

アナログ回路の発振故障診断に関する検討

坂口 和宏 金子 峰雄

東京工業大学工学部電気電子工学科, 東京都

東京都目黒区大岡山 2-12-1

あらまし 線形回路において寄生素子による発振故障が発生する場合がある。本研究では、この発振故障診断の基礎段階として、寄生素子を1つに限定した場合について、その種類、位置、値を決定する問題について検討した。提案手法は、正常な回路の接続情報、素子値情報、及び発振周波数を回路から得られる情報とし、発振時の回路の節点アドミタンス行列の行列式が0となることを利用して診断を行おうとするものである。シミュレーションでは位置、値を正確に特定するまでにはいたらなかったが、かなりの段階まで絞り込むことに成功し、この手法の有用性を確認した。

A Study of Oscillation Fault Diagnosis in Analog Circuit

Kazuhiro SAKAGUCHI, Nonmember and Mineo KANEKO, Member

Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering,
Tokyo Institute of Technology

2-12-1, O-okayama Meguro-ku Tokyo 152, Japan

Abstract The existence of the parasitic elements possibly causes the oscillation fault in the linear circuit. As the first step of the oscillation fault diagnosis, this paper presents a method for determining the sort of element, location and value of a parasitic element under the assumption that the number of parasitic elements which cause the oscillation is limited to one. The proposed method uses the information of the normal circuit topology and parameters and the oscillation frequency of the faulty circuit, and is based on the fact that the determinant of the nodal admittance matrix of the faulty circuit is to be zero. In the simulation, we can not specify the sort of the element, location and value exactly, but we can narrow down fairly.

1 はじめに

集積回路に故障が発生したとき、その不良に対して故障解析を行い、故障状態、原因を特定し、設計、開発にフィードバックを行うことは、歩止りの向上、信頼性の増大につながる重要な課題である。アナログ回路の故障の一つとして、予期しない発振が起こる発振故障があげられ、その原因として寄生素子の存在が考えられる。本稿では寄生素子を原因とするアナログ回路の発振故障について、その原因となった、寄生素子の位置、種類、値を特定する問題について考察する。

2 問題設定

アナログ回路中に存在する寄生素子が原因で起きる発振故障に対して、その寄生素子の種類、位置、値を決定する問題を考える。対象とする回路はR, L, C, 及びVCCSからなる線形回路とする。寄生素子の種類としては、本稿ではリアクタンス成分のみを持つ素子、または抵抗成分のみを持つ素子に限定し、さらに寄生素子の数は簡単のため1つとし、それが節点間に存在するものとする。回路には電圧、電流の測定可能な外部端子が存在し、これより得られる情報（電圧、電流、周波数等）を元に診断を行う。回路の正規の状態の接続情報、素子値情報は前もって与えられているものとする。

回路の節点アドミタンス行列を H 、節点電圧を V 、電流を I とすると、

$$HV = I \quad (1)$$

がなりたつ。発振している回路において式1は、 $I = 0$ の下で $V \neq 0$ であり、節点アドミタンス行列 H は非正則となる。この特徴を用いて発振故障診断を行う。

故障の無い回路については、その節点アドミタンス行列は正則であるが、寄生素子の存在によりその行列は特異となり発振状態となる。これより、発振故障診断は、正常な回路の節点アドミタンス行列に対し、適当な位置に寄生素子を想定した節点アドミタンス行列の正則性を調べることで診断が可能となる。

寄生素子の値は不明なので未知数とし、寄生素子を想定した回路の節点アドミタンス行列を H' とすれば、発振故障診断は $\det H' = 0$ が未知数に関して解を持つか否かを調べることに帰着される。

3 発振周波数情報を用いた診断手法

回路中に存在するトランジスタの gm の値は、回路が発振状態にあるときには、その非線形性のため正常時の動作値とは異なる可能性がある。この為発振状態での gm の値は不明であり、これら gm の値も未知数とすると $\det H' = 0$ は gm 及び寄生素子の素子値を変数とする方程式と考えることが可能である。

この方程式 $\det H' = 0$ は複素方程式であるから、更に、その実部、虚部についての2つの方程式 $F_{Re} = 0$ 、 $F_{Im} = 0$ が得られる。これらの方程式は、 gm の値を $x_i (1 \leq i \leq n-1)$ とし、単一寄生素子の値を x_n とすると $x_i (1 \leq i \leq n)$ を変数とする非線形方程式となるが、この非線形方程式を解くことは必ずしも容易ではない。

ここで寄生素子の値、 gm の値は任意の値が許されず、ある範囲内の値を取るに過ぎない事に着目する。これは方程

式 $\det H' = 0$ の解の存在可能な範囲を限定することになる。

変数 $x_i (1 \leq i \leq n)$ からなる n 次元空間を考える。変数 $x_i (1 \leq i \leq n)$ は値が制限されており、その範囲を $x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}$ とすると解が存在可能な空間 V_S は次のように定義される。

$$V_S = \{V_S \subset \mathbf{R}^n : \mathbf{x} \in V_S, \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} (1 \leq i \leq n)\}$$

空間 V_S は $n = 2$ においては長方形であり、 $n = 3$ においては直方体となる。 $n > 3$ の時には3次元空間における直方体に相当する空間となる。このような形状の空間を本稿では超直方体と呼ぶことにする。また方程式 $F_{Re} = 0$ 、及び $F_{Im} = 0$ の解はこの n 次元空間で、ある適当な空間 S_{Re} 、及び S_{Im} となる¹⁾(図1)。この2つの空間 S_{Re} 、 S_{Im} が空間 V_S 内で互いに交差するところが $\det H' = 0$ の解である。すなわち $\det H' = 0$ が V_S 内で解を持つ事と、この2つの空間 S_{Re} 、 S_{Im} が空間 V_S 内で交差する事は同値である。なお空間 S_{Re} 、 S_{Im} は $n = 3$ においては曲面となる様に、3次元空間における曲面に相当する空間である。そこで以降ではこのような空間を超曲面と呼ぶ。

定理 1 方程式 $\det H' = 0$ の実部を $F_{Re} = 0$ 、虚部を $F_{Im} = 0$ としたとき、超直方体となる解存在可能空間 V_S で $F_{Re} = 0$ 及び $F_{Im} = 0$ で表される超曲面 S_{Re} 及び S_{Im} が交差すれば $\det H' = 0$ は V_S 内に解を持つ。 □

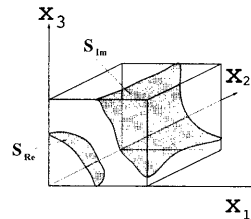


図1: $F_{Re} = 0$ 、 $F_{Im} = 0$ の様子

空間 V_S 内を探索し、超曲面 S_{Re} 、 S_{Im} の交差を調べるのは一般に膨大な手数が必要である。そこでこの超直方体 V_S を囲む面 S_S

$$S_S = \{s_S \in S_S : \mathbf{x} \in s_S :$$

$$x_k = \begin{cases} x_i^{\min} \leq x_k \leq x_i^{\max} & k = i \\ x_j^{\min} \leq x_k \leq x_j^{\max} & k = j \\ x_k = x_k^{\min} \text{ or } x_k^{\max} & k \neq i, k \neq j \end{cases} \\ \text{for all } i, j\}$$

さらには超直方体の辺 E_S

$$E_S = \{e_S \in E_S :$$

$$\mathbf{x} \in e_S : x_k = \begin{cases} x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} & k = i \\ x_k = x_k^{\min} \text{ or } x_k^{\max} & k \neq i \end{cases} \\ \text{for all } i\}$$

¹⁾ $n = 2$ の時は曲線、 $n = 3$ の時は曲面である

のみを探索することで V_S 内での S_{Re}, S_{Im} の交差が検査可能であれば探索の時間が大幅に削減できる。次にこの交差について検討する。

$\det H'$ は木アドミタンス積和で与えられ、一つの変数 x_i ($1 \leq i \leq n$) に関して一次式となる事が知られている。

$$\det H = F_{Re} + jF_{Im} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_{Re} &= F_{Re}(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &= \sum_{\text{All } \mathbf{i}_k} c_{\mathbf{i}_k} x_1^{i_1} x_2^{i_2} \dots x_n^{i_n} \quad (3) \\ \mathbf{i}_k &= \{i_1, i_2, \dots, i_n\} \\ i_j &= \{0, 1\} \quad (1 \leq j \leq n) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{Im} &= F_{Im}(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &= \sum_{\text{All } \mathbf{i}_k} c_{\mathbf{i}_k} x_1^{i_1} x_2^{i_2} \dots x_n^{i_n} \quad (4) \\ \mathbf{i}_k &= \{i_1, i_2, \dots, i_n\} \\ i_j &= \{0, 1\} \quad (1 \leq j \leq n) \end{aligned}$$

定理 2 超曲面 $F_{Re} = 0$ が V_S 内に存在するとき、これは、 S_S との交わりが閉曲線 R_{Re}^i ($i = 1, 2, \dots$) となり、かつそれを唯一の周辺とするいくつかの超曲面 S_{Re}^i となる。

超曲面 $F_{Im} = 0$ が V_S 内に存在するときも同様に、 R_{Im}^j ($j = 1, 2, \dots$) を唯一の周辺とするいくつかの超曲面 S_{Im}^j となる。□

定理 3 各一つ一つの超曲面 S_{Re}^i ($i = 1, 2, \dots$)、 S_{Im}^j ($j = 1, 2, \dots$) は V_S を 2 分する。□

定理 2, 3 の証明: 平面 s_S 上で $F_{Re} = 0$ ($F_{Im} = 0$) の軌跡は直角双曲線となる。 S_S 全ての面についてこの直角双曲線に着目するとこれらは必ず互いに交差することの無い一つ、ないし複数の閉曲線 R_{Re}^i ($i = 1, 2, \dots$) (R_{Im}^j ($j = 1, 2, \dots$)) となる。

R_{Re}^i の存在する超直方体 $x_{k_{Re,i}}^{\min} \leq x_k \leq x_{k_{Re,i}}^{\max}$ ($1 \leq k \leq n$, $x_{k_{Re,i}}^{\min}$ ($x_{k_{Re,i}}^{\max}$) は R_{Re}^i の x_k 成分の最小 (最大) 値, $x_{k_{Im,j}}^{\min}$, $x_{k_{Im,j}}^{\max}$ についても同様) について考える。いまこの空間内で S_S に平行な任意の平面を考えると $F_{Re} = 0$ の軌跡は必ず存在し、それは R_{Re}^i の点を端点とする端点以外で連続な双曲線である。

これより、超曲面 S_{Re}^i は R_{Re}^i を周辺とする超曲面となり、 V_S を 2 等分する事が示される。 R_{Im}^j についても同様である。□

定理 4 S_{Re}^i (S_{Im}^j) は超直方体 $x_{k_{Re,i}}^{\min} \leq x_k \leq x_{k_{Re,i}}^{\max}$ ($x_{k_{Im,j}}^{\min} \leq x_k \leq x_{k_{Im,j}}^{\max}$) 内のみが存在する。□

ここで S_{Re}^i ($1 \leq i$)、 S_{Im}^j ($1 \leq j$) が存在し V_S をそれぞれ 2 分割している場合について考えてみる。 S_{Re}^i により V_S は V_{Re}^i , \bar{V}_{Re}^i に分割される。この時 V_{Re}^i , \bar{V}_{Re}^i それぞれに S_{Im}^j の超曲面が存在したとすれば、 S_{Re}^i と S_{Im}^j は必ず V_S 内で交差する。

定理 5 $F_{Re} = 0$, $F_{Im} = 0$ による超曲面 S_{Re}^i ($1 \leq i$)、 S_{Im}^j ($1 \leq j$) が存在し、 S_{Re}^i (S_{Im}^j) により分割された空間 V_{Re}^i (V_{Im}^j)、 \bar{V}_{Re}^i (\bar{V}_{Im}^j) のいずれにも S_{Im}^j (S_{Re}^i) が存在していれば、 $\det H' = 0$ の解が V_S 内に存在している。□

空間 V_{Re}^i (V_{Im}^j)、 \bar{V}_{Re}^i (\bar{V}_{Im}^j) を示すために、各空間に属する E_S の範囲でこれを示すことを考える。すなわち、次の線分集合を定義する。

$$\begin{aligned} E_{Re}^i &= V_{Re}^i \cap E_S \\ \bar{E}_{Re}^i &= \bar{V}_{Re}^i \cap E_S \\ E_{Im}^j &= V_{Im}^j \cap E_S \\ \bar{E}_{Im}^j &= \bar{V}_{Im}^j \cap E_S \end{aligned}$$

図 2-a では、 E_S のうち濃く示した部分が E_{Re}^i 、残りの E_S が \bar{E}_{Re}^i である事を示している、さらに超曲面 S_{Im}^j と E_S との交点が E_{Re}^i に存在し、かつ \bar{E}_{Re}^i にも存在している。この時定理 5 に示したように、超曲面 S_{Re}^i 、超曲面 S_{Im}^j が V_S 内で交差している。

定理 6 $F_{Re} = 0$, $F_{Im} = 0$ による超曲面 S_{Re}^i , S_{Im}^j が共に存在し、 E_{Re}^i , \bar{E}_{Re}^i (E_{Im}^j , \bar{E}_{Im}^j) いずれにも S_{Im}^j (S_{Re}^i) との交点が存在するとき $\det H' = 0$ は解を持つ。□

図 2-b は、超曲面 S_{Re}^i が存在し E_S に交点を持つが、 $F_{Im} = 0$ による超曲面は V_S 内に存在せず、 E_S に交点を持たない事を示している。このような場合 $F_{Re} = 0$, $F_{Im} = 0$ による超曲面が V_S 内で交差することは有り得ない。

定理 7 $F_{Re} = 0$, $F_{Im} = 0$ の超曲面のうち、いずれか、あるいは 2 つとも E_S に交点を持たない場合には $\det H' = 0$ は V_S 内に解を持たない。□

$F_{Re} = 0$, $F_{Im} = 0$ が交差するか否かを E_S 上の探索のみで一概に判断できない状態を図 2-c に示す。これは 2 つの超曲面とも E_S に交点を持つが、 E_{Re}^i , \bar{E}_{Re}^i (E_{Im}^j , \bar{E}_{Im}^j) のいずれか一方とのみに超曲面 S_{Im}^j (S_{Re}^i) が交差する場合である。このような場合超曲面 S_{Re}^i と超曲面 S_{Im}^j が交差するか否かを E_S における交点の状況からだけで判断可能な場合と不可能な場合とに分かれる。

図 3 は簡単のため図 2-c) の場合を平面で横したものである。ここで図 3-(a)、(b) において超曲面 S_{Re}^i 、あるいは超曲面 S_{Im}^j が存在し得る可能性のある領域はそれぞれ斜線部で示されている。そしてこの斜線部で示された領域が互いに重なれば超曲面 S_{Re}^i と超曲面 S_{Im}^j は交差する可能性がある (図 3-(a))、しかし領域が重なることがなければそれぞれの超曲面 S_{Re}^i と S_{Im}^j とは交差することはありえない (図 3-(b))。

このように S_{Re}^i による E_S の交点から S_{Re}^i の存在し得る超直方体 \hat{V}_{Re}^i ($x_{k_{Re,i}}^{\min} \leq x_k \leq x_{k_{Re,i}}^{\max}$, $1 \leq k \leq n$, $x_{k_{Re,i}}^{\min}$ ($x_{k_{Re,i}}^{\max}$) は E_S における S_{Re}^i の交点のうち最小 (最大) の x_k 成分) が得られ、同様に S_{Im}^j が存在し得る超直方体 \hat{V}_{Im}^j ($x_{k_{Im,j}}^{\min} \leq x_k \leq x_{k_{Im,j}}^{\max}$, $1 \leq k \leq n$, $x_{k_{Im,j}}^{\min}$ ($x_{k_{Im,j}}^{\max}$) は E_S における S_{Im}^j の交点のうち最小 (最大) の x_k 成分) が得られる。これら 2 つの超直方体 \hat{V}_{Re}^i , \hat{V}_{Im}^j が重なり合えば S_{Re}^i , S_{Im}^j は交差する可能性がある。しかし \hat{V}_{Re}^i , \hat{V}_{Im}^j が重なることがなければ、 S_{Re}^i , S_{Im}^j は交差しない。前者の場合 S_{Re}^i , S_{Im}^j の交差の再検討は V_S を $\hat{V}_{Re}^i \cap \hat{V}_{Im}^j$ と再定義することで可能である。

以上の考察をまとめて、 $\det H' = 0$ を解くアルゴリズムを示す。

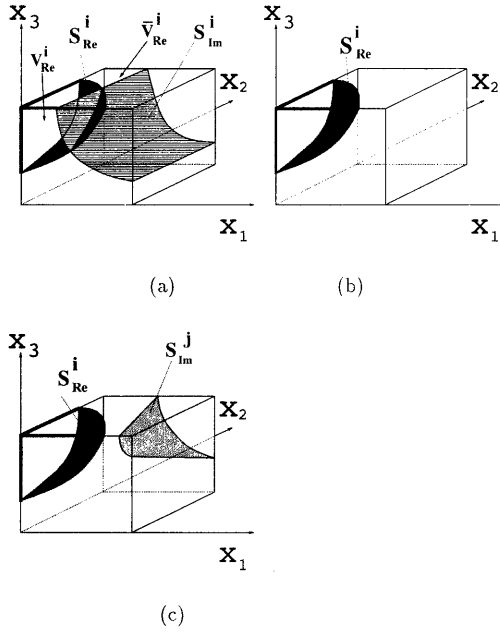


図2: 空間 V_S における超曲面 S^i_{Re} , 超曲面 S^j_{Im}

アルゴリズム

1. 回路情報を得る (接続情報, 素子値情報, 発振周波数).
2. 寄生素子を節点間に想定し節点アドミタンス行列を得る.
3. F_{Re} , F_{Im} を得る.
4. 各辺 E_S における $F_{Re} = 0$, $F_{Im} = 0$ の交点を求める.
5. V^i_{Re} , V^j_{Im} に応じ E^i_{Re} , \bar{E}^i_{Re} , E^j_{Im} , \bar{E}^j_{Im} を得る.
6. (a) E^i_{Re} , \bar{E}^i_{Re} (E^j_{Im} , \bar{E}^j_{Im}) のそれぞれに S^i_{Re} (S^j_{Im}) との交点が存在する $\Rightarrow \det H' = 0$ の解は存在する

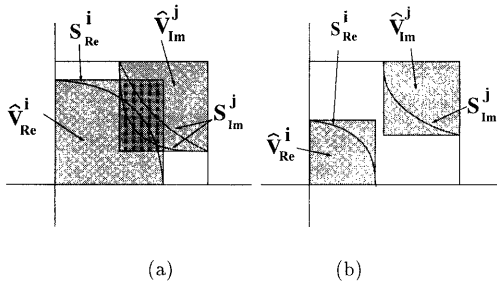


図3: 交差する状態としないとき

- (b) E_S には $F_{Re} = 0$, あるいは $F_{Im} = 0$ の交点が存在しない $\Rightarrow \det H' = 0$ の解は存在しない
- (c) i. 超直方体 \hat{V}^i_{Re} , \hat{V}^j_{Im} が重ならない $\Rightarrow \det H' = 0$ の解は存在しない
- ii. 超直方体 \hat{V}^i_{Re} , \hat{V}^j_{Im} が重なる $\Rightarrow \hat{V}^i_{Re} \cap \hat{V}^j_{Im}$ を新たに V_S とし4へ

このアルゴリズムについて具体的な計算内容を検討する。2では想定した故障位置に寄生素子を付加した回路の節点アドミタンス行列 H' を求める。この操作は寄生素子の無い正常な回路の節点アドミタンス行列 H の適当な要素を加減する操作ですむ。

3では得られた H' の行列式を計算するが、行列式計算の手数は決して少なくない。しかし行列 H の余因子行列を Δ とし、その pq 要素を Δ_{pq} で表すとすれば、節点 ij 間に寄生素子を想定した回路の節点アドミタンス行列の行列式の値は、

$$\det H' = \det H + x_n(\Delta_{ii} - \Delta_{ij} - \Delta_{ji} + \Delta_{jj})$$

で計算可能である。これより予め行列 H の行列式の値、余因子行列を求めておくことで、数回の四則演算のみで行列 H' の行列式が求められる。

4では E_S と $F_{Re} = 0$, $F_{Im} = 0$ との交点を求める。各 E_S における交点を求めるには $x_1 \sim x_n$ の変数のうち $n-1$ 個の値を固定し、残る一つの変数の値を求めるに過ぎず、1次方程式を解く問題となる。5では求めた E_S における交点から、 V^i_{Re}, V^j_{Im} に応じ E^i_{Re} , \bar{E}^i_{Re} , E^j_{Im} , \bar{E}^j_{Im} を決定する。

6において V^i_{Re} , V^j_{Im} の状況に応じ解の存在が確認され、あるいは V_S が再定義される。

4 診断例

図4, 図5にシミュレーションに用いた増幅回路, 及びその交流等価回路を示す。節点4とGND間に寄生容量を付加した。この寄生容量により回路は発振を起こし (図6), その発振周波数はSPICEでのシミュレーションの結果147000Hzであった。

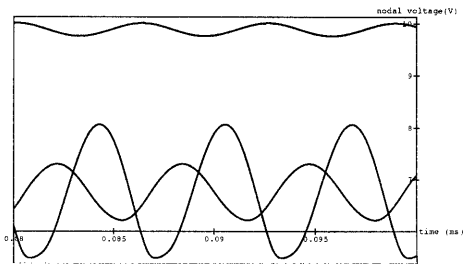


図6: 節点電圧 (節点1,5,8)

回路の接続情報, 素子値情報, 発振周波数, 及び節点4-GND間に寄生素子を想定すると節点アドミタンス行列は、

$$\det H' = F_{Re} + jF_{Im}$$

$$F_{Re} = -4.23510^{-27} - 8.46910^{-24} gm_1 \quad (5)$$

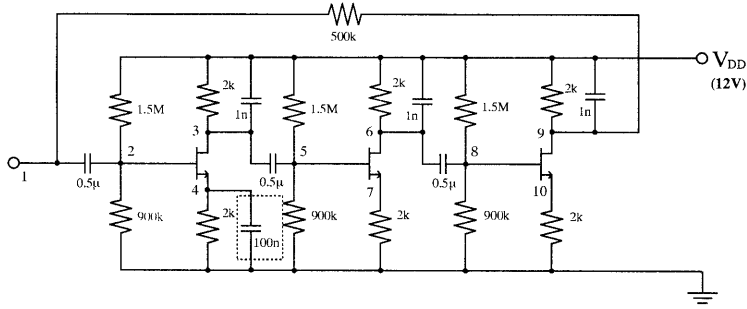


図 4: シミュレーション回路

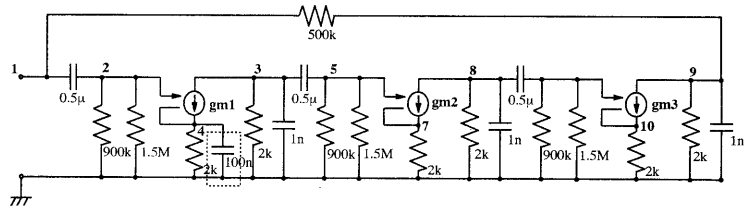


図 5: シミュレーション回路の交流等価回路

$$\begin{aligned}
 & -8.46910^{-24} gm_2 - 1.69410^{-20} gm_1 gm_2 \\
 & -8.46910^{-24} gm_3 - 1.69410^{-20} gm_1 gm_3 \\
 & -1.69410^{-20} gm_2 gm_3 - 3.38810^{-17} gm_1 gm_2 gm_3 \\
 & -9.94310^{-17} x - 1.98910^{-13} gm_2 x \\
 & -1.98910^{-13} gm_3 x - 3.97710^{-10} gm_2 gm_3 x \\
 & +4.54910^{-8} gm_1 gm_2 gm_3 x
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{Im} = & 5.38310^{-26} + 1.07710^{-22} gm_1 \\
 & +1.07710^{-22} gm_2 + 2.15310^{-19} gm_1 gm_2 \\
 & +1.07710^{-22} gm_3 + 2.15310^{-19} gm_1 gm_3 \\
 & +2.15310^{-19} gm_2 gm_3 + 4.06010^{-16} gm_1 gm_2 gm_3 \\
 & -7.82210^{-18} x - 1.56410^{-14} gm_2 x \\
 & -1.56410^{-14} gm_3 x - 3.12910^{-11} gm_2 gm_3 x
 \end{aligned} \quad (6)$$

となる。なお図5に示したように、各トランジスタの素子値を gm_1, gm_2, gm_3 、寄生容量の値を x とし、それぞれ許される値は $0 \leq gm_1, gm_2, gm_3 \leq 0.02$ 、 $-0.001 \leq x \leq 0.001$ とした。

表1に E_S における $F_{Re} = 0$ 、 $F_{Im} = 0$ との交点を示す。

ここで例えば辺番号 $(0, 0.02, *, 0)$ は $gm_1 = 0$ 、 $gm_2 = 0.02$ 、 $x = 0$ の辺を示している。表1から分かるように E_S には $F_{Re} = 0$ 、 $F_{Im} = 0$ の交点が共に存在する。 $F_{Re} = 0$ による交点はすべて S_{Re}^i によるものであり、 $F_{Im} = 0$ による交点もすべて S_{Im}^i によるものである。 E_{Re}^i 、 E_{Re}^i のいずれにも S_{Im}^i の交点が存在し、 $F_{Re} = 0$ 、 $F_{Im} = 0$ の超曲面が空間 V_S 内で交差している(図7)。このことから節点4—GND間に寄生素子が存在することが分かる。

例では変数の数が4つであるのに対し、 $F_{Re} = 0$ 、 $F_{Im} = 0$ の2式からこれらを全て決定するのは不可能である。そ

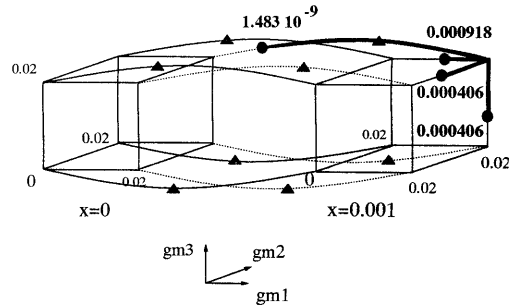


図 7: E_S と $F_{Re} = 0$ 、 $F_{Im} = 0$ との交点

こで各 gm や寄生素子の値を決定するには周波数以外の他の何等かの回路からの情報が必要である。

またこのシミュレーションの結果、真の寄生素子の位置である節点4—GND間以外にも、節点7—GND間、節点10—GND間でも寄生素子の存在を示す結果が得られた。実際にこれらの節点間に寄生素子を挿入しても回路は発振する。これより、真の寄生素子の位置を知ることは他の情報が必要であり、少なくとも発振周波数からだけでは寄生素子の位置を限定することはできず、いくつかの候補に絞り込むことが可能なのである。

以上のように、発振故障を起こした回路の寄生素子の位置、値を知る問題に対して、回路の接続情報、素子値情報、発振周波数情報から解く手法については寄生素子の存在位置をいくつかの候補として示すことが可能となった。

表 1: E_S と $F_{Re} = 0$, $F_{Im} = 0$ との交点

辺 (gm_1, gm_2, gm_3, x)	$F_{Re} = 0$ による交点	$F_{Im} = 0$ による交点
(*, 0, 0, 0)	----	----
(*, 0, 0, 0.001)	----	----
(*, 0, 0, 0.02, 0)	----	----
(*, 0, 0.02, 0.001)	----	----
(*, 0, 0.02, 0, 0)	----	----
(*, 0.02, 0, 0.001)	----	----
(*, 0.02, 0, 0.02, 0)	----	----
(*, 0.02, 0.02, 0.001)	0.009187	----
(0, *, 0, 0)	----	----
(0, *, 0, 0.001)	----	----
(0, *, 0, 0.02, 0)	----	----
(0, *, 0.02, 0.001)	----	----
(0.02, *, 0, 0)	----	----
(0.02, *, 0, 0.001)	----	----
(0.02, *, 0, 0.02, 0)	----	----
(0.02, *, 0.02, 0.001)	0.0004060	----
(0, 0, *, 0)	----	----
(0, 0, *, 0.001)	----	----
(0, 0, 0.02, *, 0)	----	----
(0, 0.02, *, 0.001)	----	----
(0, 0.02, 0, *, 0)	----	----
(0.02, 0, *, 0.001)	----	----
(0.02, 0, 0, *, 0)	----	----
(0.02, 0, *, 0.001)	----	----
(0.02, 0.02, *, 0)	----	----
(0.02, 0.02, *, 0.001)	0.0004060	----
(0, 0, 0, *)	----	6.88110 ⁻⁹
(0, 0, 0.02, *)	----	6.88110 ⁻⁹
(0, 0.02, 0, *)	----	6.88110 ⁻⁹
(0, 0.02, 0.02, *)	----	6.88110 ⁻⁹
(0.02, 0, 0, *)	----	2.82110 ⁻⁷
(0.02, 0, 0.02, *)	----	2.82110 ⁻⁷
(0.02, 0.02, 0, *)	----	2.82110 ⁻⁷
(0.02, 0.02, 0.02, *)	1.48310 ⁻⁹	2.67210 ⁻⁷

5 発振電圧, 電流, 位相情報を用いた手法

前章では, 発振故障を起こした回路の寄生素子の位置, 値を求める問題に対し, その回路接続情報, 素子値情報, 発振周波数情報から解くことについて検討した. その結果, 寄生素子が存在する位置をいくつかの候補として示すことが可能となった. しかし素子値等を正確に決定することは不可能である. これは用いた情報が少ないため, 他の何等かの情報を用いることで, さらに故障箇所, 値を特定できると考えられる. そこで本章では新たに回路からの情報として, 回路が発振しているときの外部端子に現れる電圧, 電流及びその位相情報を用いることとする.

回路には電圧, 電流の測定が可能な外部端子と, その電圧, 電流の測定が不可能な内部節点とがあるものとする. 外部端子における電圧を, その位相を含めて V_1 , 電流を I_1 とする. 同様に内部節点のそれを V_2 , I_2 とする. 回路の節点アドミタンス行列を H とすると

$$H \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

である. ここで節点アドミタンス行列 H を外部端子, 内部節点それぞれに対応する部分に分けると

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

となる. さらに回路内部に独立電源が無いものとすれば

$$I_2 = 0$$

となるから

$$H_{11}V_1 + H_{12}V_2 = I_1 \quad (9)$$

$$H_{21}V_1 + H_{22}V_2 = 0 \quad (10)$$

が得られる. ここで H_{22} の正則性について考えてみる.

H_{22} は対象回路の外部端子をすべて GND に短絡した回路の節点アドミタンス行列である. ここで H_{22} が正則であることは, 回路が一意である, すなわち, 発振しないことであり, 対象回路の外部端子を交流的に全て GND に短絡したときに回路の発振が停止すれば, H_{22} は正則であるといえる.

いま, このような条件の下で考えてみる. H_{22} は正則であるので, 式 10 から,

$$V_2 = -H_{22}^{-1}H_{21}V_1 \quad (11)$$

となり, さらに式 9 を用いて,

$$(H_{11} - H_{12}H_{22}^{-1}H_{21})V_1 = I_1 \quad (12)$$

両辺に $\det H_{22}$ を乗じて,

$$[(\det H_{22})H_{11} - H_{12}(\det H_{22})H_{22}^{-1}H_{21}]V_1 = (\det H_{22})I_1 \quad (13)$$

ここで VCCS の制御枝, 被制御枝が, 外部端子, 内部節点間を跨がないように外部端子を選ぶと, 式 13 は, gm_1, gm_2, \dots を変数とする非線形方程式であり, 一つの変数に着目すると一次式となる. つまり式 13 より前章で用いた $F_{Re} = 0$, $F_{Im} = 0$ と同様な非線形方程式が得られる. これらの式を $F_1 = 0$, $F_2 = 0, \dots, F_m = 0$ (m は外部端子の数) とすれば発振状態に於いてこれらの式が成り立つので, $F_{Re} = 0, F_{Im} = 0$ と共に用いることで, 寄生素子の位置, 値が特定できる.

6 まとめ

寄生素子による発振故障診断に対し, その寄生素子の位置, 値を決定する問題について検討した. 回路から得られる情報は, 正常な回路の接続情報, 素子値情報, 及び, 回路の発振周波数である. そして回路の節点アドミタンス行列が, 回路が発振している時にはその行列式が 0 となることを利用して診断が実行できることを確かめた. これは回路中の素子のうち, 値が特定できないものを未知数とし, さらに寄生素子の値も未知数とにおいて, 行列式が 0 となる方程式を立て, それが解を持つかどうかで判断するものである. この時この方程式は非線形方程式になるが, 個々の変数に対しては一次式となることを利用して容易に解の存在を確かめる方法を提案した. ここで未知数の数が多いと, 値をすべて決定するのに情報量が足りず, この場合寄生素子の位置, 値等はいくつかの候補, あるいは範囲として示すことにとどまった.

現在, さらに寄生素子の位置, 値を特定するために, 発振時の節点電圧, 電流を用いることについて検討している.

今検討したのは単一寄生素子についてであるが, 複数の寄生素子が存在する場合に対する拡張, 及び非単一正弦波発振に対する検討は今後の課題である.

7 謝辞

本研究を進めるにあたり, 有意義な御助言を頂いた, 本学, 小野田真穂樹教授に感謝します.