

적응형 주파수호핑을 사용하는 블루투스의 성능

이 승 범, 박 신 중

시스템직접기술연구소, 한국정보통신대학교

전화: 042-866-6907

Performance of Bluetooth using Adaptive Frequency Hopping

Seungbeom Lee, Sin-Chong Park

System Integration Technology Institute, Information and Communications University

E-mail: moonleaf@icu.ac.kr, scpark@icu.ac.kr

Abstract

2.4Ghz ISM 대역에서 동작하는 Bluetooth는 동일한 대역에서 동작하는 WLAN(802.11.b), Cordless phone, microwave oven등의 신호가 interference로 작용하여, 성능이 크게 저하된다. 특히 Bluetooth와 WLAN은 상호간 interference로 작용하여 상호 성능 저하를 초래한다. 따라서, 두 장치간의 coexistence를 위한 방안으로 adaptive hopping frequency(AFH)이 제안되었다. 이 논문에서는 3 channel status를 이용한 AFH 방식을 제안하고, 그 성능을 검증하였다.

I. Introduction

2.4Ghz의 ISM 대역에서 동작하는 Bluetooth는 동일한 대역에서 동작하는 WLAN, codeless phone, microwave oven의 interference에 의해 성능 저하를 초래한다. 특히 WLAN과 Bluetooth가 함께 동작할 경우, 상호간의 packet collision에 의해 두 장치 모두의 throughput이 저하된다[1]. 두 장치간의 상호공존(coexistence)에 대한 방안들이 논의 되었다. Power control을 통해 상호간의 interference영향을 줄여 throughput을 향상시키는 방식이 제안되었고[2], Bluetooth와 WLAN간의 정보를 교환을 통해 slot을 time division하여 각각의 전송시간에 packet을 전송하는 방식이 제안되었다[3]. [4]에서는 인식된 간섭채널에 대해 최고의 throughput을 얻을 수 있도록 packet type을 결정하는 방식이 제안되었다. FHSS system에서 channel condition에 기초하여 adaptive frequency hopping sequence를 통해 interference를 감쇄할 수 있다[5]. [6]에서는 Bluetooth가 스스로 간섭채널을 찾아내고, 인식된 간섭 채널을 frequency hopping sequence

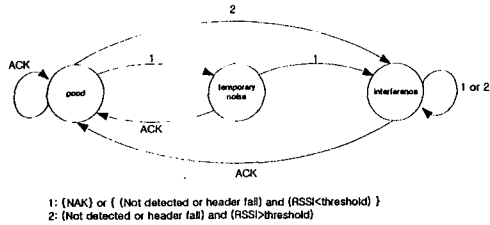
에서 제외하는 방식을 제안하였으나, 간섭채널이 증가할 경우 hopping bandwidth가 감소하고, MAI(multiple access interference)로 인해 성능이 저하된다. good channel과 bad channel으로 partition하고 partition sequence를 부여하는 방식이 제안되었다[7~9].

이 논문에서는 channel을 good(G), noise(N), interference(I) channel의 3 channel status로 구분하고, 이에 기초하여 동일한 channel status끼리 짝지어 주는 coupling-mapping 방식의 adaptive frequency hopping(AFH)를 제안하고, 이의 성능을 기존의 방식들과 one pico-net 환경과 multi pico-net환경에서의, throughput, PER(packet error rate)측면에서 검증하였다. 이 논문의 2장은 제안한 3 channel status방식과 AFH방식을 소개하였고 3장에서는 Throughput model과 결과를 보였다. 마지막으로 4장에서 결론을 보였다.

II. AFH Algorithm

Bluetooth가 hopping하는 각 채널의 상태를 good(G), noise(N), interference(I)상태로 구분한다. Noise 상태는 path-loss, AWGN에 의해 packet error를 일으키는 channel상태를 의미하며, interference 상태는 WLAN 혹은 다른 장치 신호에 의한 interference에 의해 packet error를 일으키는 channel상태를 의미한다. RSSI(received signal strength indicator)의 threshold보다 높은 값을 가지고, packet error가 발생한다면 이 채널은 interference 상태이며, RSSI가 threshold보다 낮고, packet error가 발생한다면 이는 noise 상태를 의미한다. Channel의 상태는 Bluetooth의 access code correlation, HEC error check, ACK/NAK, RSSI를 이용해 그림 1과 같이 3state로 결정된다. Master는 이 79개의 channel status 정보를 LMP(link manager protocol)

을 통해 slave로 전달하고, 이를 기초로 Master와 slave는 동일한 hopping sequence를 사용한다.



[그림 1. 3 state channel condition]

Previous work: [6]에서는 Bluetooth가 스스로 간섭으로 인식한 채널을 frequency hopping sequence에서 제외하는 L mode방식을 제안하였다. Good channel pool 내에서 hopping sequence가 결정된다. [8]에서는 good channel을 연속적으로 배열한, good channel partition, bad channel을 연속적으로 배열한 bad channel partition을 가지고 hopping sequence를 good, bad channel partition sequence를 따른다. 두 가지 hopping 방식에 대한 throughput, MAI환경에서의 PER은 식(1.1~1.2)에 나타나 있다. Intelligent hopping throughput은 [6]으로부터 확장되었다.

Coupling-mapping method AFH: 1Mhz bandwidth를 가지는 Bluetooth는 2402+k Mhz(k=0,..78)의 frequency range에 대해 pseudorandom하게 1600hop/sec hopping하는 79-hop system이다[10]. Packet duration동안 RF frequency는 고정된다. 따라서, single packet일 때는 현재의Bluetooth clock value로부터, multi-slot packet일 때는 first slot의 clock value로부터 frequency hopping이 결정된다. ACL link에 대해 송신단은 data packet을 전송하고 이에 대한 ACK를 수신해야만 packet이 완벽히 전달된 것으로 인식한다. 따라서, ACL packet이 loss없이 전송되기 위해서는 연속적인 두 개의 hopping frequency channel에서 error가 발생하지 않아야 한다. 제안한 Coupling-method방식은 그림2과 같이 successive two frequency hopping sequence를 동일한 pattern으로 방식으로 mapping함으로써, 모든 채널을 fairness하게 사용하고 throughput을 향상시키는 방식이다. 따라서, 이 방식은 기존의 adaptive frequency hopping방식이 multi pico-net환경에서 MAI(multiple access interference)로 인한 PER이 높은 단점을 보완할 수 있다.

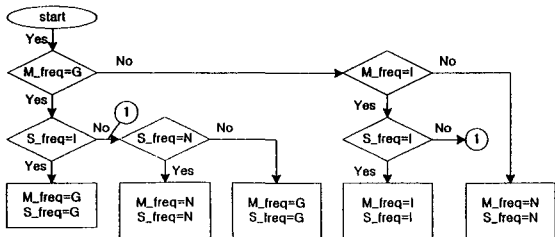


그림 2. Coupling-method AFH

III. Throughput Analysis

Master는 a slot packet을, slave는 b slot packet을 전송한다고 가정한다(a,b=1,3,5). Good channel의 개수를 N_g , noise channel의 개수를 N_n , interference channel의 개수를 N_i , good channel로 인식되었지만 현재의 packet 전송시 error를 일으킬 확률을 P_{gm} , noise channel로 인식되었지만 현재의 packet 전송시 error 없이 전송될 확률을 P_{gn} , interference channel로 인식되었지만, 현재 packet 전송시 error 없이 전송될 확률을 P_{ig} ($P_{ig} < P_{ng}$)로 정의한다. ACL link의 Aggregate throughput은 다음 식(1.1)과 같이 계산된다.

Aggregate throughput(packets/sec) : (1.1)

$$T_{regular} = \frac{1600}{(a+b)} (P_g^2 + P_b^2) \dots \dots \dots \text{regular hopping}$$

$$P_g = \frac{\{N_g(1-P_{gm}) + N_n P_{gn} + N_i P_{ig}\}}{(N_g + N_n + N_i)}$$

$$T_{L_mode} = \frac{1600}{(a+b)} (P_1^2 + P_1^2) \dots \dots \dots \text{802.152 L_mode hopping}$$

$$P_1 = 1 - P_{ng}$$

$$T_{int} = \max \left\{ 0, \frac{1600}{(x+y)} P_2 \right\} \dots \dots \dots \text{802.152 intellignet hopping}$$

$$P_2 = \frac{1}{N_g + N_b} \{ (2N_g - 1 + P_{gm}(1 - N_g))(1 - P_{gb})^2 + (N_n + P_{gn}(N_b - 1))P_{ng}^2 + (1 - P_{gn} + P_{ng})(1 - P_{ng}) \}$$

$$N_b = N_n + N_i, \quad P_b = (N_n(1 - P_{ng}) + N_i(1 - P_{ig})) / (N_n + N_i)$$

$$T_{afh} = \frac{1600}{(x+y)} (P_3 + P_3^2) \dots \dots \dots \text{adaptive frequency hopping}$$

$$P_3 = \frac{N_g^2(1 - P_{gm})^2 + N_n^2 P_{gn}^2 + N_i^2 P_{ig}^2 + 2N_g N_n P_{ng}^2 + 2N_g N_i (1 - P_{gm})^2 + 2N_n N_i P_{ng}^2}{(N_g + N_n + N_i)^2}$$

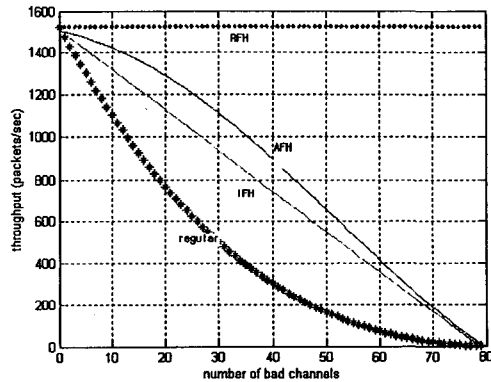


그림 3. Aggregate throughput ($P_{gb} = P_{ig} = 0.02, P_{ng} = 0.1, N_n = 0.1 N_b$)

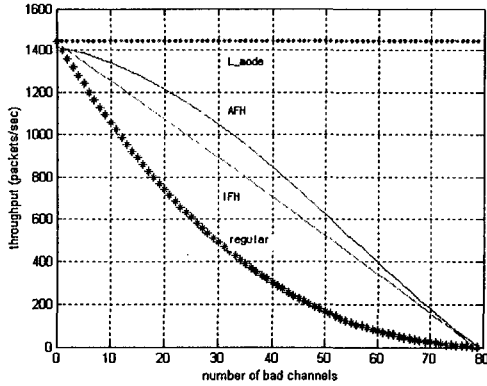


그림 4. Aggregate throughput
($P_{gb} = P_{ig} = 0.04, P_{ng} = 0.1, N_n = 0.1 N_b$)

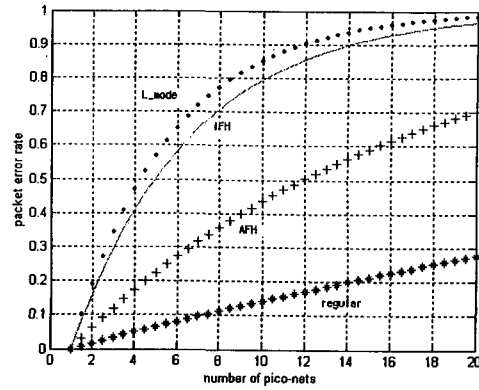


그림 6. PER at n-located piconets
($N_b = 10, N_n = 0.2 N_b$)

변형된 hopping sequence 를 사용하는 Bluetooth 가 multi-pico net 을 형성할 경우, 다른 Bluetooth pico-net 의 interference 의 영향을 받게 된다. 다음은 각 hopping method 에 따른 MAI 의 영향에 의한 upper bound of PER 을 나타내었다. N 개의 unsynchronized 된 piconets 이 존재하며, pico-net 이 상호간 interference 로 작용할 만큼 충분히 가까이 있다고 가정하였다.

Packet error rate with n unsynchronized collocated n pico-nets (1.2)
 $T_{\text{slot}} = T_{\text{packet}} / T_{\text{slot}}$ (ex: DHI packet, $T_{\text{packet}} = 366\text{usec}, T_{\text{slot}} = 625\text{usec}$)

$$P_{ng} = 1 - \left[2(1 - T_{\text{slot}}) \frac{78}{79} + (2T_{\text{slot}} - 1) \frac{78}{79} \right]^{79} \dots \text{regular hopping}$$

$$P_{L_mode} = 1 - \left[2(1 - T_{\text{slot}}) \frac{N_g - 1}{79} + (2T_{\text{slot}} - 1) \frac{N_g - 1}{79} \right]^{79} \dots 802.152 \text{ L_mode}$$

$$P_{ig} = 1 - \left[\frac{N_g}{79} \left(2(1 - T_{\text{slot}}) \frac{N_g - 1}{79} + (2T_{\text{slot}} - 1) \frac{N_g - 1}{79} \right) + \left(1 - \frac{N_g}{79} \right) \right]^{79} \dots \text{intelligent hopping}$$

$$P_{ag} = 1 - \left[2(1 - T_{\text{slot}}) \frac{78}{79} + (2T_{\text{slot}} - 1) \frac{(N_g - 1)(N_g - 2) + N_g(N_g - 1) + N_g(N_g - 1)}{79^2} \right]^{79} \dots \text{adaptive hopping}$$

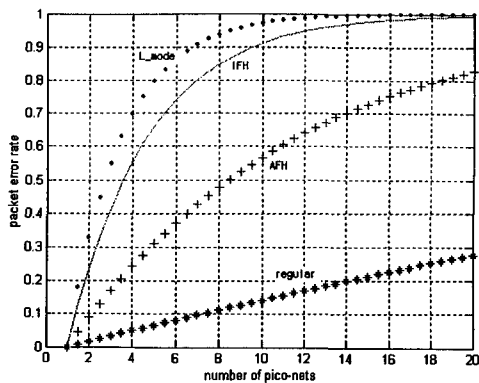


그림 5. PER at n-located piconets
($N_b = 20, N_n = 0.2 N_b$)

그림 3,4 는 같은 각 hopping sequence 방식에 따른 aggregated throughput 을 나타낸다. L_mode 방식은 good channel 만을 사용하므로 one piconet 에서는 좋은 throughput 을 가지는 반면, multi piconet 환경에서는 hopping 채널의 부족으로 그림 5,6 와 같이 가장 높은 PER 을 나타낸다. Intelligent hopping 방식은 good channel duration 에서 packet 의 전송을 보장하므로, 그림 3,4 와 같이 좋은 throughput 을 가진 반면, good channel pool 내에서 good partition 이 결정되므로, MAI 에 의한 packet error rate 가 높아진다. 제안한 adaptive hopping 방식은 intelligent 방식보다 뛰어난 throughput 을 가지면서, MAI 에 의한 packet error rate 는 더 낮다. 2 개의 pico-net 이 형성될 경우, 기존의 방식 PER<0.1, AFH 방식이 0.1 인 반면, IFH 와 L_mode 는 0.2~0.35 에 이루고 있다. 따라서 제안한 adaptive hopping 방식이 interference 환경이나 MAI 환경에서 최적의 성능을 가진다.

IV. 결론

본 논문에서는 2.5Ghz의 WLAN interference에 의한 Bluetooth의 성능 저하 방지를 위한, 새로운 adaptive hopping frequency(AFH)을 제안하고 이를 PER, throughput에 대하여 성능을 검증하였다. 기존의 hopping sequence 알고리즘이 one pico-net환경에서만 좋은 throughput을 나타내는 반면, 제안한 알고리즘은 one pico-net 환경뿐만 아니라, MAI 환경에서도 안정적인 성능을 보인다. 예측할 수 없는 채널환경과 Bluetooth application환경을 고려할 때, 제안한 알고리즘이 가장 안정적인 throughput을 가진다. 제안한 알고리즘은 추가적인 시뮬레이션을 통한 보안을 거쳐 실제적인 시스템으로 구현 가능할 것이다.

Reference

- [1] Wi-Fi(802.11b) and Bluetooth: Enabling Coexistence, Jim Lansford, Adrian Stephens, and Ron Nevo, Molilian Corporation, IEEE Network, Semptember/Ocotober , 2001, IEEE.
- [2] Power Control and Packet Schedulingg for Bluetooth to Avoid 802.11 Direct Sequence Interference, Nada Golime, Nicolas Chevrollier, IEEE 802.15-01/0063r0
- [3] Collaborative Coexistence Mechanism submission: Mobillian's META+Symbol's TDMA, IEEE 802.15-01/164r0
- [4] Adaptive Frequency hopping scheme for interference-limited WPAN applications, Y.-H. You, C.-H.park, M.-C.Ju, K.-W.Kwon and J.-W. Cho, Electronics Letters, 19th July 2001, Vol.37 No.15.
- [5] Adaptive frequency hopping in HF communications, J.zander, G.Malmgren IEE Proc. Commun, Vol. 142, No. 2, April 1995.
- [6] Adaptive Frequency Hopping A Non-collaborative Coexistence Mechanism, IEEE 802.15-00/367r1
- [7] An Intelligent Frequency Hopping Scheme for Improved Bluetooth Throughput in an Interference-Limited Environment, Anuj Batra, Kofi Anim-Appiah, and jin-Meng Ho, IEEE 802.15-01/082r1
- [8] Selective Hopping for Hit Avoidance, KC Chen, HK Chen, CC Chao, IEEE 802.15-01/057r2
- [9] Adaptive Frequency Hopping A non-collaborative Coexistence Mechanism, IEEE 802.15-01/252r0
- [10] Bluetooth specification version 1.1, SIG,