

---

# 집중 소자형 6단자 위상 상관기 설계와 집중 소자형 직접변환 수신 성능

유재두\* · 김영완\*\*

Design of lumped six-port phase correlator and performance of lumped  
direct conversion receiver

Jae-Du Yu\* · Young-wan Kim\*\*

---

본 논문은 중소기업청 지원 산학공동기술개발(일반과제, No. 00036729) 지원 사업 결과임

---

## 요 약

본 논문에서는 집중 소자형 6단자 위상 상관기 구조를 설계·제작하고, 이를 바탕으로 집중 소자형 6단자 위상 상관기를 이용한 L-대역 직접변환 수신 성능을 분석하였다. 제작된 L-대역 집중 소자형 6단자 위상 상관기 소자는 저항형 전력 분배기와 twist-wire 동축케이블을 사용하였으며, 낮은 대역에서 소형화 구조가 가능하고, 광역 특성을 갖는다. 집중 소자형 6단자 위상 상관기를 사용한 L-대역 직접변환 수신 성능은 집중 소자형 6단자 위상 상관기의 LO 단자와 RF 입력 단자에 각각 중심 주파수가 1.69 GHz이고 전력이 -20 dBm인 LO 신호와 QPSK 신호를 입력하여 측정하였다. 집중 소자형 6단자 위상 상관기를 사용한 직접변환 구조는 양호한 I/Q 디지털 신호를 복원할 수 있었다.

## ABSTRACT

The six-port phase correlator using lumped elements was designed and fabricated in this paper, also the receiving performance of L-band direct conversion receiver using lumped six-port phase correlator element was analyzed. The proposed L-band lumped six-port phase correlator element was composed of a resistive power divider and the twist-wire coaxial cables. The proposed lumped six-port structure provides the small-sized configuration and wide-band characteristics. The performance of the L-band lumped direct conversion receiver structure was measured under the conditions of 1.69 GHz frequency for LO-CW signal and RF-QPSK signal, which are input signals for the lumped six-port phase correlator element. The direct conversion receiving structure using the proposed lumped six-port phase correlator element can recover the good digital I/Q signal.

## 키워드

집중 소자형 6단자 소자, 직접변환 수신, L-대역 직접변환 수신기

## Key word

Lumped six-port element, Direct conversion receiver, L-band DCR

---

\* C&B Tech

\*\* 군산대학교 (교신저자, ywkim@kunsan.ac.kr)

접수일자 : 2010. 01. 10

심사완료일자 : 2010. 02. 02

### I. 서 론

6단자를 이용한 직접변환 방식은 6단자로 구성되는 위상 상관기, 전력 검파기, 그리고 I/Q 신호 재생을 위한 기저대역부로 구성된다[1].

6단자 직접변환 방식의 위상 상관기는 비교적 높은 주파수 영역에서는 분포 소자를 사용하여 주로 구현되고 있으며, 능동형 직접변환의 I/Q 채널에서 발생하는 불균형 특성을 용이하게 극복할 수 있는 구조를 제공하고 있다[2]. 그리고 낮은 주파수 영역(L/S 대역)에서는 혼합기 등으로 구성된 능동형 직접변환을 사용한 직접화된 회로로 구현되고 있으나, I/Q 채널간 불균일, DC 오프셋(offset) 등 채널간의 열화와 능동형 소자로 인한 전력 소비, 그리고 협대역 특성을 갖는다. 낮은 주파수 영역에서 6단자 위상 상관기를 구현하는 단일 칩 구조는 사용 주파수의 제한성이 있고[3][4], 마이크로스트립 라인 구조의 평면형 구조는 낮은 주파수 영역에서 크기 감소의 제한성으로 넓은 대역의 경박 단소형 직접변환 단말기 구성에 문제점으로 작용한다. 그러므로 낮은 주파수 영역에서도 6단자 위상 상관기 구조를 이용하여 광대역 및 소형 구조의 수신 단말기 구성을 가능하게 하는 낮은 주파수 영역의 6단자 위상 상관기 구조와 소자에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 낮은 주파수에서 소형화 구조를 갖는 집중 소자형 6단자 위상 상관기의 출력 진폭 크기 및 위상 신호를 해석하고, 위상 상관기 회로를 설계 제작한다. 아울러, 제작된 집중 소자형 6단자 위상 상관기를 사용한 직접변환 수신 구조를 구성하고, 집중 소자형 L-대역 직접변환 수신 성능을 분석한다.

### II. 집중 소자형 6단자 위상 상관기와 직접변환 수신

#### 2.1 집중 소자형 6단자 소자와 직접변환 수신

본 논문에서 제작된 집중 소자형 6단자 위상 상관기의 구조는 그림 1과 같다. 집중 소자형 6단자 위상 상관기는 세 개의 twist-wire 동축케이블과 한 개의 저항형 전력 분배기로 구성되고, 두 개의 입력단과 네 개의 출력단으로 이루어진 여섯 개 단자를 가지고 있다. RF 신호가

하나의 입력 포트(port 6)에 연결되고 LO 신호가 다른 입력 포트(port 5)에 연결될 경우, 집중 소자형 6단자 위상 상관기의 산란 계수(S)는 저항형 전력 분배기와 twist-wire 동축케이블의 산란 계수에 의해 다음과 같이 얻어진다.

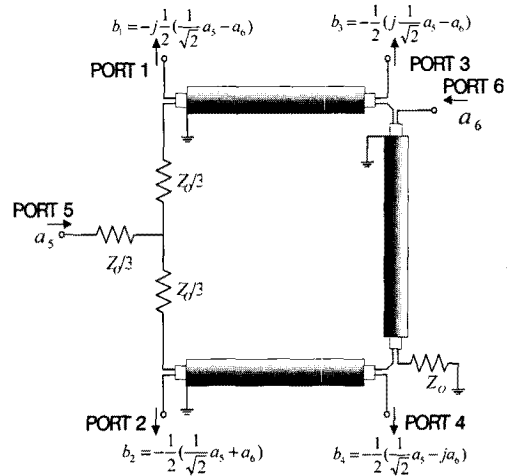


그림 1. 집중 소자형 6단자 위상 상관기의 구조.  
Fig. 1. Configuration of lumped six-port phase correlator element.

$$[S] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-j}{\sqrt{2}} + j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-j}{\sqrt{2}} + 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\sqrt{2}} - 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\sqrt{2}} + j \\ \frac{-j}{\sqrt{2}} & \frac{-j}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ +j & +1 & -1 & +j & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

두 개의 정규화 입력 신호( $a_5$ ,  $a_6$ )의 위상차가  $\Delta\varphi = \varphi_6 - \varphi_5$ 이고, 크기 비율을  $\alpha$ 라 하면, 두 입력 신호는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} a_5 &= a \exp(j\varphi_5) \\ a_6 &= \alpha a \exp(j\varphi_6) = \alpha a_5 \exp(j\Delta\varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

결과적으로 식 (1)의 6단자 산란 계수에 의해서 네 개의 출력은 식 (3)과 같다.

$$b_i = a_5 S_{i5} + a_6 S_{i6}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

식 (2)의 입력 신호를 갖는 6단자 위상 상관기 출력 신호(식 (3))가 입력 신호 전력 크기의 제공에 비례하는 제곱 특성(square-law behavior)을 갖는 각각의 전력 검파기에 입력되면, 4개의 전력 검파기 출력 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_1 &= K|b_1|^2 = K \frac{\alpha^2}{4} \left[ \frac{1}{2} + \alpha^2 - \sqrt{2} \alpha \times \cos(\Delta\varphi) \right] \\ V_2 &= K|b_2|^2 = K \frac{\alpha^2}{4} \left[ \frac{1}{2} + \alpha^2 - \sqrt{2} \alpha \times \sin(\Delta\varphi) \right] \\ V_3 &= K|b_3|^2 = K \frac{\alpha^2}{4} \left[ \frac{1}{2} + \alpha^2 + \sqrt{2} \alpha \times \cos(\Delta\varphi) \right] \\ V_4 &= K|b_4|^2 = K \frac{\alpha^2}{4} \left[ \frac{1}{2} + \alpha^2 + \sqrt{2} \alpha \times \sin(\Delta\varphi) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 상수  $K$ 는 동일한 전력 검파기 특성을 가질 경우, 입력 신호 전력에 대한 DC 출력 전압을 나타내는 전압 감도 ( $V/W$ )이다.

식 (4)와 같은 전력 검파기 출력 신호가 비디오효 증폭기, 차동 증폭기 그리고 비교기로 구성되는 I/Q 신호 재생부인 기저대역부에 입력될 경우, 기저대역부의 차동 증폭기에서 식 (5)와 같이 뺄셈 동작을 하여 아날로그 I/Q 신호를 재생할 수 있다.

$$\begin{aligned} I &= V_3 - V_1 = \frac{\alpha K \alpha^2}{\sqrt{2}} \cos(\Delta\varphi) \\ Q &= V_4 - V_2 = \frac{\alpha K \alpha^2}{\sqrt{2}} \sin(\Delta\varphi) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)와 같은 아날로그 I/Q 재생 신호가 기저대역부의 비교기를 통과하면, QPSK 변조 신호 상태를 나타내는 디지털 I/Q 신호가 재생된다.

## 2-2 집중 소자형 6단자 위상 상관기 설계 및 성능 분석

### 2-1절에서 6단자 직접변환 수신 구조의 위상 상관기

소자로 사용된 집중 소자형 6단자 위상 상관기를 설계하고 성능을 분석한다.

중심 주파수 1.69 GHz 대역에서 손실 특성이 -6 dB인 저항형 전력 분배기 한 개와 -3 dB 손실 특성을 갖는 twist-wire 동축케이블 세 개를 사용하여 집중 소자형 6단자 위상 상관기를 그림 2와 같이 설계하였다. 그림 2와 같은 이상적인 집중 소자형 6단자 위상 상관기의 모든 출력 단자(port)의 손실 특성은 입력 단자(port) 5에 대해서는 -9 dB이고 입력 단자 6에 대해서는 -6 dB 특성을 갖는다.

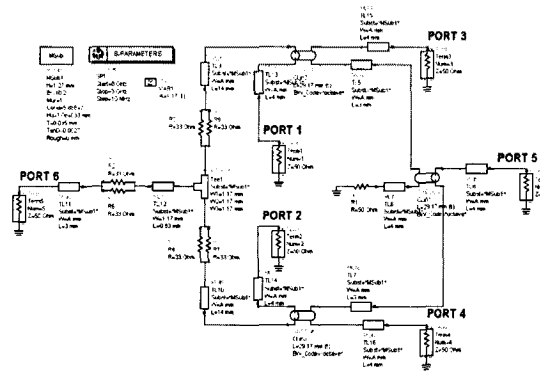
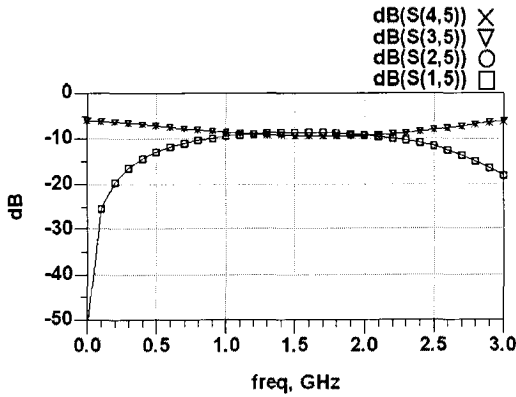


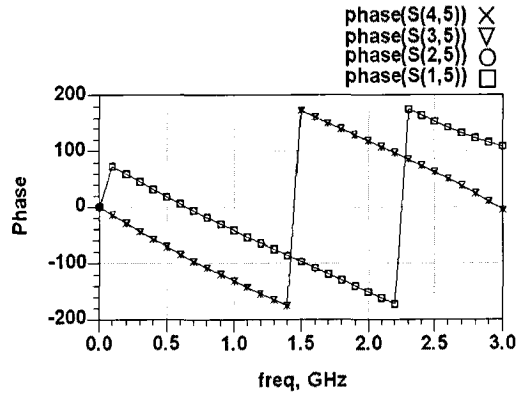
그림 2. 집중 소자형 6단자 소자 설계도.  
Fig. 2. Design layout of lumped six-port element.

그러나 구현된 집중소자를 사용할 경우, 손실 특성에 의해 그림 3과 같은 설계된 6단자 위상 상관기 소자의 성능이 나타난다.

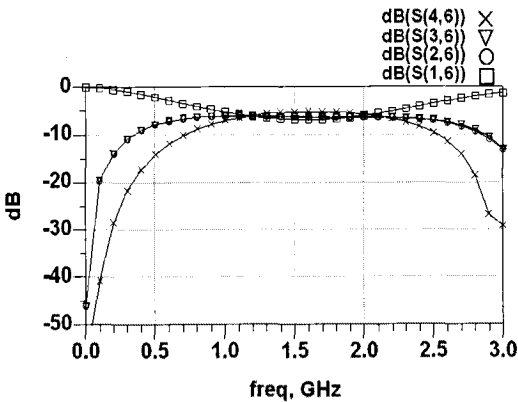
그림 3(a)와 같이, 중심 주파수에서 단자 5에 대한 손실 특성은 twist-wire 동축케이블 2, 3의 결합 단자에 연결된 단자 1, 2에서 -8.66 dB이고 출력 단자에 연결된 단자 3, 4는 -9.44 dB이다. 그리고 그림 3(b)에서 보듯이, 단자 6에 대한 손실 특성은 twist-wire 동축케이블의 출력 단자를 두 번 거친 단자 1은 -6.80 dB, 출력과 결합 단자를 한번씩 거친 단자 2, 3은 -6.26 dB, 그리고 결합 단자를 두 번 거친 단자 4는 -5.29 dB이다. 여기서, 손실 특성에 관한 주파수 대역폭을 설정한다면, 단자 5는 1 GHz ~ 2.1 GHz 사이에서 약 -9.5 dB 이하임을 알 수 있고, 단자 6은 1.1 GHz ~ 2.15 GHz 사이에서 -6.5 dB 이하임을 알 수 있다. 그러므로 대역폭의 크기는 약 1 GHz로 설정할 수 있다.



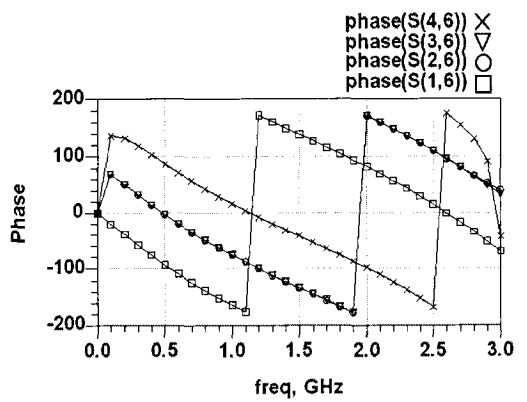
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 3. 집중 소자형 6단자 손실 특성  
(a) 입력 단자 5와 (b) 입력 단자 6.

Fig. 3. Loss characteristics of lumped six-port element  
(a) input port 5 and (b) input port 6.

위상 특성은 그림 4와 같이 단자 5에 LO 신호를 인가 하였을 경우, 단자 1과 2, 단자 3과 4가 동위상이 되고 이들은 각각 90°의 위상차가 발생한다. 그리고 단자 6에 RF 신호를 인가하였을 경우, 단자 2와 3이 동위상이 되고 단자 1과 4는 각각 90°의 위상차가 나타난다[5]. 설계된 집중 소자형 6단자 위상 상관기의 사용대역폭 내에서 단자 간 위상 오차는 2° 미만이다.

그림 4. 집중 소자형 6단자 손실 특성  
(a) 입력 단자 5와 (b) 입력 단자 6.

Fig. 4. Loss characteristics of lumped six-port element  
(a) input port 5 and (b) input port 6.

### III. 집중 소자형 6단자 위상 상관기 제작과 직접변환 수신 성능

집중 소자형 6단자 소자의 저항형 전력 분배기와 twist-wire 동축케이블 연결을 위한 기관은 유전율 10.2의 RO3210을 사용하여 제작하였다. 그림 5는 전력 분배기와 twist-wire 동축케이블을 사용하여 제작된 집중 소자형 6단자 위상 상관기 소자를 보여준다. 제작되어진 집중 소자형 6단자 위상 상관기의 크기는 약 54mm×51.63mm이다.

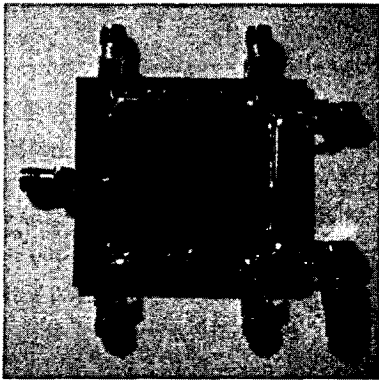


그림 5. 제작된 집중 소자형 6단자 위상 상관기 소자.  
Fig. 5. Fabricated lumped six-port phase correlator element.

그림 6은 제작된 집중 소자형 6단자 소자의 측정된 손실 및 위상 특성을 보여준다.

1.2 GHz ~ 2 GHz 대역에서의 손실 특성은 입력 LO 신호 단자와 출력 신호 단자 간(S15 ~ S45) 약 9.3 ~ 11.3 dB, 그리고 RF 신호 단자와 출력 신호 단자 간(S16 ~ S46) 약 5.4 ~ 8 dB의 성능을 보여준다. 이는 twist-wire 동축케이블의 출력 단자와 결합 단자에서 발생하는 0.76 dB의 손실차이 때문이다. 이러한 손실 특성은 기저대역부를 구성하는 비디오 증폭기의 증폭도를 조절하여 보상될 수 있다. 그리고 출력 단자 간 위상은 동위상 및  $\pm 90^\circ$  위상 관계를 만족하며, LO 신호 단자의 경우 위상 특성이 매우 양호한 특성을 갖고 있으나, RF 신호 단자의 경우 약  $5^\circ$  정도의 편이가 발생되고 있다. 이러한 특성은 제작 및 기구조립 과정에서 발생할 수 있으며, 조정 가능한 값으로 고려할 수 있다.

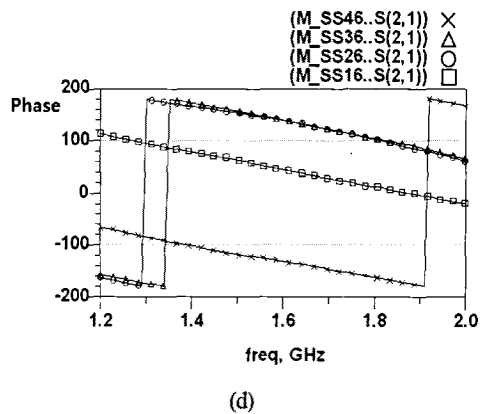
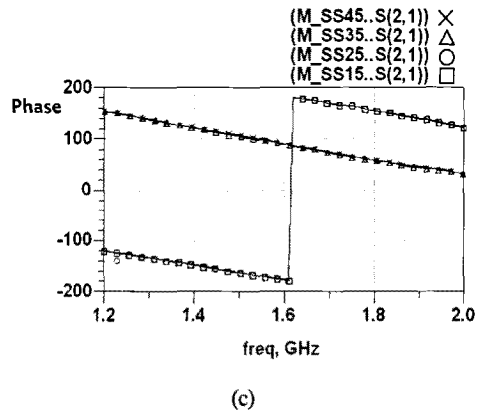
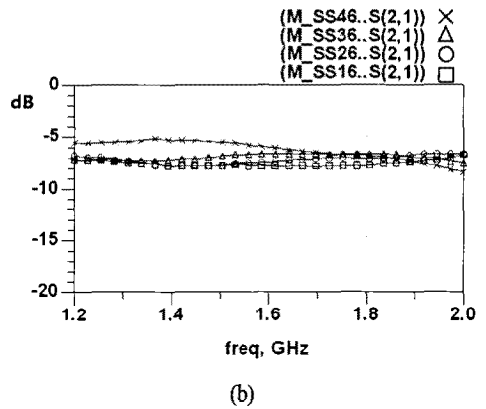
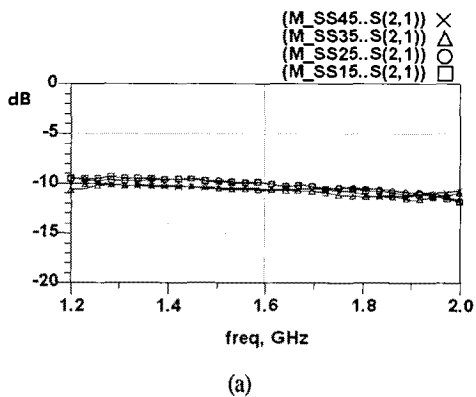
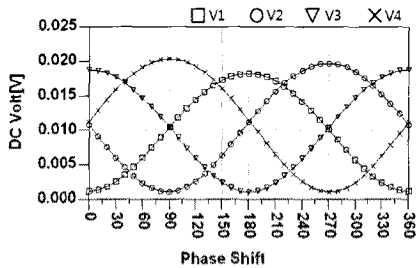


그림 6. 제작된 집중 소자형 6단자 소자의 성능 특성  
(a) 입력 단자 5 손실, (b) 입력 단자 6 손실  
(c) 입력 단자 5 위상 그리고 (d) 입력 단자 6 위상.  
Fig. 6. Performance of fabricated lumped six-port element  
(a) input port 5 loss, (b) input port 6 loss  
(c) input port 5 phase and (d) input port 6 phase.

기존의 기저대역부와 전력 검파기와 제작된 집중 소자형 6단자 위상 상관기 소자를 사용하여 구성된 집중 소자형 6단자 직접변환 수신 성능은 그림 7과 같다. 집중 소자형 6단자 위상 상관기의 입력 단자 5에 주파수가 1.69 GHz이고 전력이 -20 dBm인 LO 신호를 인가하고, 입력 단자 6에는 동일 전력을 갖는 중심 주파수 1.69 GHz의 4 Msps QPSK 신호를 입력하였다.

그림 7과 같이 집중 소자형 6단자 위상 상관기 소자의 각 단자간 신호 크기 및 위상값이 허용 오차내에서 입력 변조 신호의 위상값에 따라 나타나고 있음을 알 수 있으며, 양호하게 복원된 QPSK I/Q 데이터 신호를 보여준다.



(a)



(b)

그림 7. 집중 소자형 6단자 위상 상관기 구조 직접 변환 수신 성능, (a) 검파 신호와 (b) 복원 I/Q 신호(4 Mbps).

Fig. 7. Receiving performance of lumped six-port DCR, (a) Detection signal and (b) Recovered I/Q signal(4 Mbps).

#### IV. 결론

본 논문에서는 낮은 대역에서 소형화 구조가 가능한 집중 소자형 6단자 위상 상관기 구조와 소자를 설계 제작하고, 이를 이용한 직접변환 수신 구조의 성능을 분석하였다. 저항형 전력 분배기와 twist-wire 동축 케이블형 하이브리드 결합기 구조로 기존 소자로 구성된 위상 상관기보다 약 40% 이상의 소형화 설계가 가능하고, 광역 특성을 갖는다. 집중 소자형 6단자 위상 상관기를 이용한 직접변환 수신 구조는 전송 신호를 양호하게 복원하였으며, 광역 수신 성능을 나타내었다.

#### 참고문헌

- [1] S. O. Tatu, E. Moldovan, Ke Wu, R. G. Bosisio and T. A. Denidni, "Ka-band analog front-end for software-defined direct conversion receiver", *IEEE Trans. MTT*, vol. 53, no. 9, September 2005.
- [2] S. O. Tatu, E. Moldovan, Ke Wu, R. G. Bosisio, "Ka band direct digital receiver", *IEEE Trans. on MTT*, vol. 50, no. 11, pp. 2436-2442, November 2002.
- [3] M. Abe, N. Sasho, V. Brankovic and D. Krupe zevic, "Direct conversion receiver MMIC based on six-port technology," in *Proc. Eur. Wireless Technol. Conf.*, pp. 139-142, 2000.
- [4] Shinichiro, et al, "A software defined radio platform with direct conversion: SOPRANO," *Kluwer Journal on Wireless Personal Communications*, pp. 1-8, 2001.
- [5] S. O. Tatu, E. Moldovan, Ke Wu and R. G. Bosisio, "A new direct millimeter-wave six-port receiver," *IEEE Trans.* vol. 49, no. 12, December 2001.

## 저자소개



유재두(Jae-Du Yu)

2007년 군산대학교 전자정보공부  
학사

2009년 군산대학교 정보통신전파  
공학과 석사

2009년 ~ 현재 (주)씨앤비텍 연구소 근무

※관심분야: RF 회로설계, 무선통신 시스템, CCTV  
설계



김영완(Young-wan Kim)

1983년 경북대학교 전자공학사

1985년 경북대학교 전자공학석사

2003년 충남대학교 전자공학박사

1984~1990 동양정밀공업(주)  
중앙연구소 과장

1990~1992 (주) 유영통신 이사

1992~2004 한국전자통신연구원 책임연구원

2004~현재 군산대학교 전파공학과 교수

※관심분야: RF/Microwave 시스템 및 회로설계,  
디지털 위성방송/통신시스템, 마이크로파 소자