

## 移動物體 탐색을 위한 터넬다이오드 自勵믹서

(Tunnel Diode Oscillator with a Moving Target as a Self-excited Mixer)

李鍾珪\* · 沈壽輔\*\* · 尹賢普\*\*\*

(Lee, Chong Kak · Sim, Soo Bo · Yoon, Hyun Bo)

### 要 約

터넬다이오드를 마이크로 웨이브 發振器로 動作시키면서 出力이 輻射되어 移動物體에서 反射할때 變化信號를 터넬다이오드에 注入하여 負性抵抗領域에서 混合시키는 경우 移動物體를 포함하는 전체계의 임피던스와 발진조건, 주파수 변환 이론을 고찰했다. 터넬다이오드를 2.035 GHz, 0.1 mw 로 發振시키고 移動物體反射信號와 等價인 信號發生器는 125 MHz 낮게 發振시켰다. 入力信號크기에 따른 變換損失은 大信號注入 경우 約 67db 였다.

### Abstract

This paper deals with the self-excited mixer using tunnel diode oscillator operated as a microwave source and Doppler signal detector. The system impedance, the oscillation condition and the frequency conversion theory including moving target are investigated. The oscillating frequency and the output of tunnel diode oscillator are 2.035 GHz and 0.1 mW. The input signal frequency which is equivalent to Doppler signal is lower than tunnel diode oscillator frequency by 125 MHz. The conversion loss has been investigated as a function of input signal level. This loss is greater than 67 db for the large pump mode.

### I. 序 論

마이크로웨이브分野에 半導體素子の 應用은 파라메트릭앰프(Parametric Amp.)에서 電子에너지 蓄積素子로 바랙터(Varactor)가 쓰이고 發振 및 增幅에 터넬, 임팻(Impatt), 건(Gunn) 다이오드 등이 實用化되고 있다.

이 素子들은 소형이고 전력소모가 작으며 다루기가 쉽다는 利點이 있어 주목을 끌고 있으며 건과 임팻 發振器에 外部信號를 注入하여 周波數變

換시키는 理論과 發振器의 負荷를 變化시키는 것에 關한 研究는 [1]과 같은 것이 있다. 터넬다이오드의 周波數變換에 關한 變換利得, 雜音의 結果는 [2], [3]에 發表된바 있다.

터넬다이오드를 自勵믹서(Self excited mixer)로 쓸수 있다는 근거는 [4]에서 밝힌바 있고 負性抵抗發振器의 廣帶域負荷特性에 關한 研究結果는 [5]와 같다.

移動物體에서 反射되는 變化信號를 건다이오드로써 檢出할수 있는 장치에 對한 研究結果는 [6]과 같은 것이 있다.

本論文은 Doppler 變換信號를 檢출하는 마이크로웨이브素子로써 터넬다이오드의 自勵믹서動作을 고찰코져한다.

即 터넬다이오드를 마이크로파 발진원으로 쓰며 同時에 移動物體反射信號를 注入시켜 負性抵

\*正會員 서울大學校 工科大学 電子工學科  
Dept. of Electronics, College of Eng., Seoul National University

\*\* , \*\*\*正會員 韓國航空大學 通信工學科  
Dept. of Communication Eng. Civil Aviation College of Korea

接受日字: 1974年 1月 18日

抗領域에서 混合시킬 경우 바이어스條件과 全體系의 임피던스, 發振條件, 周波數變換理論을 高찰하므로써 自勵믹서가 Doppler 레다에서 送信系の 發振과 受信系の 믹서로 同時に 만족하여 터널 다이오드를 使用한 간단한 레다시스템을 構成할수 있다는것을 밝히고져 한다. 실험장치에서는 移動物體 反射信號代身에 信號發生器로 代치하여 入力信號의 레벨에 따른 變換損失을 測定하였다.

## II. 理論的 背景

### 1. 移動物體의 임피던스

能動素子の 發振出力은 特性임피던스가  $z_0$  인 電送線을 거쳐 空界에 整合된 空中線에 보내진다. 輻射된 에너지는 物體에 부딪쳐 反射, 屈折現象이 일어날 것이며 反射信號가 다시 能動素子에 되돌아올 경우의 發振器는 그림 1과 같다.

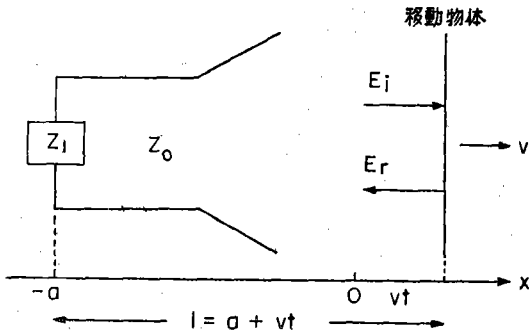


그림 1. 移動物體를 포함하는 發振器

Fig. 1. Tunnel diode oscillator including moving target.

移動物體에 入射하는 電界의 세기는

$$E_i = iE_1 e^{j(\omega t - k_i x)} \quad (1)$$

이고, 物體가  $x$  軸上을  $v$  라는 速度로 移動하고 있는 경우 反射하는 電界의 세기는

$$E_r = i\gamma E_1 e^{j(\omega_r t - k_r x)} \quad (2)$$

가 된다.

여기서  $\gamma$  는 反射係數이고,  $\omega_r = \frac{1-(v/c)}{1+(v/c)} \omega$  이다. 한편 磁界의 세기는 각각

$$H_i = i \left( \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} E_1 e^{j(\omega t - k_i x)} \quad (3)$$

$$H_r = -i \left( \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} \gamma E_1 e^{j(\omega_r t - k_r x)} \quad (4)$$

이다.

그러므로 移動物體의 임피던스는

$$Z_i = \frac{E_i + E_r}{H_i - H_r} \quad (5a)$$

이며, 自由空間의 임피던스  $Z_f = \frac{E}{H} = \left( \frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}$  이므로

$$\begin{aligned} Z_i &= \frac{E_i + E_r}{E_i (\epsilon_0 / \mu_0)^{\frac{1}{2}} - E_r (\epsilon_0 / \mu_0)^{\frac{1}{2}}} \\ &= \frac{E_i + E_r}{E_i / Z_f - E_r / Z_f} \end{aligned} \quad (5b)$$

이며, 反射波에 對한 入射波의 比 即 反射係數는

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_i - Z_f}{Z_i + Z_f} \\ &= \frac{\gamma e^{j(\omega_r t - k_r x)}}{e^{j(\omega t - k_i x)}} = \gamma e^{j(\omega_r - \omega)t + (k_r + k_i)x} \end{aligned} \quad (6)$$

가 된다.

能動素子が 있는 位置에서의 反射係數는  $x =$

$-a, k_i = \frac{\omega}{c}, k_r = \frac{\omega_r}{c}$  를 代入하여

$$\gamma_a = \gamma e^{j(\omega_r - \omega)t - (\omega_r + \omega) \frac{a}{c}} \quad (7a)$$

를 얻을수 있다.

一般的으로 物體의 移動速度가 光速보다 낮은 ( $v/c \ll 1$ ) 경우

$$\omega_r - \omega = -\frac{-2v/c}{1+(v/c)} \omega \approx -2v\omega/c$$

$$\omega_r + \omega = \frac{2\omega}{1+(v/c)} \approx 2\omega$$

이므로 (7a)식은

$$\begin{aligned} \gamma_a &= \gamma e^{j(-2v\omega/c)t - (2\omega a/c)} \\ &= \gamma e^{-j(2\omega/c)(a+vt)} \\ &= \gamma e^{-j2kx} \end{aligned} \quad (7b)$$

가 된다.

能動素子が 있는 位置에서 移動物體를 본 임피던스  $Z$  는

$$\begin{aligned} Z &= \frac{1+\gamma_a}{1-\gamma_a} Z_0 \\ &= \frac{1+\gamma e^{-j2kx}}{1-\gamma e^{-j2kx}} = R + jX \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{1-\gamma^2}{1+\gamma^2-2\gamma \cos 2kl} Z_0 \\ X &= -\frac{2\gamma \sin 2kl}{1+\gamma^2-2\gamma \cos 2kl} Z_0 \end{aligned} \right\} \quad (8b)$$

이다.

目標物體는 여러가지 형태의 것으로 레다단면적(Radar cross section)은 작으므로  $\gamma \ll 1$ 인 경우

$$\left. \begin{aligned} R &\approx Z_0 + 2Z_0\gamma \cos 2kl = Z_0 + \Delta R, \\ \Delta R &= 2Z_0\gamma \cos 2kl \\ X &\approx -2Z_0\gamma \sin 2kl = \Delta X, \\ \Delta X &= -2Z_0\gamma \sin 2kl \end{aligned} \right\} \quad (8c)$$

로 이식은 一般의인 형태의 移動物體를 能素子가 있는 쪽에서 본 임피던스가 된다.

2. 移動物體의 임피던스를 포함한 發振條件

터널다이오드의 等價回路는 그림 2(a)와 같고 發振時  $I-V$  特性曲線實測値는 그림 2(b)와 같다. 移動物體를 等價임피던스로 表示한 發振器의 構成은 그림 3과 같다.

能動素子에 흐르는 電流를

$$i_d(t) = i(t)e^{j(\omega_0 t + \varphi(t))} \quad (9a)$$

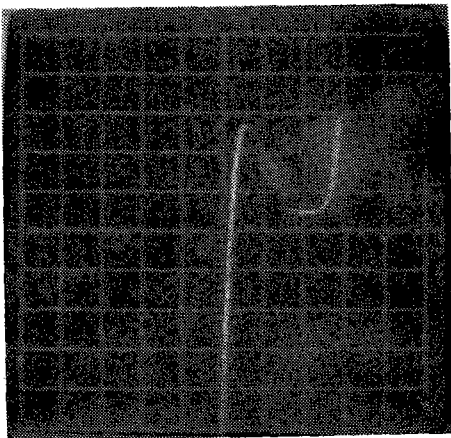
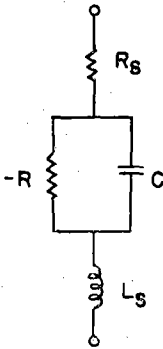


그림 2. (a), (b) 터널다이오드, 등가회로,  $I-V$  特性曲線  
 Fig. 2. (a) Equivalent circuit of tunnel diode  
 (b)  $I-V$  characteristic curve for oscillation mode of tunnel diode

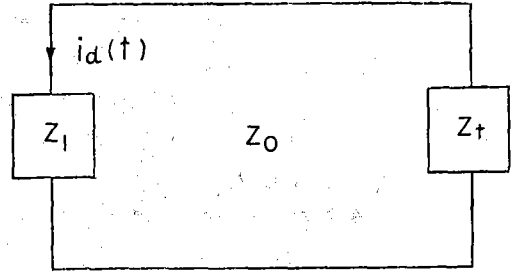


그림 3. 移動物體를 포함하는 等價回路  
 Fig. 3. Equivalent circuit including moving target.

라하면, 電流의 時間에 對한 變化는

$$\begin{aligned} \frac{di_d(t)}{dt} &= R_s \left[ j\omega_0 i + \frac{d\varphi(t)}{dt} i \right] \\ &+ \frac{1}{i(t)} \frac{di(t)}{dt} i(t) e^{j(\omega_0 t + \varphi(t))} \end{aligned} \quad (9b)$$

가 된다.

다이오드의 임피던스  $Z_1$ 은 動作周波數  $\omega$ , 交流電流  $i$ , 바이어스電流  $I$ 의 函數이므로 다음과 같이 쓸수있다.

$$Z = Z_1(\omega, i, I) + Z_s(\omega, t) \quad (10)$$

⑩式은 移動物體를 포함하는 全體임피던스式으로 自勵믹서로 動作시키려면 이식은 영이되어야 한다.

單純負性抵抗發振器로 動作할때의 周波數  $\omega_0$ , 發振電流  $i_0$ , 直流바이어스 電流  $I_0$ 에서 自勵믹서로 動作시키면 移動物體에 依한 反射信號의 周波數, 交流電流, 바이어스가 각기 달라지므로 이에 따른 임피던스의 變化는

$$\begin{aligned} dZ &= \left( \frac{\partial Z}{\partial \omega} \right) \omega_0 \cdot (\omega - \omega_0) + \left( \frac{\partial Z}{\partial i} \right) i_0 (i - i_0) \\ &+ \left( \frac{\partial Z}{\partial I} \right) I_0 \cdot (I - I_0) \end{aligned} \quad (11)$$

가 되며, 交流回路理論에서 時間에 對한 變化는  $j\omega$ 를 곱하면 되므로 (9b)式에서  $\omega$ 代身에  $\omega_0 + \frac{d\varphi(t)}{dt} - j \frac{1}{i(t)} \frac{di(t)}{dt}$ 를 代入하면, 全體 임피던스式 (10)은

$$\begin{aligned} Z &= Z_1(\omega_0, i_0, I_0) + Z_s(\omega_0, t) + \frac{\partial Z}{\partial \omega} \left( \frac{d\varphi(t)}{dt} \right. \\ &- \left. j \frac{1}{i(t)} \frac{di(t)}{dt} \right) + \left( \frac{\partial Z}{\partial i} \right) di \\ &+ \left( \frac{\partial Z}{\partial I} \right) dI = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

가 된다. 이식에서  $di=i-i_0$ ,  $dI=I-I_0$  이다. 物體가 정지하고 있을때 임피던스

$$Z_1(\omega_0, t=0) = Z_0 \quad (13)$$

이며, 移動할때는

$$Z_1(\omega_0, i_0, I_0) + Z_1(\omega_0, t) = \Delta R_1 + j\Delta X_1 \quad (14)$$

이다. (14)식과 (12)식에서

$$\left. \begin{aligned} & \left( \frac{\partial R}{\partial \omega} \right) \left( \frac{d\varphi(t)}{dt} \right) + \left( \frac{\partial X}{\partial \omega} \right) \left( \frac{1}{i(t)} \frac{di(t)}{dt} \right) \\ & + \left( \frac{\partial R}{\partial i} \right) di + \left( \frac{\partial R}{\partial I} \right) dI \\ & + \Delta R_1 = 0 \\ & \left( \frac{\partial X}{\partial \omega} \right) \left( \frac{d\varphi(t)}{dt} \right) - \left( \frac{\partial R}{\partial \omega} \right) \left( \frac{1}{i(t)} \frac{di(t)}{dt} \right) \\ & + \left( \frac{\partial X}{\partial i} \right) di + \left( \frac{\partial X}{\partial I} \right) dI \\ & + \Delta X_1 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

여기서  $Z=R+jX$  이다.

이식은 移動物體를 포함하는 發振의 基本式이다.

移動物體에 의한 바이어스 電壓變動은

$$dV = \left( \frac{\partial V}{\partial \omega} \right)_{\omega} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} + \left( \frac{\partial V}{\partial i} \right)_{i} \cdot di + \left( \frac{\partial V}{\partial I} \right)_{I} \cdot dI \quad (16)$$

이며, 移動物體에 의한 變化된 信號 측출회로 即 바이어스 回路의 抵抗을  $R_c$  라 하면

$dv=R_c dI$ 가 되어 식 (16)은

$$\begin{aligned} dI \left( R_c + \frac{\partial V}{\partial I} \right) + \left( \frac{\partial V}{\partial \omega} \right) \frac{d\varphi(t)}{dt} + \left( \frac{\partial V}{\partial i} \right) di &= 0 \\ dI = - \frac{\left( \frac{\partial V}{\partial \omega} \right) \frac{d\varphi(t)}{dt} + \left( \frac{\partial V}{\partial i} \right) di}{R_c + \frac{\partial V}{\partial I}} \end{aligned} \quad (17)$$

가 되어 이식은 Doppler 信號에 의한 바이어스變動을 나타내는 식이다.

다이오드의 負性抵抗은 直流바이어스點과 注入 電流의 크기에 따라 다르고  $R$ 의 平均値  $R_0$ 가 正의 값을 갖일때 發振은 정지하며, 單순믹서 경우의 바이어스點과는 달리 自動믹서로 動作시킬 때는  $R_0$ 는 負의 값이어야 入力信號의 어느값에 서나 發振이 가능하게 되므로 바이어스點을 잡을 때에는 入力信號의 크기도 고려하여야한다.

自動믹서는 單순믹서에 비해 매우복잡하여 한 個의 다이오드內에서 우선원하는 송신주파수의

出力을 내야하고 移動物體로부터 反射되는 信號를 받아들여 發振信號와 混合시켜 負性抵抗領域에서 變換利得을 얻게하고 중간주파수세력을 증폭한다.

이와같은 기능이 만족되기 위해서는 全體系의 임피던스는 (15)식에 만족하도록 定해져야 한다.

### 3. 周波數變換

能動素子에 흐르는 電流는

$$i_d(t) = i_0(t) + i_i(t) = i(t) e^{j(\omega_0 t + \varphi(t))} \quad (18)$$

이며 그림 4에서  $i_0(t)$ 는 發振세력으로 안테나를 거쳐 空界로 轉射되는 成分이고 物體反射에 의한 入力信號  $i_i(t)$ 는

$$i_i(t) = i_i(t) e^{j(\omega_0 t + \omega' t)} \quad (19)$$

가 되며, 여기서  $\omega' = 2v/c \cdot \omega$  이다.

能動素子の 임피던스  $Z_1$  은

$$Z_1 = \frac{-e_0 + e_i}{i_0 + i_i} = \frac{Z_0(i_i(t) - i_0(t))}{i_d(t)} \quad (20)$$

이며, 이 값은 動作周波數, 入力信號電流, 바이어스 電流에 따라 變化될 것이므로

$$\begin{aligned} dZ_1 &= \left( \frac{\partial Z_1}{\partial \omega} \right)_{\omega} \cdot (\omega - \omega_0) + \left( \frac{\partial Z_1}{\partial i} \right)_{i_0} \cdot (i - i_0) \\ &+ \left( \frac{\partial Z_1}{\partial I} \right)_{I} \cdot (I - I_0) \end{aligned} \quad (21)$$

로 쓸수 있고 여기서  $di=i-i_0$ ,  $dI=I-I_0$  이다. (20)식에서

$$\frac{i_i(t)}{i_d(t)} = \frac{Z_0 + Z_1}{2Z_0}$$

가 되므로

$$i_i(t) = \frac{1}{2Z_0} [Z_0 + Z_1(\omega_0, i_0, I_0) + dZ_1] i_d(t) \quad (22)$$

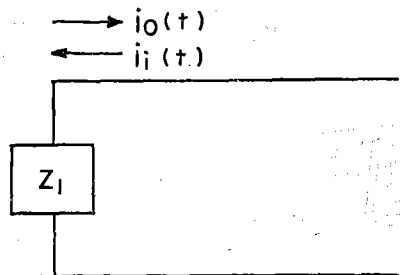


그림 4. 自動 믹서  
Fig. Self-excited mixer.

이며, 發振할때

$$Z_0 + Z_1(\omega_0, i_0, I_0) = 0 \quad (23)$$

이코,  $w$  代身에  $\omega_0 + \frac{d\varphi}{dt} - i \frac{1}{i(t)} \frac{di(t)}{dt}$  를 式 (23)을 식 (22)에 代入하면

$$\begin{aligned} \frac{i(t)}{i(t)} e^{j(\omega't - \varphi(t))} &= \frac{1}{2Z_0} \left[ \left( \frac{\partial Z_1}{\partial \omega} \right) \left( \frac{d\varphi(t)}{dt} \right) \right. \\ &\quad \left. - j \frac{1}{i(t)} \frac{di(t)}{dt} \right] + \left( \frac{\partial Z_1}{\partial i} \right) di \\ &\quad + \left( \frac{\partial Z_1}{\partial I} \right) dI \end{aligned}$$

가 되어

$$\begin{aligned} &\left( \frac{\partial R_1}{\partial \omega} \right) \frac{d\varphi(t)}{dt} + \left( \frac{\partial X_1}{\partial \omega} \right) \frac{1}{i(t)} \frac{di(t)}{dt} \\ &\quad + \left( \frac{\partial R_1}{\partial i} \right) di + \left( \frac{\partial R_1}{\partial I} \right) dI \\ &= 2Z_0 \left( \frac{i_1(t)}{i(t)} \right) \cos(\omega't - \varphi(t)) \\ &\left( \frac{\partial X_1}{\partial \omega} \right) \frac{d\varphi(t)}{dt} - \left( \frac{\partial R_1}{\partial \omega} \right) \frac{1}{i(t)} \frac{di(t)}{dt} \\ &\quad + \left( \frac{\partial X_1}{\partial i} \right) di + \left( \frac{\partial X_1}{\partial I} \right) dI \\ &= 2Z_0 \left( \frac{i_1(t)}{i(t)} \right) \sin(\omega't - \varphi(t)) \end{aligned} \quad (24)$$

여기서  $Z_1 = R_1 + jX_1$  이다.

이식은 Locking이 일어나지 않는 범위의 入力 信號에 關한 自動믹서의 周波數變換基本式이다.

變換利得은 式(17)이 Doppler 信號에 依한 바 이어스變化分이므로 差周波數分의 電力은

$$P_{IF} = \frac{1}{2} (dI)^2 R_c \quad (25)$$

이며, 能動素子에 되돌아오는 反射信號電力  $P_i$ 는

$$P_i = \frac{1}{2} Z_0 i_i'(t) \quad (26)$$

이므로, 周波數變換利得은

$$G = \frac{P_{IF}}{P_i} = \frac{(dI)^2 R_c}{Z_0 i_i'(t)} \quad (27)$$

가 된다.

### III. 實驗 및 檢討

터널다이오드 發振器에 移動物體 反射信號와 等 價인 信號發生器의 出力을 注入하고, 差周波數 出力은 바이어스回路側에서 檢出하며 이 信號가 미 약하여 超短波受信機로 增幅하여 加청주파수 出力을 스크오프와 전력계로 測定한다.

실험장치의 구성은 그림 5와 같으며 다이오드 발진주파수는 2.035 GHz에서, 出力을 0.1 mW까지 얻을 수 있었고, 信號發生器周波數는 1.91 GHz에 1 KHz 50% 振幅變調시켜 감쇠기를 통해 레벨을 조정하여 發振器에 注入한다.

差周波數는 125 MHz로 出力의 크기는 信號發生器의 出力레벨에 따른 變化分을 求하기 위하여 超短波受信機 加청주파수 出力을 전력계로 測定한 값과 125 MHz 信號發生器出力(1 KHz 50% 진폭변조)을 초단파수신기 入力으로 한 경우 出力을 比較한 結果 表1을 얻었다.

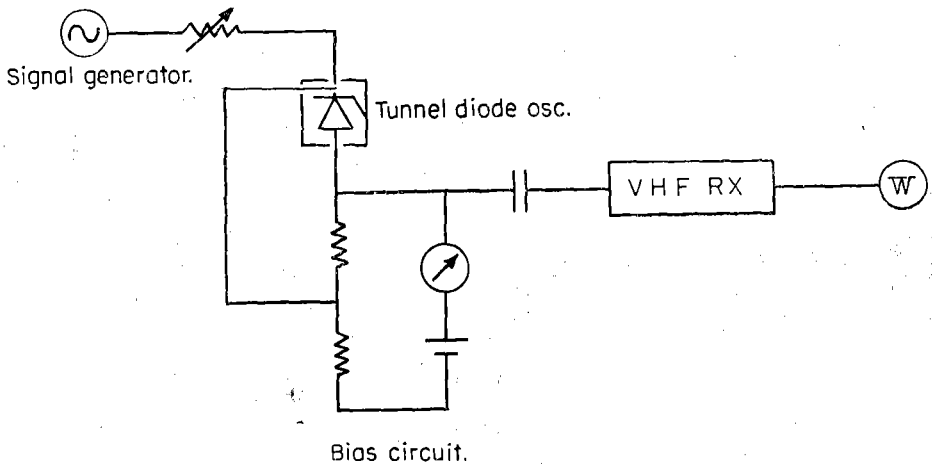


그림 5. 실험장치 구성도  
Fig. 5. Experimental set up.

信號發生器出力이  $-30\text{ dbm}$  以下가 될 경우 초단파수신기출력 검출이 불가능하였고  $-3.5655\text{ dbm}$  에서 부터 Locking 이 일어나는것을 알수 있었다.

變換損失은 入力레벨變化에 따라 測定한 結果 그림 6과 같았으며 크기는 約  $67\text{db}$  程度였다.  $125\text{ MHz}$  의 差周波數出力을 受信機로 增幅檢波하여 오시스코프에 관찰한것은 그림 7(a)이며 Locking 이 일어날때의 것은 그림 7(b)와 같다.

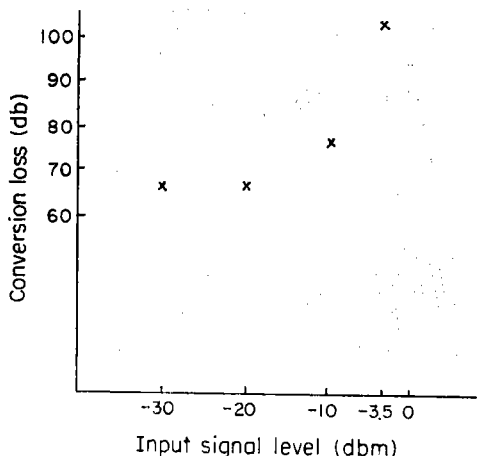


그림 6. 變換損失 對入力信號레벨  
Fig. 6. Conversion loss as a function of input signal level

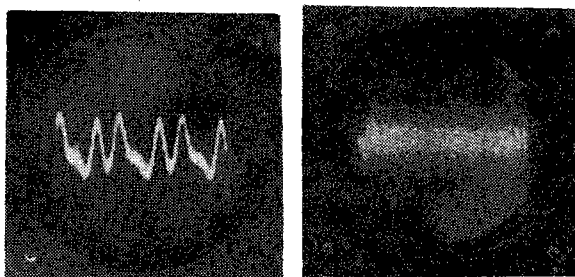


그림 7. (a) 正常수신기 出力파형  
(b) Locking 이 일어날때  
Fig. 7. (a) Lormal output of VHF RX,  
(b) Locking

目標物反射信號는 送信出力이 一定할 경우 그 크기가 物體의 레다단면적(Radar cross section)에 따라 크게 달라지며 周波數는 物體의 速度에 따라 變化할 것이다.

反射信號의 크기에 따른 system 의 감도변화는

표 1. 差周波出力  
Table 1. Beat frequency output level

| Input signal level   | VHF 受信機 audio level | 125 MHz signal generator output |
|----------------------|---------------------|---------------------------------|
| $-30\text{ dbm}$     | 20 mW               | $3\text{ }\mu\text{V}$          |
| $-20\text{ dbm}$     | 25 mW               | $9\text{ }\mu\text{V}$          |
| $-10\text{ dbm}$     | 25 mW               | $9\text{ }\mu\text{V}$          |
| $-3.5679\text{ dbm}$ | 15 mW               | $1\text{ }\mu\text{V}$          |

증폭기를 써서 解決되나 速度變化에 따른 周波數變化에 對한 一定한 共振器特性이 문제시된다.

본실험에서는 빠른 速度로 運動하는 物體反射信號를 가정하여  $125\text{ MHz}$  의 中間周波數를 使用했으나 實際問題에서는 아주느린속도에서 빠른속도까지의 전과정문제가 다루어져야 한다.

變換損失의 큰것은 다이오드 발전기에 注入하는 信號의 크기에 따라 負性抵抗값이 달라지게 되며 본실험에서는 발전신호가 미약하여 差周波數出力檢出이 곤란하여 大信號注入(large pump mode)을 시켰으므로 變換損失이 增加한 것으로 본다. 이것은 M. R. Baber 의 터널다이오드를 단 순믹서로 動作시킬때 大信號의 注入경우 Varistor mixer 의 變換損失과 比較된다는 결론과 비교할 수 있다.

#### IV. 結 論

負性抵抗素子이므로 전력소모가 적고 소형이며 레다송수신계통의 장치가 송신출력과 수신믹서를 겸용시키므로 간단해지는 利點을 갖이는 레이다 시스템을 構成할수 있다.

實驗에서 S-band 터널다이오드 自動믹서로 發振周波數  $2,035\text{ GHz}$  入力信號  $1.91\text{ GHz}$  인 경우 差周波數  $125\text{ MHz}$  에서 變換損失은 約  $67\text{ db}$  였다.

터널다이오드의 믹서 特性은 小信號注入 경우 (small pump mode) 變換利得을 갖게되고 雜音面에서도 유리하므로 受信系統에서 이로울것이나 發振出力이 弱하므로 탐색거리가 짧아질 것으로 증폭을 시켜 복사해야 할 것으로 본다.

大信號注入의 경우(large pump mode) 變換損失을 갖이는 실험결과를 얻었으나 실제 시스템에서 目標物의 레다단면적(RCS)에 따른 反射射력은 아주 미약하므로 差周波數증폭만을 보강하면 출력은 원하는 레벨의 것을 얻을수 있을 것이다.

## 參考文獻

1. Shigemichi Nagano and Yoshihiko Akaiwa, "Behavior of Gunn diode oscillator with a moving reflector as a self-excited mixer and a load variation detector," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-19, No. 12, pp. 906-910, Dec. 1971.
2. K. K. N Chang, G. H. Heilmeyer, and H. J. Prager, "Low-noise Tunnel-diode down converter having conversion gain," *Proc. IRE*, pp. 854-858, May 1960.
3. F. Sterzer and A. Presser, "Stable low-noise Tunnel-diode frequency converters," *RCA review*, pp. 3-28, March 1962.
4. C. S. Kim, "Tunnel-diode converter analysis," *IRE Trans. Electron Devices*, pp. 394-405, Sept. 1961.
5. K. Kurokawa, "Some basic characteristics of broad band negative resistance oscillator circuits," *The Bell System Technical Journal*, pp. 1937-1955, July-August 1969.
6. Yoichiro Takayama, "Doppler signal detection with negative-resistance diode oscillators," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-21, No. 2, pp. 89-94, Feb. 1973.
7. M. R. Barber, "A numerical analysis of the Tunnel-diode frequency converter," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-13, No. 5, pp. 963-670, Sept. 1965.