

이중 무선 인터페이스 결합 시스템을 위한 적응적 인터페이스 활성화 기법의 성능 분석

유리스 · 윤지훈*

Performance Analysis of Adaptive Radio Activation in Dual-Radio Aggregation System

Yuris Mulya Saputra · Ji-Hoon Yun *

Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Seoul 01811, Korea

요 약

스마트폰을 비롯한 최신의 사용자 단말은 대체로 복수 개의 무선 인터페이스를 갖는다. 이러한 복수 개의 무선 인터페이스를 결합하여 동시에 사용함으로써 데이터 전송 속도를 향상시킬 수 있다. 하지만, 이 경우 각 인터페이스가 전력을 소모하므로 단말의 총 소비 전력은 매우 클 수 있다. 본 논문에서는 이중 무선 인터페이스를 결합하여 사용 시 단말의 버퍼 상태에 따라 무선 인터페이스를 적응적으로 활성화시키는 기법의 성능 모델을 마코브체인을 이용해 도출한다. 도출된 성능 모델은 패킷 발생률, 딜레이 성능 요구 조건, 결합으로 인한 성능 손실 등 다양한 동작 환경 및 설정에 대해 전송 딜레이 성능과 전력 소모를 예측할 수 있게 한다. 모델을 통해 적응적 활성화 기법이 일정 이하의 낮은 트래픽 발생 상황에서 기존 대비 절반 정도의 전력 소모를 하는 것을 보인다.

ABSTRACT

Today's smartphones and user devices are equipped with multiple radio interfaces increasingly. Aggregating these multiple radio interfaces and using them concurrently will increase a user's communication speed immediately, but at the expense of increased power consumption. In this paper, we develop a mathematical performance model of an adaptive radio activation scheme by which a radio interface is activated only when needed for performance increase and deactivated otherwise. The developed model shows that the adaptive scheme reduces delay significantly and almost halves power consumption below a certain level of traffic input.

키워드 : 링크 결합, 소비 전력 절감, 다중 링크 통신, 무선 네트워크

Key word : Link aggregation, power saving, multi-link communication, wireless network

Received 03 July 2015, Revised 20 July 2015, Accepted 06 August 2015

* Corresponding Author Ji-Hoon Yun(E-mail:jhyun@seoultech.ac.kr, Tel:+82-2-970-6455)

Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.8.1901>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

복수 개의 무선 인터페이스를 결합하여 무선 통신 링크의 전송 용량을 향상시키기 위한 연구가 최근 들어 활발하게 이루어지고 있다[1-5]. 이는 최신 스마트폰의 대부분이 셀룰러통신과 Wi-Fi 등 복수 개의 무선 인터페이스를 갖추고 있고, 액세스 네트워크 장비(듀얼밴드 액세스포인트, Wi-Fi 통합형 펌토셀 등) 또한 비슷한 양상을 보이기 때문이다. 복수 개의 무선 인터페이스를 결합하는 것은 링크계층 기법[6], 다중경로 TCP[7-9] 등의 방법을 이용해 실현할 수 있고, 기존 인터페이스의 변경없이 즉시 다중채널 무선 시스템을 구축할 수 있다는 장점을 갖는다.

하지만, 사용자 단말이 복수 개의 무선 인터페이스를 동시에 사용할 경우, 전력 소모가 크게 증가할 수 있다. 본 논문에서는 단일 인터페이스를 통해서 원하는 성능 수치를 달성할 수 없을 경우에만 추가적인 인터페이스를 활성화시키는 기법을 고려한다. 이 기법에서 단말은 자신의 버퍼 상태에 따라 무선 인터페이스를 적응적으로 활성화시킴으로써 성능 향상과 동시에 전력 소모를 절감할 수 있다.

본 논문은 이중 인터페이스 결합 시스템에서 이러한 적응적 인터페이스 활성화 기법의 수학적 성능 분석 모델을 제시한다. 이를 위해 마코브 체인을 이용하여 단말 버퍼의 상태를 모델링하고, 이로부터 성능 지표를 구한다. 도출된 성능 모델은 패킷 발생률, 딜레이 성능 요구 조건, 결합으로 인한 성능 손실 등 다양한 동작 환경 및 설정에 대해 적응적 활성화 기법의 전송 딜레이 성능과 전력 소모를 예측할 수 있게 한다.

성능 모델로부터 도출된 수치 결과로부터 적응적 활성화 기법은 단일 인터페이스 사용 대비 딜레이 성능 향상 효과가 있을 뿐만 아니라, 상당한 정도의 전력 소모 절감 효과가 있음을 보인다. 딜레이 성능 향상은 패킷 발생률이 높을수록, 전력 소모 절감은 패킷 발생률이 낮을수록 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한 딜레이 성능과 전력 소모 간의 트레이드오프 효과는 적응적 활성화 기법에서 딜레이 요구 성능을 어떻게 설정하는지에 따라 달라짐도 보인다.

II. 시스템 모델

사용자 단말은 두 개의 무선 인터페이스를 이용하여 액세스 망에 접속한다. 이 중 하나의 인터페이스는 항상 활성화되어 있고 이를 제1 인터페이스라 한다. 다른 하나의 인터페이스는 활성화/비활성화가 가능하고 제2 인터페이스라 한다. 데이터 패킷은 λ 의 레이트로 발생하고 먼저 단말의 버퍼에 저장된 후, 활성화되어 있는 인터페이스로 보내져 무선으로 전송된다. 만약에 두 개의 인터페이스가 모두 활성화되어 있으면 버퍼의 패킷은 순서대로 각각의 인터페이스에 번갈아가면서 보내진다. 각 인터페이스의 전송 속도는 μ 로 동일하다. 따라서, 두 인터페이스가 동시에 활성화되어 있을 때, 단말이 갖는 총 전송속도는 최대 2μ 가 된다. 하지만, 실제로 복수 개의 인터페이스를 결합하여 사용 시 성능 감소가 발생하므로[10], 이를 고려하기 위한 성능 감소 팩터를 $\gamma(\geq 1)$ 로 정의한다. 그러면, 단말의 전송 속도는 $2\mu/\gamma$ 가 된다. 데이터 패킷의 발생은 Poisson 분포를 따르고, 패킷을 전송하는 데 걸리는 시간은 Exponential 분포를 따른다고 가정한다.

III. 적응적 활성화 기법 및 성능 모델

3.1. 적응적 활성화 기법

단말은 버퍼에 패킷이 $k(\geq 2)$ 개 이상 있을 경우 두 개의 인터페이스를 모두 활성화시켜 사용하고, 패킷 개수가 k 개 미만이면 제2 인터페이스를 수면(sleep) 모드로 전환하고 남은 제1 인터페이스만을 사용한다. 이것이 시간 t 이상 지속되면 제2 인터페이스를 비활성화시킨다. 시간 t 동안 버퍼가 비어 있을 경우 제1 인터페이스는 수면 모드로 전환되어 더 적은 전력을 소모하도록 한다. 모델링의 편의를 위해 $t \ll 1/\mu$ 라고 가정한다. 즉, 시간 t 동안 버퍼의 패킷 개수는 새로운 패킷 발생에 의해서만 변화된다고 가정한다.

3.2. 성능 모델

단말의 버퍼 상태는 다음과 같은 1차원 마코브 체인(Markov chain)으로 표현할 수 있다. 이 때, 마코브 체인의 상태는 단말 버퍼에 있는 패킷의 개수이다. 단말 버퍼는 최대 K 개의 패킷을 저장할 수 있다고 가정한다.

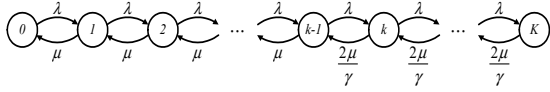


그림 1. 적응적 활성화 기법의 마코브 체인 모델
Fig. 1 Markov chain model of the adaptive radio activation scheme

위의 마코브 체인에서 평형(equilibrium) 상태의 단말 버퍼가 상태 n 에 있을 확률을 p_n 이라고 하자. p_0 는 단말 버퍼가 비어있을 때의 확률을 의미한다. 모든 n 에 대해서 상태 확률 p_n 을 얻기 위해, 먼저 버퍼의 패킷 개수 n 이 $1 \leq n \leq k-1$ 를 만족할 때, 즉 하나의 인터페이스만 사용될 때의 밸런스 등식을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda p_n &= \mu p_{n+1} \\ p_{n+1} &= \frac{\lambda}{\mu} p_n = \rho p_n \end{aligned} \quad (1)$$

위 식으로부터, $1 \leq n \leq k-1$ 인 경우에 대해서 p_n 을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$p_n = \rho^n p_0 \quad (2)$$

그 다음으로 버퍼의 패킷 개수가 k 개 이상일 경우에는 두 개의 인터페이스가 모두 사용되고, 이 경우의 전송 속도는 $2\mu/\gamma$ 가 된다. 이 때의 밸런스 등식은

$$\begin{aligned} \lambda p_n &= \frac{2\mu}{\gamma} p_{n+1} \\ p_{n+1} &= \frac{\gamma\lambda}{2\mu} p_n = \frac{\gamma}{2} \rho p_n \end{aligned} \quad (3)$$

와 같다.

이 때, $\rho := \lambda/\mu$ 로 정의한다. 이로부터 $n \geq k$ 일 때의 p_n 을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$p_n = \left(\frac{\gamma}{2}\right)^{n-k+1} \rho^n p_0 \quad (4)$$

전체 상태 확률의 합은 1고, 이는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{n=0}^K p_n = 1 \quad (5)$$

위 식은 n 구간에 따라 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$p_0 + \sum_{n=1}^{k-1} p_n + \sum_{n=k}^K p_n = 1 \quad (6)$$

위 식에 식 (2)와 (4)를 대입하면,

$$p_0 \left(1 + \sum_{n=1}^{k-1} \rho^n + \sum_{n=k}^K \left(\frac{\gamma}{2}\right)^{n-k+1} \rho^n\right) = 1 \quad (7)$$

이 되고, 두 번째와 세 번째 항의 합을 구하면 p_0 는 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$p_0 = \left[\frac{1-\rho^k}{1-\rho} + \frac{\frac{\gamma}{2}\rho^k(1-(\frac{\gamma}{2}\rho)^{K-k+1})}{1-\frac{\gamma}{2}\rho} \right]^{-1} \quad (8)$$

만약에 K 가 무한대라면(또는 충분히 크다면), p_0 는 아래와 같이 더 간단히 표현할 수 있다.

$$p_0 = \left[\frac{1-\rho^k}{1-\rho} + \frac{\frac{\gamma}{2}\rho^k}{1-\frac{\gamma}{2}\rho} \right]^{-1} \quad (9)$$

3.3. 전송 딜레이 계산

K 가 충분히 크다고 가정하면, 앞에서 구한 마코브 체인의 상태 확률로부터 단말 버퍼에 존재하는 패킷의 평균 개수 N 은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} N &= \sum_{n=1}^{k-1} (n-1)p_n + \sum_{n=k}^{\infty} (n-2)p_n \\ &= p_0 \left(\sum_{n=1}^{k-1} (n-1)\rho^n + \sum_{n=k}^{\infty} (n-2)\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{n-k+1}\rho^n \right) \\ &:= p_0(x+y) \end{aligned} \quad (10)$$

위에서 괄호 안의 첫 번째 항을 x , 두 번째 항을 y 라 하자. x 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= \rho \sum_{n=1}^{k-2} (n-1)\rho^{n-1} \\ &= \rho \left(\frac{\rho - (k-1)\rho^{k-1} + (k-2)\rho^k}{(1-\rho)^2} \right) \\ &= \frac{\rho^2 - (k-1)\rho^k + (k-2)\rho^{k+1}}{(1-\rho)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

마찬가지로 y 에 대해서도 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 y &= \sum_{n=k}^{\infty} (n-k+k-2) \left(\frac{\gamma}{2}\right)^{n-k+1} \rho^n \\
 &= \frac{\gamma}{2} \rho^k \sum_{n=k}^{\infty} (n-k) \left(\frac{\gamma}{2}\right)^{n-k} \\
 &\quad + (k-2) \left(\frac{\gamma}{2}\right)^{-k+1} \sum_{n=k}^{\infty} \left(\frac{\gamma}{2}\right)^n \quad (12) \\
 &= \frac{\left(\frac{\gamma}{2}\right)^2 \rho^{k+1}}{\left(1-\frac{\gamma}{2}\rho\right)^2} + \frac{(k-2) \frac{\gamma}{2} \rho^k}{1-\frac{\gamma}{2}\rho}
 \end{aligned}$$

위에서 구한 x 와 y 에 대한 식을 식 (10)에 대입하면 단말에서 발생한 패킷이 전송되어 액세스 망이 이를 수신하기 까지 걸린 딜레이 W 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{N}{\lambda} + \frac{1}{\mu} \\
 &= \frac{p_0(x+y)}{\lambda} + \frac{\rho}{\lambda} \quad (13)
 \end{aligned}$$

두 인터페이스가 항상 활성화되어 있는 경우에는 전송 속도는 항상 $2\mu/\gamma$ 가 되고, 버퍼에 패킷이 1개 있는 경우에만 μ 가 된다. 앞과 유사한 절차를 수행하면, 이 경우의 딜레이는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$W_{dual} = \frac{\left(\frac{\gamma}{2}\right)^2 \rho^3}{\lambda \left(1 + \rho \left(1 - \frac{\gamma}{2}\right)\right) \left(1 - \frac{\gamma}{2}\rho\right)} + \frac{\rho}{\lambda} \quad (14)$$

하나의 인터페이스만을 사용하는 경우를 고려하면 전송 속도는 항상 μ 이므로, M/M/1 큐잉 시스템이 되어 딜레이는 아래와 같이 간단하게 구할 수 있다.

$$W_{single} = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (15)$$

적응적 활성화 기법에서 k 의 선택은 전송 딜레이 요구 사항에 따라 결정된다. 절대적인 전송 딜레이 요구 값이 τ 로 주어진 경우, $W \leq \tau$ 를 만족하는 가장 큰 k 를 선택할 수 있다. 절대적인 전송 딜레이 값 대신, 단일 인터페이스를 사용하는 것 대비 딜레이 향상 정도에 따

라 k 를 선택할 수도 있다.

이 경우, $W = a W_{single}, 0 < a \leq 1$ 의 관계를 갖는 a 값을 설정하면, 이에 맞추어 원하는 W 값을 갖도록 하는 k 를 선택할 수 있다.

3.4. 전력 소모 계산

제1 인터페이스가 깨어 있을 때와 수면 모드일 때의 전력 소모를 각각 P_{active} 와 P_{sleep} 라 하자. 제2 인터페이스가 활성화, 수면 모드, 비활성화되어 있을 때의 경우는 각각 Q_{active} , Q_{sleep} , 그리고 $Q_{inactive}$ 라 한다. 버퍼의 상태에 따라 제1 인터페이스의 상태는 아래와 같이 달라진다.

- (1) 버퍼가 비어 있고, 시간 t 동안 패킷이 발생하지 않은 경우: 수면 모드로 동작한다.
- (2) 버퍼가 비어 있지만 시간 t 내에 패킷이 발생하는 경우: 활성화되어 있다.
- (3) 버퍼에 패킷이 존재하는 경우: 활성화되어 있다.

마찬가지로 제2 인터페이스의 상태는 아래와 같이 달라진다.

- (a) 버퍼의 패킷 수가 k 개 미만이고, 시간 t 동안 패킷 개수가 k 개를 넘어가지 않는 경우: 비활성화되어 있다.
- (b) 버퍼의 패킷 수가 k 개 미만이지만, 시간 t 내에 패킷 개수가 k 개 이상이 되는 경우: 수면 모드로 동작한다.
- (c) 버퍼의 패킷 수가 k 개 이상인 경우: 활성화되어 있다.

시간 t 동안 버퍼에 도착하는 신규 패킷의 개수를 E_t 라고 하자. 위의 버퍼 상태에 따른 인터페이스 동작을 고려하면 단말의 평균 전력 소모 \bar{P} 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \bar{P} &= (P_{sleep} \Pr[E_t = 0] + P_{active} \Pr[E_t \geq 1]) \Pr[n = 0] \\
 &\quad + P_{active} \Pr[n \geq 1] \\
 &\quad + Q_{inactive} \Pr[n = j, 0 \leq j < k] \Pr[E_t \leq k - j - 1] \quad (16) \\
 &\quad + Q_{sleep} \Pr[n = j, 0 \leq j < k] \Pr[E_t > k - j - 1] \\
 &\quad + Q_{active} \Pr[n \geq k]
 \end{aligned}$$

간단한 표현을 위해 $p_{j,t} := \Pr[E_t = j]$ 를 정의하고, 버

퍼 상태 확률을 대입하면, 위식은 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{P} = & (P_{sleep}p_{0,t} + P_{active}(1-p_{0,t}))p_0 \\ & + P_{active}(1-p_0) + Q_{inactive} \sum_{n=0}^{k-1} p_n \sum_{j=0}^{k-n-1} p_{j,t} \\ & + Q_{sleep} \sum_{n=0}^{k-1} p_n (1 - \sum_{j=0}^{k-n-1} p_{j,t}) \\ & + Q_{active} (1 - \sum_{n=0}^{k-1} p_n) \end{aligned} \quad (17)$$

패킷 발생은 Poisson 분포를 따르므로, $p_{j,t}, j < k$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$p_{j,t} = \sum_{x=0}^j e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^x}{x!} \quad (18)$$

두 인터페이스가 항상 활성화되어 있는 경우 제1 인터페이스의 전력 소모는 앞의 경우와 동일하다. 제2 인터페이스의 경우에는 버퍼의 패킷 개수가 1개 이하가 될 경우 수면 모드로 전환된다. 이외의 경우에는 활성화되어 있다. 따라서, 이 경우의 평균 전력 소모는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{P}_{dual} = & (P_{sleep}p_{0,t} + P_{active}(1-p_{0,t}))p_0 \\ & + P_{active}(1-p_0) + Q_{sleep}(p_{1,t}p_0 + p_{0,t}p_1) \\ & + Q_{sleep}((1-p_{1,t})p_0 + (1-p_{0,t})p_1) \\ & + Q_{active}(1-p_0-p_1) \end{aligned} \quad (19)$$

하나의 인터페이스만을 사용하는 경우를 고려하면 인터페이스의 수면 모드 진입은 버퍼가 비어 있고 시간 t 동안 신규 패킷이 도착하지 않는 경우이다. 그 이외의 경우에는 인터페이스는 항상 활성화되어 있다. 따라서, 평균 전력 소모는 아래와 같다.

$$\bar{P}_{single} = (P_{sleep}p_{0,t} + P_{active}(1-p_{0,t}))p_0 + P_{active}(1-p_0) \quad (20)$$

IV. 성능 결과

이 장에서는 앞에서 제시한 적응적 인터페이스 활성화 기법의 성능 모델을 통해 기법의 딜레이 성능과 전력 소모를 알아본다. 전력 소모량을 도출하기 위해 [11,

12]에 제시된 Atheros 칩셋의 소비전력 프로파일을 사용한다. 두 인터페이스에 대해서 동일한 소비 전력 프로파일을 적용한 경우를 고려한다.

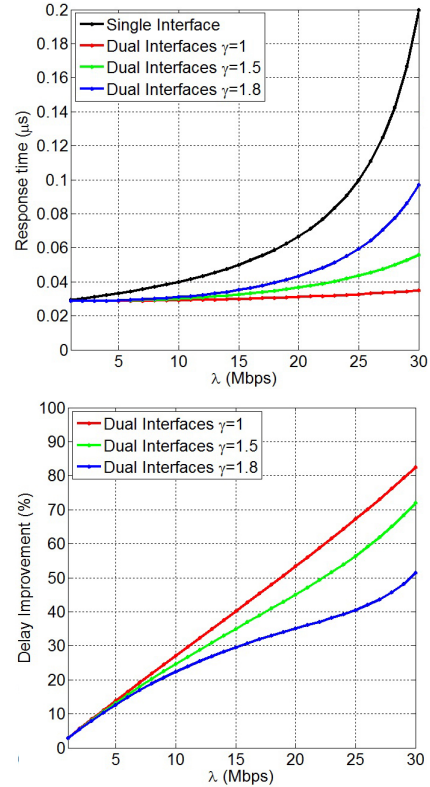


그림 2. 패킷 발생률에 따른 기법들의 전송 딜레이 성능 및 적응적 활성화 기법의 (상) 딜레이 및 (하) 향상도
Fig. 2 Transmission delay and improvement ratio of the adaptive scheme for varying packet arrival rate

그림 2는 패킷 발생률 λ 에 따른 제시된 기법의 딜레이 성능과 단일 인터페이스 사용 대비 향상 정도를 보이고 있다. 그림에서 보이는 것처럼 제시된 기법은 큰 폭의 전송 딜레이 감소를 갖는다. 이는 버퍼에 패킷이 많을 때 이중 인터페이스를 활성화시켜 전송 속도를 높임으로써 패킷이 버퍼에서 기다리는 시간을 줄이기 때문이다. 제시된 기법의 향상 폭은 패킷 발생 레이트 λ 가 클수록 더 커지는 것을 볼 수 있다. 한편 결합 팩터 γ 가 달라지면 전송 딜레이도 크게 변하는 것을 볼 수 있다. γ 가 작을수록 인터페이스 결합 시 성능 손실이 적으므로 더 큰 폭으로 딜레이 성능이 향상된다. 동일한

λ 에 대해서 더 적은 전송 딜레이를 가질 경우 버퍼가 비게 될 확률이 증가하므로 인터페이스를 더 자주, 그리고 더 오래 수면 모드 상태로 있게 할 수 있어서 전력 소모 절감에도 도움이 된다.

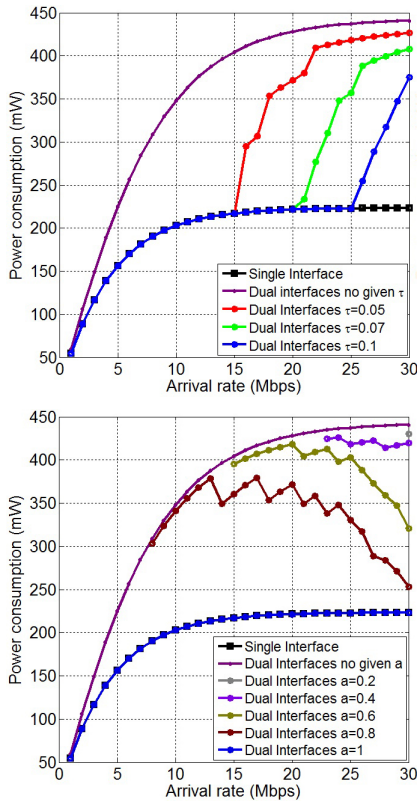


그림 3. 패킷 발생률에 따른 기법들의 전력 소모: (상) 딜레이 요구 조건에 따른 소모 변화, (하) 딜레이 향상도에 따른 소모 변화
Fig. 3 Power consumption of schemes for different delay requirements (left) and delay improvement ratios (right)

그림 3은 다양한 경우에 대해서 전력 소모를 비교하고 있다. 여기에서 γ 는 1로 고정하였다. 이중 인터페이스를 항상 활성화시키는 경우는 적응적 활성화 기법 이상의 딜레이 감소 효과를 얻을 수 있지만, 전력 소모는 단일 인터페이스 사용 대비 항상 2배를 보이고 있다. 반면, 적응적 활성화 기법의 경우는 λ 가 작을 때는 단일 인터페이스와 동일한 전력 소모를 갖고, λ 가 커질 때에만 전력 소모가 증가한다. 이 때에도 버퍼 상태에 따라 제2 인터페이스를 적응적으로 활성화/비활성화시키므로 이중 인터페이스 대비 더 적은 전력 소모를 갖는다.

전력 소모는 딜레이 요구 사항 τ 와도 큰 연관을 보인다. τ 가 클수록 설정된 k 가 커져 제2 인터페이스를 활성화시키는 경우가 줄어들어 전력 소모가 감소한다. 한편, 단일 인터페이스의 딜레이 대비 목표 딜레이 향상도 a 를 기준으로 k 를 설정한 경우, a 가 작을수록 더 높은 전력 소모를 보인다. 이는 더 적은 전송 딜레이를 요구하는 것이므로 k 가 작게 설정되어 더 자주 제2 인터페이스를 활성화시키기 때문이다. a 가 1인 경우는 단일 인터페이스와 동일한 전송 딜레이를 요구하는 것이므로 제2 인터페이스가 활성화될 필요가 없어 동일한 전력 소모를 갖는다.

V. 결론

본 논문에서는 이중 무선 인터페이스를 결합하여 사용 시 단말의 버퍼 상태에 따라 무선 인터페이스를 적응적으로 활성화/비활성화함으로써 전력 소모를 절감하기 위한 기법의 성능 모델을 도출하였다. 도출된 성능 모델은 무선 단말의 버퍼가 갖는 패킷의 개수 변화를 마코브체인으로 모델링하고, 이로부터 다양한 동작 환경에 대해 적응적 활성화 기법의 전송 딜레이 성능과 전력 소모를 예측할 수 있게 한다. 이를 통해 대상 환경에서 기법의 최적 동작을 가능하게 할 수 있다. 논문에서는 모델을 이용해 넓은 범위의 패킷 발생 레이트에 대해 기존 및 적응적 활성화 기법의 성능 수치를 얻고 이를 분석하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the Research Program funded by the Seoul National University of Science and Technology.

REFERENCES

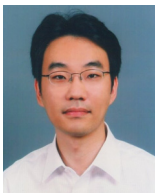
[1] A. Jayasuriya et al., "Aggregation of Wi-Fi links: When does it work?," in *Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Networks*, pp. 318 - 323, 2007.

- [2] C. Paasch, et al., “Exploring mobile/Wi-Fi handover with multipath TCP,” in *Proceedings of the 2012 ACM SIGCOMM workshop on Cellular networks: operations, challenges, and future design*, pp. 31 - 36, 2012.
- [3] C.-L. Tsao, and R. Sivakumar, “On effectively exploiting multiple wireless interfaces in mobile hosts,” in *Proceedings of the 5th international conference on Emerging networking experiments and technologies*, pp. 337 - 348, 2009.
- [4] S. Kakumanu and R. Sivakumar, “GliA: a practical solution for effective high datarate Wi-Fi-arrays,” in *Proceedings of the 15th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 229 - 240, 2009.
- [5] S. Deng, R. Netravali, A. Sivaraman, and H. Balakrishnan, “WiFi, LTE, or Both?: Measuring Multi-Homed Wireless Internet Performance,” in *Proceedings of the 2014 Conference on Internet Measurement Conference*, pp. 181-194, 2014.
- [6] IEEE Std. 802.11, *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Link Aggregation*, IEEE Computer Society, 2008.
- [7] IETF RFC 6824, *TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses*, IETF, 2013.
- [8] C. Raiciu et al., “How hard can it be? designing and implementing a deployable multipath,” in *Proceedings of the 9th USENIX conference on Networked Systems Design and Implementation*, pp. 29-29, 2012.
- [9] C. Raiciu et al., “Improving datacenter performance and robustness with multipath TCP,” in *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 conference*, pp. 266-277, 2011.
- [10] Y. M. Saputra, H. Hwang and J. H. Yun, A Comparative Study of Aggregation Schemes for Concurrent Transmission over Multiple WLAN Interfaces, *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 51, no. 7, pp. 1444-1451, July 2014.
- [11] AR5213 Preliminary Datasheet, Atheros Communications, July 2004.
- [12] DNUA-81 UB82/AR9170+AR9104 Datasheet, Unex Technology Corporation, December 2008.



유리스(Yuris Mulya Saputra)

반등공과대학교 공학사
 삼성전자 인도네시아 연구원
 서울과학기술대학교 전기정보공학과 공학석사
 서울과학기술대학교 전기정보공학과 연구원(현)
 ※관심분야 : 무선네트워크



윤지훈(Ji-Hoon Yun)

서울대학교 전기공학부 공학사
 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학석사
 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학박사
 삼성전자 네트워크사업부 책임연구원
 미시건대학교 박사후연구원
 서울과학기술대학교 전기정보공학과 조교수(현)
 ※관심분야 : 무선네트워크, 이동통신망, 무선랜