

λ/4先端開放スタブ装荷形 V帯サブハーモニック注入同期VCO MMIC

稲垣隆二*
津留正臣*
谷口英司**

V-band Subharmonically Injection Locked VCO MMIC with λ/4 Open-ended Stub

Ryuji Inagaki, Masaomi Tsuru, Eiji Taniguchi

要 旨

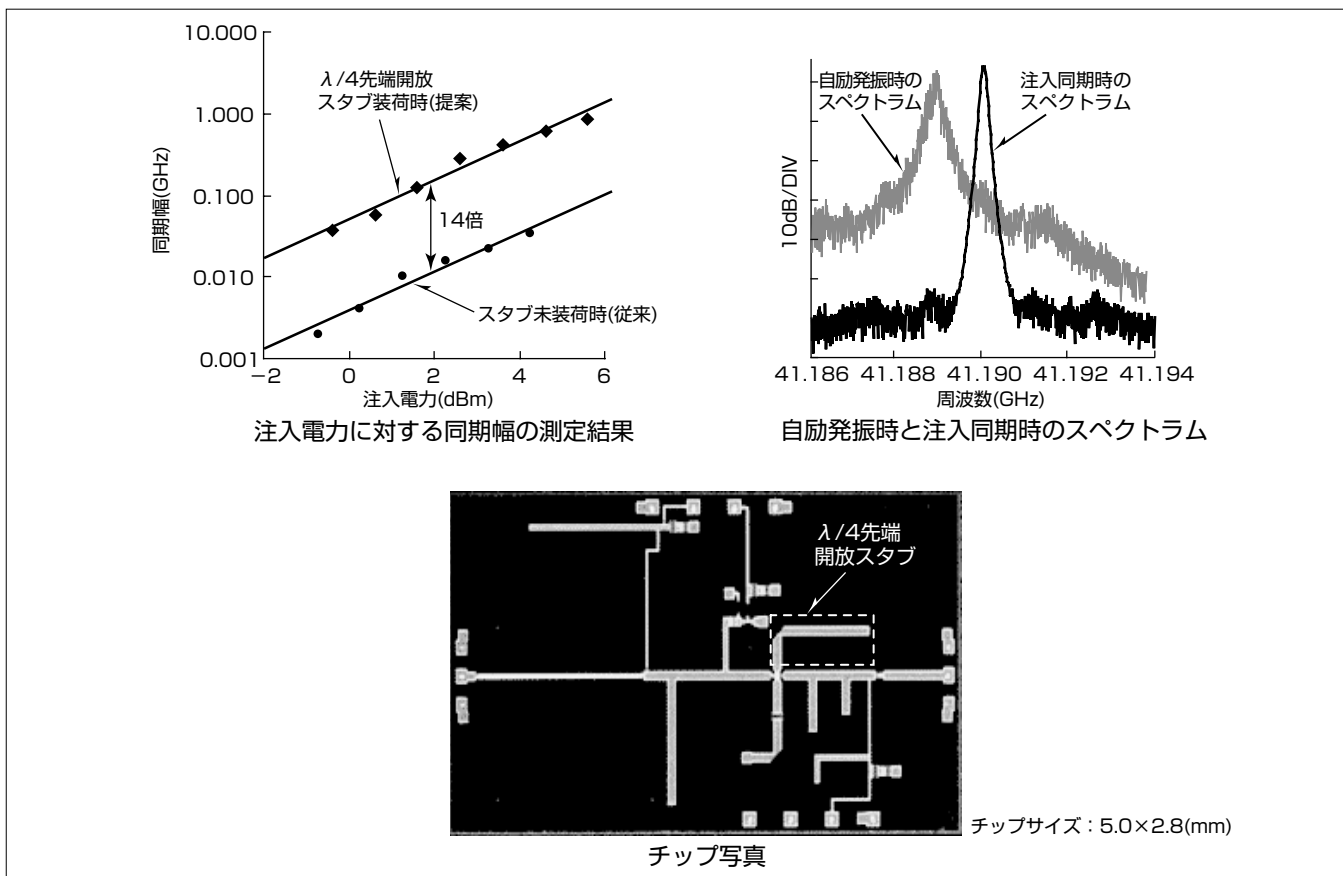
通信の大容量化やレーダの距離分解能向上などのためにミリ波デバイスの開発が進んでいる。その一つであるミリ波帯電圧制御発振器 (Voltage Controlled Oscillator : VCO) には、通信の誤り率低減やレーダのクラッタによる影響低減のために低位相雑音化が求められている。

三菱電機では、ミリ波帯VCOの低位相雑音化に向けて、サブハーモニック注入同期法を用いた開発を進めている。サブハーモニック注入同期法は、所望周波数の整数分の1の周波数を注入波の波源として使用することで、注入波の低位相雑音化が容易となり、注入同期によって、注入される側のVCO (注入同期VCO) の位相雑音が注入波の位相雑音と一致するため、高周波における低位相雑音化が実現できるという特長がある。

その一方で同期可能な周波数範囲 (同期幅) が狭い問題があったため、注入同期VCOを構成する能動素子のソース端子に注入周波数で1/4波長 (λ/4) の電気長をもつ先端開放スタブを備えた構成を提案し、同期幅の拡大を図った。

GaAs-pHEMT^(注1)プロセスを用いてV帯でのλ/4先端開放スタブ装荷形サブハーモニック注入同期VCO MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) の試作を行い、位相雑音と同期幅を評価した結果、発振周波数41.2GHz、1MHz離調における位相雑音-106dBc/Hz以下、同期幅800MHzと良好な特性が得られ、λ/4先端開放スタブの装荷によって同期幅が14倍に拡大することを確認した。

(注1) Gallium Arsenide-pseudomorphic High Electron Mobility Transistor



λ/4先端開放スタブ装荷形サブハーモニック注入同期VCO MMICの試作

試作したサブハーモニック注入同期VCO MMICのチップ写真、注入電力に対する同期幅の測定結果、自励発振時と注入同期時のスペクトラムを示す。サブハーモニック注入同期には同期幅が狭い問題があったが、ソース端子へのλ/4先端開放スタブの装荷によって、同期幅を従来と比べて14倍に拡大することができた。また、サブハーモニック注入同期法によって41.2GHzで1MHz離調における位相雑音は-106dBc/Hz以下と良好な特性が得られた。

1. ま え が き

通信の大容量化やレーダの距離分解能向上のためにミリ波デバイスの開発が進んでおり、その一つであるミリ波帯電圧制御発振器には、通信の誤り率低減やレーダのクラッタによる影響低減のために低位相雑音化が求められている。

これを解決する手段の一つとしてサブハーモニック注入同期を用いる方法がある。注入同期発振器は、自励発振周波数が注入波の周波数に同期するとともに、注入波の位相雑音、電力に応じて、注入同期発振器の位相雑音を改善できる特長がある⁽¹⁾。注入波に発振周波数の整数分の1の周波数を用いたサブハーモニック注入同期発振器⁽²⁾は、発振周波数がミリ波帯の場合でも、注入波の周波数が発振周波数の整数分の1でよい場合、低位相雑音の良好な安定した波源を用いることができる。また、発振器の自励発振周波数と注入波の周波数が異なるため、注入端子で注入波の周波数に対して整合を容易にとることが可能である。しかしながら、サブハーモニック注入同期発振器では、自励発振の周波数と注入波の高調波周波数との間で同期をとるため、注入周波数から高調波周波数への変換効率が低い場合、同期可能な周波数範囲(同期幅)が狭くなる問題点がある。

当社はこれまでに、能動素子であるFET(Field Effect Transistor)内部で生成される注入波の高調波の電力に同期幅が大きく依存することに着目し、FETのソース端子に先端開放スタブを装荷したλ/4先端開放スタブ装荷形サブハーモニック注入同期発振器を提案した⁽³⁾。

本稿では、V帯でλ/4先端開放スタブ装荷形サブハーモニック注入同期VCO MMICを試作し、ミリ波帯でこの注入同期の有効性を確認するとともに、1/2分数波を注入した場合の同期幅を評価したので述べる。

2. 1/2分数波を注入した場合の注入同期方程式

図1に発振器の等価回路モデルを示す。Uは注入波源を表し、G'は注入波源Uのコンダクタンスを表す。Gは負荷のコンダクタンス、Lは等価的なインダクタンスを表す。B(v)は非線形サセプタンス、G(v)は非線形コンダクタンスであり、非線形は式(1)、式(2)に示すようなべき級数展開表示を用いる⁽⁴⁾。

$$G(v) = -G_1 - G_2v + G_3v^2 \dots\dots\dots(1)$$

$$B(v) = C_0 + C_1v + C_2v^2 \dots\dots\dots(2)$$

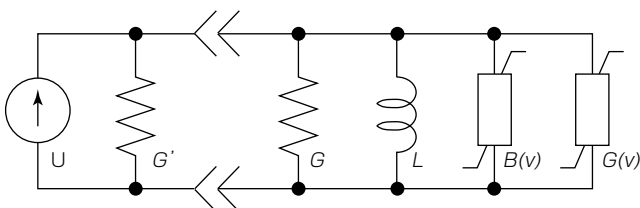


図1. 発振器の等価回路モデル

ここで、もし出力電力P_oがほとんど一定であるならば、注入波が発振周波数の1/2の場合、同期幅Δfは式(3)、式(4)、式(5)で表される⁽⁴⁾。

$$\Delta f = \frac{16f_0}{9Q_e^2} K_{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{2}{P_0 G}} P_i \dots\dots\dots(3)$$

$$K_{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{4LG_2^2}{C_0} + \frac{25}{4} \left(\frac{2C_1}{C_0}\right)^2} \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{1}{Q_e} = G \sqrt{\frac{L}{C_0}} \dots\dots\dots(5)$$

ただし、f₀は自励発振周波数、P_iは注入電力である。式(3)から注入波が発振周波数の1/2の場合、同期幅Δfは注入電力P_iに比例する。

3. λ/4先端開放スタブ装荷による効果

図2にλ/4先端開放スタブを装荷した注入同期VCOの能動回路部の等価回路を示す。従来、FETを能動素子として用いた発振器では、反射利得を得るために、ソース端子に先端短絡スタブ挿入する方法がある。しかし、サブハーモニック注入同期発振器として用いた場合には、注入波の電圧V_{in}はFETのC_{gs}とソース端子に接続された先端短絡スタブとで分圧される。そのためC_{gs}に印加される電圧V_{gs}は式(6)に示すように、V_{in}より小さくなる⁽³⁾。

$$V_{gs} = \frac{1}{1 + j \cdot gm \cdot Z_0 \tan \theta} V_{in} \dots\dots\dots(6)$$

ただし、gmは相互コンダクタンス、Z₀は特性インピーダンス、θはL₀における電気長である。

そこで、FETのソース端が1/2分数波(f₀/2)で短絡点となるように、ソース端子に注入周波数でλ/4の電気長をもつλ/4先端開放スタブを装荷する。これによってV_{gs}がV_{in}に等しくなるため、注入電力もλ/4先端開放スタブ未装荷時と比べて増加し、同期幅が拡大する⁽³⁾。また、このλ/4先端開放スタブは発振周波数f₀では、ソース端でほぼ開放となるため発振条件には影響しない。

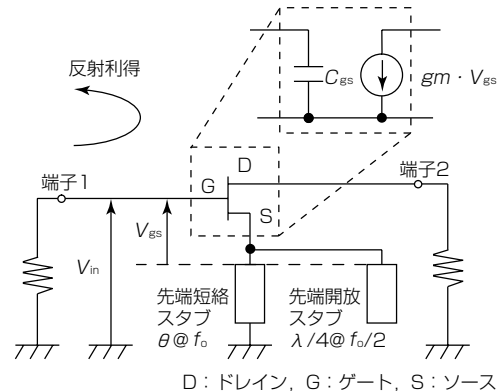


図2. λ/4先端開放スタブを装荷した注入同期VCOの能動回路部の等価回路

4. $\lambda/4$ 先端開放スタブ装荷形V帯サブハーモニック注入同期VCOの設計

図3に $\lambda/4$ 先端開放スタブ装荷形V帯サブハーモニック注入同期VCOの構成を示す。このVCOは能動素子を含む能動回路、発振周波数を制御する同調回路、及び注入波を入力する注入回路で構成している。能動素子としてゲート長 $0.19\mu\text{m}$ 、ゲート幅 $40\mu\text{m}$ のGaAs-pHEMTを使用した。注入波を発振周波数の $1/2$ とし、同調回路はショットキダイオードと伝送線路による並列共振回路で構成している。HEMTのドレイン端子側には反射利得を得るために反射回路を、ソース端子にも反射利得を得るために先端短絡スタブを装荷し、また、注入周波数で $\lambda/4$ の電気長をもつ $\lambda/4$ 先端開放スタブを装荷している。

$\lambda/4$ 先端開放スタブ未装荷の場合、HEMTの C_{gs} に印加される電圧 V_{gs} と先端短絡スタブの分圧比はおおよそ $1:3$ となり、その影響で、注入波の電圧が約 $1/4$ に低下すると考えられる。 $\lambda/4$ 先端開放スタブを装荷することによって V_{gs} は注入波の電圧に等しくなり、 $\lambda/4$ 先端開放スタブ未装荷時と比べて V_{gs} は4倍、電力としては16倍となるため、同期幅は16倍に拡大することが期待される。

5. 試作結果

$\lambda/4$ 先端開放スタブ装荷形V帯サブハーモニック注入同期VCO MMICを試作し、評価を行った。図4に試作した注入同期VCO MMICのチップ写真を示す。チップサイズは $5.0 \times 2.8(\text{mm})$ であり、MMIC基板の厚さは $100\mu\text{m}$ である。測定はオンウェハで行った。バイアス条件はドレイン電圧 $V_d = +3.5\text{V}$ 、ゲート電圧 $V_g = 0\text{V}$ 、ドレイン電流 $I_d = 16.6\text{mA}$ である。図5に自励発振時と注入同期時のスペクトラムを示す。このときの注入波の周波数は 20.6GHz 、入力電力は $+2\text{dBm}$ 、 1MHz 離調での位相雑音は -113dBc/Hz である。注入によって自励発振周波数が注入周波数に引き込まれ、

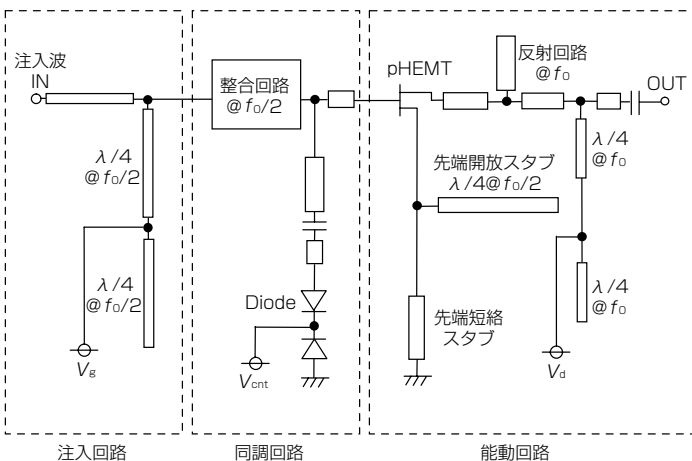


図3. $\lambda/4$ 先端開放スタブ装荷形V帯サブハーモニック注入同期VCOの構成

注入波の2倍の周波数で同期がかかっていることが分かる。図6に注入電力に対する位相雑音の測定結果を示す。自励発振時の 1MHz 離調での位相雑音が -81dBc/Hz であるのに対して、注入電力 $0 \sim 6\text{dBm}$ における 1MHz 離調での位相雑音は -106dBc/Hz 以下であり、注入波とほぼ同じ位相雑音が得られた。また、 100kHz 離調でも注入波と同等の位相雑音 -96dBc/Hz 以下が得られた。

図7に注入電力に対する出力電力の測定結果を示す。注入電力 $0 \sim 6\text{dBm}$ で出力電力は注入電力に依存せず、自励発振時の出力電力と同じ約 7.5dBm で一定であった。

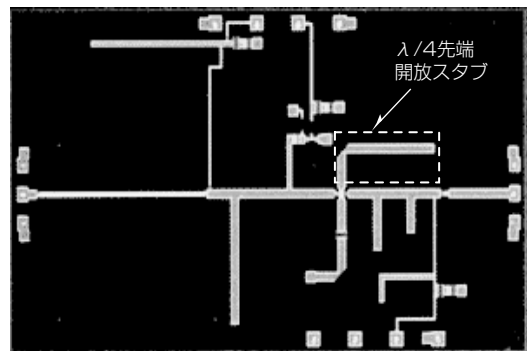


図4. 試作した注入同期VCO MMICのチップ

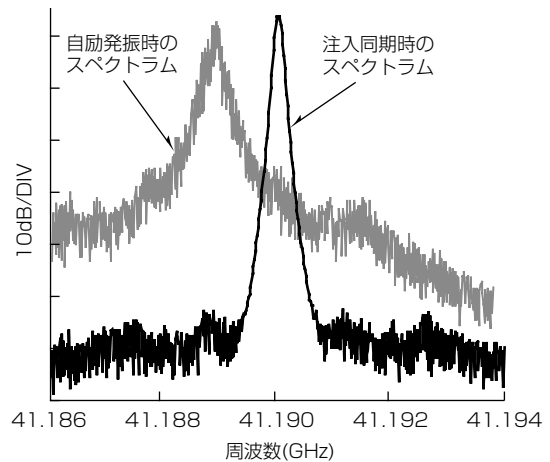


図5. 自励発振時と注入同期時のスペクトラム

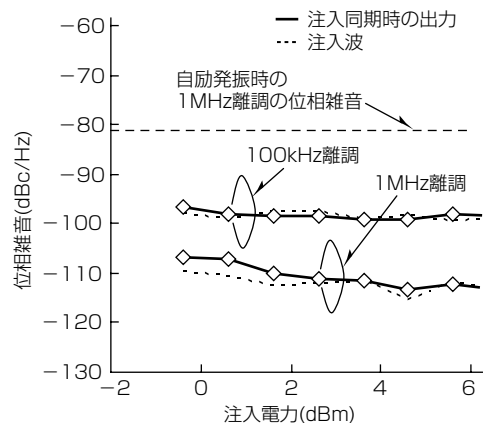


図6. 注入電力に対する位相雑音の測定結果

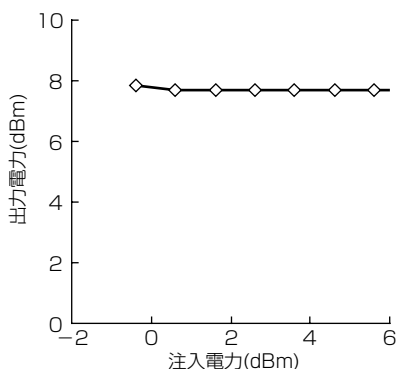


図7. 注入電力に対する出力電力の測定結果

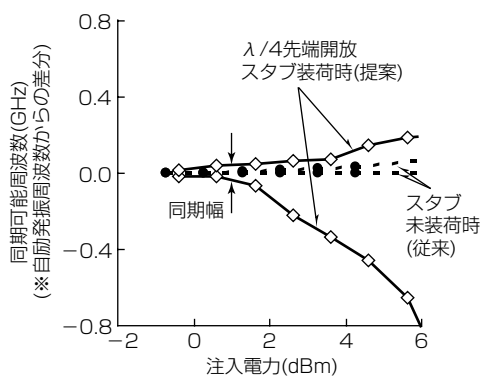


図8. 注入電力に対して同期可能な注入波の最大周波数及び最小周波数の測定結果

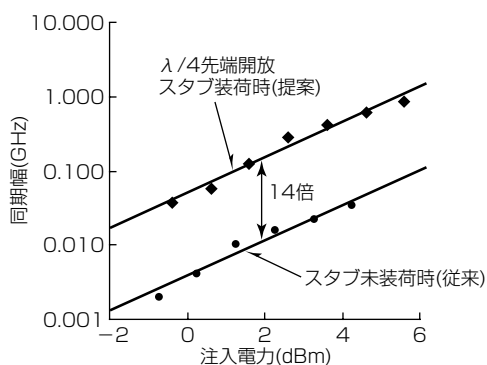


図9. 注入電力に対する同期幅の測定結果

図8に注入電力に対して同期可能な注入波の最大周波数及び最小周波数の測定結果を示す。図8における周波数は自励発振周波数からの差分である。この最大周波数と最小周波数の差が同期幅となる。図9に注入電力に対する同期幅の測定結果を示す。図8と図9には $\lambda/4$ 先端開放スタブを装荷した場合の結果と $\lambda/4$ 先端開放スタブを未装荷の場合の結果をそれぞれ示している。図7に示すように出力電力は一定で、同期幅は図8に示すように注入電力に比例して広がっており、 $\lambda/4$ 先端開放スタブを装荷した場合、注入電力6 dBmのときに約800MHzであった。また、注入電力0～6 dBmでスタブ未装荷の場合と比較して、14倍の同期幅が得られた。

6. むすび

$\lambda/4$ 先端開放スタブ装荷形V帯サブハーモニック注入同期VCOの試作・評価を行った。発振周波数41.2GHz、1 MHz離調における位相雑音 -106dBc/Hz 以下、同期幅800MHzと良好な特性が得られ、 $\lambda/4$ 先端開放スタブの装荷によって同期幅が14倍に拡大することを確認した。

参考文献

- (1) Kurokawa, K.: Injection locking of microwave solid-state oscillators, Proc. IEEE, **61**, (10), 1386～1410 (1973)
- (2) Zhang, X., et al.: A Study of Subharmonic Injection Locking for Local Oscillators, IEEE MICROWAVE AND GUIDED WAVE LETTERS, **2**, (3), 97～99 (1992)
- (3) 西田和広, ほか: 先端開放スタブ装荷サブハーモニック注入同期発振器, 電子情報通信学会技術研究報告, MW2006-52, 91～95 (2006)
- (4) 大黒一弘, ほか: 非線形発振器の注入同期特性, 電気通信研究所研究実用化報告, **21**, No.11, 2113～2125 (1972)