

# Spintronics 발진기 어레이에 적합한 듀얼채널 수신기

## A Dual-channel Receiver for Spintronics Oscillator Array

오 인 열\*                      박 승 영\*\*                      박 철 순\*\*\*  
(Inn-yeal Oh)                      (Seung-young Park)                      (Chul-soon Park)

### 요 약

나노미터 크기의 Spintronics 발진기 어레이를 기반으로 Spintronics 발진기의 주파수 및 진폭을 동시에 변조하는 새로운 스핀변조를 실현할 수 있다. 본 논문에서는 실현된 스핀 변조신호를 무선으로 수신하기 위해 듀얼 채널을 처리하는 수신기를 설계하였다. 최종적으로 얻어진 Spintronics 발진기 어레이에서 만들어진 스핀변조 신호를 수신기의 두 채널을 통해서 동시에 처리 할 수 있었으며, 각 채널당 최종적으로 200 kbps급 까지의 데이터 전송을 실현하였다. Spintronics 발진기의 신호 레벨 -60 dBm 크기의 한계로 1 cm 이하의 근접거리 통신에서 가능하며, 듀얼 채널 수신기는 56 x 33 mm<sup>2</sup> 크기이다.

핵심어 : 듀얼채널, 수신기, 스핀트로닉스, 발진기, 어레이, 스핀변조

### Abstract

The spin modulation is proposed with modulating frequency and amplitude simultaneously, and realized with the array structure easily located due to the nanometer size of the spintronics oscillator. In this paper, the dual-channel receiver is designed for detecting the spin modulated signal. Resultly, we confirmed the dual-channel receiver well detected the data sent through the spintronics oscillator array, and processed up to 200 kbps on each channel. Distance is limited up to 1 cm due to the low level signal under -60 dBm. The realized dual-channel receiver has the size of 56 x 33 mm<sup>2</sup>.

**Key words** : dual-channel, receiver, spintronics, oscillator, array, spin modulation

† 본 연구는 한국연구재단을 통해 미래창조과학부의 미래유망 융합기술 파이오니어사업과 우수연구센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (Nos. 2013-009198 과 2005-0049408).

\* 주저자 : 한국과학기술원 전기및전자과 연구 부교수

\*\* 공저자 : 한국기초과학지원연구원 물성과학연구부 선임연구원

\*\*\* 교신저자 : 한국과학기술원 전기및전자과 교수

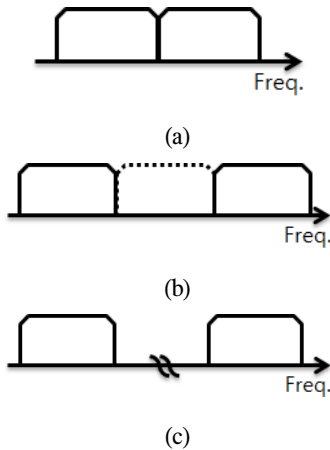
† 논문접수일 : 2013년 07월 18일

† 논문심사일 : 2013년 08월 12일

† 게재확정일 : 2013년 08월 13일

## I. 서론

LTE-A 서비스는 기존 LTE 서비스와 호환을 이루면서도 2배에 이르는 무선 전송속도를 확보할 수 있는 기술로써 세계최초로 7월 우리나라에서 본격적으로 시작하였다. 이와 관련한 핵심 기술이 CA (Carrier Aggregation) 기술이다. CA 기술은 동시에 최대 20 MHz 대역폭을 갖는 n (n은 2이상의 자연수) 개의 캐리어를 수신함으로써 기존 기술대비 n 배의 전송속도를 얻을 수 있는 기술이다. LTE-A에서는 궁극적으로 CA 기술을 기반으로 1 Gbps까지 전송속도를 구현하는데 목표를 두고 있다. 기본적으로 2개의 캐리어를 CA 하여 전송하는 방법에는 3가지가 있다. 첫째가 망내 연속적인 캐리어 (Intra-band contiguous CA)를 사용하는 방법, 둘째는 망내 비연속적인 캐리어(Intra-band Non-contiguous CA)를 사용하는 방법, 마지막으로 망외의 비연속적인 캐리어(Inter-band Non-contiguous CA)를 사용하는 방법이다. 이를 그림 1에 나타내었다.



- (a) 망내 연속적인 캐리어 사용 방법  
(a) Intra-band contiguous CA
- (b) 망내 비연속적인 캐리어 사용 방법  
(b) Intra-band Non-contiguous CA
- (c) 망외 비연속적인 캐리어 사용 방법  
(c) Inter-band Non-contiguous CA

〈그림 1〉 LTE-A 시스템의 CA 주파수 사용 방법  
〈Fig. 1〉 The method of using CA frequency for LTE-A system

그림 1과 같이 두배의 전송속도로 개선하기위해 2 개의 캐리어를 동시에 전송 및 수신해야 하며, 이를 위해서는 캐리어 수 만큼의 송수신기가 필요하여 이동통신 시스템은 더욱 복잡해진다.

2 개의 캐리어를 동시에 사용하는 듀얼 채널 관련한 또 하나의 예는 IEEE 802.11p WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments)의 차량통신 표준이다. WAVE는 미국을 시작으로 유럽, 아시아 등의 전 세계 차량통신 표준으로 자리잡고 있다. 차량통신에서 가장 중요한 기능은 차량안전이다. 차량통신은 안전을 위한 제어채널 통신과 사용자 데이터를 송수신 할 수 있는 서비스채널 통신으로 구분된다. 모두 10 MHz 대역폭을 갖는 1개의 제어 채널과 6개의 서비스 채널로 구성되어 무선으로 27Mbps까지 전송이 가능하다. 서비스채널 통신인 경우는 선택적으로 두개의 대역폭으로 확대하여 보낼 수 있어서 54 Mbps까지도 전송이 가능하다. 차량통신에서는 서비스채널 통신을 하면서도 끊임없는 제어채널 통신을 통해 언제 어디서나 즉각적으로 안전을 확보할 수 있도록 듀얼 채널통신 구조를 규정하고 있다 [1]. 듀얼 채널통신 구조에는 동시에 제어채널 통신도 하면서 서비스채널 통신도 계속적으로 할 수 있는 기능까지의 신호의 동시전송 (Concurrent) 듀얼 채널 통신도 포함하고 있다. 궁극적으로는 보다 안전이 강화된 차량통신일 수 있도록 신호의 동시전송 듀얼 채널 통신을 사용할 것이다.

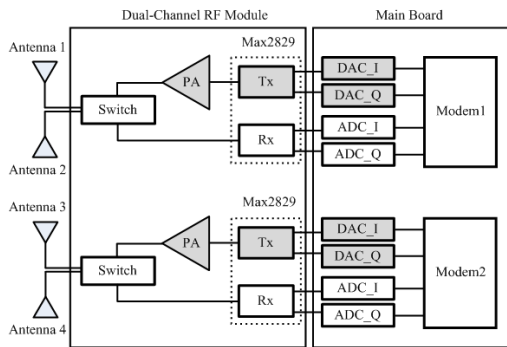


〈그림 2〉 듀얼채널 통신에서의 신호의 동시전송 듀얼 채널 서비스 개념

〈Fig. 2〉 The concept of the concurrent dual-channel service in the dual channel communication

동시에 송신과 수신되는 제어 채널과 서비스 채널의 데이터를 끊임없이 처리하기위해서 두 개의 송수신기가 모두 송신기로 동작하거나, 또는 모두

수신기로 동작함으로써, 각 채널별로 송수신기가 독립적으로 처리해야한다. 단일 송수신기의 경우와 달리, 두 개의 송수신기를 통해서 각 경로로 제어 채널 데이터와 서비스 채널 데이터를 끊김 없이 처리하게 함으로써 언제 어디서나 즉각적으로 제어 채널을 통해서 안전데이터를 전송할 수 있게되는 것이다. 따라서 더 짧은 데이터 전송 시간을 통해 고속으로 이동하는 차량 간의 안전 정보 전송 시, 차량 통신의 안전 신뢰성을 높여줄 뿐 아니라, 제어 채널 정보의 연속적인 수신으로 인한 서비스 채널 데이터의 지연되는 단점도 개선하여, 서비스 채널의 정보 역시 원활하게 처리하도록 하고 있다. 차량 통신에서 중요한 고려사항 중 또 다른 하나는 전파 간섭 현상이다. 빠른 자동차 이동속도로 인해 발생하는 전파 간섭의 취약한 통신환경을 극복하기위해서 다이버시티 기술을 활용하고 있다. 다이버시티 기술을 통해 RF 모듈 구조는 두 개의 송수신기에 각 2개씩, 총 4개의 안테나를 연결하게된다. 이러한 다이버시티 기술까지를 적용한다면 차량통신 송수신기 구조는 그림 3과 같이 되며 [2], 실제 복잡한 도로 환경에서도 송수신을 원활하게 지원하게된다.



〈그림 3〉 듀얼채널 송수신기 구조  
 〈Fig. 3〉 The structure of the dual-channel

거론한 두 사례의 LTE-A의 CA 기술과 WAVE의 듀얼채널 송수신기 기술은 다채널 수만큼의 송수신기가 요구되어 단말기의 전력소모 및 복잡도, 가격을 증가시키게 되어 구현의 제약을 갖게된다. 이의 근본적 해결로 본 논문에서는 Spintronics 발진기

어레이를 기반으로 한 통신 기법을 거론하였으며, 이의 적용 가능성을 실험적 결과를 통해 제시하였다.

## II. Spintronics 발진기 기술 소개

Spintronics 발진기는 두개의 자성물체 사이에 비자성 물체를 삽입한 구조를 가지며, 대부분 필러(Pillar, 둥근 기둥 모양)로 구조화된다. 두 개의 자성 물체 중 하나는 자화벡터가 고정되어 있는 고정 자성체(Pinned layer)이며, 다른 하나의 자성 물체는 자화벡터가 주변 환경에 의해서 자유롭게 변하는 자유 자성체(Free layer)로 만들어진다. 이러한 구조의 필러 주변에 자계를 인가하고, 필러를 가로질러 전류를 흐르게함으로써 자유 자성체의 자화벡터가 안정상태를 유지하는 반대방향으로 움직이게 하는 힘을 얻게 된다. 이를 STT (Spin Transfer Torque)라고 하며 [3], 이러한 STT에 의해서 자화벡터가 회전하게 되고, 이러한 운동을 통해 GHz 대역의 발진 신호 얻게된다.

Spintronics 기술을 현재 메모리에 적용하면서 MTJ(Magnetic Tunneling Junction) 특성을 이용한 MRAM과 STT(Spin Torque Transfer) 기술을 이용한 STT-MRAM으로 구현 연구되고 있다. 세계에서 처음으로 2009년 모토로라에서 분사한 Everspin사에서 MTJ 기반 MRAM을 양산했지만, STT-MRAM은 곧 양산을 하기위해 반도체 회사 중심으로 연구에 집중하고 있다. 이러한 Spintronics 기술이 최근 메모리 관련 연구와 별도로 Spintronics 발진 현상의 연구가 진행되고 있다. 그러나 아직 Nature, Science, Physical Review Letters 등 기초과학 저널 중심으로 소개되는 기초 수준인 Spintronics 발진 현상의 물리적 원리 연구에 머물러있다.

현재까지의 Spintronics 발진기는 수평형 Spintronics 발진기, 수평/수직 복합형 Spintronics 발진기, 점접촉형 Spintronics 발진기, Vortex형 Spintronics 발진기의 다양한 구조로 연구가 진행되고 있으나 출력되는 신호레벨이 작고, 신호의 3-dB 선폭(Linewidth)이 넓어 통신에 적용하기 위해서는 개선이 요구된다. 현재까지 Spin 발진기의 세계 최

고 수준은 -33dBm의 출력 신호와 MHz 단위의 3-dB 선폭 특성을 보이고 있다. 이러한 Spin 발진기를 통신회로에 응용하려는 연구가 진행되며, Spintronics 발진기에 대한 논문 1건이 전기전자 관련 저널에 최초로 2010년에 게재되었고 [4], FSK 변조 가능성을 제시한 논문이 2009년 11월에 1건 게재되어 [5], spintronics 발진기를 통신에 활용하려는 연구가 개화되었다.

Reconfigurable RF 또는 다수개의 RF의 신호의 동시전송 동작 기술은 다수개의 RF 및 가변성을 갖는 소자를 적용하여 구현함으로써 여전히 칩 회로에 부가 회로가 많아 칩사이즈가 크며, 전력 소모가 커서 비효율적인 융복합 구조가 된다. 가변 기능을 갖는 RF 기술은 Varactor 혹은 가변 Inductor를 채택하지만 그 변조 주파수의 선택 폭에 제한이 있으므로, 이동통신 융합회로 (Mobile convergence)에 대응하기 위해서는 별도의 다수 공진기를 필요로 하는 문제를 갖고 있다. 이의 대안으로 연구되는 디지털 RF는 변조 신호의 선형성 확보에 어려움을 갖고 있으며, 현재의 혼성회로 기술로는 낮은 전송 속도 (Data Rate)의 전송만 구현되는 수준이다.

본 연구에서는 나노미터 크기의 Spintronics 발진기 어레이를 바탕으로 한 듀얼 채널 통신을 구현하는데 있다. 이는 기존의 LC발진기와 비교할 때, 작은 크기로 마이크로 와트 ( $\mu\text{W}$ ) 단위의 저전력형 구현이 가능하며, 단일 발진기로 수 ~ 수십 GHz 광대역 발진이 가능하여 새로운 변조 방식 및 통신 구조가 예상되어 혁신적 통신 기술이 제시될 수 있다.

### III. Spintronics 발진기의 듀얼 채널 구조

나노미터 크기로  $\mu\text{W}$  단위의 저전력형 구현이 가능한 GHz 광대역 신호 발진을 얻을 수 있는 Spintronics 발진기 기술을 이용하면 쉽게 듀얼 채널 통신 구조를 얻을 수 있어서 다중 채널의 동시 구동 (Concurrent) 동작이 용이해 진다. 크기가 대략 100 나노미터 크기로 구현됨으로 어레이 구조가 쉽고,  $n \times m$  어레이 구조로 구현하면서 수십, 수백개의 다수 채널 구조를 이루면서도 마이크로 미터 단

위로 구현될 수 있다. 또한 광대역 동작 특성을 가짐으로 이격된 여러개의 주파수를 발진 시킬수 있는 특징을 갖는다.

본 논문에서는 3.5 GHz에서 4.2 GHz 동작 특성을 갖는 Spintronics 발진기를 이용하여 듀얼채널 동작을 갖는 송수신기의 가능성을 제시하였다.

#### 1. Spintronics 발진기의 레벨 및 3-dB 선폭 특성을 고려한 송수신기 방식

나노미터 단위 기술로 만들어지는 Spintronics 발진기는 차세대 이동통신 기술의 장벽이었던 협대역의 주파수 특성, 복잡도에 따른 큰 사이즈 및 높은 전력 소비의 한계를 획기적으로 극복할 수 있는 대안이 될 수 있다. 특히, Spintronics 발진기의 High-Q 및 1~2 나노초 단위의 발진 신호 안정시간 (Settling time) 특성 바탕으로 고속통신이 가능한 고도화 특성을 수용할 수 있는 차세대 통신 기술을 수용할 수 있다.

그러나 현재까지의 Spintronics 발진기는 2012년 일본 AIST의 -33 dBm이 최대 출력 레벨에 그치고 있으며, 대부분 -60 ~ -80 dBm 수준의 출력레벨에 머물러 있어서 통신에 활용되기에는 아직 어렵다.

또한 Spintronics 발진기 신호가 통신기술에 접목되기 위해서는 위상잡음(Phase Noise) 특성이 각 통신 서비스에서 요구하는 수준을 만족시켜야 한다. 이러한 위상잡음 특성은 Spintronics 발진기의 3-dB 선폭과 관련이 있고, 3-dB 선폭은 Spintronics 발진기의 위상 및 진폭의 노이즈, 열 변동 스펙트럼 (Thermal fluctuation spectrum) 및 마그네틱 백색 잡음 (Magnetic white noise)에 의해서 결정되며, TMR 일 경우 터널(Tunneling) 효과에 의한 순간 잡음 (Shot Noise)이 포함되어 결정되는 것으로 알려져 있다 [6].

현재까지의 Spintronics 발진 신호에서 측정된 3-dB 선폭은 수 ~ 수십 MHz 특성으로 나타나고 있다. 이러한 위상 잡음특성의 문제의 원인은 첫째로 출력 레벨이 작음으로 인해 여러 잡음 환경에서 만들어지는 잡음 레벨과 크게 차이나지 않는 현상에

기인하며, 둘째로는 주파수가 동조가 되지 않아 여러 주파수 성분을 가지고 발진하기 때문이다. 실제적으로 스펙트럼을 통해 PLL On/Off 조건을 달리하여 Spin 발진 신호를 측정하면 위상잡음 특성이 20dB 정도의 개선을 보인다 [6].

## 2. Spintronics 발진기의 진폭/주파수 비 선형성 특성을 고려한 송수신기 방식

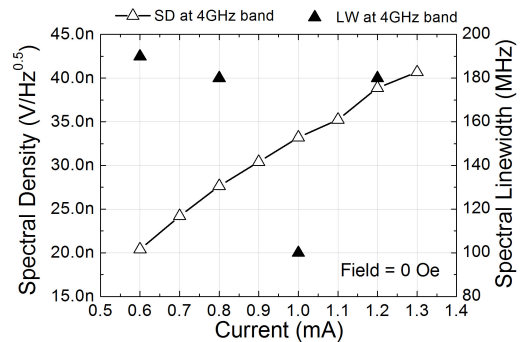
Spintronics 발진기는 일반적으로 인가되는 자계와 전류에 대하여 주파수가 이동하는 특성을 가지고 있다 [7]. 이러한 특성을 적극 활용하여 PRF (Pulse Repetation Frequency) 신호의 의해서 Spintronics 발진기에 주파수 변조(Frequency shifting Keying)을 할 수 있음을 제시하고 있고 참조논문 [7]에서는 PRF 주파수 10 MHz 이상에서 변조 한계를 가짐을 보고하고 있다. 또 하나의 Spintronics 발진기의 특성은 전류에 따라서 출력레벨과 출력신호의 3-dB 선폭이 변화한다. 주파수만 이동하는 것이 아니라 전류에 따라서 출력 신호의 진폭 및 3-dB 선폭이 변화함으로 최종 출력되는 Spintronics 발진기의 출력 주파수는 출력되는 신호 진폭에 의해서도 영향을 받아서 결정됨을 생각할 수 있다. 이러한 특성으로 Spintronics 발진기는 전류에 대한 주파수의 선형 특성과 비선형 특성이 얻어지고 있음을 보고하고 있다 [8]. 참조논문 [8]의 논문에서는 선형 영역 동작은 대략 발진 주파수의 상/하 측파대역(sideband) 신호의 레벨 크기가 같으며, 비선형 영역 동작에서는 상/하 측파대역 신호의 레벨 크기가 달라짐을 보고하고 있다.

즉, Spintronics 발진기를 활용한 통신구현에서는 기존 방식과 다른 새로운 변조 방식이 요구되며, 선형 및 비선형 동작에 영향 받지 않는 스핀 변조가 되어야 한다. 이러한 Spintronics 발진기 특성을 고려하여 본 논문에서는 인가되는 자계에 의해서 주파수를 결정하고, 전류에 의해서 발진 신호를 출력하는 방식의 주파수와 진폭을 동시에 사용하는 스핀 변조 방법을 택하였다. 이러한 스핀 변조 방식은 나노미터 크기를 갖는 Spintronics 어레이 구조를 적극 활용하면 구현이 쉽다.

## 3. Spintronics 발진기를 활용한 듀얼채널 구조

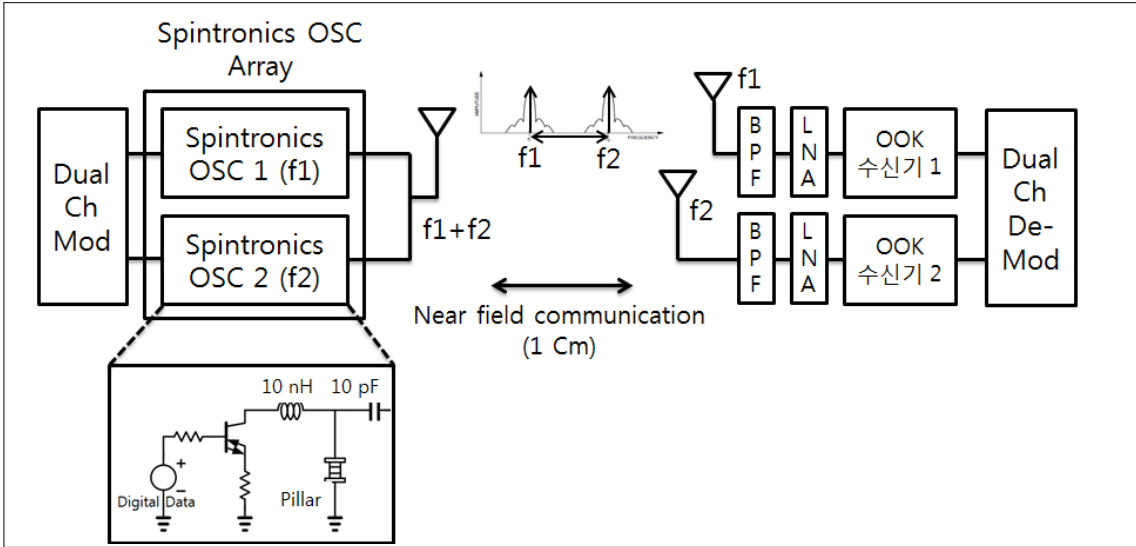
통신에 활용한 Spintronics 발진기를 자계가 없는 환경 조건에서 0.6 mA 에서 1.3 mA 까지의 전류의 변화를 주어서 발진 주파수를 4 GHz 대역에서 얻었다. 측정하여 얻어진 신호 레벨(Spectral density)과 3-dB 선폭을 그림 4에 나타내었다. 측정은 Tektronics 사의 RSA 3408A Real-time 스펙트럼 분석기 (spectrum analyzer)를 사용하여 측정하였다. 얻어진 결과는  $20 \sim 45 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  사이의 출력레벨 결과와 100 ~ 200 MHz의 3-dB 선폭을 얻은 결과를 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 특성 개선을 하지 않고는 기존 통신에 활용될 수 없는 수준의 발진 특성이다. 그러나 전 세계 우수 기관들이 발진 특성을 개선하기 위한 연구를 집중적으로 진행하고 있기때문에 곧 극복되리라 판단한다.



(SD:Spectral density, LW:3-dB 선폭-Linewidth)  
 (그림 4) Spintronics 발진기의 출력레벨 및 3-dB 선폭 동작 특성  
 (Fig. 4) Output level and Linewidth of the Spintronics oscillator

결과적으로 Spintronics 발진기 기술을 활용하여 통신에 활용하기 위해서는 기존 통신 기술이 아닌 새로운 구조적 접근이 요구된다. 본 논문에서는 Spintronics 발진기의 저출력 신호 특성으로도 무선 통신이 가능한 응용인 NFC (Near Field Communication)와 같은 근접거리 통신에 국한했다.



<그림 5> Spintronics 발진기의 어레이 구조를 활용한 듀얼채널 송수신기  
 <Fig. 5> Dual-channel receiver using the spintronics oscillator array

본 논문에서 사용된 Spintronics 발진기는 -60 dBm 수준으로 수신기는 1 cm 이하의 거리를 지원하는 Link budget을 만족하여 수신할 수 있도록 수신기의 잡음지수 및 수신기 이득을 갖도록 설계하였다. 송수신 방식에 있어서는 위상잡음 (Phase noise)에 둔감한 진폭변조 통신 구조를 채택하였다. 자유공간 경로손실은 일반적으로 식 (1)과 같다.

$$\text{자유공간 경로손실 (FSPL)} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad \text{--- (1)}$$

또한 Spintronics 발진기의 진폭 및 주파수 비선형 동작 특성으로도 통신이 가능할 수 있도록 OOK 구조로 통신을 채택하였다.

이러한 기본적 특성을 바탕으로 통신 방식을 정하였고, 두개의 Spintronics 발진기를 어레이화하여 듀얼 채널 통신 구조를 실험하였다. 그림 5는 Spintronics 발진기의 어레이 구조를 활용한 듀얼채널 송수신기 구조를 나타낸 것이다.

3-dB 선폭이 200 MHz 까지의 특성을 갖는 Spintronics 발진기 특성과 Spintronics 발진기의 광대역 동작 특성을 고려하여 통신 가능한 두 주파수의 이격거리를 700 MHz로 하여 f1 주파수를 3.5GHz, f2 주파수를 4.2 GHz로 정하였고, 하나의 안테나로 2개의 채널 신호를 동시에 전송할 수 있도록 구조

화 하였다. 수신기에서는 기존 LC 기술을 활용하여 이격된 각각의 주파수를 수신할 수 있도록 각 주파수에 해당하는 BPF와 LNA를 설계하였고, OOK 수신을 하여 신호를 복조할 수 있도록하였다.

#### IV. 실험 및 결과

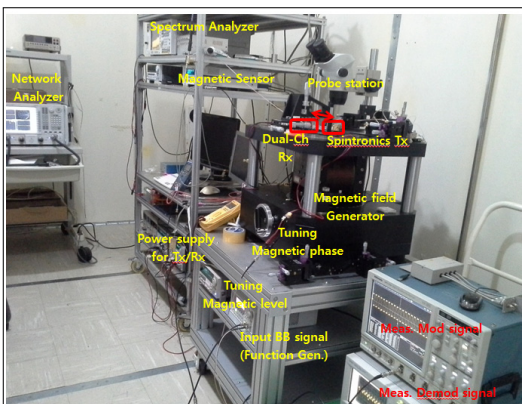
송수신기는 나노미터 크기의 Spintronics 발진기의 동작을 위해서 Probe station에서 동작하였고, Probe station 바로 아래는 자계 발생기를 위치시켜 자계의 크기와 각도를 변화시켜 주면서 원하는 주파수에 발진 할 수 있도록 세팅하였다. 동작 환경에 대한 그림은 그림 6과 같다.

그림 6은 Spintronics 어레이 발진기를 원하는 발진 주파수인 3.5 GHz 와 4.2 GHz 로 세팅하고, Spintronics 어레이 발진기의 신호에 각각 OOK 변조시켜 근접거리에 있는 듀얼 채널 수신기로 신호를 전달하여 복조시키는 실험 환경을 나타내었다. Spintronics 어레이 발진기를 원하는 주파수에 발진시킬 수 있도록 Probe station 바로 밑에 자계발생장치를 두었다. 자계 발생장치는 C-형 구조의 폐쇄형 회로로 구현하였으며, 정류된 전류 크기에의해

서 자체 값이 결정되도록 하였다. 발생하는 자계는 시료 중간으로 오도록 구조화 하였다. RF 신호의 특성은 스펙트럼 분석기 (Spectrum Analyzer)와 네트워크 분석기 (Network Analyzer)를 통해 검증하였고, 송수신된 신호는 오실로스코프 2개를 사용하여 수신된 복조 신호가 변조된 신호와 함께 비교하면서 실험할 수 있도록 하였다.

전송된 듀얼채널 신호를 분리하여 수신하기 위해서 수신기는 안테나 바로 다음단에 각각 BPF를 적용하였고, 3.5GHz, 4.2 GHz 각 신호 주파수 대역에서 1.5 dB, 2.0 dB의 삽입 손실을 가짐을 확인하였다. 또한 3.5 GHz 신호전송 시 4.2 GHz 주파수에서의 격리는 15 dB 이상의 격리를 가지며, 4.2 GHz 신호전송 시 3.5 GHz 주파수에서의 격리는 -35 dB 이상의 격리를 갖도록 설계하였다. LNA 이하 3.5 GHz 신호경로의 수신기는 3.8 GHz 까지 수신하도록 정합하였고, 4.2 GHz 신호경로의 수신기는 6 GHz 이상 충분히 수신하도록 듀얼 채널 수신기를 설계하였다.

격리도가 낮은 3.5 GHz 신호경로에서 4.2 GHz 신호가 간섭으로 작용할 것인지를 판단하기 위해서 가장 큰 신호레벨이 입력 될 수 있는 조건인 유선 연결시에 3.5 GHz 발진 신호를 제거하고 4.2 GHz 신호만을 입력시켰을 때에 수신기에서 수신되지 않음을 확인하여 격리도에 문제가 없음을 확인하였다.

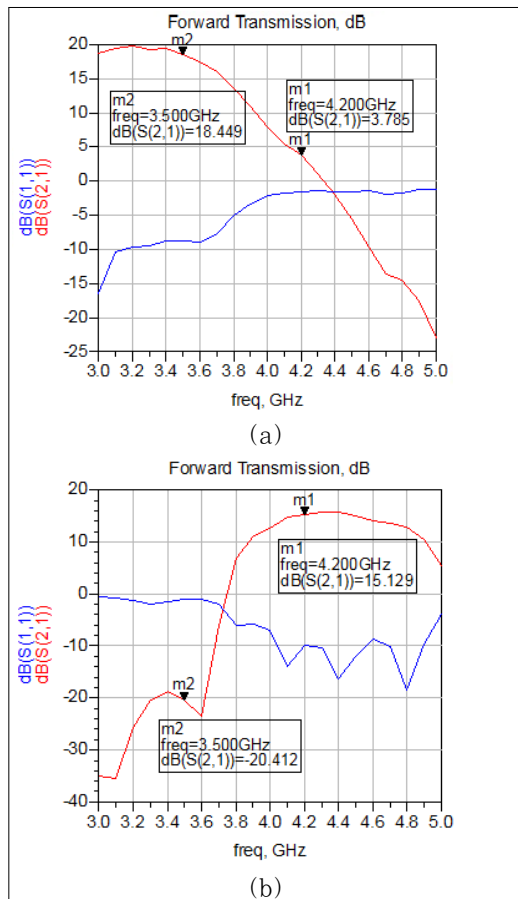


〈그림 6〉 듀얼 채널 수신기의 송수신 실험 환경

〈Fig. 6〉 The measurement setup for the dual-channel receiver using spintronics oscillator array

BPF 다음단에는 Spintronics 발진기의 작은 출력 레벨에서도 신호를 수신할 수 있도록 수신기의 감도를 높이기 위한 LNA (저잡음 증폭기)를 설계하여 수신기가 저잡음 지수로 충분한 이득을 가질 수 있도록 하였다. 측정결과 LNA는 3.5 GHz 신호 경로에서 잡음지수가 1.8 dB 이며, 이득은 20 dB를 얻었고, 4.2 GHz 신호 경로에서는 잡음지수가 2.0 dB 이며, 이득은 17.1 dB를 얻었다.

그림 7은 3.5 GHz 신호경로와 4.2 GHz 신호경로의 BPF 와 LNA 의 동작 결과를 네트워크 분석기로 측정하여 나타내었다.



(a) 3.5 GHz 신호 경로의 결과

(b) 4.2 GHz 신호 경로의 결과

〈그림 7〉 3.5 GHz 와 4.2 GHz 신호경로의 BPF 와 LNA 의 측정 결과

(a) The result of the 3.5 GHz signal path

(b) The result of the 4.2 GHz signal path

〈Fig. 7〉 The measurement result of the BPF and LNA for the 3.5 GHz and 4.2 GHz signal paths

채널이 3.5 GHz 신호 경로는 18 dB 이득을 가지며, 4.2 GHz 지점에서 15 dB 이득 시키고 있음을 나타내고 있으며, 채널이 4.2 GHz 신호 경로에서는 15 dB 이득을 가지며, 3.5 GHz 지점에서 35 dB 이득 시킴으로써 역시 충분히 간섭없이 4.2 GHz 수신 신호를 받아 들일 수 있음을 확인하였다.

수신기 각 채널에서 최종적으로 RF 신호를 복조하여 얻은 결과를 그림 8에 나타내었다. 스핀 변조기의 실험 조건으로 50% Duty를 갖는 사각파형의 주기신호를 각 채널에 사용하였고, 변조된 신호를 수신기의 각 채널에서 수신하여 결과를 얻었다. 송수신기 거리는 1 cm 조건이다.

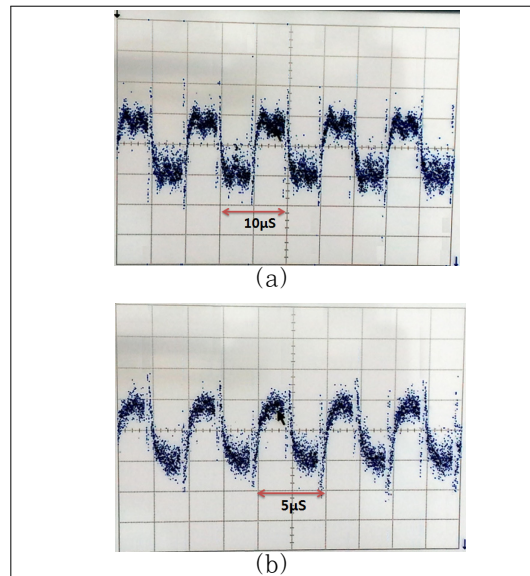
얻어진 결과는 각 채널이 200 kbps 와 400 kbps 를 수신함을 보여주고 있으며, 200 kbps의 경우 변조시 On/Off 신호에 따라의 수신된 신호의 증가하고 감소하는 지연시간 (rising/falling time) 결과가 90% 이내에서 동작함을 판단할 때 200 kbps 신호까지 안정적으로 수신하고 있음을 알 수 있었다.

본 논문을 통해서 200 kbps 수준의 전송 속도까지의 실험결과를 확보하였지만 여러 다른 논문을 통해서 보고된 결과는 수 나노 초 단위로 동작하는 안정 시간을 갖는 Spintronics 발진기를 기반으로 수십 Mbps 급의 동작을 얻을 수 있음을 보고 하고 있다 [5-9]. 본 논문에서는 200 kbps 급 수준의 제한된 전송 속도 성능을 얻고 있는 것은 Spintronics 발진기의 구동 전류를 지원하는 전류 미러 회로 (Current mirror circuit)를 통해 변조를 하는데 있어서 Transistor 응답 속도의 제한과 Spintronics 발진기의 바이어스를 지원하는 Bias-T의 RC 지연시간으로 인한 결과이다. RF 구동을 위한 Bias-T 회로는 피할 수 없는 필수적인 회로인 반면, 전류 미러 회로 대신 빠른 응답 속도를 갖는 전류 지원회로를 사용하면 데이터 전송율을 올릴 수 있을 것이다. 또는 전류 미러 회로에서 사용된 Transistor를 응답 속도가 빠른 Transistor로 대체하여 설계하면 Spintronics 발진기 전류를 빠르게 동작시킬 수 있어서 전송속도를 올릴 수 있을 것으로 판단한다.

아직 Spintronics 발진기는 통신에 사용하기에는 출력 레벨이 작고, 위상 잡음 특성을 거론하기에는

너무도 나쁜 위상잡음 특성을 갖는다. 하지만 OOK 통신 방식을 기반으로 실험 진행한 본 연구 결과를 통해서 Spintronics 발진기 신호를 통신에 사용할 수 있음과 동시에, 통신에 사용할 경우 Spintronics 어레이를 기반으로 듀얼 채널 송수신기로 확대 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

기존 듀얼 채널 통신 구현은 반드시 단말기와 중계기가 송수신기를 2개씩 가지고 있어야 가능한 개념이었다. 그러나 Spintronics 어레이를 사용하면 듀얼채널 통신을 간단히 구현할 수 있는 큰 장점을 갖는다. 더욱이 다채널 통신 구현으로도 확장이 가능함을 알 수 있다.



(a) 200 kbps 복조 결과

(b) 400 kbps 복조 결과

<그림 8> 수신기의 복조된 측정 결과

(a) The demodulation result of 200 kbps

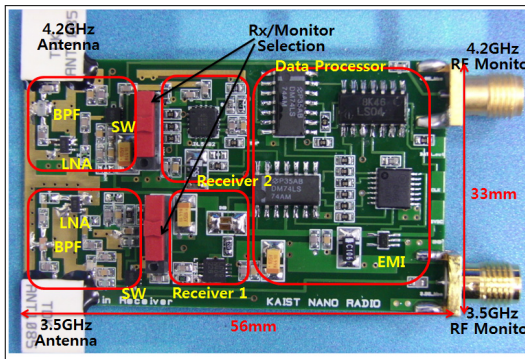
(b) The demodulation result of 400 kbps

<Fig. 8> Demodulation result on receiver

그림 9는 듀얼 채널 수신기의 실장 보드를 나타내었다. 각 주파수를 수용할 수 있는 광대역 안테나를 사용하였고, 안테나의 이득은 2 dBi이다. 각 채널의 경로에는 안테나 바로 다음단에 BPF와 LNA가 위치하고 있음을 볼 수 있다. 각 신호 경로는 PCB에서도 충분히 격리되도록 분리하여 설계하였다. LNA 출력은 각 채널의 수신기(Receiver1,



Receiver2)로 입력되기 전에 8 GHz 까지 동작하는 RF 스위치(SW)를 사용하여 RF 모니터 또는 각 채널의 수신기의 경로를 선택할 수 있도록 하여 RF 경로의 디버깅을 쉽도록 하였다. RF 모니터 또는 각 채널의 수신기의 경로 선택은 DIP 스위치로 조절할 수 있도록 회로화하였다. Spintronics 발진기를 통해서 송신된 두 신호는 수신기에서 주파수별 분리처리되어 각각 신호를 200 kbps까지 복조하고 있음을 확인하였다.



〈그림 9〉 듀얼 채널 수신기 실장 보드 사진  
〈Fig. 9〉 The photo of the dual-channel receiver

## V. 고찰

Spintronics 발진기의 어레이에서 송신된 듀얼 채널 신호를 동시에 수신하는 수신기를 통해서 두 채널의 수신 데이터를 각각 최종적으로 200 kbps급의 데이터 전송을 무선으로 할 수 있었다. 수신기의 크기는  $56 \times 33 \text{ mm}^2$  크기로 구현되었다. 본 논문은 Spintronics 발진기의 신호 레벨 -60 dBm 크기의 한계로 근접거리 통신에만 가능하였지만 Spintronics 발진기 어레이 신호를 활용하여 진폭 및 주파수 변조를 동시에 할수 있는 새로운 스핀 변조의 가능성을 제시하였다. 듀얼 채널 수신기를 활용하여 각 채널을 복조할 수 있었으며, 200 kbps 까지의 통신을 구현하였다. 이는 아직까지 구현된 연구가 전 세계적으로 이루어진 바 없는 결과이다.

본 연구를 통해 Spintronics 발진기의 나노미터 급 크기의 재료를 사용하여 저전력 소모로 수 GHz의 초고주파 발진신호 대역에서 듀얼 채널 통신을 실

현하였다.

다양한 통신 및 방송 서비스를 수용해야 하는 이동통신 단말기와 언제 어디서나 안전통신 채널을 확보하고자 하는 차량용 WAVE 통신의 듀얼채널 통신등의 요구사항으로 복잡해져 가는 무선통신 시스템에 나노기술로 대표되는 Spintronics 기술을 새롭게 적용함으로써 무선통신 구조를 획기적으로 개선할 수 있는 가능성을 제시하였다. 또한 새로운 접근의 미래 유비쿼터스 환경 무선 센서로 본 기술이 경쟁력 있게 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] ITS Committee of the IEEE Vehicular Technology Society, "IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)–Multi-channel Operation," Aug. 2011.
- [2] H.S. Choi, Q.D. Bui, S.Y. Kang, H.Y. Song, D.M. Kang, I.Y. Oh, C.S. Park, K.J. Choi, and Y.S. Jin, "Concurrent dual-channel RF transceiver Module with Diversity for 802.11p WAVE," *IEEE SECON 2012 Workshop on Vehicular Communications, Sensing and Computing (VCSC)*, Jun. 2012
- [3] A. M. Deac et al., "Bias-driven high-power microwave emission from MgO-based tunnel magnetoresistance devices," *Nature Physics*, vol. 4, pp.803-809, Oct. 2008.
- [4] P. Villard et al., "A GHz Spintronic-Based RF Oscillator," *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, vol. 45, no. 1, Jan. 2010.
- [5] M. Manfrini, T. Devolder, J. Kim, P. Crozat, N. Zerounian, C. Chappert, W. Roy, L. Lagae, G. Hrkac, and T. Schrefl, "Agility of vortex-based nanocontact spin torque oscillators," *Applied Physics letters* 95, 192507, Nov. 2009
- [6] M. Keller, A. Kos, T. Silva, W. Rippard, and M. Pufall, "Time domain measurement of phase noise in a spin torque oscillator," *Applied physics*

letters 94, 193105, May 2009.

- [7] M. Manfrini, T. Devolder, J. Kim, P. Crozat, C. Chapper et al., "Frequency shift keying in vortex-based spin torque oscillators," *Journal of Applied Physics* 109, 083940 (2011)
- [8] M. Pufall, W. Rippard, S. Kaka, T. Silva, and S. Russek, "Frequency modulation of spin-transfer oscillators," *Applied Physics Letters* 86, 082506 (2005)
- [9] 한석희, 신경호, 장준연, 구현철, 엄종화, "스핀 트로닉스 기술," *한국물리학회, 물리학과 첨단 기술, KIST 창립 40주년 기념 특집*, Jun. 2006

**저자소개**



**오 인 열 (Oh, Inn-yeal)**

2009년 3월 ~ 현 재 : KAIST 전기및 전자공학부 연구 부교수  
 2007년 1월 ~ 2009년 3월 : KAIST 전기및 전자공학부 연구 조교수  
 2005년 3월 ~ 2006년 12월 : 위덕대학교 정보통신공학부 전임강사  
 1996년 7월 ~ 1999년 7월 : (주)LG전자 이동통신연구단, 연구원  
 E-mail : iyoh@kaist.ac.kr  
 연락처 : 042) 350-7398



**박 승 영 (Park, Seung-young)**

2011년 12월 ~ 현 재 : 한국기초과학지원연구원, 선임연구원  
 2010년 3월 ~ 2011년 11월 : 한국기초과학지원연구원, 위촉연구원  
 E-mail : parksy@kbsi.re.kr  
 연락처 : 042) 865-3655



**박 철 순 (Park, Chul Soon)**

2005년 7월 ~ 현 재: 지능형 RF 연구센터 우수공학연구센터(ERC) 소장  
 2001년 6월 ~ 2005년 6월: 초고주파회로 국가지정연구실(NRL) 연구책임자  
 1999년 1월 ~ 현 재: 한국정보통신대학교/한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수  
 1987년 1월 ~ 1989년 1월: 미국 AT & T Bell Labs 방문과학자  
 1985년 2월 ~ 1999년 1월: 한국전자통신연구원 실장  
 E-mail : c-spark@kaist.ac.kr  
 연락처 : 042) 350-3455