

직접 반송파 변조 시스템을 위한 IQ 변조기 설계

A Design of IQ Modulator for Direct Carrier Modulation Systems

문 태 수 · Kim Phirun · 정 용 채

Taesu Mun · Phirun Kim · Yongchae Jeong

직접 반송파 변조 시스템을 위한 IQ 변조기 설계

A Design of IQ Modulator for Direct Carrier Modulation Systems

문 태 수 · Kim Phirun · 정 용 채

Taesu Mun · Phirun Kim · Yongchae Jeong

요 약

본 논문에서는 입력 신호의 진폭과 위상을 미세 조정할 수 있는 새로운 IQ 변조기를 제안하였다. 제안된 IQ 변조기는 저위상 편차 감쇠기, 분배기, 그리고 결합기로 구성되어 있다. 기존 감쇠기의 위상 편차 특성을 극복하기 위한 새로운 위상 보상 기술을 사용하였고, 이를 수치적으로 분석하였다. 제안하는 IQ 변조기를 통하여 완전한 360°의 위상 조정과 동시에 입력 신호의 큰 진폭 조정이 가능하며, 극좌표계의 중심점을 지나는 선형적인 IQ신호 배열을 구현하였다.

Abstract

In this paper, a novel IQ modulator that precisely controls the magnitude and phase of input signals is proposed. The proposed IQ modulator consists of low phase deviation attenuators, a splitter, and a combiner. In order to overcome the phase deviation characteristics found in conventional attenuators, a novel phase compensation technique has been adopted and mathematically analyzed. Linear vector arrays along the center point with large magnitude output signal variations in a full 360° phase control are achieved on a polar plane by the proposed IQ modulator.

Key words : Attenuation, Low Phase Deviation, Multiple Input Multiple Output System, IQ Modulator, Zero Crossing

I. 서 론

다중 입력 다중 출력 시스템(MIMO)은 높은 주파수 효율과 잡음 특성을 가질 수 있고, 더 많은 데이터를 처리할 수 있다. 하지만 이 시스템의 성능은 각 안테나 경로에서 신호의 미세한 진폭과 위상 조정에 의해 크게 영향을 받는다. IQ 변조기를 사용하여 적절한 신호의 진폭과 위상의 조정이 가능하다면 미세한 빔 성형과 원하지 않는 안테나 부엽 제거가 가능하다^[1]. IQ 변조기는 레이더 시스템에서도 사용되며, 무선 통신 시스템에서 피드포워드 기법을 이용한 선형증폭기에서 중요한 회로도로 쓰인다^[2].

가변 위상천이기와 가변감쇠기로 구성된 캐스케이드 구조^{[2],[3]}와 이득 조절 증폭기를 포함한 IQ 변조기^{[4],[5]}를 설계하려는 몇 가지 접근법이 제안되었다. 이러한 변조기들은 저위상 편차를 갖는 고성능 가변 감쇠기와 일정한 출력 신호의 크기를 갖는 가변 위상천이기의 설계에 대한 어려움이 있다. 또한, IQ 변조기의 회로 크기가 위상천이기와 감쇠기로 인해 커지는 문제가 있다^[3]. 또 다른 접근으로는 반사형 평형 변조기가 있지만, 이 경우에는 많은 수의 수동 분산소자가 필요하게 되므로, 높은 동작 주파수에서도 큰 회로 크기를 필요로 한다^{[6],[7]}.

본 논문에서는 저위상 편차 감쇠기를 이용한 IQ

전북대학교 전자정보공학부 및 IT융합연구센터(Department of Electronics & Communication Engineering, IT Convergence Research Center, Chonbuk National University)

· 논문 번호 : 20110527-118

· 교신저자 : 정용채(e-mail : ycjeong@jbnu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 8월 29일

변조기를 제안하였다. 제안하는 감쇠기는 기존 감쇠기의 큰 위상 편차 특성을 줄이기 위한 새로운 보상 방법이 사용되었다.

II. 수식적 분석

그림 1(a)는 90° 하이브리드 분배기, 저위상 편차 감쇠기, 그리고 윌킨슨 전력결합기로 구성된 제안하는 IQ 변조기의 구조이다. 90° 하이브리드 분배기는 입력 신호를 동위상(I)과 90° 직교 위상(Q)로 분배한다. 저위상 편차 감쇠기는 I와 Q 경로 신호의 진폭과 극성(+/-)을 조정한다. 동위상(I)과 90° 직교 위상(Q) 신호는 동위상 윌킨슨 전력결합기에 의해 합성된다. 수식적으로 IQ 변조기의 출력은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$RF_{out} = \alpha L \angle -90^\circ + \beta Q \angle -180^\circ \quad (1)$$

그림 1(b)는 제안하는 저위상 편차 감쇠기의 등가 회로이며, PIN 다이오드로 종단된 전송 선로의 입력 임피던스는 식 (2)로 주어진다.

$$Z_{in} = Z_c A \frac{(Z_c + B \tan \theta) - (B - Z_c \tan \theta) \tan \theta}{(Z_c + B \tan \theta)^2 + (A \tan \theta)^2} - j \frac{(Z_c + B \tan \theta)(B - Z_c \tan \theta) + A^2 \tan \theta}{(Z_c + B \tan \theta)^2 + (A \tan \theta)^2} \quad (2)$$

식 (2)에서 A와 B는 다음과 같다.

$$A = R_j + \frac{R_j}{1 + (\omega R_j C_j)^2}, B = \frac{\omega R_j^2}{1 + (\omega R_j C_j)^2} - \omega L_s \quad (3)$$

식 (2)를 통해 계산되는 입력 반사 계수가 반사 계수 평면인 스미스 차트에서 원점(zero point)을 갖도록 하기 위해서, 입력 임피던스는 $Z_0 + j0$ Ω를 가져야 한다. 이것으로부터 식 (4)와 (5)를 얻을 수 있다.

$$-BZ_c \tan^2 \theta + (B^2 - Z_c^2 + A^2) \tan \theta + BZ_c = 0 \quad (4)$$

$$-(AZ_c^2 - Z_0 A^2 - Z_0 B^2) \tan^2 \theta - 2Z_0 Z_c B \tan \theta + AZ_c^2 + Z_0 Z_c^2 = 0 \quad (5)$$

이러한 조건들로부터 입력 반사 계수가 스미스 차트의 원점을 지나도록 할 수 있는 전송 선로의 특성 임피던스와 전기적 길이를 구할 수 있다.

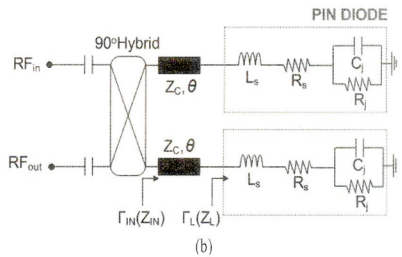
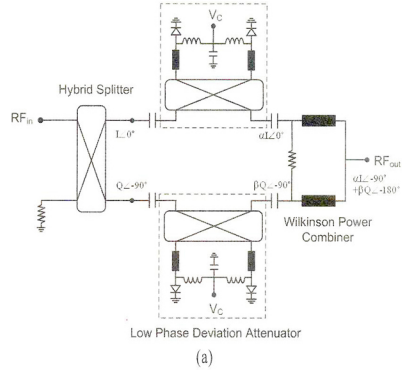
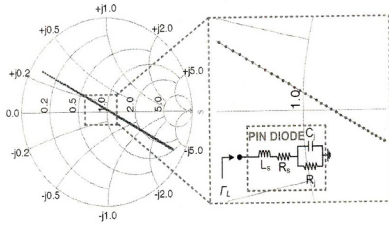


그림 1. 제안하는 (a) IQ 변조기 및 (b) 저위상 편차 가변 감쇠기의 구조

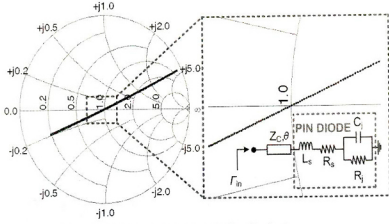
Fig. 1. The proposed structure of low phase deviation variable attenuator: (a) IQ modulator and (b) equivalent circuit.

제안하는 저위상 편차 감쇠기의 수식적인 분석의 타당성을 검증하기 위해서 전송 선로 쪽을 바라본 입력 반사 계수(Γ_{in})를 MATLAB을 이용하여 나타내었고, PIN 다이오드로만 이루어진 기존의 감쇠기의 반사 계수(Γ_t)와 비교하였다. 이러한 비교를 위해 Avago 사의 PIN 다이오드 HSMP-4810의 등가회로 파라미터를 사용하였고, 그 값들은 각각 $L_s=1$ nH, $R_s=3$ Ω, $C_j=0.35$ pF이다. $Z_0=50$ Ω인 경우 2.14 GHz에서 전송 선로의 특성 임피던스와 전기적 길이는 각각 87.8 Ω와 62.6°를 얻었다.

그림 2(a)는 R_j 의 변화에 따라 PIN 다이오드를 바라본 기존 감쇠기의 반사 계수 Γ_t 를 나타낸다. 반사 계수가 곧은 경로를 갖지만 확대된 그림을 보면 스미스 차트의 원점을 통과하지 않는 것을 알 수 있다. 그림 3(a)는 R_j 변화에 따른 기존 감쇠기의 입력 반사



(a) 기존의 감쇠기
(a) Conventional attenuator



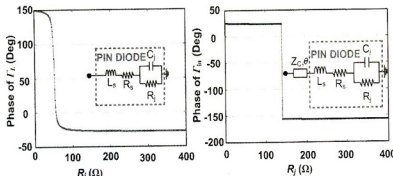
(b) 제안하는 저위상 편차 감쇠기
(b) Proposed low phase deviation attenuator

그림 2. 접합 저항에 따른 반사 계수의 시뮬레이션 결과

Fig. 2. The simulated reflection coefficient according to junction resistance.

계수(Γ_L)의 위상 특성을 보이고 있다. 기존 감쇠기의 위상 특성은 PIN 다이오드의 기생 성분들 때문에 R_L 값의 변화에 따라 일정하지 않다. 이것은 그림 2(a)에서와 같이 입력 반사 계수 궤적이 원점을 통과하지 않는 것으로 판단할 수 있다.

그림 2(b)는 R_L 의 변화에 따라 제안하는 감쇠기의 반사 계수 Γ_{in} 을 나타낸다. 제안하는 감쇠기의 반사



(a) 기존의 감쇠기 (b) 제안하는 감쇠기
(a) Conventional attenuator (b) Proposed attenuator

그림 3. 반사 계수 위상의 시뮬레이션 결과
Fig. 3. The simulated phase response of reflection coefficient.

계수 Γ_{in} 은 직선 경로 특성을 가지며, 확대된 그림을 보았을 때, 스미스 차트의 원점을 통과하는 것을 알 수 있다. 그림 3(b)는 R_L 변화에 따른 제안하는 감쇠기의 입력 반사 계수(Γ_L) 위상 특성이 일정하며 극성의 반전이 가능함을 보인다. 이러한 결과를 얻을 수 있는 것은 PIN 다이오드를 중단한 전송 선로가 다이오드의 기생 성분의 영향을 보상했기 때문이다.

III. 실험 결과

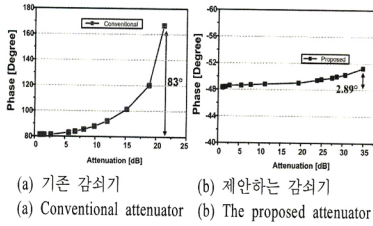
제안하는 위상 보상 방법의 타당성을 증명하기 위해서, WCDMA 기저국 하향 주파수 대역(2.11~2.17 GHz)에서 동작하는 반사형 구조의 저위상 편차 감쇠기를 설계 및 제작하였으며, 기존의 감쇠기와 전기적 특성들을 비교하였다. 사용된 기판은 Rogers사의 RT/duroid 5880(유전율: 2.2, 두께: 3.3 mil, 1 Oz)이다.

그림 4는 기존 감쇠기 및 제안한 저위상 편차 감쇠기의 신호 감쇠에 따른 위상 편차 특성을 보이고 있다. 기존의 감쇠기는 22 dB의 신호 감쇠에 대해 83°의 위상 편차를 갖는 반면에, 제안하는 감쇠기는 35 dB의 신호 감쇠에 대해 2.89°만의 값을 갖는다. 제안하는 감쇠기의 입/출력 반사 계수는 전 범위의 감쇠에 대해서 27 dB 이상을 갖는다.

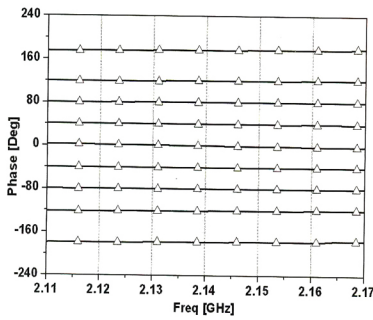
그림 5는 WCDMA 동작 주파수 전체 대역(60 MHz)에서 신호 진폭 변화와 위상 특성을 보이고 있다. 이때 신호 진폭은 정규화하여 표현하였으며, 전체 동작 주파수 대역에서 일정한 진폭과 위상 특성을 보여준다.

그림 6은 제안하는 IQ 변조기의 극 좌표계 출력 신호 궤적을 보이고 있다. 동위상(I)과 90° 직교위상(Q) 경로의 신호 진폭들을 각각 제어하여 IQ 변조기의 성상(constellation)들을 얻을 수 있었으며, IQ 변조기의 성상들은 중심점을 통과하며 곧은 배열을 가짐을 확인할 수 있다. 이러한 배열은 변조기의 I 및 Q 경로의 감쇠기 전압을 각각 가변함으로써 얻을 수 있다.

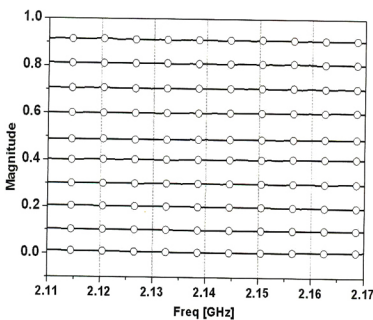
측정된 제안하는 IQ 변조기의 입력 반사 손실(S_{11})과 출력 반사 손실(S_{22}) 모두 전체 신호 감쇠 범위에서 각각 27 dB와 20 dB 이상을 얻었다. 제작된 IQ 변조기의 전체 회로 크기는 $6 \times 10 \text{ cm}^2$ 이다. 그림 7은 제



(a) 기존 감쇠기 (b) 제안하는 감쇠기
 (a) Conventional attenuator (b) The proposed attenuator
 그림 4. 감쇠에 따른 측정된 위상 편차
 Fig. 4. The measured phase deviation according to attenuation.



(a) 위상 변화
 (a) Normalized magnitude



(b) 정규화된 진폭 측정 결과
 (b) Phase variation

그림 5. 2.11~2.17 GHz의 주파수 범위에서 제안하는 IQ 변조기

Fig. 5. The measured results of proposed IQ modulator over frequency range 2.11~2.17 GHz.

작된 IQ 변조기의 사진이다.

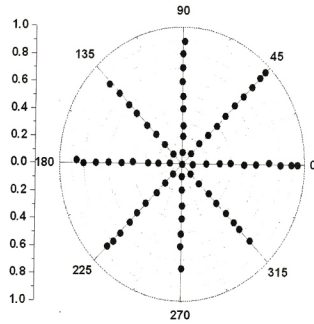


그림 6. 제안하는 IQ 변조기의 극좌표 측정 결과
 Fig. 6. The measured array for the proposed IQ modulator in polar form plane.

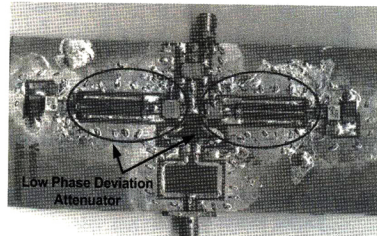


그림 7. 제작된 IQ 변조기의 사진
 Fig. 7. The photograph of fabricated vector modulator.

IV. 결 론

본 논문에서는 새로운 저위상 편차 감쇠기를 이용한 IQ 변조기를 제안하였다. 신호 진폭 제어 시에 발생하는 큰 위상 편차는 IQ 변조기 설계의 중요한 설계 고려 사항이므로, 이를 해결하기 위해 새로운 저위상 편차 감쇠기가 제안되었다. 제안된 IQ 변조기는 360°의 위상 조절 범위와 동시에 큰 진폭 변화를 갖고, 입력 신호의 진폭과 위상을 정확하게 조절할 수 있다. 제안하는 IQ 변조기는 다중 입력 다중 출력 시스템이나 전력증폭기의 선형화 회로에 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] S. A. Hasan, "Highly reliable & adaptive SMART

phased array antenna with gain adjustment & beam forming capabilities for space applications", in *International Symposium on Antennas Propagation and EM Theory Proceedings*, pp. 124-127, 2010.

[2] W. T. Thornton, L. E. Larson, "An improved 5.7 GHz ISM-band feedforward amplifier utilizing vector modulators for phase and attenuation control", *Microw. J.*, vol. 42, no. 12, pp. 96-106, Dec. 1999.

[3] Y. Jeong, D. Ahn, and C. D. Kim, "A design of the novel vector modulator", *Microw. J.*, vol. 44, no. 10, pp. 156-162, Oct. 2001.

[4] D. S. McPherson, S. Lucyszyn, "Vector modulator for W-band software radar techniques", *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.*, vol. 49, no. 8, pp. 1451-1461, Aug. 2001.

[5] G. B. Norris, D. C. Boire, G. S. Onge, C. Wutke, C. Barratt, W. Coughlin, and J. Chickanosky, "A fully monolithic 4~18 GHz digital vector modulator", in *IEEE Microw. Symp. Dig. MTT-S Int.*, vol. 2, pp.

직접 반송파 변조 시스템을 위한 IQ 변조기 설계

789-792, May 1990.

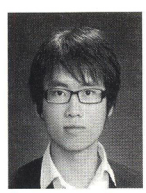
[6] A. E. Ashitiani, T. Gokdemir, S. Nam, and I. D. Robertson, "Compact 38 GHz MMIC balanced vector modulators employing GaAs/InGap HBTs", *Electronic Lettr.*, vol. 35, no. 10, pp. 817-818, May 1999.

[7] J. E. Penn, "A balanced Ka-band vector modulator MMIC", *Microw. J.*, vol. 48, no. 6, pp. 82-86, Jun. 2005.

[8] Y. Kim, S. Shim, T. Moon, G. Chaudhary, and Y. Jeong, "Mathematical analysis of novel low phase deviation variable attenuator", in *IEEE Asian Pacific Microw. Conference Proceeding*, pp. 1743-1746, Dec. 2010.

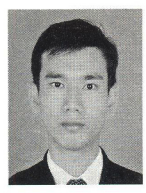
[9] W. Kang, I. Chang, and M. Kang, "Reflection-type low-phase-shift attenuator", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 46, no. 7, pp. 1019-1021, Jul. 1998.

문 태 수



2011년 2월: 전북대학교 전자공학부 (공학사)
 2011년 3월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 석사과정
 [주 관심분야] RF 능동 회로 설계

Kim Phirun



2010년 10월: National Polytechnic Institute of Cambodia, Electronic Engineering (공학사)
 2011년 3월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 석사과정
 [주 관심분야] RF 수동회로 설계

정 용 채



1989년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
 1991년 2월~1998년 2월: 삼성전자 정보통신본부 선임연구원

2006년 7월~2007년 12월: 미국 Georgia Institute of Technology 방문연구교수
 1998년 3월~현재: 전북대학교 전자공학부 교수
 [주 관심분야] RF 및 Microwave 회로 해석 및 설계