

# マイクロ波ミリ波平面回路技術の要点とその展開

—マイクロ波複合による電磁波動場の活用とその応用—

The technical points and the applications for microwave planar circuits and planar antennas

相川 正義

Masayoshi AIKAWA

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 and a couple of technical points for common use in microwave planar technologies, illustrating the practical techniques based on author's research and development so far. More specifically, the basic and common technical approach and the applications in both the microwave integrated circuits and the planar antennas are described.

## I. はじめに

マイクロ波工学の技術的特質は、対象となる動作周波数が高いが故にその波長が短かく、その結果として現実の伝送線路や回路・装置の物理寸法は概ね波長オーダーとなる。そのために、ハードウェア設計においては、Maxwellの電磁方程式に基づいた精密な電磁理論解析が必要となり、同時に伝搬定数や固有伝送状態等を正確に把握し、回路設計では分布定数回路として高精度に扱うことが必須となる。ここでは、所謂、マイクロ波ミリ波帯における平面回路に関する基礎的な技術ポイントを概説する。即ち、高周波送受信モジュールやマイクロ波集積回路の技術開発において、実務上、有用なポイントに絞って概説する。

本講座のキーワードは「電磁波動場」であり、それはマイクロ波平面回路技術の中核的存在、即ち、主役である。その主役に演じてもらう舞台装置は「広義のマイクロ波回路」（マイクロ波伝送線路、共振器、アンテナ等）と各種「デ

バイス」（半導体素子、回路素子、各種集積回路等）であり、さらにその舞台創りのしかけはそれらの「複合化」である。主役である電磁波動場をいかにスマートに登場させ、美しく変身しつつ目標とする理想の演目を演じてもらうか、その決め手は舞台創りのレベルに強く依存する。この講座では、その舞台創りにおけるしかけに相当する平面回路の基礎的要素技術を説明する。

次の第2章では、マイクロ波ミリ波帯で用いる各種伝送線路の複合化技術（両平面回路と呼ぶ）について、特に単層・多層の誘電体基板モジュールあるいは3次元MMICへの適用において有効な各要素技術を概説する。第3章では「広義のマイクロ波回路」と各種「デバイス」の複合技術について、それらの代表的な実施例を挙げてそれらの有効性を解説する。

先ず、舞台創りのしかけである「複合化」について本講座における意味を述べる。ここでは、

マイクロ波平面回路の性能・機能の向上とその簡易・小型化を指向した高周波技術の一アプローチを説明するが、その基本的考え方は、主役である電磁波動場の特質や特徴を最大限に活用することにある。目的とする高周波機能や性能向上の実現に必要な電磁波動場を構築するために、ここでは「マイクロ波複合技術」と呼ぶ技術概念を基盤とする。即ち、ここで言う「マイクロ波複合技術」とは、上述の「広義のマイクロ波回路」や様々な「デバイス」の構成エレメントを一体複合化することによって必要とする電磁波動場を形成する。さらに、その電磁波動場が持っている特質を最大限に活用して、目的とする回路機能やその性能の向上を図る。目的によっては、その電磁波動場を可変あるいは制御し、波動信号を演算処理することによって、いわゆる Reconfigurable な高周波帯ハードウェアを、さらにはスマートなマイクロ波ミリ波帯の新機能技術の開拓を目指す。

図 1 に、この「マイクロ波複合技術」の基本概念を示す[1]。ここでは、「広義のマイクロ波回路」や各種「デバイス」を意図する電磁波動場構築のためのコンポーネントとして、それらを一体的に「複合化」することによって、最終ゴールの高周波帯機能回路の開拓や高周波特性の向上を図る。これが「マイクロ波複合技術」の基本概念である。マイクロ波ミリ波帯電磁波動場の特質の中で、時間軸ならびに空間軸の良質なコヒーレント性が最も重要な要件である。高周波ハードウェアを構築する立場から見ると、手ごろな波長サイズの電磁波動場であるために波動場の形成が比較的容易である。それに加えて、電磁波動場形成のための各コンポーネントの多様な組み合わせ（複合化）によって構築する電磁波動場は自在に形成可能であること、さらにはその電磁境界条件の変化によって電子的にコントロール可能であることなど、マイクロ波ミリ波帯は上記技術概念の実現性や制御可変性に適した周波数バンドであると言える。

その電磁波動場活用の方法として、以下の 3 つに大別する。

- (方法 1) 形成した電磁波動場そのものの特質を直接積極的に利用する。
- (方法 2) 電磁波動場の境界条件を電子的に直接制御し、構築した可変電磁波動場を利用する。
- (方法 3) 形成した電磁波動場上の波動を直接処理して波動信号処理機能を実現する。

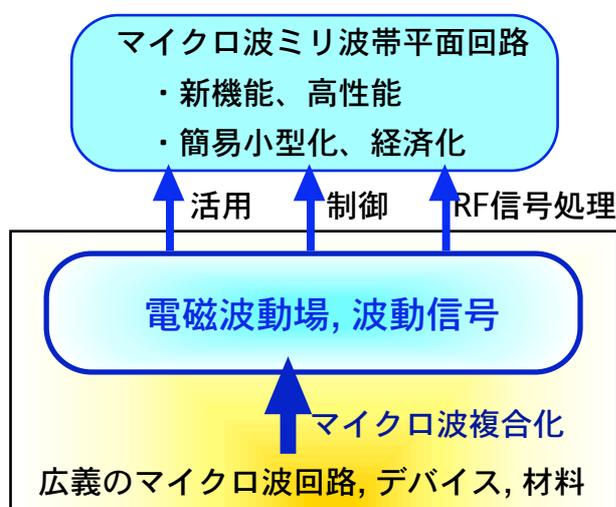


図 1. マイクロ波複合技術の概念

特に、広義の「マイクロ波回路」と半導体素子との一体複合化は、電磁波動場の境界条件の直接可変制御を可能とする。即ち、(方法 2)の電磁波動場の電子的コントロールが可能となり、各種のアクティブアンテナや可変 RF フィルター等の実現、さらには(方法 3)の RF 帯直接波動信号処理技術を実現することができる。

## II. マイクロ波伝送線路の複合技術 (両平面回路技術) [2]

マイクロ波伝送線路の複合技術（ここでは「両平面回路」技術とも呼ぶ）は、主に前述の活用方法 1 に相当する。即ち、マイクロストリップライン、コプレーナライン、スロットライ

ンさらにはそれらの結合線路や様々な変形線路を誘電体基板の両面または多層面に形成し、それらの伝送姿態の特徴を機能的に組み合わせ、回路機能実現と設計自由度拡大を追求することを目的としたマイクロ波ミリ波集積回路技術である。この基本構成は、後年、ユニプレーナ MMIC(コプレーナ MMIC)、多層あるいは3次元 MMIC 等へと継承・発展している。この技術の特徴は、マイクロストリップラインだけのマイクロ波集積回路(MIC)と比較した場合、以下の様な特徴がある。

- (特徴 1) 多層レイヤの回路構成であり、設計自由度が大幅に高くなるので高集積化と小型簡易化に優れている。
- (特徴 2) 平衡型線路と不平衡型線路の複合化によって、直列・並列の分岐合成回路等が多様に構成できる。
- (特徴 3) 同様の理由により、平衡型マイクロ波機能回路も容易に実現できる。
- (特徴 4) 密結合線路の形成も容易であり、また、線路パラメータの設計自由度も高い。
- (特徴 5) 直交伝送姿態の利用も容易となり、回路の簡易小型化と機能向上に有効である。

以下、両平面回路で構成する基本回路として、各種マイクロ波伝送線路、分岐合成回路、異種線路変換回路さらには方向性結合機能回路などについて、それぞれの代表的な事例を紹介する。

### 2.1 マイクロ波伝送線路

周知のマイクロストリップライン、スロットラインおよびコプレーナライン以外に、様々な構造の線路が利用できる。主なマイクロ波線路を図 2 に示す。この中で、(b)コプレーナラインはスロットライン結合線路と見なすこともできるが、その場合は3線条対称構造の直交伝送姿態の Odd モード伝送線路と解釈することが出来る。また、(f)スロット結合マイクロストリップラインも同様である。また、図中の(e)

は、コプレーナラインの変型伝送線路(ここでは変型コプレーナラインと呼ぶ)も、左右対称の3導体から構成しており、所謂、Even モードならびに Odd モードの直交伝送姿態が存在可能である。従って、コプレーナラインと同じく、この変型 CPW も同一線路で2つの独立な高周波信号が伝送可能であり、応用上の価値が高い。即ち、直交伝送姿態を用いて同一線路で2つの独立な信号伝送が可能である。実際の回路構成においては、多層構造も含めてこれらの線路を自在に組み合わせることができる。

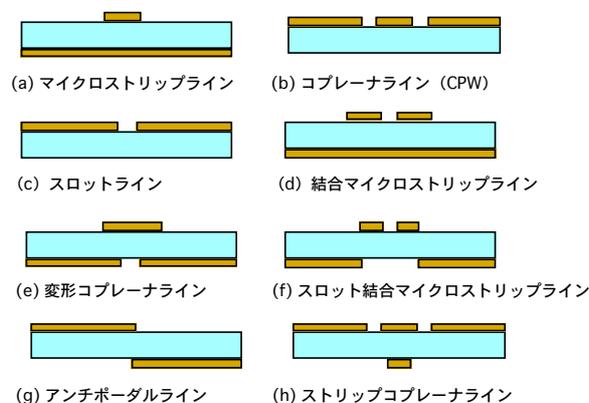


図 2. 両平面回路における主な伝送線路

### 2.2 分岐合成回路

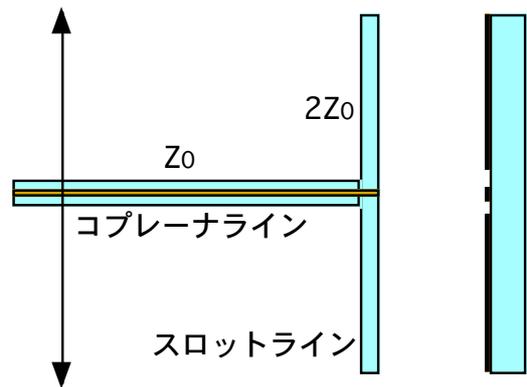
主な分岐合成回路を表 1 に示す。このうち、平衡線路であるスロットラインから分岐する (d) ~ (f) が直列(逆相)分岐合成回路であり、残りは並列(同相)分岐合成回路である。このなかの代表的な構成例として、表 1 中の (b)、(d)、(e)、(h)を図 3 に示す。

表 1. 主な分岐合成回路

分岐端子 合成端子	ストリップライン	スロットライン	コプレーナライン
ストリップライン	(a)並列	(b)並列	(c)並列
スロットライン	(d)直列	(e)直列	(f)直列
コプレーナライン	(g)並列	(h)並列	(i)並列

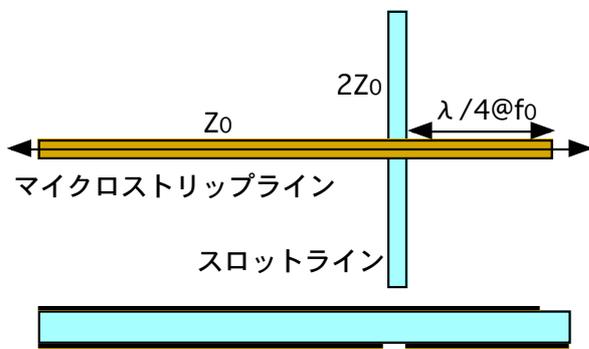
この分岐合成回路の着眼ポイントは、スロットラインの平衡伝送姿態とマイクロストリップライン等の不平衡型伝送姿態の特徴を複合

して活用できることである。実用上、この直列分岐合成と並列分岐合成の組み合わせ利用が大変有効である。例えば、図4はパッチアレーアンテナへの応用例であり、給電回路に並列分岐合成回路と直列分岐合成回路を交互に繰り返し用いることおよび鏡面对称の逆相給電によってその給電回路を極めて簡易に形成することができる。その結果、給電回路のインピーダンス整合が不要となること、整合回路からの不要放射を抑圧できること、さらにはこの鏡面对称逆相給電は不要な直交偏波成分を-35dB以下と従来から大幅に抑制できることなど、優れた性能向上が実現できる。

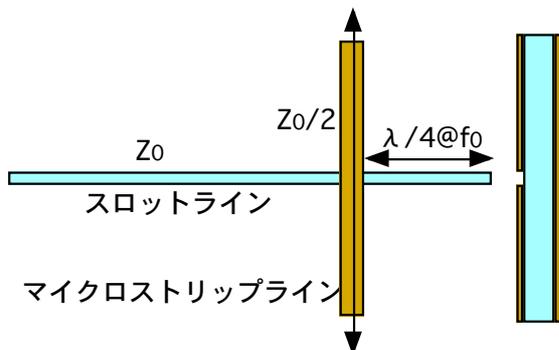


(h) コプレーナ・スロット並列分岐合成回路

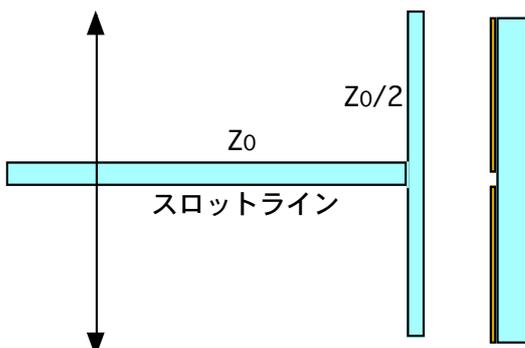
図3. 主な分岐合成回路



(b) ストリップ・スロット並列分岐合成回路



(d) スロット・ストリップ直列分岐合成回路



(e) スロット・スロット直列分岐合成回路

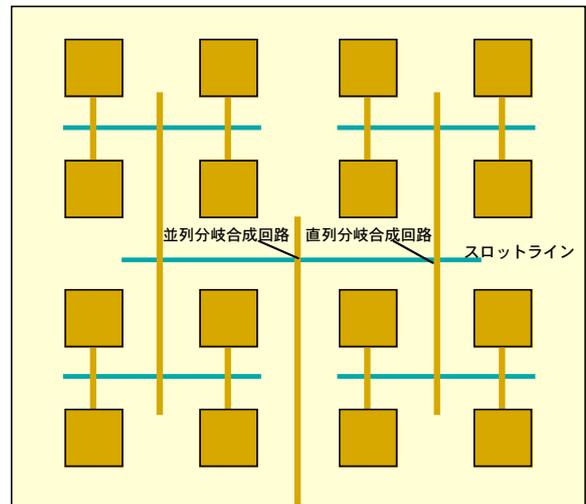


図4.16 素子パッチアレーアンテナ構成例

他の応用例としては、図5に示す正帰還型 Push-Push 発振器がある。ここでは、直列分岐合成回路と後述の180度ハイブリッド回路(マジックTとも呼ぶ)を効果的に導入している。この Push-Push 発振器においては、誘電体基板裏面にスロットライン、表面にマイクロストリップライン、変型 CPW および2個のRF増幅器を配した大変簡易な構造である。図中にも示す通り、直列分岐回路とマジックTによって Push-Push 発振動作を正確に実現することができる。直列分岐回路とマジックTの直並列合成機能によって基本発振周波数( $f_0$ )で互いに逆相の2つの正帰還同期発振を自律的に励起させる。即ち、平衡型伝送線路であるスロット

ラインによって、左右の正帰還発振ループは自律的に逆相の位相同期となる。同時に、直並列合成回路で構成したマジックTによって、所望の第2高調波 ( $2f_0$ ) を効率よく出力させることができる。ここで第2高調波等の偶数次高調波はRF増幅器から同相で出力されるのでマジックT中の変型コプレーナラインのEvenモードとなり、奇数次高調波は互いに逆相でOddモードとなるので、不要な奇数次高調波成分は原理的に完全に抑制することができる。その結果、例えば20GHz帯での試作実験結果では、不要波抑圧度-40 dBc以上の良好な特性を実証している。なお、この発振器は正帰還ループのスロットラインが共通であるので、広帯域な周波数可変制御やFSK変調機能などの機能複合化も容易に実現できる。

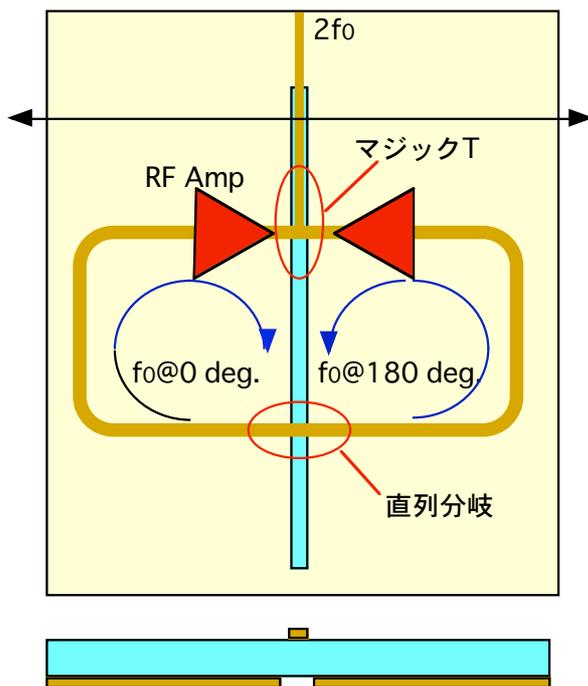


図 5. 正帰還型 Push-Push 発振器の構成例

### 2.3 線路変換回路

両平面回路では、異種線路間の伝送モード変換が重要かつ不可欠である。それらも電磁結合やビアホールあるいはエアブリッジを用いて自在に形成できる。図6に主な変換回路の例を示す。ここで(1)(2)と(5)図中のコプレーナライン伝送姿態は、それぞれその直交モードの

OddモードとEvenモードである。

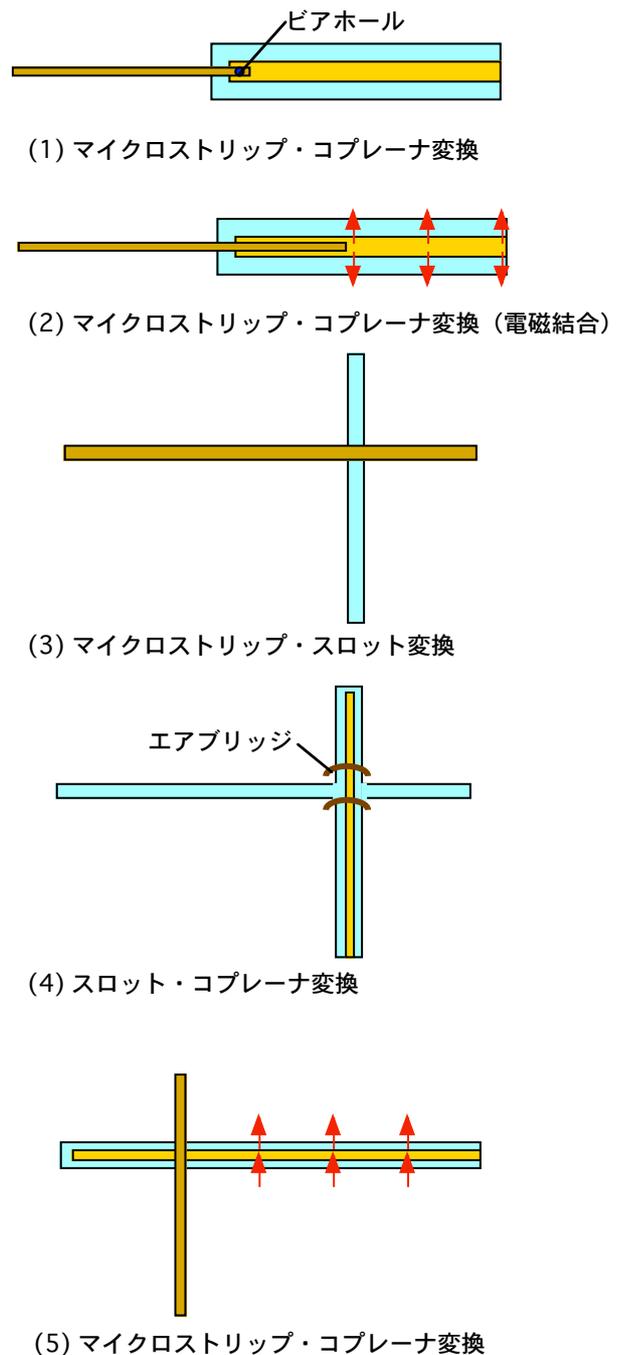


図 6. 線路変換の構成例

### 2.4 電力分配合成回路

図7は、両平面回路による $\pi/2$ 分布結合型ハイブリッド回路の構成例である。(a)は、マイクロストリップ結合線路のEvenモード特性インピーダンス値の増加によって、3dBの密結合を実現する事例、(b)は、周知のRonde型ハイブリッド回路である。(c)は2層誘電体基板で構成した広面結合のハイブリッド回路であ

り、入出力ポートが両面に配置できる特徴があり、バトラーマトリックス（バタフライ回路）給電系アレーアンテナに必要な線路交差を除去することも可能である。

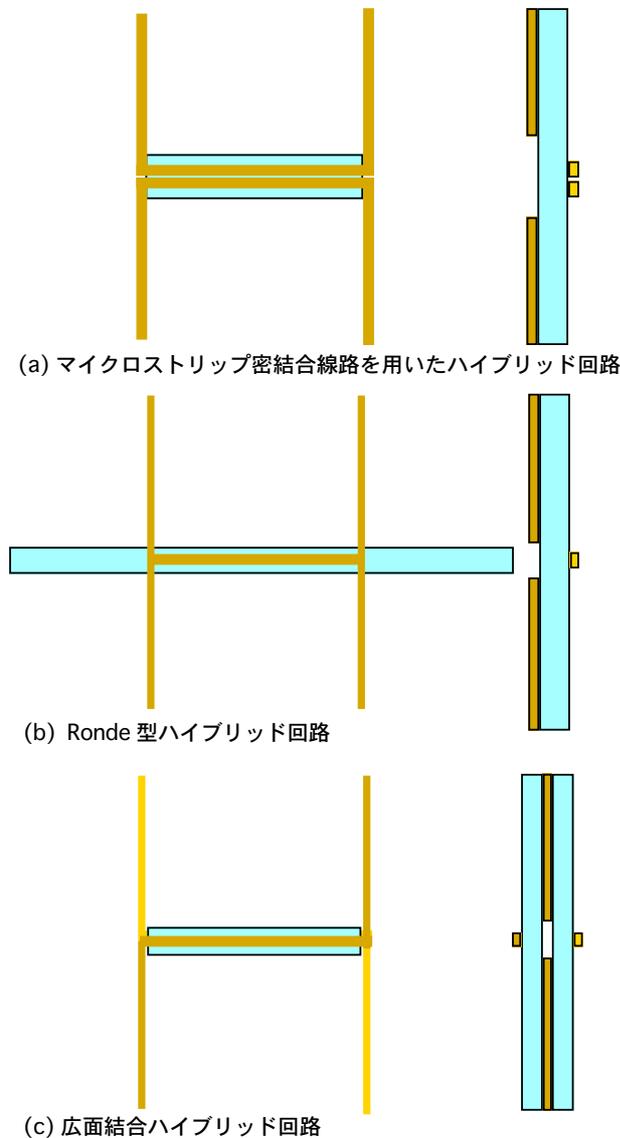


図 7.  $\pi/2$  分布結合型ハイブリッド回路

図 8 は、直列分岐合成回路と並列分岐合成回路を一体複合化した 180 度ハイブリッド回路（マジック T）の構成例である。この実施例で示す様に、簡易な回路構造にも拘らず、周知のラットレース回路に比べると大幅な広帯域の分配合成特性であり、かつ正確な位相特性を有している。この構成原理に基づいて、前述の直列及び並列の分岐合成回路の複合化によって多様なマジック T が構成できる。図 9 はその構

成例であり、(a)はコプレーナラインとスロットラインで構成した回路である。ここではコプレーナライン（結合スロットライン）の Even および Odd モードの直交伝送姿態を用いている。同図(b),(c)の構成例においても、同様にコプレーナラインの直交伝送姿態を活用している。

その他、スロットラインによるラットレース回路やブランチラインハイブリッド回路、スロット結合線路を用いたウイルキンソン型分岐合成回路など、伝送線路の選択と複合化によって様々な分岐合成回路が実現できる。

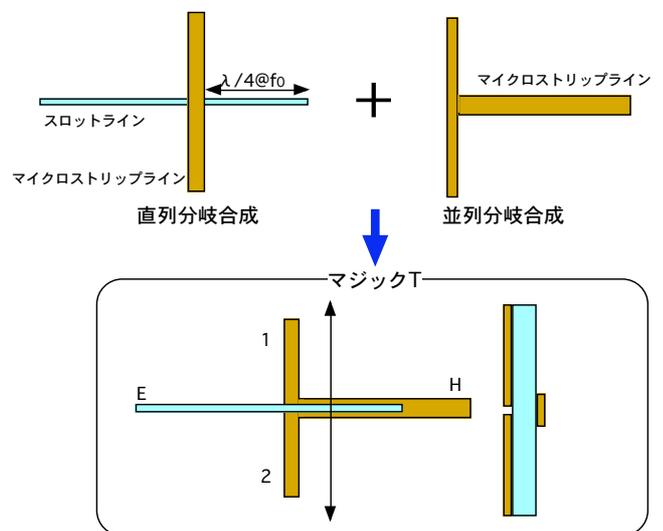


図 8. 180 度ハイブリッド回路（マジック T）の基本構成

### III. マイクロ波回路とデバイスの複合化

前述の「マイクロ波複合技術」の技術概念に基づいて、「広義のマイクロ波回路」や各種「デバイス」を自在に複合化して、所望の電磁波動場を形成し、さらに制御して、RF 直接信号処理するなど、多彩なマイクロ波平面機能回路を実現することができる。即ち、第 1 章で述べた電磁波動場活用の（方法 2）さらには（方法 3）に相当する機能実現が可能となる。本章では、マイクロ波機能回路として、マイクロ波伝送線路、共振回路さらに平面アンテナについて、それぞれデバイスとの複合事例を紹介する。

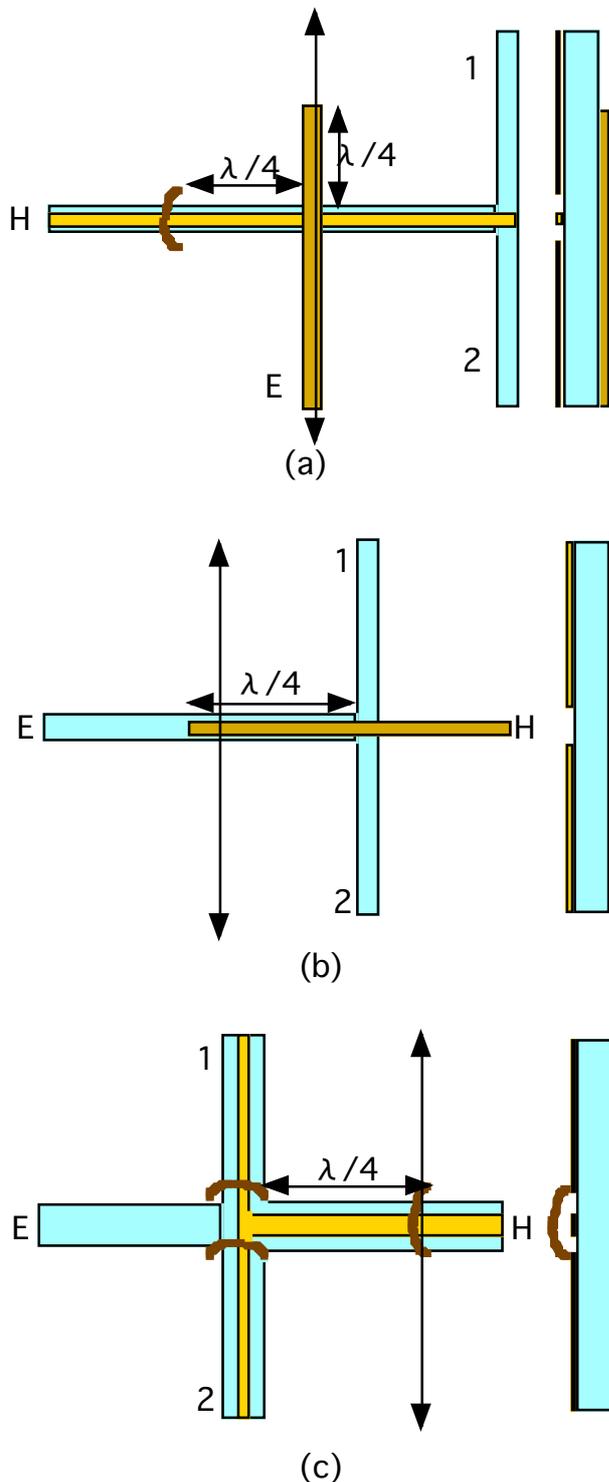


図9.マジックTの構成例

### 3.1 マイクロ波伝送線路とデバイスの複合化

一般に機能回路は伝送線路と半導体素子を結合して構成するので、ここで取り立てて紹介する必要はない。従って、ここでは前述の両平面回路技術の特徴を活用したマイクロ波乗算機能回路の事例を示すに留める。図10は一重平衡型RF乗算器であり、(a)と(b)は平衡型伝

送線路であるスロットラインと不平衡型伝送線路のマイクロストリップライン及び非線形デバイスを複合化した構成である。また(c)は、スロットラインを用いたリング状構造の回路であり、極めて簡易に実現できる乗算回路である。このうち、(a)と(c)は、低周波信号端子をスロットライン内導体の中心からワイヤボンディングなどでポート形成ができれば電磁界分布の周波数特性の違いから実質的に二重平衡型回路となる。また、(b)の回路ではRF帯で $\lambda/4$ 長の短絡スタップで低周波信号と分離しているので、これも二重平衡型に近い特性が実現できる。送受信モジュールの周波数変換回路、RF帯直接PSK変調器やRF帯のダイレクト位相検波器などに広く利用可能なマイクロ波乗算器である。その他、ユニプレーナ型MMICにおいては、FETと共平面伝送線路を一体複合化した「LUFET」と呼ぶ電力分配合成回路や広帯域なマジックTも報告している[3]。また、3次元MMICにおいては、多数のHEMTを微細なマイクロストリップラインに一体複合化した周波数可変ブランチラインハイブリッド回路の実証例もある[4]。

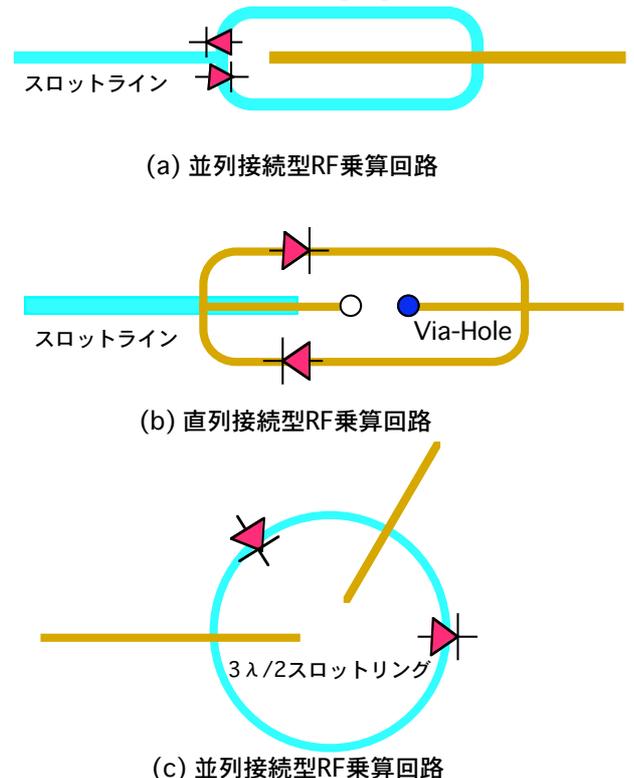


図10.一重平衡型RF乗算回路

### 3.2 共振回路とデバイスの複合化

#### —高次高調波 Push-Push 発振器の開発経緯—

前述の「マイクロ波複合技術」の基本概念は、高周波帯発振器の基本構成にも相通じている。即ち、高周波発振器開発の検討過程で Push-Push 発振器の原理と既存回路の各要素の役割について一般的な視点から見直しを試みた。その結果、その構成要素の中の共通共振器は逆相同期発振と所望の電磁共振波動エネルギーを蓄える役割、負性抵抗は所望の共振波動場を選択的に励振するべく共振回路の適切な位置に装荷されると同時にその共振波動場を介して互いに相互同期して波動場を形成する役割、発振出力回路はその共振波動場から所望の高次高調波を選択的に取り出す役割であると分析出来る (図 11)。

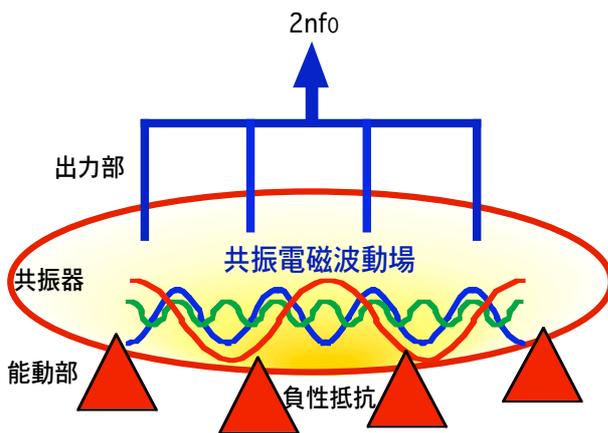


図 11. 高調波発振器構成の基本概念

一旦、その様に Push-Push 発振器を「抽象化」して捉えてみると、「マイクロ波複合技術」の概念に基づいて、Push-Push 発振回路に構成上の自由度を獲得させることが出来る[5]。その結果、従来の第 2 次高調波発振に限らず、第 4 次さらには第 8 次の高次高調波 Push-Push 発振器実現への道が自ずと拓けて来る。例えば、 $\lambda/2$  長の線路共振器を用いた場合、図 12 に示す様に負性抵抗素子の装荷位置や出力回路の接続ポイントとその数によって第 4 次高調波を選択的に取り出すことが出来る。同様の原理に基づいてリング共振回路を用いた場合の第 4 次と第 8 次高調波発振器等の基本構成を図 13

に示す。同図(c)の写真に示す様に、市販の X 帯 HEMT を 2 個用いて V 帯(50GHz 帯)出力の第 8 次高調波発振を実現することも出来る。これらの実証事例でも明らかな様に、主役は共振器上の電磁共振波動場であり、負性抵抗は所望の高次高調波を含む電磁波動場の励振がその役目であり、出力回路は共振波動場から所望の高調波を選択抽出する役目を担っている。以上の経緯に示す様に、既存技術について一歩視点を高めて考察する「抽象化」思考を行うことでその技術の本質的把握レベルを高めると同時に、抽象化思考で捉えた新たな世界観は再び現実に戻って考察するプロセスにおいて新たな発想を創出するトリガとなりうる。

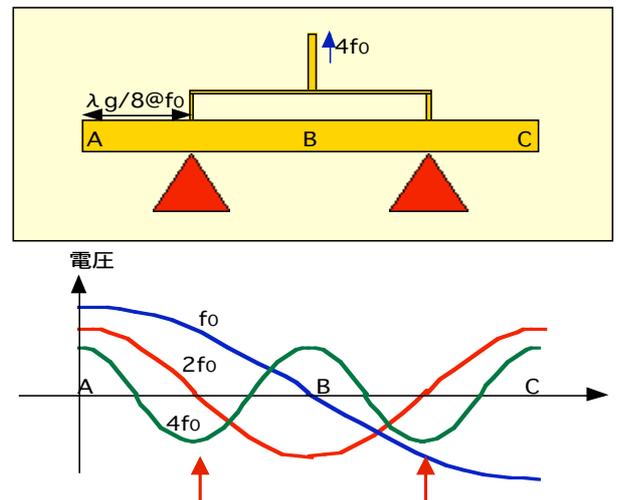
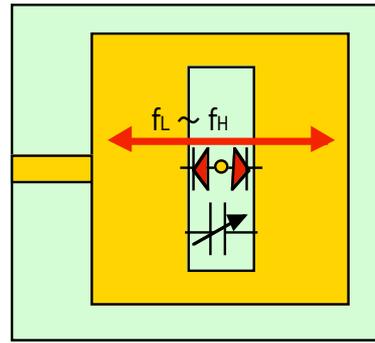


図 12. 第 4 次高調波 Push-Push 発振器

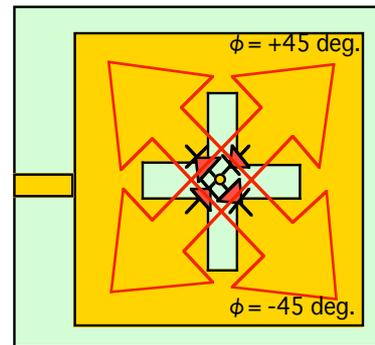
### 3.3 平面アンテナとデバイスの複合化

マイクロストリップ平面アンテナやスロット平面アンテナは、簡易な構造で製作も容易であるために、様々なシステム応用が期待されている。また、多様なシステムへ向けて様々な機能や性能実現のニーズが多様化している。平面アンテナは一種の空間開放型の共振器と見なすこともできるが、これに前述の「マイクロ波複合技術」の概念を適用すると、様々な機能アンテナの実現可能性が見えてくる。例えば、平面アンテナ構成導体にダイオードや IC 等の半導体素子を直接装荷することによって、アンテナ共振波動場の

境界条件を可変し制御する道が開けてくる。例えば、元来、狭帯域特性のパッチアンテナ導体にバラクタダイオードを装荷することによってその共振周波数を可変にすることができる。また、スイッチング素子の装荷によって直交偏波の切り替え機能を実現することも出来る(図14)。さらに、直交共振モードを平衡非線形デバイスで結合してその乗算出力電圧を制御することによって直交共振モードの位相差を制御することも可能である。この原理を用いて、直交円偏波の切り替え機能を有するパッチアンテナも実現することが出来る[6]。これは、アンテナ上の直交波動の波動信号処理と見なすことも出来る。

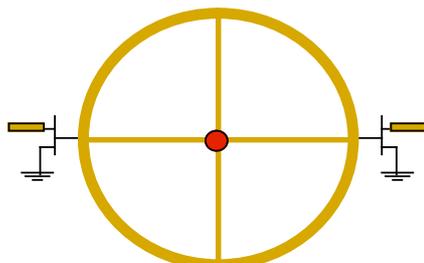


(a) 周波数可変パッチアンテナ

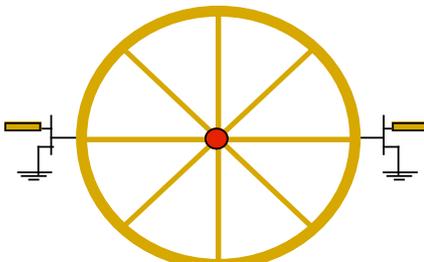


(b) 直交直線偏波切換えパッチアンテナ

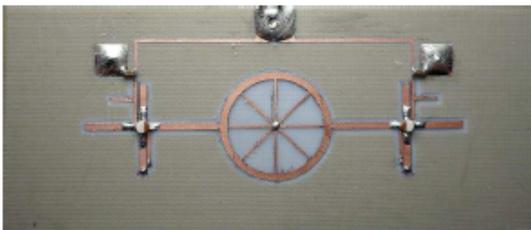
図14. アクティブパッチアンテナ



(a) 第4次高調波発振器



(b) 第8次高調波発振器

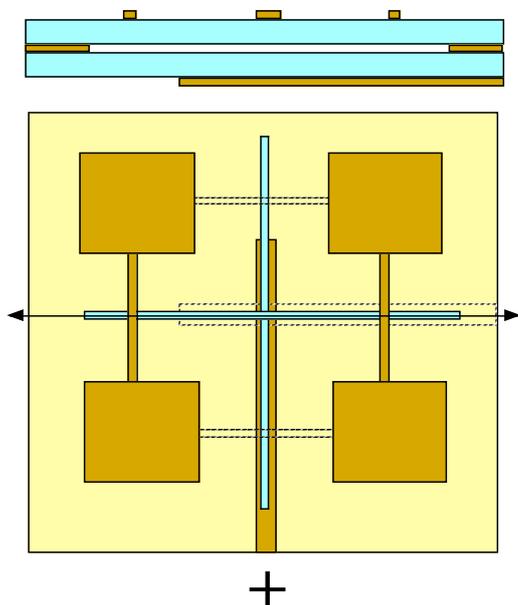


(c) X帯HEMT使用の50GHz帯第8次高調波発振器

図13. リング共振器を用いた高次高調波 Push-Push 発振器の基本構成とV帯試作回路

また、平面アンテナ素子導体と半導体素子の一体複合化に限定する必要はなく、アレー化してその給電回路系にマイクロ波機能回路を組み込むことも出来る。例えば、直交直線偏波識別や円偏波の右旋左旋識別などが可能な機能アレーアンテナの実現も可能である。これらは通信系に限らず、各種のRFセンサーやレーダモジュール、さらにはレクテナ技術等への幅広い応用が期待される。例えば、図15は、両平面回路技術を活用とした直交励振機能を有するアレーアンテナである。この事例は誘電体2層基板の構成であり、優れた直交励振を可能としているのは、スロットラインとマイクロストリップラインの伝送姿態の直交性に基づいているからである。これにRFスイッチや $\pi/2$ ハイブリッド回路を複合化することによって、直交偏波同時共用機能や直交偏波切り替え機能アンテナなどを構成することが出来ると共に、

これらにVCO等の発振系やRF直接検波受信系等を複合化することによってFM-CWレーダやポラリメトリックセンサーなどへ展開することも可能である。



スイッチ回路、 $\pi/2$ ハイブリッド回路、VCO、RF乗算回路など

図 15. 直交偏波励振アレーアンテナと機能複合

#### IV. むすび

平面回路は、2次元あるいは2.5次元の構造であるが故に、LSI等と同じく製作上は量産性に適している。しかしながら、一方では本質的に3次元の電磁波動場を主な対象とするマイクロ波工学や関連技術の装置設計においては、それが構成上の制約ともなる。本講座で概説した「両平面回路」やマイクロ波回路やデバイスの複合化という技術アプローチは、平面回路が持つ構造上の制約を克服して設計自由度を高めること、さらにはその制約を超えて新たな高周波機能の開拓や装置の簡易化・小型化等のブレークスルーとすることを目的としている。即ち、異種伝送線路間の電磁結合やその複合効果、マイクロ波回路とデバイスの一体複合化による電磁波動場活用の3方法は、高周波帯における新機能開拓や装置簡易化を実現する有効な方策である。やや独断偏向的な記述となり講座の所期の目的を果たす内容になったかどうか、

いささか心もとない感がするが、特に若手技術者の皆様にとって少しでも業務の参考になれば幸いである。

最後に、著者から助言することをお許しいただけるならば、3.2節のPush-Push発振器の検討経緯でも述べた様に、抽象化過程の思考と現実レベルの検討を意識してサイクリックに実践することは、課題解決に限らず新たな発想の創出にも有効である。言うまでもなく、誰もが生得的に保持している人間の高度な思考プロセスにおいては、意識するかしないに関わらず、様々な局面で同様な思考をしていると思われる。特に検討対象がますます複雑かつ広範雑多な情報の中で新技術の開拓や課題解決に取り組む様な場面では、この帰納法的思考を中心とした抽象化と演繹法的検討による現実展開を意識して反復するアプローチは、効果的である。なお、帰納法や演繹法が持つ欠点（認識や情報の限界、先入観や固定観念）を意識しつつ、ダイナミックに実践することが大切である。

#### 【参考文献】

- [1]相川, 西山, 田中, “平面回路におけるマイクロ波インテグレーションとその展開 -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.
- [2] M. Aikawa and H. Ogawa, “Double-Sided MIC's and Their Applications,” IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. Vol. MTT-37, No. 2, 1989.
- [3] T. Tokumitsu, S. Hara, T. Takenaka, and M. Aikawa, “Divider and combiner Line-Unified FETs as basic circuit function modules - Part I,” IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-38, No.9, 1990.
- [4] 田中,西川,相川, "3次元MMIC準分布定数線路を用いた小型化ブランチラインハイブリッド回路,"電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J89-C, No. 5, pp. 249-258 2006.
- [5]H. Xiao, T. Tanaka and M. Aikawa, “Push-Push Oscillator with Simplified Circuit Structure,” IEE Electron. Lett., Vol. 38, No. 24, pp. 1545-1547, 2002.
- [6]E.Nishiyama and M.Aikawa, “Circular Polarization Controllable Microstrip Antenna,” Proceeding of 2007 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, pp.5195-5198, June 2007.