

마이크로스트립-슬롯선로 廣帶域 마이크로波 周波數 弁別器에 관한 研究

(A Study on the Wide-Band Microstrip-Slotline Microwave Frequency Discriminator)

曹 洪 九*, 李 忠 雄**

(Hong Goo Cho and Choong Woong Lee)

要 約

弁別帶域幅이 가장 넓은 것으로 알려진 線路 周波數 弁別器를 마이크로波帶에서 마이크로스트립과 슬롯선로를 이용하여 具現할 수 있는 새로운 마이크로波 周波數 弁別器를 提示하고 그것을 S-Band에서 實現하였다.

實驗的으로 中心周波數 3.2GHz에서 弁別帶域幅이 1.6GHz까지 線形性이 대단히 좋으며 return loss > 20dB로서 만족할 만한 임피던스 整合特性을 가지는 廣帶域의 弁別器를 얻을 수 있음을 確認하였다.

Abstract

A new microwave wideband frequency discriminator is described, which is based on the theory of transmission line frequency discriminator known as having the widest bandwidth. It has been realized with microstrip lines and slot lines.

It is experimentally verified that the discriminator is linear in a 1.6 GHz bandwidth centered at frequency of 3.2 GHz and has return loss of 20 dB or more in that bandwidth.

I. 序 論

마이크로波 周波數 弁別器는 導波管 共振器를 주로 이용해 왔으며, 이 때 Q가 수1000~10000정도로 크기 때문에 廣帶域 周波數 弁別器를 實現하는 것이 거의 불가능하였으나, 현재는 마이크로波 回路의 대부분이 MIC化, 더 나아가서 MMIC化 하고 있음에 따라 周波數 弁別器도 마이크로스트립으로 具現되고 있으며^[1], 廣帶域 周波數 弁別器로서는 Gysel과 Watjen^[2]이 두

개의 quadrature hybrid와 delay line을 이용하여 中心周波數 9GHz에서 44.4%의 弁別帶域幅을 가지는 것을 발표하였다.

廣帶域 線路 弁別器에 관한 理論은 1964년에 C. W. Lee^[3]에 의해서 紹介되었으며 現在까지 알려진 周波數 弁別器로서는 弁別帶域幅이 가장 넓고 周波數에 따른 線形性이 대단히 좋다. 이 理論에 따라서 1979년에 S-band에서 마이크로스트립으로 20%의 弁別帶域幅을 가지는 周波數 弁別器가 實現되므로서^[4] 마이크로波帶에서 MIC化 할 수 있는 線路 周波數 弁別器가 가능함을 보였으나 2重의 마이크로스트립 線路를 사용하므로 構造가 複雜하다.

本 論文에서는 마이크로스트립과 슬롯 線路를 사용하여 C. W. Lee가 提示한 線路 周波數 弁別器에서의 브리지회로를 近似的으로 具現하므로서 50%정도의

*正會員, 國民大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kook Min Univ.)

**正會員, 서울大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Seoul National Univ.)

接受日字: 1985年 8月 14日

弁別帶域幅을 가지는, 構造가 간단한 廣帶域 線路 周波數 弁別器를 實現하는 方法을 提示하고 S-band에서 그 特性을 調査한다.

II. 線路 周波數 弁別器

C. W. Lee가 提示한 廣帶域 線路 周波數 弁別器의 브리지 回路에서 開放 傳送線路와 集中素子, 短絡 傳送線路와 集中素子의 위치를 서로 바꾼 것은 그림 1과 같으며 이것을 基本回路로 利用한다. 이렇게 하는 것은 傳送線路의 定在波를 檢波하기 위하여 入力 임피던스가 매우 높은 檢波回路를 傳送線路에 竝列로 연결하는 方法을 쓰지 않고 集中素子와 檢波回路를 합쳐서 整合된 檢波回路가 사용될 수 있게 하기 위함이다. 그림에서 Z_{op} , Z_{sh} 는 각각 特性 임피던스가 Z_0 인 開放 및 短絡 傳送線路의 임피던스이고, 저항 R은 rZ_0 가 되는 集中素子이다. 또한 다이오드 D_1 , D_2 에서는 集中素子 R의 兩端에 나타나는 電壓波를 각각 檢波하여 그 차이가 出力 V_0 가 되게 한다.

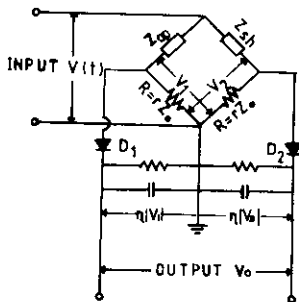


그림 1. 廣帶域 線路 周波數 弁別器 回路圖
Fig. 1. Circuit diagram of wideband transmission line frequency discriminator.

여기서 檢波回路가 負荷 효과로 나타나지 않는다면 直線 檢波인 경우와 自乘檢波인 경우의 出力電壓 V_{o1} 과 V_{o2} 는 각각 다음과 같이 표시된다.

$$V_{o1} = \eta_1 (|V_1| - |V_2|) = \eta_1 V \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\cot^2 \theta}{r^2}}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\tan^2 \theta}{r^2}}} \right) \quad (1)$$

$$V_{o2} = \eta_2 (|V_1|^2 - |V_2|^2) = \eta_2 V^2 \left(\frac{1}{1 + \frac{\cot^2 \theta}{r^2}} - \frac{1}{1 + \frac{\tan^2 \theta}{r^2}} \right) \quad (2)$$

여기서 V는 브리지 회로에 인가된 FM 信號電壓의 振幅이며, r은 브리지의 集中素子 R과 傳送線路의 特性 임

피던스 Z_0 와의 比 η 는 檢波回路의 電壓波에 대한 感度이며 θ 는 傳送線路의 길이에 대한 電氣角을 나타낸다.

弁別器의 出力電壓 V_{o1} 혹은 V_{o2} 가 零이 되는 點을 動作點으로 해야하므로 식(1)과 (2)에서 $\theta = (2n+1)\pi/4$ 가 動作點이 됨을 알 수 있으며 傳送線路의 길이 l 은 FM 信號의 搬送波 波長을 λ_0 라 하면 $l = (2n+1)\lambda_0/8$ 가 된다. 그런데 傳送線路의 길이 가 짧을수록 弁別帶域幅이 넓어지므로^[5] 廣帶域 弁別器를 具現하기 위해서 $l = \lambda_0/8$ 가 되게 한다.

$\theta = \pi/4$ 를 動作點으로 정했을 때 r을 媒介變數로 하

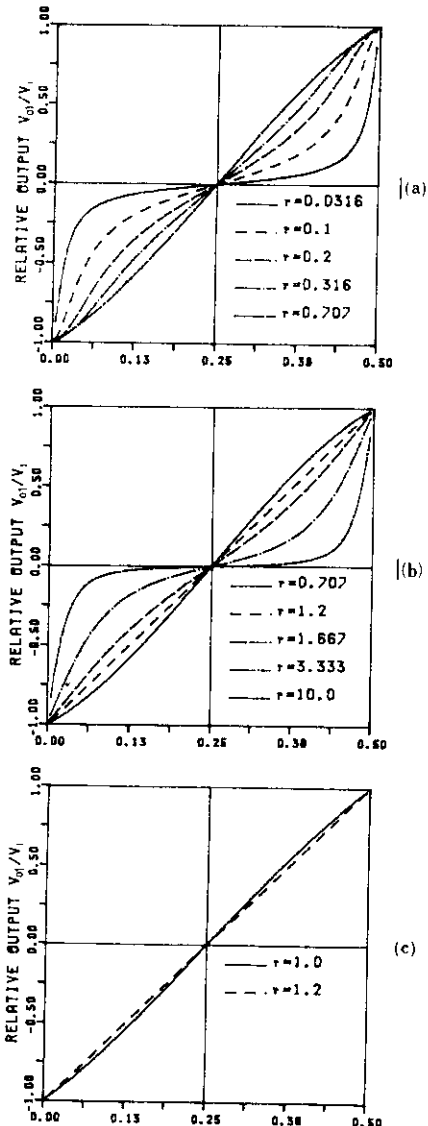


그림 2. θ 에 대한 出力電壓의 相對值 V_{o1}/V_1
Fig. 2. Relative output V_{o1}/V_1 vs θ .

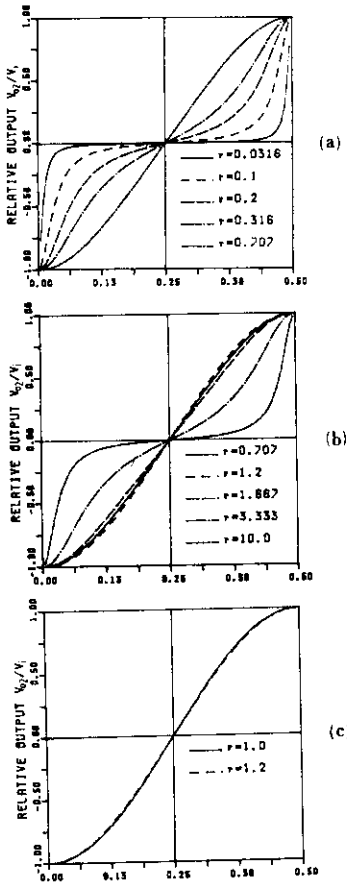


그림 3. θ 에 대한 出力電壓의 相對值 V_{o2}/V_i
 Fig. 3. Relative output V_{o2}/V_i vs θ .

여 $0 \leq \theta \leq \pi/2$ 인 범위 내에서 出力電壓의 相對值를 표시하면 그림 2, 3과 같다.

그림 2-(b)에서 $r=1.2$ 일 때에 線形性이 가장 좋을음을 알 수 있으며 이것은 C. W. Lee의 理論에서 $r=0.833$ 에 해당된다.¹⁾ 動作點에서 弁別器의 sensitivity는 식(1)과 (2)를 微分하여 구하면

$$\frac{\partial V_{o1}}{\partial \theta} \Big|_{\theta = \frac{\pi}{4}} = \frac{4r\eta_1 V}{(1+r^2)^{3/2}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_{o2}}{\partial \theta} \Big|_{\theta = \frac{\pi}{4}} = \frac{8r^2\eta_2 V^2}{(1+r^2)^2} \quad (4)$$

가 된다. 直線檢波인 경우 식(3)에서 $r=0.707$ 일 때 最大가 되며 이 때의 값은 $1.54\eta_1 V$ (V/rad)가 된다. 自乘檢波인 경우에는 식(4)에서 $r=1.0$ 일 때가 sensitivity가 最大가 되며 이 때의 값은 $2\eta_2 V^2$ (V/rad)가 된다.

한편 브리지回路를 들여다 본 임피던스 Z_{in} 은 檢波回路의 負荷효과를 무시할 수 있다면

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(r^2 + 1) - 2jrZ_0 \cot 2\theta}{2r - 2j \cot 2\theta} \quad (5)$$

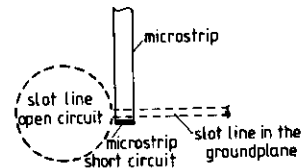
가 된다. 식(5)에서 $r=1.0$ 일 때에 $Z_{in}=Z_0$ 가 되어 모든 周波數에 대하여 弁別器의 브리지回路를 임피던스 整合시킬 수 있다.

따라서 $r=1.0$ 으로 하는 것이 바람직하며 이 때에 傳送線路의 特性 임피던스를 信號電源의 내부 임피던스와 같게 하면 周波數에 무관하게 FM 信號電壓 V 는 일정한 값으로 브리지回路에 인가된다.

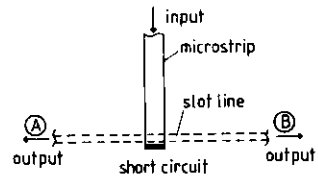
마이크로波帶에서는 일반적으로 自乘檢波를 이용하므로 弁別器의 線形性은 直線檢波일 때보다 나빠지지만 그림 3-(c)에서 $r=1.0$ 일 때에 임피던스 整合을 시키면서 動作點 부근의 直線性을 이용하여 50% 정도의 弁別帶域幅을 가지는 弁別器를 具現할 수 있다.

III. 線路 周波數 弁別器의 具現

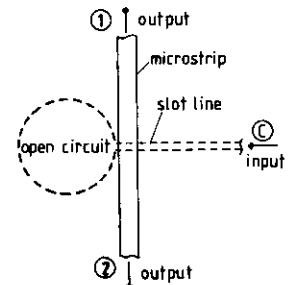
그림 4 (a)의 마이크로스트립-슬롯트 transition에서 슬롯트 開放回路와 마이크로스트립 短絡回路 대신에 슬



(a) Standard method



(b) Microstrip-slot junction



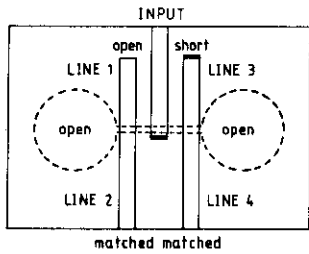
(c) Slot-microstrip junction

그림 4. 마이크로스트립-슬롯트 트랜지션
 Fig. 4. Microstrip-slot transition.

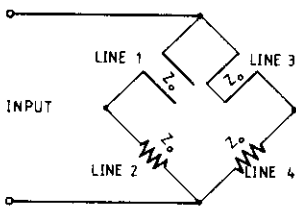
로트線路和 마이크로스트립線路를 연장하면 그림4 (b), (c)와 같은 형태의 transition이 된다.

그림 4 (b)의 마이크로스트립에서 들어다 볼 때에 port A와 port B로 연결되는 두 슬로트線路는 竝列로 되며 그림 4 (c)의 슬로트線路인 port C에서 들어다볼 때에 port 1과 port 2로 연결되는 두 마이크로스트립은 直列로 된다!¹⁾

이제 port A와 port B에 각각 port C를 연결하면 그림 5 (a)와 같은 回路를 구성할 수 있다. 여기서 마이크로스트립의 特性 임피던스는 모두 Z_0 이며 line 1과 line 3은 각각 終端을 開放과 短絡시키며, line 2와 line 4는 特性 임피던스 Z_0 로 整合을 시키고 마이크로스트립사이의 간격은 線路의 幅정도 이상이 되게하여 인접하는 線路사이에서 結合이 무시할 수 있게 한다!²⁾



(a) Structure of bridge circuit



(b) Equivalent circuit

그림 5. 開放 및 短絡된 브리지 回路
Fig. 5. Bridge circuit with open- and short-circuited lines.

마이크로스트립의 接地面에 있는 슬로트의 두 開放 回路사이에서 마이크로스트립과 直交하는 짧은 슬로트線路는 그 길이가 波長에 비하여 무시할 수 있을 정도로 짧다면 마이크로스트립 線路사이를 結合만 시켜주며 이 때에 등가회로는 그림 5 (b)와 같다. 이것은 그림 1에서 $r=1$ 인 경우 檢波回路를 제외한 브리지 回路와 동일하다.

集中素子 $R=Z_0$ 에 인가되는 電壓波란 것은 각각 line 2와 line 4를 통하여 傳送되는 것을 나타내므로 整

합된 檢波回路를 line 2와 line 4에 연결하면 弁別回路가 構成된다.

檢波回路가 연결되어 構成된 線路 周波數 弁別器의 等價回路는 그림 6과 같이 표시된다.

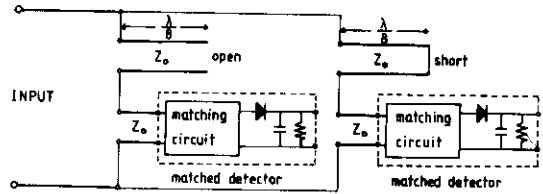


그림 6. 線路 周波數 弁別器의 等價回路
Fig. 6. Equivalent circuit of a realized line frequency discriminator.

IV. 製作 및 特性實驗

S-band에서 中心周波數를 $f_0=3.2\text{GHz}$ 로 하여 開放 및 短絡線路 스테브의 길이는 $\lambda_0/8$ 가 되게 하고, 각 마이크로스트립線路의 特性 임피던스는 모두 50ohm으로 하였다. 그림 5 (a)에서 line 1~2와 line 3~4는 connector와의 연결을 고려하여 원호가 되게 하였다.

실제 제작에 사용한 誘電체 基板은 比誘電率 $\epsilon_r=2.065$, 誘電체 두께 $h=0.254\text{mm}$, 基板上的 導體두께 $t=0.0178\text{mm}$ 인 Polyflon社의 Cufion이다.

마이크로스트립線路의 幅 및 길이는 Wheeler¹⁾가 提示한 마이크로스트립의 特性 임피던스 및 有效誘電率에 관한 관계식을 이용하여 구하였다.

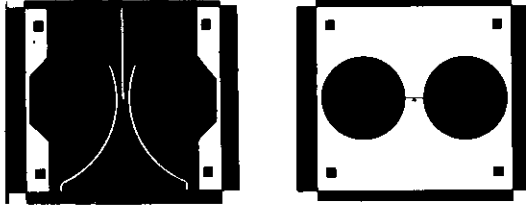
Line 1의 마이크로스트립 開放回路는 end-effect²⁾를 고려하여 스테브의 길이를 誘電체 두께 h 의 반정도 短縮하였으며, 마이크로스트립-스포트 junction 부분과 line 3의 마이크로스트립 短絡回路는 마이크로스트립線路의 幅과 같은 幅을 가지는 얇은 銅판을 誘電체 基板과는 直角으로 挿入하여 스테브의 끝부분과 接地面을 연결하였으며 8 GHz以上까지 短絡特性이 상당히 좋은을 確認하였다.

마이크로스트립의 接地面에 있는 슬로트線路의 寬 (gap)은 誘電체 두께의 1/2이 되게 하였으며, 슬로트線路의 開放回路인 원형의 둘레는 $0.8\lambda_0$ 정도가 되게 하고 슬로트線路의 效果를 충분히 얻기 위하여 슬로트回路와 마운트사이의 폭 20mm, 길이 10mm의 공간을 두었으며 誘電체 基板의 크기가 $40 \times 42\text{mm}$ 이 되도록 마운트를 청동으로 제작하여 사용하였다.

整合된 檢波回路로는 入力 임피던스가 50ohm인 Hewlett Packard社의 크리스탈 檢波器 8470A를 사용하였으며 測定 周波數 범위내에서 檢波器의 VSWR은

1.1 이하임을 확인하였다.

製作에 사용한 마이크로스트립회로의 마스크와 접지면에 슬롯회로의 마스크는 그림 7 (a), (b)와 같으며 整合된 檢波器를 연결하여 실제 特性實驗에 사용된 弁別器는 그림 8 과 같다.



(a) Microstrip circuit mask (b) Slotline circuit mask

그림 7. 마이크로스트립과 슬롯선로의 回路마스크
Fig. 7. Microstrip and slotline circuit masks.

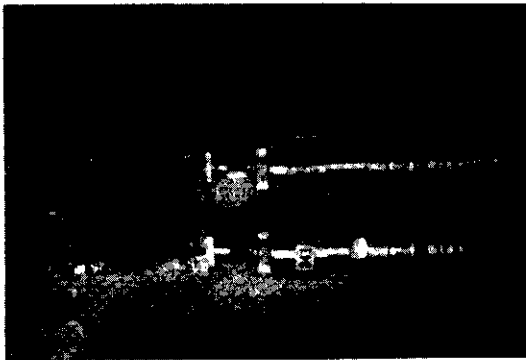


그림 8. 製作된 線路 周波數 弁別器
Fig. 8. Photograph of realized line frequency discriminator.

周波數 弁別器의 特性測定은 Sweep Oscillator (HP8350B) 의 CF- Δ F기능을 사용하여 入力 임피던스 整合特性은 Spectrum Analyzer (HP8569B)로 測定 하고, 周波數 弁別特性은 두 檢波器의 出力을 差動증폭기에 入力시킨 후 그 出力을 Oscilloscope로 測定하였다.

이 弁別器의 入力은 -10dBm으로 일정하게 인가시켰으며 2.2GHz에서 4.1GHz까지의 入力 整合特性은 그림 9와 같으며 2.4GHz에서 4.0GHz까지의 周波數 弁別特性은 그림 10과 같다.

V. 結 論

弁別帶域幅이 가장 넓은 것으로 알려진 線路 FM 弁別器의 브리지회로를 마이크로스트립과 슬롯선로를 이용하여 近似的으로 具現하여, 入力 임피던스 整合特性이 Return loss 20dB 이상이며 50%의 弁別帶域幅

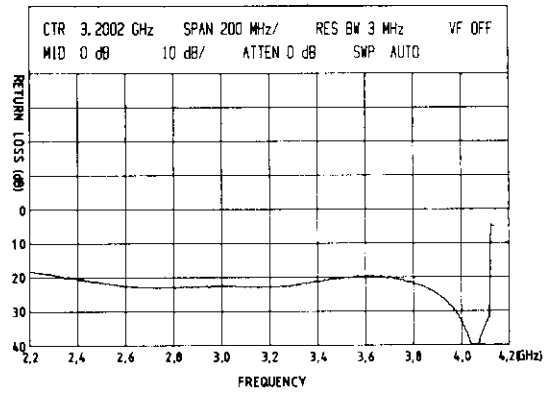


그림 9. 廣帶域 線路 弁別器의 return loss測定值
Fig. 9. Measured return loss of wide-band line frequency discriminator.

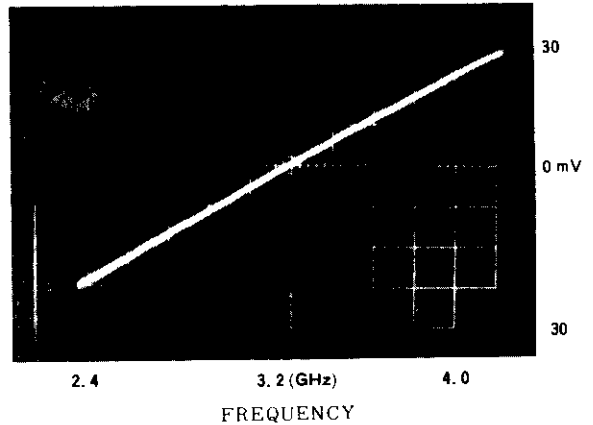


그림 10. 周波數 弁別器의 動特性
Fig. 10. Dynamic characteristics of frequency discriminator.

을 얻을 수 있음을 확인하였다.

本 論文에서 設計製作한 弁別器는 중심주파수 3.2GHz에서 1.6GHz를 얻었으며, 이것은 Gysel이 2개의 quadrature hybrid와 delay line을 이용하여 9GHz에서 얻은 4GHz의 帶域幅에 比하여 더욱 廣帶域이며 構造가 간단하다.

앞으로의 연구과제로는 弁別特性의 distortion을 정확히 測定하여 비교 검토하는 것이다.

參 考 文 獻

[1] Zhuang Kuan-Jie and Lin Fu-Hua, "Direct Microwave Modulation and Demodulation.

- IEEE MIT-S Digest, pp. 547-549, 1983.
- [2] Ulrich H. Gysel and John P. Watjen, *Wide-band Frequency Discriminator* "with High Linearity," *IEEE MIT-S Digest*, pp. 373-376, 1977.
- [3] Choong Woong Lee, "An analysis of a super wide-band FM line discriminator," *Proc. IEEE*, vol. 52, no. 9, pp. 1034-1038, Sept. 1964.
- [4] 張益洙, 朴麟洙, "마이크로스트립線路 廣帶域 마이크로波 周波數 弁別器에 관한 研究" 대한전자 공학회誌, 第16卷 第3號, pp. 49-56, 7月 1979年
- [5] C.W. Lee and W.Y. Seo, "Super wide-band FM line discriminator," *Proc. IEEE*, vol. 51, pp. 1675-1676, November 1963.
- [6] K.C. Gupta et al, *Microstrip Lines and Slotlines*. Artech House, pp. 235-244, 1979.
- [7] G.J. Laughlin, "A New Impedance-Matched Wide-Band Balun and Magic Tee," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-24, no. 3, March 1976.
- [8] Harold A. Wheeler, "Transmission-line properties of a strip on a dielectric sheet on a plane," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-25, no. 8, pp. 631-647, Aug. 1977.
- [9] T.C. Edwards, *Foundations for Microstrip Circuit Design*. John Wiley & Sons, pp. 102-105, 1981.
-