

## 〔研究〕

# PINダイオードスイッチを用いた広帯域マイクロ波可変減衰器 New Broadband Microwave Attenuator with PIN Diode Switches

中野 洋 加藤 吉彦  
H. NAKANO Y. KATO

An electrically controlled broadband attenuator composed of two PIN diode switches and two quadrature hybrid couplers (QHCs) has been developed. Its attenuation can be precisely controlled by electrical pulses and also easily measured by counting its pulse repetitions. It can thus be used for broadband microwave measurements, especially noise measurement. When controlled with pulses whose width was 10 $\mu$ s and repetition frequencies were between 10 and 90kHz, this attenuator has an attenuation being linear to repetition frequencies for signal frequencies in the range of 2 to 12 GHz.

### §1 序論

広帯域なマイクロ波機器の特性評価には、広帯域な測定システムが必要となる。ところで、雑音の精密測定やパッシブリモートセンシングにおいては、受信機としてラジオメータが用いられるが、測定の容易さから自動平衡方式が望まれる。ラジオメータの自動平衡化のためには、電子的手段で高速に制御できる広帯域のマイクロ波可変減衰器が必要となるが、これまで、抵抗体を使用した一般的な減衰器でこのような目的にかなったものは得られていない。一方、高速の電子的減衰器として、これまでPINダイオードを使用した2つの方式が考案されている。1つは、SPSTタイプのPINダイオードスイッチを連続的にON・OFFさせることによって、実効的に減衰量を制御するものである<sup>1,2)</sup>。これは、既に、実際のラジオメータに応用されている<sup>3)</sup>。この方式の特長は、PINダイオードスイッチが2つの状態しか取らないため動作が安定している、PINダイオードは繰り返しパルスによって駆動されるため、減衰量を正確に制御でき、その変化量をパルス数から求めることができる等である。そのため、この方式はある一定の平均電

力が意味を持つ雑音の測定に適している。しかし、PINスイッチはON状態とOFF状態とで反射係数が大きく異なる。精密雑音測定においては、入力端と出力端における多重反射が減衰量の精密計測に影響を及ぼし、誤差の主要因の1つになる。例えば、スイッチの反射係数が0.1変化すれば、その有能電力比は約2%変化する。この影響を避けるために、通常、PINスイッチの前後にアイソレータを接続する。しかし、アイソレータは周波数特性が狭いため、ラジオメータの広帯域化には適していない。2つ目の方式は、PIN減衰器のバイアス電流を変えることにより、減衰量を制御するものである。この方式の応用例として、同一特性を持つ2個の0°/90°ハイブリッド結合器(QHC)を用意し、その間に同一特性を持つ2個のPIN減衰器を接続したものが<sup>4)</sup>ある。2個のQHCを使うことによって、アイソレータを用いることなく入出力端での反射係数を下げ、広帯域にわたり動作させるものである。しかし、この方式では、バイアス電流はアナログ回路によって制御されるので、減衰量は周囲温度の影響を受ける。また、減衰量の線形範囲は限られており、減衰量を正確に制御することが困難である。

このような欠点を避け広帯域化を図る方法として、2個のQHCと2個のPINダイオードスイッチを用い、その2つのPINダイオードスイッチを電氣的に高速でON・OFFする可変減衰器を考案した<sup>5)</sup>。本論文では、その構成、動作原理、測定結果等について述べる。

## §2 原理

PINダイオードを使ったSPSTスイッチがパルス信号で駆動されると、PINスイッチはON状態とOFF状態を繰り返す。ON状態では、PINスイッチは減衰量が最小(挿入損約1dB)になり、OFF状態では減衰量が最大(約45dB)になる。Fig.1にこの減衰器を雑音測定に用いた場合の構成と動作を示す。 $T_i$ は雑音源の雑音温度、 $T_a$ は減衰器の物理温度(絶対温度)である。PINスイッチがON状態では、平均的あるいは実効的な出力雑音温度 $T_b$ は $T_i$ に等しく、一方PINスイッチがOFF状態では、 $T_b$ は $T_a$ に等しくなる。このため、 $T_b$ は下式のように表される<sup>2)</sup>。

$$T_b = \tau_p f_R T_i + (1 - \tau_p f_R) T_a = \tau_p f_R (T_i - T_a) + T_a \quad (1)$$

ここで、 $\tau_p$ はパルス幅であり、 $f_R$ はパルス繰り返し周波数である。(1)式より、 $T_b$ と $f_R$ の間に線形の関係が成り立つことが分かる。すなわち、一定幅の狭いパルスでPINダイオードスイッチを駆動すると、その平均的な電力透過係数の変化はパルス周波数の変化に比例している。しかし、PINスイッチの反射係数はON状態とOFF状態とで大きく異なる(OFF状態では大き

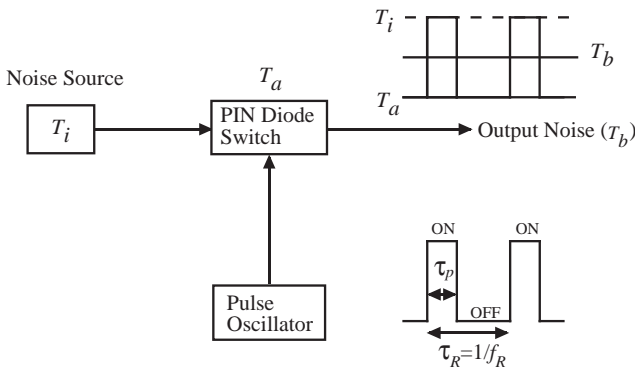


Fig. 1 Example of an attenuator with a PIN diode switch.

な値となる)。それによる多重反射の影響を避けるためには、入出力端にそれぞれアイソレータを置く方法が考えられる。しかし、先に述べたように、一般にアイソレータの使用帯域幅は狭く、広帯域化の点から用いることはできない。そのため、アイソレータを用いない方法として、Fig.2で示すような、2個のSPSTタイプのPINダイオードスイッチと2個のQHCを使用した対称的な回路構成を考える。

QHCのSマトリックスの各成分は、理論的に、

$$S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42} = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(-j\theta_h) \quad (2)$$

$$S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32} = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left[-j\left(\theta_h + \frac{\pi}{2}\right)\right] \quad (3)$$

である。 $\theta_h$ はQHCの残留位相量である。

(2)、(3)式より、QHCの入力端からみた反射係数 $\Gamma_1$ は、

$$|\Gamma_1| = \frac{1}{2} |\Gamma_3 - \Gamma_4| \quad (4)$$

と表される。ここで、 $\Gamma_3$ と $\Gamma_4$ はPINスイッチの入力端における反射係数である。(4)式より、もし2個のPINスイッチの反射係数が同じなら、PINスイッチ自体の反射は、この減衰器システムの入力端と出力端には生じない。一般に、PINスイッチもQHCも広帯域であり、これにより、アイソレータを使用せずに、広帯域な可変減衰器を実現することができる。また、(1)式のところで述べたように、パルス発振器の繰り返しパルス周波数を変えることによって、その減衰量を制御し、そのパルス周波数から減衰量の変化を読み取ることができる。

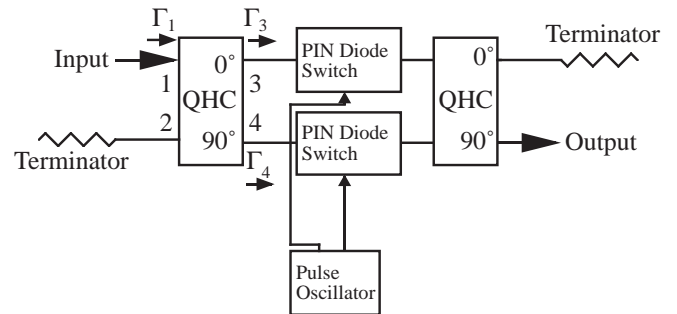


Fig. 2 Configuration circuit of the new attenuator.

### §3 測定結果

ON状態とOFF状態におけるPINダイオードスイッチ単体の入出力端での反射特性の測定結果を Fig.3, Fig. 4 に示す。これらの図から, P I N スイッチの反射特性 ( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ) は, ON 状態では -20dB 以下であるが, OFF 状態ではほぼ 0dB であることが分かる。新しい可変減衰器の反射特性を Fig.5, Fig.6 に示す。 $S_{11}$ ,  $S_{22}$  はON 状態とOFF 状態のどちらにおいても, 測定周波数全体にわたって -15dB 程度以下である。このため, この可変減衰器は多重反射の影響を極めて小さくできる。パルス幅を $10\mu s$ とし, パルス繰り返し周波数を変化させたときの, 可変減衰器の電力透過係数の変化を Fig.7 に示す。この図から, 2 - 12GHzの周波数範囲で, 電力透過係数はパルス繰り返し周波数に比例

していることが分かる。また, 測定されたグラフの勾配は, 測定したマイクロ波の周波数によって異なるが, これは使用した素子の特性が周波数によって異なるためである。

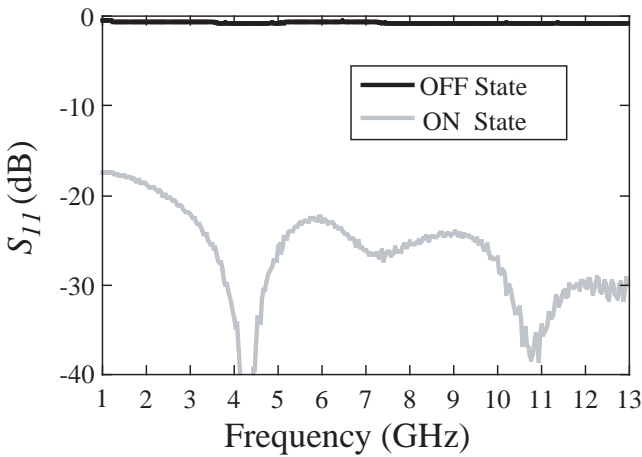


Fig.3  $S_{11}$  of a PIN diode switch.

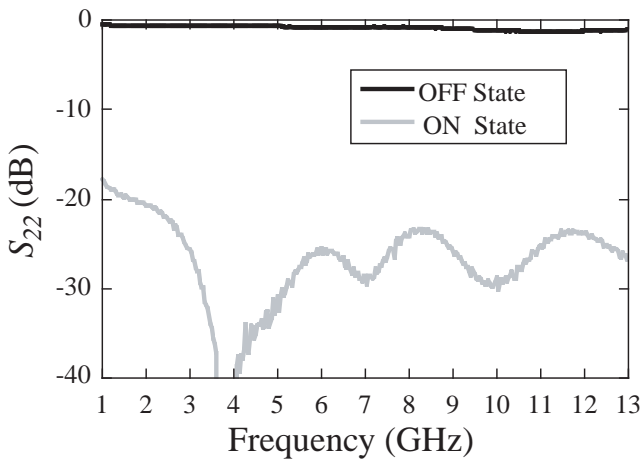


Fig.4  $S_{22}$  of a PIN diode switch.

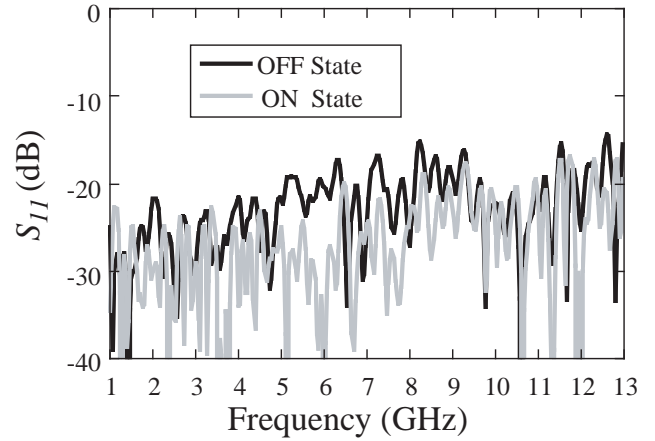


Fig.5  $S_{11}$  of the new attenuator.

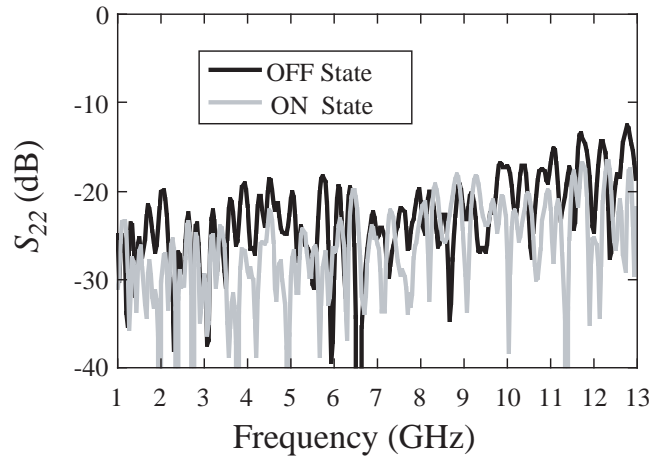


Fig.6  $S_{22}$  of the new attenuator.

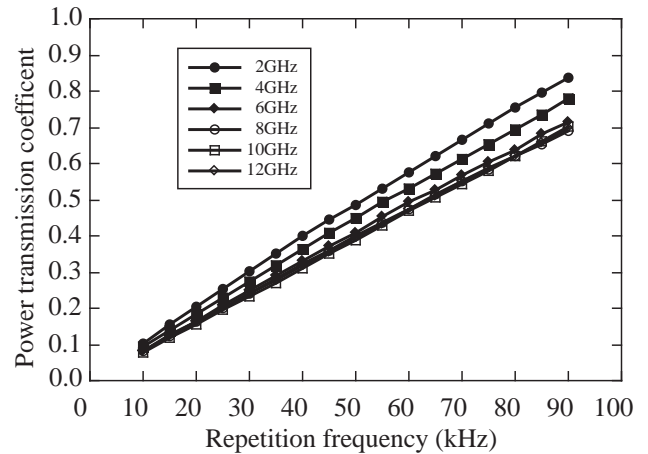


Fig.7 Attenuation characteristics of the new attenuator.

## § 4 結論

電氣的に制御可能な広帯域減衰器として、ON状態とOFF状態をとる2つのPINダイオードスイッチと2つのQHCを接続した回路構成を考案した。実際に回路を組み、2 - 12GHzの周波数範囲でCWにより実験を行い、広帯域可変減衰器としての機能を確認した。この減衰器がCWによらず雑音においても同様に動作することは明らかであり、雑音測定用ラジオメータに用いることができる。

## 参考文献

- 1) W. N. Hardy, K. W. Gray and A. W. Love: "An S-Band Radiometer Design with High Absolute Precision", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **Vol. MTT-22**, No. 4 (1974) 382-390.
- 2) F. T. Ulaby, R. K. Moore and A. K. Fung: Microwave Remote Sensing. Active and Passive, **Vol. I**, (Artech House, Massachusetts, 1981) 379-382.
- 3) Y. Kato, K. Komiyama, and T. Yasuhira: "A New Microwave Radiometer Simultaneously Receiving Dual-Polarized Radiation", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **Vol. GE-25**, No. 1(1987) 16-21.
- 4) R. J. Blaser: "Control Circuit Produces Linear Attenuator Response", Microwaves & RF, **Vol. 33**, No.2 (1994) 59-64.
- 5) H. Nakano and Y. Kato: "Electrically Controlled Broadband Microwave Attenuator with *p-i-n* Diode Switches", Review of Scientific Instruments, **Vol. 70**, No. 6(1999) 2864-2865.

(2000.1.31受付)