高誘電率誘電体線路を用いた次世代ミリ波通信用小型広帯域アンテナシステムの開発

研究代表者　　伊　藤　桂　一　　秋田工業高等専門学校・電気・電子・情報系・教授

1 はじめに

ミリ波帯の通信利用が普及すると同時に高周波化が著しく進み，第 5 世代移動通信システム（5G）では 28 GHz 帯であった使用帯域も第 6 世代移動通信システム（6G）では 100 GHz 超と言われている。ミリ波デイバスおよび伝送線路も高周波化に伴い小型化が求められ，特にデバイス間を接続する低損失な伝送線路の需要は高い。低損失な伝送線路の代表格は導波管であるが，一般に重く，形状の自由度は少ない。そのため小型軽量化が実現でき，分岐や曲がりなどの試作も容易な伝送線路として，誘電体線路に着目した[(1)]。誘電体線路は誘電体内を伝送させる線路であり，主に光領域で用いられる。本研究では誘電体を利用した 3 つの伝送線路モデルを定義し，ミリ波帯における誘電体線路の伝送特性を明らかにすることを目的とする。次に，誘電体線路による分波器の T 分岐部を設計し，2 分配が実現可能か明らかにする。本研究では自由度の高い形状設計法として正規化ガウス関数ネットワーク（NGnet）を用いたトポロジー最適化を適用する[(2)(3)]。また，誘電体線路終端をアンテナとして利用した場合の設計を行い，任意のチルト角を実現可能か明らかにする。

2 伝送線路モデル

図 1 は本研究で使用した伝送線路モデルの一覧である。基本となる伝送特性は直線線路を用いて解析を行い，分波器では T 分岐を用いた分配特性およびアンテナ一体回路の設計を行う。3 種類の誘電体線路はそれぞれ誘電体線路モデル，NRD ガイド（Non-radiative dielectric guide）モデル[(4)]，導波管モデルである。各モデルのシルバー色部分の素材が金属，青色部分が誘電体である。NRD モデルは線路上下を金属で挟んだ構造であり，導波管モデルは線路を金属で囲んだ誘電体充填導波管となっている。また，各モデルの先頭部分にある金属の囲みは同軸導波管変換器を想定した給電部であり，中身は空気である。

本研究では WR-10 規格の導波管サイズの誘電体線路を解析対象とし，解析周波数は 76 GHz 帯を用いた。解析には FDTD 法（時間領域差分法）を用い，セルサイズは 0.08 mm とした。誘電体線路は比誘電率ε_rをパラメータとして与え，誘電正接 $\tan\delta=3\times10^{-3}$ とした。波源として給電部に TE_{10} モードの電界を与えたため，伝送線路は導波管規格に合わせて 2.56×1.28 mm（32×16 セル）の矩形形状の線路とした。

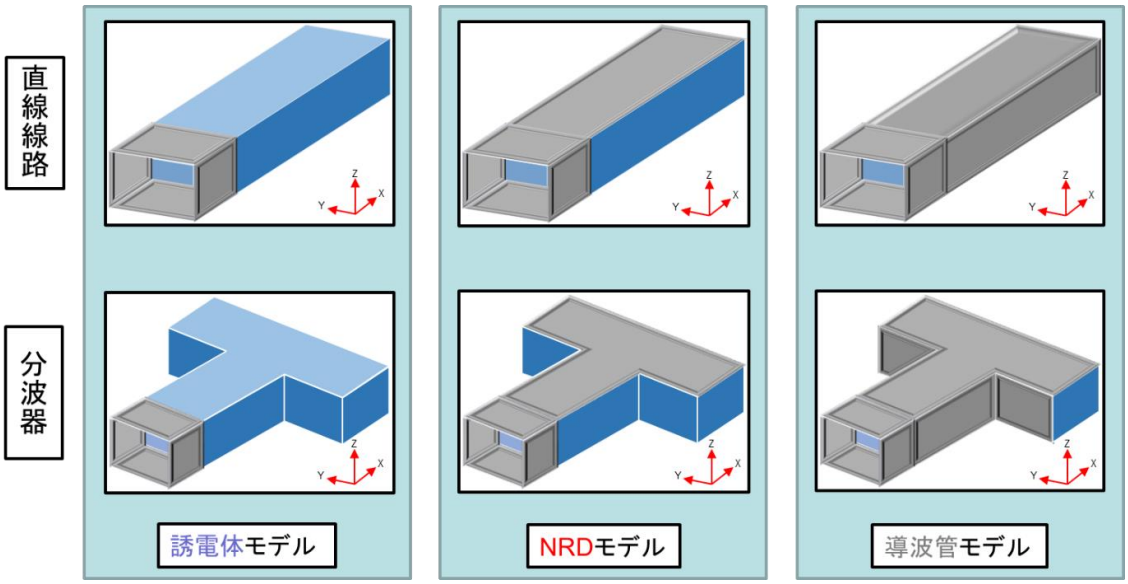


図 1　誘電体線路モデル

公益財団法人電気通信普及財団
研究調査助成報告書　第39号　2024年度

3 直線線路の伝送特性

3-1 解析条件

WR-10 規格導波管サイズの直線誘電体線路を解析対象とし，前述した 3 つのモデルについて伝送特性を解析した。最初に図 1 に示す直線誘電体線路モデルについて，入射側（x=KX1）と出力側（x=KX2）の通過電力を比誘電率ε_rを 1～8 に変えて計算を行った。刻み幅は 0.1 である。通過電力は線路内のポインティングベクトルを計算することにより求め，その比をとって伝送損失を算出した。伝送損失は損失率として計算し，始端側の観測位置の電力が全て終端側に伝わった場合の損失率は 0%である。誘電体は無損失および損失あり（誘電正接 $\tan\delta$=3×10^{-3}）の条件で計算した。FDTD 法は 12,000 ステップまで計算を行った。

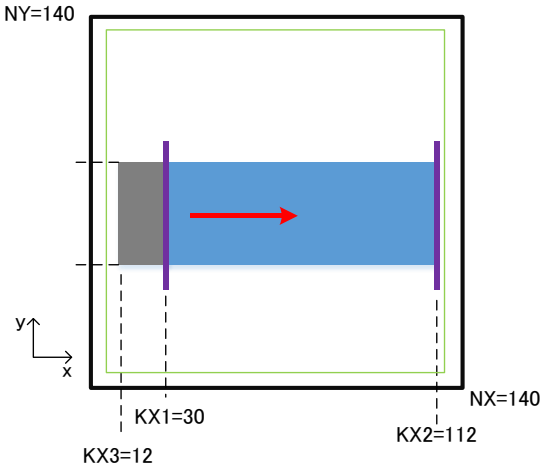
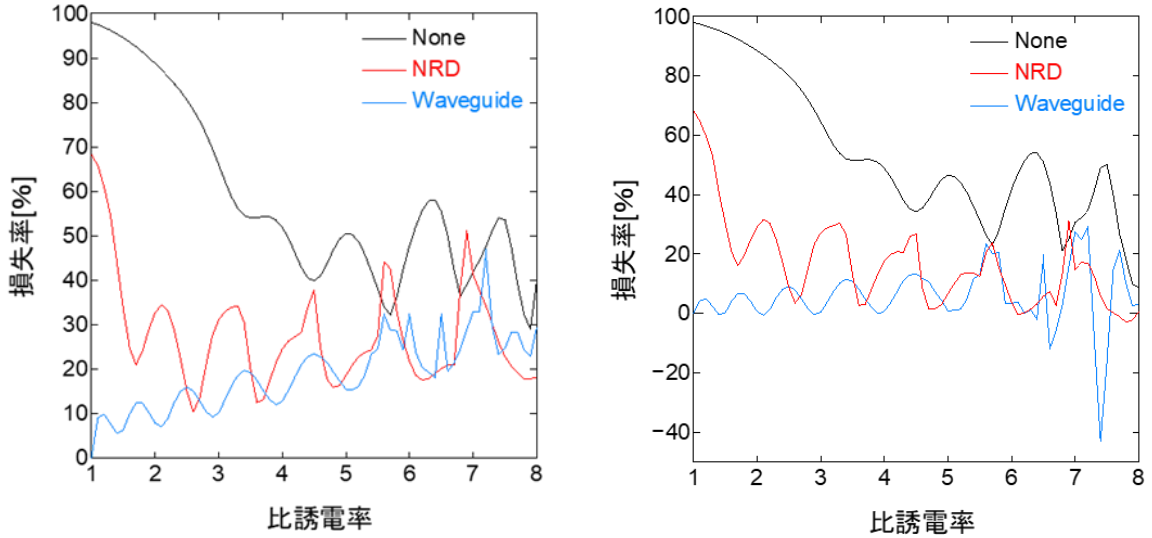


図 2　直線誘電体線路の解析モデル

3-2 解析結果

図 3 より誘電体線路モデル（図 3 中 None）は低誘電率では線路として全く機能していないものの，比誘電率が上がるにつれて誘電体線路内を通過する量が多くなる傾向を示した。NRD ガイドモデルも同様の傾向を示したが損失率は誘電体線路モデルと比べて低い。導波管モデルは比誘電率が 1 のとき損失率は 0%であるが，誘電率が高くなるにつれて損失率は悪化することが分かった。



(a) 損失あり　　(b) 損失なし

図 3 直線線路の電磁波の損失率

誘電体線路モデルはいくつかの比誘電率の範囲において損失率は 50 %を切るところもあり，高誘電率になるほど伝送特性はよい。高誘電率になるほど空気との境界で臨界角が小さくなり，全反射が起きやすくなる。誘電体に損失を与えた場合は与えない場合と比べても損失は大きくなるものの傾向としてはほぼ変わらない結果となった。いずれのモデルの結果からも比誘電率に対して周期的な変動がみられる。各壁面からの反射によって周期性が得られていると考えられ，金属壁の枚数が多い順に周期性は短くなる。

4　T 分岐誘電体線路のトポロジー最適化

4-1 解析条件

本研究では分岐部の四角形の領域についてトポロジー最適化を用いて構造設計を行い，分配効率の向上を試みた。解析モデルは図 4 に示す T 分岐であり，入射側（KX1）と分波後の一方の通過電力の比を分波率として計算する。つまり，分波率は 50 %が最善となる。導波管モデルでは分波率はほぼ 50 %となり，入射波は両側に均等に分配される。図 5 の電界分布のスナップショットでも 90 度に折れ曲がった線路上を電波が伝送していることが分かる。一方，NRD ガイドモデル，誘電体線路モデルでは正面方向へ抜ける電波が多く，分岐後の線路を伝送する電磁波が少なくなる。図 5 の電界分布のスナップショットをみても誘電体線路は分波器としてほぼ機能していないこと，NRD ガイドも曲がりが急になると漏れる量が多くなることが分かる。

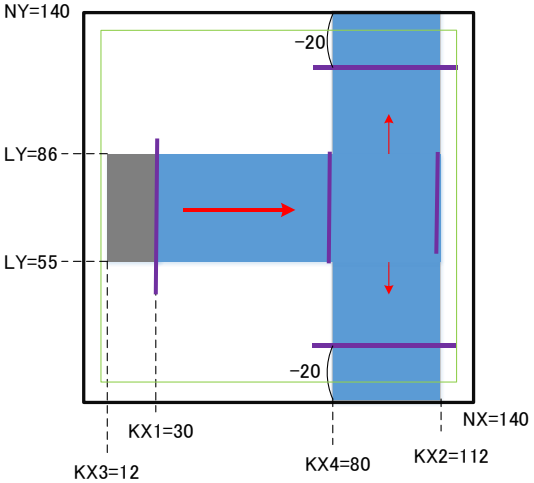
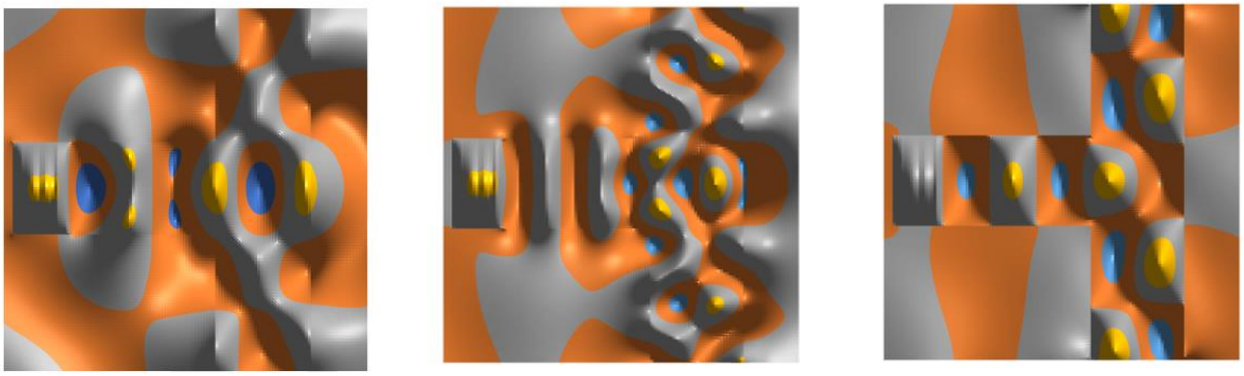


図 4　T 分岐誘電体線路の解析モデル



(a)誘電体線路モデル（ε_r=5）　(b)NRD ガイドモデル（ε_r=7）　(c)導波管モデル（ε_r=3）

図 5 T 分岐誘電体線路の電界分布の例

4-2 トポロジー最適化

誘電体線路を用いた分波器は，T 分岐ではほぼ機能しないことが分かった。そこで T 分岐の分岐部分（図 6 の斜線部）の構造をトポロジー最適化を用いて設計し，分波率の向上を試みた。本研究では NGnet を用いたトポロジー最適化を行い， 32×32 セルの設計領域に対して NGnet の基底数は x 方向 11 個，y 方向 10 個として，図 6 の上下で対象となるように誘電体線路の構造設計を行った。前節の結果より曲がりが急峻な構造では完全に金属で囲わないと漏れが大きいことが分かった。ゆっくりと変化する構造にすると分波率は向上すると考えられるが余分なスペースを使ってしまう。トポロジー最適化を用いて T 分岐と変わらない設計領域でも分波可能な構造を得ることができれば省スペース化を実現できる。トポロジー最適化では厚さ方向（z 方向）は一様な構造として設計した。NGnet を用いたトポロジー最適化では各ガウス基底の係数を調整が必要である。本研究ではμGA（マイクロ遺伝的アルゴリズム）を用いて最適化を行った。

比誘電率をε_r=6 として最適化した結果を図 7 に示す。200 世代まで計算を行ったところ，目的関数はほぼ飽和する傾向が見られた。最終結果は分波率が 32.45 %（50 %が最大）まで改善し，当初の T 分岐線路と比較しても最適化後の構造によって伝送効率は大幅に改善することを確認した。図 7 の図中図に示した最適化構造をみると入力側に大きな空洞ができていることが分かる。別の最適化結果でも同様の構造が得られたことから，狭い設計領域でも効率よく分波するために空洞が有効な形状になっていると推測される。一方で，設計領域を広くして最適化を行った結果では滑らかに分岐することが予想されるため次節で検討する。

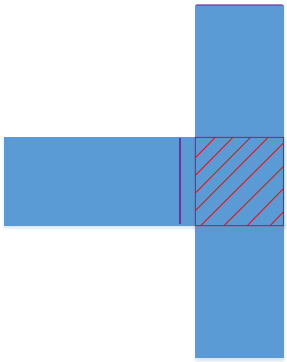


図 6 設計領域

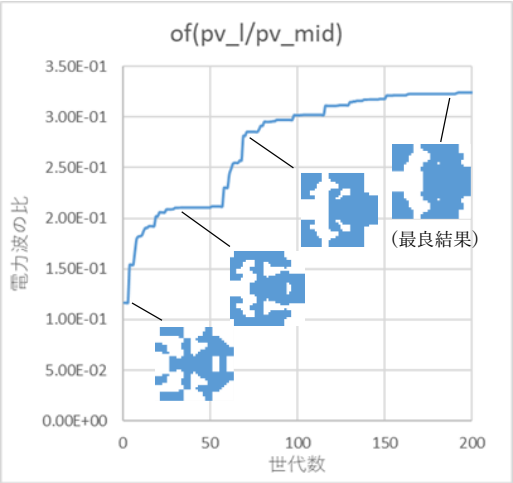


図 7　世代推移と最適化結果（ε_r=6）

4-3 設計領域の拡大

トポロジー最適化によって誘電体線路でも分波可能になることが分かった。次に設計領域図 8 に示すように 32×32 セルに拡大して同様の設計を行った。より滑らかな形状を得られるため，分波率の向上が期待される。比誘電率ε_r=4.5 のとき，最適前（T 分岐）の分波率は 1.5 %であったのに対して最適化後は 45.3 %にまで改善した。このときの最適形状を図 9 に示す。空洞を設けることにより設計領域内で透過と反射がうまく組み合わさり，分波率が向上したものと考えられる。

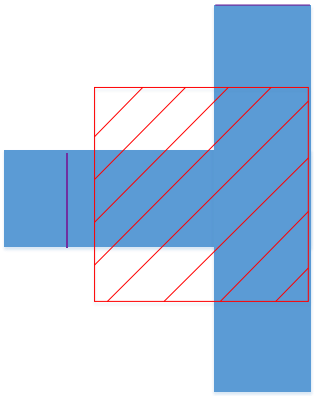


図 8 設計領域の拡大

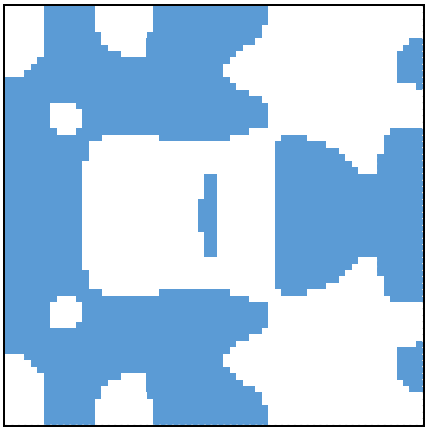


図 9 最適形状の例（ε_r=4.5）

5 誘電体線路一体アンテナの設計

4 章ではトポロジー最適化による設計を行うことで誘電体線路でも分波可能であることを示した。本研究では分岐先をさらに 90° 曲げて誘電体アンテナを 2 つ構成し，誘電体線路一体アンテナの設計を行った。図 8 の斜線部の設計領域をトポロジー最適化による構造設計を行うことで，分波して，さらに位相制御を行うことができればビームステアリングが可能になる。試みに放射パターン上で 45° 方向にビームチルトするよう最適設計を行った結果が図 9 である。初期固体に比べ，最適化結果の放射パターンは 45° 寄りにビームチルトし，放射も大きくなった。このときの形状を図 9 に示す。高誘電率材料をどのように加工するかが今後の課題であるが，トポロジー最適化を用いて誘電体線路とアンテナを一体設計できることを示した。

2 素子アレーアンテナについて検討を行ったが誘電体線路を 3 次元的に配置することで立体的にビームチルトすることも可能である。また，素子数を増やすことによりビーム幅も狭くして指向性アンテナを実現することもできる。

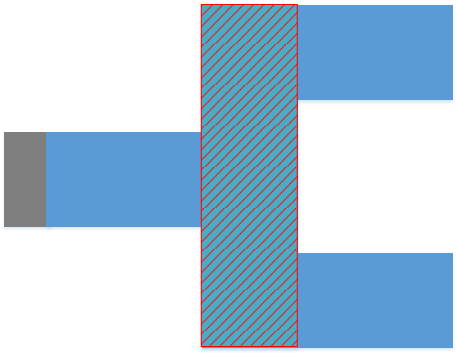
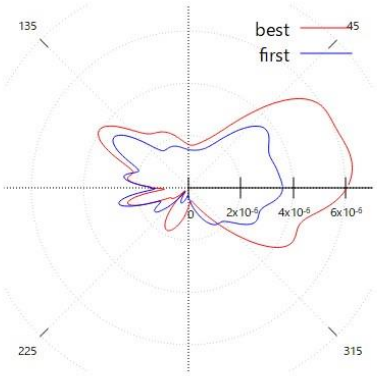
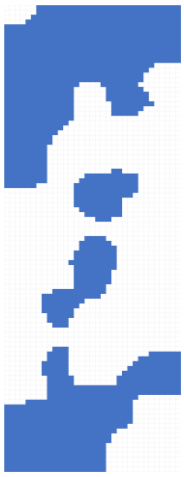


図 8 設計領域



(a) 放射パターン



(b) 最適構造

図 9 設計結果

6 おわりに

本研究では誘電体線路の伝送特性について解析を行い，高誘電率では誘電体線路でも伝送できることを示した。T 分岐による分波器では誘電体線路でも構造設計次第では分波が可能になることを示した。以上の結果より，トポロジー最適化を用いた構造設計はミリ波デバイスの設計においても有効であるといえる。

一方で試作については今後も引き続き検討していく。トポロジー最適化による設計結果を試作する最有力候補は 3D プリンタであるが誘電率の選択の余地がなく，76 GHz 程度の波長になると印刷精度も課題となる。今後は機械工作でも製作可能となるようなロバストな設計についても検討する予定である。

【参考文献】

(1) 小笠原直幸，鈴木道也，布施正:「ミリ波工学」, pp.39-46 (1976)
(2) 佐藤孝洋，五十嵐一，高橋慎矢，内山翔，松尾圭祐，松橋大器:「ポロジー最適化による埋込磁石同期モータの回転子形状最適化」，電気学会論文誌 D, Vol.135, No.4, pp.291-298(2015)
(3) K. Itoh, H. Nakajima, H. Matsuda, M. Tanaka, and H. Igarashi: “Development of small dielectric lens for slot antenna using topology optimization with normalized Gaussian network,” IEICE Trans. Electron., Vol.E101-C, No.10, pp.784-790(2018).
(4) 米山務:「非放射性誘電体線路を用いたミリ波集積回路」，電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J73-C1, No.3, p.87-91(1990)

〈発　表　資　料〉

題　　名	掲載誌・学会名等	発表年月
ミリ波伝送線路のFDTD解析とミリ波バンドパスフィルタの設計	第6回大規模電磁界数値解析手法に関する研究シンポジウム（LSCEM2023）	2023年2月
ミリ波誘電体線路の FDTD 解析とトポロジー最適化	電気学会電子・情報・システム部門大会	2023年9月
Design of Millimeter Wave Waveguide Bandpass Filter for Prototyping with 3D Printer	21st International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2023)	2023年11月