

무선랜 시스템을 위한 적응형 빔포밍 시스템의 설계 및 구현

오주현¹ · 곽경훈¹ · 오영석² · 조성민² · 오혁준^{1*}

Design and Implementation of Adaptive Beam-forming System for Wi-Fi Systems

Joohyeon Oh¹ · Gyoungun Gwag¹ · Youngseok Oh² · Sungmin Cho² · Hyukjun Oh^{1*}

^{1*}Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

²SK Telecom Central R&D Center, Seongnam-si, Kyunggi-do, 463-784, Korea

요 약

본 논문은 무선랜 시스템에서 성능 향상을 위해, 안테나 빔을 전 방향으로 방사하는 기존의 방법과는 달리, 접속한 단말이 존재하는 방향으로만 안테나 빔을 방사하는 빔포밍 시스템을 설계 및 구현하였다. 해당 시스템은 패치형 배열 안테나를 통해 통신을 하며, DSP(Digital Signal Processor)에서 패킷 타입과 단말의 정보를 퀄컴사의 상용 칩으로부터 제공받아 FPGA(Field Programmable Gate Array)로 전송하는 방식으로 동작한다. DSP와 FPGA의 통신 방식은 데이터 송수신시 생기는 지연을 최소화하기 위해 PCI express(Peripheral Component Interconnect express)를 사용하였다. 단말 고유의 MAC(Media Access Control) 주소를 FPGA에서 저장하고 데이터베이스화함으로써 단말들의 위치를 관리할 수 있도록 하였다. 따라서 해당하는 단말로 패킷을 전송할 때, 추정된 위치로 빔을 방사하여 T/P(throughput)를 높일 수 있다. 단말의 위치는 패치형 배열 안테나를 통해 수신한 단말의 SINR(Signal to Interface plus Noise Ratio)을 프리엠블 구간에서 극대화하는 알고리즘을 사용하여 추정하였다. 제안하는 빔포밍 시스템을 Verilog HDL(Hardware Description Language)을 이용하여 FPGA와 퀄컴사의 상용 칩과 연동하여 구현하였으며 실제 운용 환경에서 시험을 통해 구현된 장비가 일반 AP(Access Point) 보다 더 높은 성능을 보이며 통신하는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

This paper presents the implementation and design of the advanced WI-FI systems with beam-forming antenna that radiate their power to the direction of user equipment to improve the overall throughput, contrast to the general WI-FI systems equipped with omni-antenna. The system consists of patch array antenna, DSP, FPGA, and Qualcomm's commercial chip. The beam-forming system on the FPGA utilizes the packet information from Qualcomm's commercial chip to control the phase shifters and attenuators of the patch array antenna. The PCI express interface has been used to maximize the communication speed between DSP and FPGA. The directions of arrival of users are managed using the database, and each user is distinguished by the MAC address given from the packet information. When the system wants to transmit a packet to one user, it forms beams to the direction of arrival of the corresponding user stored in the database to maximize the throughput. Directions of arrival of users are estimated using the received preamble in the packet to make its SINR as high as possible. The proposed beam-forming system was implemented using an FPGA and Qualcomm's commercial chip together. The implemented system showed considerable throughput improvement over the existing general AP system with omni-directional antenna in the multi-user communication environment.

키워드 : 무선랜, 빔포밍, DOA, 배열 안테나

Key word : Wireless LAN, Beam forming, DOA, Array antenna

접수일자 : 2014. 06. 02 심사완료일자 : 2014. 06. 30 게재확정일자 : 2014. 07. 15

* **Corresponding Author** Hyukjun Oh(E-mail:hj_oh@kw.ac.kr, Tel:+82-2-940-5132)

Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.9.2109>

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

최근 무선랜 투자가 급격히 늘면서 무선랜 접속 장치가 집중된 지역에서는 상호 간섭으로 인하여 통신 속도가 급격히 떨어지거나 통신 불능 상태가 되는 현상이 발생되고 있다.

이와 같이 심각한 무선랜 난개발의 문제점으로 인하여 무선랜의 T/P(throughput)가 급속도로 떨어져 결국 많은 스마트폰 사용자들이 무선랜을 끄고 이동 통신망을 통해서 데이터 서비스를 이용함으로써 이동 통신에 사용되는 자원의 한계로 네트워크의 과부하 문제를 야기하게 되는 현상이 발생하고 있다.

이러한 문제점의 기술적인 원인은 많은 무선랜 AP(Access Point)들이 통신 가능 범위가 비슷한 주파수 대역에서 중첩되어 설치됨으로써 무선랜 접속 장치 간의 신호들이 서로 중첩되어 간섭으로써 작용하기 때문이다. 이 때문에 T/P가 저하되게 된다. 현재 2.4GHz 주파수를 사용하는 IEEE 802.11 b/g/n 의 경우 무선랜의 채널을 지능적·가변적으로 할당하는 방식이 아닌 초기에 설정한 값이 그대로 고정되는 방식으로 운용되고 있어 간섭 회피가 효율적이지 못한 상황이다. 또한 대부분의 무선랜의 접속 장치 출력 파워가 최대 출력으로 고정되어 설정되어 장비가 운용되고 있어 주변 상황에 따라 지능적·가변적으로 출력 파워의 조절이 효율적으로 이루어지지 않고 있다.

이러한 문제의 해결책 중 하나로 채널 선택 알고리즘을 고려하지 않고, 위상배열 안테나를 이용한 적응형 빔포밍 기술을 이용한 방법이 제시되고 있다.

본 논문은 IEEE 802.11 b/g/n 통신 시스템에서 빔 형성 기술을 사용하여 단말들의 자유롭게 이동하면서 데이터 통신을 할 수 있는 적응형 빔포밍 시스템을 설계하고 구현하는 내용을 설명하고 있다.

구현된 장비와 스마트폰, 동일한 출력을 갖되 전 방향으로 빔을 방사하는 기존 무선랜 접속 장치와 비교 실험을 통해 알고리즘을 검증하였다. 이를 통해 구현된 적응형 빔포밍 장비가 일반 무선랜 접속 장치보다 T/P가 얼마나 향상되었는지 확인하였다.

실험 환경은 스마트폰 8대로 다중 사용자 통신 환경을 구성하였고, 위와 같은 통신 환경에서 동일한 출력을 갖는 일반 AP보다 높은 T/P를 보이며 통신 기능을 수행할 수 있음을 증명하였다.

II. 본 론

2.1. 빔포밍 소개

빔포밍은 안테나에서 특정한 방향을 따라 집중 방사된 에너지가 그 특정한 방향에 존재하는 장치 또는 장비들에 의해 수행되는 기능과 관련이 있다. 이러한 빔포밍의 목적은 원하는 특정 방향으로부터 고품질의 신호를 수신하거나 송신하는 것이다[1,2].

이러한 안테나로 구성된 시스템은 직접 안테나를 회전 및 조향하여 안테나 빔의 방향을 조정하는 기존의 기계적인 구동 방식에서 벗어나, 디지털 적으로 원하는 빔의 형상을 합성하거나 조향하여 탐지나 추적 및 통신이 가능하게 한다[3].

기존에는 감시 및 정찰 등의 군사적 용도로 합성 개구면 레이더 기술인 SAR(Synthetic Aperture Radar)에 많이 적용되었지만, 최근 산업분야에서도 이동통신 가입자 수의 증대의 이유로 시간과 장소에 구애받지 않고 높은 전송 속도가 요구되기에 빔포밍 기술에 대한 필요성이 크게 증대되고 있다[4].

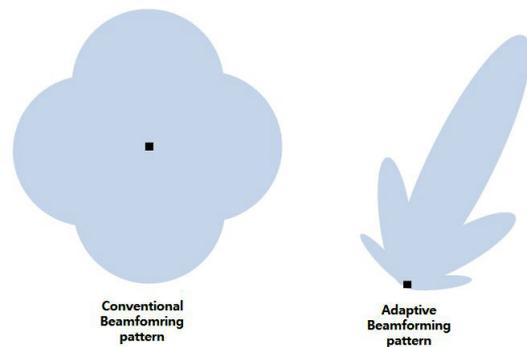


그림 1. 전 방향 안테나와 지향성 안테나의 방사 패턴
Fig. 1 The radiation patterns of omni-antenna and beam-forming antenna

그림 1은 전 방향 안테나와 지향성 안테나의 방사 패턴이다. 전 방향 안테나의 방사 패턴은 모든 방향으로 에너지가 방사되기 때문에 에너지 효율이 낮으며 원하는 단말에게도 데이터가 송신되어 보안상의 문제도 발생할 수 있다[5]. 그러나 지향성 안테나는 특정 방향으로만 에너지를 방사할 수 있기 때문에 상대적으로 낮은 송신 출력을 사용하여도 통신이 가능하며, 다른 방향에 존재하는 단말에게도 에너지가 방사되지 않아

보안상의 효과도 얻을 수 있다[6].

2.2. 제안하는 빔포밍 시스템

제안하는 빔포밍 시스템은 그림 2와 같이 4x3 형태의 총 9개의 방향으로 지향할 수 있는 지향성 안테나를 사용하고, 쿼컴사의 상용 칩으로부터 패킷 정보를 제공받아 동작하도록 설계되었다.

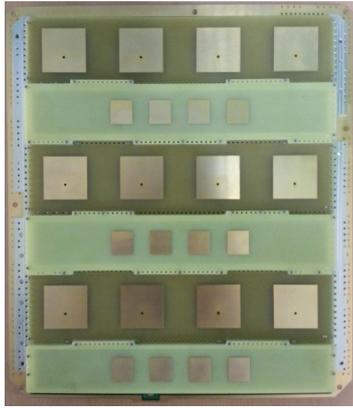


그림 2. 패치형 위상배열 안테나
Fig. 2 Patch type array antenna

사용한 안테나 전체 크기는 26 x 23 cm이며 방사패턴은 그림 3과 같다. 그림 3에서 m1 지점은 9dB의 이득을 가지며 m2, m6 지점은 중심으로부터 3dB 감소 되는 ±15도 지점이다.

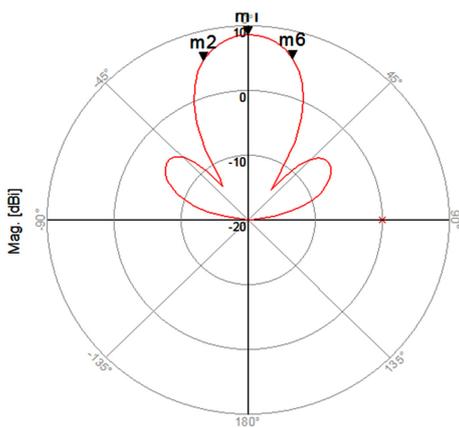


그림 3. 위상배열 안테나의 방사패턴
Fig. 3 Radiation pattern of the used array antenna

무선랜 시스템에 적응형 빔포밍 시스템의 경우 가장 핵심 사항은 무선랜 초기 접속 과정인 Association 및 Authentication을 거친 모든 단말의 위치를 파악하여 관리하여야 한다는 것이다. 또한 해당 단말이 이동하면서 통신을 시도할 경우에 대한 대비로 단말의 위치를 지속적으로 추정하여 업데이트하여야 한다. 시스템적으로 모든 기존 동작 시나리오에서 동작이 이루어져야 하므로 UL(Uplink), DL(Downlink), Initial Association 등 모든 단계에 대하여 적합한 알고리즘으로 설계되어야 한다[7].

그림 4는 전체적인 시스템 구조를 나타낸다. 전체적인 시스템 측면까지 고려한 스마트 빔포밍 알고리즘의 동작 방식은 다음과 같다.

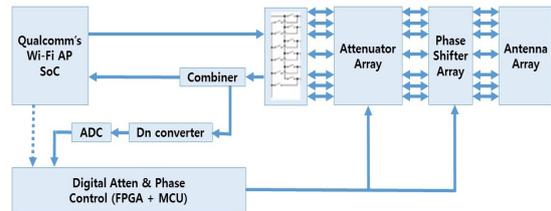


그림 4. 전체 시스템 구조
Fig. 4 Overall system architecture

송신의 경우 무선랜 AP가 패킷의 정보를 단말로 전송하기 전에 미리 FPGA(Field Programmable Gate Array)에게 알려주고 FPGA는 해당 정보를 파악하여 패킷에 맞는 방향에 맞게 안테나의 이득 및 위상값을 적용하여 해당 방향으로 빔 성형을 수행하며 수신 시, 그림 4와 같이 송신 때와 동일하게 FPGA는 무선랜 AP로부터 패킷에 대한 정보를 수신 받는다. 무선랜 AP가 수신하는 패킷을 기반으로 하여 각 패킷에 포함된 일종의 훈련 신호인 프리앰블 구간에서 SINR(Signal to Interface plus Noise Ratio) 값을 극대화하는 단말의 위치를 추정한다. 추가적으로 상용 칩에서 제공되는 채널 환경에 대한 정보를 동시에 이용하여 추정된 위치를 보정한다. 특정 단말과 통신 도중, 일정 시간 동안 단말로부터 패킷이 수신되지 않았는데도 단말 방향으로 빔을 지향하는 것은 비효율적이다. 그러므로 단말로부터 미리 정해진 시간 동안 패킷이 수신되지 않는다면, 빔포밍 모드에서 전 방향 방사 모드로 변경한 후 해당 단말의 위치 추정을 다시 수행하며 이를 통하여 해당 단말

에 대한 데이터베이스를 업데이트한다.

MAC Address	Current DOA	Update Time

그림 5. 단말 정보 테이블
Fig. 5 MS information table

저장된 정보들은 그림 5와 같이 데이터베이스화하여 정보들을 관리한다. 또한 일정 시간 안에 패킷이 수신되지 않는다면 다시 전 방향 방사 모드로 변경한다.

마지막으로 적응형 빔포밍 AP와 통신을 마치기 위한 단말로부터 De-authentication 패킷, De-association 패킷을 수신했을 경우, 데이터베이스에서 해당 단말의 정보를 제거함으로써 효율적으로 데이터베이스를 관리할 수 있도록 구성하였다.

2.3. 빔포밍 알고리즘

Wi-Fi 패킷의 앞에 위치한 16usec의 프리앰블 구간을 이용하여 수신된 패킷의 방향에 맞춰 위상배열 안테나의 이득과 위상을 조절한다. 프리앰블 구간 동안 수렴된 이득과 위상값을 통해 향상된 신호 품질 특성을 가진 데이터를 수신하게 된다[8,9].

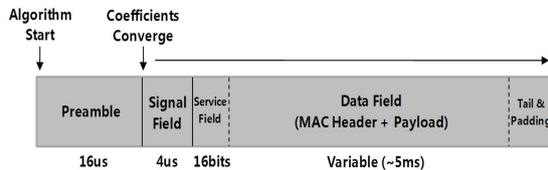


그림 6. 무선랜 기본 패킷 구조
Fig. 6 Basic Packet structure

프리앰블에 기반을 둔 빔포밍 방법은 기본적으로 적응형 알고리즘을 적용하는 빔포밍 기법으로써 원하는 목적함수를 최소로 하도록 자동으로 안테나의 이득과 위상을 조절하는 것이다. 본 논문에서는 LMS(Least Mean Square) 알고리즘을 사용하였다[10].

$$W_{k+1} = W_k + \mu \epsilon_k^* X_k \quad (1)$$

식 (1)에서 W_k 는 위상배열 안테나에 적용될 위상값과 이득을 나타내는 계수이고 ϵ_k 는 이미 알려진 프리앰

블 데이터와 수신된 신호와의 오차를 나타내며 X_k 는 수신신호이다. μ 는 LMS 알고리즘에서 한 번의 계수 값 조정에서 계수를 조정하는 정도를 조절하는 작은 값이다. 실제로 위상배열 안테나의 위상과 이득은 제한된 비트 길이의 해상도를 가지고 있으므로 W 를 해당 비트 길이로 양자화한 후 적용한다. 그림 7은 LMS 알고리즘에 기반을 둔 빔포밍 알고리즘을 도시한 것이다.

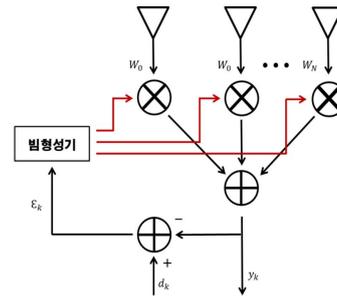


그림 7. LMS 알고리즘 기반 빔포밍 시스템
Fig. 7 LMS algorithm based beam-forming system

2.4. 실험 및 성능평가

제안된 무선랜 빔포밍 시스템을 실제 구현하여 검증을 수행하였다. Verilog HDL(Hardware Description Language)을 이용하여 기술되었으며, Modelsim, DU-Meter, J-Perf와 Xilinx Chipscope를 이용하여 검증하였다.

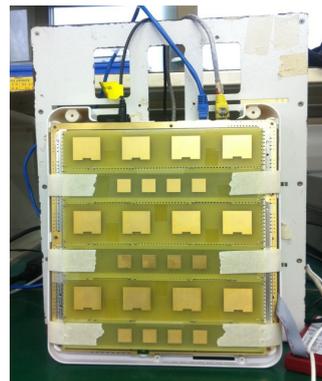


그림 8. 구현된 전체 시스템
Fig. 8 Implemented overall system

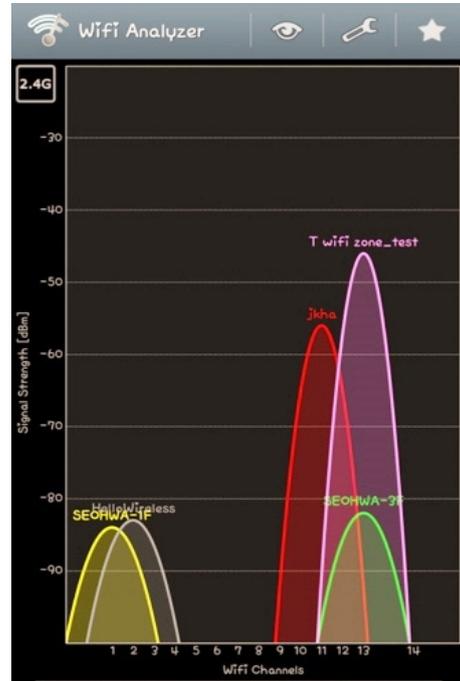
개발 프로그램으로 Xilinx ISE 14.3을 이용해 합성하였고, Xilinx Spartan6 계열의 XC6SLX100T-2FGG48을

사용하였다. 그리고 JTAG connector를 이용하여 FPGA에 설치되어 구동되었다. 또한 PCIe 1 Lane을 사용하여 쉘컴의 상용 칩과 데이터를 송수신 한다.

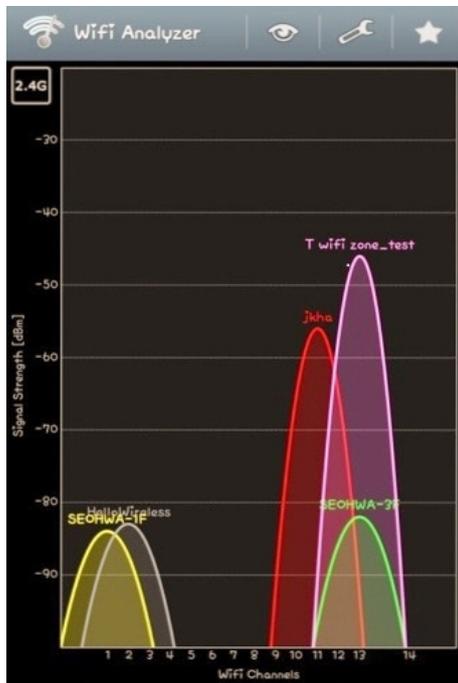
표 1. 제안하는 알고리즘의 FPGA 합성 결과
Table. 1 FPGA synthesis result of proposed algorithm

Logic Utilization	Used	Available	Utilization
Number of Slice Registers	4549	126576	3%
Number of Slice LUTs	9576	63288	15%
Number of fully used LUT-FF pairs	3047	10743	28%
Number of total occupied slices	3810	15822	24%
Block RAM Usage (RAMB16BWER)	127	268	47%

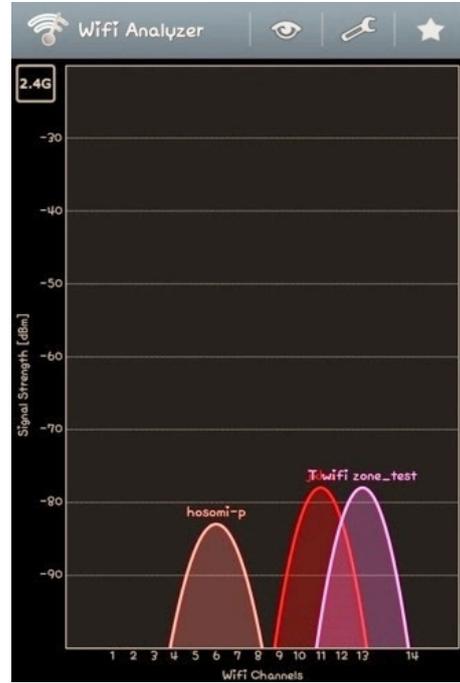
해당 알고리즘을 FPGA로 합성한 결과는 표1과 같다. FPGA 합성 프로그램은 ISE 14.3 Version에 포함된 XST를 사용하였다.



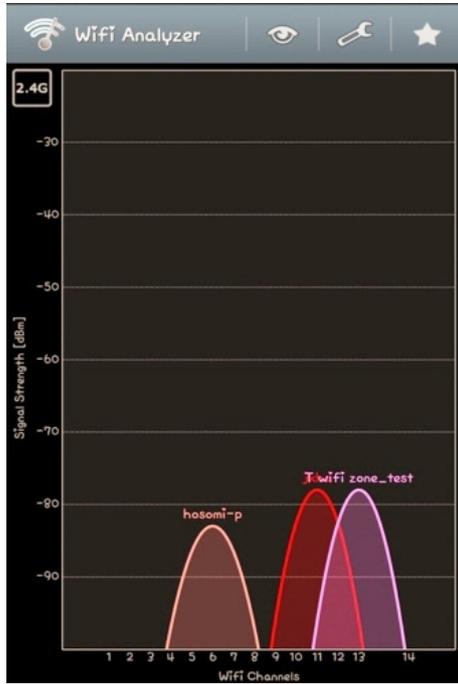
(b)



(a)



(c)



(d)

그림 9. WiFi Analyzer Application 으로 분석한 각 지점에서의 통신 환경 (a) P1에서의 통신환경 (b) P2에서의 통신환경 (c) P3에서의 통신환경 (d) P4에서의 통신환경

Fig. 9 Communication Environment at Each point analyzed WiFi Analyzer Application (a) Communication Environment at P1 (b) Communication Environment at P2 (c) Communication Environment at P3 (d) Communication Environment at P4

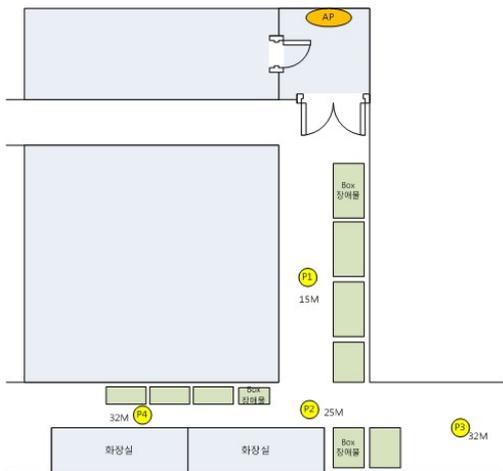


그림 10. 실험환경

Fig. 10 Field test environment

성능 검증 실험으로 일반 출력을 갖는 일반 AP 대비 적응형 빔포밍 AP의 성능을 비교하기 위해 실험하였다. 정확한 테스트를 위해 이상적인 환경인 LOS(Line Of Sight) 환경이 아닌 실제 AP가 많이 사용되는 NLOS(Non Line Of Sight) 환경에서 4군데의 point에서 실험을 진행하였다.

그림 9는 WiFi Analyzer Application으로 확인해본 각 지점에서의 통신 환경이다. 왼쪽 상단의 그림부터 오른쪽 하단의 그림까지 그림 10의 point1부터 point4까지의 통신환경을 나타내고 있다. 해당 그림을 통해 1번과 2번 point에 AP가 밀집되어 있고, 3번과 4번 point는 이보다 덜 밀집되어있는 것으로 확인되었다.

제안된 빔포밍 시스템을 탑재한 AP와 일반 AP에 대한 T/P를 각각의 PC에서 확인하였다. T/P의 경우 J-Perf와 DU meter를 이용하여 측정하였으며, 특정 시간 동안 측정된 결과의 average 값을 반영하였다. RSSI(Received Signal Strength Indication) 값은 스마트폰에서 측정된 값을 반영하였다.

표 2. 5CH 에서의 일반 AP 대비 스마트 빔포밍 AP 최소 성능 향상 시험 결과표

Table. 2 Minimum performance improvements of the smart beam-forming AP over the normal AP in 5CH

5CH	Normal AP		Beam-forming AP	
	RSSI	T/P	RSSI	T/P
P1	-39 ~ -46	30.5	-35 ~ -44	41
P2	-46 ~ -52	34.5	-43 ~ -53	41.3
P3	-67 ~ -73	19.1	-63 ~ -69	33.8
P4	-73 ~ -78	5.2	-65 ~ -73	21.1

표 3. 13CH 에서의 일반 AP 대비 스마트 빔포밍 AP 최소 성능 향상 시험 결과표

Table. 3 Minimum performance improvements of the smart beam-forming AP over the normal AP in 13CH

13CH	Normal AP		Beam-forming AP	
	RSSI	T/P	RSSI	T/P
P1	-40 ~ -47	32.1	-33 ~ -40	39.6
P2	-45 ~ -49	33.8	-42 ~ -49	39.4
P3	-66 ~ -73	17.2	-63 ~ -72	27.1
P4	-72 ~ -78	3.9	-72 ~ -77	3.8

구현된 시스템의 성능을 측정하기 위하여 2.4GHz 대역의 Wi-Fi 13개 Channel 중 5번과 13번 Channel 에서 테스트를 진행하였다. 실제 일반 AP로는 통신 불능 상태가 되는 경우에도 제안된 시스템은 통신이 가능한 경우가 많았으나 이 경우 T/P 개선율이 무한대가 되어 의미 있는 통계적 값으로 정리하기에 적합하지 않으므로 이런 경우는 결과 분석에서 제외하였다.

표 2, 표 3은 여러 번의 실험 중 가장 최소의 성능 향상이 일어난 경우에 대한 결과를 정리한 것이다. 해당 알고리즘이 적용된 스마트 빔포밍 AP가 같은 출력을 갖는 일반 AP 보다 최소 RSSI가 5~8dB 정도 좋으며 T/P의 경우에도 최소 7~16Mbps 정도 더 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

본 논문에서는 무선랜 통신 시스템에서 같은 출력을 갖는 AP보다 더 높은 T/P로 단말들과 데이터 통신을 할 수 있는 적응형 빔포밍 시스템을 제안하였고, FPGA를 이용하여 설계 및 구현하고 실제 퀄컴사의 상용 칩과 연동 테스트를 통해 그 성능을 보였다.

설계된 적응형 빔포밍 AP는 실험 결과 움직이는 단말의 위치를 정확하게 추정하였으며, 같은 출력을 갖는 일반 AP보다 더 나은 RSSI와 T/P를 갖는 것을 보였다.

해당 알고리즘 개발을 통해 무선랜 간 간섭 제거 효과를 기대할 수 있다. 또한 5세대 이동통신 기술 중 하나인 Massive MIMO(Multiple Input Multiple Output)를 비롯하여, 현재 다양한 분야에서 적응형 빔포밍 기술이 사용되고 있다[11,12].

따라서 해당 알고리즘과 같은 적응형 빔포밍 관련 기술 연구를 통해 핵심 기술을 확보, 관련 산업을 활성화시켜 저가로 공급할 수 있는 기대효과를 얻을 수 있다[13].

감사의 글

본 논문은 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신방송 연구개발사업 [14-911-01-001, 준밀리미터파 채널적응형 안테나 및 송수신개발], 중소기업청에서 지원하는 2013년도 중소기업기술혁신개발사업 (No.S2084651), 그리고 2013년도 광운대학교 교내학술연구비의 지원을 통해 이루어졌음을 밝힙니다.

REFERENCES

- [1] M. Benedetto and B. Vojcic, "Ultra wide band wireless communications: a tutorial," *Journal of Communications and Networks*, Vol. 5, No. 4, December 2003.
- [2] T. Tanaka, R. Miura, and Y. Karasawa, "Implementation of a Digital Signal Processor in a BDF Self Beam-Steering Array Antenna," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E80-B, No.1, Jan. 1997.
- [3] H. Steyskal, "Digital Beam-forming Antenna: An Introduction," *Microwave Journal*, Jan. 1987, pp.107-114.
- [4] H. Steyskal, "Digital Beam-forming Antenna: An Introduction," *Microwave Journal*, Jan. 1987, pp.107-114.
- [5] H. Steyskal and John F. Rose, "Digital Beam-forming for Radar Systems," *Microwave Journal*, Jan.1989, pp.121-138.
- [6] L. C. Godara, *Smart Antennas*, CRC Press, 2004, pp. 325-357
- [7] I. J. Gupta and K. Griffith, "Simulations of antennas mounted on rotorcrafts," in *Proc. Institute of Navigation's 2008 GNSS Meeting*, pp. 2766-2771, Savannah, GA, Sep. 2008.
- [8] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*, Wiley, 2010.
- [9] Steven C. Chapra, *Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists 3/E*, McGraw-Hill, pp.339-345, 2012.
- [10] Faires/Burden, *Numerical Methods (4th edition)*, BROOKS/COLE, pp.111-123, 2013

- [11] T. Tanaka, R. Miura and I. Chiba, Y. Karasawa, "An ASIC Implementation of a Digital Beam-forming Multibeam Antenna," *IEICE Trans.*, Vol.J78-B-II, No.9, Sep. 1995, pp.602-610.
- [12] L. Eber, "Digital Beam-forming Antenna," Rome Air Development Center Technical Report, RADC-TR-88-83, June 1998.
- [13] Thomas Gebauer, Heins G. Gockler, "Channel-Individual Adaptive Beamforming for Mobile Satellite Communications", *IEEE* Feb. 1995, pp.439-441.



오주현(Joohyeon Oh)

광운대학교 전자통신공학과 석사
LIG 넥스원 통신연구센터, Project 4팀 연구원
※관심분야 : 무선통신, 통신신호처리



곽경훈(Gyounghun Gwag)

광운대학교 전자통신공학과 석사과정
※관심분야 : 무선통신, 통신신호처리



오영석(Youngseok Oh)

한국과학기술원 전자공학 석사
한국과학기술원 전자공학 박사
SK텔레콤 Network기술원 Broadband Tech. Lab 매니저
※관심분야 : 무선통신, 무선백홀, Wi-Fi



조성민(Seongmin Cho)

국민대학교 전자공학 박사 수료
SK텔레콤 Network 기술원
SK텔레콤 China R&D 그룹
SK텔레콤 Network기술원 Broadband Tech. Lab 팀장
※관심분야 : 유무선 통합 네트워크, Wi-Fi, 광 전달/가입자 네트워크, CDN



오혁준(Hyukjun Oh)

한국과학기술원 전기및전자공학과 공학석사
한국과학기술원 전기및전자공학과 공학박사
미국 스탠포드 대학교 박사후과정
미국 퀄컴 QCT 3GPP 사업부
광운대학교 전자통신공학과 교수
※관심분야 : 무선통신, 통신신호처리, 군통신시스템, 레이더신호처리