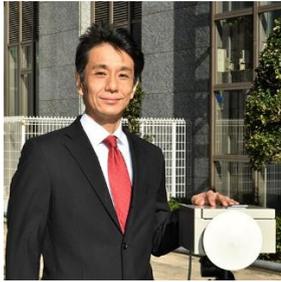


メタマテリアル集積スロットアレーアンテナによるテラヘルツ近接無線エリア制御の研究

Contact Area Control of Terahertz Proximity Wireless System by Metamaterial Integrated Slot Array Antenna



枚田 明彦 (Akihiko HIRATA, Ph. D.)
千葉工業大学 工学部 情報通信システム工学科 教授
(Professor, Chiba Institute of Technology, Faculty of Engineering, Department of Information and Communication Systems Engineering)
電子情報通信学会 Institute of Electrical and Electronics Engineers
受賞：文部科学大臣表彰 科学技術賞 研究部門 (2011年) 放送文化基金賞 (2010年) 電波功績賞 (2009年) 他
著書：THz Communications, Springer (2021年)、次世代無線通信に向けたアンテナ開発、シーエムシー出版 (2020年) 2030年の情報通信技術、NTT出版 (2015年) 他
研究専門分野：無線通信工学

あらまし

我々は、接触時のみ電波を透過し、不要電波の放射を抑制するテラヘルツ*1 帯超高速近接無線への適用に向けて、石英基板上に分割リング共振器 (SRR: slot-ring resonator) *2 バンドストップフィルタと格子パターンを試作し、SRR バンドストップフィルタ単体では電波を透過しないが、両者を接触させると格子パターンが接触した部分の SRR バンドストップフィルタの透過率が向上し、10Gbps データ通信が可能となる近接無線通信システムの検討を実施した。本システムでは SRR バンドストップフィルタと格子パターン近接時の透過特性の広帯域化、および、SRR バンドストップフィルタと格子パターンの位置合せ精度が課題であった。そこで、我々は格子パターンの構造の最適化により、SRR バンドストップフィルタと格子パターン近接時の透過特性の広帯域化を実現した。また、SRR バンドストップフィルタと格子パターンの位置合せマージンの拡大に向けて、格子パターンの周期を SRR パターンの周期と異なる周期を有する格子パターンを提案した。

1. はじめに

近年、瞬時に 4K や 8K 映像などの大容量データ

を携帯端末に PC からダウンロード可能にする 100 Gbps 級近接無線通信システムの実現が期待されている。100Gbps 級のデータ伝送速度を実現する手段のひとつが、周波数 100 GHz を超える周波数帯であるテラヘルツ波の利用であり、テラヘルツ波を使用した無線通信システムで 100 Gbps 超のデータ伝送実験が報告されている [1-2]。しかし、テラヘルツ帯近接無線通信ではひとつのシステムが広い帯域を使用するため、不要電波が出てしまうと同一周波数を使用する他システムへの干渉が生じる。また、テラヘルツ波では各受動部品の高さが 1mm 以下となるため、送信アンテナと受信アンテナとの間で精密なアライメントが必要となる。図 1 にテラヘルツ帯近接無線通信システムおよびその技術課題を示す。

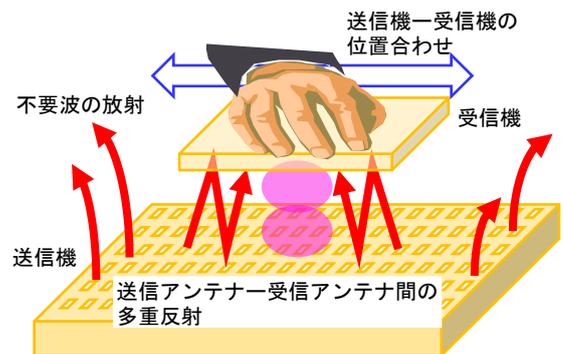


図 1 テラヘルツ帯近接無線通信システムおよびその技術課題

本研究では、送信機の平面アレーアンテナ上にメタマテリアル*3 を集積することにより、送信アンテナ単体時は電波を放射しないが、送信機一受信機のアンテナ同士を接触させた場合は、接触した部分だけは電波が透過可能となるように透過性を制御可能な近接無線通信の実現を目指している。メタマテリアルの一種である分割リング共振器 (SRR: slot-ring resonator)は、互いを近接させると混成共振モードが発生し、共振モードが2つに分裂する[3]。本研究では、この現象を利用し、SRR バンドストップフィルタと格子パターンを近接させることにより、SRR バンドストップフィルタの透過性の制御を試みた。また、SRR バンドストップフィルタと格子パターン近接時の透過特性の広帯域化、

メタマテリアル集積スロットアレーアンテナによるテラヘルツ近接無線エリア制御の研究

Contact Area Control of Terahertz Proximity Wireless System by Metamaterial Integrated Slot Array Antenna

および、SRR バンドストップフィルタと格子パタンの位置合せマージンを拡大する格子パタンの検討を実施した。

2. 格子パターン近接による SRR バンドストップフィルタの透過性制御

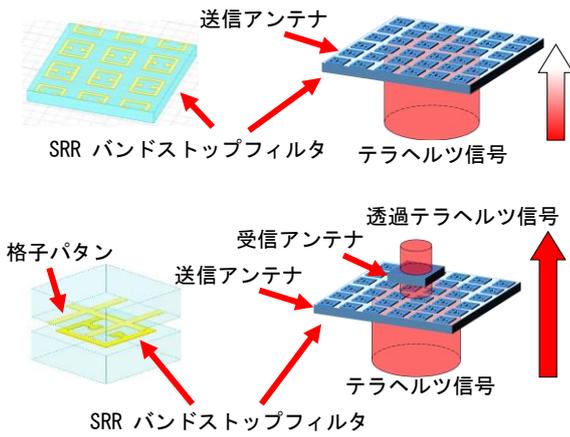


図2 SRR バンドストップフィルタを使用したテラヘルツ帯近接無線の概念図

図2に SRR バンドストップフィルタを使用したテラヘルツ帯近接無線の概念図を示す。SRR バンドストップフィルタ単体では、下面から入射されたテラヘルツ信号は、SRR バンドストップフィルタにより反射され、上面に透過されないため、本フィルタを送信アンテナに集積した場合、送信機からのテラヘルツ波の放射は抑制され、不要放射はなくなる。しかし、この状態では受信機は無線信号の受信ができない。格子パターンを集積した受信アンテナを送信アンテナに近接させると、SRR バンドストップフィルタと格子パタンの結合が発生し、格子パターン基板が重なる領域でのみ SRR バンドストップフィルタの挿入損失が減少する。その結果、受信機はテラヘルツ無線信号を受信することができ、同時に、送信機からの不要なテラヘルツ波の放射の抑制が可能となる。

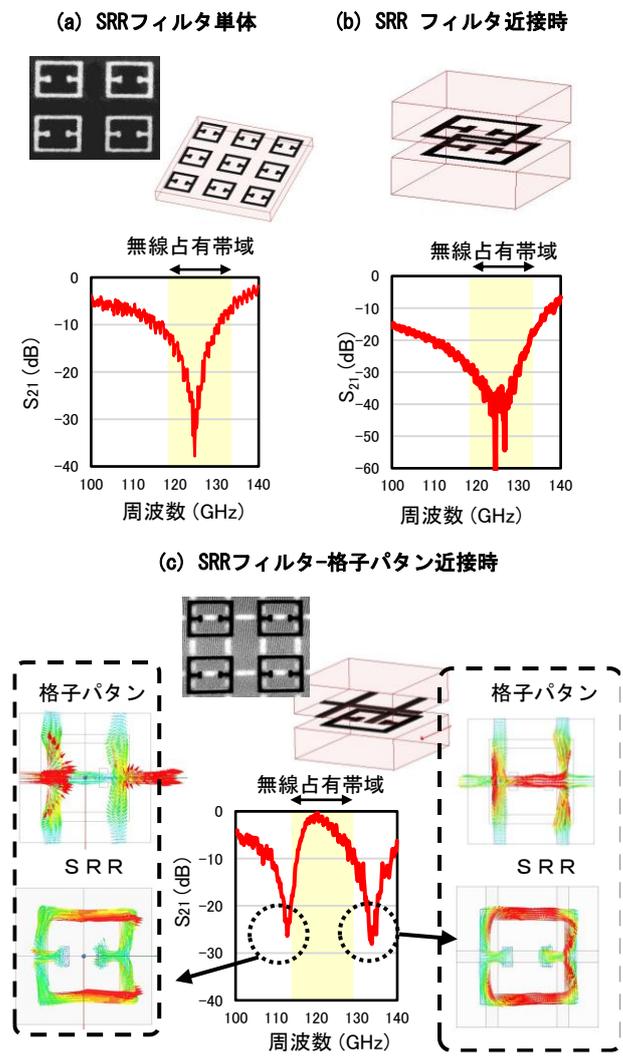


図3 設計した SRR バンドストップフィルタおよび格子パタンの模式図、写真、および、透過特性の測定結果

図3に設計した SRR バンドストップフィルタおよび格子パタンの模式図、写真、および、透過特性の測定結果を示す。SRR バンドストップフィルタ単体 (図3(a)) では、125GHz で強い共振が観測され、透過率が-35 dB となった。一方、SRR バンドストップフィルタ同士を距離 600μm で近接配置した場合 (図3(b)) は、共振のピークが2つに分かれ、125GHz での透過特性は -25dB と SRR 単体と比較して 10dB 向上したが、まだ大きな挿入損失が見られた。一方、SRR バンドストップフィルタ に格子パターンを近接さ

メタマテリアル集積スロットアレーアンテナによるテラヘルツ近接無線エリア制御の研究

Contact Area Control of Terahertz Proximity Wireless System by Metamaterial Integrated Slot Array Antenna

せた場合 (図 3(c))、上下の SRR と格子パターン間で電磁結合が生じるが、図 3(c) 中に示すように、電流の流れる方向に関して対称性の異なる 2つのモードが励起され、SRR バンドストップフィルタの共振モードは 2つに分離される。この結果、125GHz での透過率が -2.2 dB まで改善し、-10 dB 帯域が 113.6 GHz-131.4 GHz と広帯域を実現した。この SRR バンドストップフィルタおよび格子パターンを使用した 120GHz 帯無線通信実験を実施した。送信機・受信機にホーンアンテナを設置し、空間伝送路の中間に SRR バンドストップフィルタを挿入し、格子パターンの近接の有無によるデータ伝送特性の違いを評価した。図 4 に 10Gbps データ伝送時のアイパターンを示す。SRR バンドストップフィルタ単体を挿入した場合は、受信機に十分な受信電力が得られず、アイは閉じている。一方、SRR バンドストップフィルタに格子パターンを近接させた場合は、SRR バンドストップフィルタの透過特性が向上した結果、アイがクリアに開いており、 10^{-11} 以下のビット誤り率 (BER) が得られた。

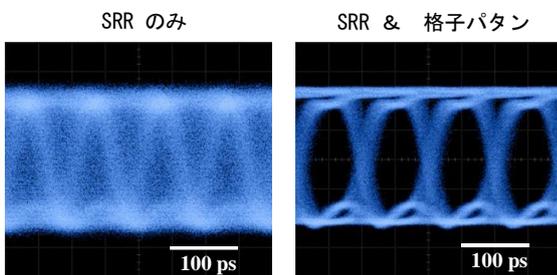


図 4 SRR バンドストップフィルタおよび格子パターンを使用した 120GHz 帯無線における 10Gbps データ伝送時のアイパターン

3. 透過特性の広帯域化の検討

さらなるデータ伝送特性の改善を行うために、格子パターンの形状の最適化により、SRR フィルター-格子パターン近接時の透過帯域を広帯域化する検討を実施した。

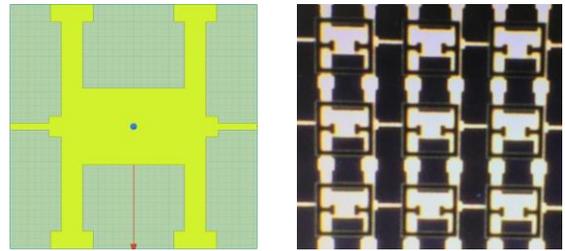


図 5 SRR バンドストップフィルタの通過帯域を広帯域化する格子パターンの模式図および写真

図 5 に SRR バンドストップフィルタの通過帯域を広帯域化する格子パターンの模式図および写真を示す。第 2 章に記載した従来の格子パターンでは、格子パターンの配線幅は場所によらず一定 ($60\mu\text{m}$) であったが、広帯域化格子パターンでは、Y 軸と平行な線では、SRR 上にある線幅は $220\mu\text{m}$ にして、SRR 上くない線幅は $22\mu\text{m}$ にした。加えて X 軸に平行な線幅も一部太くしている。図 6 に、図 5 に示す格子パターンを SRR バンドストップフィルタに近接させた場合の透過特性の測定結果を示している。シミュレーションでは、従来型格子パターンの共振ピーク差が約 29.1GHz なのに対し広帯域化格子パターンは共振ピーク差が約 46GHz となっている。広帯域化格子パターンを近接させた SRR フィルタの S_{21} は 125GHz で -1.5dB 、3dB 通過帯域幅は 20GHz となった。この値は、従来の格子パターンと組み合わせ合わせた場合よりも 3dB 以上大きい。この格子パターンを使用した 120GHz 帯無線による 10Gbps データ伝送実験を実施した。第 2 章に示す従来型の格子パターンを近接させた場合と比較して、3.3 dB 低い送信電力で 10^{-11} 以下の BER を得ることができた。これは、図 6 に示すように、SRR バンドストップフィルタに広帯域化した格子パターンを近接させた場合の SRR バンドストップフィルタの透過特性が広帯域化したため、データ伝送特性も向上したことを示している。

メタマテリアル集積スロットアレーアンテナによるテラヘルツ近接無線エリア制御の研究

Contact Area Control of Terahertz Proximity Wireless System by Metamaterial Integrated Slot Array Antenna

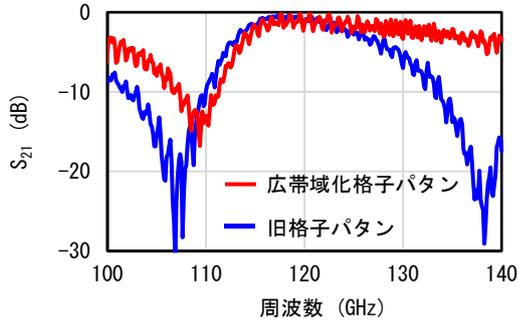


図6 格子パターンを SRR バンドストップフィルタに近接させた場合の透過特性の測定結果

4. SRR バンドストップフィルタの広帯域化の検討

SRR バンドストップフィルタと格子パターンを近接させることにより、透過特性を制御するためには、SRR バンドストップフィルタと格子パターンの間に 200 μm 以下のアライメント精度が必要である。しかし、実用的な近接無線において、このような高いアライメント精度を達成することは困難である。そこで我々は、SRR バンドストップフィルタと格子パターンの位置合わせを不要にするため、アライメントフリー格子パターンについて検討を実施した。

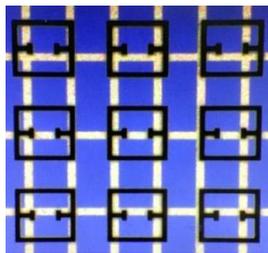


図7 アライメントフリーの格子パターンと SRR バンドストップフィルタを近接させた場合の写真

図7に、アライメントフリーの格子パターンと SRR バンドストップフィルタを近接させた場合の写真を示す。アライメントフリー格子パターンでは、格子パターンの単位セル周期と SRR バンドストップフィルタの単位セル周期の大きさを変えている。SRR バンドストップフィルタの単位セル周期は 700 μm である

のに対し、アライメントフリー格子パターンの単位セルの大きさは 650 μm とした。この結果、SRR の 13 周期がアライメントフリー格子パターンの 14 周期に相当する。

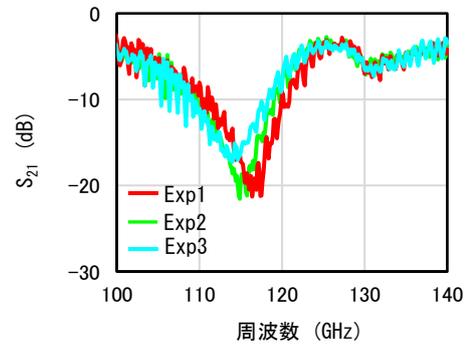


図8 SRR バンドストップフィルタとアライメントフリー格子パターンを 70 μm の距離で配置した場合の透過特性の実験値

図8に、SRR バンドストップフィルタとアライメントフリー格子パターンを 70 μm の距離で配置した場合の透過特性の実験値を示す。実験では、アライメントフリー格子パターンを SRR バンドストップフィルタに対して位置合わせを行うことなく近接配置することを 3 回繰り返して測定した。125GHz における透過特性は第2章に示す従来型の格子パターンと比較すると約 2dB 劣化したが、位置合わせをせずに配置した 3 回の透過特性の計測結果はほぼ一致した。このアライメントフリー格子パターンを SRR バンドストップフィルタを使用した 120GHz 帯無線による 10Gbps データ伝送実験を実施し 3×10^{-11} 以下の BER を得ることができた。これは、本章で示す格子パターンにより、SRR バンドストップフィルタとアライメントフリー格子パターンとの間の位置合わせをすることなく、120GHz 帯無線によって 10Gbps データ伝送が可能であることを示している。

5. 将来展望

これまで、同一のメタマテリアルを極近接させたモデルについては、その等価回路がシンプルであり、近接時のプラズモン混成共振モードによるエネルギー準

メタマテリアル集積スロットアレーアンテナによるテラヘルツ近接無線エリア制御の研究

Contact Area Control of Terahertz Proximity Wireless System by Metamaterial Integrated Slot Array Antenna

位図の変化などの検討が進められているが、本研究に示すようにテラヘルツ帯において、異なるメタマテリアルを近接させ場合に透過特性が大きく変化することを実証したのは本研究が初めてである。現状では、異なるメタマテリアルを近接させた場合の等価回路は複雑になるため、近接時に透過特性が大幅に向上するメカニズムは未解明である。今後は異なるメタマテリアルを近接させた場合の等価回路モデルを構築し、大幅に透過性が向上する原因を解明するとともに、構築したモデルから設計論を確立し、メタマテリアルのテラヘルツ波に対する透過性を自在かつ可変に制御することを可能にすることを目指す。

おわりに

接触時のみ電波を透過し、不要電波の放射を抑制するテラヘルツ帯超高速近接無線への適用に向けて、SRR バンドストップフィルタ単体では電波を透過しないが、両者を接触させると、格子パターンが接触した部分の SRR バンドストップフィルタの透過率が向上し、10Gbps データ通信が可能となる近接無線通信システムの検討を実施した。格子パタンの近接により SRR バンドストップフィルタの透過特性を 30 dB 以上向上させること、および、SRR と格子パターンを近接させた系で 120 GHz 帯無線信号の 10 Gbps データに成功した。さらに、格子パタンの線幅を変えることによりテラヘルツ信号の通過帯域の拡大が可能であること、SRR と格子パタンのアライメントを不要にするため、格子周期を変更した格子パターンを試作し、アライメントフリーでの透過性向上を実証した。

用語解説

- *1 テラヘルツ：100GHz から 10THz の間の周波数、または 3mm から 30 μ m の長さの波長を有する電磁波
- *2 SRR (分割リング共振器)：金属からなる環状構造をしており、その一部にスリットが挿入されている構造。環状部分のインダクタ成分と、スリット部分のキャパシタ成分によって共振器として動作する。
- *3 メタマテリアル：電磁波 (光) の波長よりも細かな構造体を利用して、物質の電磁気学 (光) 的な特

性を人工的に操作した疑似物質

参考文献

- [1] Ho-Jin Song, Toshihiko Kosugi, Hiroshi Hamada, Takuro Tajima, Amine El Moutaouaki, Hideaki Matsuzaki, Yoichi Kawano, Tsuyoshi Takahashi, Yasuhiro Nakasha, Naoki Hara, Katsumi Fujii, Issei Watanabe, Akifumi Kasamatsu, and Makoto Yaita, "Demonstration of 20-Gbps wireless data transmission at 300 GHz for KIOSK instant data downloading applications with InP MMICs," 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), WEIF2-29, pp.1-4, May, 2016.
- [2] T. Nagatsuma, K. Oogimoto, Y. Inubushi, and J. Hirokawa, "Practical considerations of terahertz communications for short distance applications," Nano Communication Networks, 10, pp. 1–12, 2016.
- [3] B. Kanté, S. N. Burokur, A. Sellier, A. de Lustrac, and J.-M. Lourtioz, "Controlling plasmon hybridization for negative refraction metamaterials," Phys. Rev. B, Vol. 79, 075121, 2009.

関連文献

Koichiro Itakura, Akihiko Hirata, Masato Sonoda, Taiki Higashimoto, Tadao Nagatsuma, Takashi Tomura, Jiro Hirokawa, Norihiko Sekine, Issei Watanabe, and Akifumi Kasamatsu, "Control of 120-GHz-band Split Ring Resonator Filter by Coupling Lattice Pattern Substrate," IEICE Transactions on Electronics, Vol. E104-C, No. 3, pp. 102-111, Mar 2020.

Akihiko Hirata, Koichiro Itakura, Taiki Higashimoto, Yuta Uemura, Tadao Nagatsuma, Takashi Tomura, Jiro Hirokawa, Norihiko Sekine, Issei Watanabe, Akifumi Kasamatsu, "Transmission Characteristics Control of 120 GHz-Band Bandstop Filter by Coupling Alignment-Free Lattice Pattern,"

メタマテリアル集積スロットアレーアンテナによるテラヘルツ近接無線エリア制御の研究

Contact Area Control of Terahertz Proximity Wireless System by Metamaterial Integrated Slot Array Antenna

IEICE Transactions on Electronics, Vol. E104-C, No. 10, pp. 587-595, Apr 2021.

この研究は、平成29年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成30年度～令和2年度に実施されたものです。