

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：52604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06407

研究課題名（和文）メタマテリアル技術を用いたリコンフィギュラブルRFスイッチの開発

研究課題名（英文）Development of Reconfigurable RF Switch Based on Metamaterials

研究代表者

水谷 浩（Mizutani, Hiroshi）

サレジオ工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：10589914

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではコグニティブ無線を安価に実現するための鍵となる技術として「2次元切替スイッチ」を提案した。メタマテリアルのアクティブ化の技術を用いて、時間ドメインでのON/OFF切り替え動作に加え、周波数ドメインでの切り替えが可能となる。GaN MMICにて回路動作の原理的実証を行った。さらに、周波数切替範囲を拡大するためにアクティブ・リフレクタを用いたリコンフィギュラブルスイッチ回路を提案した。GaN MMICにより原理的動作実証を行った。提案した回路の理論構築を行い、当初の研究目的を達成した。研究成果は2×2次元スイッチ回路の提案を生み、原理的実証まで成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

IoT（Internet of Things）および5G（第5世代）無線通信で問題となっている周波数の逼迫を解決するため、最適な周波数を自動選択する「コグニティブ無線」技術の実用化が期待されている。本研究からなるリコンフィギュラブルRFスイッチ回路技術を創出・実証・理論化することは、周波数軸と時間軸の切り替え機能を持つ素子を1素子で安価に実現できる点で、逼迫する周波数帯域を自在に切り替えてコグニティブ無線を安価に実現する重要な技術開発であり、本研究の成果はコグニティブ無線の実用化加速の技術的な引き金となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, a novel key technology was proposed for realizing Cognitive Radio with a low cost, which is called a two-dimensional change-over switch. By using the active metamaterial technique, both the time domain switching and the frequency domain switching are available. GaN MMIC introducing this technique demonstrated the basic circuit operation. Furthermore, to improve the frequency switching range, a novel active reflector technology was proposed and a reconfigurable switch GaN MMIC was successfully demonstrated. The circuit theory of two-dimensional change-over switch was constructed. The initial goal of this study has been achieved.

研究分野：マイクロ波・ミリ波回路

キーワード：スイッチ GaN MMIC リコンフィギュラブル 5G コグニティブ無線

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

IoT (Internet of Things) および 5G (第 5 世代) 無線通信では通信速度の高速化が必須となり周波数の逼迫が問題となっている。この解決法として、刻々変化する通信環境の中で既存の周波数の中から最適な環境にある周波数を自動的に選択し使用する「コグニティブ無線」技術の実用化に大きな期待が集まっている (総務省 平成 26 年電波政策ビジョン懇談会 最終報告書)。

一般に、無線通信システムには RF スイッチが必須である。現在技術でコグニティブ無線を実現するためには時間領域の ON/OFF をする広帯域スイッチと、周波数の切り替えをするリコンフィギュラブル・フィルタ (RCF) の 2 素子で構成する必要があり、コスト高が懸念される。RCF は未だ世界中で研究中のためコグニティブ無線は実用化には至っていない。

これに対し筆者は、等価回路の直列容量を FET で置き換えたアクティブ右手/左手系複合 (CRLH) 線路の提案と実証 (Metamaterials, pp.169-171, Sept. 2013) や、等価回路の直列容量をバラクタ・ダイオードで置き換えたアクティブ CRLH 線路の提案と実証 (ICEAA, pp.434-437, Aug. 2014) において、CRLH 線路の真性領域を構成する容量素子を FET で置き換えることによって、メタマテリアルのアクティブ化に関する成果を得てきた。

従来のスイッチ動作では一定の周波数で時間領域のみの ON/OFF を行っていたが、これまでのメタマテリアルのアクティブ化の研究成果から周波数軸での切替という全く新しいスイッチの着想を得た。本研究からなる新しいスイッチでは、時間ドメインでの ON/OFF 切り替え動作に加えて、周波数ドメインでの切り替えが可能となり、コグニティブ無線で必要とされる自由な周波数選択機能を同時に提供できる。従来は 2 素子で構成されたものが、本研究の成果によって「リコンフィギュラブル RF スイッチ」1 素子で安価に構成することができる。本研究からなるスイッチ回路はメタマテリアル技術を用いて左手系の帯域通過フィルタ (BPF) と通常の右手系の BPF を FET に印加するバイアス電圧によって信号を通過する周波数帯域を切り替えることが可能となし、従来通り周波数固定で ON/OFF 動作も可能である。

このように、本研究の成果により、従来の時間ドメインでの ON/OFF 切り替え動作に加え周波数ドメインでの切り替えが可能となり、コグニティブ無線で必須の時間領域と周波数領域の縦横な選択が 1 素子で提供できるため安価に実現可能となり、コグニティブ無線の実用化加速の技術的な引き金となることが期待される。

2. 研究の目的

本研究では周波数の切り替えも可能なリコンフィギュラブル RF スイッチを提案・実証し、その回路理論を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

CRLH 線路の並列容量も FET で置き換えることで、直並列の FET のバイアス電圧の組み合わせによりメタマテリアルの左手系領域 帯域通過フィルタ (BPF) と通常の右手系領域 BPF を周波数領域で切り替えることができ、さらに時間領域での ON/OFF 切り替えができる、新しいスイッチ回路ができることを見出した。従来の技術の範囲で異なる周波数に切り替えて通信を行う場合、広帯域スイッチと、RCF の 2 つの素子で構成する必要がある。これに対し本研究によるスイッチ回路は、メタマテリアルに FET を組み込んでアクティブ化することで左手系領域と右手系領域のそれぞれの BPF のカットオフ周波数を変化させ、時間領域の ON/OFF と通過帯域の切り替え機能を 1 素子で安価に実現できる。このように CRLH 線路の等価回路の

並列容量を FET で置き換えることで帯域切り替え型 RF スイッチ回路を開発・実証する。

4. 研究成果

(1) 原理的実証

本研究では時間軸と周波数軸で切り替え可能なスイッチを「2次元切替スイッチ」と呼ぶことにする。図1に2次元切替 SPST (Single Pole Single Throw) スイッチ回路の一般例を示した。図1の四角い点線は、2次元切替スイッチの単位回路であり、単位回路が直列に複数個接続した回路が一般的な2次元切り替えスイッチ回路である。この単位回路は、CRLH 線路の単位回路のうち直列容量と接地容量を、それぞれ高抵抗を介したゲートバイアス線路を有する FET (以下「2端子 FET」と呼ぶ。) で置き換えた回路である。(高抵抗を介したゲートバイアス線路を有する FET を高周波 RF 信号から見るとソースとドレインのみの2端子素子として扱うことができるため「2端子 FET」と読んでいい。) 本研究で提案した単位回路は、直列 FET のゲートバイアスと接地 FET のゲートバイアスを別々に印加することができるようになっている。RF スイッチにおいて、2端子 FET にはオープンチャネル状態とピンチオフ状態の二つの状態があるため、2次元切替スイッチ回路は全部で4つのバイアス状態が存在する。

図2は2次元切替スイッチの原理的実証用 GaN MMIC のチップ写真である。低挿入損失と高アイソレーションを確保するため、単位回路の2段構成とした。図2に示した2次元切替スイッチ MMIC の実測した周波数特性を図3に示した。図から明らかなように、8.5 GHz と 26.6 GHz の二つの周波数帯で、挿入損失が 1.2 dB と 1.6 dB、アイソレーションが 15 dB 以上および 13 dB 以上をそれぞれ有するスイッチ動作を示した。このように従来通りの時間軸に加え、周波数軸でもスイッチ動作が確認でき、2次元切替スイッチの原理的実証ができた。

(2) 周波数切替範囲拡大技術の検討

本提案回路技術が実使用に耐えるためには、リコンフィギュラブル・スイッチとして切替できる周波数の範囲を知り、その範囲を最大限拡大する必要がある。まず、本提案回路に FET の代わりにバラクタ・ダイオードを用いて切替周波数の可変範囲の確認を行った。しかしながら、バラクタ・ダイオードの容量が一般に大きいため、共振周波数の可変範囲は高々数百 MHz ~1 GHz 程度にとどまった。今後のコグニティブ無線通信などでの使用を考慮すると、数十 GHz の切替範囲が必要と考えられるため、切替範囲を拡大する新しい技術の創出が必要となった。1 GHz 程度までの微細な周波数調整ではバラクタ・ダイオードを用い、数十 GHz の切替範囲では新しい技術を利用することで問題は解決できると考えている。

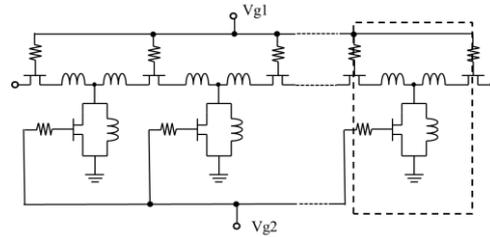


図1. 2次元切替 SPST スイッチ回路の一般例

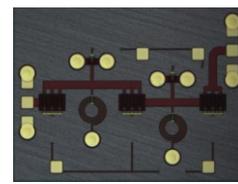


図2. 2次元切替 SPST スイッチの原理的実証用 GaN MMIC

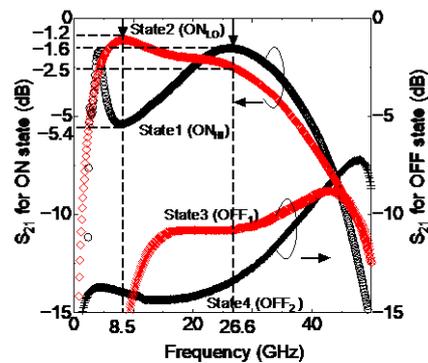


図3. 2次元切替 SPST スイッチの実証周波数特性

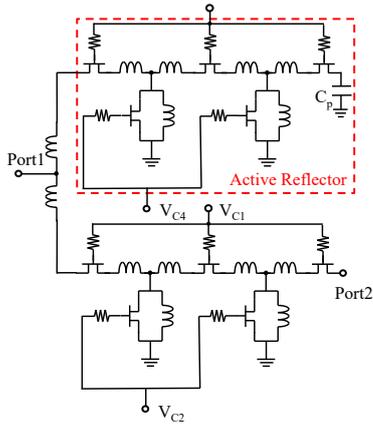


図 4. アクティブ・リフレクタ付き 2次元切替 SPST スイッチ回路の例

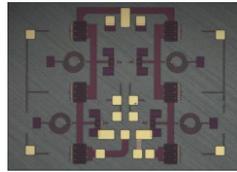


図 5. アクティブ・リフレクタ付き 2次元切替 SPST スイッチ GaN MMIC

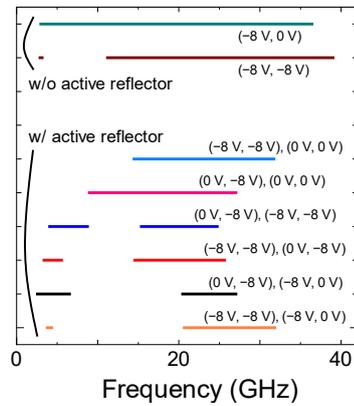


図 6. アクティブ・リフレクタ付き 2次元切替 SPST スイッチ GaN MMIC の ON 状態の周波数切替可能帯域

図 4 に、本研究で周波数の切替範囲を広範囲に拡大する新しい技術として提案したアクティブ・リフレクタ付き 2次元切替スイッチの回路図を示した。原理実証の時と同様に、単位回路 2 段構成となっている。図 5 がアクティブ・リフレクタ付き 2次元切替スイッチ GaN MMIC のチップ写真である。図 6 に示すように、アクティブ・リフレクタを用いることにより、リフレクタがないときに比べてスイッチの状態の数が増すことに伴って、周波数切替範囲を細分化できることがわかる。別のバイアスの組み合わせを選ぶことで、DC から 40 GHz 帯付近まで 15 dB 以上のアイソレーションを得ることができ、スイッチ動作が確認できている。この設計理論を確立することによって、周波数切替範囲を設計することができるようになり、周波数切替範囲を拡大する技術を得ることができると期待される。そこで、2次元切替スイッチ回路の小信号の回路設計理論を検討し、回路設計指針を確立した。この設計理論に基づいて回路設計をすることで、2次元切替スイッチの周波数切替範囲も含めた自在な設計が可能となった。

このように本研究の当初の目的は達成することができた。

(3) 「2×2次元切替スイッチ」の提案

本研究の成果を基に「2×2次元切替スイッチ」を提案し、原理的動作を実証した。図 7 が実証した 2×2次元切替スイッチの回路図である。これは 2次元切替 SPST スイッチを各ブランチに配した構造を持つ SPDT スイッチである。図 8 には実証した 2×2次元切替 GaN MMIC スイッチのチップ写真である。図 9 は実証した 2×2次元切替 GaN MMIC スイッチの周波数特性である。2本ある曲線は、一つが 2つあるブランチのうち片側のブランチの周波数特性であり、もう一つがもう片方のブランチの周波数特性を示している。図の各ブランチのバイアス電圧を切り替えることによって、6 GHz 以下の低い周波数 (Low

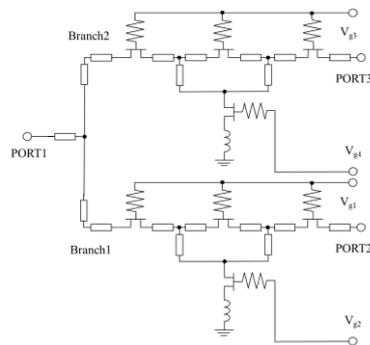


図 7. 2×2次元切替スイッチ回路の例

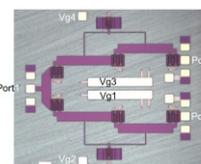


図 8. 2×2次元切替 GaN MMIC スイッチ

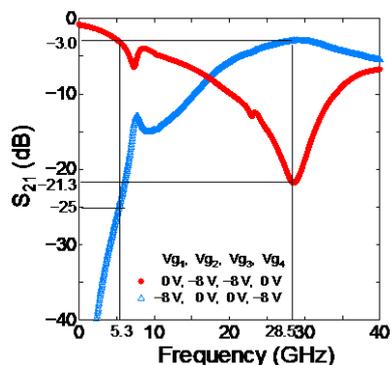


図 9. 2×2次元切替 GaN MMIC スイッチの周波数特性

Band) と 28GHz 帯という高い周波数 (High Band) を同時に、あるいは相補的に、各ブランチの周波数を、ON/OFF を、切り替えることが可能となる新しい機能を有したデバイスである。

Beyond 5G などの高速通信の実現に非常に有用なデバイス技術として期待できる。今後、回路構成のバリエーション検討や回路設計理論構築などの 2×2 次元切替スイッチの一層の研究の深化は、今後の新たな研究テーマである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mizutani Hiroshi, Ishikawa Ryo, Honjo Kazuhiko	4. 巻 59
2. 論文標題 Small-signal design consideration for two-dimensional change-over switch GaN MMICs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SGGL07 ~ SGGL07
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab70a4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 石井 岳人、中丸靖崇、水谷 浩、石川 亮、本城和彦
2. 発表標題 900 MHz/4.5 GHz帯2×2次元切替スイッチの開発
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H.Mizutani, R.Ishikawa, and K.Honjo
2. 発表標題 A Novel Sub-6-GHz and 28-GHz GaN Switchable Duplexer MMIC for Carrier Aggregation with Massive MIMO Full Duplex Link
3. 学会等名 2019 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H.Mizutani, R.Ishikawa, and K.Honjo
2. 発表標題 Proposal of a Novel SPDT Switch and Duplexer Dual-Function Circuit
3. 学会等名 Extended Abstracts of the 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H.Mizutani, R.Ishikawa, and K.Honjo
2. 発表標題 A Novel Reconfigurable GaN Filter MMIC with Active Reflector
3. 学会等名 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水谷 浩、本城和彦
2. 発表標題 多機能SPDTデバイスの提案
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中丸靖崇、水谷 浩、瀬下拓也、石川 亮、本城和彦
2. 発表標題 多機能SPDTデバイスの実証
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Mizutani, Ryo Ishikawa, and Kazuhiko Honjo
2. 発表標題 A Novel Two-Dimensional Changeover GaN MMIC Switch for Electrically Selectable SPDT Multifunctional Device
3. 学会等名 2017 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中丸靖崇、水谷 浩、瀬下拓也
2. 発表標題 FETとバラクタダイオードを用いた新たなリコンフィギュラブルフィルタ回路の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬下拓也、中丸靖崇、水谷 浩
2. 発表標題 複数のFETを用いた新たなアクティブCRLH伝送線路の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	本城 和彦 (Honjo Kazuhiko) (90334573)	電気通信大学・先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター・客員教授 (12612)	