

# IEEE 802.11 시스템에서 경쟁 터미널 수 추정기법 성능분석 (칼만필터 vs. H Infinity Filter)

김 태 진\*, 임 재 찬\*, 홍 대 형<sup>o</sup>

## Performance Comparison in Estimating the Number of Competing Terminals in IEEE 802.11 Networks (Kalman vs. H Infinity Filter)

Taejin Kim\*, Jaechan Lim\*, Daehyoung Hong<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문에서는 IEEE 802.11 시스템에서 경쟁 중인 터미널 수를 추정하고 이를 반영할 때 시스템 성능에 미치는 영향을 분석한다. IEEE 802.11 시스템에서는 터미널간의 다중 접근의 방법으로 DCF (Distributed Coordination Function)를 이용하고 있으며 경쟁하는 터미널 수를 정확하게 추정하여 반영하는 것이 시스템 throughput 증가하는데 중요한 요소가 된다. 본 논문에서는 터미널 수를 추정하는 방법으로 노이즈 정보가 필요하지 않는 Extended H Infinity Filter (EHIF)를 이용하여 터미널 수를 추정하는 방법을 제안한다. 경쟁하는 터미널의 수가 saturated되는 경우와 non-saturated되는 네트워크 환경에서 EHIF가 기존의 Extended Kalman Filter (EKF) 방법보다 좋은 성능을 가짐을 모의실험을 통해 확인하였고 이를 정량적으로 분석하였다.

**Key Words** : IEEE 802.11, WLAN, DCF, Extended Kalman Filter (EKF), Extended H Infinity Filter (EHIF)

### ABSTRACT

In this paper, the effects to system performance are evaluated in IEEE 802.11 system when the number of competing terminals are estimated and reflected to the system. The IEEE 802.11 system uses DCF (Distributed Coordination Function) for the multiple access method, and the system throughput performance depends on the accuracy of the estimated number of competing terminals. We propose extended H infinity filter (EHIF) approach which does not require the noise information for estimating the number of competing terminals. Simulation results show that EHIF outperforms the extended Kalman filter in both saturated and non-saturated network conditions.

### I. 서 론

IEEE 802.11 프로토콜에서는 다중 제어 방법으로 DCF (Distributed Coordination Function)를 이용하여 자원을 공유한다. DCF는 CSMA/CA(Carrier

Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 프로토콜을 이용하여 충돌을 감지하고 있으며, 충돌이 감지된 경우 특정 시간 동안 대기 후 다시 자원 사용을 시도하게 되는데, 이때의 대기 시간을 binary exponential back-off time interval 이라고

※ 본 연구의 일부는 Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011 IEEE 에 발표되었음<sup>1)</sup>.

※ 본 연구는 “7차년도 두뇌한국21사업”, “지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT명품인재양성사업 (C1515-1121-0003)” 및 “2012년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 (2011-0009255)” 지원을 받아 수행된 것임.

♦ 주저자 : 서강대학교 전자 공학과 이동통신 시스템 연구실, taejin7@sogang.ac.kr, 준회원

° 교신저자 : 서강대학교 전자 공학과 이동통신 시스템 연구실, dhong@sogang.ac.kr, 종신회원

\* 포항공과대학교 창의 IT 융합공학과/미래IT 융합연구원, jclim@postech.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2012-10-501, 접수일자 : 2012년 10월 22일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 20일

한다. 다른 터미널과 자원 (채널) 경쟁으로 인한 충돌이 발생한 경우, 터미널은 이를 감지하게 되고 2의 지수 배(binary exponential)로 백 오프 윈도우(back-off window)를 늘린다. 터미널은 늘어난 백 오프 윈도우 이내 임의의 수를 선택하고 대기하여 다른 터미널과의 자원 경쟁 중 충돌 확률을 낮추게 된다<sup>[1]</sup>. DCF를 이용하여 자원을 공유하는 경쟁 터미널의 수를 추정하고 이 정보를 백 오프 윈도우(minimum contention window)에 반영하게 되면 최대 시스템 throughput을 낼 수 있다<sup>[2]</sup>.

DCF 방식은 전송하려는 패킷 페이로드(payload)의 크기에 따라 “Basic Access” 방법과 “Request-To-Send / Clear-To-Send (RTS/CTS)” 방법으로 구분하여 전송 할 수 있다. RTS/CTS 전송 방법은 페이로드(payload) 패킷 전송 전에 수신단과의 협의 후 전송 하는 방식으로 핸드셰이크(handshake)를 통하여 충돌을 회피 할 수 있으며 패킷의 크기가 RTS/CTS 한계치(threshold) 보다 클 경우 유리한 방법이다. 경쟁하는 터미널의 수를 추정 한 뒤 이를 RTS/CTS 한계치에 반영 하면 시스템 처리량(throughput)을 최대로 할 수 있다<sup>[3]</sup>.

경쟁 하는 터미널의 수를 추정하는 방법으로 [4]에서는 Extended Kalman Filter (EKF)를 사용하였다. 해당 연구에서는 상태 노이즈(state noise) 정보를 가변적으로 적용 하는 방법을 사용하였는데, 경쟁하는 터미널의 수의 변화가 클 경우 상태 노이즈의 분산(state noise variance)이 큰 값으로 적용하여 변화를 빠르게 추정하도록 하였으며, 변화가 작을 경우 작은 값의 상태 노이즈 분산을 적용하여 추정하는 값의 정확도를 높였다. 참고 문헌 [6]의 연구에서는 파티클 필터(particle filter - sequential monte carlo method)를 이용하여 IEEE 802.11 프로토콜의 경쟁하는 터미널의 수를 추정하였다. 파티클 필터는 예측적 샘플(particle)을 통하여 필요한 PDF(Probability Density Function)를 추정 하는 방법으로 파티클의 수가 많을수록 대체로 좋은 성능을 가진다. non-linear / non-gaussian 환경에서 좋은 성능을 보이는 파티클 필터의 특성을 이용하여 EKF 보다 정확하게 터미널 수를 추정하였다. 참고 문헌 [7]의 연구에서는 Gaussian Mixture Sigma Point Particle Filter (GMSPPF)를 적용하여 터미널 수를 추정하였다. 이 방법은 UKF (Unscented Kalman Filter) based gaussian sum filter의 방법과 파티클 필터 방법을 동시에 적용 한 방법으로 가우시안 믹스처(gaussian mixture) 모델을 이용하여 기

존의 파티클 필터의 성능보다 좋은 결과를 확인 하였다. 파티클 필터는 EKF 에 비해서 대체로 성능이 뛰어나나 계산 복잡도가 크다는 단점이 있다. 참고 문헌 [8]에서는 경쟁 터미널수를 추정하지 않고 충돌 발생 시 최대 윈도우를 적용하고 충돌하지 않을 경우 윈도우를 반으로 줄이는 방법을 사용하여 시스템 성능을 높이는 방법을 연구하였다. 하지만 이 방법은 수식적으로 증명한 성능분석<sup>[3]</sup>에 기반을 두고 있지 않는 방법이기 에 최적(Optimal) 성능을 만족하기 어렵다.

본 논문에서는 Kalman filter 와는 달리 노이즈 정보가 필요하지 않는 Extended H Infinity Filter (EHIF)<sup>[5]</sup>를 이용하여 IEEE 802.11 프로토콜에서의 경쟁 중인 터미널 수를 추정하는 방법을 제안하여 EKF 과의 성능을 면밀히 비교분석한다. 또한 기존 연구 [5]에서는 확인하지 않은 필터 성능에 따른 처리량(Throughput)의 관계성과 성능차이가 발생하는 이유에 대해서 확인한다. EHIF는 최악의 상황(worst case)에 대한 에러를 최소화하기 위한 목적으로 개발된 필터이기 때문에 경쟁 터미널의 수가 급격하게 변화 하는 구간에 대해 매우 뛰어난 성능을 가지고 있다. 또한 계산 복잡도가 낮아서 이동 디바이스에서의 적용 또한 유리하다. 모의실험을 통하여 경쟁하는 터미널의 수가 saturated 되는 경우와 non-saturated 되는 네트워크 환경 모두에서 EHIF가 EKF 보다 나은 성능을 가짐을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성 된다. 첫째 IEEE 802.11에서 경쟁하는 터미널의 수와 터미널 간의 충돌 확률에 대한 관계를 설명한다. 그리고 터미널 수를 추정하기 위한 동적 시스템 모델에 대해 정의한다. 둘째, 기존 기법인 EKF와 제안하는 EHIF에 대하여 설명하고 각각의 특징을 비교 분석한다. 셋째, 모의실험을 통하여 MSE (Mean Square Error) 및 시스템 처리량(throughput)에 대한 성능을 비교 분석한다. 넷째, 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

### 2.1. 경쟁 터수와 충돌 확률과의 관계

IEEE 802.11 System을 사용하는 터미널의 수가 고정되며, 각각의 터미널이 전송하는 패킷의 형태가 지연 없이 연속적으로 전달하는 상태(full-buffer)일 경우를 saturated 네트워크 환경이라고 한다. 이 때 경쟁하는 터미널의 수  $n$ 과 DCF를 통한 경쟁 시 충돌 확률  $p$ 은 아래의 수식으로 표현된다<sup>[3]</sup>.

$$n = f(p) = 1 + \frac{\log(1-p)}{\log\left(1 - \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)}\right)} \quad (1)$$

여기서  $W$ 는 백 오프 윈도우(back-off window)의 최소값으로  $CW_{min}$ 의 의미이다. 터미널이 자원을 획득하기 위하여 경쟁 중 충돌을 감지하게 되면 백 오프 윈도우 크기 안에서 임의의 값을 취하여 대기하게 된다. 만약 다음 시도에서도 충돌을 감지하게 되면 윈도우 값을 2배 늘린 후 대기 시간을 임의로 선택한다. 백 오프 윈도우의 최댓값을  $CW_{max}$ 라고 하며 다음과 같은 관계로 표현된다.

$$m = \log_2(CW_{max}/CW_{min}) \quad (2)$$

수식 (2)에서  $m$ 을 최대 백 오프 단계(maximum back-off stage)라고 하며, 충돌이 발생할 때 윈도우 값을 늘릴 수 있는 최대 크기를 의미한다. 수식 (1)은 채널 상황이 이상적일 경우를 가정하는데, 전송하는 패킷의 크기와 상관없이 터미널간의 충돌 확률을 가지고 터미널 수를 구하는 것이 가능함을 알 수 있다. 수식 (1)은 충돌 확률  $p$ 가 증가 할수록 경쟁 터미널의 수  $n$ 이 증가 하는 단조 증가 함수 이므로 그 역함수(수식 (3))가 존재한다. 하지만 해당 수식은 정확한 수식으로 표현하는 데에는 어려움이 있다. 이럴 경우 수치적인 방법을 통해 역함수에 대한 해를 근사값으로 계산할 수 있으며, 본 논문에서는 MATLAB의 fsolve 함수를 이용하여 역함수에 대한 해를 구하였다.

$$p = f^{-1}(n) = h(n) \quad (3)$$

다음에서는 충돌 확률  $p$ 를 구하는 방법에 대해서 알아본다. 충돌 확률  $p$ 는 하나의 단말 입장에서 관측을 통해서 구하는 값으로 특정 주기의 관찰 슬롯과 충돌 슬롯의 비율로 표현 할 수 있다. 수식 (4)

는  $k$ 번째 관찰한 충돌 확률  $p_k$ 에 대한 정의이다<sup>4,9)</sup>.

$$p_k = \frac{1}{B} \sum_{i=(k-1)B}^{kB-1} C_i \quad (4)$$

수식 (4)에서의  $B$ 는 관찰 슬롯의 크기(observation slots)이고,  $C_i$ 는  $i$ 번째 슬롯의 충돌 정보이다.  $C_i$  이 0일 경우는 해당 슬롯이 사용되지 않거나(idle) 전송이 성공일 때를 의미하며 1일 경우는 슬롯이 사용 되거나(busy) 충돌로 인해 전송이 실패 할 경우를 의미한다. 그림 1은 슬롯 시간의 모델과 실제 시간에 대한 관계를 설명해 주는 그림이다<sup>9)</sup>. 터미널의 데이터 패킷과 ACK 패킷으로 구성 되는 성공적인 전송 슬롯은 실제 시간상에서 긴 슬롯들로 이루어져 있지만, 실제 모델 시간에서는 단 하나의 슬롯으로 표현된다. 마찬가지로 다른 터미널이 전송하게 되는 사용된(busy) 구간이나 충돌이 발생한 구간도 실제시간은 여러 개의 슬롯으로 구성되어 있으나 모델 시간대에서는 단 하나의 슬롯으로 표현된다.

전송하는 데이터 패킷(data packet)의 길이가 커지게 되거나 충돌이 빈번하게 발생하게 되면 실제 시간(actual time)에서의 관찰 시점 주기가 길어지게 된다. 또한 관찰 슬롯  $B$ 의 크기가 커지면 관측 오류에 대한 분산이 작아지게 되지만, 관찰 주기가 늘어나게 되어 변화에 대한 민감도가 떨어지게 된다.

$$\Pr(p_k = \frac{b}{B}) = \binom{B}{b} p^b (1-p)^{B-b} \quad b \in (0, B) \quad (5)$$

이와 같은 방법으로 측정된  $p_k$ 는 수식 (5)와 같이 이항 분포(binomial distribution)를 따르고 있으며, 그 분산은  $p(1-p)/B$ 이다. 관찰 구간  $B$ 가 커질수록 분산 값이 작아지게 되므로 에러가 작아진다.

## 2.2. 동적 시스템 모델 (Dynamic System Model)

IEEE 802.11 프로토콜을 사용하는 경쟁 터미널의 수를 기존 기법인 EKF나 제안 기법인 EHIF 필터를 사용하여 추정하려면 이산 시간에 대한 동적 시스템 모델이 필요하다. 또한 각 시간에서의 상태 벡터는 이전 시간의 벡터들에 대해서만 관계되는 마르코프 연쇄 (Markov chain) 성질을 만족한다는 가정도 필요하다. 경쟁 터미널의 수를 시스템의 상태로 정의 하는 상태 업데이트 모델(state update

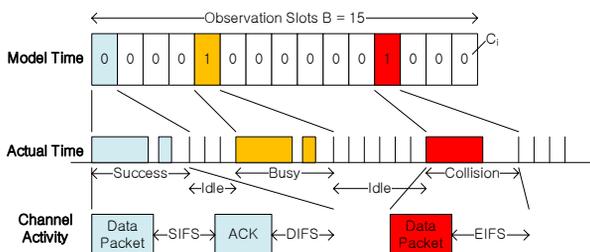


그림 1. 모델 시간과 실제 시간과의 관계  
Fig. 1. Model Time versus Actual Time

model)은 다음과 같이 표현된다<sup>[4]</sup>.

$$n_k = n_{k-1} + w_k \quad (6)$$

수식 (6)에서  $n_k$ 는 k 시점에서의 경쟁 터미널의 수이고  $w_k$ 는 상태 노이즈(state noise)으로써 확률 변수(random variable)이다. 상태 노이즈  $w_k$ 의 평균은 0이고, 분산은  $Var[w_k] = Q_k$ 로 정의 한다. 측정 모델(measurement model)은 수식 (7)과 같다. k번째 관측한 충돌 확률  $p_k$ 는 수식 (1)의 역함수를 통해 계산된 값에 관측 노이즈(measurement noise)인  $v_k$ 를 더해서 구할 수 있다.  $v_k$ 는 이항 확률 변수(binomial random variable)로 평균이 0이며 분산은 수식 (8)이다<sup>[4]</sup>.

$$p_k = f^{-1}(n_k) + v_k = h(n_k) + v_k \quad (7)$$

$$Var[v_k] = \frac{h(n_k)[1-h(n_k)]}{B} \quad (8)$$

경쟁 중인 터미널 수를 추정하기 위해서는 이와 같은 동적 시스템 모델이 정의 되어 있어야 하며, 상태 정보와 관측 정보의 간의 관계를 정의 할 수 있는 수식 (1)과 같은 내용도 필요 하다.

### III. 추정 기법들

다음에서는 위에서 가정 및 정의한 동적 시스템 모델 기반 위에서 Extended Kalman Filter (EKF)와 Extended H Infinity Filter (EHIF)를 이용하여 터미널 수를 추정하는 방법에 대해서 알아본다.

#### 3.1. Extended Kalman Filter

Kalman filter는 특정 시점의 상태와 다음 시점의 상태간의 관계가 선형적인 관계가 있고, 상태 노이즈(state noise)와 관측 노이즈(measurement noise)가 가우시안 분포를 따르는 가정을 만족 할 경우 가장 최적의 성능을 내는 필터이다. extended Kalman filter는 모델의 선형성의 가정을 완화 시켜 비선형 시스템에서도 적용이 가능하게 한 필터이다. EKF 알고리즘은 표 1과 같으며, 매 관측 시점마다 상태  $\hat{n}_k$ 에 대한 추정과 에러 분산  $P_k$ 를 갱신한다<sup>[4]</sup>.

EKF에서는 노이즈 정보가 필요하다. [4]에서는 관측 노이즈 (measurement noise) 정보에 수식 (8)을 적용하였고 상태 노이즈에 대한 분산 정보  $Q_k$ 는

표 1. EKF 알고리즘  
Table 1. EKF Algorithm

Initialization of the estimate $\hat{n}_0$ , the error variance $P_0$
1) Compute sensitivity of the measurement $h_k = \left. \frac{\partial h(n)}{\partial n} \right _{n=\hat{n}_{k-1}}$
2) Compute the variance of observation noise $R_k = \frac{h(\hat{n}_{k-1})(1-h(\hat{n}_{k-1}))}{B}$
3) Compute the Kalman gain $K_k = \frac{(P_{k-1} + Q_k)h_k}{(P_{k-1} + Q_k)h_k^2 + R_k}$
4) Compute the innovation from the measurement $z_k = p_k - h(\hat{n}_{k-1})$
5) Update the estimate $\hat{n}_k = \hat{n}_{k-1} + K_k z_k$
6) Update the error variance $P_k = (1 - K_k h_k)(P_{k-1} + Q_k)$

상황에 따라 다른 값으로 적용하였다. 그림 2와 같이  $Q_k$ 가 0.01로 작으면 정확도는 좋아지지만 변화를 따라가는데 많은 시간이 걸린다. 반면  $Q_k$ 가 1로 클 경우에는 정확도는 떨어지나 짧은 시간에 변화를 따라가는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징을 이용하여 관측된 값의 변화량이 클 경우 (alarm condition) 분산 값으로 큰 값( $Q_k = 5$ )을 적용하고, 관측 값의 변화량이 적을 경우 작은 값( $Q_k = 0$ )을 적용한다. 변화량의 크기를 감지하는 필터(change detection filter)로 [4]에서는 CUSUM (Cumulative SUMmary) 방법을 사용하였다.

CUSUM 알고리즘은 표 2와 같다. CUSUM을

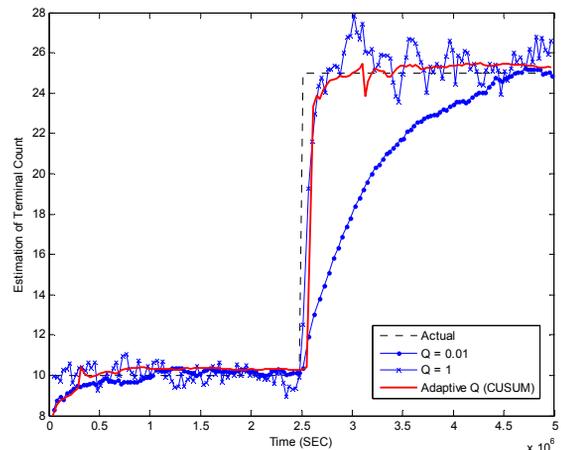


그림 2. 상태 노이즈의 분산에 따른 터미널 수 추정  
Fig. 2. Estimation of Terminal Count varying the variance of the state noise

표 2. CUSUM 알고리즘  
Table 2. CUSUM Algorithm

<p>1) Compute the innovation process</p> $s_k = \frac{z_k}{\sqrt{(P_{k-1} + Q_k)h_k^2 + R_k}}$ <p>2) Compute the filtered innovation process</p> $g_k^+ = \max(0, g_{k-1}^+ + s_k - v)$ $g_k^- = \max(0, g_{k-1}^- - s_k + v)$ <p>3) Check Alarm Condition</p> $g_k^+ > h \text{ or } g_k^- > -h$ <p>4) Apply <math>Q_k</math></p> $\begin{cases} Q_k = 5 & \text{if Alarm Condition is true} \\ Q_k = 0 & \text{if Alarm Condition is false} \end{cases}$
--

사용하기 위해서는 내부적으로 사용되는 변화 파라메타 (drift parameter)  $v$ , 알람 임계치 (alarm threshold)  $h$ 가 필요하다. 이 파라메타를 통해 변화를 감지하는 민감도가 달라진다. [4]에서는 해당 파라메타를  $v = 0.5, h = 10$ 로 설정하였다. 또한 변화를 감지하기 위해 누적된 판단 기준 값( $g_k^+, g_k^-$ )을 사용하고 있는데, 이는 급격한 변화를 감지하기 위해서는 어느 정도의 학습 시간이 필요함을 의미한다. CUSUM 방법을 EKF에 적용 할 경우 그림 2와 같이 경쟁 터미널의 수가 일정 할 경우 작은  $Q_k = 0$ 를 적용하여 실제 값과 차이가 없이 정확도를 높였고, 터미널 수가 10개에서 25개로 급격하게 늘어나는 25초 구간에서는 큰  $Q_k = 5$ 값을 적용하여 변화를 빠르게 따라갔다.

### 3.2. 제안기법 - Extended H Infinity Filter

extended Kalman filter의 경우 노이즈의 통계적인 특성을 알고 있어야 하며 노이즈의 평균 또한 0이 되어야 하는 전제가 필요하다. 이러한 전제 조건은 일반적인 상황에서 EKF를 적용하는데 있어 제한 조건이 될 수 있다. 또한 EKF는 에러에 대한 MSE(mean square error)를 최소화 하는데 그 목적을 두고 있다<sup>[10]</sup>.

extended H infinity filter는 노이즈가 특정 범위 안에 들어 갈 경우 노이즈 정보가 필요 없는 필터로써 EKF보다 일반적인 상황에 적합한 필터이다. 왜냐하면 일반적으로 정확한 노이즈 특성을 알 수 있는 조건은 많지가 않기 때문이다. EHIF의 목적은 가장 최악의 조건(worst case)에서의 추정 에러를 최소화 하는데 그 목적을 두고 있다. 때문에 EHIF는 미니맥스(minimax) 필터로도 불린다. EHIF는

표 3. EHIF 알고리즘  
Table 3. EHIF Algorithm

<p>Initialize the performance bound <math>\gamma</math>, the initial estimate <math>\hat{n}_0</math>, and the initial weight parameters <math>P_0, \chi_k, W_k, V_k</math></p> <p>1) Compute</p> $S_k = \frac{1}{1 - \gamma \chi_k P_{k-1} + [h'(n_{k-1})]^2 P_{k-1} V_k^{-1}}$ <p>where <math>h'(n_{k-1}) = \left. \frac{\partial h(n)}{\partial n} \right _{n = \hat{n}_{k-1}}</math></p> <p>2) Compute H infinity gain</p> $H_k = P_{k-1} S_k h'(n_{k-1}) V_k^{-1}$ <p>3) Update the estimate</p> $\hat{n}_k = \hat{n}_{k-1} + H_k [p_k - h(\hat{n}_{k-1})]$ <p>4) Update the error variance</p> $P_k = P_{k-1} S_k + W_k$
---

아래와 같은 미니맥스(minimax) 최적화 문제의 해로 표현된다.

$$\min_{\hat{n}_k} \left( \max_{w_k, v_k, n_k} J \right) \quad (9)$$

수식 (9)에서  $J$ 는 비용 함수(cost function)로 추정 결과가 얼마나 정확한 지에 대한 값으로 값이 클수록 에러가 큰 경우를 의미한다. 수식 (10)은  $J$ 의 정의이다. 수식 (10)에서  $\chi_k, W_k, V_k, P_0$ 는 가중치 파라메타(weight parameter)로 비용(cost)을 구하기 위한 가중치이고  $N$ 은 전체 타임 스텝(time step) 수를 의미한다. 가중치 파라메타는 적용할 시스템 모델의 특성에 따라 달라지며 트레이닝(training)을 통해 최적의 값을 찾을 수 있다.

$$J = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \chi_k (n_k - \hat{n}_k)^2}{\frac{(n_0 - \hat{n}_0)^2}{P_0} + \sum_{k=0}^{N-1} \left( \frac{w_k^2}{W_k} + \frac{v_k^2}{V_k} \right)} \quad (10)$$

수식 (9)의 최적화 문제를 풀려면 수식 (11)의 가정이 있어야 미니맥스(minimax) 최적화 문제를 풀 수 있다<sup>[10]</sup>. 수식 (11)에서 적용되는 성능 경계(performance bound) 값  $\gamma$  은 다른 가중치 파라메타와 같이 EHIF에서 필요한 중요 파라메타이다.

$$\sup J < \gamma^{-1} \quad (11)$$

수식 (9),(10),(11)를 이용하여 최적화 해를 구하

표 4. 패킷 규격 및 파라미터  
Table 4. Packet Format and Parameter Values

Channel Bit Rate	1 Mbit/s
PHY header	128 bits
MAC header	272 bits
ACK length	112 bits + PHY header
Payload length	2048 bits
SIFS	28us
DIFS	130us
ACK_Timeout	300us

면 표 3과 같은 EHIF 알고리즘을 구할 수 있다. 표 3의 알고리즘에서 확인 할 수 있듯이 EKF와 유사하게 테일러 시리즈(taylor series)를 이용하여 선형 근사화한 관측 수식 ( $h'(n_{k-1})$ )을 사용하고 있다.

일반적인 IEEE 802.11 환경에서는 경쟁 터미널 수인 상태(state)가 급격하게 변할 경우가 많고 이를 노이즈 특성으로 표현하기에 어려움이 있다. 상태 노이즈의 특성을 알 수 없는 이와 같은 환경에서는 EHIF가 노이즈 정보가 필요한 다른 필터 보다 유리한 필터이다. EHIF를 경쟁 터미널 수의 추정 필터로 사용 할 경우, 사용자가 급격하게 변화 하게 되면 비용(cost)가 커지게 될 것이고 이는 최악의 상황(worst case) 즉,  $J$ 가 최대가 되는 상황이다. EHIF는 이 상황에서 에러를 가장 최소화 하는 필터이다. EKF에서는 급격한 변화를 감지하기 위해 CUSUM을 사용하지만 이 알고리즘은 시간을 통해 누적된 값이 필요하기 때문에 반응이 EHIF보다 느리다.

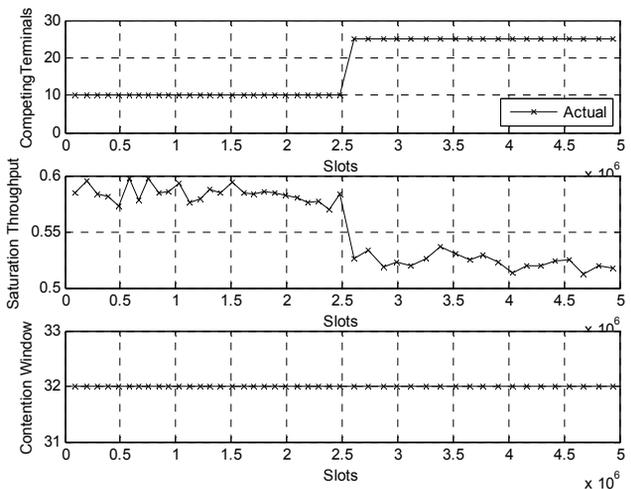
필터의 계산 복잡 도를 참고 문헌 [7]의 방법에 따라 Big O notation로 표현하면 두 방법 모두  $O(1)$ 으로 고정된 연산시간을 가진다. 하지만 EKF는 가변적인 상태 노이즈 분산을 적용하기 위해 CUSUM 알고리즘을 추가로 사용하므로 EHIF 보다 계산 양이 조금 늘어나게 된다. 터미널이 배터리를 사용하는 이동 디바이스 일 경우 연산 량이 작으면 작을수록 유리하다. 이러한 관점에서 볼 때 EHIF는 EKF보다 유리한 필터라고 할 수 있다.

#### IV. 성능 분석

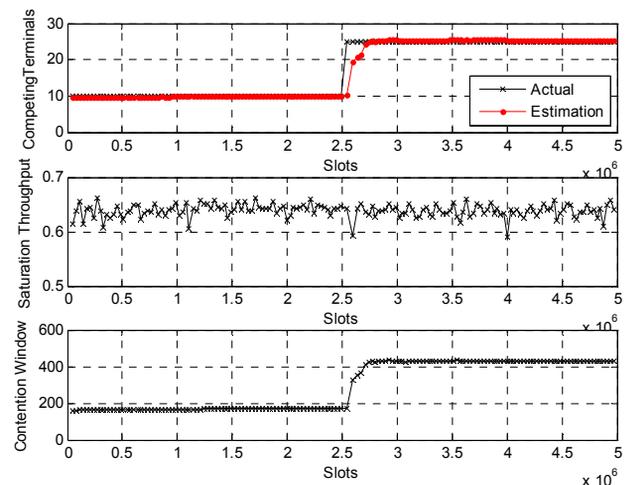
다음에서는 모의실험을 구성하여 IEEE 802.11의 터미널 수를 추정하고 시스템에 반영하여 EKF와 EHIF 필터의 성능을 분석한다. 모든 실험은 MATLAB 7.11.0 을 이용하였으며, [1]의 규격 내

용대로 각 터미널들을 구성하였다. 모의실험에서 가정한 IEEE 802.11 PHY는 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum)로 슬롯 타임(slot time)은 20us 이며,  $CW_{min}$  과  $CW_{max}$  는 각각 32와 1024 이다. 그 밖의 다른 중요 파라메타는 표 4를 기준으로 설정 하였다<sup>4)</sup>. 또한 관찰 슬롯 (observation slots) B 는 2000으로 설정하였고 초기 추정 터미널 수는  $\hat{n}_0 = 5$ , 초기 에러 분산  $P_0 = 10$  으로 EKF, EHIF 모두 동일하게 설정하였다.

EKF 실험 시 사용되는 CUSUM 알고리즘에 필요한 파라메타는 [4]와 동일하게  $v=0.5$   $h=10$ 으로



(a) Fixed Contention Window Case



(b) Estimate(EKF) Applied Contention Window Case

그림 3. CWmin 과 Saturation Throughput 과의 관계  
Fig. 3. CWmin versus Saturation Throughput

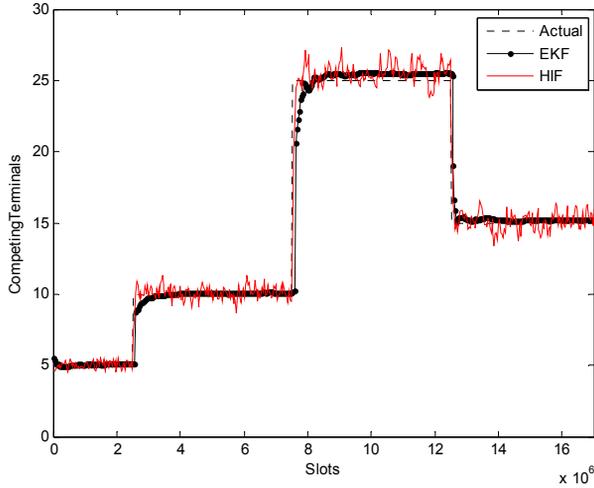
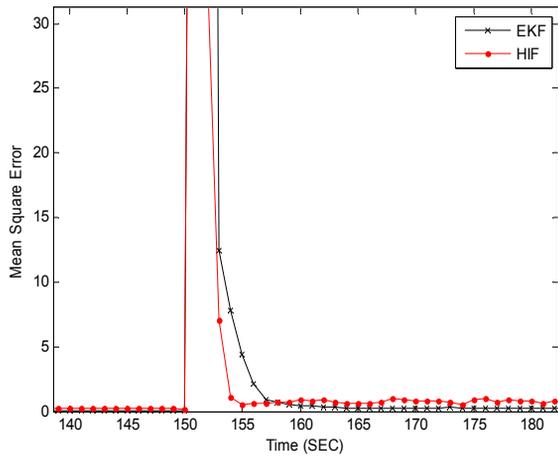
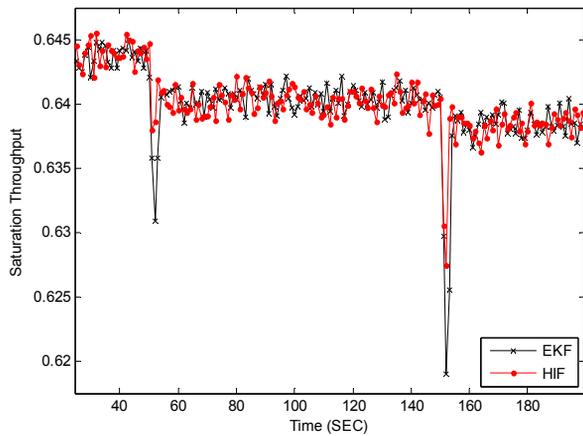


그림 4. Saturated 환경에서의 EKF 와 EHIF의 추정  
Fig. 4. EKF & EHIF estimation in saturated network conditions



(a) Mean Square Error



(b) Saturation Throughput

그림 5. Saturated 네트워크 환경에서의 성능 결과  
Fig. 5. Results of Saturated Network Conditions

설정하였고, 알람(alarm) 조건에서 사용하는  $Q$ 는 5로, 비 알람(non alarm) 조건에서 필요한  $Q$ 는 0으로 설정하였다. EHIF를 위한 설정 파라메타는  $\gamma=0.001, \chi_k=1, W_k=2, V_k=0.0001$ 로 설정하였으며 해당 파라메타는 트레이닝(training)을 통하여 찾은 값이다. 트레이닝(training)은 모델링한 환경에서 MSE가 가장 작은 최적의 경우에 대한 파라메타를 찾는 과정으로 반복 실험을 통해서 이루어진다.  $\chi_k$ 의 경우는 1로 가정하여 진행 하였으며  $W_k$  파라메타의 경우 값이 클수록 실제 값의 변화를 빠르게 찾아가지만 오차는 커진다.  $\gamma, V_k$  파라메타의 경우 값이 너무 클 경우 추정 값이 발산하는 특징을 가지고 있다.

#### 4.1. Saturation Throughput

포화 처리량(saturation throughput)은 관찰 슬롯 수 대비 모든 터미널의 성공한 payload 슬롯 수의 비율을 의미한다. 이는 전체 채널 자원의 사용률로 볼 수 있다<sup>[11]</sup>. 포화 처리량 (saturation throughput)을 최대화하기 위해서는 경쟁하는 터미널 수를 추정하여 식 (12)과 같이 백 오프 윈도우 최솟값  $CW_{min}$ 에 반영하면 된다<sup>[2]</sup>. 식 (12)의  $\bar{n}$ 은 추정된 경쟁 터미널의 수이며,  $T$ 는 전체 패킷 전송 시간 (Header, SIFS, ACK, DIFS 포함)이다.

$$CW_{min} = \bar{n} \sqrt{2T} \quad (12)$$

백 오프 윈도우의 최솟값  $CW_{min}$ 과 포화 처리량 (saturation throughput)과의 관계를 확인하기 위해 그림 3과 같은 실험을 진행하였다. 시간에 따른 처리량(throughput) 편차를 줄이고 짧은 시간 동안에 성능 차이를 쉽게 관찰하기 위해서 패이로드 (payload) 크기를 2048bits로 적용하였다. 이로 인해 포화 처리량(saturation throughput)은 8184bits인 경우보다 줄어들지만, 필터간의 성능 차이는 쉽게 관찰할 수 있다.

그림 3의 (a)에서는  $CW_{min}$ 을 [1]에서 정의 하는 값 32로 고정하여 실험하였고, (b)에서는 터미널 수를 EKF로 추정하고 그 결과를  $CW_{min}$ 에 반영하였다. (a)에서는 터미널 수가 10명에서 25명으로 증가할 경우 처리량(throughput)이 떨어지나 (b)의 경우에는 터미널 수가 변동 하여도 포화 처리량 (saturation throughput)은 떨어지지 않는다. (a)의 경우 터미널 수가 증가할 때 충돌 확률은 증가 한

표 5. Saturated 환경에서의 결과  
Table 5. Results of Saturated Network Conditions

(a) Mean Square Error

	MSE	Variance
EKF	1.492829	0.055072
EHIF	0.915706	0.022531

(b) Saturation Throughput (150sec~160sec)

	Saturation Throughput	Variance ( $10^{-5}$ )
EKF	0.634940	4.891635
EHIF	0.637085	1.711364

다. 이때  $CW_{min}$ 이 작은 값에 고정 되므로 터미널마다 재전송을 통해 백 오프 윈도우를 늘려가는 과정을 거치므로 성능이 떨어진다. 반면 (b)의 경우에는 백 오프 윈도우를 늘려가는 과정이 생략되므로 포화 처리량(saturation throughput)이 떨어지는 현상은 관찰되지 않는다.

#### 4.2. Saturated 네트워크 환경에서의 성능

모든 터미널이 연속적으로 패킷을 전송하는 상황을 saturated 네트워크 환경이라고 한다. 패킷 전송 간의 지연이 없게 되므로, 경쟁하는 터미널 수가 일정하다고 가정하면, 관찰되는 충돌 확률의 평균은 특정한 값으로 수렴하게 될 것이다. saturated 네트워크 환경에서의 실험은 일정시간이 지나면 경쟁하는 터미널의 수가 변하는 시나리오를 적용하였다. 초기 경쟁자는 5명, 50초 후에는 10명, 150초에는 25명, 250초에는 15명이 경쟁하는 시나리오를 가정하였다.

그림 4의 결과에서 EKF의 경우 터미널 수가 일정한 경우 추정 값은 변동 없이 일정한 값을 유지한다. 반면 EHIF의 경우 평균값을 기준으로 출렁임(fluctuation)이 EKF보다 큼을 관찰 할 수 있다. EKF의 경우 변화 감지를 하지 않는 경우 상태 노이즈 분산  $Q_k$ 를 0으로 설정하기 때문이며, 노이즈 정보가 포함되지 않은 EHIF의 경우 관측에서의 오차 그대로 반영되어 있기 때문에 출렁임이 관찰된다. 반면 터미널 수가 급격하게 변하는 구간에서는 EHIF가 EKF보다 월등하지는 않지만 빠르게 터미널 수를 추정하는 경향이 있다. 이는 EKF에서 사용하는 CUSUM 알고리즘이 변화를 감지하기 위한 시간이 필요하기 때문이다.

EKF와 EHIF의 성능 차이를 정교하게 분석하기 위하여 그림 4의 실험을 100회 수행 한 뒤 각 실

표 6. Non-Saturated 환경에서의 결과  
Table 6. Results of Non-Saturated Network Condition

(a) Mean Square Error

	MSE	Variance
EKF	4.363303	0.792361
EHIF	1.528985	0.110101

(b) Saturation Throughput

	Saturation Throughput	Variance ( $10^{-7}$ )
EKF	0.639690	8.408113
EHIF	0.640418	7.325334

험의 결과를 매 초마다의 평균을 내어 확인하였다. 실제 관측 주기인 타임 스텝(time step)은 1초보다 작은 값으로 이 주기가 짧아지면 정확도가 떨어지지만 실제 값을 빨리 따라가게 되며, 관측 주기가 길어지면 정확도는 좋아지지만 추정 값을 느리게 따라간다.

그림 5의 (a)는 150초 근처 구간에 대한 MSE 결과이다. EHIF가 실제 값을 추정하는데 걸리는 시간이 EKF 보다 짧음을 확인 할 수 있다. 반면 경쟁 터미널의 수가 일정한 구간에 대해서는 EKF의 MSE가 작지만 이 구간에 대한 성능 차이가 전체 구간에 대한 영향을 미치지 못하게 되는 현상을 표 5의 (a)의 결과로 확인 할 수 있다. 이는 터미널 수가 급격하게 변하는 구간에서의 MSE의 값이 일정한 구간에서의 차이 보다 월등하게 크기 때문이다.

그림 5의 (b)에서는 터미널 수가 순간적으로 변화하는 구간에서 포화 처리량(saturation throughput)도 떨어지게 되는 현상을 관찰할 수 있다. EHIF의 경우 MSE 결과로 확인 하였듯이 추정치가 실제 값을 빠르게 따라가게 되므로 EKF 보다 순간적인 성능 감소가 덜하다. 반면 터미널 수가 일정한 구간에서는 성능의 차이가 크게 관찰되지 않는다. 이는 추정 값의 작은 오차가 터미널 마다 임의로 선택하는 대기 슬롯에 대한 임의성에 의해 가려지기 때문이다. 즉, 최적의 백 오프 윈도우와 실제 백 오프 윈도우의 차이가 일정 수준 이상으로 커야지만 포화 처리량(saturation throughput)의 성능 차이가 관찰된다.

#### 4.3. Non-Saturated 네트워크 환경에서의 성능

터미널에서 전송하는 데이터 패킷이 연속적으로 전송하는 것이 아닌 터미널마다 임의의 분포를 가지고 전송하는 방식을 non-saturated 네트워크 환경

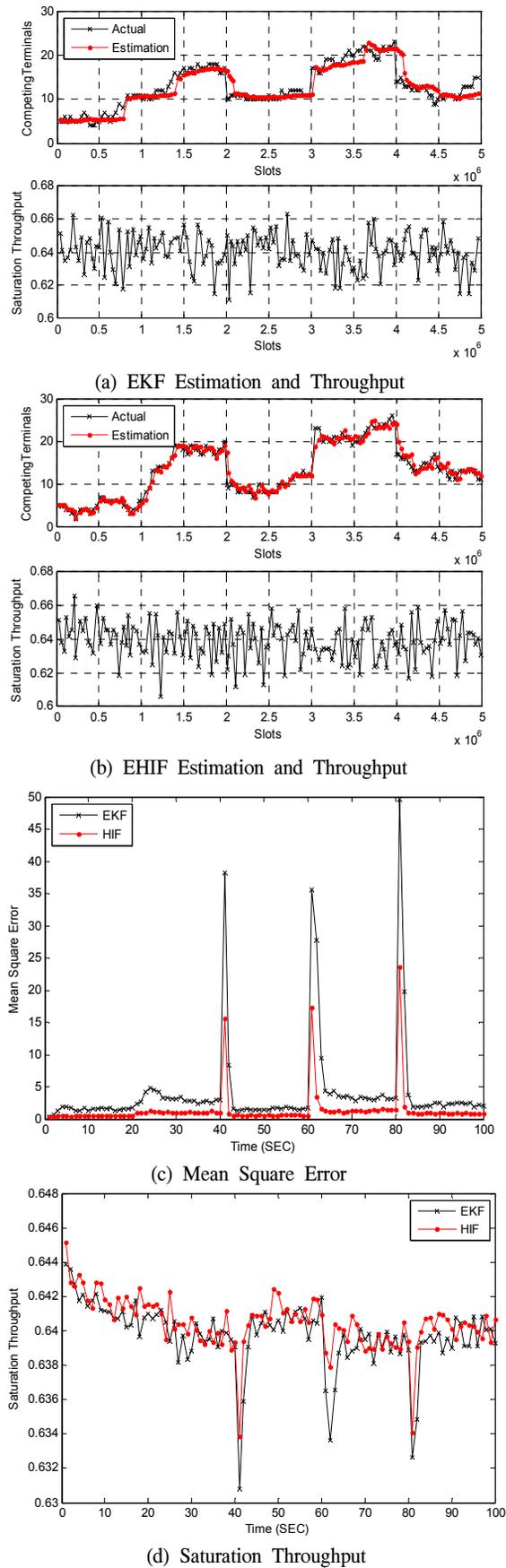


그림 6. Non-Saturated 환경에서의 결과  
Fig. 6. Results of Non-Saturated Network Condition

이라고 한다. 이는 일반적인 인터넷 데이터 전송 패턴과 유사하다고 할 수 있다. 일반적으로 웹서핑과 같은 인터넷 데이터 트래픽 패턴은 터미널이 항상 데이터를 전송하는 형태가 아닌 사용자의 응답에 따라 데이터 전송이 발생하기 때문에 전송량과 전송 간격은 임의성을 가진다. 이러한 환경에서는 경쟁하는 터미널의 수가 역동적으로 변화한다.

본 실험에서는 각 터미널들이 생성하는 임의의 트래픽의 패턴의 구현을 위해 데이터 트래픽의 길이와 간격이 지수 분포(exponential distribution)를 따른다고 가정하였다. 데이터 트래픽의 간격에 대한 지수 분포 파라메타  $\lambda$ 는 0.11로, 데이터 길이에 대한 지수 분포 파라메타  $\mu$ 는 0.7로 설정하였다. 또한 경쟁 터미널 수의 변화를 크게 만들기 위해서 20초를 주기로 시스템 전체 터미널 수도 변화하게 하였다. 이는 지하철과 같이 환경에서 여러 개의 터미널의 이동이 동시에 일어나는 경우에 대한 가정이다. 시스템 전체 터미널 수의 시작은 15명, 20초에서는 25명, 40초에서는 15명, 60초에서는 30명, 80초에서는 20명으로 적용하고 전체 100초 구간에 대하여 실험을 진행 하였다.

그림 6의 (a)와 (b)는 각각 EKF와 EHIF를 이용하여 터미널 수를 추정하고 이를 백 오프 윈도우에 반영한 뒤에 포화 처리량(saturation throughput)를 측정된 결과이다. EKF의 경우 [4]에서의 non-saturated 실험 결과와 동일하게 추정 값이 실제 터미널 수의 평균을 따라가는 경향을 보인다. 반면 EHIF로 추정할 경우는 그림 6의 (b)와 같이 추정 값이 실제 값을 잘 따라감을 확인할 수 있다. 또한 터미널 수가 급격하게 변화 하는 구간에서도 EKF 보다 빠르게 실제 값을 따라감을 관찰할 수 있다. 하지만 1회 실험을 통해 관찰된 포화 처리량(saturation throughput)은 EKF나 EHIF를 구분할 수 있는 특징이 관찰 되지 않았고 시간에 따른 특징도 관찰되지 않았다.

그림 6의 (c),(d)는 이와 같은 실험을 200회 반복한 뒤 매초 마다 평균을 내어 관찰한 MSE와 포화 처리량 (saturation throughput)에 대한 결과이다. 그림 6의 (c)의 결과를 보면 saturated 환경에서와 달리 EHIF의 MSE결과가 모든 구간에 대해서 EKF보다 좋음을 확인할 수 있다. EKF는 CUSUM 알고리즘을 사용하기 때문에 터미널 수의 변화가 많이 크지 않을 경우 그 평균을 유지하는 특성을 가지고 있기 때문에 해당 구간에 대한 MSE 성능은 EHIF보다 떨어진다. 또한 시스템 터미널 수가 급격하게

변화하는 40초 60초 80초 구간에 대해서도 EHIF가 변화를 빠르게 따라가기 때문에 MSE의 성능이 좋다. 이는 표 6의 (a)의 수치적 결과를 가지고도 확인할 수 있다.

1회 실험을 통해서도 포화 처리량(saturation throughput)에 대한 특성을 확인하기 힘들었으나 누적된 결과인 그림 6의 (d)에서는 필터간의 특징을 확인할 수 있었다. saturated 환경과 유사하게 시스템 터미널 수가 급격하게 변화 하는 구간에 대해서 EHIF는 EKF 보다 좋은 성능을 가짐을 확인할 수 있다. 또한 그 외의 구간에서도 EHIF의 성능이 EKF와 유사하거나 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 표 6의 (b)는 전체 구간에 대한 수치 결과로써 EHIF의 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

### V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.11 시스템에서 경쟁하는 터미널의 수를 추정하는 방법을 제안하고 분석하였다. 기존 기법인 EKF와 제안하는 기법인 EHIF를 이용하여 경쟁 터미널 수를 추정 한 뒤 이를 시스템에 적용하여 MSE와 포화 처리량(saturation throughput)으로 성능을 도출, 비교 분석 하였다.

제안하는 EHIF는 노이즈 정보가 필요 없는 필터로써 터미널의 수가 일정하게 saturated 된 구간에서는 EKF보다 미세하게 성능이 떨어지지만 경쟁 터미널 수가 급격하게 변화 하는 구간에서는 EKF보다 좋은 성능을 보인다. 특히 non-saturated 환경에서는 모든 구간에서 EKF보다 좋은 성능을 보임을 모의실험을 통해 확인하였다. 또 경쟁 터미널 수를 추정하는 필터의 정교한 정확도도 중요하지만 추정 값을 빠르게 따라가는 성능이 시스템 처리량(system throughput)에 더 큰 영향을 미침을 확인하였다. 제안하는 EHIF가 특히 non-saturated 경우에 우수한 결과를 보여 실제 네트워크 환경에 가장 적합함을 확인 하였다.

### References

[1] Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Standard 802.11 Std., Nov. 1999.

[2] G. Bianchi, L. Fratta, M. Oliveri, "Performance Evaluation and Enhancement

of the CSMA/CA MAC Protocol for 802.11 Wireless LANs", *Proc.PIMRC 1996*, pp. 392-396, Taipei, Taiwan, Oct. 1996.

[3] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", *IEEE Journal of Selected Areas in Telecommunications, Wireless series*, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, Oct. 1996.

[4] G. Bianchi and I. Tinnirello, "Kalman Filter Estimation of the Number of Competing Terminals in an IEEE 802.11 Network", in *Proc. Infocom 2003*, vol. 2, pp. 844-852, Mar. 2003.

[5] Hyeyoung Choi, Jaechan Lim, Hong, D. "Game theory based H infinity filter approach for estimating the number of competing terminals in IEEE 802.11 networks", *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) 2011 IEEE*, pp. 953-957, Jan. 2011.

[6] T. Vercauteren, A. L. Toledo, and X. Wang, "Batch and sequential Bayesian estimators of the number of active terminals in an IEEE 802.11 network", *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 2, pp. 437-450, Feb. 2006.

[7] J. Kim, E. Serpedin, D. Shin, "Improved particle Filtering-based Estimation of the number of competing stations in IEEE 802.11 networks", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 15, pp. 87-90, Oct. 1996.

[8] Seog-Ku Lim, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 DCF on Applying Maximum Contention Window at Collision", *The Journal of the Korea Contents Association*, vol. 11, no. 11, pp. 34-41, Nov. 2011.

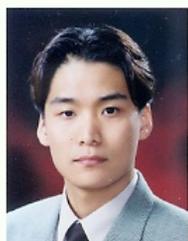
[9] G. Bianchi and I. Tinnirello, "Interference Estimation in IEEE 802.11 Networks", *Control Systems, IEEE*, vol. 30, no. 2, pp.30-43, Apr. 2010.

[10] X. Shen and L. Deng, "Game theory approach to discrete H $\infty$  Filter design," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 45, no. 4, pp. 1092-1095, Apr. 1997.

[11] Bianchi, G., "IEEE 802.11-saturation

throughput analysis”, *Communications Letters, IEEE*, vol. 2, no. 12, pp. 318-320, Dec. 1998.

**김 태 진 (Taejin Kim)**



동통신공학

2002년 2월 고려대학교 전기공학과  
 2002년 3월~현재 삼성전자 DMC 연구소  
 2011년 3월~현재 서강대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 필터 알고리즘, 이

**홍 대 형 (Deahyoung Hong)**



1977년 서울대학교 전자공학과  
 1982년 State University of New York at Stony Brook, Electrical Engineering 석사  
 1986년 State University of New York at Stony Brook, Electrical Engineering 박사  
 1977년~1981년 공군 사관학교 교수부  
 1986년~1992년 (미)Motorola 연구소, Senior Staff Research Engineer  
 2011년 한국 통신학회 회장  
 1992년~현재 서강대학교 전자공학과 정교수  
 <관심분야> 무선통신 시스템, 무선망 설계 및 성능 분석, 무선망 운용 및 제어기술

**임 재 찬 (Jaechan Lim)**



Engineering 박사

1996년 고려대학교 물리학과 졸업  
 1999년 Stony Brook University, Electrical Engineering 석사  
 2007년 Stony Brook University, Electrical Engineering 박사  
 2007년~2008년 전자공학과, University of Bridgeport, CT US 겸임교수  
 2008년~2012년 5월 서강대학교 전자공학과 연구교수  
 2012년 6월~8월 구미 전자 정보 기술원 선임 연구원  
 2012년 9월~현재 포항공과대학교 창의 IT 융합 공학과 / 미래 IT 융합 연구원 책임연구원  
 <관심분야> Methodology in signal processing, Detection & estimation of signal, Statistical filtering methodology, 무선통신 시스템.