

# SPA 안테나 기반 단일 RF 체인을 사용한 빔포밍 기능 구현

송재수<sup>◦</sup>, 서 석<sup>\*</sup>, 김형진<sup>\*\*</sup>, 조성철<sup>\*\*\*</sup>, 오정훈<sup>\*</sup>

## Design of Beamforming Scheme Using Single RF Chain Based on SPA Antenna

Jae-Su Song<sup>◦</sup>, Seok Seo<sup>\*</sup>, Hyung-jin Kim<sup>\*\*</sup>, Seong-chul Cho<sup>\*\*\*</sup>, Jung-hoon Oh<sup>\*</sup>

### 요 약

본 논문에서는 다수의 기생소자를 사용하여 빔패턴을 제어할 수 있는 SPA(Switched Parasitic Array) 안테나를 설계 및 제작하고, 이를 실제 무선통신 시스템에 적용하여 빔포밍 기능을 구현함으로써 시스템 성능이 향상됨을 확인한다. SPA 안테나는 단일 능동 안테나와 그 주위에 다수의 기생소자들로 구성되는 안테나로서 기생소자의 스위칭을 통하여 빔패턴 제어가 가능한 안테나이다. 이러한 안테나 특성을 이용하면 기존의 다중 안테나 시스템으로 구현되는 빔포밍 기능을 SPA 안테나로 구현이 가능하다. SPA 안테나를 이용한 빔포밍 시스템은 단일 능동 안테나와 단일 RF 체인을 사용하기 때문에 저비용, 저복잡도 및 저전력의 통신 시스템을 구현할 수 있다. 본 논문에서는 SPA 안테나를 통한 빔포밍 이득을 실제 시스템 레벨에서 확인하기 위하여 기 구현된 무선통신 시스템 상에서 SPA 안테나를 적용하는 경우와 기존의 omni 안테나를 사용하는 경우에 대하여 성능 파라미터(SNR, PER, 전송속도)를 측정하여 비교 분석한다.

**Key Words** : SPA, Parastic, Beamforming, Single RF chain

### ABSTRACT

In this paper, we design and implement SPA (Switched Parasitic Antenna) antenna which can control its beampattern using multiple parasitic elements. By applying SPA antenna to wireless communication system and implementing beamforming scheme, we show that SPA antenna can be used to improve the performance of wireless communication systems. SPA antenna consists of a single active antenna and multiple parasitic elements around the active one, and can control its beampattern by switching the parasitic elements. Using this characteristic of the SPA antenna, it is possible to impelementent beamforming technique with single RF chain, which enables to design low cost, low complexity and low power wireless communication systems. In order to verify the beamforming gain, we measure and analyze the system level performance, such as SNR, PER, and throughput.

※ 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.R0101-16-244, 초연결 스마트 서비스를 위한 5G 이동통신 핵심 기술 개발)

◦ First and Corresponding Author : Electronics and Telecommunications Research Institute(ETRI), heretic@etri.re.kr, 정희원

\* 한국전자통신연구원, 정희원

\*\* 한국전자통신연구원 선임연구원, 정희원

\*\*\* 한국전자통신연구원 책임연구원

논문번호 : KICS2016-03-047, Received March 25, 2016; Revised June 7, 2016; Accepted June 9, 2016

## I. 서 론

오늘날 이동통신 환경은 스마트 기기와 같은 다양한 모바일 디바이스의 출현과 이를 이용하는 사용자들의 증가로 인하여 데이터 사용량이 폭증하고 있다. 또한 트래픽 형태도 과거 음성이나 문자 위주의 저용량 데이터에서 높은 전송 속도가 요구되는 고해상도 동영상류로 주류를 이루게 되었다.<sup>[1,2]</sup>

이와 같은 통신 환경의 변화에 따라 이동통신 시스템은 더욱 높은 전송 용량과 신뢰도 높은 전송 방식이 요구되며, 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하려는 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구 중의 하나로 송수신단에서 다수의 안테나를 사용하는 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 기술이 연구되어 왔다. MIMO 기술은 추가적인 주파수나 전력을 사용하지 않고도 채널 용량을 증대 시키거나(multiplexing gain) 전송 신뢰도를 높이는 (diversity gain) 효과를 얻을 수 있다. 최근의 5G 이동통신 시스템에서는 MIMO의 안테나 수를 획기적으로 늘린 Massive MIMO 기술이 연구되고 있다.

그러나 기존 MIMO 기술의 경우, 안테나별로 RF 체인이 필요하게 되는데 RF 체인은 대역통과필터, LNA(Low Noise Amplifier), 믹서 및 ADC (Analog-To-Digital Converter) 등으로 구성된다. 이러한 RF 부품들은 가격이 비싸고 전력소모가 커서 이동통신시스템 구현시 문제가 된다. 특히 이동통신 시스템의 광대역화에 따라서 ADC의 동작속도가 높아지면서 전력소모가 증가하고 부품가격이 상승하게 된다. 또 한가지 기존 MIMO 시스템의 문제점은 부피가 커진다는 점이다. 일반적으로 MIMO 시스템에서 안테나간 coupling을 방지하고 안테나별로 독립적인 채널이 형성되는 것을 보장하기 위해서 안테나간 간격을 반송파의 반파장 이상으로 이격시켜야 한다. 따라서 안테나 개수가 증가함에 따라 부피가 커지게 된다. 이러한 이유로 MIMO 기술은 그 기술적 효과에도 불구하고 주로 기지국에만 적용되고 단말에 적용하는데는 한계가 있었다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 단일 RF 체인을 이용하여 MIMO 기술을 구현하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있다.<sup>[3,4]</sup> 이러한 연구의 하나로 능동안테나와 기생소자간 mutual coupling 현상을 이용하여 빔패턴을 제어할 수 있는 안테나가 연구되고 있으며 이 안테나를 이용하여 기존의 다중 안테나 구조인 MIMO 기술을 단일 안테나 구조로 구현할 수 있음이 알려져 있다.<sup>[5]</sup> 여기에는 기생소자의 로드값을 가변시

키는 방식의 ESPAR와 On/Off 형태로 스위칭하는 방식의 SPA 안테나로 구분된다.

본 논문에서는 SPA 안테나를 제작하고 기생소자의 로드값을 스위칭하여 빔패턴을 제어할 수 있음을 보이고, SPA 안테나를 실제 무선통신 시스템<sup>[6]</sup>에 적용하여 빔포밍 기능을 구현한다. 이를 위해서 기존 무선통신 시스템의 프레임 구조를 분석하고 프레임 구조에 맞도록 안테나 제어신호를 발생시키는 빔포밍 모듈을 구현한다. 마지막으로 SPA 안테나에 의해 얻어지는 빔포밍 이득을 시스템 레벨의 성능 측정을 통해서 확인한다.

## II. SPA 안테나

### 2.1 SPA 안테나 이론

그림 1에서와 같이 RF 체인에 연결되는 단일 능동소자(active element)와 다수의 수동소자(passive element)로 구성되고 수동소자의 끝단에 리액턴스값을 변경시킬 수 있는 가변소자가 부하로 달려있는 구조의 안테나를 ESPAR(Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) 안테나 라고 한다. ESPAR 안테나는 가변 리액턴스 값을 변경시킴으로써 능동소자와 수동소자간 mutual coupling을 변경시켜서 결과적으로 방사패턴을 제어할 수 있는데 가변소자를 스위치(On/Off)로만 동작시키는 것을 SPA 안테나라고 한다<sup>[7]</sup>. 즉 ESPAR 안테나에서 리액턴스 값을 0 또는 무한대로만 설정하면 SPA 안테나를 모델링 할 수 있기 때문에 여기서는 ESPAR 안테나 모델링으로 SPA 안테나를 기술한다.

SPA 안테나 구조에서 M개의 수동소자는 단일 능동소자를 중심으로  $\phi_m = 2\pi(m-1)/M$ ,  $m \in \{1, \dots, M\}$  인 azimuth angle에 위치한다.

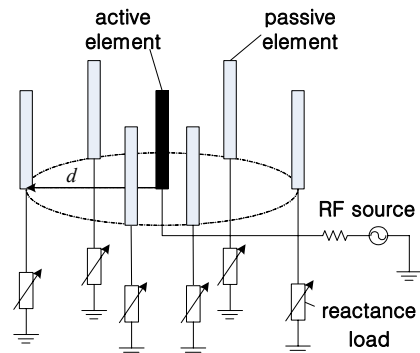


그림 1. SPA 안테나 구조  
Fig. 1. SPA antenna structure

이때 빔패턴은 다음과 같이 표현된다.

$$B(\phi) = \mathbf{w}^T \mathbf{a}(\phi) \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{a}(\phi)$ 는 azimuth 각도  $\phi$ 로부터 수신되는 평파(plane wave)에 대응되는 steering 벡터를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{a}(\phi) = [1 \ e^{-j\kappa d \cos(\phi - \phi_1)} \ \dots \ e^{-j\kappa d \cos(\phi - \phi_M)}] \quad (2)$$

여기서  $d$ 는 그림1에서와 같이 능동소자와 수동소자 간 거리이며,  $\kappa$ 는 파수(wave number)로서 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

(1)에서  $\mathbf{w} \in C^{(M+1) \times 1}$ 는 등가 weight 벡터로서 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{w} = (\mathbf{Z} + \mathbf{X})^{-1} \mathbf{u} \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{Z} \in C^{(M+1) \times (M+1)}$ 는 안테나 소자들 간의 상호 임피던스 행렬이고,  $\mathbf{u} = [1, 0, \dots, 0]^T$ 는 칼럼 선택 벡터이다.  $\mathbf{X}$ 는 대각 요소가 능동소자의 입력 임피던스와 수동소자의 리액턴스 값으로 구성되는 대각행렬이며 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{X} = \text{diag}([Z_L \ j\mathbf{x}]) \quad (5)$$

여기서  $Z_L$ 은 그림1에서와 같이 능동소자의 입력 임피던스이며  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]$ 는 기생소자의 리액턴스 값을 나타내는 부하 벡터이다.

SPA 안테나의 능동소자의 입력 임피던스와 반사계수는 다음과 같이 표현된다<sup>8)</sup>.

$$Z_{in} = \frac{\mathbf{u}^T \mathbf{Z} (\mathbf{Z} + \mathbf{X})^{-1} \mathbf{u}}{\mathbf{u}^T (\mathbf{Z} + \mathbf{X})^{-1} \mathbf{u}} \quad (6)$$

$$\Gamma_{in} = (Z_{in} + Z_L)^{-1} (Z_{in} - Z_L) \quad (7)$$

### 2.2 SPA 안테나 구현

구현된 SPA 안테나의 형상은 그림2, 3과 같다. 기생소자 개수는 4개로 구성되며 빔패턴 제어를 위한 스위치는 PIN 다이오드로 구현된다. 이것은 PIN 다이

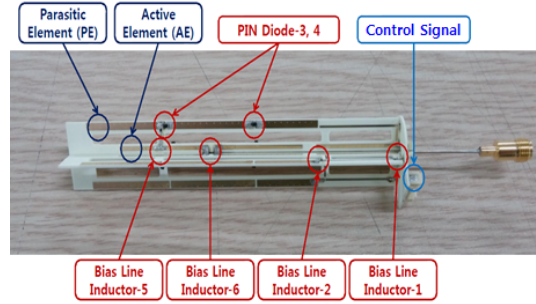


그림 2. SPA 안테나 구성  
Fig. 2. SPA antenna configuration



그림 3. SPA 안테나 schematic  
Fig. 3. SPA antenna schematic

오드에 순방향 전압이 인가되면 저항이 0에 근접하고 역방향 전압이 인가되면 저항이 무한대에 가까워지는 성질을 이용한 것이다. 또한 PIN다이오드의 스위칭 시간은  $10^{-9}$ 초 정도 이므로 빔패턴을 고속으로 제어하고자 하는 SPA 안테나 제어에 적합하다. 기생소자의 스위칭 제어신호는 5V의 DC 신호를 외부에서 인가할 수 있도록 구현된다. 구현된 안테나의 체원은 표 1과 같다. 일반적으로 SPA 안테나 길이가 길어지면 빔이득이 개선되는데 기생소자의 길이가 길어지면 PIN 다

표 1. SPA 안테나 체원  
Table 1. SPA antenna specifications.

Parameter	Value
Number of passive element	4
Switch	PIN diode
Frequency	2.4GHz
Active element length	60mm
Passive element length	75mm
Radius( $d$ )	9.2mm

이오드의 switching 기능이 떨어지기 때문에 일정 거리마다 PIN 다이오드를 배치해야 한다. 그러나 PIN 다이오드 자체의 손실에 의해 빔이득이 상쇄되는 효과가 있기 때문에 안테나 길이와 PIN 다이오드 개수 간의 trade-off 관계를 고려하여 설계해야 하며 본 구현에서는 이러한 관계를 고려하여 2개의 다이오드를 사용하여 SPA 안테나를 구현하였다.

구현된 SPA 안테나의 제어 신호 인가에 따른 빔패턴이 그림 4와 그림 5에 제시되어 있다. 그림 4에서는 4개의 기생소자 제어신호 중에서 하나를 인가했을 때의 빔패턴을 나타낸다. 안테나 이득은 5dB 정도를 보

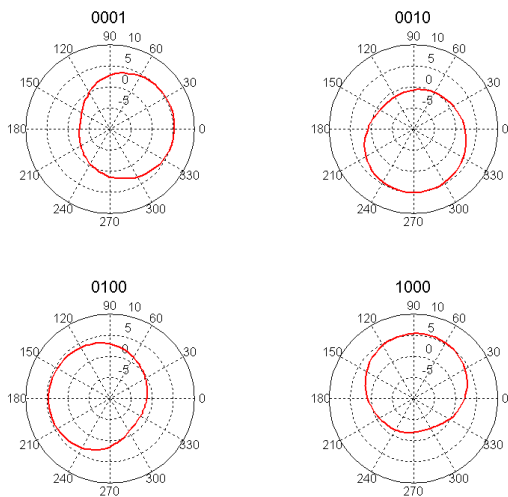


그림 4. SPA 빔패턴(1bit on)  
Fig. 4. SPA beampattern(1bit on)

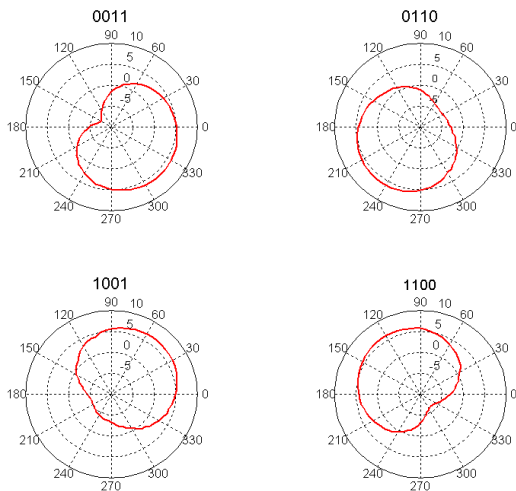


그림 5. SPA 빔패턴(2bit on)  
Fig. 5. SPA beampattern(2bit on)

인다. 그림 5에는 두개의 제어신호를 인가했을 때의 빔패턴을 나타낸다. 이 경우는 안테나 이득이 6dB를 나타내고 있다.

SPA 안테나의 생성 가능한 빔패턴 수는 기생소자의 수를 M이라고 할때  $2^M - 1$ 개 (모든 기생소자를 on 하는 경우 제외) 이다. 그러나 기생소자를 on시키는 개수와 위치에 따라서 안테나 입력 임피던스값이 달라지기 때문에 VSWR 특성을 측정해야 한다. 그림 6, 그림 7은 각각 제어신호를 1개, 2개 인가하는 경우의 주파수에 따른 VSWR을 나타낸다. 2.4GHz부터 2.5GHz 대역에서 제어신호 1개 또는 2개를 인가하는 경우 VSWR이 2이하를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 빔포밍 기능 구현에는 전방향성 빔패턴과 제어 신호를 1개 또는 2개 인가하는 9개의 빔패턴을 사용한다.

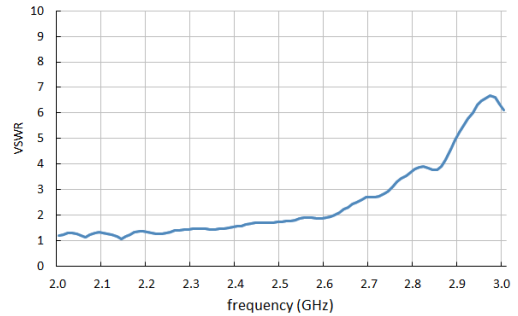


그림 6. VSWR (1bit on)  
Fig. 6. VSWR (1bit on)

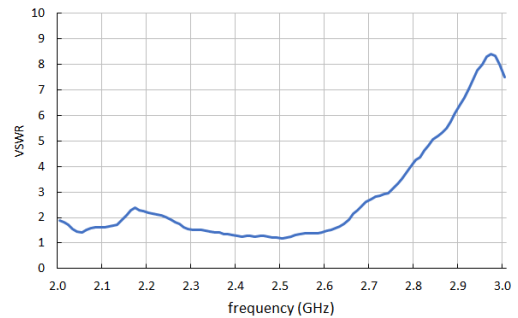


그림 7. VSWR (2bit on)  
Fig. 7. VSWR (2bit on)

표 2. SPA 안테나 특성  
Table 2. SPA antenna characteristic.

Parameter	Value
Number of beams(used)	15(9)
Gain(dBi)	5~6.5
Beamwidth(deg)	120~130
VSWR	< 2.0

### III. SPA 안테나 기반 빔포밍 기능 구현

앞에서 구현된 SPA 안테나를 사용하여 실제 무선 통신 시스템에 빔포밍 기능을 구현한다. 여기서는 기존에 구현되어 있는 무선 통신 시스템(모뎀)을 변경하지 않고 SPA 안테나와 MAC 펌웨어 변경을 통하여 빔포밍 기능을 추가하고자 한다.



그림 8. 무선 통신 시스템 구성도  
Fig. 8. Wireless system configuration.

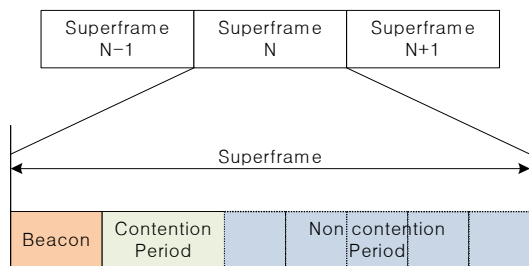


그림 9. 무선 시스템 프레임 구조  
Fig. 9. Wireless system frame structure.

#### 3.1 빔포밍 적용 시스템

빔포밍 기능을 구현하고자 하는 대상 무선통신 시스템은 KS X 4650-2<sup>6)</sup> 규격에 의해 정의되는 시스템으로서 전송방식은 Binary-CDMA를 사용하고 CSMA/CA방식과 TDMA의 다중 접속 방식을 혼용하여 사용한다. 전체 시스템은 기지국 기능을 담당하는 하나의 master와 단말에 해당하는 다수의 slave로 구성된다. 시스템의 무선 프레임 구조는 그림9와 같이 비콘구간, 경쟁구간(CSMA/CA), 할당구간(TDMA)으로 구성된다. 비콘구간에서는 master에서 범위내에 있는 slave에게 기준 시점을 알려주고 자원할당 정보를 전송하는 구간이며, 경쟁구간은 master 및 slave가 시스템 운영에 필요한 제어절차를 수행하기 위해 CSMA/CA방식으로 통신이 이루어지는 구간이다. 할당구간은 master에 의해서 각 slave에 time slot을 할당하여 특정 slave가 독점적으로 데이터를 전송할 수 있는 구간이다. 할당 구간의 자원 할당 정보는 비콘구간에서 전송된다. 또한 위 무선 시스템은 slave에서

master(상향링크)로 대부분의 트래픽이 발생하는 특징이 있다.

#### 3.2 빔포밍 방식

빔포밍 기능을 구현하는데 있어서 먼저 빔포밍 방식이 정해져야 하는데 slave에서 구현하는 방법, master에서 구현하는 방법, 또는 slave와 master에서 동시에 구현하는 방법을 고려할 수 있다. 또한 각 노드에 적용하는 빔포밍 방식에 있어서도 송신 빔포밍, 수신 빔포밍 또는 송수신 빔포밍을 고려할 수 있다. 그러나 두 노드에 모두 빔포밍 기능을 구현하거나 송신 빔포밍을 구현하기 위해서는 두 노드간에 빔포밍을 위한 제어 메시지를 교환하는 절차가 필요하다. 따라서 기존 무선 시스템(규격)을 변경하지 않고 빔포밍 기능을 구현하기 위해서는 수신 빔포밍 방식을 선택해야 한다. 또한 위 시스템의 경우 slave에서 master로 주로 데이터 전송이 이루어지므로 master에서의 수신 빔포밍을 구현하도록 한다.

한편, 비콘 구간의 경우 범위 내에 존재하는 모든 slave가 수신을 해야 하기 때문에 비콘구간에 대하여 특정 방향으로 빔포밍을 수행할 경우 비콘을 수신하지 못하는 slave가 존재할 수 있다. 따라서 비콘구간에서는 빔포밍을 적용하기 어렵다. 또한 경쟁구간에서는 각 기능 노드가 비동기 방식으로 동작하기 때문에 빔포밍 기능을 적용하기가 어렵다. 즉 어떤 노드가 언제 데이터를 전송할지 모르기 때문에 수신 빔포밍을 적용하기 어렵게 된다. 반면 TDMA 방식으로 특정 slave에게 자원이 할당되는 할당구간의 경우, master에서 time slot을 할당하기 때문에 빔포밍 적용이 가능하다. 따라서 요약하면 상향링크의 성능을 높이도록 master에서 수신 빔포밍 방식을 적용하며 전체 슈퍼 프레임 중에서 할당 구간에서만 빔포밍을 수행한다.

#### 3.3 빔포밍 구현

SPA 안테나를 이용한 빔포밍 절차는 그림 10과 같다. 빔포밍 동작은 두가지 상태(beamtracking과 beamforming)로 구성된다.

먼저 beamtracking 상태는 현재 채널환경에서 master와 slave간 통신을 수행하는데 최적의 빔패턴을 찾아내는 동작을 수행하는 상태이다. 최적의 빔패턴을 탐색하기 위해서는 SPA안테나에 제어신호를 인가하여 빔패턴을 생성하고 해당 빔패턴을 통하여 수신한 패킷의 수신 성능값(RSSI 또는 SINR)을 측정하는 동작이 필요하다. SPA안테나에서 정의되는 모든 빔패턴에 대하여 이러한 성능 측정을 반복한다.

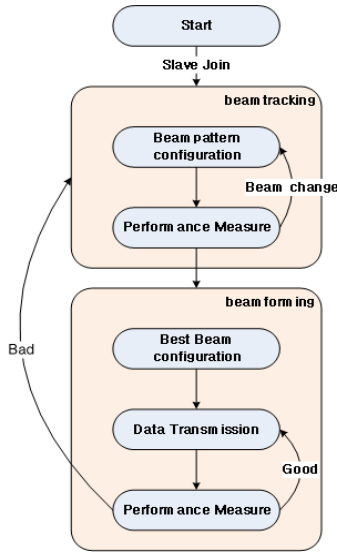


그림 10. 빔포밍 절차  
Fig. 10. Beamforming procedure

Beamforming 상태에서는 beamtracking 상태에서 측정된 빔패턴 성능 측정값을 기준으로 최적의 빔패턴을 선택하고 해당 빔패턴을 생성하여 데이터 송수신을 수행하는 상태이다. Beamforming 상태에서 채널 환경이 바뀌게 되면 사용중인 빔패턴의 성능이 열화될 수도 있기 때문에 계속해서 수신 패킷의 성능을 모니터링 하다가 성능 측정값이 임계치이하로 낮아지면 다시 beamtracking 상태로 천이하여 최적 빔패턴을 찾아야 한다.

위와 같은 빔포밍 절차에서 빔패턴 성능을 측정하

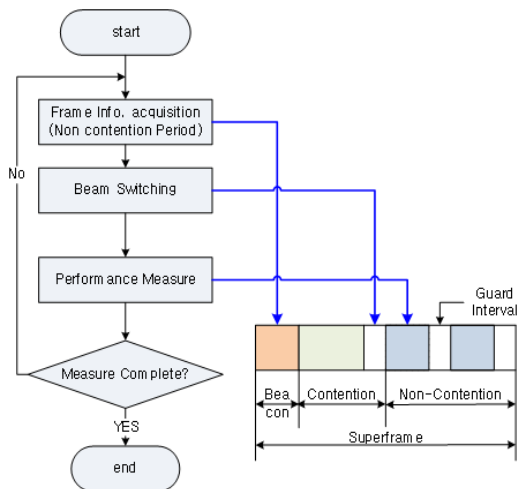


그림 11. 빔 패턴 성능 측정에 따른 무선 프레임 구조  
Fig. 11. Radio frame structure for beam pattern measurement.

는 동작은 무선 프레임 구조와 동기가 맞게 수행되어야 한다. 각 slave별로 할당구간에 할당된 time slot의 동기 정보를 얻어서 해당 time slot의 바로 앞 가드타임에 빔 스위칭 동작이 수행되고 해당 time slot에서 수신되는 패킷의 성능 측정값을 획득하게 된다. 빔패턴 성능 측정과 무선 프레임 구조의 관계는 그림11와 같다. 위와 같이 정의되는 빔포밍 동작을 위해서 빔포밍 모듈은 무선 모듈로부터 필요한 정보가 제공되어야 하고 SPA 안테나의 기생소자에 제어신호를 인가하기 위한 인터페이스가 제공되어야 한다. 무선 모듈로부터 제공되어야 하는 정보는 slave 정보, 성능 측정 정보(RSSI, SNR, PER), 무선 프레임 동기정보이다. Master에 접속한 slave는 MAC 계층에서 관리하고, 성능 측정 정보 및 무선 프레임 동기정보는 baseband로부터 얻을 수 있다. 안테나 제어 신호는 무선 시스템 테스트베드에서 제공하는 GPIO 신호를 이용하여 구현할 수 있다. 이와 같이 빔포밍 모듈에서 요구되는 외부 인터페이스를 고려하여 기존의 MAC

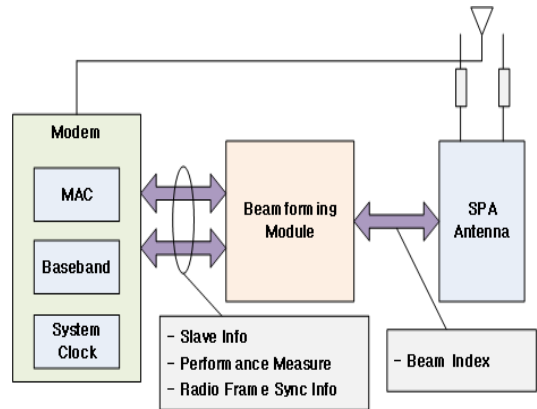


그림 12. 빔포밍 구현을 위한 인터페이스  
Fig. 12. Interface for implementation of beamforming module

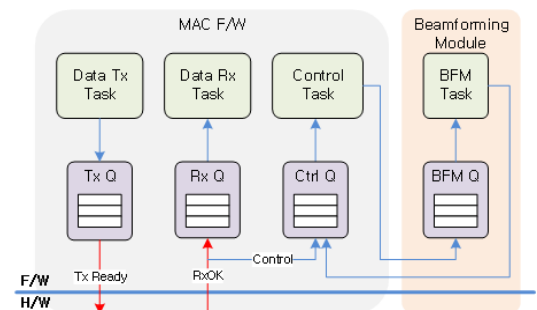


그림 13. 빔포밍 모듈 타스크 구조  
Fig. 13. Implementation structure of beamforming module task

제층의 기능이 구현된 하드웨어에 빔포밍 관련 task를 추가함으로써 구현이 가능하다. 그림 13에서와 같이 기존 MAC F/W내에 있는 control plane을 담당하는 task와 필요한 인터페이스를 정의한다.

#### IV. 시험 및 성능 분석

본 장에서는 SPA 안테나를 이용하여 빔포밍 기능을 구현한 무선통신 시스템의 성능을 측정하고 빔포밍에 따른 성능 향상을 확인한다. SPA 안테나를 장착한 빔포밍 테스트베드 형상은 그림 14와 같다. 무선 IP 카메라는 사용자 트래픽을 위한 응용 서비스로서 slave에 장착되어 동영상 데이터를 master로 전송한다. 본 시험에서 다중경로 페이딩 및 간섭에 의한 영향을 배제하고 빔포밍에 따른 성능만을 확인하고자 잔향 챔버와 개활지에서 시험을 수행하였다.

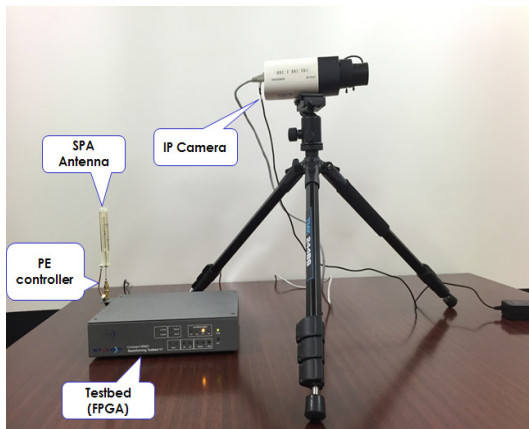


그림 14. 빔포밍 테스트 베드  
Fig. 14. Testbed for beamforming

##### 4.1 챔버 시험

잔향 챔버에서는 그림 15와 같이 master에 SPA 안테나를 설치하고 2대의 slave를 동일한 위치에 설치하여 IP 카메라에서 생성되는 동영상 데이터를 전송하는 시험을 수행하였다. 이때 각 slave에 빔포밍을 적용했을 경우와 적용하지 않았을 경우의 성능을 비교한다. 표6에서는 시간에 따른 빔포밍 시험 시나리오를 나타낸다. 처음에는 두 slave 모두 빔포밍을 적용하고 이후 순차적으로 slave #1과 slave #2에 대하여 빔포밍 적용/미적용 상태를 변경한다.

이 시나리오에 따른 각 slave의 SNR 및 throughput 성능이 그림 16에서 제시된다. 빔포밍이 적용되는 경우는 SNR이 18dB, throughput은 1200kbps의 성능을

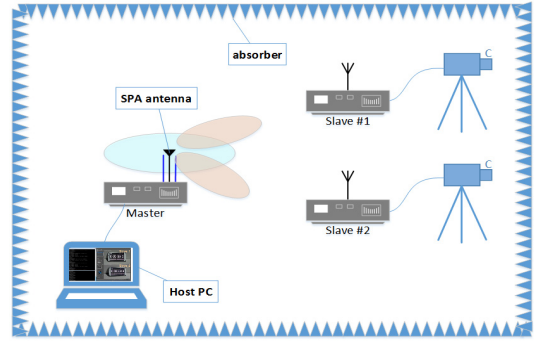


그림 15. 챔버 시험 구성도  
Fig. 15. Chamber test configuration

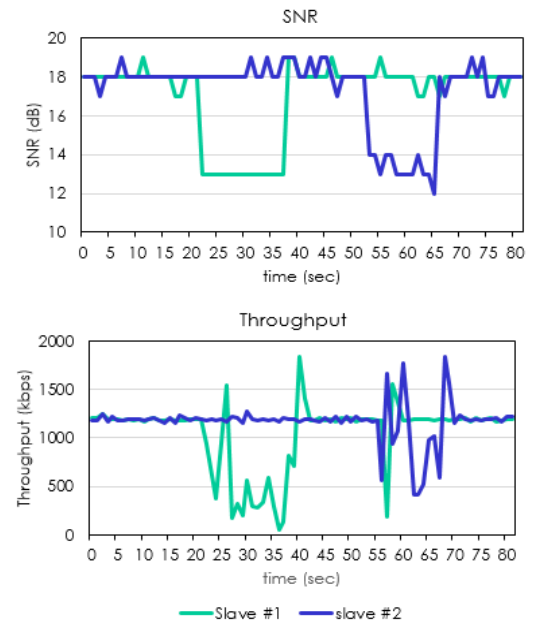


그림 16. 빔포밍 적용 여부에 따른 시스템 성능  
Fig. 16. System performance with beamforming

표 3. 빔포밍 시험 시나리오  
Table 3. Beamforming test scenario

Slave ID	Beamforming usage				
	Used	None	Used	Used	Used
#1	Used	None	Used	Used	Used
#2	Used	Used	Used	None	Used

보이나 빔포밍 적용되지 않는 경우는 SNR이 13dB, throughput이 500kbps이하로 저하됨을 알 수 있다.

그림 17은 빔포밍 적용여부에 따른 무선 통신 시스템의 PER 그래프를 송신 전력에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 빔포밍을 적용한 경우 약

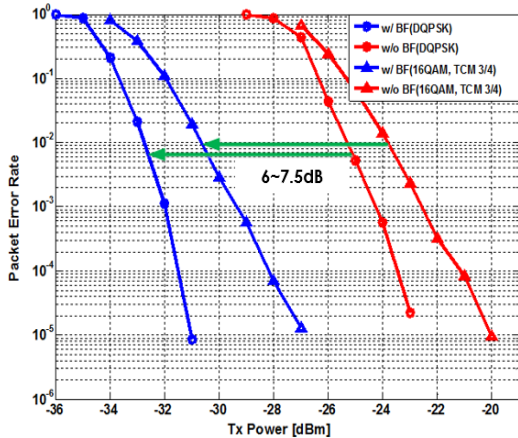


그림 17. 빔포밍 적용 여부에 따른 PER 성능  
Fig. 17. PER performance with beamforming scheme

6.7dB의 송신 전력 이득이 있음을 알 수 있다. 이것은 동일한 성능을 얻기 위해 빔포밍을 적용하면 그렇지 않은 경우에 비하여 4배 적은 전력이 사용된다는 것을 의미한다. 본 시험에서는 DQPSK와 16QAM 두가지 변조 방식에 대하여 성능을 측정하였으며 모두 비슷한 송신 전력 차이를 보인다.

#### 4.2 실외 시험

빔포밍 기능을 통하여 기대할 수 있는 효과 중의 하나는 통달거리 확대이다. SPA 안테나에 의한 빔포밍에 의하여 얻을 수 있는 통달거리 확대를 측정하기 위하여 실외 환경(개활지)에서의 데이터 전송 시험을 수행하였다. 그림 18에서 보이는 바와 같이 동일한 SNR을 기준으로 비교하면 빔포밍을 적용했을 경우 130m 정도의 통달 거리 증가가 발생함을 알 수 있다.

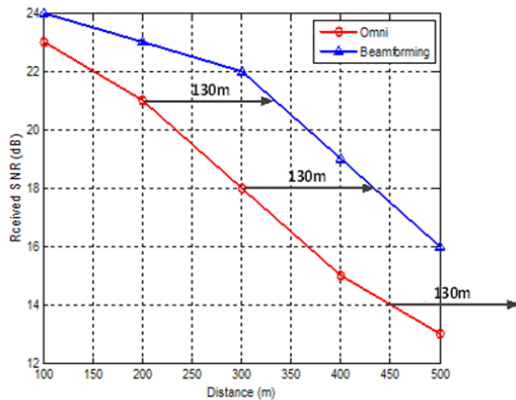


그림 18. 빔포밍 적용 여부에 따른 통달 거리  
Fig. 18. Coverage with beamforming scheme

## V. 결론

본 논문에서는 단일 RF체인과 단일 안테나를 사용하여 빔패턴을 제어할 수 있는 SPA 안테나를 구현하고 성능 분석을 수행하였다. 또한 SPA 안테나를 실제 무선 통신 시스템에 적용하여 빔포밍 기능을 구현하였다. 기존 무선 통신 시스템의 모델로부터 성능 파라미터와 동기 정보를 얻고 이러한 정보를 기반으로 SPA 안테나의 기생소자를 제어함으로써 빔포밍 기능을 구현할 수 있음을 보였다. 이와 같이 구현된 SPA 안테나에 의한 빔포밍 기능은 무선 통신 시스템의 PER 성능 향상과 통달거리 증가를 통하여 정량적으로 분석하였다. SPA 안테나는 기존의 MIMO 안테나와 달리 단일 RF체인과 단일 안테나만을 사용하기 때문에 구현 복잡도가 감소하고 전력소모가 줄어들기 때문에 이동 단말에 적용하기 용이하다. 본 논문에서는 고정형의 무선 IP 카메라에 SPA 안테나를 적용하였으나 향후 이동통신 단말에 적용이 가능할 것으로 보인다.

## References

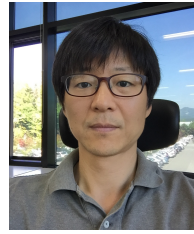
- [1] Jeffrey G. Andrews, et al., "What will 5G be?," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 9, pp. 1065-1082, 2014.
- [2] Cisco, *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update*, 2013-2018, Feb. 2014.
- [3] D. H. Lee, C. Y. An, and H. G. Ryu, "Design and performance evaluation of load-modulation MIMO system using high-order modulation," *J. KICS*, vol. 40, no. 11, pp. 2121-2130, 2015.
- [4] A. Mohammadi and F. M. Ghannouchi, "Single RF front-end MIMO transceivers," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 12, pp. 104-109, Dec. 2011.
- [5] T. Ohira and K. Iigusa, "Electronically steerable parasitic array radiator antenna," *Electronics and Commun. in Japan*, vol. 87, pp. 25-45, 2004.
- [6] KS X 4650-2:2007, "Fast B-CDMA Medium Access Control(MAC) and Physical(PHY) - Part II: Enhanced Physical Layer Throughput," 2007.
- [7] V. Rodney, "Switched parasitic elements for



antenna diversity,” *IEEE Trans. Ant. and Propag.*, vol. 47, no. 2, pp. 399-405, 1999.

- [8] E. P. Tsakalaki, “Reduced-complexity wireless transceiver architectures and techniques for space-time communications,” *Philosophy*, 2012.

**김 형 진 (Hyung-jin Kim)**



1999년 2월 : 전남대학교 컴퓨터공학과 졸업  
2001년 2월 : 전남대학교 컴퓨터공학과 석사  
2000년 12월~현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원  
<관심분야> 컴퓨터공학, 통신공학, 이동통신공학

**송 재 수 (Jae-Su Song)**



1999년 2월 : 고려대학교 전기공학과 졸업  
2001년 2월 : 한국과학기술원 전자전산학과 졸업  
2001년 3월~현재 : 한국전자통신연구원  
<관심분야> 전자공학, 통신공학

**조 성 철 (Seong-chul Cho)**



2000년 8월 : 전남대학교 컴퓨터공학과 석사  
2005년 8월 : 충북대학교 정보통신공학과 공학박사  
2000년~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 이동통신시스템, 채널부호화, 전파전파

**서 석 (Seok Seo)**



1997년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업  
1999년 2월 : 한양대학교 전자공학과 석사  
2005년 2월 : 한양대학교 전자통신전파공학과 박사  
2005년 3월~현재 : 한국전자통신연구원

<관심분야> 통신, 신호처리, 전자공학

**오 정 훈 (Jung-hoon Oh)**



1997년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업  
1999년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 석사  
2000년 10월~현재 : 한국전자통신연구원  
<관심분야> 전자공학, 통신공학, 안테나 공학