

# 스위치와 180° 하이브리드를 이용한 단일 송신기 송신 다이버시티

## Transmit Diversity with Single Transmitter Using Switch and 180° Hybrid

윤 현 구 · 장 병 준\*

Hyungoo Yoon · Byung-Jun Jang\*

### 요 약

일반적으로 Alamouti 코드와 같은 송신 다이버시티를 구현하기 위해서는 동기화된 2개의 송신기가 필요하다. 하지만 송신기를 2개 사용하므로 가격, 전력소모, 복잡도, 동기 및 교정의 필요성 등 많은 단점이 발생한다. 본 논문에서는 1개의 송신기만을 가지고도 송신 다이버시티를 구현할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 기저대역 신호처리와 RF회로를 결합하는 방법으로서 1개의 송신기와 2개의 송신안테나 사이에 180° 하이브리드와 하나의 스위치를 연결하고, 스위치를 송신비트의 중간 시점에서 제어하는 것이다. 제안한 시스템은 송신기가 하나이므로 전력소모 및 하드웨어 제작비용이 반으로 줄어 들 수 있으면서 페이딩 환경에서 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 실현가능성을 검증하였고, 하드웨어를 제작하여 다이버시티 동작이 가능함을 확인하였다.

### Abstract

Generally, two synchronized transmitters are required to implement transmit diversity, such as Alamouti codes. However, because two transmitters are used, many disadvantages arise, such as increased price, power consumption, complexity, and the necessity of synchronization and calibration. In this paper, we proposed a new method to realize transmit diversity only using one transmitter. The proposed method combines baseband signal processing and an RF circuit, which connects a 180° hybrid and one switch between one transmitter and two transmit antennas, and controls the switch at the mid-point of the transmission bit. Because the proposed system has only one transmitter, the power consumption and hardware cost can be reduced by half, and the diversity gain can be realized in a fading environment. We verified the feasibility of the proposed method by computer simulations and confirmed that diversity operation can be realized using hardware.

Key words: TX Diversity, Alamouti Code, MIMO, RF Switch, Single Transceiver

### I. 서 론

이동통신 환경은 서로 다른 진폭과 위상을 갖는 다중 경로 신호들의 합으로 수신되므로 이러한 다중경로 페이

딩에 의해서 수신되는 신호는 품질이 크게 저하된다. 이에 따라 통신품질 향상을 위한 다양한 다이버시티 기법이 연구되어 왔으며, 특히 기지국에서 단말기로의 순방향 링크에서의 송신 다이버시티 기법에 대한 많은 연구가

「이 연구는 2019년도 삼성전자 미래기술육성센터 연구비(SRFC-IT1801-06)의 지원으로 연구되었음.」

명지전문대학 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Myongji College)

\*국민대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Kookmin University)

· Manuscript received July 22, 2020 ; Revised August 4, 2020 ; Accepted August 4, 2020. (ID No. 20200722-004S)

· Corresponding Author: Byung-Jun Jang (e-mail: bjjang@kookmin.ac.kr)

진행되었다. 이러한 노력의 일환으로 1998년 Alamouti에 의해 순방향에서 송신다이버시티(STTD: space time transmit diversity) 개념이 도입된 이후 다양한 송신 다이버시티 기법이 WCDMA와 LTE에서 표준으로 채택되었다. 송신 다이버시티의 원조라 할 수 있는 Alamouti 코드는 데이터 심볼을 시간과 공간에 대해 적절히 부호화하여 두 개의 안테나를 통해 신호를 전송하고, 수신단에서 적절한 연산을 통해 복조를 수행함으로써 페이딩 영향을 최소화시켜 시스템의 성능을 향상시킨다<sup>[1]~[3]</sup>.

일반적으로 Alamouti 코드와 같은 송신 다이버시티를 구현하기 위해서는 송신기가 2개 필요하다. 하지만 송신기를 2개 사용하므로 하드웨어 구성이 복잡하고, 가격, 전력소모 및 제작비용도 두 배 증가한다. 게다가 두 개의 송신기 사이의 동기를 맞추어야 하므로 추가적인 클럭 분배회로가 필요하다는 단점이 있다. 만약 송신 다이버시티를 구현하면서도 송신기를 하나만 사용할 수 있다면 가격 및 저전력 문제로 송신다이버시티를 사용하지 못했던 다양한 무선통신 응용분야에 송신다이버시티가 사용될 수 있을 것이다. 예를 들어 사물인터넷(IoT: internet of things) 같은 분야에 송신 다이버시티가 사용된다면 페이딩 환경에서 무선통신 시스템의 커버리지가 늘어나는 등의 효과를 얻을 수 있다<sup>[4]~[6]</sup>.

하나의 송신기로 MIMO 안테나를 구현하기 위해 현재까지의 연구는 대부분 기생안테나를 데이터 비트에 따라 스위칭하는 방식을 사용한다. 이 경우, 송신 빔의 수보다 하나 더 많은 안테나가 필요하고, 비표준 방식으로 별도의 수신기가 필요하다는 단점이 있다<sup>[6]</sup>. 한편, Alamouti 코드를 특별히 설계된 두 개의 다이폴 안테나만으로 구현하는 연구가 있었다. 하지만 후속 연구가 이루어진 바 없고, 실제 구현까지 이루어지지도 않았다<sup>[7]</sup>.

이에 본 논문에서는 한 개의 송신기와 두 개의 안테나만을 이용하여 Alamouti 코드 기반의 송신 다이버시티를 구현할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 제안한 방법은 송신기와 2개의 송신안테나 사이에 180° 하이브리드와 SPDT(single pole double throw) 스위치가 있으며, 이 스위치를 송신비트에 따라 적절히 제어하여 송신 다이버시티 효과를 얻는 것이다. 제안한 시스템은 기존의 Alamouti 코드와 동일하므로 기존 시스템에 쉽게 구현하는 것이

가능하다. 또한 안테나에 제한이 없으므로 다양한 안테나에 적용할 수 있다. 특히, 본 논문의 구성은 하나의 안테나 구조에 다중 모드를 갖는 2개의 안테나가 집적된 SRMM(single resonator multiple mode) 안테나와 결합된다면 안테나 크기의 문제까지도 해결할 수 있으므로 다양한 상용 시스템에 활용될 수 있을 것이다<sup>[8]</sup>.

## II. 송신 다이버시티 원리

먼저, Alamouti 방식의 송신 다이버시티의 기본 원리는 그림 1과 같다. 송신하는 데이터 심볼이 첫 번째 시간 슬롯에서는  $s_0$ , 두 번째 시간 슬롯에서는  $s_1$ 이라고 하자. 이 신호를 2개의 안테나로 송신할 때 space-time encoder 블록을 이용하여 심볼의 순서를 섞고, 공액복소수 및 음(-)의 연산을 통해 식 (1)과 같이 변형하여 송신한다. 식 (1)을 자세히 보면 첫 번째 타임 슬롯 구간 중 첫 번째 안테나에서는 첫 번째 데이터 심볼  $s_0$ 을 송신하고, 두 번째 안테나에서는 두 번째 데이터 심볼을 변형한  $-s_1^*$ 을 송신한다. 두 번째 타임 슬롯 구간에서는 순서를 바꾸어 첫 번째 안테나에서  $s_1$ 을 송신하고, 두 번째 안테나에서는  $s_0^*$ 을 보낸다.

$$\begin{bmatrix} s_0 & s_1 \\ -s_1^* & s_0^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

이렇게 데이터 심볼을 섞어서 두 개의 안테나에서 송신할 때 첫 번째 안테나에서 수신 안테나까지의 채널 특성을  $h_1$ , 두 번째 안테나에서 수신 안테나까지의 채널 특성을  $h_2$ 라고 하고, 채널 특성이  $s_0$ 과  $s_1$  데이터 심볼을 송신하는 구간 동안 변하지 않는다고 가정하면,  $k(k=1, 2)$  번째 타임슬롯에서 수신신호  $y^k$ 는 식 (2) 및 식 (3)과 같

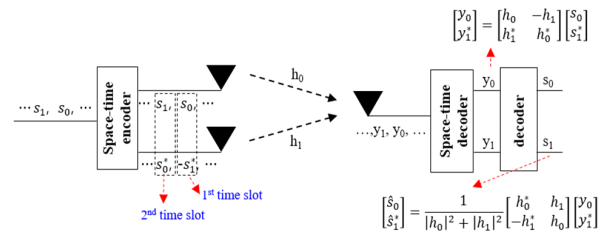


그림 1. Alamouti code 송신 다이버시티 원리  
Fig. 1. Transmitter diversity using Alamouti code.

이 주어진다. 여기서  $n^k$ 는  $k$ 번째 타임슬롯에서 가우시안백색잡음(AWGN: additive white Gaussian noise)을 의미한다.

$$y^1 = h_0 s_0 + h_1 (-s_1^*) + n^1 \quad (2)$$

$$y^2 = h_0 s_1 + h_1 s_0^* + n^2 \quad (3)$$

이제 식 (3)을 공액복소수(complex conjugate)를 취하고 행렬로 표현하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y^1 \\ y^{2*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & -h_1 \\ h_1^* & h_0^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n^1 \\ n^{2*} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_0 & -h_1 \\ h_1^* & h_0^* \end{bmatrix}$ 라 놓고  $\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix}$ 에 대해 식 (4)를 풀면, 식 (5)와 같이 송신한 데이터 심볼을 추정할 수 있다. 여기서  $\mathbf{H}^+$ 는  $\mathbf{H}$ 의 pseudo inverse를 의미하고, Hermitian 행렬을 이용하여  $\mathbf{H}^+ = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H$ 로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} &= \mathbf{H}^+ \begin{bmatrix} y^1 \\ y^{2*} \end{bmatrix} \\ &= (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \begin{bmatrix} n^1 \\ n^{2*} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \begin{bmatrix} n^1 \\ n^{2*} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

Alamouti code는 데이터 심볼을 순차적으로 보내는 것이 아니라 섞어서 송신하기 때문에 RF 대역에서 바로 구현할 수 없을 뿐만 아니라, 데이터 심볼의 공액복소수 역시 RF 회로로 구현할 수 없기 때문에 Alamouti 코드 기반 송신 다이버시티는 언제나 송신기 2개를 필요로 한다.

### III. 제안한 단일송신기 송신 다이버시티

단일 송신기를 이용하여 Alamouti 방식의 송신 다이버시티를 구현하기 위해 RF회로로 구현할 수 있는 부분과 구현할 수 없는 부분을 분리해야 한다.

먼저, 식 (1)과 같이 데이터 심볼  $s_0$ 와  $s_1$ 을 섞어서 보내면 단일송신기로 구현할 수 없으므로 동일한 데이터를 반복하여 보내는 방식으로 변경하여 식을 쓰면 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} s_0 & -s_0^* \\ s_0 & s_0^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)의 첫 번째 타임 슬롯에서는 데이터 심볼  $s_0$ 을 두 개의 안테나에서 동일하게 보내고, 두 번째 타임슬롯에서는 데이터 심볼  $s_0^*$ 을 두 개의 안테나에서 동일하게 보내는 것으로 해석할 수 있다. 식 (6)은 실제 송신기가 송신할 수 있는 전송속도보다 1/2 속도로 송신하는 것으로 볼 수 있다. 이는 고속 전송 시스템에서는 단점이라 볼 수 있으나, LoRa IoT와 같이 저속이면서 커버리지가 넓어야 하는 LPWAN(low power wide area network) 시스템에서는 문제가 되지 않는다.

다음으로 두 번째 타임슬롯에서 송신할 데이터 심볼  $s_0^*$ 은 두 개의 안테나 간에 부호가 반대이므로 이를 구현하기 위하여 그림 2와 같이 180° 하이브리드와 스위치를 이용한다. 180° 하이브리드에는 합( $\Sigma$ ) 단자와 차( $\Delta$ ) 단자가 있으므로 이를 입력으로 하고, 단자의 선택을 첫 번째 타임슬롯에서는 합( $\Sigma$ ) 단자로 송신기를 연결하고 두 번째 타임슬롯에서는 차( $\Delta$ ) 단자로 연결하도록 한다. 이렇게 되면 음(-)의 부호를 갖는 심볼을 송신할 필요가 있을 때마다 스위치 제어를 통해 차( $\Delta$ ) 단자로 연결하여 180° 위상차를 만들어줌으로써 식 (6)의 행렬을 구할 수 있다.

이제 식 (6)으로 송신된 신호를 하나의 안테나로 수신하면 수신 신호는 식 (7)과 같이 주어진다.

$$1^{\text{st}} \text{ time slot: } y^1 = h_0 s_0 + h_1 s_0 + n^1 \quad (7)$$

$$2^{\text{nd}} \text{ time slot: } y^2 = h_0 (-s_0^*) + h_1 s_0^* + n^2 \quad (8)$$

이제 식 (8)을 공액복소수 연산을 취하고, 다시 정리하면 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y^1 \\ y^{2*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h_1^* & -h_0^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n^1 \\ n^{2*} \end{bmatrix} \quad (9)$$

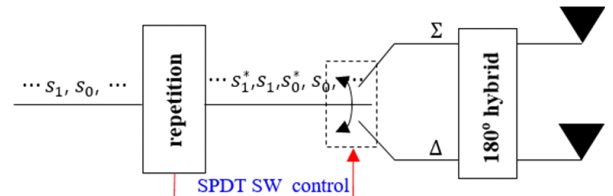


그림 2. 제안한 단일 송신기 Alamouti 송신 다이버시티  
Fig. 2. Suggested Alamouti transmitter diversity using single transmitter.

여기서  $\mathbf{H}_{2 \times 1} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h_1^* & -h_0^* \end{bmatrix}$ 라 놓고,  $\begin{bmatrix} s_0 \\ s_0 \end{bmatrix}$ 에 대해 식 (9)를 pseudo inverse 행렬을 이용하여 풀면, 다음의 식 (10)과 같이 심볼을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{s}_0 \\ \hat{s}_0 \end{bmatrix} &= \mathbf{H}_{2 \times 1}^+ \begin{bmatrix} y^1 \\ y^{2*} \end{bmatrix} \\ &= (\mathbf{H}_{2 \times 1}^H \mathbf{H}_{2 \times 1})^{-1} \mathbf{H}_{2 \times 1}^H \mathbf{H}_{2 \times 1} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_0 \end{bmatrix} \\ &\quad + (\mathbf{H}_{2 \times 1}^H \mathbf{H}_{2 \times 1})^{-1} \mathbf{H}_{2 \times 1}^H \begin{bmatrix} n^1 \\ n^{2*} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} s_0 \\ s_0 \end{bmatrix} + (\mathbf{H}_{2 \times 1}^H \mathbf{H}_{2 \times 1})^{-1} \mathbf{H}_{2 \times 1}^H \begin{bmatrix} n^1 \\ n^{2*} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)은 식 (5)에서 심볼만 반복된 것이므로 기존 Alamouti 송신 다이버시티 신호를 수신할 수 있는 수신부는 간단한 조작만으로 본 논문에서 제안한 방식의 송신 다이버시티 데이터 심볼을 복원하는 것이 가능하게 된다.

수신 안테나 2개를 사용하는 경우, 수신신호는 식 (11)과 식 (12)와 같이 표현될 수 있다. 여기서  $y_i^k$ 는  $k$  ( $k=1,2$ )번째 타임슬롯에서  $i$ 번째 수신안테나의 신호를 의미한다. 그리고  $h_{i,j}$ 는  $j$ 번째 송신안테나에서  $i$ 번째 수신안테나로의 채널계수를 나타내고,  $n_i^k$ 는  $i$ 번째 수신안테나에서 수신된 신호의  $k$ 번째 타임슬롯에서 가우시안백색잡음을 의미한다.

$$\begin{aligned} 1^{\text{st}} \text{ time slot: } y_0^1 &= h_{00}s_0 + h_{01}s_0 + n_0^1 \\ y_1^1 &= h_{10}s_0 + h_{11}s_0 + n_1^1 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} 2^{\text{nd}} \text{ time slot: } y_0^2 &= h_{00}(-s_0^*) + h_{01}s_0^* + n_0^2 \\ y_1^2 &= -h_{10}s_0^* + h_{11}s_0^* + n_1^2 \end{aligned} \quad (12)$$

이제 식 (12)의 양변에 공액복소수 연산을 취하고, 다시 정리하면 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y_0^1 \\ y_1^1 \\ y_0^{2*} \\ y_1^{2*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} \\ h_{10} & h_{11} \\ h_{01}^* & -h_{00}^* \\ h_{11}^* & -h_{10}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0^1 \\ n_1^1 \\ n_0^{2*} \\ n_1^{2*} \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서  $\mathbf{H}_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} \\ h_{10} & h_{11} \\ h_{01}^* & -h_{00}^* \\ h_{11}^* & -h_{10}^* \end{bmatrix}$ 라 놓고  $\begin{bmatrix} s_0 \\ s_0 \end{bmatrix}$ 에 대해 식 (13)을

pseudo inverse 행렬을 이용하여 풀면, 다음의 식 (14)와 같이 심볼을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{s}_0 \\ \hat{s}_0 \end{bmatrix} &= \mathbf{H}_{2 \times 2}^+ \begin{bmatrix} y_0^1 \\ y_1^1 \\ y_0^{2*} \\ y_1^{2*} \end{bmatrix} \\ &= (\mathbf{H}_{2 \times 2}^H \mathbf{H}_{2 \times 2})^{-1} \mathbf{H}_{2 \times 2}^H \mathbf{H}_{2 \times 2} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_0 \end{bmatrix} \\ &\quad + (\mathbf{H}_{2 \times 2}^H \mathbf{H}_{2 \times 2})^{-1} \mathbf{H}_{2 \times 2}^H \begin{bmatrix} n_0^1 \\ n_1^1 \\ n_0^{2*} \\ n_1^{2*} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} s_0 \\ s_0 \end{bmatrix} + (\mathbf{H}_{2 \times 2}^H \mathbf{H}_{2 \times 2})^{-1} \mathbf{H}_{2 \times 2}^H \begin{bmatrix} n_0^1 \\ n_1^1 \\ n_0^{2*} \\ n_1^{2*} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

## IV. 실험 및 결과

### 4-1 BER 시뮬레이션 검증

제안한 아이디어의 타당성을 검증하기 위하여 Rayleigh 페이딩 채널 환경에서 송신다이버시티의 BER(bit error rate) 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3은 2개의 송신안테나(nTx=2)와 1개의 수신안테나(nRx=1)를 사용할 경우이고, 그림 4는 송수신 안테나가 각각 2개일 때, BER 시뮬레이션 결과이다. 그림 3에서 송신다이버시티효과는 일반적으로 알려진 바와 같이 송신 다이버시티가 없는 경우보다 Rayleigh 페이딩 환경에서 성능이 우수하며, 이론적인 수신다이버시티(송신안테나 1개, 수신안테나 2개)에 비해 3 dB 낮음을 이론적으로 확인할 수 있다. 다음으로 제안한 송신다이버시티의 성능이 기존의 Alamouti 송신다이버시티의 이론값 및 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다. 이러한 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 송신다이버시티 방법이 기존 송신기 2개인 경우와 동일한 효과가 있음을 확인할 수 있다.

다음으로 그림 4는 송신기의 수와 수신기의 수가 2개로 동일한 경우의 송신다이버시티 이론값과 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 제안한 송신다이버시티 방식은 Alamouti 송신다이버시티와 동일한 성능을 보이며, BER

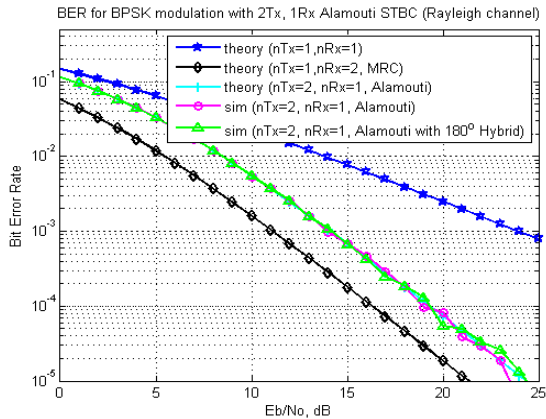


그림 3. Rayleigh 페이딩 환경에서 제안한 송신 다이버시티의 BER( $nTx=2$ ,  $nRx=1$ )

Fig. 3. BER of proposed transmitter diversity( $nTx=2$ ,  $nRx=1$ ).

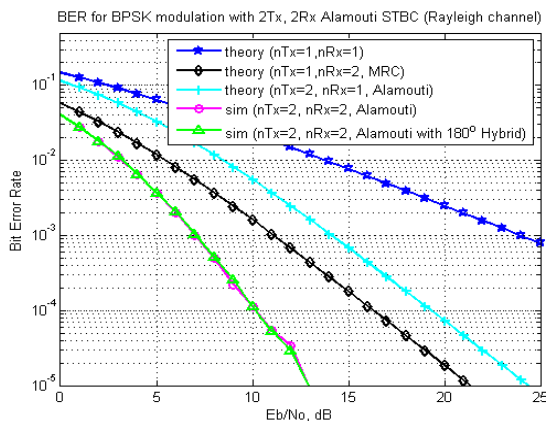


그림 4. Rayleigh 페이딩 환경에서 제안한 송신 다이버시티의 BER( $nTx=2$ ,  $nRx=2$ ).

Fig. 4. BER of proposed transmitter diversity( $nTx=2$ ,  $nRx=2$ ).

$10^{-3}$  기준으로 수신다이버시티(MRC: maximal ratio combining)에 비해 약 5 dB 성능이 우수하다. 이는 송수신안테나 2개씩인 경우는 다이버시티 order가 4이고, 송신 1개, 수신 2개 안테나는 다이버시티 order가 2이기 때문이다. 이상의 BER 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 송신기 하나의 송신다이버시티가 송신기 2개인 기존의 송신다이버시티와 동일한 성능을 가짐을 확인할 수 있었다.

#### 4-2 구현 시 이슈

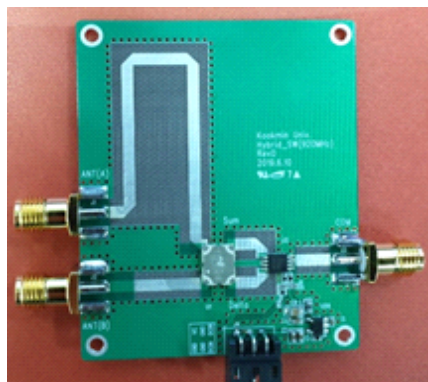
다음으로 제안한 방식의 구현 시 이슈를 알아본다. 제

안한 방식이 한계로는 추가되는 RF회로의 크기와 스위칭 속도의 한계가 있을 수 있다. 먼저 스위칭 속도에 대해 살펴보자. 제안한 방식은 송신 데이터 심볼 속도의 2배로 스위칭을 하여야 하므로 스위치 속도의 한계로 고속 전송에는 적용하기 어려울 수 있다. 하지만 RF MEMS 기술의 발달로 수십 MHz 이상의 스위칭 속도를 가지면서도 손실이 적은 고속스위치 구현이 가능하다. 예를 들어 본 논문에서 사용된 RF 스위치는 범용 스위치인 Peregrine Semiconductor사의 absorptive 방식의 SPDT RF Switch인 PE4251을 사용하였다. 사용된 스위치는 3.3 V나 5 V에서 동작 가능하며, 150 nsec의 스위칭시간을 가지므로 수 MHz까지의 데이터 속도까지 감당할 수 있다. 일반적으로 IoT 시스템의 경우, 수십 kbps 정도의 데이터 전송 속도를 가지므로 위의 스위치로 데이터 동작이 가능하다.

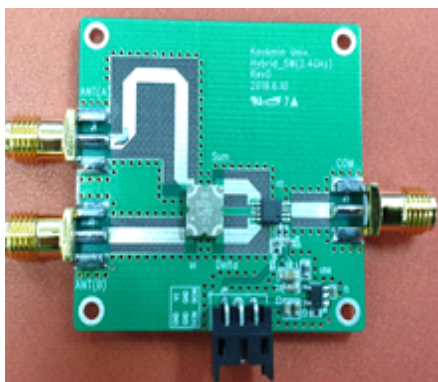
다음으로 추가되는 RF회로의 크기를 살펴보자. 제안한 아이디어가 적용될 수 있는 900 MHz IoT 주파수 대역이나 2.4 GHz ISM(industrial, scientific, and medical) 주파수 대역에 적용되기 위해서는 180° 하이브리드 및 스위치 하드웨어의 크기가 작아야 한다. 일반적으로 900 MHz 대역에서 동작하는 180° 하이브리드를 마이크로스트립 선로로 제작하면 크기가 수십 cm 크기가 되므로 상용화에 문제가 된다. 이에 본 논문에서는 상용제품이 존재하는 90° hybrid의 한쪽 단자에 90° 마이크로스트립 선로를 추가하는 형식으로 하드웨어를 제작하였다. 제작에 사용된 기판은 유전율 3.2, 두께 31 mil을 갖는 타코닉(taconic)사의 TLC-32-0310-01/01이며, 900 MHz와 2.4 GHz 대역에서 동작하는 3 dB 90° hybrid는 Anaren사 제품으로 모델명은 각각 X3C09P1-03S(800~1,000 MHz), X32C26P1-03S (2,300~2,900 MHz)이다. 90° 마이크로스트립 선로는 ADS를 이용한 전자기해석 Tool을 사용해 정확한 위상을 갖는 선로를 설계하였다.

그림 5는 이렇게 설계된 900 MHz와 2.4 GHz에서 동작하는 180° 하이브리드 및 스위치 하드웨어의 사진을 보여준다. 사진에서 왼쪽 편의 SMA 단자 2개(단자 1과 단자 2)는 각각 안테나에 연결되는 단자이고, 오른쪽 단자(단자 3)는 RF 스위치의 출력으로 아래쪽 디지털제어를 통해 합( $\Sigma$ ) 단자와 차( $\Delta$ ) 단자가 출력될 수 있도록 하였다. 회로의 크기는 900 MHz에서 구현한 결과,  $5.5 \times 4.5 \text{ cm}^2$ 의





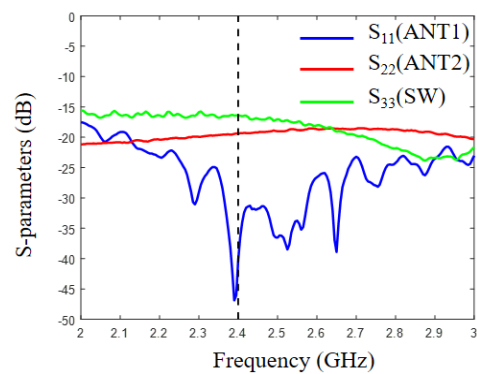
(a) 920 MHz 중심주파수  
(a) Center frequency of 920 MHz



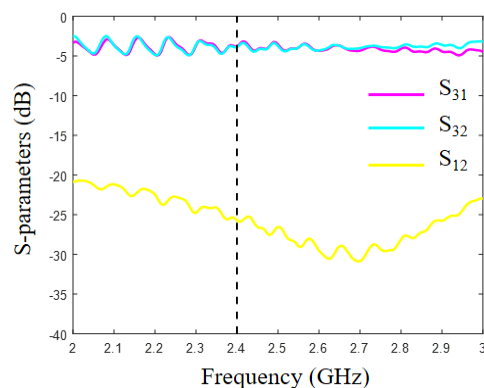
(b) 2.4 GHz 중심주파수  
(b) Center frequency of 2.4 GHz

그림 5. 제작된 180° 하이브리드와 스위치 보드 사진  
Fig. 5. Photograph of fabricated 180° hybrid and RF switch board.

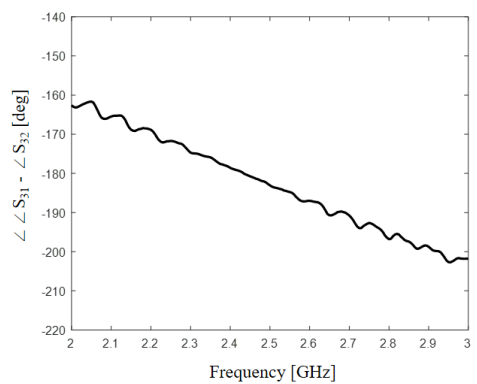
크기를 가지며, 2.4 GHz에서 구현한 결과는  $4.1 \times 4.0 \text{ cm}^2$ 의 크기를 갖도록 할 수 있었다. 실제 상용화를 위해 좀 더 작은 크기가 필요할 경우, 유전율이 높은 기판을 사용하거나, 90° 마이크로스트립 선로를 최적 설계할 경우 크기는 더 작아질 수 있을 것으로 판단된다. 제작된 2.4 GHz 180° 하이브리드 및 스위치 보드를 측정한 결과는 그림 6과 같다. 920 MHz 대역의 측정결과도 유사하므로 더 오차가 클 수 있는 2.4 GHz 측정데이터만을 첨부하였다. 그림 6(a)의 입력반사계수는 모든 단자에서 -15 dB 이하의 특성을 나타냈으며, 그림 6(b)와 같이 삽입손실은 하이브리드 동작에 의해 -3 dB임을 확인하였고, 안테나 간의 격리도는 -25 dB가 측정되었다. 스위치 조정에 따



(a) 반사손실  
(a) Return loss



(b) 삽입손실과 격리도  
(b) Insertion loss and isolation



(c) 두 안테나 간 위상차  
(c) Phase difference between two antennas

그림 6. 제작된 2.4 GHz 180° 하이브리드와 스위치 보드의 측정결과

Fig. 6. Measurement results of fabricated 2.4 GHz 180° hybrid and RF switch board.

라 두 안테나 간의 위상차가 합( $\Sigma$ ) 단자에서는 0°, 차( $\Delta$ ) 단자에서는 그림 6(c)와 같이 180° 위상차가 정확히 출력됨을 확인할 수 있었다. 이상의 하드웨어 검증을 통해 본 논문에서 제안한 방식으로 송신기가 하나만 있는 경우에도 송신다이버시티를 구현할 수 있음을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 연구에서는 스위치와 180° 하이브리드를 이용한 단일 송신기 구조로 Alamouti 송신 다이버시티를 구현하는 새로운 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 기저대역 신호 처리와 RF회로를 지능적으로 결합하는 방법으로서 1개의 송신기와 2개의 송신안테나 사이에 180° 하이브리드와 하나의 스위치를 연결하고, 스위치를 송신비트의 중간 시점에서 제어하도록 하는 것이다. 제안한 시스템은 송신기가 하나이므로 전력소모 및 하드웨어 제작비용이 반으로 줄어들 수 있으면서 페이딩 환경에서 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 실현가능성을 검증하였고, 하드웨어를 제작하였다. 제작된 하드웨어는 920 MHz에서도 5.5×4.5 cm<sup>2</sup>의 크기, 2.4 GHz에서는 4.1×4.0 cm<sup>2</sup>의 크기만을 가지면서도 우수한 RF특성을 가지며, 스위치 동작에 따라 제안한 방식에서 필요로 하는 180° 위상차가 중심주파수에서 정확히 나옴을 확인하였다.

## References

- [1] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communication," *IEEE Journal of Select Area in Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [2] B. H. Park, "Performance analysis of angle time transmit diversity in urban area," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 60, no. 4, pp. 200-205, Dec. 2011.
- [3] S. R. Gwon, H. G. Kim, D. J. Park, Y. G. Lee, and C. H. Yeon, "MIMO technology trend in 3GPP LTE," *Information and Communications Magazine*, vol. 23, no. 6, pp. 39-52, Jun. 2006.
- [4] K. Gyoda, T. Ohira, "Design of electronically steerable passive array radiator(ESPAR) antenna," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Salt Lake City, Jul. 2000, vol. 2, pp. 922-955.
- [5] J. S. Song, S. Seo, H. J. Kim, S. C. Cho, and J. H. Oh, "Design of beamforming scheme using single RF chain based on SPA antenna," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 41, no. 6, pp. 689-697, Jun. 2016.
- [6] J. Bok, S. H. Lee, and H. G. Ryu, "Design and performance evaluation of M×M MIMO transmission in ESPAR antenna," *Journal of The Institute of Electronics Engineers*, vol. 38A, no. 12, pp. 1061-1068, Dec. 2013.
- [7] G. G. Messier, A. Sutinjo, S. V. Hum, and M. Okoniewski, "A space-time coding scheme utilizing phase shifting antennas at RF frequencies," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, pp. 369-372, Oct. 2005.
- [8] T. H. Im, B. J. Jang, and H. S. Cho, "Anti-jamming 2-element multimode pattern array antenna design," in *2019 The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science(KIEES) Winter Conference*, Feb. 2019.
- [9] K. J. Baik, S. Lee, and B. J. Jang, "AoA-based local positioning system using a time-modulated array," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 17, no. 4, pp. 181-185, Oct. 2017.

윤 현 구 [명지전문대학/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-5722-2438>



1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

2002년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)

2002년~2004년: (주)현대시스콤 선임연

구원

2004년~현재: 명지전문대학 전자공학과 교수

[주 관심분야] 통신시스템, 무선자원관리, 간섭회피방안

장 병 준 [국민대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-5295-6050>



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)

1995년 3월~1999년 1월: LG전자(주)

1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소

2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원

2013년 9월~2015년 8월: 미래창조과학부 민간전문가(CP)

2005년 9월~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 교수

[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용