

# マルチ共振モードとマイクロ波発振器等への展開

－共振電磁波動場の高次高調波 Push-Push 発振器への応用－

Multifunctional Microwave Oscillators Exploiting High-Order Mode Resonance and Coupling

相川正義 田中高行 西山英輔

Masayoshi AIKAWA, Takayuki TANAKA and Eisuke NISHIYAMA

佐賀大学

Saga University

〒840-8502 佐賀市本庄町 1

1 Honjyo-machi, Saga-shi, 840-8502 Japan

**Abstract:** This paper presents the basic technical concept for the higher order harmonic push-push oscillators in microwave and millimeter wave bands. The push-push oscillators described here can be easily achieved by the constructive use of harmonic resonant fields and their mutual coupling on microwave resonators. The crucial technical point is very extensive use of the coherent electromagnetic fields including the higher order harmonics.

## 1. はじめに

ユビキタス社会の多様なサービスの進展に伴って、マイクロ波・ミリ波帯を中心とする高周波帯装置はその高性能・高機能化および経済化がますます求められてつつある。その基盤となるマイクロ波集積回路技術、RF モジュール技術さらには高周波実装技術等は、関連する製造技術や材料技術と共に着実に進展してきた。一方、ミリ波帯を中心としたより高い周波帯領域では、それらの性能向上や機能開拓および経済化に関する進展は比較的緩やかである。特にミリ波帯における市場ニーズや高周波であるが故のデバイス性能や製造技術の制約、高周波帯実装や評価測定に関わる量産性等の諸課題を抱えており、その応用分野は今なお限定的である。

本講では、上記の動向を踏まえて、高周波装置の中心的な機能回路である高周波発振器について一つの開発アプローチを提起する。マイクロ波ミリ波帯発振器の技術開発に関しては、これまで数多くの学術論文が発表され、さらに関連の技術文献も多数出版してきた。ここでは、やや視点を変えたマイクロ波ミリ波発振器の構成法を概説する。そのポイ

ントは、発振器の構成要素である共振器について、その共振電磁波動場を徹底して活用することにある。その結果、極めて簡易な Push-Push 発振器を実現すると共に、従来の第 2 次高調波発振に限らず、第 4 次高調波さらには第 8 次高調波に至る高次高調波発振によってその大幅な高周波化を目指す試みである。それらを実現するための基本的考え方は、共振電磁波動場の電磁界分布を最大限に活用することにある [1] [2] [3]。これはアンテナ系等も含めた各種高周波帯ハードウェア技術の飛躍向上とその経済化を指向する一つの開発アプローチと位置づけてよい。

本稿の主題である高次高調波 Push-Push 発振器構成の基盤となる「マイクロ波一体複合化」と呼ぶ基本コンセプトについて、先ず第 2 節で概説する。引き続いて、第 3 節では本講の主テーマである Push-Push 発振器の基礎と特徴 [4] ~ [7]、および「マイクロ波一体複合化」の基本コンセプトに基づいた Push-Push 発振器の構成事例を示す。そして第 4 節では第 4 次高調波発振を含む Push-Push

発振器の実施事例を紹介する。最後の第5節では、私見を交えて、当該技術の展望の一端を述べる。

## 2. 「マイクロ波一体複合化」の大要

本節では、「マイクロ波一体複合化」と呼ぶ基本コンセプトおよびその電磁波動場形成とその活用ポイントについて概説する [1] [2] [3]。

図1に、この「マイクロ波一体複合化」の概要を示している。ここでは、各種の高周波導波路、共振器さらには各種のアンテナなど、伝送導波路姿態、共振波動場および放射電磁界等の様々な電磁波動場の舞台となるコンポーネントを「広義のマイクロ波回路」と呼ぶ。この「広義のマイクロ波回路」に加えて、各種ICや半導体素子、各種の部品材料さらにはMEMS等を含めた各種パーツも包含してここでは「マイクロ波コンポーネント」と称する。この「マイクロ波コンポーネント」を一体複合化することによって、目的とする機能や性能の実現に必要な電磁波動場を形成する。これらの構造とその製造はモノリシック半導体工程、ハイブリッド工程あるいは両者の組み合わせのいずれでもよく、また、共振器等の「広義のマイクロ波回路」を含むマイクロ波コンポーネントが、共に一体となって電磁波動場の境界条件を形成する。その電磁波動場を最大限に活用することによって、マイクロ波・ミリ波帯ハードウェアの高機能化・高性能化さらには簡易経済化を目指すものである。

ここでは、マイクロ波帯電磁波動場の時間軸、空間軸および周波数軸における良好なコヒーレント性に着目する。特に、そのハードウェア構築の観点から見ると、マイクロ波ミリ波帯は手ごろな波長サイズであるために、その波動場の形成とその信号処理も比較的容易である。それに加えて、図1に示す「マイクロ波コンポーネント」の多様な組み合わせによって、所望の電磁波動場は自在に形成することができると共に、その電磁境界条件の可変制御によって波動場の電子的コントロールも容易となる。その結果、所謂、Reconfigurableな高周波ハードウェアの実現も比較的容易となる。従って、その電磁波動場の利用や制御において、マイクロ波ミリ波帯は本アプローチに対して適合性の高い周波数帯であると言える。

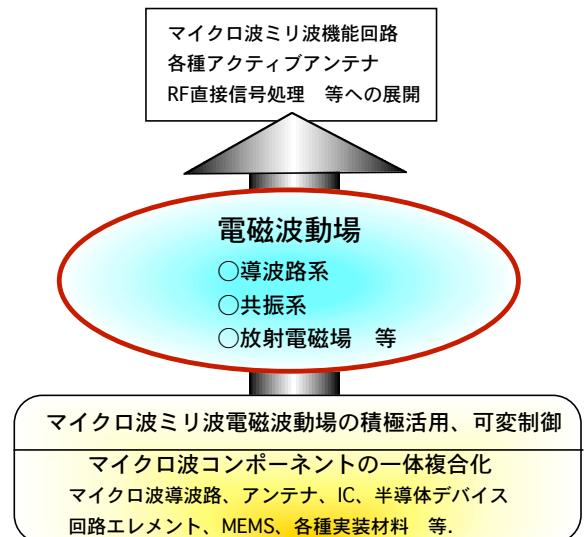


図1. 「マイクロ波一体複合化」の概要

この基本コンセプトの主要な狙いは、「マイクロ波電磁波動場」の特徴を積極的に活用すると共に、そのRF信号の直接処理による装置の簡易化と経済化にある。目的とする機能の実現あるいは性能を向上するための電磁波動場は以下の3種に大別できる。

- (1) 形成した電磁波動場の電磁界分布の特徴を直接活用するか、あるいは電磁場自体を直接信号処理する。
- (2) マイクロ波コンポーネントの一体複合化による電磁境界条件を可変化して、その電磁波動場を電子的にコントロールして利用する。
- (3) 形成した電磁波動場を介して、各コンポーネントやIC等の間の相互同期や相互結合等を活用する。

本講で後述する高次高調波Push-Push発振器は、複数負性抵抗素子による共振波動場の相互位相同期励振であると捉えれば上記(3)の範疇であり、同時に発振出力部では範疇(1)と位置づけられる。

主な電磁波動場として各種導波路系、共振回路系および放射電磁場系の3つについて、それぞれの具体的な活用事例を表1示す。

表 1. 「マイクロ波一体複合化」による電磁波動場の活用事例

波動場の形態	マイクロ波一体複合化の事例
導波路伝送姿態	直交伝送モードによる直交伝送／同相逆相信号分波合成 異種伝送線路複合化による各種の分岐合成 等
共振電磁場	基本共振／高調波とその時空間同期性 縮退共振モードの直交性／高次モードと非線形結合 等
放射電磁場	アンテナ／IC一体複合化による各種機能アンテナ 各種アーチアンテナのスペース給電／指向性可変制御 等

表 1 の中の導波路伝送系では、例えばマイクロストリップラインとスロットラインの異種線路の一体複合化によって、極めて容易に広帯域な 4 ポート 分岐合成回路が実現できる。図 2 は、その同相逆相分岐合成回路であり、一種の 180 度ハイブリッド回路でもある。この分岐合成回路のポイントは、スロットラインの平衡伝送姿態とマイクロストリップラインの不平衡伝送姿態の特徴を活かした一体複合化によって実現している。回路構造は至って単純ではあるが、広帯域な周波数特性である。この 180 度ハイブリッド回路は、本講では第 3 節で紹介する正帰還 Push-Push 発振器（図 8）の中で中心的な構成要素である [8]。

表 1 中の共振電磁場は、次の第 3 節で紹介する様に、本講テーマの Push-Push 発振器構成の主役として積極的に活用する。

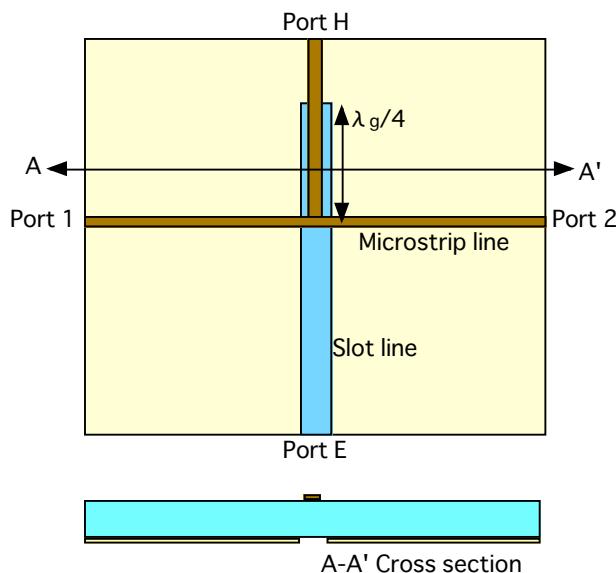


図 2. 同相逆相分岐合成回路

(180 度ハイブリッド回路)

放射電磁場やアンテナ系の具体的な実施事例は文献 [9] ~ [12] 等に報告されている。

### 3. Push-Push 発振器への展開

#### 3.1 Push-Push 発振器の構成と特徴

マイクロ波ミリ波帯の高周波帯発振器は、各種ワイヤレス送受信装置のコアとなる機能回路であり、装置の性能やコストを左右する。高周波発振回路技術は、多年にわたって多様な研究開発が行われてきており、言うまでもなく様々な分野で実用に供されている。ここでは、前述のマイクロ波一体複合化の特徴を積極的に活用する Push-Push 発振器について解説する。Push-Push 発振器は一般に 2 つの発振ユニットと同相合成回路から構成される [4] ~ [7]。図 3 にその基本構成を示すが、同図 (a) は 1 つの共通共振器で構成する場合であり、その共振器を介して互いに逆相の発振出力を同相合成回路によって合成して所望の第 2 次高調波を取り出す回路である。図 3(b) の構成では、2 つの発振ユニットはそれぞれの共振器を持つと共に、それらの対称面に仮想ヌル面 (Virtual ground) を設けることによって互いに逆相の Odd-Mode 発振させ、(a) と同じく同相合成回路を介して第 2 高調波を得る回路である。この様な構成であるから、次の式(1),(2) で示す様に、一般に偶数次の高調波発振出力を得ることができる。

$$V_1(t) = \sum_n a_n e^{jn\omega_0 t} \\ V_2(t) = \sum_n a_n e^{jn\omega_0(t+\Delta t)} \quad (1)$$

ここで  $\omega_0 \Delta t = \pi$ 、即ち、基本周波数  $\omega_0 = 2\pi f_0$ において互いに逆相の発振に設定すれば、これらの同相合成出力は次式の偶数次の高調波周波数となる。

$$V_{out}(t) = (V_1(t) + V_2(t)) = b_2 e^{j2\omega_0 t} + b_4 e^{j4\omega_0 t} + \dots \quad (2)$$

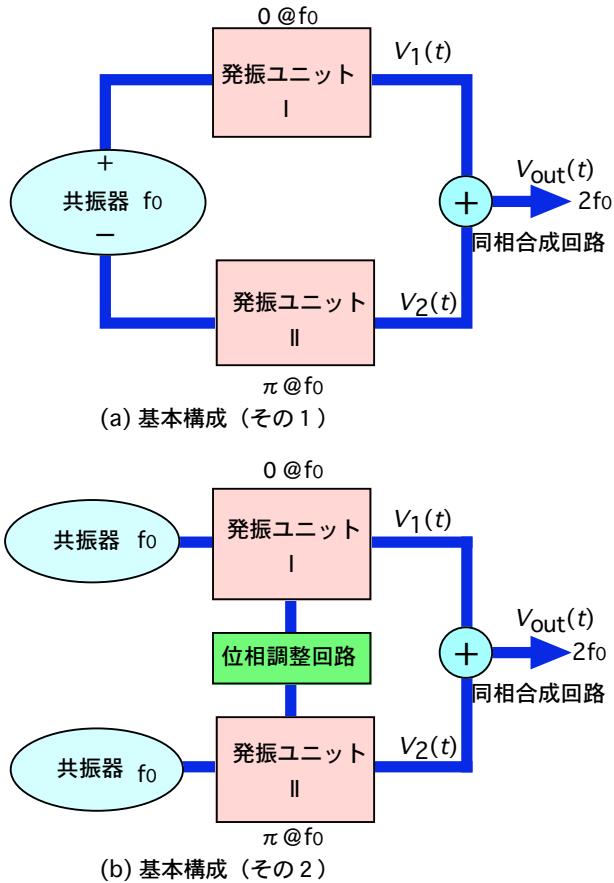


図 3. Push-Push 発振器の基本構成

Push-Push 発振器の主な特徴は以下の通りである。

- (1) 2 次以上の偶数次高調波発振であるために、半導体デバイスや共振器は低周波帶用を適用することが出来ることから、特性上ならびに製作上も有利である。
- (2) 上記(1)の特徴は、特にミリ波帯以上の高周波帯発振に有効である。
- (3) 複数デバイスの相互位相同期発振であるために位相雑音特性および発振出力特性にも優れている。
- (4) 不要周波数信号の抑圧特性も優れている。

Push-Push 発振器は上記の様な優れた特徴を有しているが、技術課題としては複数デバイスの非線形設計が必要であり設計が比較的複雑になること、さらには回路構成要素が多くなり、その結果、回路寸法あるいは IC チップサイズが比較的大きくな

ることなどである。

これらの Push-Push 発振器の特徴をより顕著に発揮させること、さらには課題である設計の簡易化および回路規模の小型化を目的として、前述のマイクロ波一体複合化の考え方に基づいた Push-Push 発振器の基本的構成法を次の 3.2 節で概説する。

### 3.2 マイクロ波一体複合化技術に基づいた Push-Push 発振器の構成法

マイクロ波一体複合化において広義のマイクロ波回路の一種である共振器は、共振波動場を形成する場となると同時に、発振器に不可欠な共振回路でもある。本講ではマイクロ波一体複合化技術に基づいた Push-Push 発振器の基本構成を概説する。

マイクロ波共振器の電磁波動場は、その境界条件と寸法で決まる固有値とそれに対応する固有の共振電磁場である。そして一般に空間軸、時間軸および周波数軸において優れたコヒーレント性がある。一方、Push-Push 発振原理は、本来、高調波発振であることから、特に共振電磁波動場の優れた時空間分布を積極的に活用することによって Push-Push 発振の特徴をさらに大幅に向上させると共に、高周波帯発振器の諸課題の克服にも有効となる。図 4 は、以上の考え方に基づいた Push-Push 発振器の基本構成の概念図である。

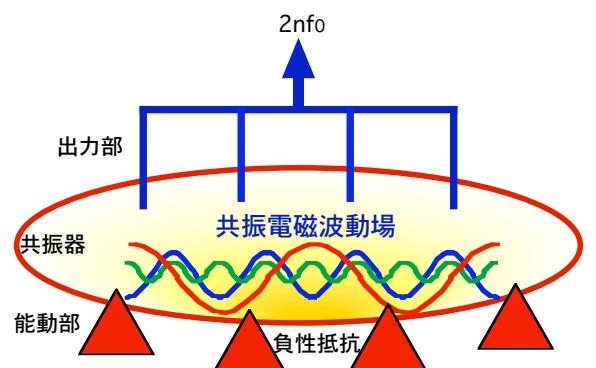


図 4. 共振電磁波動場を活用する高次高調波 Push-Push 発振器の基本構成

即ち、マイクロ波一体複合化の考え方に基づいて、ここでは共振電磁波動場を発振器構成の主役として焦点を当て、その特徴を積極的に活用することを

主眼とすると同時に、3.1 節に述べた Push-Push 発振原理を併せて考察すると、思考の流れとして自然に以下の技術指針に帰結する。

- (a) 高調波を含む共振電磁波動場は、時空間軸上の同期性を活用することによって複数の負性抵抗素子で構成する Push-Push 同期励振によく適合している。複数素子による Push-Push 発振回路の構成は、高周波化、高出力化および低位相雜音化に有効である。
- (b) 共振電磁波動場と負性抵抗素子のインターフェースにおいては、共振波動場の高調波電磁界分布を利用することによって高調波次数の選択機能を付与することができる。この特徴は、所望次数の高調波 Push-Push 発振の実現に有効である。
- (c) 上記(a)、(b)の共振電磁波動場の特徴は、発振出力部においても有効である。即ち、発振出力インターフェースにおいても、所望次数の高調波選択機能を持った出力回路が構成できる。その結果、不要周波数成分を原理的に抑圧しつつ、効率的に所望の発振周波数成分を電力合成することができる。

この様に、マイクロ波一体複合化の特徴と効用は、複数素子による高調波発振である Push-Push 発振器の構成において、大変有効である。図 5 には、これらの特徴と効用をまとめて示している。

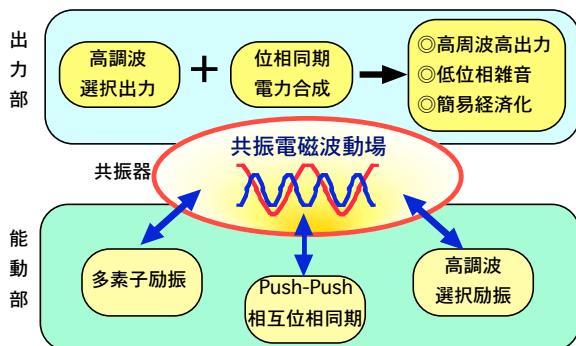


図 5. 共振電磁波動場を活用する Push-Push 発振器の特徴と効用

この考え方に基づいた Push-Push 発振器の基本構成事例を、図 6～図 8 に示す。図 6 (a)は、基本発振周波数( $f_0$ )で半波長の線路共振器と 2 つの負性抵抗回路からなる Push-Push 発振器の基本構成であり、従来の回路構成から大幅な簡易化を実現している [13]。即ち、同図(b)に示す線路共振波動場の特徴を活用して、その中点 B を所望の第 2 次高調波の出力ポイントとするだけの極めて簡易な構造である。

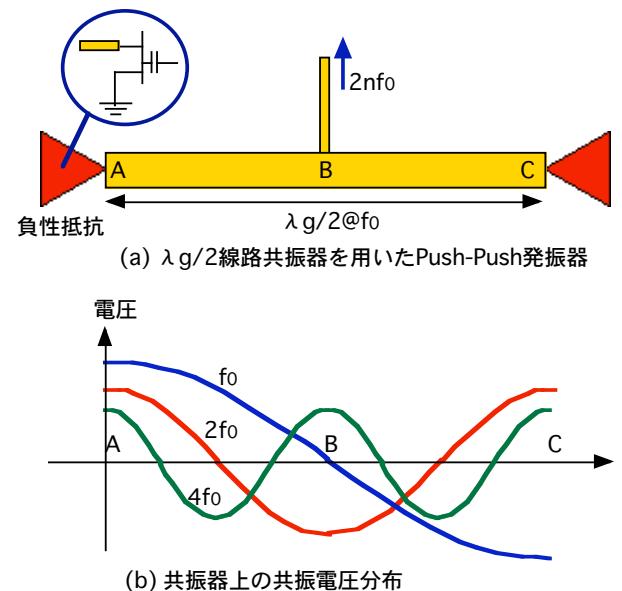


図 6. 半波長線路共振器を用いた Push-Push 発振器

図 6(b)の共振電圧分布から明らかな様に、波動場の出力インターフェース点 B は基本発振周波数( $f_0$ )や奇数次高調波にとってヌル点となり、本構成では所望の第 2 次高調波成分( $2f_0$ )を主な発振出力とする偶数次 Push-Push 発振器を形成することができる。

図 7 (a)は、リング共振器を用いた Push-Push 発振器の基本構成であり、同図(b)は 1 波長リング共振器上の電磁波動分布を示している。同図(b)に示す線路共振器上の共振波動分布を活用して共振器インターフェース点 B ならびに点 D を所望の第 2 次高調波と偶数次高調波の出力ポイントとする。この回路の発振動作は、図 6 の半波長線路共振器を用いた Push-Push 発振器と基本的に同じである。

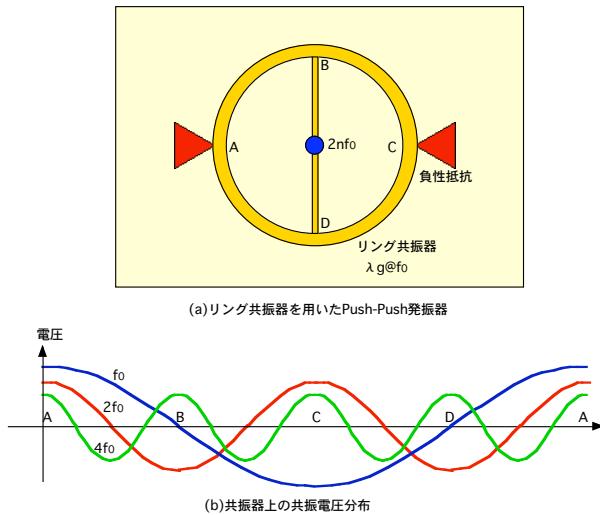


図 7. リング共振器を用いた Push-Push 発振器

図 8 は、正帰還型 Push-Push 発振器の構成例である [8]。これはマイクロ波一体複合化技術における異種導波路の複合化による広帯域逆相分岐合成回路（図 2）を出力部に用いたものである。図中で出力部が同相合成であり、さらに逆相分岐回路を介してスロットラインへ正帰還をかけている。従って、出力部へは同位相の偶数次高調波のみを取り出すことができる。さらにこの発振回路の特徴は、帰還ループのスロット共通部を利用することによって、広帯域かつ簡易な周波数可変化や変調機能等の機能複合化が容易に実現できることである。

### 3.3 マルチモード共振波動場を活用した高次高調波 Push-Push 発振

一般に、Push-Push 発振では 2 次の高調波が利用されている。ここでは共振波動場の時空間と周波数軸における同期性を積極的に活用した高次高調波 Push-Push 発振器の基本構成について解説する。

例えば、図 9 に示す半波長線路共振器を用いた Push-Push 発振器において、同図(c)に示す共振波動分布の↑点は第 2 高調波のヌル点であり、その 2 点を負性抵抗励振ポイントおよび出力回路インターフェースポイントとするだけで、不要な第 2 次高調波を抑制した第 4 次高調波出力の Push-Push 発振器が簡単に形成できる。同図(a)および(b)は、それぞれ励振ポイント、出力インターフェースポイントの設定によって基本周波数信号や第 2 次高調

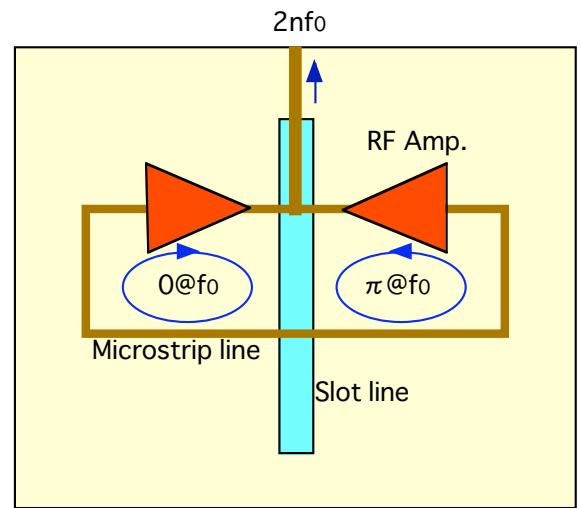


図 8. 正帰還型 Push-Push 発振器の基本構成

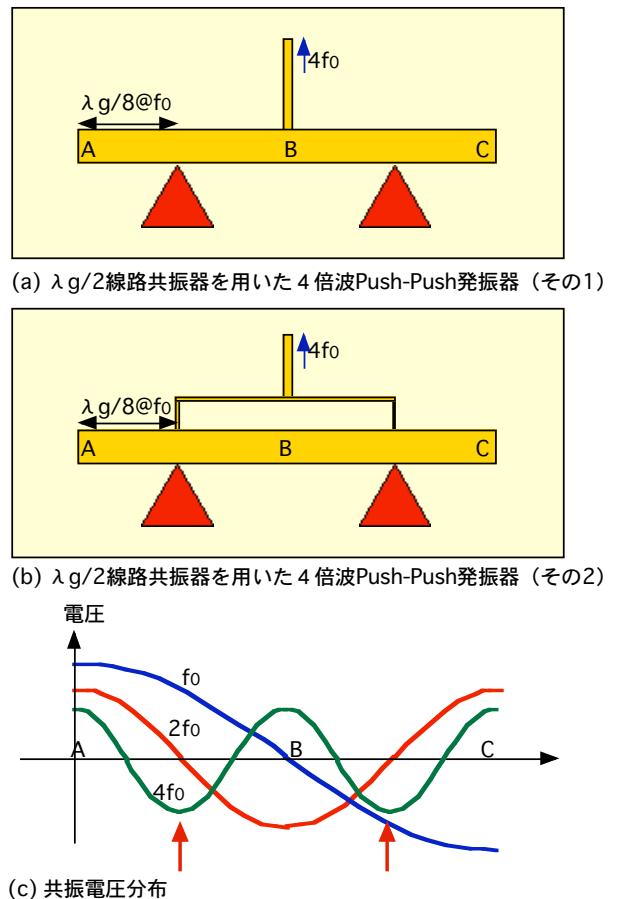


図 9. 半波長線路共振器を用いた第 4 次高調波 Push-Push 発振器の構成例

波成分を抑制した第 4 次高調波出力の Push-Push 発振器の基本構成を示している。この様に、高次高調波を含めた共振電磁波動場を緻密に活用することによって、基本周波数成分等の不要波を抑制しつつ基本発振周波数の 4 倍の高次高調波発振を簡易

に実現することができる。その具体的な特性事例は、文献 [2] に報告されている。

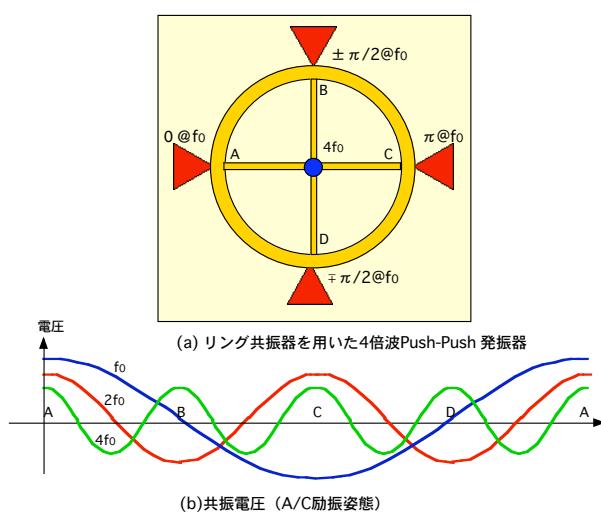


図 10. リング共振器を用いた第 4 次高調波 Push-Push 発振器

図 10 は、リング共振器を用いた第 4 次高調波 Push-Push 発振器の構成例である [3]。

リング共振器にはその対称性によって直交した縮退共振姿態が存在する。従って、直交した 2 つの基本周波数信号は互いに独立であり、従って互いの位相差も任意である。しかしながら、非線形回路である発振器においては、基本周波数の整数倍の高次高調波も常に存在するために、基本周波数以外の高次高調波では相互結合が生じる。従って、第 2 次高調波は隣接する負性抵抗間で結合が生じ、その結果、同図(a)に示す様に、隣接間では第 2 次高調波において  $\pi$  の位相差が自律的に生じる。この位相差  $\pi$  は、基本周波数( $f_0$ )においては  $\pm\pi/2$  の位相差に相当する。従って、式(3),(4)に示す様に Push-Push 発振原理に基づいて出力合成回路を対称性を維持して形成すれば、第 4 次高調波発振の Push-Push 発振器が実現できることを意味する。また、基本周波数信号を含む不要波を原理的に抑制することができる。

即ち、図中の A, B, C, D の各ポイントの電圧は、式(3)で表示できる。

$$\begin{aligned} V_A(t) &= \sum_n a_n e^{jn\omega_0 t} \\ V_B(t) &= \sum_n a_n e^{jn(\omega_0 t \pm \frac{\pi}{2})} \\ V_C(t) &= \sum_n a_n e^{jn(\omega_0 t + \pi)} \\ V_D(t) &= \sum_n a_n e^{jn(\omega_0 t \mp \frac{\pi}{2})} \end{aligned} \quad (3)$$

従って、これらの同相合成出力は式(4)となる。

$$V_{out}(t) = \sum_{A,B,C,D} V_n(t) = c_4 e^{j4\omega_0 t} + c_8 e^{j8\omega_0 t} + \dots \quad (4)$$

この発振出力は  $V_{out}(t)$ 、式(4)に示す様に第 4 次高調波とその整数倍の周波数成分を有する。

さらに、図 11(b)に示す高次高調波の共振波動分布を考慮すれば、同図(a)に示す出力回路を形成することによって、第 8 次高調波の Push-Push 発振器が実現できる [2]。この場合も基本周波数成分を含む不要波を原理的に抑制することができる。

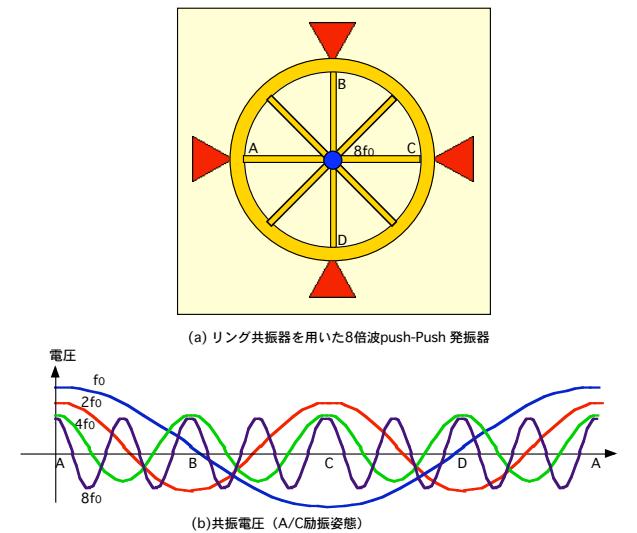


図 11. 第 8 次高調波 Push-Push 発振器の基本構成

### 3.4 n素子高次高調波 Push-Push 発振器への拡張

図 12 に示す様に、原理的には負性抵抗回路を  $n$  個一体化した  $n$  素子 Push-Push 発振器へ拡張することもできる。

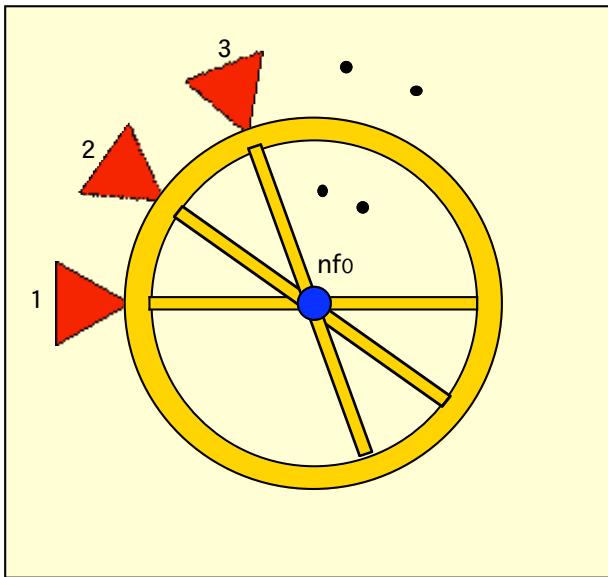


図 12.  $n$  素子を用いた高次高調波 Push-Push 発振器の基本構成

この場合、隣接する負性抵抗の発振ユニット間で相互位同期が自律的に形成され、その結果、隣接発振ユニット間の位相差は基本周波数において  $2\pi/n$  となる。従って、回路の対称性を保持しながら出力合成した場合、Push-Push 発振原理に基づいて基本発振周波数の  $n$  倍の高周波発振が実現できる。この場合も基本周波数を含めた不要高調波は原理的に抑圧することができる。

以上、マイクロ波一体複合化技術における共振電磁波動場を主役とすると共に、その波動場を積極的に活用して構成する高次高調波 Push-Push 発振器の主な特徴は以下の通りである。

- (a) 高次の共振電磁場を用いた高次高調波 Push-Push 発振するために、低周波数帯用の半導体デバイスと共振器によって大幅な高周波発振が簡易に実現できる。
- (b) 多素子デバイスによる共振電磁場の励振が可能するために、高出力かつ低位相雜音特性が実現できる。

(c) 共振電動系を介した構成であるために、能動部と出力部の設計が比較的容易である。また出力負荷変動の発振特性への影響も比較的小さい。

### 4. Push-Push 発振器の実施事例

前節で紹介した Push-Push 発振器のうちで、代表的な 2 種の Push-Push 発振回路の試作結果を以下に示す。

図 13 は、スロットラインのリング共振器を用いた第 2 次高調波出力の Push-Push 発振器(図 7 に相当)である [14]。ここでは、2 個の HEMT(Fujitsu FHX35LG)と厚み 0.8mm のテフロングラス基板を用いて、基本発振周波数( $f_0$ )8GHz で設計試作した回路である。

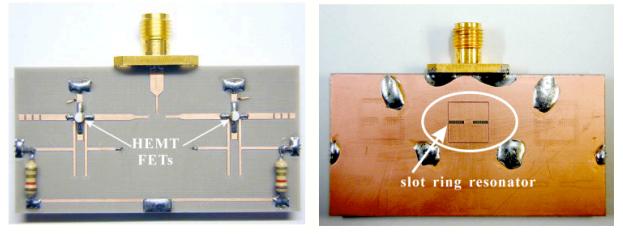


図 13. スロットリング共振器を用いた Push-Push 発振器

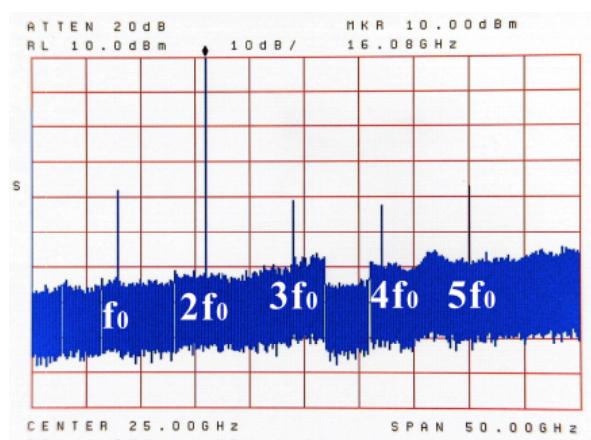


図 14. スロットリング共振器を用いた Push-Push 発振器の発振電力スペクトル

( $2f_0:16.0\text{GHz}$ )

図 14 は、その発振電力スペクトルであり、発振出力は +10dBm( $2f_0=16\text{GHz}$ )、基本周波数成分、

3倍波および4倍波成分の抑圧度は、それぞれ-37.5dBc、-40.0dBc および-42.2dBc と良好である。また、位相雑音は-121.3dBc(1MHz Offset)である。

図15は、マイクロストリップラインで構成したリング共振器を用いた第4次高調波 Push-Push 発振器(Quadruple-Push 発振器)(図10に相当)である[15]。使用デバイスは、同じく HEMT(Fujitsu FHX35LP)であり、基本周波数( $f_0$ )は 9GHz である。図16は Quadruple-Push 発振器の発振電力スペクトルであり、発振出力は 36GHz( $=4f_0$ )で +1.67dBm、位相雑音は-104.0dBc(1MHz Offset)である。また、基本周波数、2倍波、3倍波および5倍波の各不要波成分の抑圧度は、それぞれ -18dBc、-17.9dBc、-17.8dBc および-35.5dBc である。

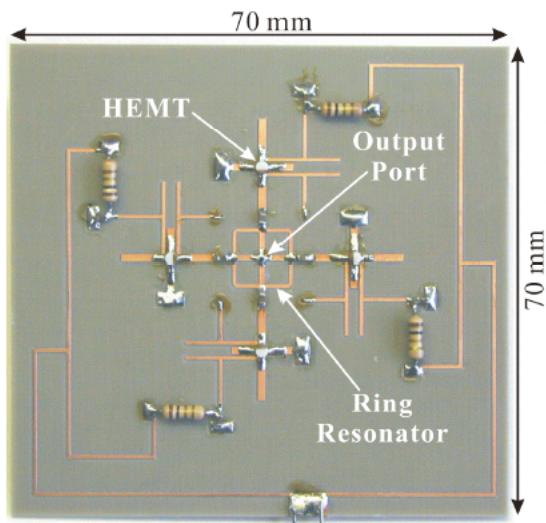


図 15. Quadruple-Push 発振器

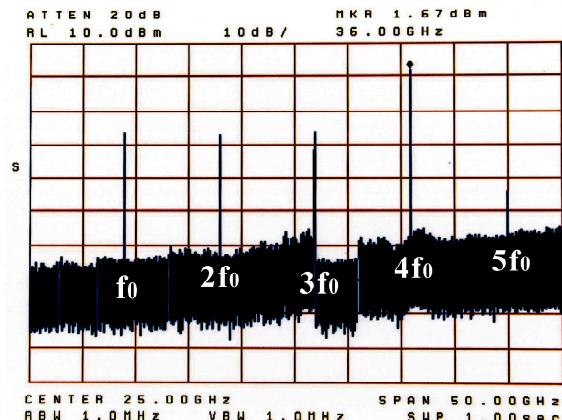


図 16. Quadruple-Push 発振器の発振電力  
スペクトル ( $4f_0=36.0$  GHz)

## 5. むすび

近年、仮想ヌル面(Virtual ground)を設定して小型簡易化したモノリシック Push-Push 発振器がミリ波帯でも報告される様になってきた。即ち、HBT 等を用いた差動クロス接続の発振回路出力を同相合成するという Push-Push 発振原理に基づいて、第2高調波を得るものである。また、小型共振器、負性抵抗回路、同相合成回路、さらには VCO 化のための可変容量素子、さらには分周回路までチップ上に形成した事例もある。これらの発振出力は基本発振周波数の2倍とするのが一般的である。今後、より一層の高周波化、広帯域周波数可変化および低位相雑音化と共に、チップサイズを左右する共振系の一層の小型化と併せて MEMS 等によるマルチバンド化等の可能性なども含めて当該技術の進展が期待される。

本講で概説したマイクロ波一体複合化の考え方に基づいた高次高調波 Push-Push 発振器は、特にミリ波帯や短ミリ波帯以上の超高周波発振とその発振電力向上にその効果が期待できる。その実現方法としては、モノリシック IC 化、MMIC チップと LTCC 等によるハイブリッド化など実施形態はいくつか考えられるが、その選択は送受機能モジュール全体としてアンテナ系や周辺機能回路とそれらの実装技術を含めた総合的な考察も併せて必要である。また、本講の第4次から第8次の高次高調波 Push-Push 発振は、汎用の半導体素子や市販の IC チップを用いることによって極めて簡易低コストなミリ波帯発振モジュールの実現可能である。即ち、低価格なマイクロ波帯用の汎用デバイスの適用によって、簡易なミリ波帯発振源が容易に構成できる。さらに、この簡易低コストな高周波発振の実現に加えて、高次高調波を用いたマルチバンド出力あるいは同期マルチポート出力、さらには発振と変調等の機能複合化なども期待される。また、共振回路上の波動場をアンテナ系の直接給電に用いるなど、様々な高周波機能モジュールの実現形態が想定できる。

## 文 献 :

- [1] 相川, “マイクロ波工学の展望,” 信学会誌, Vol. 83, No. 8, pp. 595-599, 2000.
- [2] M. Aikawa, E. Nishiyama and T. Tanaka, “Advanced Utilization of Microwave Resonant Fields and Its Applications to Push-Push Oscillators and Reconfigurable Antennas,” IEICE Trans. Electron, Vol. E89-C, No. 12, pp.1798-1805, Dec. 2006.
- [3] 相川, 西山, 田中, “平面回路におけるマイクロ波インテグレイションとその展開－マイクロ波電磁波動場の活用とその応用,” 信学論文誌 B, Vol. J89-C, No. 5, pp. 183-190, 2006.
- [4] J. Kim, S. Jeon, S. Moon, NY Kim and H. Shin, “A 12GHz GaInP/GaAs HBT VCO Based on Push-Push Output Extraction from Capacitive Common-Node,” IEEE MTT-S, Int. Microwave Symp. Dig., pp.1705-1708, June 2005.
- [5] T-P Wang, Z-M Tsai, K-J Sun and H. Wang, “Phase-Noise Reduction of X-Band Push-Push Oscillator with Second-Harmonic Self-Injection Techniques,” IEEE Trans. on MTT, Vol. 55, No. 1, pp. 66-77, January 2007.
- [6] R. Wanner, H. Schfer, R. Lacher, G. R. Olbrich and P. Russer, “A Fully Integrated 70GHz SiGe Low Phase Noise Push-Push Oscillator,” IEEE MTT-S, Int. Microwave Symp. Dig., pp.1523-1526, June 2005.
- [7] U. L. Rohde, A. K. Poddar and G. Bock, “The Design of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications,” John Wiley and Sons, 2005.
- [8] K. Kawahata, T. Tanaka and M. Aikawa, “A K-Band Push-Push Oscillator with High Suppression of Undesired Harmonic Signals,” IEICE Trans. Electron, Vol. E86-C, No. 8, pp. 1433-1437, August 2003.
- [9] 西山, 竹中, 相川, “直交偏波制御機能を有するマイクロストリップアンテナ,” 信学論文誌 B, Vol. J85-B, No. 9, pp. 1519-1525, 2002.
- [10] E. Nishiyama and M. Aikawa, “Polarization Controlled Microstrip Antenna,” IEEE, AP-S 2005.
- [11] 坂元, 西山, 相川, “可変容量素子を装荷した周波数連続可変制御アンテナ,” 映像情報メディア学会誌, Vol. 58, No. 7, pp.952-956, 2004.
- [12] S. Sasaki, E. Nishiyama, M. Aikawa, “Polarization Controllable Circular Slot Antenna,” Proceeding of ISAP 2005, pp. 1193-1196, 2005.
- [13] H. Xiao, T. Tanaka and M. Aikawa, “Push-Push Oscillator with Simplified Circuit Structure,” IEE Electron. Lett., Vol. 38, No. 24, pp. 1545-1547, Nov. 2002.
- [14] H. Xiao, T. Tanaka and M. Aikawa, “A Low Phase Noise Ku-Band Push-Push Oscillator using Slot Ring Resonator,” Proceeding of IEEE MTT-S Dig., pp.1333-1336, 2004.
- [15] H. Xiao, T. Tanaka and M. Aikawa, “A Ka-Band Quadruple-Push Oscillator,” IEEE MTT-S, Int. Microwave Symp. Dig., pp.889-892, 2003.