

DTV(Digital TV) 수신 모듈용 광대역 가변 위상기의 설계

Design of the Broad Band Phase Shifter for DTV Receiver

한 기 진 · 김 종 필 · 나 형 기

Ki-Jin Han · Jong-Pil Kim · Hyung-Gi Na

요 약

본 논문에서는 DTV(Digital TV) 수신 모듈에 적용되는 반사형 가변 위상기의 설계를 위한 설계식을 제안하고 이를 이용해 DTV 수신대역인 470 MHz에서 860 MHz까지 180° 이상의 위상 가변특성을 만족하는 가변 위상기를 설계하였다. 제시된 설계식을 이용하여 원하는 위상 가변 범위와 삽입손실을 만족하는 반사형 가변 위상의 체계적인 설계가 가능하며, 제작된 가변 위상기가 주어진 사양을 만족함을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, a design method is proposed for the reflection type phase shifter applied to the DTV(Digital TV) receiver, and a phase shifter is designed by using the design equations to satisfy the phase shifting range over 180 degrees for frequency range from 470 MHz to 860 MHz, the receiving band of DTV. From the proposed method, it is possible that the systematic design of the reflection type phase shifter with desired phase shifting range and insertion loss. In addition, it is found that the realized phase shifter satisfies the given specifications.

Key words : DTV 수신 모듈, 반사형 가변 위상기, Varactor 다이오드

I. 서 론

반사형 가변 위상기는 varactor 다이오드의 가변 커패시터 특성과 90° hybrid coupler를 이용하여 연속적인 위상 변화를 구현하는 소자이다. 반사형 가변 위상기의 위상 변화 범위는 이론적으로 180°이나, varactor 다이오드의 커패시터 성분만을 이용할 경우 커패시턴스의 한정된 범위로 인하여 실제 180°의 구현은 불가능하다. 이를 개선하기 위해 인덕터를 직렬 또는 병렬로 연결하여 180° 이상의 위상범위를 구현하는 방법이 있다. 그러나 지금까지는 L값의 결정에 있어서 간단한 공진식이나 L의 미세 조정을 이용한 방법을 사용하였다. 본 문서에서는 L값의 체계적인 결정을 위해 C값의 변화에 따른 180° 위

상차가 나는 경우의 L값을 구하는 방정식을 유도하고 이를 이용하여 주어진 대역 내에서의 180° 이상의 위상차를 구현하는 L값을 결정하는 방법을 정립하였다. 한편 LC 공진 구조를 사용할 경우 야기되는 삽입 손실에 대해 분석하고 이를 설계에 적용할 수 있는 방법을 제시하였다. 제안된 설계식과 설계방법을 DTV 수신 모듈에 사용되는 가변 위상기 설계에 적용하였으며, 또한 이를 시뮬레이션과 실제 가변 위상기의 제작을 통해 검증하였다.

II. 반사형 가변 위상기

반사형 가변 위상기의 기본적인 구조는 그림 1에 보이는 바와 같다. 이 회로는 이론적으로 180° 까지

LG 이노텍(주) 시스템연구소(System R&D Center, LG Innotek Co., Ltd.)
· 논문 번호 : 20021209-172
· 수정완료일자 : 2003년 1월 29일

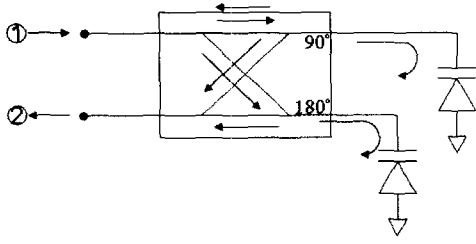


그림 1. 반사형 가변 위상기 개념도
Fig. 1. Schematic diagram of the reflection type phase shifter.

의 위상 변화가 가능하다. 또한 두 varactor가 동일한 소자값을 갖는다면 입력단에서 완전 정합이 구현되며, varactor와 하이브리드 결합기의 손실이 없는 경우 소자 전체의 삽입 손실은 0이다. 이를 식으로 나타내면,

$$\begin{aligned} |S_{21}| &= |\Gamma| = 1 \\ \angle S_{21} &= -\frac{\pi}{2} + \angle \Gamma \\ S_{11} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{Z_V - Z_0}{Z_V + Z_0} & : \text{ 반사계수} \\ Z_V &= \frac{1}{j\omega C_V} & : \text{ varactor 등가 임피던스} \\ Z_0 &= 50 \Omega & : \text{ 특성 임피던스} \\ C_V &= f(V_{DC}) & : \text{ varactor 등가 커패시턴스} \end{aligned}$$

식 (1)에 주어진 바와 같이 Z_V 를 V_{DC} 로 가변하여 $\angle \Gamma$ 를 변화시키게 된다.

실제 구현 과정에서는 하이브리드 결합기의 주파수 특성과 삽입손실, varactor 다이오드의 기생 성분 때문에 일정한 크기의 삽입 손실과 부정합이 존재한다. 또한, varactor만을 부하로 사용할 경우, 등가 커패시턴스가 완벽한 개방과 단락에 도달할 수 없으므로 $\angle \Gamma$ 의 가변 범위가 한정되어 180° 이상의 위상 변화가 불가능하다.

III. LC 공진을 이용한 위상 변화 범위의 확장

180° 이상의 위상 변화를 구현하기 위해 주로 커패시터 성분을 갖는 varactor 다이오드에 직렬 또는 병렬로 인덕터를 연결하는 방법이 알려져 있다. 이는 LC공진을 이용해 0의 임피던스 또는 0의 어드미턴스를 구현하여 단일 커패시터의 한정된 임피던스 가변 범위를 확대시키는 방법이다. 이러한 방법을 이용한 phase shifter의 설계 예가 제시되어 있으나, L 의 선정에 있어서 적당한 몇 개의 L 값을 시뮬레이션을 통해 얻어내는 방법을 취하고 있다^[1]. 한편, L 이 없는 경우의 위상 변화가 가장 적은 주파수와 커패시턴스 부분에서 공진이 일어나도록 L 값을 결정하는 경우도 있다. 이 경우에도 역시 L 값의 최종적인 결정을 위해 미세 조정이 필요하다. 여기서는 이러한 설계과정에서의 미세 조정을 최소화하고 L 값 결정을 체계적으로 하기 위한 방법을 제시한다.

기본적인 개념은 가변 커패시터가 최소일 때와 최대일 때의 위상차가 180° 인 L 을 찾는 것이다. 먼저 LC 병렬 구조인 경우 이러한 조건을 식으로 나타내면 아래와 같다. 이 때 하이브리드 결합기의 특성은 이상적이라고 가정한다.

$$\begin{aligned} & \frac{2\omega LZ_0(1 - \omega^2 LC_{\min})}{Z_0^2(1 - \omega^2 LC_{\min})^2 - (\omega L)^2} \\ &= \frac{2\omega LZ_0(1 - \omega^2 LC_{\max})}{Z_0^2(1 - \omega^2 LC_{\max})^2 - (\omega L)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

위 식을 L 에 대하여 전개하면 L 에 대한 2차 방정식을 얻을 수 있으며, 방정식의 근은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} L &= \frac{Z_0^2 \omega (C_{\min} + C_{\max})}{2\omega(\omega^2 Z_0^2 C_{\min} C_{\max} + 1)} \\ & \pm \frac{\sqrt{Z_0^4 \omega^2 (C_{\min} - C_{\max})^2 - 4Z_0^2}}{2\omega(\omega^2 Z_0^2 C_{\min} C_{\max} + 1)} \end{aligned} \quad (3)$$

이 때 식 (3)에서 L 이 실근을 갖는 조건으로부터 다음의 주파수 조건을 얻게 된다.

$$\omega > \frac{2}{Z_0(C_{\max} - C_{\min})} \quad (4)$$

한편 LC 직렬 구조의 경우 위상차가 180° 인 조건을 식으로 표현하면

$$\begin{aligned} & \frac{-2\omega Z_0 C_{\min}(1 - \omega^2 LC_{\min})}{(1 - \omega^2 LC_{\min})^2 - (Z_0 \omega C_{\min})^2} \\ &= \frac{-2\omega Z_0 C_{\max}(1 - \omega^2 LC_{\max})}{(1 - \omega^2 LC_{\max})^2 - (Z_0 \omega C_{\max})^2} \end{aligned} \quad (5)$$

LC 병렬의 경우와 마찬가지로 위식을 전개하여 얻은 방정식의 근은

$$L = \frac{(C_{\min} + C_{\max})}{2C_{\min}C_{\max}\omega^2} \pm \frac{\sqrt{(C_{\min} - C_{\max})^2 - (2C_1C_2Z_0\omega)^2}}{2C_{\min}C_{\max}\omega^2} \quad (6)$$

L이 실근을 갖기 위한 조건으로부터,

$$\omega < \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2C_{\min}C_{\max}Z_0} \quad (7)$$

(3)과 (6)으로부터 병렬, 직렬 각각의 경우 위상차 180°를 만족하는 L값이 2개 존재함을 알 수 있다. 또한 (4)과 (7)로부터 병렬의 경우 주파수의 최소값이, 직렬의 경우 주파수의 최대값이 존재함을 알 수 있는데, 이들은 180° 이상의 위상변동을 구현할 수 있는 임계 주파수이다. 각 임계 주파수는 모두 C_{\min} , C_{\max} 에 따라 결정되며, 병렬의 경우 최소 주파수 이하의 주파수에서는 어떤 L에 대해서도 180° 이상의 위상변동을 얻을 수 없고, 직렬의 경우 최대 주파수 이상에서는 어떤 L에 대해서도 180° 이상의 위상변동을 얻을 수 없음을 의미한다.

180°의 위상변동을 만족하는 L값을 각각 L_1 , $L_2(L_2 > L_1)$ 라 하면, (3) 또는 (6)으로부터 주파수에 대하여 L_1 , L_2 의 그래프를 그림 2와 같이 도시할 수 있다. 여기서 L_1 곡선과 L_2 곡선의 사이의 L값에서는 180° 이상의 위상차를 구현할 수 있으며, 곡선의 바

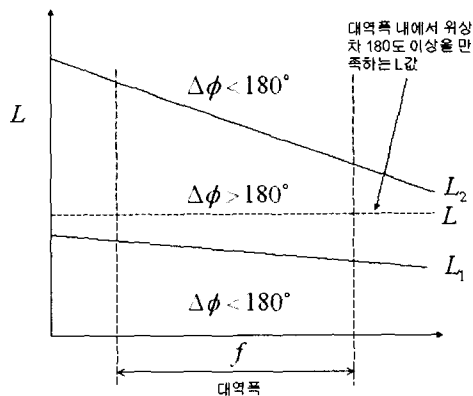


그림 2. 180° 위상 변동 범위를 만족하는 L의 선정
Fig. 2. Selection of L which satisfies the phase variation range of 180 degrees.

깎쪽에서 L값을 채택할 경우 위상변동 범위는 180°보다 작게 된다. 따라서 주어진 대역과 varactor의 C_1 , C_2 값이 채택되면, 그림 2와 같이 주어진 대역내에서 위상차 180° 이상의 위상 변동 범위를 만족하는 L을 찾아낼 수 있다.

IV. 삽입손실의 고려

Varactor 다이오드의 기생성분을 고려할 경우 거의 이상적으로 0 dB에 가깝던 삽입 손실이 떨어지며, 이러한 현상은 특히 III절에서 소개한 LC병렬 구조를 사용할 경우 두드러지게 나타난다. 따라서 기생성분, 특히 내부 저항에 의한 삽입 손실 발생을 분석하고 이를 기준에 앞에서 제시한 설계 기법과 연계시킬 필요가 있다.

패키지화된 varactor diode의 등가회로는 그림 3과 같다^[2]. 여기서 L_s 는 리드 인덕턴스(lead inductance)이고, C_p 는 패키지 커패시턴스인데, C_p 의 경우 보통 0에 가깝고, L_s 의 영향 또한 C_j 를 약간 상쇄시켜 주는 정도이다. C_j 는 varactor의 핵심부이며, 인가된 역방향 전압에 따라 그 값이 변화한다. R_s 는 varactor 자체의 기생성분으로 C_j 와 같이 인가 역방향 전압에 따라 변하나, 실제 그 변화 폭은 매우 작아 일정한 값으로 제시된다. 본 절에서의 삽입 손실 분석에서는 C_j 와 R_s 만을 고려한다.

R_s 를 포함한 LC 병렬 구조를 갖는 부하는 그림 4(a)와 같이 나타낼 수 있다. 이 부하의 임피던스

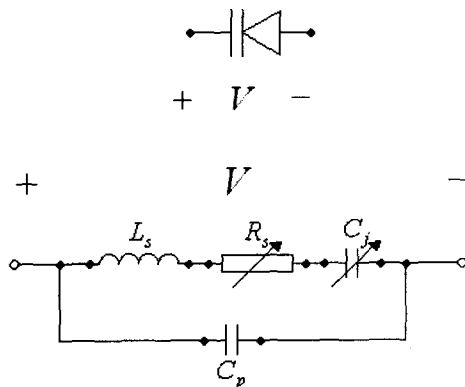


그림 3. Varactor 다이오드 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of the varactor diode.

Z_L 을 계산하면 아래와 같다.

$$Z_L = \frac{j\omega L(1 + j\omega R_s C)}{(1 - \omega^2 LC) + j\omega R_s C} \quad (8)$$

LC 공진이 발생하여 $\omega^2 LC = 1$ 을 만족하게 되면,

$$Z_L = \frac{L}{R_s C} + j\omega L \quad (9)$$

이 때의 반사계수는 아래와 같고, 반사계수가 가변 위상기의 위상과 삽입손실로 나타난다.

$$\Gamma = \frac{(\frac{L}{R_s C} - Z_0) + j\omega L}{(\frac{L}{R_s C} + Z_0) + j\omega L} \quad (10)$$

이 때 저항이 없는 이상적인 경우의 삽입손실은 0 dB이다. 그러나 $L/R_s C$ 의 값이 Z_0 보다 충분히 크지 않다면 삽입손실이 크게 나타난다. $L/R_s C = \alpha Z_0$ 라고 정의하면,

$$\Gamma = \frac{(\alpha - 1)Z_0 + j\sqrt{L/C}}{(\alpha + 1)Z_0 + j\sqrt{L/C}} \quad (11)$$

α 가 충분히 크게 하려면, R_s 가 충분히 작거나, L 이 충분히 커야 한다. 그러나 R_s 의 값은 varactor의 고유 기생성분 값이므로 변경이 어렵고, L 을 크게 할 경우 원하는 대역 내에서의 충분한 위상 변화 범위 확보가 어려우므로 설계상의 제약이 따르게 된다. 또한 varactor를 병렬 연결하여 R_s 를 1/2로 작게 하여도 C 값이 2배가 되므로 결과는 마찬가지이다.

R_s 를 포함한 LC 직렬 구조를 갖는 부하는 그림 4(b)와 같이 나타낼 수 있다. 이 부하의 임피던스 Z_L 을 계산하면 아래와 같다.

$$Z_L = \frac{1 - \omega^2 LC + j\omega R_s C}{j\omega C} \quad (12)$$

LC공진에 의해 $\omega^2 LC = 1$ 을 만족하게 되면,

$$Z_L = R_s \quad (13)$$

이때의 반사계수는,

$$\Gamma = \frac{R_s - Z_0}{R_s + Z_0} \quad (14)$$

대개의 경우 R_s 는 1 Ω 근처의 값이고, Z_0 가 50 Ω 이

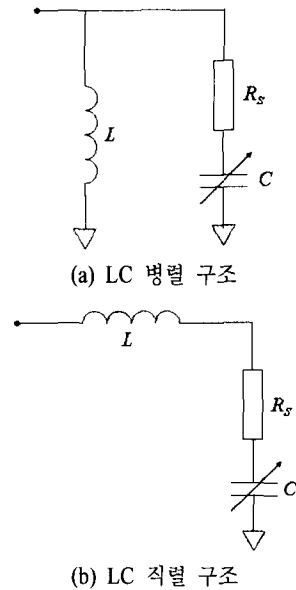


그림 4. L 이 연결된 varactor 다이오드의 등가회로
Fig. 4. Equivalent circuit of the varactor diode with L .

라면 R_s 는 Z_0 에 대해 거의 무시할 수 있다. 따라서 LC직렬의 경우에는 기생저항에 의한 삽입 손실이 크게 중요하지 않다.

위의 분석결과로부터, LC 병렬구조로 가변 위상기를 설계할 경우 기생 저항에 의한 LC공진점에서의 삽입손실이 크게 나타날 수 있음을 알 수 있다. 따라서 위상 변화 대역폭의 확보와 함께 삽입손실의 최소화 또한 설계의 주요 목표가 되어야 할 것이다.

기생 저항에 의한 삽입손실 효과를 L곡선상에 포함시켜 설계에 적용하기 위해 우선 고려해야 할 점은 기생 저항에 의한 L곡선의 변화 여부이다. 이를 규명하기 위해서는 반사계수의 위상을 기생저항을 고려하여 다시 분석해야 한다. LC병렬구조의 경우 기생저항을 고려한 위상은

$$(\omega R_s C)^2 \ll 1 \quad (15)$$

을 만족할 경우 기생저항의 영향을 무시할 수 있으며, 앞에서 제안한 L곡선을 그대로 적용할 수 있다.

먼저 L-주파수 평면상에 도시되는 곡선은 LC공진 곡선이다. 이는 LC공진이 주어진 L 과 주파수 범위에서 일어나는지를 보여 주는 곡선으로 다음과

같다.

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (16)$$

공진곡선은 C 값에 따라 변화하며, 그림 5와 같이 선정하고자 하는 L 값의 교차 여부를 결정한다.

다음으로 고려되어야 할 곡선은 constant- α 곡선이다. 이는 공진이 일어날 경우 그 효과가 삽입손실에 어느 정도의 영향을 미치는지에 대한 정량적인 정보를 제공하게 된다. α 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{L}{Z_0 R_s C} \quad (17)$$

공진조건을 대입하여 C 항을 소거하면, 아래와 같은 L 에 관한 constant- α 곡선을 얻게 된다.

$$L = \frac{\sqrt{\alpha R_s Z_0}}{\omega} \quad (18)$$

constant- α 곡선은 그림 5와 같이 여러 α 값에 대해 등고선과 같이 표현하며, 공진곡선의 교점이 낮은 α 값에서 나타날 경우 삽입 손실이 커짐을 알 수 있다. 따라서, 우선 주어진 varactor의 C_{min} 과 C_{max} 에 의해 L 곡선을 도시하여 대역폭을 확보할 수 있는 L 값을 결정하고, 범위 내의 여러 C 값에 대해 공진 여부를 탐색한다. 공진점이 주어진 대역내에서 나타날 경우 constant- α 곡선을 참조하여 삽입손실을 예측할 수 있다.

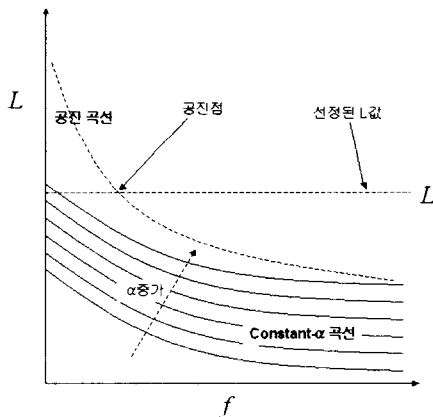


그림 5. 삽입 손실을 고려한 L 값의 선정
Fig. 5. Selection of L considering the insertion loss.

V. DTV 수신 모듈용 가변 위상기의 설계

앞에서 제안한 설계 기법을 활용하여 DTV 수신 모듈에 적용되는 가변 위상기를 설계 제작하였다. DTV 수신 모듈의 대역은 470 MHz에서 860 MHz 까지 포함하고, 주어진 대역에서 가변 위상기는 삽입손실을 최소화 하면서 180° 이상의 위상 변동 범위를 만족해야 한다.

Varactor 다이오드는 MA-COM사의 MA4ST401을 사용하였으며, 1~12 V의 역전압이 인가될 때 $C_{min}=2$ pF, $C_{max}=20$ pF의 값을 갖는다^[3]. R_s 의 경우 정확한 값이 제공되지 않아 1~2 Ω 사이의 몇 가지 값을 사용하였다.

시뮬레이션 및 제작에 사용된 하이브리드 결합기는 Anaren사의 1F1304-3로, DTV 수신모듈 대역에서 최대 0.6 dB의 진폭 불균형과 3° 미만의 위상 불균형 특성을 갖는다^[4].

우선 LC 직렬 구조 또는 LC 병렬 구조를 사용하는 것에 대한 결정을 해야 하는데, 식 (4)로부터 LC 병렬 구조가 적용되는 최소 주파수는 354 MHz이고, LC 직렬 구조가 적용되는 최대 주파수는 619 MHz임을 알 수 있다. 따라서 주어진 varactor를 사용하여 DTV 수신대역에서의 위상 변동 범위를 모두 만족하기 위해서는 LC 병렬 구조를 사용해야 함을 알 수 있다.

그림 6은 $R_s=1.5 \Omega$ 일 때 L 곡선과 공진곡선, constant- α 곡선을 DTV대역에 대해 도시하고 이때의 L 값을 선정하는 과정을 보인다. L 곡선은 (3)으로부터 도시되었고, 두 L 곡선 사이에서 180° 이상의 위상 변위를 갖게 할 수 있는 L 값으로 10 nH를 선정할 수 있다. 여기서 C 값을 C_{min} 에서 C_{max} 사이로 변화 시키면서 $L=10$ nH가 공진곡선과 만나는지, 또 만난다면 그 때의 α 값은 얼마인지 검토할 수 있다. 그림 6에서는 $C=9.2$ pF인 경우를 예로 들었다. Constant- α 곡선과 공진곡선의 교점이 만나는 지점에서 α 를 결정하는데, α 가 1에 가까워질수록 삽입 손실이 커진다. 그런데, constant- α 곡선은 주파수에 반비례하고, 공진곡선은 C 가 커질수록 낮은 주파수에서 L 과 만나므로 C 값이 커질 때 삽입손실이 커짐을 알 수 있다. 분석결과 $C=11$ pF일 때 삽입손실이 가장 크며, 약 -1.44 dB의 손실이 예상된다.

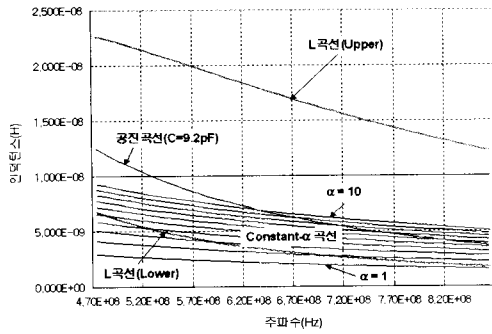


그림 6. DTV 대역에서의 L값 선정
Fig. 6. Selection of L in the band of DTV.

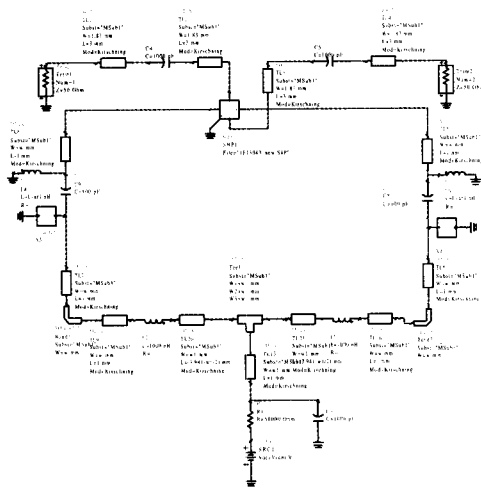
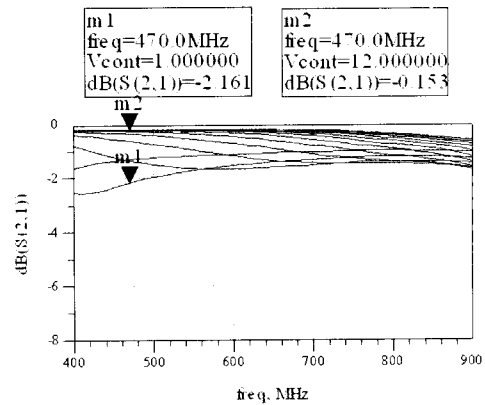
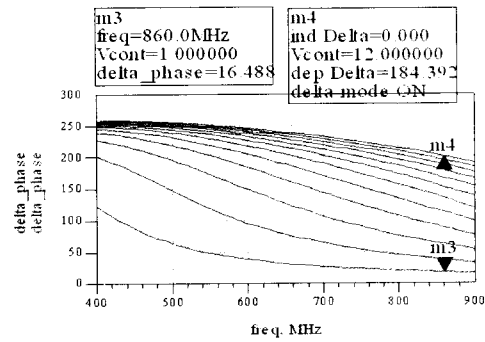


그림 7. 가변 위상기의 시뮬레이션 모델
Fig. 7. Simulation model of the phase shifter.

위에서 분석한 결과를 ADS로 시뮬레이션해 보고 그 결과를 검증하여 보았다. Varactor 등가 모델과 급전부, 선로 등을 고려한 시뮬레이션 모델을 그림 7과 같이 구성하였다. $L=10.5$ nH일 때 C 값에 따른 삽입손실은 그림 8(a)와 같이 나타난다. 시뮬레이션 결과에 따르면, 공진주파수에서 삽입손실이 최대가 되는 것은 아님을 알 수 있고, C 값이 커짐에 따라 삽입손실이 최대 -2.1 dB까지 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 즉, IV절에서 보인 삽입 손실은 공진점에서의 값이며, 최대 손실은 아니다. 그러나, constant- α 곡선에서 α 가 큰 값에서 공진이 일어나도록 L 값을 조절하거나 대역폭을 줄여 주면 삽입손실을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그림 8(b)는 위상 변동 범위를 보이며, 예측된 결과와 일치함을 알 수



(a) 삽입 손실
(a) Insertion losses



(b) 위상 변동 특성
(b) Phase variations

그림 8. 가변 위상기 시뮬레이션 결과
Fig. 8. Results of the simulation of the phase shifter.

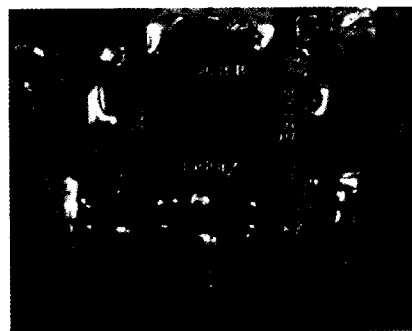
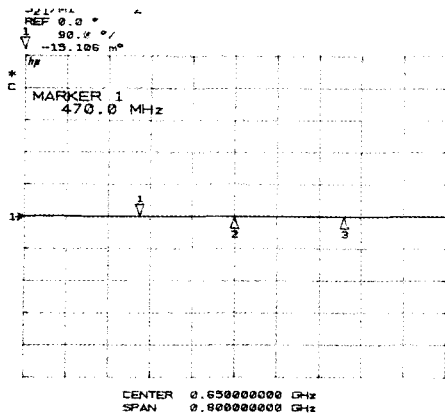


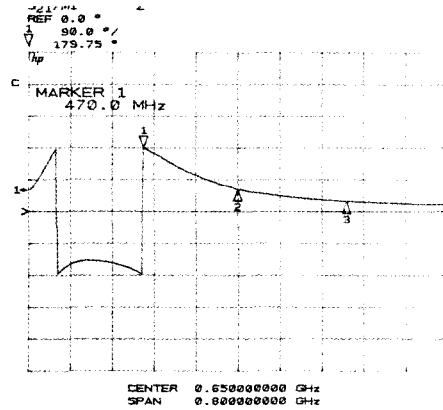
그림 9. 제작된 가변 위상기
Fig. 9. Fabricated phase shifter.

있다.

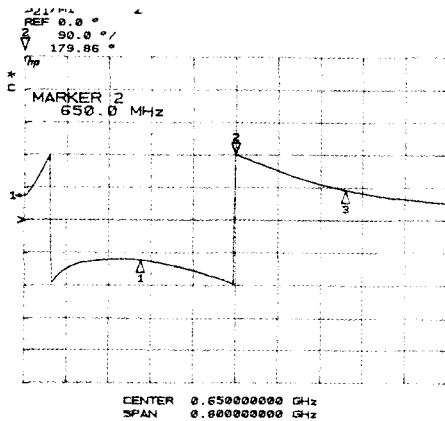
제안된 설계법과 시뮬레이션 결과에 기반하여 DTV 수신 모듈용 가변 위상기를 제작, 시험하였다. 제작된 가변 위상기 회로는 그림 9에 보이는 바와 같다.



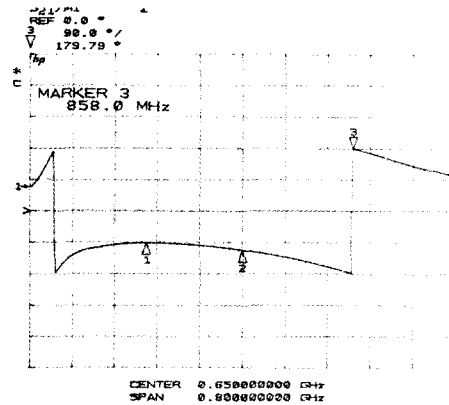
(a) 제어 전압 0 V (기준값)
(a) Control voltage 0 V (reference value)



(b) 제어 전압 4.1 V (180° @470 MHz)
(b) Control voltage 4.1 V (180° @ 470 MHz)



(c) 제어 전압 6.4 V (180° @650 MHz)
(c) Control voltage 6.4 V (180° @650 MHz)



(d) 제어 전압 11.5 V (180° @ 860 MHz)
(d) Control voltage 11.5 V (180° @860 MHz)

그림 10. 가변 위상기의 위상 변동 특성 측정결과

Fig. 10. Results of the measurement for phase variations of the phase shifter.

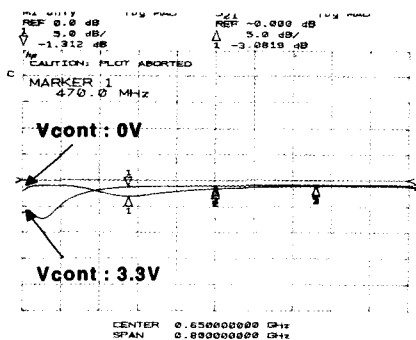


그림 11. 삽입손실 특성 측정 결과

Fig. 11. Results of the measurement for insertion losses of the phase shifter.

HP8510B 네트워크 분석기로 S_{21} 을 측정된 결과 위상 변화는 그림 10과 같이 나타나며, 삽입손실의 변화는 그림 11과 같이 측정됨을 확인하였다. 위상 변동의 경우 예측된 결과와 같이 전대역에서 180° 이상의 위상 변동을 만족하며, 삽입손실의 경우는 최대 약 -3 dB로 예측값과 약 1 dB의 차이가 있고, 최대 최소 삽입손실의 최대값은 약 1.7 dB로 나타나 예측값(약 2 dB)과 거의 일치하고 있다.

V. 결 론

L-주파수 평면상에서 위상 변동과 삽입손실을 고

려하는 설계 기법을 DTV 수신 모듈용 가변 위상기의 설계에 적용한 결과, 시뮬레이션과 제작 과정에서의 미세 조정을 최소화하는 체계적인 설계가 가능하고, 각 변수의 변동에 따른 가변 위상기의 특성 변화를 정량적으로 예측할 수 있었다. 제안된 기법은 광대역에서의 위상 변동 특성을 만족해야 하는 가변 위상기의 설계에 유용하게 적용 할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Alpha Application Note APN1009, "A Varactor Controlled Phase Shifter for PCS Base Station Applications".
- [2] S. K. Koul, B. Bhat, Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters, Artech House, pp. 527~529, 1991.
- [3] M/A-COM Catalog, RF and Microwave Semiconductors-Discrete, Monolithic and Multifunction, pp. 4-3~4-4.
- [4] Anaren Catalog, Surface Mount Signal Distribution, <http://www.anaren.com>

한 기 진



설계 및 분석

1998년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)
 2000년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학석사)
 2000년 2월~현재: LG 이노텍 시스템연구소 주임연구원
 [주 관심분야] RF 및 전파 시스템

나 형 기



시스템연구소 책임연구원
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 수치해석

1991년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
 1993년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 1996년 1월~현재: LG 이노텍 시

김 중 필



1998년 2월: 경기대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 11월~2000년 9월: 단암전자통신연구소 주임연구원
 2000년 10월~현재: LG 이노텍 시스템연구소 주임연구원
 [주 관심분야] RF 소자 및 시스템 설계 및 분석