異種メタサーフェスの電磁結合によるテラヘルツ波透過制御とシートＬＡＮ通信への応用

代表研究者　　氏　名　枚田　明彦　千葉工業大学　工学部　役職　教授

1 はじめに

近年、携帯端末の爆発的な普及により、無線 LAN においてアクセス集中による通信速度低下やアクセスポイント間での相互干渉等の課題が顕在化している。電波が内部を伝送する誘電体シート上に端末を置くだけで LAN 接続を可能にする LAN シート通信は、シートごとにアクセスポイントを設定し、通信エリアを限定できるため、無線 LAN の課題を解決する手段として注目されているが、現状では 5 GHz 帯電波を使用した 300 Mbps 程度のシート LAN しか実現されていない。100GHz 以上のテラヘルツ波を使用すれば 10 Gbps 以上の速度向上が期待できるが、テラヘルツ波は誘電体損、放射損が大きいため、LAN シートで必要となる数 m をシート内で伝送するのは困難である。低損失誘電体シートの上下に金属パタンを設けてテラヘルツ信号を閉じ込めて伝送すれば、数 m 伝送が可能となるが、シート上に置いた端末との接続は不可能となる。

LAN シート通信の実現には、端末が接触したエリアのみテラヘルツ波の透過性が向上する可変フィルタが必要である。２つのメタサーフェスを極近接させると、プラズモン混成共振モードが発生してモード分裂が生じ、透過特性が変化することが報告されているが、その透過性変化は小さいため、LAN シート通信への適用は不可能である。我々は、すでに異なる微小金属パタンを周期的に配置した２つの機能性誘電体層を近接させると、メタサーフェス単体と比較してテラヘルツ信号の透過性を 33 dB 以上向上できることを実証した。２つのメタサーフェスが近接したエリアのみ透過特性を向上することができれば、シート上にノート PC などを置くだけで、簡単かつ安定に 10Gbps を超える超高速 LAN 接続を可能にするテラヘルツ帯 LAN シート通信が実現できる。

本研究の目的は、誘電体シート上に異なる微小金属パタンを周期的に配置した 2 つのメタサーフェスの近接によるテラヘルツ波の透過性制御を可能とすることにより、電波の伝わるシート上に置くだけで安定なネットワーク接続を可能にする超高速テラヘルツ LAN シート通信を実現することである。誘電体基板上に波長より小さな微小金属パタンを周期配置したメタサーフェスは、自然界には存在できない誘電率や屈折率を実現可能な材料として注目されている。本研究では、120 GHz 帯無線信号を表面にメタサーフェスを形成した誘電体シートに閉じ込めて伝送し、誘電体シート上に、誘電体シート上のメタサーフェスとは異なるメタサーフェスを実装した受信アンテナを置くことにより、10 Gbps を超える LAN 接続を可能にすることを目標とする。

2 接触エリアのみ透過率を向上することが可能なメタサーフェス集積アンテナ

本章では、4×4 平面スロットアレーアンテナにメタサーフェスを集積することにより、送受信のアンテナ間の多重反射を抑えつつ、アンテナ間の透過特性の特性を向上できないかを検討した。図 2-1 に検討したメタサーフェス集積アンテナのシミュレーションモデルを示す。4×4 平面スロットアレーアンテナは、東京工業大学　広川教授が開発された使用した平面スロットアレーアンテナは、拡散接合により作成した中空導波管平面スロットアレーアンテナである [1]。中空導波管平面スロットアレーアンテナは、高周波領域においても低損失、高利得、高効率という特徴を実現可能である。4x4 素子のような小型のアレーアンテナではアレーの端部の影響を排除するため、各スロット間の相互結合を低減する目的で、各スロットに外部キャビティを設けている。各スロットの間隔は 2.1 mm、スロットの幅は 0.88 mm、長さは 1.37 mm 、深さは 0.2 mm である。また、外部キャビティの幅は 1.80 mm、長さは 1.60 mm、深さは 0.4 mm である [2]。このシミュレーションモデルでは、モデルの下に設けたメタル（銅）に設けた WR08 の方形導波管を Port 1、上方の空気部の上面を Floquet Port 2 としてシミュレーションを実施した。

この 4×4 平面スロットアレーアンテナ上に、厚さ 0.2 mm の石英基板上に配線パタンで形成したメタサーフェスを集積した。形成したメタサーフェスの模式図を図 2-2 に示す。スロット上には金で作成した Split Ring Resonator (SRR) を配置した。図 2-2 中のモデルでは黄色で記載された SRR に相当する。この金で作

成した SRR は、単体の場合、特定の周波数で共振が発生し、バンドストップフィルタとして機能する。また、同じ SRR を近接させると、共振が消えることにより、バンドストップフィルタとして機能しなくなり、その結果、その周波数での透過特性が向上する。今回検討した SRR は、石英基板の表面、裏面、の同じ位置に SRR が設けてある。上下に配置した SRR はそれぞれ外周の大きさが異なり、アンテナ側の石英基板表面に集積された SRR は外周の 1 辺の長さが 0.56mm、アンテナと反対側の石英基板表面に配置した SRR は外周の 1 辺の長さが 0.52mm となっている。4×4 平面スロットアレーアンテナのスロット上にない SRR は抵抗体である TaN で形成しており、この TaN SRR は図 2-2 中で緑の SRR として示してあり、特定の周波数で電波吸収体として機能する。

図 2-3 に図 2-1 に示すモデルでの 3 次元電磁界シミュレーションの結果を示す。S_{21} において、124.9GHz に鋭い共振による吸収が見られる。124.9 GHz での S_{21} の値は -34.5dB であった。この値は SRR 単体でのシミュレーション値とほぼ一致する。

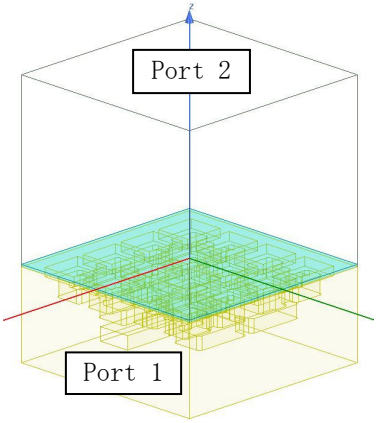


図 2-1 メタサーフェス集積アンテナのシミュレーションモデル

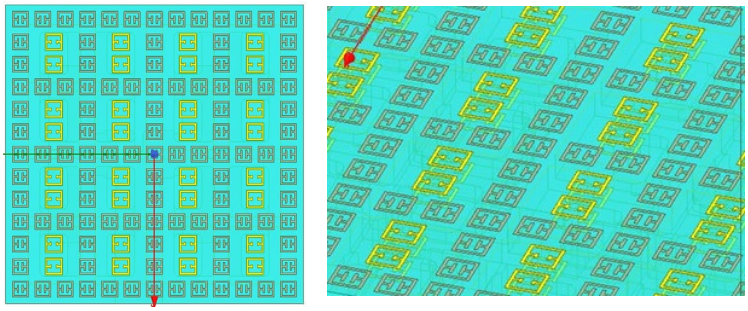


図 2-2 メタサーフェスのシミュレーションモデル

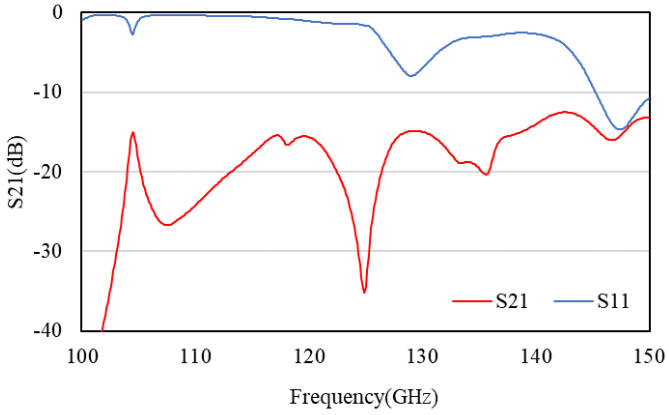


図 2-3 図 2-1 に示すメタサーフェス集積アンテナの S パラメータ特性

次に、異なるメタサーフェスを近接させることにより、アンテナ間の透過特性を制御することが可能か、検討を実施した。図 2-3 に示すメタサーフェスを集積したアンテナと、図 2-4 に示す厚さ 0.2 mm の石英基板上に形成した格子パタンを集積したアンテナを近接させたシミュレーションに使用したモデルを図 2-5 に示す。図 2-5 に示すモデルにおいて、2 つのアンテナの距離を 0.05mm から 1mm の距離で変化させた場合の透過率の変化を計算した結果を図 2-6 に示す。対向距離 1 mm の場合 131.6GHz に-38.4dB の共振が発生し、125GHz での透過率は-16.5dB となった。対向距離 0.5 mm の場合、127.9GHz と 132.6GHz に共振が発生し、125GHz での透過率は-18.9dB となった。対向距離 0.1mm の場合は、130GHz と 137.6GHz に共振が発生し、125GHz で透

過率は-10.7dB となっている。対向距離 0.05mm の場合は共振が確認できず 125GHz での透過率は-13.8dB となっている。いずれの結果でも 125GHz での透過率は図 2-3 に示すアンテナ単体の場合の S_{21} の値（-34.5dB）から大幅に向上した。

これらの結果より、平面スロットアンテナにメタサーフェスを集積し、そのメタサーフェスに異なるメタサーフェスを近接させた場合、アンテナ間の透過率を 20 dB 以上向上させることに成功した。

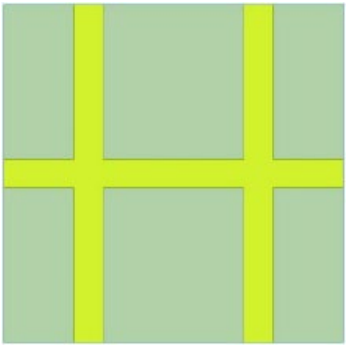


図 2-4　格子パタンの模式図

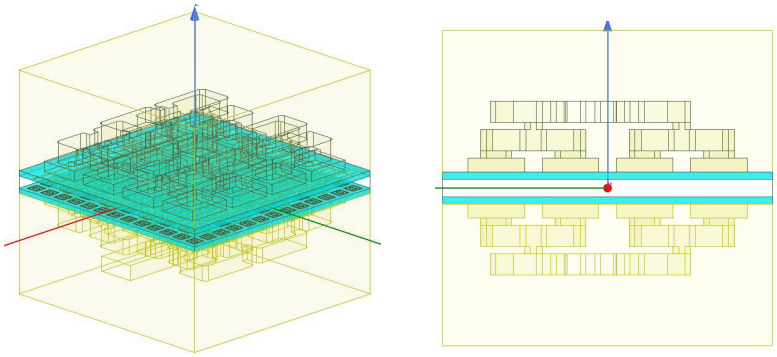


図 2-5 異種メタサーフェス集積アンテナ近接時のシミュレーションモデル

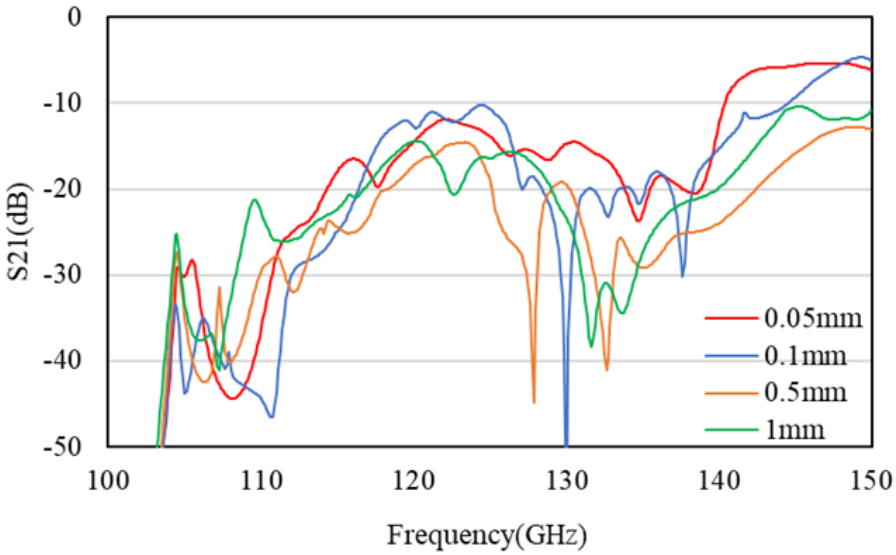


図 2-6　図 2-5 に示すモデルでアンテナ間の距離を変えた場合の S21 のシミュレーション結果

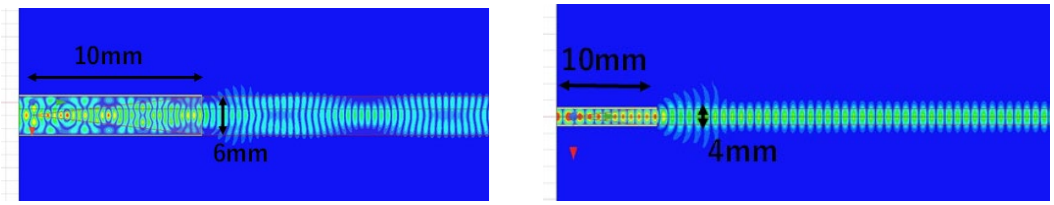
3 テラヘルツ信号伝送用誘電体シート

シート状 LAN の実現には、様々な課題が存在する。第 1 の課題は誘電体シートでのテラヘルツ波の低損失伝送である。低損失での伝送を実現するためには、誘電体シート―導波管変換部の低損失化、および、誘電体シート内での低損失伝送の両方を実現する必要がある。テラヘルツデバイスのインターフェースは一般的に方形導波管であるため、シート状 LAN の実現には、方形導波管と誘電体シートを接続する誘電体シート―導波管変換部が必要となる。また、誘電体シート内での低損失伝送の実現には、誘電体シート内でのテラヘルツ信号の伝送モードを解明する必要がある。また、シート状 LAN の実現には、テラヘルツ信号を伝送する誘電体シートに別の誘電体を接触し、その誘電体にテラヘルツ信号を導波する必要がある。

誘電体シート内伝搬の低損失化には、変換されたテラヘルツ波が誘電体シート内をどのように伝搬するのか解明する必要がある。従来研究におけるシート状 LAN では、誘電体シート幅が 6mm と、波長より大幅に広かったため、マルチモードでの伝送となっていた [3]。また、誘電体シート―導波管変換部やシートの端面で反射が起こると、定在波が発生する。定在波が発生すると反射点の距離に応じて一定の周波数間隔で大きな減衰が生じるため、周波数によって受信電力に大きな違いが生まれてしまう。データ伝送を実施する上で、伝送損失の周波数依存性が大きいことは大きな障害となる。そこで、マルチモード伝送を利用した高速無線通信システムとして送信アンテナ、受信アンテナを複数配置し、各アンテナから異なるデータを重畳した同一周波数のテラヘルツ信号を送信する MIMO 方式による通信容量の拡大を検討するか、シングルモードで伝送するための誘電体シート形状を検討する必要がある。本研究では誘電体シート幅をシングルモードで伝搬が可能となるような形状とすることで解決した。

また、テラヘルツ波は周波数が非常に高いため、薄い誘電体シートの上面や端面から電波が漏れてしまう。そのため、誘電体シート内に電波を閉じ込め、上面や端面からの電波の漏れを抑制する誘電体シートの構成を検討する必要がある。ただし、誘電体シート内にテラヘルツ波を完全に閉じ込めてしまうと、シート上に接触させた端末との通信が行えなくなる。そこで、通常はテラヘルツ波を誘電体シートに閉じ込め、携帯端末接触時には、接触したエリアのみ電波伝搬を可能にするような仕組みを、誘電体シート上で設計する必要がある。本研究では、受信用の誘電体シートを接触させる面積や接触時の屈折させる角度といったパラメータが受信電力に与える影響を評価した。

はじめに、テラヘルツ帯シート状 LAN の実現に向けて、誘電体シート内テラヘルツ信号伝送の低損失化について検討を実施した。誘電体シートには、誘電体損が小さい厚さ 0.787 mm の Rogers RT/ duroid 5880 を選択した。誘電体シート端面でのテラヘルツ信号の反射を低減するため、誘電体シートの先端をテーパー状に加工している。誘電体シートの直線部の長さは 100 mm とした。誘電体シート―導波管変換部の材質はアルミニウムとした。図 3-1 に、誘電体シートの幅を 4 mm および 6 mm にした場合の 120 GHz 帯信号の電界分布のシミュレーション結果を示す。誘電体シートの幅が 6 mm の場合は、シート内の電界が一様とならず、マルチモードでの伝送となっていることがわかる。一方、誘電体シート幅を 4 mm の場合は、シングルモードでの伝送になっていることがわかる。



(a) (b)

図 3-1 誘電体シートの幅を (a) 6 mm および (b) 4 mm にした場合の 120 GHz 帯信号の電界分布のシミュレーション結果

誘電体シートのシート幅、および、テーパー部の長さを変化させた場合の通過特性のシミュレーション結果を図 3-2 に示す。シート幅 6 mm、テーパー部の長さが 5 mm の場合、定在波の影響により S_{21} が周波数変化により周期的に変動している。一方、誘電体シート幅が 4 mm の場合は、誘電体シート両端の誘電体シート―導波管変換部での反射が抑制されるため、定在波に起因する S_{21} の周期的な変動は見られない。また、テーパー部の長さが 10 mm 以上では、それ以上テーパー部の長さを長くしても S_{21} は 125 GHz で約 -6.5 dB とほぼ一定になった。図 3-3 に試作した誘電体シート、および、誘電体シートおよび誘電体シート変換部の写真を示す。誘電体シートの幅は 4 mm、長さは 100 mm、テーパー部の長さは 30 mm である。この誘電体シート―導波管変換を長さ 100 mm の誘電体シートに両端に設置した場合の通過損失をベクトルネットワークアナライザ (VNA) により評価した。計測結果を図 3-4 に示す。125 GHz での S_{21} は -9.5 dB であり、図 3-2 に示すシミュレーション結果 (-6.5 dB) より約 3 dB 小さい値となった。これは、誘電体シート―導波管変換の構造がシミュレーションモデルと一致していないことが原因と考えられる。

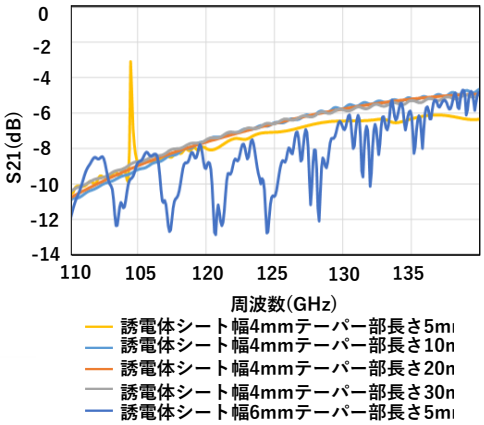
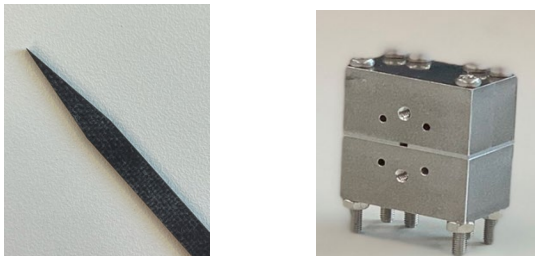


図 3-2　長さ 100 mm の誘電体シートの透過特性のシミュレーション結果



(a)　(b)

図 3-3　試作した（a）誘電体シート、および、（b）誘電体シートおよび誘電体シート変換部の写真

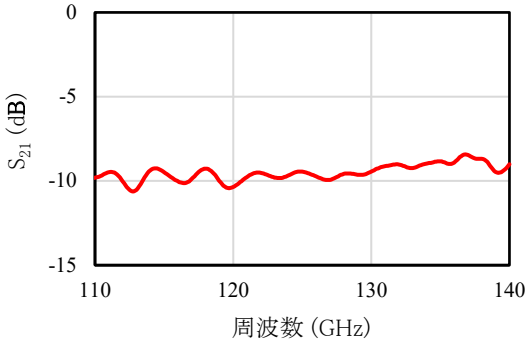


図 3-4　長さ 100 mm の誘電体シートの透過特性の実験結果

シート状 LAN の実現には、テラヘルツ信号を伝送する誘電体シートに別の誘電体を接触し、その誘電体にテラヘルツ信号を導波する必要がある。そこで、図 3-3(a) に示す 120 GHz 帯 RF 信号を伝送する誘電体シートに別の誘電体シートを接触することにより、接触した誘電体シートに 120 GHz 帯 RF 信号を導波可能か検討した。図 3-5 に使用した電磁界シミュレーションのモデルを示す。Port 1 と Port 2 は、誘電体シート—導波管変換を介して、幅 4 mm、長さ 100 mm の第 1 の誘電体シートで接続されている。この誘電体シートに、第 2 の誘電体シートを接触している。第 1 の誘電体シートを伝搬する 120 GHz 帯 RF 信号のうち、接触した第 2 の誘電体シートに導波され、Port 3 に伝送される信号の割合を求めた。誘電体を媒体として RF 信号を伝送する場合、誘電体シートに曲げ部があると、その曲げ部から RF 信号が外部に放射される放射損が発

生する。そこで、S_{31} の第 2 の誘電体シートの曲げ角度依存性を求めた。シミュレーション結果を図 3-6 に示す。接触角が大きくなるに従い、S_{31} は大幅に低下し、125 GHz での S_{31} は約 -27 dB となった。図 3-7 に接触角 40 度での電界分布のシミュレーション結果を示す。第 2 の誘電体シートを第 1 の誘電体シートに接触させるために曲げた部分で電界が空間に放射されていることがわかる。接触角が浅くなるに従い、S_{31} は増加し、125 GHz で約 -13 dB となった。

次に第 2 の誘電体シートを接触させた場合の S_{31} を VNA により評価した。評価系の写真を図 3-8 に示す。図 3-5 における Port 1、および Port 3 に VNA の周波数エクステンダを接続し、Port 2 には、導波管のターミネータを接続し、Port 2 での反射を抑制した。測定結果を図 3-9 に示す。Port 1 と Port 3 に接続した VNA 周波数エクステンダの高さを変えることにより、誘電体シートの接触角度を変えて測定を実施した。VNA 周波数エクステンダの高さを変えて、接触角度を変えても S_{31} はほとんど変化せず、125 GHz で約 -13 dB と一定になった。これは、VNA 周波数エクステンダの高さを変えて接触角度を変えても、シミュレーションモデルのように、急峻な角度変化を実現できなかったことが原因と考えられる。このように、２つの誘電体シートを接触させることにより、約 1/20 の 120 GHz 帯 RF 信号を接触した誘電体シートに導波することが可能であることを確認した。

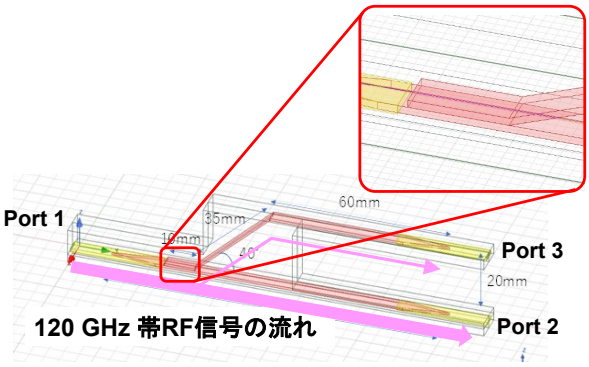


図 3-5　２つの誘電体シートを接触させた電磁界シミュレーションモデル

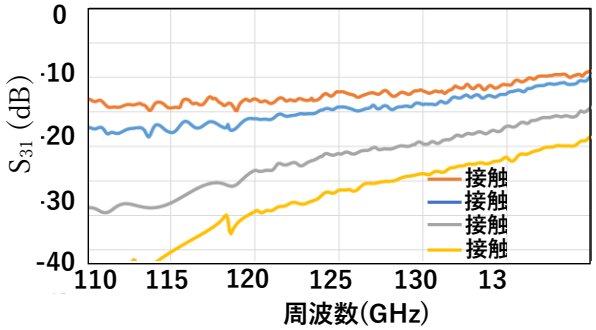


図 3-6 S_{31} の第 2 の誘電体シートの曲げ角度依存性のシミュレーション結果

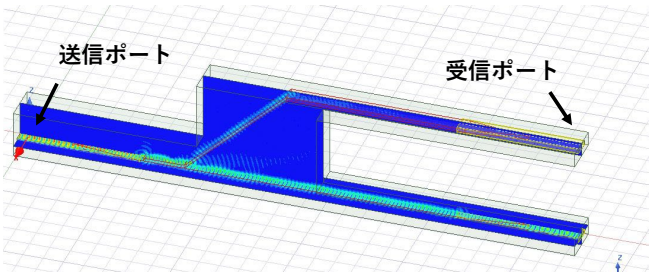


図 3-7　接触角 40 度での電界分布のシミュレーション結果

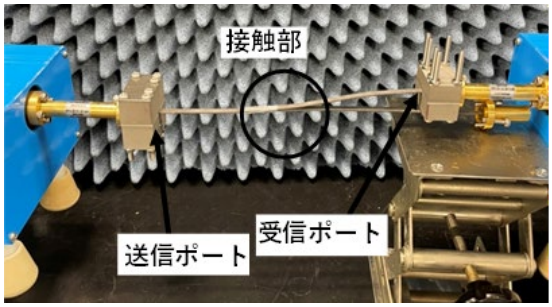


図 3-8　２つの誘電体シートを接触させた実験系での透過特性の評価系

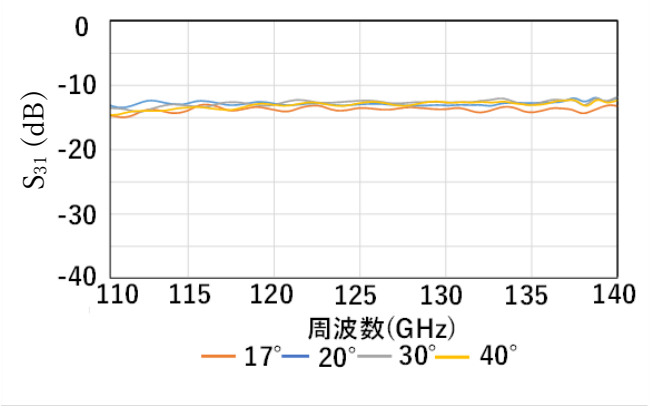


図 3-9　２つの誘電体シートを接触させた透過特性の実験結果

4 まとめ

異なるメタサーフェスを近接させることにより、アンテナ間の透過特性を制御することが可能か、検討を実施した。メタサーフェスとして split ring resonator (SRR) を集積した平面スロットアレーアンテナと石英基板上に形成した格子パタンを集積したアンテナを近接させるモデルについて電磁界シミュレーションを実施した。SRR を集積したアンテナ単体の場合の S_{21} は -34.5 dB であったが、対向距離 0.1mm の場合は、130GHz と 137.6GHz に共振が発生し、125GHz での S_{21} は -10.7dB となり、SRR 集積スロットアレーアンテナ単体の場合の S_{21} から大幅に向上した。

次に、誘電体シートによる 120 GHz 帯 RF 信号伝搬の低損失化、および、接触した別の誘電体への RF 信号の導波が可能か、検討を実施した。誘電体シート幅が 4 mm の場合は、誘電体シート内の伝搬がシングルモードでの伝搬になり、長さ 100 mm での誘電体シートの通過損失は 125 GHz で約 -9.5 dB となった。また、２つの誘電体シートを接触させることにより、約 1/20 の 120 GHz 帯 RF 信号を接触した誘電体シートに導波することが可能であることを確認した。

【参考文献】

[1] H. Takahashi, A. Hirata, K. Ajito, S. Hisatake, and T. Nagatsuma,”10-Gbit/s close-proximity wireless system meeting the regulation for extremely low-power radio stations,” IEICE Electronics Express, Vol. 11 (2014), No. 3, pp. 1–7, February, 2014.

[2] Dongjin Kim, Jiro Hirokawa, Makoto Ando, Jun Takeuchi, and Akihiko Hirata, “4 x 4-Element Corporate-Feed Waveguide Slot Array Antenna With Cavities for the 120 GHz-Band,” IEEE Trans. on Antennas and propagation, vol. 61, no. 12, pp. 5968-5975, December, 2013.

[3] Masaki Ushio, Futa Tokoro, Akihiko Hirata, Taiki Higashimoto, Yuta Uemura, Tadao Nagatsuma, Norihiko Sekine, Issei Watanabe, Akifumi Kasamatsu, □"10-Gbit/s Data Transmission over Dielectric Sheet for 120-GHz-band Sheet LAN," 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2020), 3G3-8, January 2021.

〈発　表　資　料〉

題　　名	掲載誌・学会名等	発表年月
誘電体シートの接触による 120GHz 帯 RF 信号伝送の検討	電子情報通信学会 MWPTHz 研究会	2022 年 7 月
Suppression of Multiple Reflection by Metasurface Absorber in 120-GHz-band Close-Proximity Wireless Link（査読中）	The 2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)	2022 年 11 月