

# 自己注入同期法によるマイクロ波電圧制御発振器の低位相雑音化技術

津留正臣\*

Phase Noise Reduction of Voltage Controlled Oscillator with Self-injection Locking

Masaomi Tsuru

## 要旨

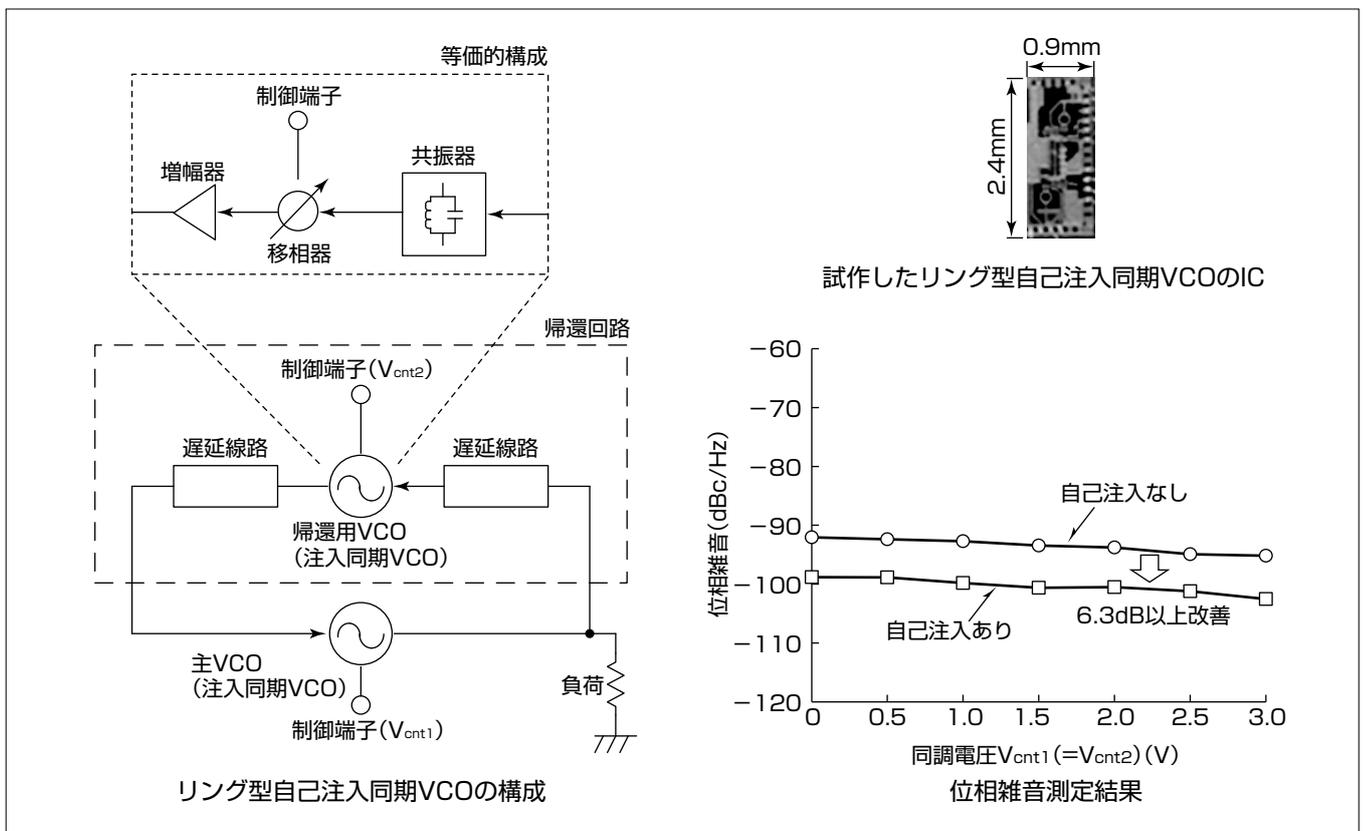
外部から印加する制御電圧によって発振周波数を制御するマイクロ波電圧制御発振器(Voltage Controlled Oscillator: VCO)は、通信装置及びレーダ装置などの局部発振源として用いられており、各装置の通信品質や探知性能の向上のため、低位相雑音化が求められている。

VCOでの低位相雑音化手法として、共振器の高Q化がある。ただし、発振周波数可変範囲が狭帯域となることや、共振器による損失が大きくなって発振条件を満足できなくなる問題がある。

ほかの低位相雑音化手法として自己注入同期法がある。これは発振器の外部に帰還回路を備え、自らの出力を移相させて発振器に注入することで位相雑音を低減する手法で

ある。ただし、これをVCOに適用すると移相量が固定の帰還回路では発振周波数可変範囲が狭帯域となる。また帰還回路での損失によって低位相雑音化の効果が小さくなる。

そこで、発振周波数可変範囲を維持したまま位相雑音を低減するために、帰還回路内に元々の発振器(主VCO)とは別の帰還用VCOを設けて帰還移相量を可変としたリング型自己注入同期VCOを提案する。0.18 $\mu$ m SiGe(シリコンゲルマニウム)-BiCMOS (SiGe Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor)プロセスを用いてC帯で試作した結果、VCOの発振周波数全範囲にわたり位相雑音は約6 dB低減し、この構成の有効性を確認した。



## 自己注入同期法による低位相雑音VCO

リング型の自己注入同期VCOの構成を提案して低位相雑音化を図っている。帰還回路に注入同期VCOを用いることで、発振周波数に応じた帰還回路での移相量の制御を可能にし、発振周波数可変範囲を維持したまま位相雑音を約6 dB低減する結果を得た。低位相雑音化によって通信装置及びレーダ装置の性能向上への寄与が期待できる。

### 1. ま え が き

マイクロ波発振器は、通信装置及びレーダ装置などの局部発振源として用いられており、低位相雑音化が求められている。マイクロ波発振器の低位相雑音化によって、通信装置では信号伝送誤りが低減されて通信品質の向上が、レーダ装置ではクラッタの影響が低減されて探知性能の向上が、それぞれ期待される。

低位相雑音マイクロ波発振器として、イットリウム鉄ガーネット(YIG)共振器を用いた発振器<sup>(1)</sup>、誘電体共振器(Dielectric Resonator : DR)を用いた発振器(Dielectric Resonator Oscillator : DRO)<sup>(2)</sup>、平面形共振器を用いた発振器<sup>(3)</sup>などがある。小型化が可能で低消費電力であることなどから、平面形共振器を用いた電圧制御発振器(VCO)が広範なシステムに用いられている。VCOは発振周波数を電圧で制御可能である。ただし共振器のQ値はYIG共振器やDRほど高くはなく、低位相雑音化が課題である。

平面形共振器を用いたVCOでの低位相雑音化手法として共振器の高Q化がある。これまで高Q化された共振器として90°インバータ装荷共振器<sup>(4)</sup>、 $\lambda/4 \pm \delta$ 共振器<sup>(5)</sup>、異周波共振器<sup>(6)</sup>、マルチ結合共振器<sup>(7)</sup>、コムラインを用いたバンドパスフィルタ<sup>(8)</sup>などが報告されている。これらの共振器を備えたVCOでは、共振器とトランジスタとを疎結合にすることで高い負荷Qを得て位相雑音低減を図っている。ただし、発振周波数可変範囲が狭帯域となることや、共振器による損失が大きくなって発振条件を満足できなくなる問題がある。

ほかの低位相雑音化手法として、自己注入同期法が提案されている<sup>(9)(10)(11)(12)(13)</sup>。これは、発振器の外部に帰還回路(同軸ケーブルや伝送線路など)を備え、自らの出力を移相させて発振器に注入することで位相雑音を低減する手法である。そのため発振器内部に備わる共振器の高Q化とは独立に設計可能であり、共振器高Q化手法で低位相雑音化を図った後に、自己注入同期法によって、さらに位相雑音の改善を図ることが可能である。ただし注入波は発振周波数で同相であることが求められる。したがって発振器がVCOである場合、移相量が固定の帰還回路では発振周波数可変範囲が狭帯域となる。また帰還回路での損失によって低位相雑音化の効果が小さくなる。

そこで、発振周波数可変範囲を維持したまま位相雑音を低減するために、帰還回路内に元々の発振器(主VCO)とは別の帰還用VCOを設けて帰還移相量を可変にしたリング型自己注入同期VCOを提案する。試作は0.18 $\mu\text{m}$  SiGe-BiCMOSプロセスを用いて行った。

本稿では、2章で提案するリング型自己注入同期VCOの回路構成、3章で注入同期VCO単体の移相特性のシ

ミュレーション結果、4章で提案するリング型自己注入同期VCOの測定結果について述べる。

### 2. リング型自己注入同期VCOの回路構成

図1に提案するリング型自己注入同期VCOの構成を示す。リング型自己注入同期VCOは主VCOと帰還用VCOでリング型を構成しており、共に同一構成の注入同期VCOである。帰還回路内の遅延線路は発振周波数可変範囲の中心周波数で同相帰還となるように設計する。

図1の等価的構成に示すように、注入同期VCOは移相器としての機能を持っており、発振周波数に応じて制御端子への印加電圧を変化させて帰還回路での移相量を制御できる。したがって発振周波数可変範囲を維持できる。また主VCOとは別に共振器を持つため回路全体のQ値が高くなり低位相雑音化が図れる。さらに低注入電力に対しても一定の電力を出力することから増幅器としても働き、帰還回路での損失を補償することが可能である。

### 3. 注入同期VCO単体のシミュレーション結果

図2に注入同期VCO(注入差動対と出力バッファ増幅器を含む)の回路構成を示す。注入同期VCOはバラクタダイオードとスパイラルインダクタとで形成される共振器を備えたクロスカップル型VCOである。0.18 $\mu\text{m}$  SiGe-BiCMOSプロセスを用いて設計した。電源電圧 $V_{cc}$ は1.8V、電源電流は約35.8mA、VCOコアだけで約12.4mAである。

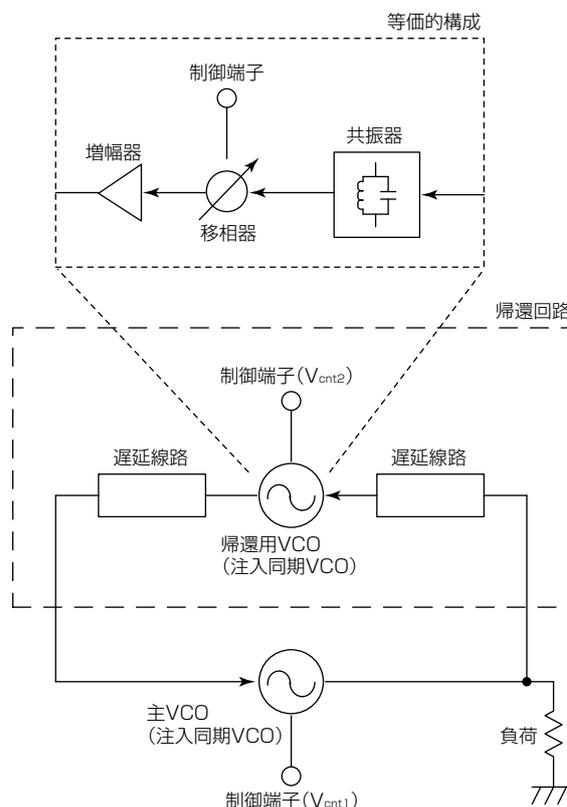


図1. リング型自己注入同期VCOの構成

図3に設計した注入同期VCO出力波のシミュレーション結果を示す。このときの注入波は、周波数9.5GHz、電力0dBmである。図3(b)は図3(a)に示す出力電圧波形をフーリエ変換して得たスペクトラムである。図3から、同調電圧 $V_{cnt}$ を変化させた場合でも周波数は変わらず出力電圧波形は移相していることが分かる。 $V_{cnt}$ を0.9Vから2.7Vへ変化させたことによる移相量は約118°であった。

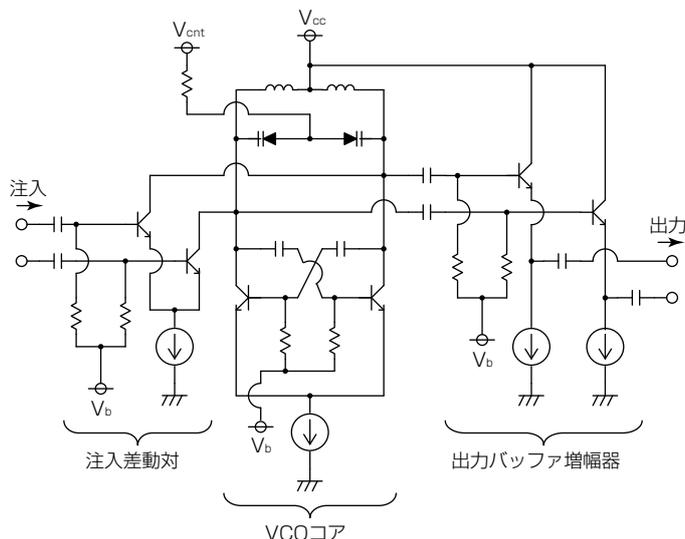
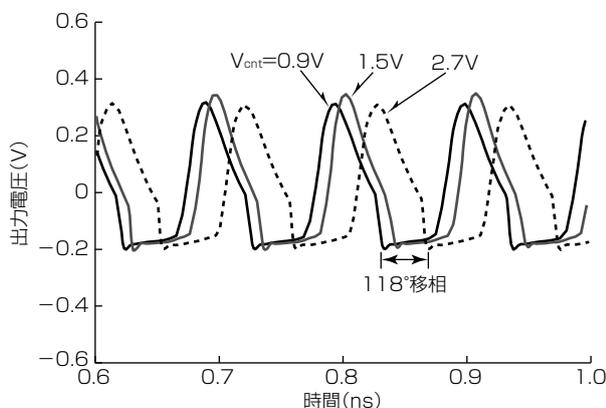
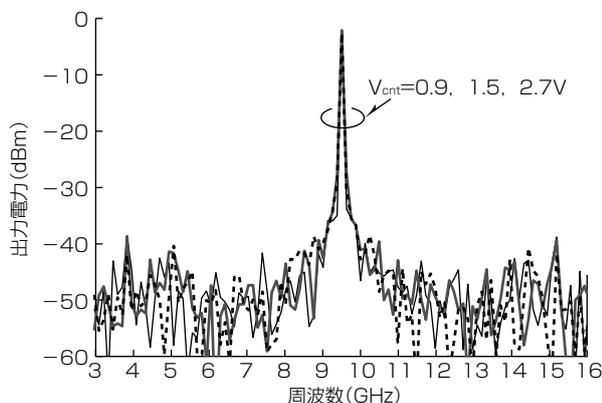


図2. 注入同期VCOの回路構成



(a) 出力電圧波形



(b) スペクトラム

図3. 注入同期VCO出力波のシミュレーション結果

#### 4. 測定結果

図4に試作したリング型自己注入同期VCOの写真を示す。チップ占有面積は $0.9 \times 2.4$ (mm<sup>2</sup>)である。試作したリング型自己注入同期VCOのICをプリント基板に実装して測定を行った。帰還回路側の電源をON/OFFすることで自己注入同期の有無を切り替えることが可能である。

図5に帰還用VCOの同調電圧( $V_{cnt2}$ )を変化させた場合の位相雑音の測定結果を示す。主VCOの同調電圧 $V_{cnt1}$ を0Vで固定し、帰還用VCOの同調電圧 $V_{cnt2}$ を0~3Vと変化させた。このとき $V_{cnt2} = 0 \sim 1.5$ Vでは自己注入同期による低位相雑音化の効果(最大7.4dBの改善)が得られているが、 $V_{cnt2} = 1.8 \sim 3.0$ Vでは自己注入同期なしの場合よりも劣化又は同等であり同期が外れている。このことから帰還用VCOの同調電圧によって位相雑音低減効果のある位相に制御可能であることが分かる。

図6に両同調電圧を同時に変化させたときの発振周波数と位相雑音の測定結果を示す。自己注入同期なしの場合、同調電圧 $V_{cnt1} (= V_{cnt2}) = 0 \sim 3$ Vで、発振周波数可変範囲6.96~7.93GHz(比帯域13.0%)、位相雑音 $-92.0$ dBc/Hz以下@1MHz離調であった。一方、自己注入同期ありの場合、同調電圧 $V_{cnt1} = V_{cnt2} = 0 \sim 3$ Vで、発振周波数可変範囲7.21~8.28GHz(比帯域13.8%)、位相雑音 $-98.8$ dBc/Hz以下@1MHz離調が得られ、比帯域は自己注入同期な

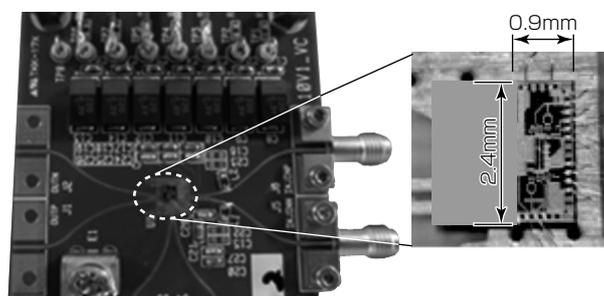


図4. 試作したリング型自己注入同期VCO

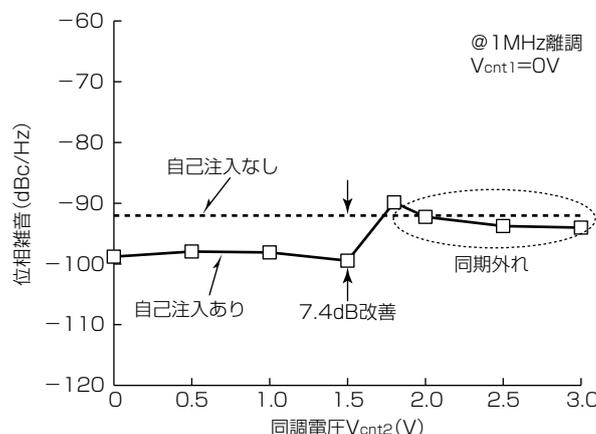


図5. 帰還用VCOの同調電圧( $V_{cnt2}$ )を変化させた場合の位相雑音測定結果

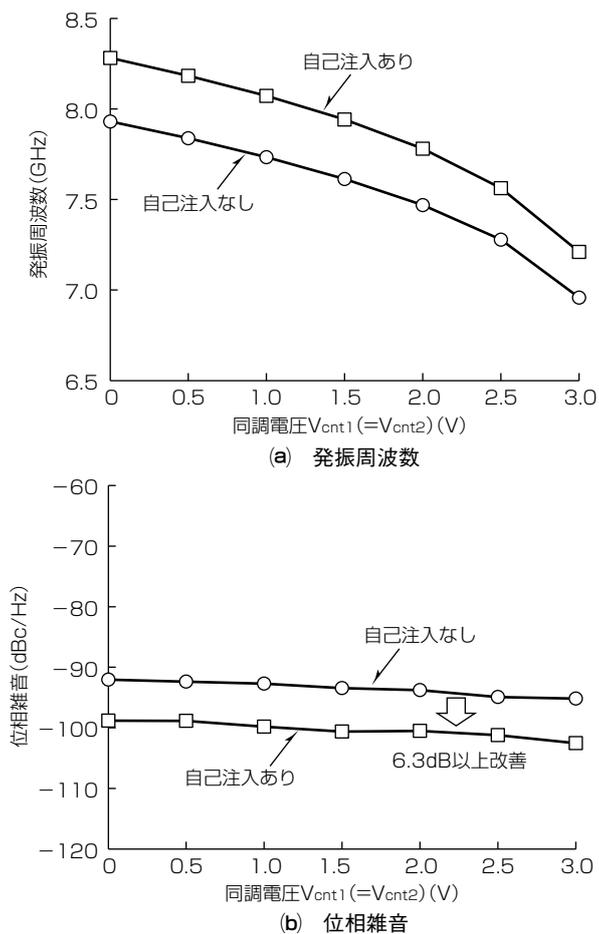


図6. 両同調電圧を同時に変化させたときの測定結果

しと同等で、位相雑音の最悪値は6.8dBの改善、各同調電圧での位相雑音の比較では6.3dB以上の改善を得た。

5. む す び

帰還回路に注入同期VCOを用いたリング型自己注入同期VCOを提案した。0.18um SiGe BiCMOSプロセスを用いて試作し、注入同期VCOの移相器としての効果を確認した。試作したリング型自己注入同期VCOの発振周波数可変範囲は自己注入同期がない場合と同等の比帯域13.8%であり、位相雑音は約6 dB低減した。

参 考 文 献

(1) Soares, R. : GaAs MESFET Circuit Design, Artech House, 382~399 (1988)  
 (2) Abe, H., et al. : A Highly Stabilized Low-Noise GaAs FET Integrated Oscillator with a Dielectric Resonator in the C Band, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **26**, No.3, 156~162 (1978)  
 (3) Kuhnert, H., et al. : Low Phase-Noise GaInP/

GaAs-HBT MMIC Oscillators up to 36GHz, IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Dig., **3**, 1551~1554 (2001)

(4) Ikematsu, H., et al. : A V-band MMIC VCO with a Sub-Resonator Coupled by a 90-Degree Inverter, Asia-Pacific Microwave Conf., 143~146 (1998)  
 (5) Hosoya, K., et al. : A Low Phase-Noise 38-GHz HBT MMIC Oscillator Utilizing a Novel Transmission Line Resonator, IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Dig., **1**, 47~50 (2000)  
 (6) Hamano, S., et al. : A Low Phase Noise 19 GHz-band VCO using Two Different Frequency Resonators, IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Dig., **3**, 2189~2192 (2003)  
 (7) Rohde, U. L., et al. : Novel Multi-Coupled Line Resonators Replace Traditional Ceramic Resonators in Oscillators/VCOs, IEEE Int. Frequency Control Symposium and Expo., 432~442 (2006)  
 (8) Tseng, C.-H., et al. : Design of Low Phase-Noise Microwave Oscillator and Wideband VCO Based on Microstrip Compline Bandpass Filters, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **60**, No.10, 3151~3160 (2012)  
 (9) Chang, H.-C. : Stability analysis of self-injection-locked oscillators, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., **51**, No.9, 1989~1993 (2003)  
 (10) Chang, H.-C. : Phase noise in self-injection-locked oscillators-theory and experiment, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., **51**, No.9, 1994~1999 (2003)  
 (11) Wang, T.-P., et al. : Phase-Noise Reduction of X-Band Push-Push Oscillator With Second-Harmonic Self-Injection Techniques, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., **55**, No.1, 66~77 (2007)  
 (12) Tanaka, T., et al. : Investigation on oscillation mode-jump phenomenon in reflection type of self-injection locked NRD guide Gunn oscillator at 60GHz, 43th European Microwave Conf., 834~837 (2013)  
 (13) Kawasaki, K., et al. : A Self-Injection Locked VCO with Adaptive Control of Injection Phase, 44th European Microwave Conf., EuMC53-02 (2014)