

CDMA 슬롯 ALOHA 시스템에서 확산 이득 제어의 영향

정희원 도미선*, 박중신*, 강지은*, 이재용*

The Effect of Spreading Gain Control on a CDMA Slotted ALOHA System

Mi-Sun Do*, Jung-Shin Park*, Ji-Eun Kang*, Jai-Yong Lee* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 획득 확률과 확산 이득 제어가 CDMA 슬롯 ALOHA 시스템의 처리율에 미치는 영향을 연구한다. 이동 단말들은 공유 채널을 통해 패킷을 전송하고, 동일한 시간 슬롯에서 전송되는 패킷들은 동시 접속 간섭으로 작용한다. 대역확산 신호를 사용함으로써, CDMA 슬롯 ALOHA 채널은 높은 시간 해상도 특성에 의해 높은 획득 확률을 얻고, 확산 이득의 크기에 따라 사용자의 비트율이 결정된다. 동시 접속 간섭의 크기가 증가할 때, 확산 이득의 증가는 패킷 전송 성공 확률을 증가시켜 패킷 처리율을 향상시키나 패킷이 전송하는 사용자 정보 비트 수가 감소되어 유효 처리율을 저하시킨다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여, 본 논문에서는 획득 확률과 동시 접속 간섭 크기가 시스템 처리율에 미치는 영향을 연구하고, 확산 이득 제어 방법에 따른 시스템 처리율 성능을 평가하였다. 시스템 상태에 따라 최적 확산 이득을 구함으로써 동시 접속 간섭 크기의 변화에 대해 통일된 방법으로 최대 유효 처리율을 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

The effect of spreading gain control on the throughput of a CDMA slotted ALOHA system is considered. Mobile users transmit packets over a shared channel, and the packets transmitted in the same time slot over the shared channel act as simultaneous access interference (SAI). When using spread-spectrum signal, a CDMA slotted ALOHA channel achieves high probability of capture due to the property of high time resolution, and the bit rate of user information is determined by spreading gain. When the SAI level gets larger, the high value of spreading gain enhances the packet throughput by increasing the probability of a successful packet transmission, while it degrades the effective throughput by reducing the user information bits carried within a packet.

To solve the problem, we investigated the effect of the capture probability and the SAI level on these system throughputs, and evaluated the throughput performance of the system for each spreading gain control scheme. The results showed that the maximum effective throughput could be achieved with an unified method despite the variation of the SAI level by deriving an optimal value of the spreading gain according to the system states.

I. 서 론

슬롯 ALOHA (slotted ALOHA)는 이동 통신망에서 널리 알려진 다중 접속 프로토콜 중의 하나이다. 이동 단말들은 시간 슬롯에 맞춰 공통 채널을

통해 중앙국으로 패킷을 전송하고, 동일한 시간 슬롯에서 전송되는 패킷들은 동시 접속 간섭(simultaneous access interference : SAI)으로 작용한다. 슬롯 ALOHA 시스템에서 중앙국의 수신기는 여러 패킷이 동일한 슬롯에 접속할 때 성공적으로

* 연세대학교 전기전자공학과 네트워크 연구실(msdo, shin, gnee, lji}@nasla.yonsei.ac.kr)

논문번호: 010207-0801, 접수일자: 2001년 8월 1일

※ 본 연구는 삼성전자의 지원 및 연세대학교 전자정보통신연구소 관리로 수행되었습니다.

패킷을 획득할 수 있는 획득 효과 (capture effect)를 갖는다. 따라서, 공통 채널에서 시스템 처리율은 다중 접속 간섭에 대한 획득 확률과 패킷 전송 성공 확률에 의해 영향 받는다.

CDMA 슬롯 ALOHA 시스템은 대역확산 신호를 사용함으로써 비대역확산 슬롯 ALOHA 시스템과는 다른 성능 특성을 갖는다. 첫째, 대역확산 신호가 갖는 높은 시간 해상도 (time resolution) 특성으로 인해 지연 획득 효과로 인한 뛰어난 획득 확률을 얻을 수 있다. 둘째, 확산 이득에 의해 패킷이 전송하는 사용자 정보 비트 수가 결정된다. 본 논문에서는, 이러한 확산 신호의 특성을 이용하여, CDMA 슬롯 ALOHA 시스템에서 지연 획득 효과와 확산 이득 제어가 시스템의 유효 처리율에 미치는 영향을 연구한다.

시스템 환경으로 저속 전력 제어를 갖는 중앙 집중형 CDMA 슬롯 ALOHA 시스템을 고려하였다. 모든 패킷들은 동일한 확산 코드를 사용하는 단일 획득 시스템이고, 중앙국에서 모든 패킷은 동일한 평균 전력으로 수신된다고 가정한다. 단일 획득 시스템은 확산 코드 수를 확장하거나^{[14][2]}, 다중 획득 수신기를 사용하면^[3], 다중 획득 시스템으로 확장할 수 있다. 단일 획득 모델에 비해 수신기가 복잡해지는 대신 더 높은 획득 성능을 갖는다.

대표적인 획득 모델들로는 지연 획득 모델^{[3][5]}, 전력 획득 모델^{[2][6][7]}, 하이브리드 (hybrid) 획득 모델 [8]이 있다. CDMA 슬롯 ALOHA 채널에서 서로 다른 패킷이 동시에 도착할 때는 높은 상관관계를 갖게되나, 서로 다른 지연을 갖고 도착하는 경우 낮은 상관관계를 갖는다. 지연 획득 모델과 하이브리드 획득 모델은 기본적으로 이러한 지연 획득 효과를 갖는다. 전력 획득 모델을 CDMA 슬롯 ALOHA 채널에 적용하기 위해서는 모든 수신 패킷들이 지연 오프셋 (delay offset)을 갖는다고 가정하고, 목표 패킷과 간섭 패킷들의 전력 비 대신에 이들의 에너지 비가 고려되어야 한다.

CDMA 슬롯 ALOHA 무선 링크의 획득과 처리율 성능은 일반적으로 고정 확산 이득을 기본으로 한다. 고정 확산 이득 제어에서는 모든 슬롯에서 전송되는 비트 수가 동일하고 시스템 처리율과 지연은 패킷 처리율과 지연으로 정의된다. 가변 확산 이득 제어에서는^{[9][11]}, 확산 이득은 고정 침몰을 유지하면서 전송되는 비트율을 증가시키거나 감소시킴으로써 제어된다. 따라서 확산 이득이 변함에 따라 패킷이 전송하는 비트 수도 변하게 된다.

동일한 채널을 공유하는 여러 패킷이 동시에 접속할 때 패킷이 성공적으로 전송될 확률은 획득 확률 (capture probability)과 전송 성공 확률 (successful transmission probability)에 의해 영향 받는다. 이 중 전송 성공 확률은 SAI 크기와 확산 이득에 의해 영향 받는다. SAI 크기가 증가할수록 전송 성공 확률은 감소한다. 큰 확산 이득 값은 전송 성공 확률을 증가시켜 패킷 처리율을 향상시키나, 패킷이 전송하는 사용자 정보 비트 수가 감소되어 유효 처리율을 저하시킨다. 따라서 높은 패킷 처리율을 얻을 수 있는 확산 이득 값으로 동시에 높은 유효 처리율을 얻는것은 아니다. 이를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 획득 확률과 SAI 크기가 시스템 성능에 미치는 영향과 함께, SAI 크기에 변할때 높은 유효 처리율을 유지하기 위한 확산 이득 제어 방법을 연구한다.

II. 획득 확률

이 절에서는 CDMA 슬롯 ALOHA 채널에서 기존의 획득 모델들의 획득 성능을 비교하고, 지연 획득 효과와 전력 획득 효과가 각 획득 모델의 성능에 미치는 영향을 구한다. 슬롯 시간은 τ [sec/slot]로 주어진다. 동일한 슬롯에서 접속하는 패킷들의 수가 w 일 때 획득 확률을 $p_{cap}(w)$ 으로 정의한다.

지연 획득 모델에서는 [4], 접속 패킷의 도착 시간을 제어함으로써, 획득 효과를 얻는다. 패킷 i 의 도착 시간 T_i 는 지연 랜덤화 구간 $(0, T_c)$ 에서 균일하게 분포된다고 가정한다 ($T_c \ll \tau$). T_c 를 획득 시간으로 $Q = T_c/\tau$ 을 지연 획득 비로 정의하면, 획득 확률은 $p_{cap}(w) = \Pr\{T_2 - T_1 > T_c\}$ 로 정의되고 다음과 같이 구해진다.

$$p_{cap}(w) = \begin{cases} 1 & w=1 \\ (1-Q)^w & w>1 \end{cases} \quad (1)$$

전력 획득 모델에서는 저속 전력 제어를 갖는 Rayleigh 채널을 고려한다. 수신 신호들의 위상은 매우 빨리 변한다고 가정한다 [6]. 패킷 i 의 도착 시간부터 랜덤화 구간 끝까지 지속시간을 패킷 i 의 잔여시간으로 정의한다. p_i 와 t_i 를 각각 패킷 i 의 수신 전력과 잔여시간이라 하면 패킷 i 의 수신 에너지는 $e_i = p_i t_i$ 로 표현된다. CDMA 슬롯 ALOHA 채널에서, 첫 번째 패킷의 수신 에너지 e_1 과 $w-1$ 간섭 패킷들의 간섭 에너지 $\sum_{i=2}^w e_i$ 의 비

가 임계값(γ) 이상이면, 첫 번째 패킷이 획득된다. 획득 확률은 $p_{cap}(w) = \Pr\left[-\sum_{i=1}^w e_i > \gamma\right]$ 로 정의되고 다음과 같이 구해진다.

$$p_{cap}(w) \approx \left\{ \frac{\ln(1+\gamma)}{\gamma} \right\}^{w-1}, \quad w \geq 1 \quad (2)$$

비대역확산 슬롯 ALOHA 채널인 경우, [6]에 의해 획득 확률은 $p_{cap}(w) = \Pr\left[-\sum_{i=1}^w b_i > \gamma\right]$ 으로 정의되고 $w\left(\frac{1}{\gamma+1}\right)^{w-1}, w \geq 1$ 으로 얻어진다.

하이브리드 획득 모델에서는 [8], 지연 획득이 실패한 경우 에너지 비에 기반하여 전력 획득 효과를 적용한다. 따라서 지연 획득 모델의 획득 성능을 하한으로 갖는다. 그림 1은 하이브리드 획득 모델에서 도착 시간 랜덤화에 의한 지연 획득 효과와 수신 전력 랜덤화에 의한 전력 획득 효과를 나타낸다. $T_p \gg T_c$ 라고 가정하면, 획득 구간 동안 도착한 간섭 패킷들의 수가 k 일 때 평균 획득 확률 $p_{cap}(w)$ 는 다음과 같이 근사화된다.

$$p_{cap}(w) \approx w \sum_{k=0}^{w-1} \binom{w-1}{k} \frac{Q^k(1-Q)^{w-k}}{w-k} \cdot \left\{ \frac{\ln(1+\gamma)}{\gamma} \right\}^k, \quad w \geq 1 \quad (3)$$

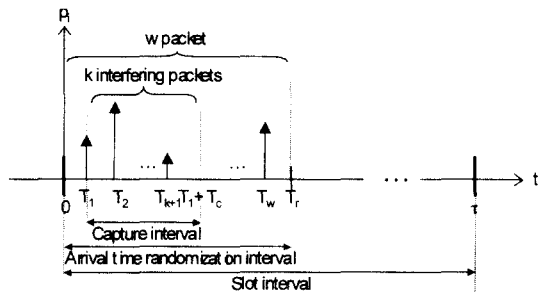
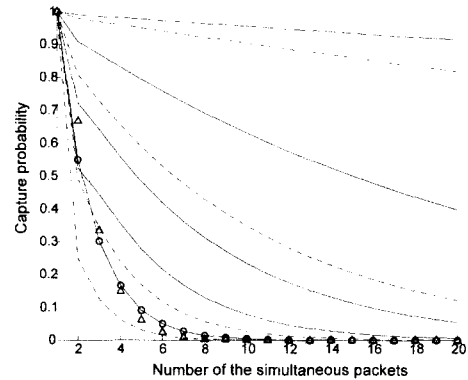


그림 1. 하이브리드 획득 모델에서 포획 효과

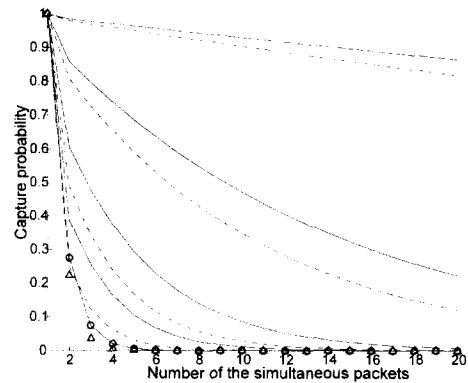
그림 2와 3은 각 모델의 획득 확률에 대한 전력 획득 비 γ 와 지연 획득 비 Q 의 영향을 나타낸다. 모델-1, 2, 3은 각각 지연 획득 모델, 전력 획득 모델, 하이브리드 획득 모델을 나타낸다. 모델-2는 다시 대역확산 (SS) 시스템과 비대역확산 (NSS) 시스템으로 구분하였다. 그림 2는 γ 가 주어졌을 때 Q 의 변화에 따른 획득 확률을 비교한 것이고, 그림 3은 Q 가 주어졌을 때, γ 의 변화에 따른 획득 확률을 비교한 것이다. 획득 비 γ 와 Q 가 커질수록 획득

성능은 감소한다.

CDMA 슬롯 ALOHA 채널에서는 지연 획득 효과로 인한 영향이 전력 획득 효과로 인한 영향보다



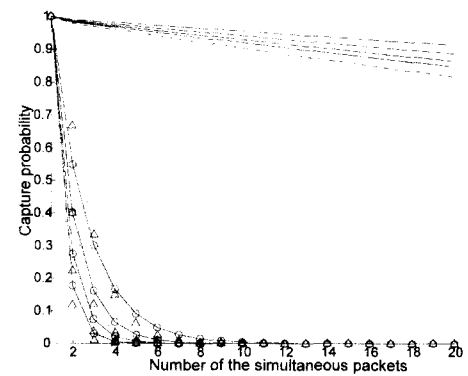
(a) $\gamma = 3$ dB



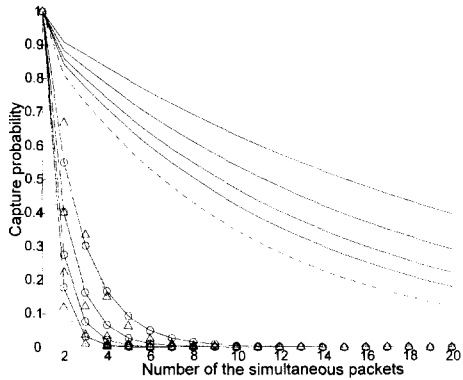
(b) $\gamma = 9$ dB

--- : 모델-1, ○ --- : 모델-2(SS), △ --- : 모델-2(NSS), — : 모델-3

그림 2. 서로 다른 지연 획득 비에 대한 획득 확률 비교 (모델-1과 모델-3에서 위에서 아래로 $Q=0.01, 0.1, 0.3, 0.5$)



(a) $Q = 0.01$



(b) $Q = 0.1$

--- :모델-1, ○--- :모델-2(SS), △--- :모델-2(NSS), — :모델-3

그림 3. 서로 다른 지연 획득 비에 대한 획득 확률 비교 (모델-2와 모델-3에서 위에서 아래로 $\gamma=3, 6, 9, 12$ dB)

훨씬 큼을 볼 수 있다. 높은 시간 해상도로 인한 지연 획득 효과는 모델-1과 모델-3에서 전력 획득 효과만을 고려한 모델-2에 비해 뛰어난 획득 성능을 갖는 주요인이 된다.

그림 2와 3은, 하이브리드 획득 모델에서 지연 획득 비가 전력 획득 비보다 획득 확률에 더 큰 영향을 미침을 보여준다. 하이브리드 획득 모델은 지연 랜덤화 구간 동안 얻어지는 전력 획득 효과로 인하여 지연 획득 모델보다 우수한 획득 성능을 갖는다. 이러한 전력 획득 효과는 γ 가 증가할수록 감소하므로, γ 가 증가함에 따라 지연 획득 모델의 획득 확률은 하이브리드 획득 모델의 획득 확률의 하한이 된다.

III. 확산 이득 제어와 시스템 성능

이 절에서는 II절에서 언급한 획득 모델들을 사용할 때, CDMA 슬롯 ALOHA 시스템의 성능을 처리율과 지연의 향으로 평가한다. 처리율을 패킷 처리율과 유효 처리율로 구분하고, 고정 확산 이득 제어와 가변 확산 이득 제어에서 처리율을 구한다.

1. 패킷 접속 성공 확률

그림 4는 CDMA 슬롯 ALOHA 시스템에서 사용자 정보의 전송을 나타낸다. 시스템의 최소 확산 이득을 G_{min} , 최대 확산 이득을 G_{max} 로 정의한다. CDMA 슬롯 ALOHA 채널의 슬롯 길이는 L

[chips/slot]이고 슬롯 시간은 τ [sec/slot]로 주어진다. 슬롯 시간 당 새로운 패킷의 도착율은 λ_n 으로 주어지고, 동시 접속 패킷들의 도착 시간은 지연 랜덤화 구간 $(0, T_s)$, $T_s \ll \tau$ 에서 균일하게 분포되도록 제어된다.

논리 채널 레벨에서 사용자 정보는 고정 크기로 분할된다. 이들은 순방향 오류 제어(forward error control : FEC)를 거쳐 확산 이득으로 확산되어 슬롯 ALOHA 채널에서 미리 정의된 시간 슬롯을 통해 전송된다. FEC 출력열의 단위를 데이터 블록(DB)으로, 슬롯 ALOHA 채널의 전송 단위를 패킷으로 정의하기로 한다. DB 길이는 L_b [bits/DB slot]이고, $T_s \ll \tau$ 이므로 패킷 길이는 L [chips/slot]이라 할 수 있다. 하나의 패킷에서 전송되는 정보 비트 수는 FEC 코드율 r 과 확산 이득 G 에 의해 결정된다. 하나의 슬롯에서 전송되는 DB의 수를 ρ 라 정의하면, $\rho = G_{max}/G$ 로 주어진다. 따라서 패킷 길이 L 은 $GL_b\rho$ [chips/slot]로 표현되고, 하나의 패킷에서 전송되는 유효 정보 비트 수는 rL/G [bits/slot]이다. 매 슬롯에서 패킷은 주어진 지연 오프셋에 따라 지연 랜덤화 구간에서 전송된다. 그림 4는 사용자 정보가 다중 논리 채널을 통해 전송되는 경우로 확장될 수 있다. 이 경우 논리 채널들은 시분할 다중화되어 확산되고, 동일한 트래픽 특성을 갖는다고 가정한다.

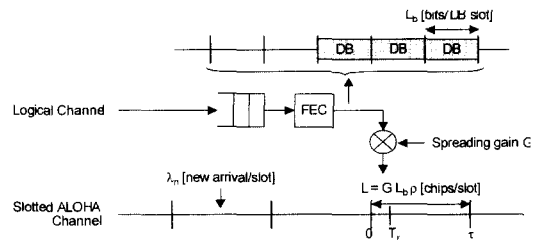


그림 4. CDMA 슬롯 ALOHA 채널에서의 전송

CDMA 슬롯 ALOHA 채널 상의 패킷 전송은 무 기억 이산 이진 대칭 채널 (memoryless discrete binary symmetric channel (BSC))을 거친 값을 경판정 (hard decision) 하는 것으로 모델링된다고 가정한다 [12]. 패킷이 성공적으로 전송될 확률은 FEC 코드와 변조 방법에 의해 영향 받는다. 여기서는 제한 거리 (bounded distance)가 t 인 (L_b, k) BCH 코드와 BPSK 방법을 고려한다.

패킷이 중앙국에서 올바르게 수신되지 못하는 것은

SAI와 AWGN 값에 좌우되며, AWGN에 의한 영향은 무시할만하고 주로 SAI 크기에 의해 영향 받는다고 가정한다. 동일한 슬롯을 접속하는 패킷의 수를 w 라 하자. 패킷의 E_b/N_o 는 $G/(w-1)$ 로 주어지고, BSC 천이 확률 p 는 다음과 같이 근사화된다.

$$p \approx \frac{1}{2} e^{-rG/(w-1)}$$

중앙국의 수신기에서 오류 검출은 DB 단위로 수행된다. 하나의 DB가 중앙국에서 오류 없이 수신될 확률 p_{db} 는

$$p_{db}(w) = \sum_{j=0}^{L_b} \binom{L_b}{j} p^j (1-p)^{L_b-j}$$

이다. 하나의 패킷이 여러 데이터 블록으로 구성된 경우, 오류가 검출된 데이터 블록만 재전송될 수 있으나 여기서는 이를 고려하지 않는다. ρ 데이터 블록이 모두 성공하지 않으면 해당 패킷은 재전송된다고 가정한다. 하나의 패킷이 중앙국에서 오류없이 수신될 확률 $p_{pkt}(w)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$p_{pkt}(w) = p_{db}^\rho, \quad \rho = G_{max}/G \quad (4)$$

공유 채널에서 w 개의 패킷이 동시에 접속할 때 하나의 패킷이 성공적으로 전송될 확률을 패킷 접속 성공 확률로 정의하고 $P_s(w)$ 로 나타내기로 한다. $P_s(w)$ 는 식 (1), (2), (3)의 획득 확률과 식 (4)의 패킷 전송 성공 확률로부터 다음과 같이 주어진다.

$$P_s(w) = p_{cap}(w) p_{pkt}(w) \quad (5)$$

다중 획득 시스템인 경우, 식 (5)는 패킷 중 다중 패킷이 성공적으로 전송될 확률로 확장될 수 있다.

2. 평형 상태 분포

평형 상태 분포를 구하기 위하여, CDMA 슬롯 ALOHA 시스템은 이산 시간 마코프 체인으로 모델링 될 수 있다 [13]. 각 사용자의 상태는 “유휴(idle)” 또는 “백로그(backlogged)”로 표현된다. 전송할 패킷이 없는 경우 “유휴” 상태에 있고, 전송할 패킷이 성공적으로 수신되지 않는 경우 “백로그” 상태에 있다. 백로그 사용자는 새로운 패킷을 발생하지 않는다고 가정한다.

시스템 상태는 백로그 사용자의 수로 N 으로 정의한다. 전체 사용자 수가 m 으로 주어질 때, 상태

공간은 $E = (1, 2, \dots, m)$ 으로 표현된다. 매 슬롯에서 새로운 패킷과 재전송 패킷의 도착 프로세스는 각각 파라미터 λ_n 과 λ_r 을 갖는 Poisson 프로세스를 따른다고 가정한다. λ_r 은 재전송 프로세스에 의해 결정되고, 사용자 당 새로운 패킷 발생 수는 파라미터 λ_n/m 인 Poisson 랜덤 변수이다.

유휴 사용자가 주어진 슬롯에서 새로운 패킷을 전송할 확률을 $q_a = 1 - e^{-\lambda_n/m}$, 백로그 사용자가 주어진 슬롯에서 패킷을 전송할 확률을 q_r 이라 하자. 패킷 전송 후 주어진 접속 슬롯의 끝으로부터 T_A 동안 응답을 받지 못하면, $(0, H)$ 구간에서 균일하게 분포하는 랜덤 지연 후 재전송된다. 분석을 간단하게 하기 위하여 재전송 지연은 기하적으로 분포된다고 가정한다. 이를 위하여 성공적으로 전송될 때까지 각 연속적인 슬롯에서 패킷 재전송 확률 q_r 은 [4]와 같이 $1/(T_A + H/2)$ 인 경우를 고려한다.

일단계 천이 확률 $P_{i,j}$ 는

$$P_{i,j} = \Pr [N(t+1) = j | N(t) = i], \quad i, j \in E \quad (6)$$

로 표현된다. 주어진 슬롯에서 백로그 사용자가 i 일 때, 백로그 상태에 있지 않은 $(m-i)$ 사용자 중 k 사용자가 패킷을 전송할 확률을 $Q_a(k, i)$ 로 정의하고, i 백로그 사용자 중 k 사용자가 패킷을 전송할 확률을 $Q_r(k, i)$ 라 하자.

$$Q_a(k, i) = \binom{m-i}{k} q_a^k (1-q_a)^{m-i-k} \quad (7)$$

$$Q_r(k, i) = \binom{i}{k} q_r^k (1-q_r)^{i-k} \quad (8)$$

식 (5), (7), (8)을 이용하여, 식 (6)의 $P_{i,j}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$P_{i,j} = \begin{cases} 0 & j < i-1 \\ Q_a(0, i) \left\{ \sum_{k=1}^i Q_r(k, i) P_s(k) \right\} & j = i-1 \\ Q_a(j-i+1, i) \left\{ \sum_{k=0}^i Q_r(k, i) \cdot P_s(j-i+1+k) \right\} + Q_r(j-i, i) \cdot \left\{ \sum_{k=0}^i Q_r(k, i) [1 - P_s(j-i+k)] \right\} & j \geq i \end{cases}$$

시스템이 상태 i 에 있을 확률을 π_i 라 정의하고, 시스템의 평형 상태 확률 벡터와 천이 확률 행렬을 각각 $\pi = [\pi_1, \dots, \pi_m]$ 과 $P = [P_{i,j}], i, j \in E$ 라고 정의하자. CDMA 슬롯 ALOHA 마코프 모델의 평

형 상태 확률 분포는 평형 방정식 $\pi = \pi P$ 의 해이고, 정규화 조건 $\sum \pi_i = 1$ 을 만족한다.

3. 고정 확산 이득 제어

고정 확산 이득을 사용할 때, CDMA 슬롯 ALOHA 시스템의 성능을 처리율과 지연으로 나타내도록 한다. 먼저, 시스템 상태의 함수로 처리율을 구하고, 이어서 평균 처리율과 평균 지연을 구한다. 시스템 처리율은 패킷 처리율과 유효 처리율로 구분한다. 시스템 상태 n 에서 패킷 처리율 $S_{G,q}(n)$ [packets/slot]은 확산 이득 G , 재전송 확률 q_r 일 때, 한 슬롯동안 오류 없이 전송된 패킷 수로 정의하고, 유효 처리율 $S_{G,q}^e(n)$ [bits/slot]은 한 패킷에서 오류 없이 전송된 사용자 정보 비트 수로 정의한다.

$$S_{G,q}(n) = \sum_{l=0}^{m-n} \sum_{k=0}^n \binom{m-n}{l} q_a^l (1-q_a)^{m-n-l} \cdot \binom{n}{k} q_r^k (1-q_r)^{n-k} P_s(l+k) \text{ [packets/slot]} \quad (9)$$

$$S_{G,q}^e(n) = \frac{rL}{G} S_{G,q}(n) \text{ [bits/slot]} \quad (10)$$

여기서, rL/G 는 하나의 시간 슬롯에서 전송되는 사용자 정보 비트 수를 나타낸다. 앞 절에서 구한 평형 상태 분포로부터 평균 처리율과 평균 백로그 사용자는 다음과 같이 구해진다.

$$S_{G,q} = \sum_{n=0}^m S_{G,q}(n) \pi_n \text{ [packets/slot]} \quad (11)$$

$$S_{G,q}^e = \sum_{n=0}^m S_{G,q}^e(n) \pi_n \text{ [bits/slot]} \quad (12)$$

$$N_{G,q} = \sum_{n=0}^m n \pi_n \quad (13)$$

평균 지연은 패킷 지연과 비트 지연으로 구분된다. 평균 패킷 지연 $D_{G,q}$ 은 사용자 단말에서 슬롯 ALOHA 채널로 패킷을 전송한 후 패킷이 성공적으로 전송될 때까지의 슬롯 길이로 정의한다. 평균 비트 지연은 패킷내의 한 비트가 성공적으로 전송될 때까지의 슬롯 길이로 정의한다. 식 (11), (12), (13)으로부터 Little의 공식에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$D_{G,q} = N_{G,q} / S_{G,q} \text{ [slots]}$$

$$D_{G,q}^e = N_{G,q} / S_{G,q}^e \text{ [slots]}$$

4. 가변 확산 이득 제어

식 (9)와 (10)은 고정 확산 이득을 사용하는 시스템의 처리율을 나타낸다. 아래에서 시스템 상태에 따른 가변 확산 이득 제어를 사용할 때 시스템 처리율을 구하도록 한다.

그림 4에서 슬롯 ALOHA 채널은 처리율이 최대화되도록 각 슬롯별로 시스템 상태 n 에 따라 서로 다른 확산 이득 $G(n)$ 을 갖도록 제어된다. 중앙국은 각 슬롯에서 백로그 사용자 수를 알고 있다고 가정한다. 백로그 사용자에게 대한 재전송 프로토콜은 시스템 처리율에 중요한 영향을 미치나 여기서는 고려하지 않는다. 재전송 확률 q_r 은 앞 서브절에서와 같이 상수라고 가정한다. 중앙국은 다음 슬롯의 백로그 사용자 수에 따라 처리율이 최대가 되는 최적 확산 이득을 계산하여 매 슬롯의 끝에서 방송하고, 다음 슬롯에서 전송을 시도하는 패킷들은 이 값을 이용하여 확산된다.

가변 확산 이득 제어에서 식 (9)와 (10)의 처리율은 다음과 같이 표현된다.

$$S_{G(n),q}(n) = S_{G,q}(n) \mid_{G=G(n)}$$

$$S_{G(n),q}^e(n) = S_{G,q}^e(n) \mid_{G=G(n)}$$

이들 처리율을 최대로 하는 확산 이득 $G(n)$ 을 최적 확산 이득 G^* 와 G_e^* 로 정의하면,

$$G^* = \max_{G(n)} S_{G(n),q}(n) \quad (14)$$

$$G_e^* = \max_{G(n)} S_{G(n),q}^e(n) \quad (15)$$

최대 패킷 처리율과 최대 유효 처리율은 이들 최적 확산 이득에서의 처리율 $S_{G^*,q}(n)$ 과 $S_{G_e^*,q}^e(n)$ 으로 구해진다.

$g(x)$ 의 최대값을 구하는 문제는 $-g(x)$ 의 최소값을 구하는 문제가 된다 [14].

$$\max\{g(x)\} = \min\{-g(x)\}$$

$-g(x)$ 를 $f(x)$ 라 하고 $f(x)$ 가 구간 $I=[a, b]$ 에서 정의될 때, $f(x_0)=0$ 이고 $f'(x_0)>0$ 이면 $x=x_0$ 에서 지역 최소값을 갖는다.

$G(n)$ 을 x , $-S_{G(n),q}(n)$ 과 $-S_{G(n),q}^e(n)$ 을 x 의 함수 $f(x)$ 와 $f_e(x)$ 라 하자. 본 논문에서 식 (14), (15)의 G^* 와 G_e^* 는 구간 $I=[G_{\min}, G_{\max}]$ 에서 각각 다음 식을 만족하도록, 수치 계산에 의해 구해진다.

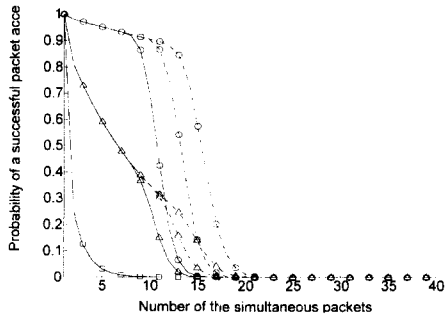
$$f'(G^*)=0 \text{ and } f''(x)>0$$

$$f'_e(G_e^*)=0 \text{ and } f''_e(x)>0$$

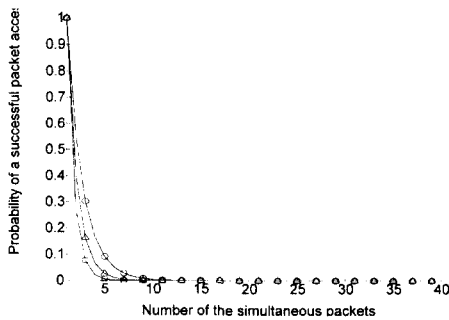
IV. 결과

III에서 언급된 파라미터들은 $m=40$, $L=16320$, $L_b=255$, $T_A=5$, $H=6$ 으로 주어진다. FEC 코드는 (255,123) BCH 코드를 사용하였다. 먼저, 고정 확산 이득의 성능을 구한다.

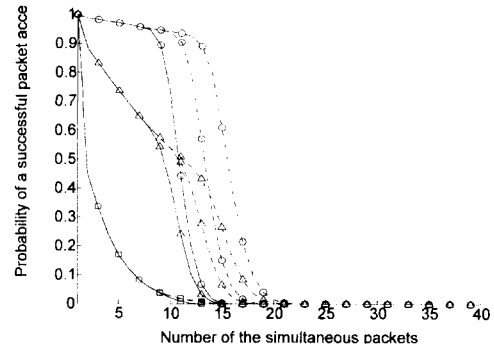
그림 5는 $\lambda_n=0.2$, $G=64$ 로 주어졌을 때, 획득 모델 별로 획득 비와 FEC 코드의 제한 거리 $t=5, 10, 15$ 에 대해서 패킷 접속 성공 확률 $P_s(w)$ 을 동시 접속 패킷 수에 대한 함수로 나타낸 것이다. (a)와 (c)의 기호들은 서로 다른 Q 값을 나타내고 ($\circ : Q=0.01$, $\triangle : Q=0.1$, $\square : Q=0.5$), (b)와 (d)의 기호들은 서로 다른 γ 값을 나타낸다 ($\circ : \gamma=3\text{dB}$, $\triangle : \gamma=6\text{dB}$, $\square : \gamma=9\text{ dB}$). 동일한 t 에서 $P_s(w)$ 는 작은 SAI에서는 패킷 오류 확률이 적으므로 획득 확률에 좌우되지만, SAI 크기가 증가함에 따라 패킷 오류 확률이 증가하면서 급격히 감소한다.



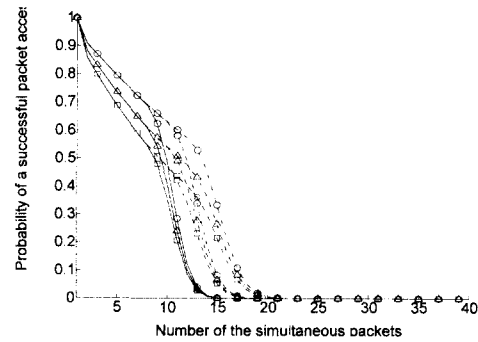
(a) 지연 획득 모델



(b) 전력 획득 모델



(c) 하이브리드 획득 모델 ($\gamma=0.1$)

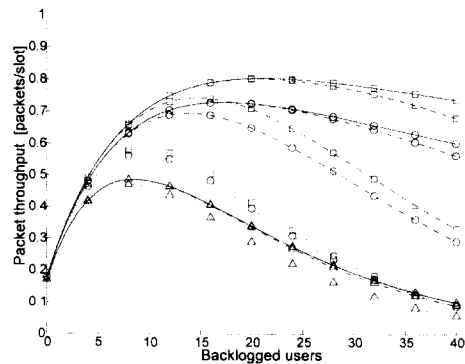


(d) 하이브리드 획득 모델 ($Q=0.1$)

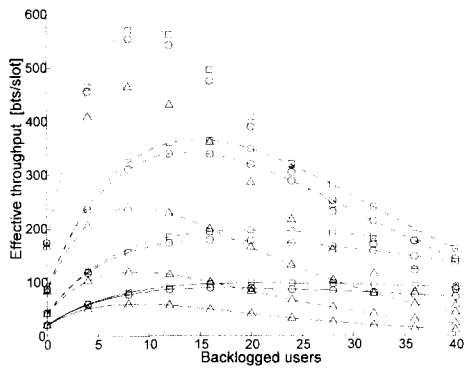
--- : $t=5$, - - - : $t=10$, - · - : $t=15$

그림 5. 패킷 접속 성공 확률

t 가 증가할수록 패킷 전송 성공 확률이 증가하므로 동일한 $P_s(w)$ 를 얻는 SAI 크기가 증가하는 반면 수신기의 복잡도도 증가한다. 전력 획득 모델은 SAI의 증가에 따라 획득 확률이 급격히 낮아지므로, t 에 따른 영향이 거의 없음을 볼 수 있다. 아래에서 시스템 처리율을 평가할 때, $t=15$ 인 FEC 코드를 사용하기로 한다.



(a) 패킷 처리율



(b) 유효 처리율

○ : 모델-1, △ : 모델-2 (SS), □ : 모델-3,
 $Q=0.1, \gamma=6\text{dB}, t=15$
 — : $G=64$, --- : $G=32$, ··· : $G=16$, ···· : $G=8$

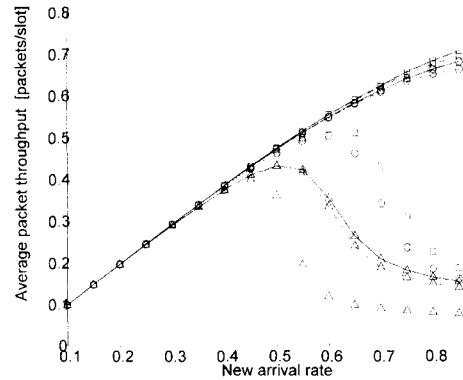
그림 6. 획득 모델들의 처리율.

그림 6은 고정 확산 이득에서, 시스템 상태 n 의 함수로 획득 모델들의 처리율을 비교한 것이다. $\lambda_n=0.2, t=15$ 로 주어지고, 획득 비가 $Q=0.1, \gamma=6\text{ dB}$ 일 때 확산 이득 64, 32, 26, 8에 대해 식 (9)와 (10)에 의한 처리율을 보여준다. 모델-1, 2, 3은 각각 지연, 전력 (SS), 하이브리드 획득 모델을 나타낸다. a_r 이 a_a 보다 상당히 크므로, SAI 크기는 시스템 상태에 비례한다고 가정한다. 동일한 확산 이득에서는 시스템 처리율은 획득 성능을 따르므로, 획득 확률이 가장 높은 하이브리드 획득 모델이 가장 우수한 처리율 성능을 보인다. 동일한 획득 비에서, 패킷 처리율은 확산 이득이 클수록 증가한다. 한편, 유효 처리율은, SAI가 작을 때는 확산 이득이 작을수록 높지만, SAI가 증가함에 따라 패킷 오류 확률 증가로 인하여 확산 이득이 작을 때 더 큰 성능 저하를 겪을 수 있다. 전력 획득 모델은 획득 확률이 가장 낮았듯이 처리율 역시 이 가장 낮은 값을 보인다.

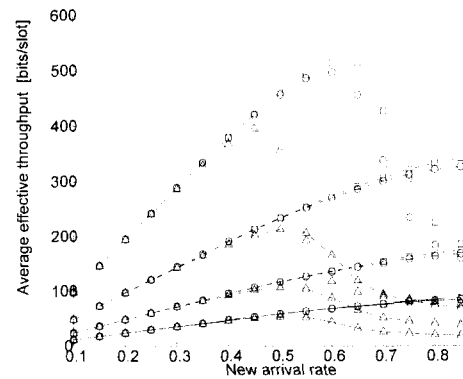
그림 7과 8은 식 (11), (12), (13)에 의해, λ_n 의 함수로 획득 모델들의 평균 처리율과 평균 지연을 나타낸 것으로, 그림 6과 동일한 파라미터들을 사용하였다. 확산 이득이 큰 경우 ($G=64, 32$), 평균 패킷 처리율은 비슷하나 평균 유효 처리율은 확산 이득의 크기에 따라 큰 차이를 보인다. 동일한 획득 비에서, 확산 이득이 감소할수록 패킷 처리율은 감소하나, 높은 비트율로 인해 유효 처리율은 증가하고 비트 지연은 감소하는 경향을 갖는다. 로드가 낮

은 경우 확산 이득이 작을수록 처리율과 지연 성능이 우수하지만, 로드가 증가함에 따라 패킷 오류 확률이 증가하면서 매우 작은 확산 이득 ($G=8$)에서는 시스템 성능이 급격히 저하됨을 볼 수 있다. 전력 획득 모델은 낮은 획득 확률로 평균 처리율 역시 가장 낮은 값을 갖는다. 지연 획득 효과를 사용하는 모델들이 (모델-1, 모델-3) 뛰어난 획득 성능을 기반으로 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

이제까지는 고정 확산 이득을 가질 때, 확산 이득과 획득 비와 SAI 크기가 시스템 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 동일한 확산 이득에서는 모든 SAI에 대해 획득 비가 작을수록 높은 처리율과 낮은 지연을 얻을 수 있다. 동일한 획득 비에서는 SAI 크기에 따라 높은 시스템 성능을 얻을 수 있는 확산 이득 값이 달라진다. 큰 확산 이득에서는 높은 패킷 처리율을 얻는 반면 낮은 유효 처리율을



(a) 평균 패킷 처리율



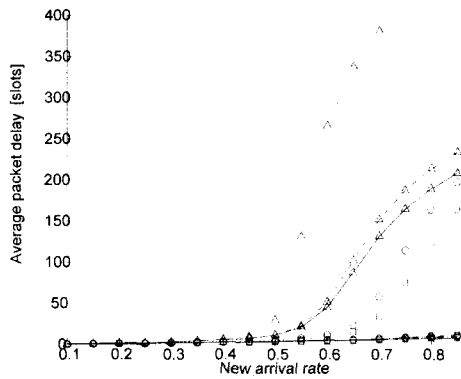
(b) 평균 유효 처리율

○ : $Q=0.01$ △ : $Q=0.1$, □ : $Q=0.05$,
 — : $G=64$, --- : $G=32$, ··· : $G=16$, ···· : $G=8$ $\gamma=8$

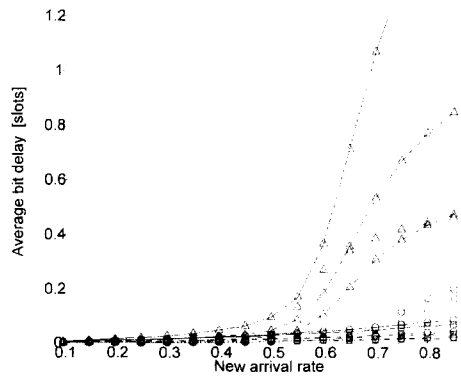
그림 7. 획득 모델들의 평균 처리율 ($Q=0.1, 6\text{dB}, t=15$).

연고, 낮은 패킷 지연을 겪는 대신 높은 비트 지연을 겪는다. SAI가 작을 때는 확산 이득이 낮을수록 우수한 시스템 성능을 보이나, SAI가 증가함에 따라 너무 낮은 확산 이득은 급격한 성능저하를 겪음을 볼 수 있다.

이러한 시스템 성능 특성은 사용자의 트래픽 특성에 따라 시스템 파라미터를 다르게 선택해야 함을 보여준다. 지연 제약이 엄격하지 않은 데이터 트래픽의 경우는 높은 유효 처리율을 얻도록 선택될 수 있다. SAI 크기에 상관없이 높은 유효 처리율 성능을 유지하기 위해서는 SAI 크기의 변화에 따라 확산 이득을 제어할 수 있어야 한다. 아래에서는, 하이브리드 획득 모델을 기반으로 획득 비 Q 와 γ 가 주어졌을 때, 가변 확산 이득 제어가 시스템의 처리율에 미치는 영향을 살펴본다. $G_{min} = 4$ 이고 $G_{max} = 64$ 로 주어진다고 가정한다.



(a) 평균 패킷 지연

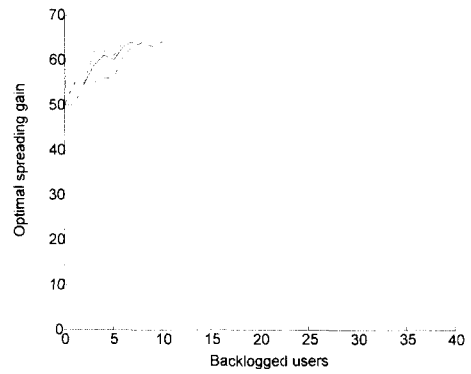


(b) 평균 유효 지연

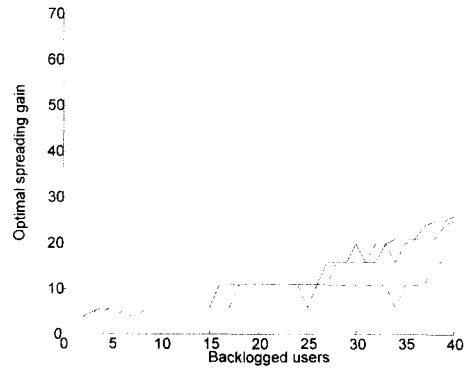
— : $G=64$, --- : $G=32$, - - - : $G=16$, ... : $G=8$

그림 8. 획득 모델들의 평균 지연 ($Q=0.1$, $\gamma=6$ dB, $t=15$).

그림 9는 $L_b=255$, $L=16320$, $t=15$, $\gamma=6$ 일 때, $Q=0.01$, 0.1 , 0.5 에 대해 $S_{G(n),q}(n)$ 과 $S_{G(n),q}^e(n)$ 이 최대가 되는 최적 확산 이득 G^* 와 G_e^* 를 나타낸다. 획득 모델과 FEC 방법이 정해졌을 때, 패킷 처리율에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 확산 이득으로, 확산 이득이 클수록 높은 패킷 처리율을 얻지만 정보 비트율이 감소하므로 유효 정보 비트 수 $\frac{\gamma L}{G(n)}$ 가 작아진다. 따라서 확산 이득 값은 비트 에너지를 유지할 수 있을 만큼 큰 값을 가지면서 동시에 높은 정보 비트율을 유지할 수 있을 만큼 작아야 한다. 최대 패킷 처리율은 큰 확산 이득에서 얻어지고, 최대 유효 처리율을 얻는 확산 이득 G_e^* 는 최대 패킷 처리율을 얻는 확산 이득 G^* 에 비해 훨씬 작은 값을 가짐을 볼 수 있다.



(a) 패킷 처리율의 최적 확산 이득 G^*

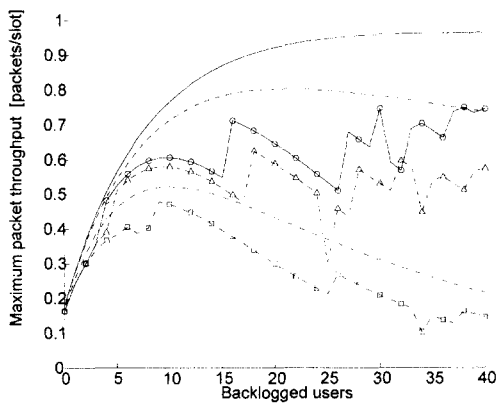


(b) 유효 처리율의 최적 확산 이득 G_e^*

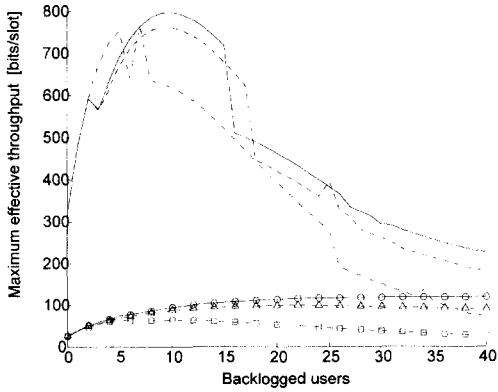
— : $Q=0.01$, --- : $Q=0.1$, - - - : $Q=0.5$

그림 9. 하이브리드 획득 모델의 최적 확산 이득 ($\gamma=6$ dB, $t=15$).

그림 10은 이들 최적 확산 이득에서의 최대 처리율 $S_{G^*,q}(n)$ 과 $S_{G_e^*,q}^e(n)$ 을 보여준다. (a)에서는 최대 패킷 처리율 $S_{G^*,q}(n)$ (기호 없는 선)과 G_e^* 에서의 패킷 처리율 $S_{G_e^*,q}^e(n)$ (기호 있는 선)을 비교하였다. (b)에서는 최대 유효 처리율 $S_{G^*,q}^e(n)$ (기호 없는 선)과 G_e^* 에서의 유효 처리율 $S_{G_e^*,q}^e(n)$ (기호 있는 선)을 비교하였다. 패킷 처리율의 차이보다 유효 처리율의 차이가 훨씬 큼을 볼 수 있다. 특히 n 이 적을 때에는, G_e^* 를 사용하였을 때 패킷 처리율의 성능 저하가 작으면서 훨씬 높은 유효 처리율을 얻을 수 있다.



(a) 최대 패킷 처리율 $S_{G^*,q}(n)$ (기호없음)과 $S_{G_e^*,q}^e(n)$ (기호표시)

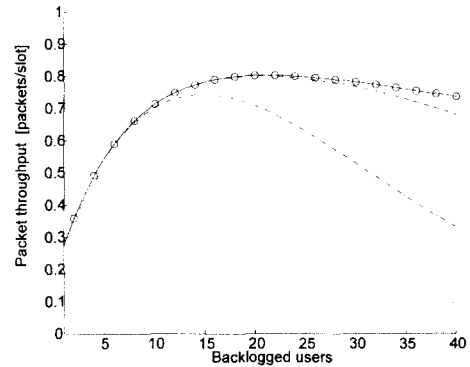


(b) 최대 유효 처리율 $S_{G^*,q}^e(n)$ (기호없음)과 $S_{G_e^*,q}^e(n)$ (기호표시)

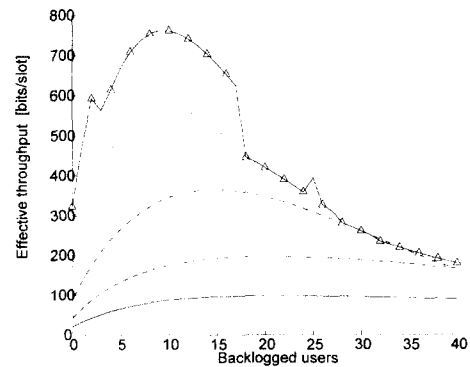
— : $Q=0.01$, --- : $Q=0.1$, - - - : $Q=0.5$

그림 10. 하이브리드 획득 모델의 최대 처리율 ($\gamma=6$ dB, $t=15$)

그림 11은 $Q=0.1$, $\gamma=6$ dB인 하이브리드 획득 모델에서 확산 이득 제어 방법에 따라 시스템 처리율을 비교한 것이다. (a)는 고정 확산 이득 제어일 때 패킷 처리율 $S_{G,q}(n)$ ($G=64, 32, 16, 8$)과 가변 확산 이득 제어일 때 최적 확산 이득 G^* 에서의 최대 패킷 처리율 $S_{G^*,q}(n)$ 을 비교한 것이다. 확산 이득이 클수록 높은 패킷 처리율을 얻고, $G=64$ 일 때의 처리율과 G^* 에서의 처리율이 거의 같음을 볼 수 있다. (b)는 고정 확산 이득 제어의 유효 처리율 $S_{G,q}^e(n)$ ($G=64, 32, 16, 8$)과 최적 확산 이득 G_e^* 에서의 유효 처리율 $S_{G_e^*,q}^e(n)$ 을 비교한 것이다. 고정 확산 이득 제어는 SAI가 변함에 따라 높은 유효 처리율을 유지할 수 없음을 볼 수 있다. 가변 확산 이득 제어는 간섭의 크기에 따라 최적 확산 이득을 구함으로써 SAI 크기에 상관없이 최대 유효 처리율을 유지할 수 있다.



(a) 패킷 처리율 (○ : G^*)



(b) 유효 처리율 (△ : G_e^*)

— : $G=64$, --- : $G=32$, - - - : $G=16$, ... : $G=8$

그림 11. 확산 이득 제어 방법에 따른 처리율 비교 ($Q=0.1$, $\gamma=6$ dB, $t=15$).

V. 결론

저속 전력 제어와 단일 획득 모델에 기반한 CDMA 슬롯 ALOHA 시스템에서, 획득 확률과 확산 이득 제어가 처리율 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 획득 확률에 영향을 미치는 주요 요인은 지연 획득 효과와 작은 획득 비로, 동시 접속 간섭의 크기에 상관없이 지연 획득비가 적을수록 획득 확률은 커지고, 높은 획득 확률은 시스템 처리율을 향상시킨다. 반면에 확산 이득이 시스템 처리율에 미치는 영향은 동시 접속 간섭의 크기와 확산 이득 제어 방법에 따라 다르게 나타난다.

동시 접속 간섭의 크기가 크지 않을 때, 고정 확산 이득 제어는 패킷 처리율과 유효 처리율이 상반되는 성능 특성을 보였다. 가변 확산 제어는 동시 접속 간섭 크기에 따라 확산 이득을 적응시키으로써, 최대 유효 처리율과 높은 패킷 처리율을 동시에 얻을 수 있었다. 동시 접속 간섭의 크기가 큰 경우에도 가변 확산 제어는 최적 확산 이득을 구함으로써, 최대 유효 처리율을 유지할 수 있었다. 이는 패킷 처리율을 감소시키거나 패킷 처리율의 감소보다 큰 유효 처리율 증가를 얻을 수 있었다. 무선 링크의 품질 저하는 다양한 요소에 의해 발생하므로, 데이터 처리율을 향상시키기 위해서는 확산 이득 외에 다른 링크 라미터들도 고려되어야 한다. 확산 이득과 함께 패킷 길이, FEC 코드율 과의 joint 최적화에 대한 연구가 계속 진행되고 있다. 이러한 가변 확산 이득 제어는 서로 다른 서비스 품질(QoS)을 요구하는 멀티미디어 트래픽에 대해서도, QoS 요구 사항과 우선 순위에 따른 적응에 적합한 유연한 다중 접속 제어 방법이 될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] E. S. Sousa and J. A. Silvester, "Spreading code protocols for distributed spread-spectrum packet radio networks," *IEEE Trans. commun.*, vol. 36, no. 3, pp. 272-281, June 1991.
- [2] W. Yue, "The effect of capture on performance of multichannel slotted ALOHA systems," *IEEE Trans. commun.*, vol. 39, no. 6, pp. 818-822, June 1991.
- [3] D. I. Kim and R. A. Scholtz, "On the performance of centralized DS-SS packet radio networks with random spreading code assignment," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 10, pp. 2613-2621, October 1995.
- [4] D. H. Davis and S. A. Gronemeyer, "Performance of slotted ALOHA random access with delay capture and randomized time of arrival," *IEEE Trans. Commun.*, vol. com-28, no. 5, pp. 703-710, May 1980.
- [5] M. Soroushnejad and E. Geraniotis, "Probability of capture and rejection of primary multiple-access interference in spread-spectrum networks," *IEEE Trans. commun.*, vol. 39, no. 6, pp. 986-994, June 1991.
- [6] J. C. Arnbak and W. V. Blitterswijk, "Capacity of slotted ALOHA in Rayleigh-fading channels," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. SAC-5, no. 2, pp. 261-269, February 1987.
- [7] B. Hajek, A. Krishna, and R. O. LaMaire, "On the capture probability for a large number of stations," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 2, pp. 254-260, February 1997.
- [8] K. Cheun and S. Kim, "Joint delay-power capture in spread-spectrum packet radio networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 4, pp. 450-453, April 1998.
- [9] S. Oh and K. M. Wasserman, "Dynamic spreading gain control in multiservice CDMA networks," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 17, no. 5, pp. 918-927, May 1999.
- [10] C. I and K. K. Sabani, "Variable spreading gain CDMA with adaptive control for true packet switching wireless network," in *Proc. IEEE ICC'95*, Seattle WA, vol. 2, pp. 725-730, June 1995.
- [11] J. B. Kim, M. L. Honig, "Resource allocation for multiple classes of DS-SS traffic," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 2, pp. 506-519, March 2000.
- [12] J. S. Lee and L. E. Miller, *CDMA Systems Engineering Handbook*, Artech House, Boston, Mass., 1998.
- [13] D. Bertsekas and R. Gallager, *Data Networks*, 2nd Ed., Prentice Hall, Englewood, NJ, 1992.
- [14] M. S. Bazaraa, H. D. Sherali, and C. M.

