

Six-Port 직접 변환을 이용한 QPSK 수신기 설계 및 제작

Design and Implementation of QPSK Receiver Using Six-Port Direct Conversion

양 우 진 · 김 영 완

Woo-Jin Yang · Young-Wan Kim

요 약

본 논문에서는 six-port 위상 상관기와 신호 검파부 그리고 I 및 Q 채널 신호를 복조하는 간단한 구조를 갖는 six-port 직접 변환 QPSK 수신기를 설계하고 제작하였다. Six-port 위상 상관기의 출력 단자간 출력 위상 신호를 해석하고, 출력 단자 신호 간 90° 위상 관계로부터 QPSK 신호를 복조하는 간단한 회로의 직접 변환 수신기 구조를 갖는다. Six-port 위상 상관기는 90° 하이브리드 branch line 및 전력 분배기를 가지며, 11.7~12.0 GHz 주파수 대역에서 설계된 six-port 위상 상관기의 출력 신호는 5° 이내의 양호한 위상 오차 특성을 갖는다. 또한 직접 변환 수신기 구성 소자간 양호한 정합도 및 진폭 특성에 의해 약 5° 이내의 위상 오차를 갖는 I, Q 데이터를 복원하였다.

Abstract

A simple six-port direct conversion QPSK receiver which is made up of a six-port phase correlator, a signal power detector, and I/Q channel signal de-modulator is designed and implemented in this paper. The output phase signals of six-port phase correlator are also analysed. On the basis of 90° phase relation among the six-port phase correlator output signals, the QPSK de-modulation circuit is designed by a simple circuit. The six-port phase correlator is made up of 90° hybrid branch line and power detector. The six-port phase correlator, which is designed in frequency range of 11.7 to 12.0 GHz, gets the phase error characteristics less than 5°. By considering matching network and amplitude balance in the designed frequency range, the designed six-port direct conversion QPSK receiver demodulates the I and Q signals with performance less than 5° phase error.

Key words : Six-Port, Direct Conversion, QPSK Demodulation, Direct Conversion Receiver(DCR)

I. 서 론

직접 변환 방식은 중간 주파수를 사용하지 않고 전송 주파수를 저주파 기저대역으로 직접 변환하는 방식으로서 소형, 경량화 및 이동 휴대 단말기 구성을 위한 중요 요소로 대두되고 있다. 직접 변환 구조로는 일반적으로 혼합기를 사용하는 구조와 six-port 위상 상관기와 검파 다이오드를 사용하는 six-port 구조가 있다. Six-port 직접 변환 방식은 혼합기를 사용

하는 구조에 비해서 회로 구조가 간단하여 집적화에 유리하다. 그리고 다이오드를 작동시키기 위해 필요한 전압이 혼합기를 작동시키기 위해 필요한 전압보다 상대적으로 낮은 장점이 있다. 또한 국부 발진기의 전력 소비가 상대적으로 낮고 광대역을 구현하기에 유리하여 고속 데이터 전송을 가능하게 할 수 있어 six-port 결합을 이용한 직접 변환 방식이 널리 이용되고 있는 추세이다^{[1],[2]}. 초고주파 신호의 위상을 결정하는 six-port 구조는 1964년 Cohn에 의해서 처

군산대학교 전자정보공학부(School of Electronic and Information Engineering, Kunsan National University)

· 논문 번호 : 20060918-114

· 수정완료일자 : 2006년 11월 17일

음으로 제안되고^[3], 근래에 여러 전송 방식에 적용한 연구 결과들이 발표되고 있다^{[4]~[6]}. 기존의 연구 결과에서는 six-port 출력 신호들의 신호 처리 기법에 의해 다중 전송 신호를 복원하고 있으나, six-port 위상 상관기 출력 신호의 진폭 크기 및 위상 관계로부터 간단한 복조 회로 구성이 가능하며, PSK 전송 신호를 복원하는 비교적 간단한 직접 변환 수신기를 구성할 수 있다. Six-port 위상 상관기에서 출력되는 4개의 출력 신호들은 각각 90° 위상 관계를 갖는 신호들의 합으로 QPSK 신호를 간단히 복원할 수 있다.

본 논문에서는 six-port 위상 상관기의 출력 진폭 크기 및 위상 신호를 해석하고, 해석된 결과를 이용한 전송 신호 복원 회로와 six-port 상관기와 신호 검파부와의 높은 정합도를 갖는 회로 구성으로 비교적 간단한 구조의 직접 변환 회로를 설계한다. 전송 신호는 QPSK 변조 방식을 적용하며, six-port 출력 신호의 위상과 진폭 불일치를 최소화하기 위하여 six-port 위상 상관기와 신호 검파부는 다단 LC 정합 회로를 사용한다. 또한 QPSK 신호 복원을 위해서는 six-port 위상 상관기 출력 신호의 위상 관계를 적용하여 적합한 I 및 Q 신호를 복원하도록 한다. Six-port 위상 상관기와 신호 검파부와와의 정합도에 의해 출력 신호간 위상 불일치 성분이 크게 감소되어 90° 간격의 일정한 위상 특성을 갖는 QPSK 신호를 복원한다.

II. Six-port 직접 변환 및 설계

2-1 Six-port 직접 변환 및 QPSK 신호 복원

Six-port 직접 변환 수신기(DCR)는 six-port 위상 상관기, 신호 검파부, 신호 복조부로 구성되어 있다^[6]. RF 신호와 국부 발진 신호가 six-port 위상 상관기에 각각 입력되면 이들은 six-port 구조에 의해 적절하게 위상이 변화하고 4개의 출력단에 서로 다른 위상을 가지고 합해진다. 신호 검파부는 4개의 출력 신호들을 기저대역으로 변환하는 역할을 하며, 차등 증폭기로 구성되는 신호 복조부에 의해 기저대역 신호 I와 Q 신호를 생성하게 된다. 그림 1과 같은 six-port 위상 상관기는 국부 발진 신호 LO와 입력 데이터 RF 신호를 더해서 4 개의 다른 위상을 갖는

출력 신호를 생성한다^[1]. 회로상의 신호 손실이 없고 동등한 진폭 크기로 분리기에 의해 나누어지는 경우, 위상 상관기의 출력 신호는 $(0.5LO + j 0.5RF)$ 와 $(j0.5LO + 0.5RF)$, $j(0.5LO + 0.5RF)$ 와 $(0.5LO - 0.5RF)$ 의 구성을 갖는 위상 변화, 0°, 90°, 180°, 270°를 갖는 입력 신호들의 합이며, six-port 위상 상관기 출력 신호의 수는 디지털 변조 기법의 상태(state) 수와 같다. 그림 1의 six-port 위상 상관기를 90° 하이브리드 branch line으로 구성할 경우, six-port 직접 변환 수신기 구성은 그림 2와 같다.

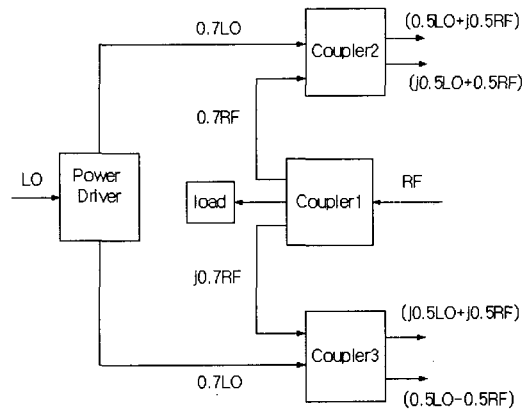


그림 1. Six-port 위상 상관기 구성도
Fig. 1. Six-port phase correlator block diagram.

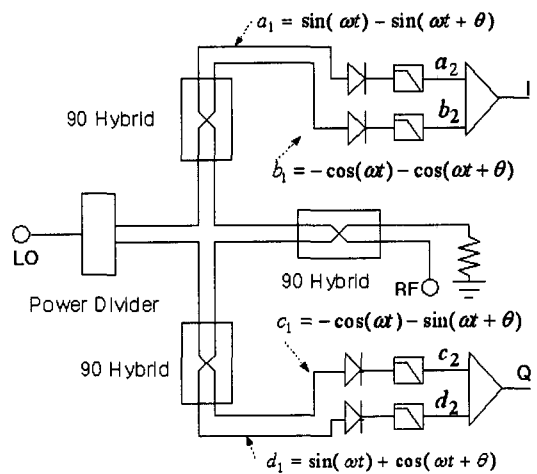


그림 2. 90° 하이브리드 branch line을 사용한 six-port 직접 변환 수신기 구성도
Fig. 2. Six-port DCR diagram using 90° hybrid branch line.

직접 변환기의 간단한 해석을 위하여 동일한 출력 크기와 선로상의 위상 변화를 무시하고, 국부 발진 신호와 입력 RF 신호를 각각 $\cos(\omega t)$ 와 $\cos(\omega t + \theta)$ 라고 할 경우, 신호 검파부 앞단의 신호들은 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} a_1 &= \sin(\omega t) - \sin(\omega t + \theta) \\ b_1 &= -\cos(\omega t) - \cos(\omega t + \theta) \\ c_1 &= -\cos(\omega t) - \sin(\omega t + \theta) \\ d_1 &= \sin(\omega t) + \cos(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

다이오드 검출기가 square-law 소자이므로 식 (1)의 신호들을 제곱함으로써 신호 검파부의 출력을 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} a_1^2 &= \sin^2(\omega t) - 2\sin(\omega t)\sin(\omega t + \theta) \\ &\quad + \sin^2(\omega t + \theta) \\ b_1^2 &= \cos^2(\omega t) + 2\cos(\omega t)\cos(\omega t + \theta) \\ &\quad + \cos^2(\omega t + \theta) \\ c_1^2 &= \cos^2(\omega t) + 2\cos(\omega t)\sin(\omega t + \theta) \\ &\quad + \sin^2(\omega t + \theta) \\ d_1^2 &= \sin^2(\omega t) + 2\sin(\omega t)\cos(\omega t + \theta) \\ &\quad + \cos^2(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

신호 검파부 출력 신호는 고주파 신호를 제거하기 위하여 저역 통과 필터를 통과하며, 저역 통과 필터에 의한 기저대역 신호는 식 (3)과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} a_2 &= 1 - \cos(\theta), \quad b_2 = 1 + \cos(\theta) \\ c_2 &= 1 - \sin(\theta), \quad d_2 = 1 + \sin(\theta) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)은 입력 RF 신호가 기저대역 신호로 변환된 DC 레벨의 신호로 나타나는 것을 알 수 있다. 입력 RF 신호의 변조 신호 성분이 변하면, six-port 기저대역 신호는 식 (3)으로부터 그림 3과 같이 나타난다. Six-port 4개의 출력 신호는 90° 간격의 일정한 위상 관계를 가지며, 4개의 출력 상태로 나타남을 알 수 있다. 기저대역 신호로 직접 변환된 4개 출력 신호는 전송 신호의 변조 신호 성분을 나타내고 있으며, 차동 증폭기의 신호 조합에 의해 다음과 같은 변조 신호 성분으로 나타낼 수 있다.

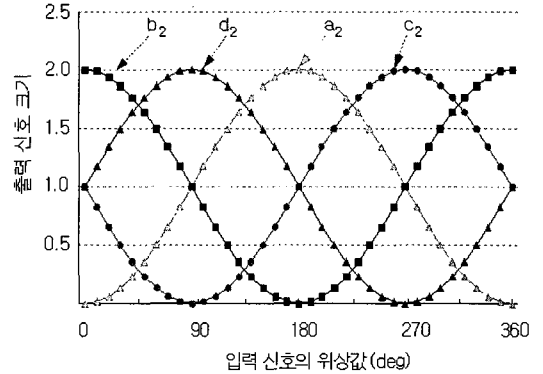


그림 3. Six-port 직접 변환기의 출력 위상신호
Fig. 3. Output phase signal of six-port DCR.

$$b_2 - a_2 = 2 \cos(\theta), \quad d_2 - c_2 = 2 \sin(\theta) \quad (4)$$

식 (4)의 출력 신호는 I, Q 채널의 기저대역 신호로서 입력 신호의 위상 변화에 따라 크기가 변한다. 그러나 차동 증폭기는 이득이 큰 값을 가지므로 식 (4)의 출력 신호는 QPSK 변조 신호 상태를 나타내는 I, Q 디지털 채널 신호로 재생된다.

아울러, 식 (4)의 결과로부터 six-port 수신기에 의해 I, Q 채널의 기저대역 신호의 크기가 정해지면, RF 또는 국부 발진 신호의 위상과 주파수를 추적할 수도 있다. 또한 다른 형태의 하이브리드와 전력 분배기에 의한 직접 변환 구조에 대해서도 식 (4)와 같은 동일한 결과를 얻을 수 있다^[7].

2-2 QPSK 수신기 설계 및 모의 성능

QPSK 직접 변환 수신기는 그림 2와 같이 six-port 위상 상관기, shottky 다이오드로 구성되는 신호 검파부 그리고 I 및 Q 채널 신호 재생을 위한 회로로 구성된다. QPSK six-port 직접 변환 수신기는 ADS를 사용하여 설계되고 모의 성능이 수행된다.

Six-port 위상 상관기는 식 (1)과 같은 출력 위상 관계를 갖도록 그림 5와 같은 Wilkins power divider 및 90° 하이브리드 branch line으로 설계한다. 그림 4와 같은 입출력 단자를 갖는 six-port 위상 상관기의 손실 및 위상 특성은 그림 5와 같다. 국부 발진 신호 입력단과 4개 출력단의 삽입 손실은 설계 대역폭 11.7~12.0 GHz 대역에서 약 $-6.2 \sim -6.6$ dB 이내의 평탄한 특성을 가지며, 또한 입력 RF 단과 4개 출

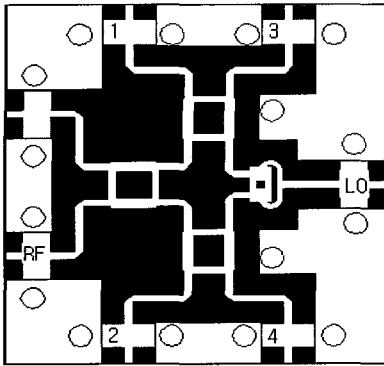


그림 4. Six-port 위상 상관기
Fig. 4. Six-port phase correlator.

력단과의 손실 특성은 약 $-6.2 \sim -6.8$ dB의 양호한 특성을 나타낸다. 출력단간 위상 상관 특성은 90° 및 180° 위상 관계를 나타내고 있으며, 설계된 six-port

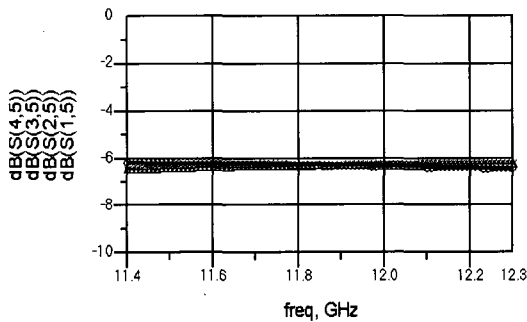
위상 상관기는 QPSK 직접 변환 전 처리부(front-end)로 적합함을 알 수 있다.

신호 검파부는 Ku 대역 검파용 Schottky 다이오드를 사용하여 설계한다. 입력단은 2단 LC 정합회로를 사용하며, 출력단은 RF 단락 및 저역 통과 여과기(필터) 회로로 설계한다. 설계된 신호 검파부는 그림 6과 같으며, 저역 통과 여과기는 RF 신호 단락 스텐브(stub) 회로로 구성한다.

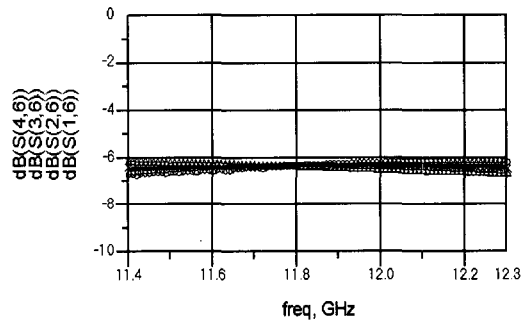
설계된 신호 검파부의 성능은 그림 6(b)와 같으며, $11.7 \sim 12.0$ GHz 대역에서 -5 dB 이하의 삽입 손실 특성을 갖는다.

Six-port를 이용한 QPSK 직접 변환 수신기의 복조 성능은 그림 7과 같은 구조로 수행한다.

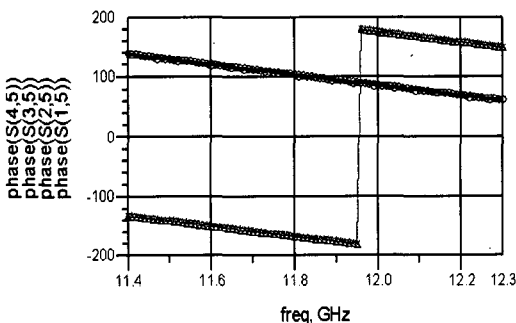
설계된 그림 4의 six-port와 그림 6의 신호 검파부 그리고 비교기로 구성되는 QPSK 직접 변환 수신기



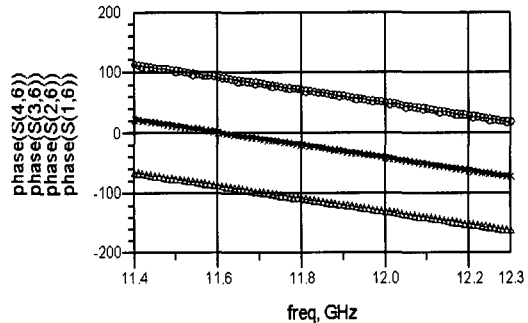
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5. 설계된 six-port 위상 상관기 특성. (a), (c) 국부 발진 신호 입력단과 출력단 손실 및 위상 특성, (b), (d) 입력 RF 입력단과 출력단 손실 및 위상 특성.

Fig. 5. Performance of designed six-port phase correlator. (a), (c) Insertion loss and phase characteristics between local oscillator signal port and output ports, (b), (d) Insertion loss and phase characteristics between input RF signal port and output ports.

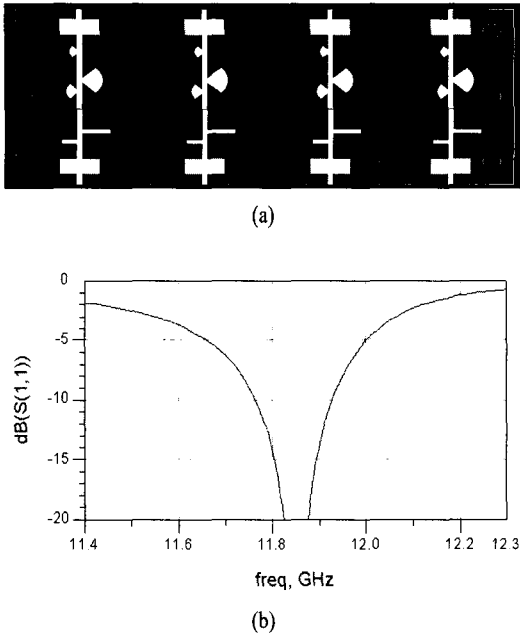


그림 6. 신호 검파부 설계 layout (a) 및 모의 성능 (b)
 Fig. 6. Designed circuit layout (a) and simulation performance (b).

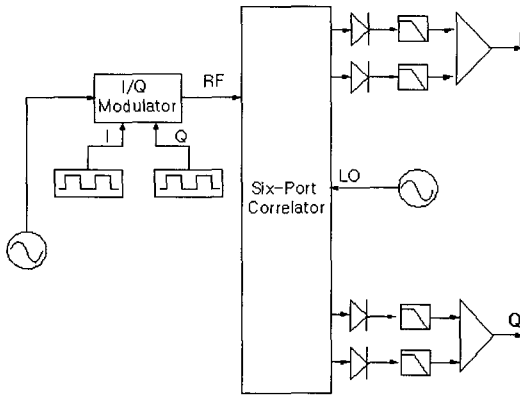


그림 7. Six-port 위상 상관기를 사용한 QPSK 직접 변환 수신기 구성
 Fig. 7. Block diagram of QPSK direct conversion receiver using six-port correlator.

의 모의 성능은 그림 8과 같다. 그림 8은 그림 2에 나타난 직접 변환 수신기가 정확히 I/Q 채널 신호를 재생하고 있음을 나타내고 있으며, 입력 변조 신호와 국부 발진 신호와의 위상차(15°)가 발생하여도 I 및 Q 채널 신호를 재생하고 있음을 보여주고 있다.

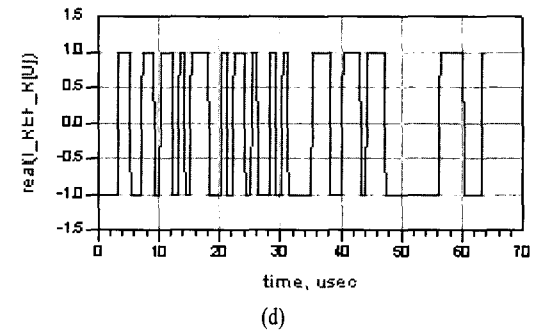
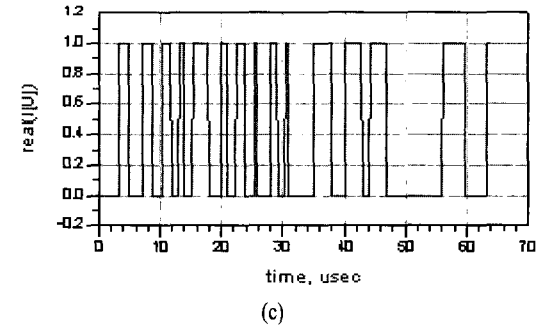
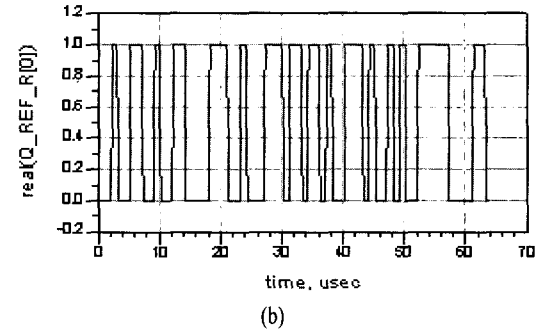
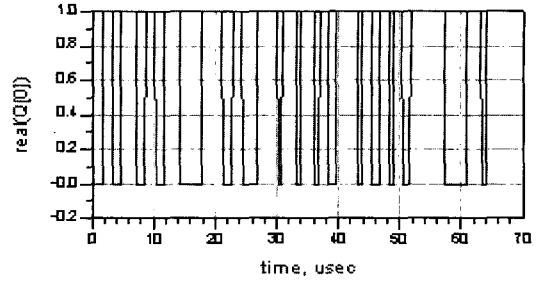
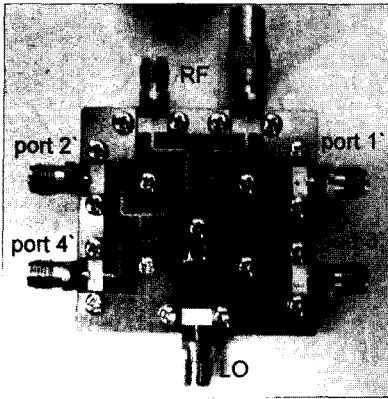
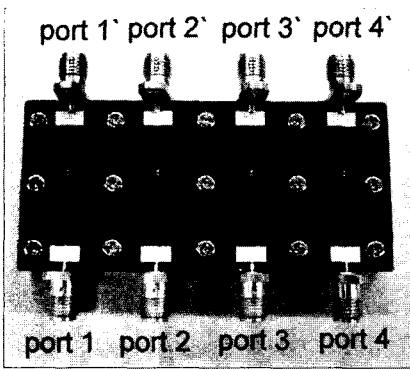


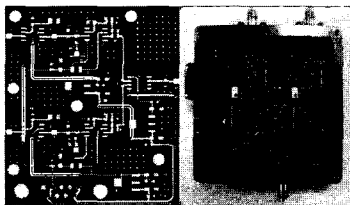
그림 8. Six-port 수신기 신호 재생. (a) 재생 신호, (c) 재생 신호 @ 15° 위상차 및 (b), (d) 기준 신호
 Fig. 8. Signal re-generation of six-port receiver. (a) re-generation signal, (c) re-generation signal @ 15° phase difference, (b), (d) reference signal.



(a) Six-port 위상 상관기
(a) Six-port phase correlator



(b) 신호 검파부
(b) Power detector



(c) QPSK 신호 재생부
(c) QPSK signal re-generator

그림 9. 제작된 six-port 직접 변환기 구성부
Fig. 9. Designed six-port DCR.

III. 제작 및 측정

3-1 제작

Six-port 위상 상관기 및 신호 검파부는 유전율 2.25를 갖는 10-mil duroid 기판을 사용하여 제작하였다. Six-port 위상 상관기의 50 Ω 종단(termination) 단

자는 그림 9(a)와 같이 외부의 50 Ω 종단 소자를 사용한다. 신호 검파부는 HSCH-9161 zero-bias schottky 다이오드를 사용한다^[8]. QPSK I 및 Q 채널 신호 재생부는 신호 검파부에서 저역 통과된 신호의 기저대역 신호를 2차 여과하는 능동 저역 통과 여과기 및 고 이득 차동 증폭기로 구성되어 제작하였다. 2차 여과기는 QPSK 전송 심볼율에 비례하는 대역폭을 갖도록 한다.

그림 9는 제작된 QPSK 신호 수신을 위한 six-port 직접 변환 수신부를 보여준다.

3-2 성능 측정

Six-port 직접 변환 QPSK 수신기는 six-port 위상 상관기, 신호 검파부의 성능을 측정하며, QPSK I 및 Q 채널 신호 재생 성능은 six-port 위상 상관기 및 신호 검파부를 동일한 전기적 길이를 갖는 케이블로 연결하고, I 및 Q 채널 신호 재생부를 연결하여 측정하였다. 그림 10은 six-port 위상 상관기의 손실 및 위상 출력 측정 특성을 보여준다. 설계 대역폭 11.7 GHz~12.0 GHz 영역 내에서 $-8 \text{ dB} \pm 0.25 \text{ dB}$ 손실 특성으로, 그림 5의 설계 값보다는 약 3 dB 정도의 삽입 손실이 증가하고 이득 평탄도는 12.0 GHz 영역에서 다소 증가하나, 대역 내에서 약 0.5 dB 이내로 양호한 특성을 갖는다.

Six-port 위상 상관기의 출력 단자 간 위상은 동위상 및 $\pm 90^\circ$ 위상 관계를 가지며, 출력 단자 간 약 5° 이내의 거의 일치하는 위상 특성을 나타내고 있다. 신호 검파부 성능 측정 특성은 그림 11에 나타나 있다. 설계 중심 주파수 11.85 GHz에서 정합된 회로 특성이 약 12.0 GHz 주파수 영역으로 측정되었으나, 신호 검파 출력은 입력 전력 -20 dBm 에서 약 75~110 mV의 사용 가능한 검파 출력 특성을 갖는다.

Six-port 위상 상관기와 신호 검파부가 연결된 출력 신호는 그림 11(a)와 같다. 출력 신호간 위상 변화는 그림 3과 같이 90° 간격을 가지나, 단자 간 출력 위상의 값 오차로 인하여 약 5° 이내의 위상 오차를 갖는다. 또한 출력 단자 간 손실 특성의 차이로 출력 전압의 차이를 보여준다. 그림 12(a)와 같은 출력 신호 특성이 QPSK I 및 Q 채널 재생 회로에 입력되면 그림 12(b) 또는 그림 12(c)와 같은 QPSK I 및 Q 채널

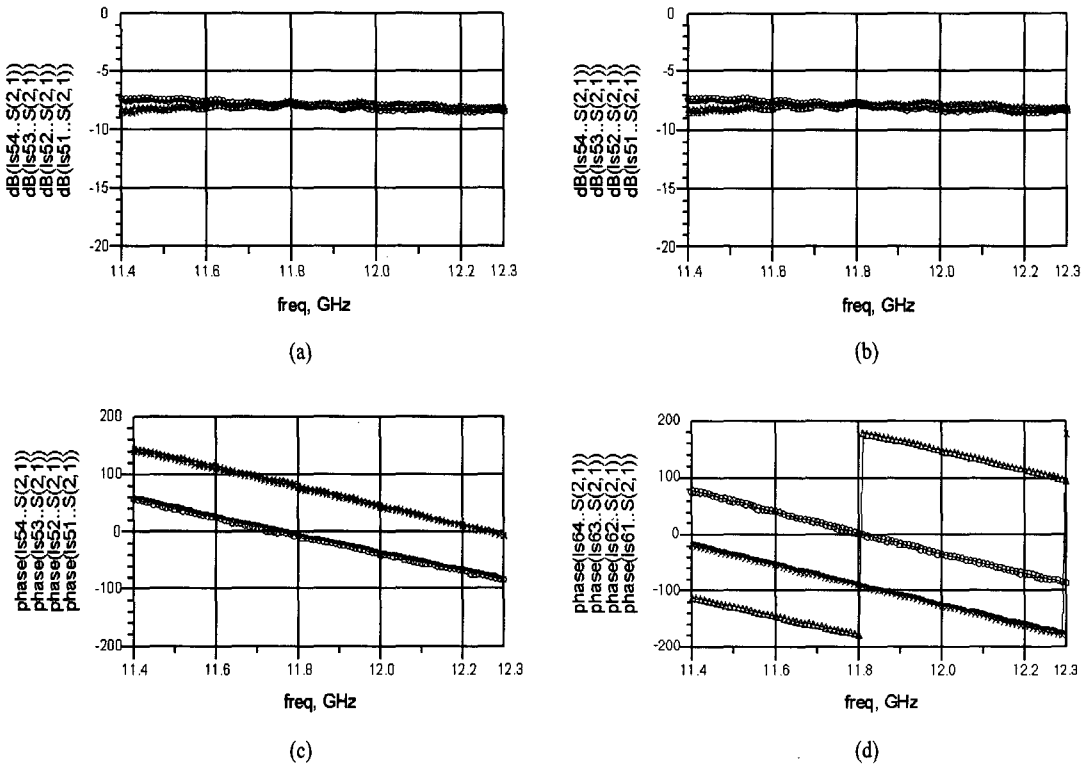


그림 10. 제작된 six-port 위상 상관기 성능 특성. (a), (c) 국부 발진 신호 입력단과 출력단 손실 및 위상 특성, (b), (d) 입력 RF 입력단과 출력단 손실 및 위상 특성

Fig. 10. Performance of implemented six-port phase correlator. (a), (c) Insertion loss and phase characteristics between local oscillator signal port and output ports, (b), (d) Insertion loss and phase characteristics between input RF signal port and output ports.

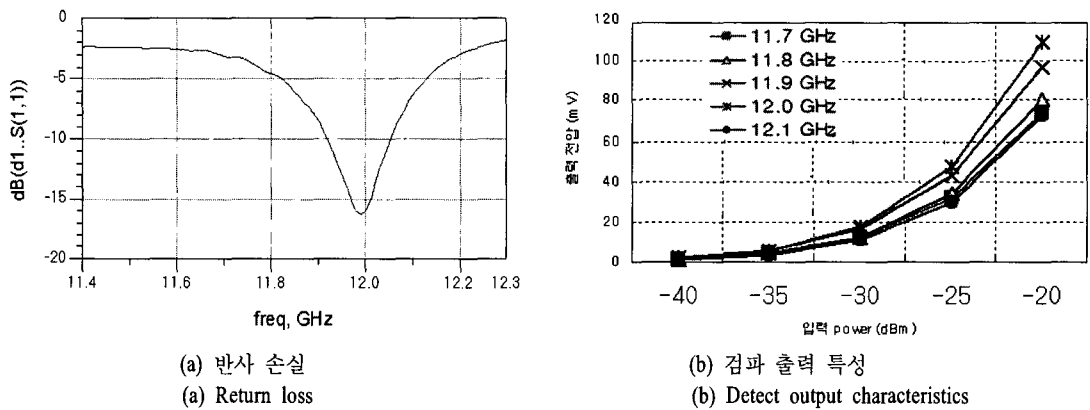


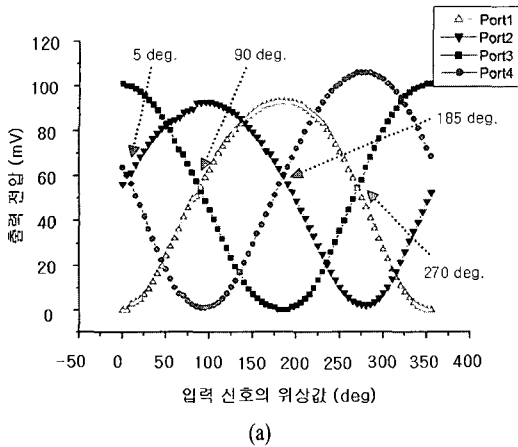
그림 11. 신호 검파부 측정 성능

Fig. 11. Measured performance of power detector.

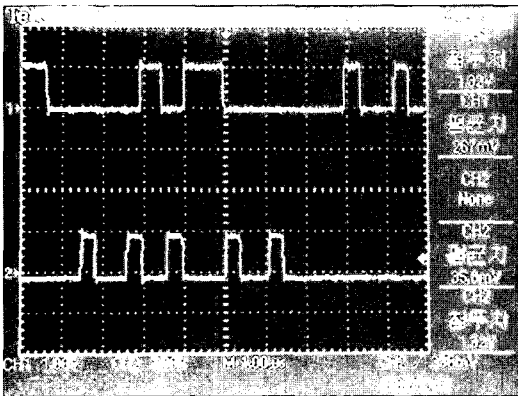
널 신호를 재생하며, 간단한 six-port 직접 변환 및 QPSK 복조에 의해 전송 신호를 기저대역으로 직접

수신하는 간단한 구조를 갖는 것을 알 수 있다.

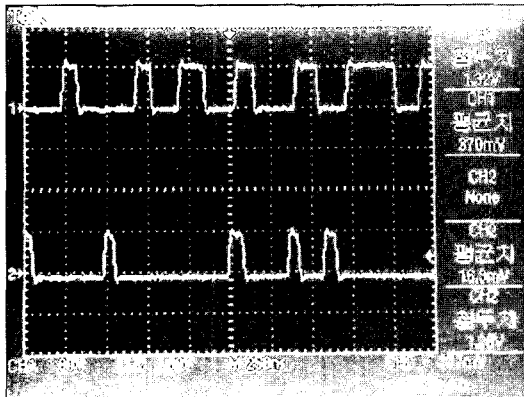
그림 12의 전송 데이터는 각각 2 Msp/s 및 4 Msp/s



(a)



(b)



(c)

그림 12. QPSK six-port 직접 변환 수신기 성능. (a) 출력 위상 신호 및 (b), (c) 재생된 I 및 Q 채널 신호 ((b): 2 Msps, (c): 4 Msps).

Fig. 12. Performance of QPSK six-port DCR. (a) output phase signal and (b), (c) re-generated I- and Q-channel signals ((b): 2 Msps, (c): 4 Msps).

를 적용하여 측정하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 six-port 직접 변환을 이용한 간단한 구조의 QPSK 전송 신호를 복원하는 직접 변환 수신기를 해석하고 설계·제작하였다. 설계된 직접 변환 수신기는 3개의 90° 하이브리드 branch line과 1개의 Wilkins 전력 분배기로 구성되는 six-port 전 처리부, schottky 다이오드로 구성되는 신호 검파부 그리고 저역통과 여과기 및 차동 증폭기로 구성되는 I 및 Q 채널 신호 재생부로 구성된다. 수신 신호 복조는 QPSK 신호를 적용하여 six-port 위상 상관기의 출력 단자 간 90° 위상 신호로부터 해석되었다. 설계된 직접 변환 수신기는 구성 소자간 진폭 및 위상 정합을 위한 성능 모의 실험 및 설계를 통하여 약 5° 이내의 위상 오차를 갖는 I, Q 데이터를 복원할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] T. Hentschel, "The six-port as a communications receiver", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 3, pp. 1039-1047, 2005.
- [2] M. Torsten, H. Alexancer, and P. L. Johann, "An extremely broadband software configurable six-port receiver platform", *European Microwave Conf.*, vol. 1, no. 2, pp. 623-626, 2003.
- [3] S. B. Cohn, N. P. Weinhouse, "An automatic microwave phase measurement system", *Microwave Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 49-56, Feb. 1964.
- [4] J. C. Schiel, S. O. Tatu, Wu Ke, and R. G. Bosisio, "Six-port direct digital receiver(SPDR) and standard direct receiver(SDR) results for QPSK modulation at high speeds", *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, vol. 2, pp. 931-934, 2002.
- [5] B. Razavi, "Design considerations for direct-conversion receiver", *IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 44, no. 6, pp. 428-435, 1997.
- [6] R. Mohamed, K. Dragan, W. Zhaocheng, and U. J. Jens, "Broadband digital direct down conversion

receiver suitable for software defined radio", *PI-MRC*, vol. 1, no. 1, pp. 100-104, 2002.

[7] J. B. Tsui, *Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications*, John Wiley & Sons, Inc.

1986.

[8] Agilent, *Surface Mount Zero Bias Schottky Detector Diodes: HSCH-9161 Technical data*, Agilent, 2005.

양 우 진

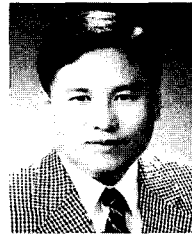


2005년: 군산대학교 정보통신전파공학과 (공학사)

2005년~현재: 군산대학교 정보통신전파공학과 석사과정

[주 관심분야] 무선통신 시스템, 무선통신 회로 설계

김 영 완



1983년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1985년: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

2003년: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)

1984년~1990년: 동양정밀공업(주) 중앙연구소 과장

1990년~1992년: (주)유영통신 이사

1992년~2004년: 한국전자통신연구원 책임연구원

2004년~현재: 군산대학교 전자정보공학부 교수

[주 관심분야] RF/Microwave 회로설계, 디지털 위성방송/통신, Microwave devices, 무선통신시스템