 한 호를 전송하는 데 필요한 출력이다. 일단 모드 i^* 가 정해지면 다음 식 (14)를 만족하는 음이 아닌 최대 정수

y^* 를 찾음으로써 각 모드에 해당하는 사용자 수를 결정할 수 있게 된다. 단, 식 (14)에서 N 은 i^* 번째 원소가 y , i^*+1 번째 원소가 $n-y$ 이고, 나머지 원소는 0인 상태 벡터이다.

$$\begin{aligned} Power(N) &= Power_{i^*}(N) \cdot y + Power_{i^*+1}(N) \cdot (n-y) + P_\delta, \\ 0 &\leq P_\delta < Power_{i^*}(N), y \in \{0, \dots, n\} \end{aligned} \quad (14)$$

이것을 통해 음성 사용자 수가 n 으로 정해졌을 때, 각 모드에 해당하는 사용자 분포, 즉 형평성이 만족된 시스템 상태 벡터 $N=(n_1, \dots, n_I)$ 이 식 (15)와 같이 얻어지게 된다.

$$n_i = \begin{cases} n-y^* & , i=i^*+1 \\ y^* & , i=i^* \\ 0 & , i \neq i^*, i^*+1 \end{cases} \quad (15)$$

4.3.2 시스템 성능 계산

DMA에서의 시스템 상태 변수는 사용자 수가 된다. 형평성 보장 알고리즘은 시스템의 효율의 최대화를 보장하지는 못하기 때문에 사용자 수가 증가함에 따라 시스템의 총 출력이 비례적으로 증가하지는 않는다. 따라서 신규 호 수락 임계값 (P_{New}^{Th})을 SMA 하에서와 같이 사용자 수로 대응시킬 수는 없다. DMA 하에서의 시스템 상태 전이는 $\lambda(n)$ 을 입력률, $n \cdot \mu$ 를 출력률로 하는 단순 출생-소멸 과정(birth-death process)으로 모델링된다.

단, $\lambda(n)$ 은 식 (16)과 같이 주어지는데, n 이 주어지면 형평성 보장 알고리즘에 의해 각 모드 사용자 분포인 $N=(n_1, \dots, n_I)$ 이 주어지고 이에 따라 $Power(N)$ 이 계산됨을 알 수 있다. 또한 시스템의 최대 수용 용량 M 은 최소 전송률 모드 I 를 적용했을 때, 4.1절의 SMA 방식과 동일하게 구해질 수 있다.

$$\lambda(n) = \begin{cases} \lambda^{NC} + \lambda^{HC} & , Power(N) < P_{New}^{Th} \\ \lambda^{HC} & , P_{New}^{Th} \leq Power(N) < P^S \end{cases} \quad (16)$$

따라서 시스템의 안정 상태 확률은 다음 식 (17), (18)과 같이 주어진다.

$$\pi(n) = \pi(0) \prod_{k=0}^{n-1} \frac{\lambda(k)}{(k+1)\mu} \quad \text{단, } n=1, 2, \dots, M \quad (17)$$

$$\pi(0) = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^M \prod_{k=0}^{n-1} \frac{\lambda(k)}{(k+1)\mu}} \quad (18)$$

계산된 안정 상태 확률을 이용하여 **NBP**와 **HDP**를 구하면 식 (19), (20)과 같다.

$$NBP = \sum_{n \in \Omega \setminus n \notin \Omega_{NC}} \pi(n) \quad (19)$$

$$HDP = \pi(M) \quad (20)$$

US 값을 구하기 위해서는 시스템에 들어온 사용자가 시스템을 떠날 때까지 서비스 받은 각 모드의 종류와 시간을 추정

할 수 있어야 한다. 이후로는 시스템에 새로 들어온 임의의 관측 대상이 되는 호를 ‘관측 호’라고 하자. 시스템이 안정 상태임을 가정하면 관측 호가 떠날 때까지 각 모드로 할당 받게 되는 평균 시간은 관측 호가 들어 온 초기 시스템의 상태(사용자 수)에 영향을 받게 된다. 이 성질을 이용하여 US를 다음의 식 (21)과 같이 초기 시스템 상태의 조건부 식으로 나타낼 수 있다

$$US = \sum_{n=1}^M US(n) \cdot Pr(n) \quad (21)$$

식 (21)에서 $Pr(n)$ 은 관측 호가 임의의 시점에 시스템에 들어왔을 때의 사용자 수가 자신을 포함해서 n 명이 될 확률을 나타낸다. $Pr(n)$ 은 시스템 안정 상태 확률에서 사용자 수가 0인 경우를 제외하고 확률을 다시 구성하여 식 (22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Pr(n) = \frac{\pi(n)}{1 - \pi(0)} \quad (22)$$

또한 식 (21)에서 $US(n)$ 은 초기 조건이 n 인 경우에 관측 호가 떠날 때까지 경험하게 되는 평균 사용자 만족도로서 식 (23)과 같이 주어진다.

$$US(n) = \sum_{i=1}^I \left(Qrel(i) \cdot \frac{\tau_{in}}{1/\mu} \right) \quad (23)$$

식 (23)에서 τ_{in} 은 초기상태가 n 으로 주어졌을 때 관측 호가 떠날 때 까지 AMR 모드 i 에 머무르게 되는 평균시간을 나타내며 식 (24)와 같이 얻어진다.

$$\tau_{in} = \sum_{n=1}^M P_i(n^*) \cdot y_{n|n} \quad (24)$$

식 (24)에서 $y_{n|n}$ 은 초기 사용자 수가 n 으로 주어졌을 때 관측 호가 떠날 때까지 시스템의 사용자가 n^* 인 상태에 머물러 있게 되는 평균 시간 길이를 나타낸다. 또한 $P_i(n^*)$ 은 시스템 사용자 수가 n^* 일 때, 관측 호가 AMR 모드 i 에 있게 될 확률을 나타낸다.

식 (24)에서 $y_{n|n}$ 을 구하기 위해서 관측 호가 시스템에 들어와서 떠나는 것을 흡수 상태(absorbing state)로 하는 상태 전이도를 <Figure 4>에 나타내었다. Q 를 <Figure 4>를 만족시키는 상태 전이 행렬이라고 하자. 여기서 흡수 상태로의 전이열과 행을 뺀 행렬을 \hat{Q} 라 한다면 다음과 같은 Kolmogorov's 방정식을 구성할 수 있다.

$$\frac{d \hat{\pi}_t}{dt} = \hat{\pi}_t \cdot \hat{Q} \quad (25)$$

식 (25)에서 $\hat{\pi}_t$ 는 t 시점에서 흡수 상태를 제외하고 각 시스템 상태에 머무르게 되는 확률을 나타내는 벡터가 된다. 식 (25)를 0에서 ∞ 까지 적분하고 시간 t 를 무한대로 보내는 극한을 취하면 식 (26)을 얻을 수 있다(Trivedi, 2002).

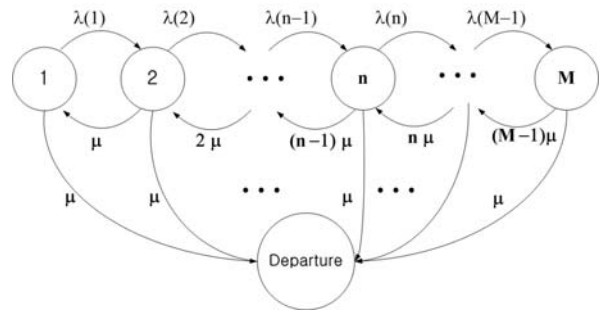


Figure 4. System state transition diagram of DMA.

$$Y \cdot \hat{Q} = -\hat{\pi}_0 \quad (26)$$

식 (26)에서 Y 는 관측 호가 떠날 때까지 각 시스템 상태에 머무르게 되는 기대시간을 나타내는 벡터로서 시스템의 초기 상태 확률 벡터 $\hat{\pi}_0$ 에 영향을 받는 벡터가 된다. 따라서 초기 시스템에 있는 사용자 수를 n 으로 가정했을 때, Y 벡터의 각 원소가 $y_{n|n}$ 를 나타내게 된다.

식 (24)에서 $P_i(n^*)$ 의 값은 본 연구에서 제시한 형평성을 보장하는 알고리즘을 사용했을 경우 단순하게 $P_i(n^*) = \frac{n_i^*}{n^*}$ (단, $n^* = \sum_{i=1}^I n_i^*$)로 주어지게 된다.

5. 실험 예제

본 장에서는 제안된 음성 코덱 모드 할당방식의 성능 분석 모델을 이용하여 각 할당방식의 운용에 필요한 최적 제어 변수를 찾는 방법을 도출한다. 또한 시스템 부하 변화에 따른 SMA, PMA 그리고 DMA 방식의 성능 차이를 비교 분석한다.

Table 1. Parameters of AMR Mode

	mode 1	mode 2	mode 3
Bitrate : $R^{(i)}$	12.2 kbps	7.4 kbps	4.75 kbps
E_b/N_0 : $\beta^{(i)}$	7.0 dB	7.5 dB	8.0 dB
MOS	3.89	3.76	3.35
Qrel	0.97	0.937	0.835

Table 2. Parameters of the System

모수	값	모수	값	모수	값
$\bar{\alpha}$	0.5	f_{DL}	0.9	P_N	-100dBm
\bar{L}	120dB	v	0.67	W	3840Kcps
P^S	5W	code rate	1/3	C_B	5
P_{CCH}	35.5dBm	$\lambda^{HC}/(\lambda^{NC} + \lambda^{HC})$	1/3	ω	0.1

본 실험은 회선 교환 (circuit switched) 방식의 AMR 음성 트래픽을 분석 대상으로 하였으며, AMR 모드에서 지원 가능한 8개 코덱 모드 중 대표적인 3개를 취하였다. 또한 3GPP TR 26.975 결과를 이용하여 No Error 조건하에서 최고 전송률 (12.2 kbps)에서의 MOS(Mean Opinion Score) 값 (4.01)을 기준 값 1로 하고, FER 목표값이 0.5% 일 때 각 모드의 MOS 값을 상대값으로 하여 각 모드에 따른 Qrel 값을 구하였으며, 이를 <Table 1>에 정리하였다. 그 외에 본 실험에서 가정된 시스템 보수값을 <Table 2>에 정리하였다.

본 연구에서는 시스템 부하는 $Erlang = (\lambda^{HC} + \lambda^{NC}) / \mu$ 로 정의한다. 시스템의 사용자 수는 추계적(stochastic)으로 변화되기 때문에, Erlang 값을 기준으로 시스템의 부하를 나타내며 정해진 Erlang 하에서는 시스템의 평균 사용자 수는 일정하다. Erlang이 증가할수록 평균 사용자 수는 일반적으로 증가하게 되나 본 시스템은 차단 확률이 존재하는 loss 시스템이므로 Erlang이 증가할수록 차단 확률값도 증가하게 되어 시스템의 평균 사용자 수가 Erlang의 변화에 정비례하지 않을 것으로 예상된다.

<Figure 5>는 Erlang load가 5일 때, SMA 방식 하에서 신규 호 수락 임계값 (P_{New}^{Th})의 증가에 따른 시스템의 성능인 SP 값의 변화를 보여주고 있다. SMA에서는 단일 전송 모드를 적용하므로 US 값은 고정되지만 임계값이 증가하면서 신규 호의 차단 확률 감소와 핸드오프 호의 차단 확률의 증가로 인한 상충 효과가 발생하여 SP 값을 최대로 하는 최적 임계값이 존재함을 알 수 있다. 또한 낮은 전송률 모드일수록 더 높은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있는데, 이 사실을 통해서 Erlang load가 5일 경우는 높은 모드 전송률에 의한 US 값의 수익보다 차단 확률 증가로 인한 비용이 더 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

PMA하에서는 신규 호 수락 임계값뿐 아니라 새로 들어오는 호에 어떤 모드를 할당해 줄 것인지를 기준 영역을 정해주는 P_1^{Th} , P_2^{Th} 값들도 설정해야 한다.

본 연구에서는 유전 알고리즘을 통하여 최적 제어변수를 찾

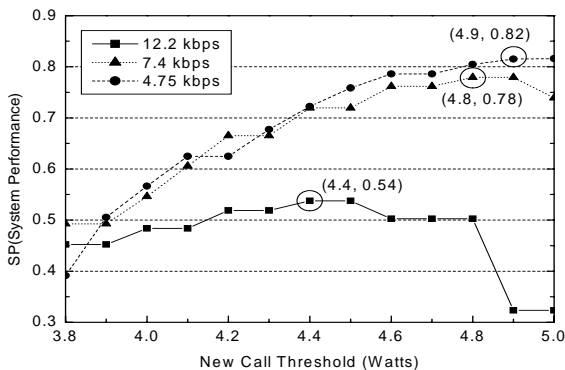


Figure 5. System performances according to P_{New}^{Th} in SMA.

는 방법을 제시하였다. 사용된 유전 알고리즘에서는 AMR 모드가 3개일 때, 최대 SP 값을 내는 파라미터 벡터 (P_1^{Th} , P_2^{Th} , P_{New}^{Th})를 최적해로 정의한다. 먼저 초기 해집단을 임의로 10개 생성한다. 선택 연산에서는 품질 비례 룰렛 휠을 선택하였다. 교차연산은 산술적 교차를 사용하였으며, 변이 연산 임계값으로 0.1을 주었고 해의 수렴 속도를 빠르게 하기 위해서 국소 탐색 알고리즘을 삽입하였다. 또한 0.9의 확률로 품질이 가장 나쁜 해와 대치가 일어나도록 하였다 <Figure 6>은 Erlang load가 9일 때, 제안된 유전 알고리즘을 적용하여 최적해를 탐색하는 과정을 보여 주고 있다. 그림에서 해집단의 평균이 최적해로 수렴해 가는 것을 확인할 수 있으며 최적해로 (3.4, 3.5, 4.7)와 $SP = 0.73$ 을 얻을 수 있었다.

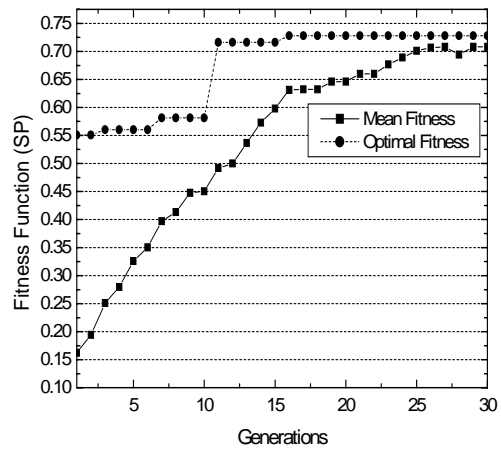


Figure 6. Optimal solutions in PMA using genetic algorithm.

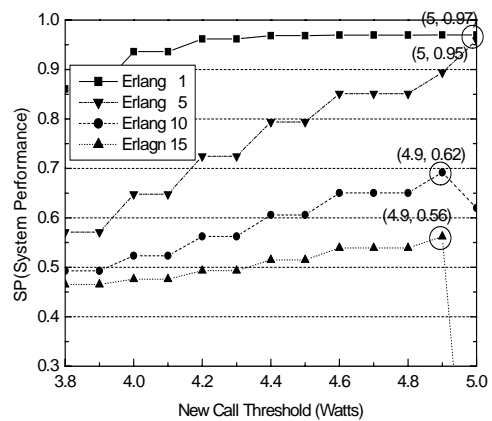


Figure 7. System performances according to P_{New}^{Th} and Erlang in DMA.

<Figure 7>은 DMA 방식 하에서 Erlang load와 신규 호 수락

임계값 증가에 따른 *SP* 값의 변화를 보여주고 있다. 각 Erlang load 하에서 *SP* 값을 최대화하는 최적 신규 호 수락 임계값이 존재함을 확인할 수 있다.

<Figure 8>부터 <Figure 11>은 세 가지 모드 할당방식의 성능을 비교하기 위해서 각 Erlang load별로 *SP* 값을 최대화하는 최적의 제어 변수값들을 찾아 이를 적용했을 때 각 QoS 척도들의 변화를 도기한 것이다.

<Figure 8>에서는 Erlang load가 9인 경우를 제외하고는 모든 구간에서 DMA 방식이 가장 좋은 성능을 내고 있음을 확인할 수 있다. PMA 방식은 Erlang가 7까지는 SMA에서 4.75 kbps를 적용했을 때보다 더 좋은 성능을 내지만 부하가 증가하면서는 성능 저하가 SMA 4.75 kbps보다 더 빠르게 일어남을 알 수 있다.

이 상황을 좀더 잘 파악하기 위해서 *SP* 값에 영향을 주는 *US*, *NBP* 그리고 *HDP* 값들의 변화를 <Figure 9>부터 <Figure 11>에 도시하였다. PMA와 DMA의 경우 시스템 부하가 증가하면서 성능 척도들이 감소하지 않고 진동하는 양상을 보여주고 있는데 이는 각 부하에서 동일한 임계값을 적용하지 않고 *SP* 값을 최대화하는 임계값들을 찾아서 적용하였기 때문이다.

<Figure 9>에서 Erlang 9까지는 DMA의 *US* 값이 꾸준히 감소하다가 그 이후에 큰 폭으로 증가하게 되는데, 그 이유는 *SP* 값을 최대로 하는 신규 호 수락 임계값이 Erlang 9까지 5W로 변화가 없다가, 그 이후로는 4.9W로 변경되었기 때문이다. *NBP*와 *HDP*의 경우에도 동일하게 최적 신규 호 수락 임계값의 변화에 따라 Erlang 9 이후로 큰 폭으로 증가하거나 증가하다가 감소함을 확인할 수 있다.

<Figure 9>부터 <Figure 11>에서 확인할 수 있는 것처럼, Erlang load가 증가할수록 DMA 방식이 다른 방식들에 비해 가장 작은 *HDP*의 값을 보장해 주며, *US*의 값도 안정적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다.

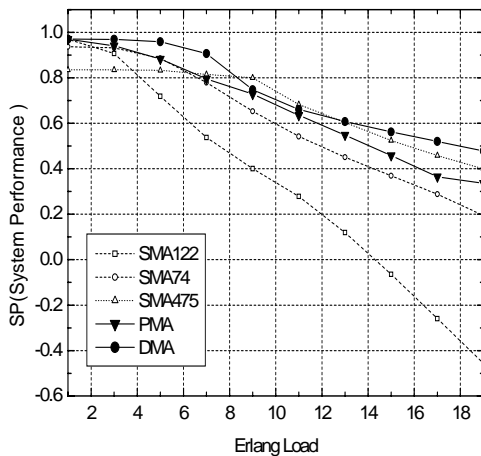


Figure 8. System performances according to Erlang.

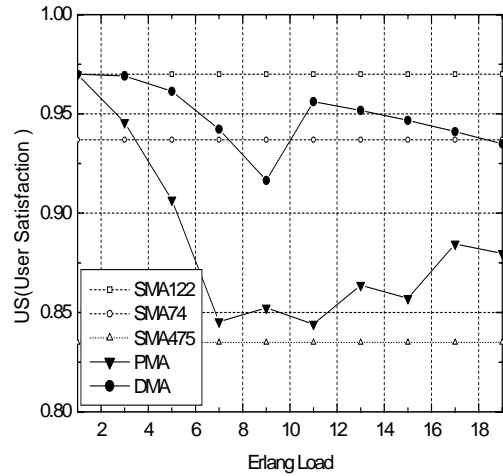


Figure 9. User satisfactions using optimal threshold.

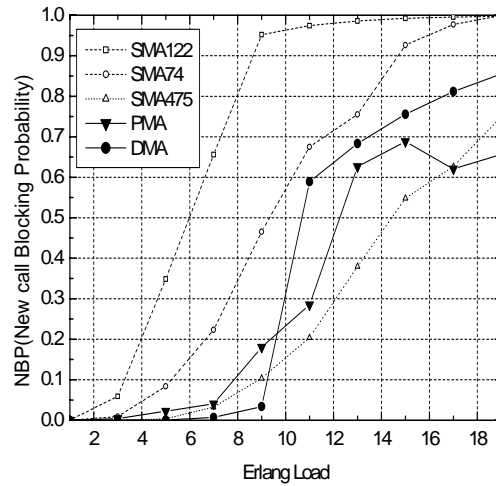


Figure 10. New call blocking probabilities using optimal threshold.

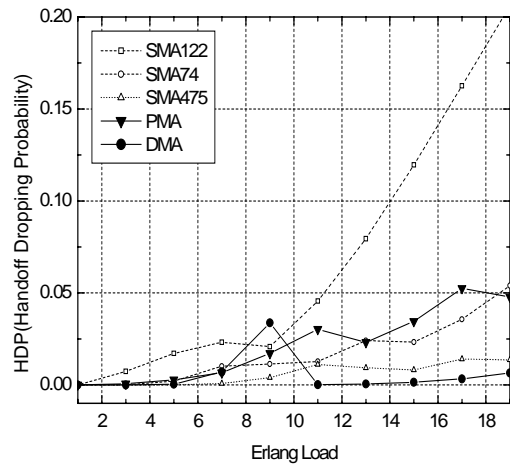


Figure 11. Handoff call dropping probabilities using optimal threshold.

6. 결론

본 연구에서는 순방향 WCDMA 채널에서 세 가지의 AMR 출력 모드 할당방식에 대해서 시스템 성능 척도를 제안하고 분석적 방법을 통해서 이를 계산할 수 있는 모델을 제안하였다. 신규 호와 핸드오프 호를 모두 고려하여 추계적인 시스템 상황을 묘사하기 위하여 각 방식에 대한 마코프체인을 구성하였으며, 특별히 DMA의 경우 서비스 받는 사용자의 평균 만족도를 추정하기 위하여 임의의 사용자가 시스템을 떠날 경우를 흡수 상태로 하는 마코프체인을 구성하였다. 이를 통하여 각 모드 할당방식에 따른 시스템 성능과 최적의 제어 변수를 구할 수 있었다. 실험 예제를 통하여 모든 사용자 부하에 대하여 가장 높은 사용자 만족도를 주는 방법이 DMA임을 확인할 수 있었고, 제어 복잡도와 시스템 성능을 동시에 고려할 때 시스템의 부하에 따라 최선의 모드 할당방식이 달라질 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- 3GPP TR 26.975 : Performance Characterization of the AMR Speech Codec.
- 3GPP TR 25.922 V3.1.0 : Radio Resource Management Strategies
- Calin, D., F. Goeusse and P. Sartori (2001), Performance and Interference Analysis of WCDMA System, *VTC '01*, **4**, 6-9, 2479-2483.
- Holma, H., J. Melero, J. Vainio, T. Halonen and J. Makinen (2003), Performance of Adaptive Multirate(AMR) Voice in GSM and WCDMA, *VTC '03*, **4**, 22-25, 2177-2181.
- Holma, H. and A. Toskala (2004), *WCDMA for UMTS*, 3rd Ed., John Wiley & Sons.
- Dimitriou, N., R. Tafazolli and G. Sfikas (2000), Quality of service for multimedia CDMA, *IEEE Communications Magazine*, **38** (7), 88-94.
- Kim, D.I., E. Hossain and V.K. Bhargava (2003), Downlink joint rate and power allocation in cellular multirate WCDMA systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **2** (1), 69-80.
- Jeon, W.S. and D.G. Jeong (2002), Call Admission Control for CDMA Mobile Communications Systems Supporting Multimedia Services, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **1**(4), 649-659.
- Karlsson, M., M. Almgren, S. Bruhn, K. Larsson and M. Sundelin (2002), Joint Capacity and Quality Evaluation for AMR Telephony Speech in WCDMA Systems, *VTC '02*, **4**, 24-28, 2046-2050.
- Kleinrock, L. (1975), *Queueing Systems*, vol I, John Wiley & Sons.
- Knutsson, J., P. Butovitsch, M. Persson and R.D. Yates (1998), Downlink Admission Control Strategies for CDMA Systems in a Manhattan Environment, *VTC '98*, Ottawa, Canada, **2**, 1453-1457.
- Malik, S.A. and D. Zeglache (2002), Downlink Capacity and Performance Issues in Mixed Services UMTS WCDMA Networks, *VTC '02*, **4**, 6-9, 1824-1828.
- Mun, B.R. (2001), *Genetic Algorithm*, Da-sung, Seoul, Korea.
- Sipila, K., K.C. Honkasalo, J. Laiho-Steffens and A. Wacker (2000), Estimation of Capacity and Required Transmission Power of WCDMA Downlink Based on a Downlink Pole Equation, *VTC '00*, **2**, 15-18, 1002-1005.
- Trivedi, K.S. (2002), Probability and Statistics with Reliability, *Queueing and Computer Science Applications*, 2nd. Ed. John Wiley & Sons, New York.