

# 相互注入同期発振器のFM 雑音低減の実験的研究

|       |   |
|-------|---|
| メタデータ | 言語: Japanese<br>出版者:<br>公開日: 2017-10-03<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 大田, 正喜, 柏野, 博英, 林, 健一, 橋本, 松進, 井田, 良雄, Ota, Masaki, Kashiwano, Hirohide, Hayashi, Kenichi, Hashimoto, Shoshin, Ida, Yoshio<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="https://doi.org/10.24517/00011753">https://doi.org/10.24517/00011753</a>   |

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



## 相互注入同期発振器のFM雑音低減の実験的研究

大田正喜\*\* 柏野博英\*\* 林 健一\*  
橋本松進\* 井田良雄\*

### An Experimental Study of the FM Noise Reduction of Bilaterally Injection-Locked Oscillators

by

Masaki Ota, Hirohide Kashiwano, Kenichi Hayashi,  
Shoshin Hashimoto and Yoshio Ida

#### Abstract

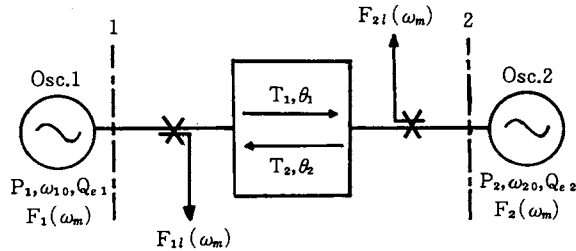
In our previous paper the FM noise reduction of bilaterally injection-locked oscillators is analyzed by using a simple model in which noise conversions between AM and FM noises are omitted. In this paper an experimental study of the FM noise reduction is presented. The experiment shows that the FM noise reduction factor is determined, depending on both the figure of merit of unilateral injection and the electric length of the circuit between a reference source and a main oscillator, as predicted from the analysis. However, some features apparently different from the analysis are also found in the experiment and are presumed to be attributed to the noise conversions between AM and FM noises.

#### 1. ま え が き

発振器の注入同期現象に関する従来の理論では、主発振器と注入源発振器との間に完全なアイソレーションが仮定されている。筆者らは先に、実際の回路が有限のアイソレーションをもつサーキュレータにより構成されることを考慮し、相互注入同期回路の解析<sup>1)2)</sup>を行った。これらの解析では、注入の単方向性を表わすフィギュア オブ メリット (M) を導入することにより、同期幅およびFM雑音低減率マトリクス ([S]) がフィギュア オブ メリット (M) および結合回路の往復の電気角 ( $\theta$ ) に依存して決定されることを示した。同期幅のMおよび $\theta$ に関する依存性の実験的な検証についてはすでに報告<sup>1)</sup>したので、本論文ではFM雑音低減率 (S) のMおよび $\theta$ に関する依存性の実測結果につき報告する。

\*電子工学科 \*\*大学院学生

## 2. 実験方法



第1図 相互注入同期発振器

図1に、2つの発振器が非可逆素子を含む任意の回路により結合された相互注入同期発振器のモデル図を示す。2つの発振器の出力導波管をそれぞれ単独に整合負荷して動作させたとき、その自励発振角周波数をそれぞれ $\omega_{10}$ および $\omega_{20}$ 、整合負荷に消費される電力をそれぞれ $P_1$ および $P_2$ 、その外部Qをそれぞれ $Q_{e1}$ および $Q_{e2}$ とする。また結合回路の端子1から端子2、および端子2から端子1への電力伝送比をそれぞれ $T_1$ および $T_2$ 、その電気角をそれぞれ $\theta_1$ および $\theta_2$ とする。

2つの発振器を単独に自励発振させたとき、オフキャリア角周波数 $\omega_m$ におけるFM雑音電力スペクトル密度をそれぞれ $F_1(\omega_m)$ および $F_2(\omega_m)$ とし、それらが相互注入同期状態にあるとき、オフキャリア角周波数 $\omega_m$ におけるFM雑音電力スペクトル密度をそれぞれ $F_{11}(\omega_m)$ および $F_{21}(\omega_m)$ とする。2つの発振器の自励発振時において、それぞれのAM雑音がFM雑音に比して充分小さいとして省略し、かつAM-FM間の相互雑音変換も無視したモデルを用いた解析<sup>2)</sup>によれば、相互注入同期系の $F_{11}(\omega_m)$ および $F_{21}(\omega_m)$ はFM雑音低減率マトリクス[S]により、自励発振時の $F_i(\omega_m)$ および $F_2(\omega_m)$ と次式で関係づけられる。

$$\begin{bmatrix} F_{11}(\omega_m) \\ F_{21}(\omega_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1(\omega_m) \\ F_2(\omega_m) \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、

$$[S] = \frac{\begin{bmatrix} (\cos\Phi_{20})^2 + (1+M)^2 \cdot (\omega_m/B_0)^2 & (M\cos\Phi_{10})^2 \\ (\cos\Phi_{20})^2 & (M\cos\Phi_{10})^2 + (1+M)^2 \cdot (\omega_m/B_0)^2 \end{bmatrix}}{(M\cos\Phi_{10} + \cos\Phi_{20})^2 + (1+M)^2 \cdot (\omega_m/B_0)^2} \quad (2)$$

ここで、 $B_0$ は相互注入同期系の最大同期幅、 $M = [(\omega_{10}Q_{e2}P_2)/(\omega_{20}Q_{e1}P_1)] \cdot \sqrt{T_2/T_1}$ は注入の単方向性の程度を表わすフィギュア オブ メリットである。また $\Phi_{10}$ 、 $\Phi_{20}$ は、それぞれ発振器における入・出力間の位相差で、 $-\Phi_{10} - \Phi_{20} + \theta = 2n\pi$ なる関係がある。ここで、 $\theta = \theta_1 + \theta_2$ は結合回路の往復の電気角を表わす。

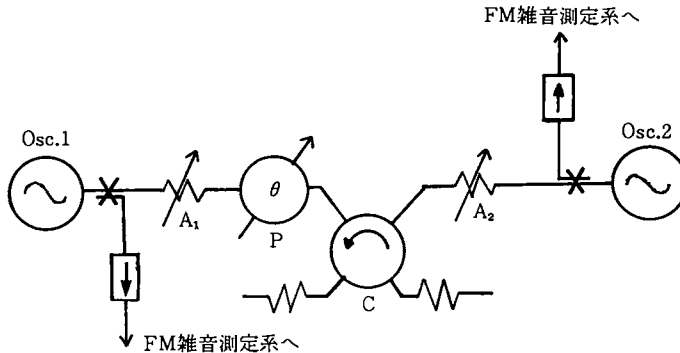
実験では、主発振器 (Osc.1) としてインパット発振器 (NEC, AD611) を用い注入源発振器 (Osc.2) として反射形クライストロン発振器 (NEC, 10V54) を用い両者を相互注入同期させる。いま主発振器のFM雑音に注目すれば、(1)式より

$$F_{11}(\omega_m) = S_{11}F_1(\omega_m) + S_{12}F_2(\omega_m) \quad (3)$$

一般に、キャリアの近傍 ( $\omega_m/B_0 < 1$ ) では  $S_{12} \approx S_{11}$  であるが、クライストロン発振器のFM雑音はインパット発振器のFM雑音に比してはるかに低いことがわかっているので、 $S_{11}$  と  $S_{12}$  の差を考慮しても上式の第2項は第1項に比して省略できる。すなわち、

$$F_{11}(\omega_m) \approx S_{11} F_1(\omega_m) \quad (4)$$

したがって、自励発振時および相互注入同期時における Osc.1 の FM雑音を実測すれば  $S_{11}$  を実験的に決定することができる。ただし、 $S_{11}$  は  $\theta$ 、 $B_0$ 、 $M$  および  $\Delta\omega = \omega_{10} - \omega_{20}$  をパラメータとして含んでいるので、雑音測定に先だてこれらの値を実験的に決定する必要がある。



第2図 測定回路

図2は実験に用いた回路で、測定はXバンドで実施した。図中のCはサーキュレータ(4ポート)で、その励磁電流を最適値からずらすことによりアイソレーションを変化させている。Mおよび $B_0$ は励磁電流、発振器出力および減衰器 $A_1$ 、 $A_2$ を調節することにより適当な値に設定され、結合回路の電気角 $\theta$ は移相器により変化される。また $A_1$ 、 $A_2$ は2つの発振器の出力導波管を整合状態に保ち、かつサーキュレータおよび移相器の不整合による反射波を吸収するため常に比較的大きな減衰量を与えるよう設定されなければならない。

次に回路パラメータの測定について説明する。まず、2つの発振器の自励発振角周波数を相等しく ( $\Delta\omega = 0$ ) しておき、これを相互注入同期状態にしたときその同期発振角周波数 ( $\omega$ ) が変化しない ( $\omega = \omega_{10} = \omega_{20}$ ) ように移相器を調節すれば  $\theta = 0^\circ$  の状態が実現される。<sup>1)</sup> また、移相器を用いて  $\theta$  を  $360^\circ$  以上にわたり変化させその同期幅の最大値を求めれば、これが  $B_0$  を与える。<sup>1)</sup> Mの測定は2つの発振器の外部Q、発振出力および結合回路のアイソレーションを個別に測定して求めることができる。ただし、Mが10 dB程度以下の場合には次の方法を用いると便利である。まず  $\omega_{10} = \omega_{20}$ 、 $\theta = 0^\circ$  に回路を調整する。次に注入源発振器の自励発振角周波数 ( $\omega_{20}$ ) を変化して、 $\Delta\omega (= \omega_{10} - \omega_{20})$  と  $\Delta\omega_{10} (= \omega_{10} - \omega)$  との関係を実測する。もし正しく  $\theta = 0^\circ$  の状態に調整されておれば、 $\Delta\omega$  と  $\Delta\omega_{10}$  の関係は原点を通る直線となる。その傾斜 k から次式によって M が決定される。<sup>1)</sup>

$$M = k / (1 - k) \quad (5)$$

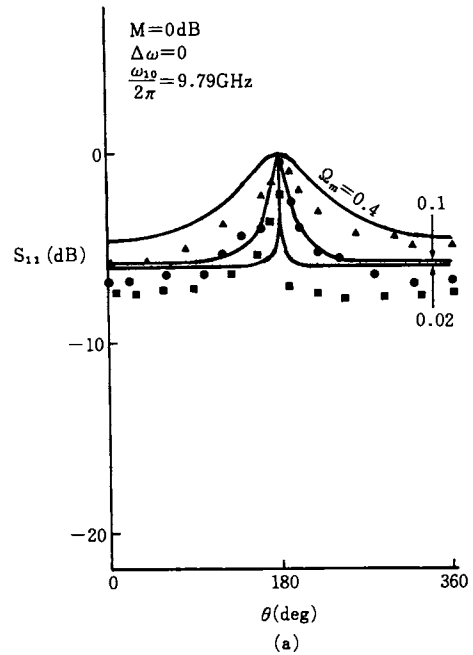
相互注入同期時における Osc.1 の出力は FM雑音測定系に導かれ、種々の M の値についてそれぞれ正規化オフキャリア角周波数  $\Omega_m (= \omega_m/B_0)$  をパラメータとしてその FM雑音電力が  $\theta$  の関数として測定される。

3. 実験結果と考察

種々のMの値について正規化オフキャリア角周波数 $\Omega_m$ をパラメータとし、 $\theta$ の関数として測定された $S_{11}$ の値を図3 ( $\Delta\omega=0$ の場合) および図4 ( $\Delta\omega\neq 0$ の場合) に示す。図中の実験はいずれも文献(2)による理論値を示す。図からわかるように、実測値と理論値とはかなりよく一致している。両者の一致が見られる点として次の諸項を指摘することができる。

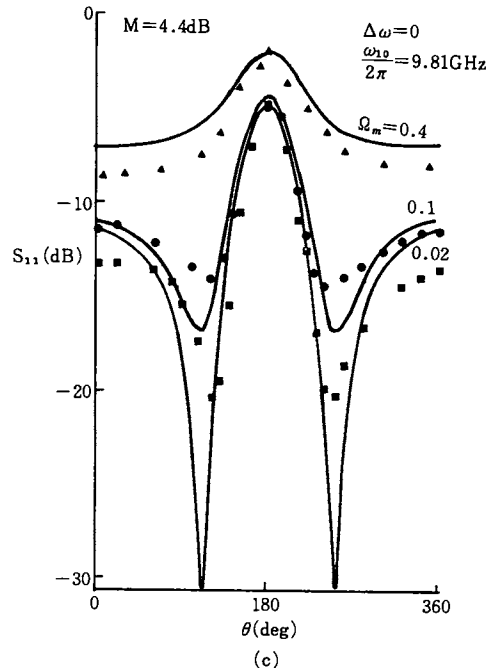
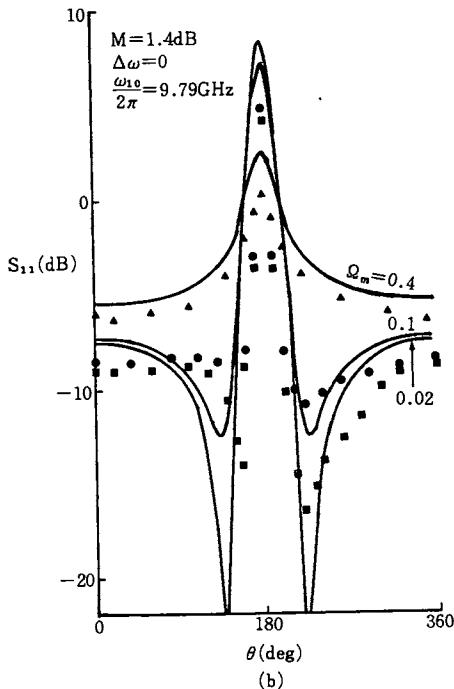
(i)  $\Delta\omega=0$ の場合には $S_{11}$ の測定値は $\theta=180^\circ$ に対してほぼ対称になっている。

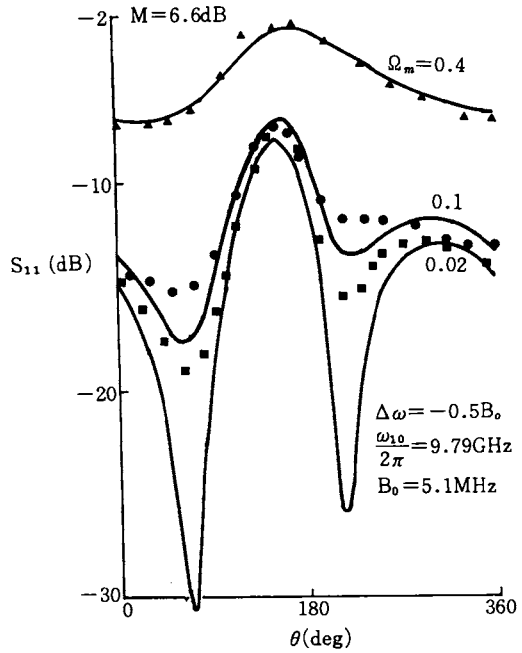
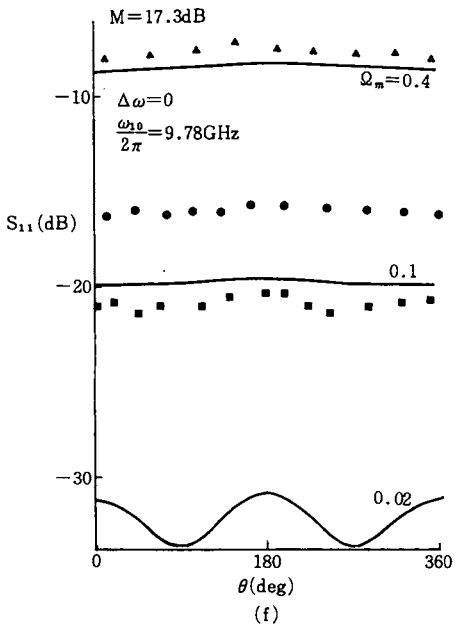
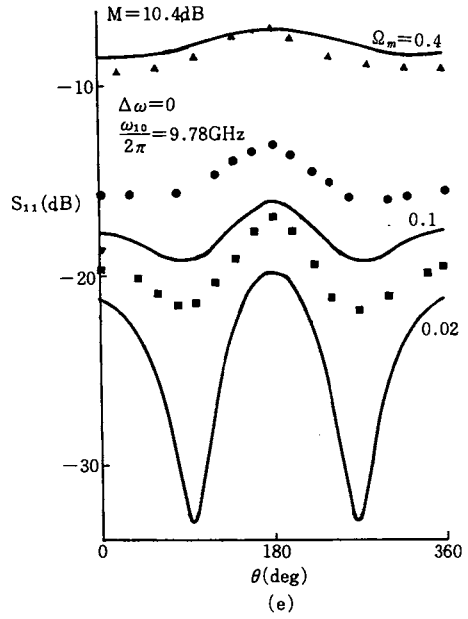
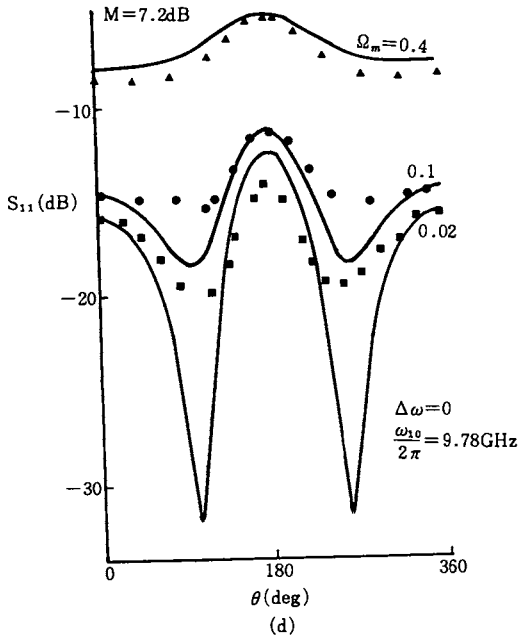
(ii)  $\Delta\omega=0$ ,  $M < 3$  dBでは $\theta=180^\circ$ の近傍で $S_{11}$ が0 dB以上となり注入同期によりFM雑音がかえって高められている。特に $S_{11}$ の値は $\Omega_m$ が小さい程大きくなっている点注目に価する。しかし、 $M=0$  dBでは $\theta=180^\circ$ で $S_{11}$ は再び低下し



第3図 結合回路の電気角に対するFM雑音低減率

$\Omega_m$ の値0.4, 0.1および0.02の測定値をそれぞれ $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ および $\blacksquare$ で示す。実線はそれらに対応する理論値を示す。(  $\Delta\omega=0$  の場合)





第4図 結合回路の電気角に対するFM雑音低減率。  
 $\Omega_m$  の値 0.4, 0.1 および 0.02 の測定値をそれぞれ  $\blacktriangle$ ,  $\bullet$  および  $\blacksquare$  で示す。  
 実線はそれらに対応する理論値を示す。  
 ( $\Delta\omega \neq 0$  の場合)

0 dBとなっている。

(iii)  $S_{11}$ 最小値を与える $\theta$ の実測値は理論値と大体一致している。

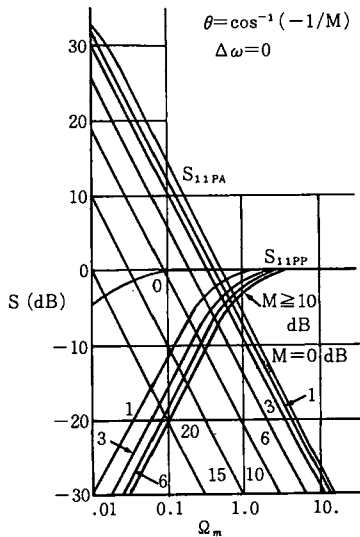
(iv)  $\Delta\omega \neq 0$ の場合には $S_{11}$ の $\theta=180^\circ$ に関する対称性がくずれ、 $S_{11}$ の最小値を与える $\theta$ の値は $180^\circ$ より大きい方へ移動する。

一方、実測値と理論値が必ずしも一致しない点として次の諸項を指摘することができる。

(i) 一般に $\Omega_m$ の小さいところで $S_{11}$ の実測値と理論値との差が大きくなる。

(ii) 特に $S_{11}$ の最小値を与える $\theta$ の値に若干の系統的な誤差(実測の方が一般に $\theta=180^\circ$ に近い点で生じる)がみとめられる。また、この点の $S_{11}$ の値は特にキャリア近傍で理論値よりも著しく大きくなる。

一般に、測定誤差の原因としては $\theta$ 、 $B_0$ 、 $M$ および $\Delta\omega$ など回路パラメータの測定誤差や結合回路内の多重反射の影響などが考えられ、また両発振器の出力・周波数の時間的変動も問題となる。しかしながら、これらの原因によって上記のような実験と理論の不一致を説明することはできない。この点については、ここに用いた理論ではAM雑音はFM雑音に比して充分小さいものとして省略していること、AM—FM雑音間の相互変換も考慮していないことなどが原因として考えられる。そこで筆者らの一部は、AM雑音およびAM—FM雑音間の相互変換も考慮した雑音変換率マトリックスの解析<sup>3)</sup>を行った。その結果によると、主発振器のAM雑音がFM雑音に変換される雑音変換率( $S_{11PA}$ )はキャリアの近傍程大きくなる。そして、図5に示すように例えば $\Omega_m \leq 0.2$ では $S_{11PP}^*$ に対して50 dB以上大きくなる。このような場合、主発振器のAM雑音がFM雑音に比して50 dB程度小さくてもその影響は無視できないことがわかる。



第5図 雑音変換率 $S_{11PP}$   $S_{11PA}$ と正規化オフキャリア $\Omega_m$ との関係(参考文献3)から引用

#### 4. む す び

相互注入同期発振器のFM雑音低減率 $S_{11}$ を実測し、筆者らが先に報告した簡単化されたモデルによる理論解析<sup>2)</sup>とよく一致する結果を得た。しかしながら、実測値と理論値との間には単なる測定誤差によるものとは考えられない系統的な差異も認められた。これは発振器内におけるAM—FM間の雑音変換によるものと推定される。更に詳細な理論解析の結果<sup>3)</sup>を実験的に検証するためには、自励発振時のFMおよびAM雑音を測定し、FM—FM間およびAM—FM間の雑音変換率を分離することが必要である。しかしながら、そのためにはこれらの変換率の分離にもっとも適した測定条件を設定すること、高レベルのFM雑音に埋れたAM雑音を正確に測定することなど若干の技術的困難を克服することが必要である。その実験は現在進行中であって、その結果は別の機会に報告する。最後に、実験装置の製作に当り御尽力を載いた工学部工作センターの近岡友男、和布浦和夫両氏に厚く御礼申し上げる。

\* $S_{11PP}$ は参考文献(3)で用いたもので本論文の $S_{11}$ に相当する。

参 考 文 献

- 1) 井田, 林, 他; 電子通信学会論文誌(B) Vol. 56—B, No. 11, 昭48—11, P. 486
- 2) 林, 井田, 他; 金大工学部紀要, Vol. 8, No. 1, 135 (1974)
- 3) 林, 井田; 電子通信学会論文誌(B) 昭49—7 採録決定

(昭和49年5月9日受理)