

汎用三次元数値シミュレーションソフトを用いたヘリックス型進行波管の最適設計手法に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2024-06-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 中島, 研二 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.14945/0002000646">https://doi.org/10.14945/0002000646</a>

(課程博士・様式7)

# 学位論文要旨

専攻：ナノビジョン工学

氏名：中島 研二

論文題目：

汎用三次元数値シミュレーションソフトを用いたヘリックス型進行波管の最適設計手法に関する研究

論文要旨：

進行波管増幅器 (TWTA : Traveling-wave tube amplifier) は、電子管の一種である進行波管 (TWT : Traveling-wave tube) を増幅素子として用いる増幅器である。特に、ヘリックス型 TWTA は半導体を増幅素子として用いる SSPA (Solid state power amplifier) と比べて、マイクロ波およびミリ波帯といった超高周波領域において、高出力電力、高効率、広周波数帯域といった特長を持ち、衛星通信・放送やレーダシステムにおけるキーデバイスとして広く利用されている。TWTA の性能は近年の情報通信技術の高度化に伴い高度化しており、通信や放送等の応用分野向けに実用化されている周波数帯で用いられる TWTA においては、現在も高効率化や広帯域化といった性能改善の努力が継続されている。

現在実用化されている多くの TWT の基本構造は軸対称形であるため、従来の TWT の設計にはモデル化する物体を軸対称形で近似して計算を行う軸対称二次元モデルが用いられていた。しかし、TWT の構成要素には軸対称形でない部分も多く存在し、TWT 内部で起こる物理現象を詳細に模擬するには軸対称二次元モデルでは不十分な面もあった。また、軸対称二次元モデルでは、製造誤差などに起因する非対称性を考慮することが不可能であり、こういった非対称性は通信品質に大きく影響する TWT の振幅および位相の周波数特性に不連続点を生じたり、TWT の不安定動作を引き起こしたりすることが知られている。このように従来の設計手法では考慮が不足する課題が存在することにより、従来の設計においては複数の試作機を製造し、測定結果と設計結果を比較することで設計に反映するといったフローが一般的であったが、この手法では複数回のイタレーションが発生し、TWT 開発の長期化や高コスト化の一因になると考えられる。

近年の計算機の性能向上および TWT への性能要求の高度化に伴い、TWT の設計精度向上を目的として、TWT の設計により高度なモデルを適用する研究がなされてきた。そういった研究の多くから、測定結果をよく再現する計算結果が得られるなど有益な結果が報告されているが、いずれの報告においても TWT 内部のモデル化において現実とは異なるモデル化が用いられるなど、計算結果を実際の設計および TWT の製造にフィードバックすることが困難で TWT の不安定現象への言及がなされていない、または不安定現象は独立に考慮

されており、TWT 性能と不安定現象の総合的な考慮がなされていないといった課題が存在し、実用的なレベルで TWT の設計に適用された例は少ない。

近年の高周波数かつ高出力電力のヘリックス型 TWT では、TWT の不安定動作を詳細に考慮した設計が必要であり、従来用いられてきた軸対称二次元モデルによる設計ではこれらの不安定現象を TWT の数値シミュレーションにおいて総合的に考慮することが困難であるという問題があった。本研究では、TWT の主要性能と不安定性を同時に考慮しながら、実際のヘリックス型 TWT 内部の三次元構造などをより厳密にモデル化することでこれまで困難であった不安定現象を抑制したヘリックス型 TWT の最適設計手法を提案することを目的とする。

本研究では、汎用三次元数値シミュレーションソフトである CST Studio Suite を用いて、ヘリックス型 TWT の各構成要素の 3D モデル化を行い、得られた計算結果と理論値や測定値との比較を行うことで 3D モデルの妥当性の確認を行った。また、本研究で得られた 3D モデル化手法を用いて K 帯 (17.7–21.2 GHz) 150 W 級ヘリックス型 TWT の動作解析モデルを作成し、主要性能の計算値と測定値の比較を実施した。比較の結果、動作解析モデルの計算結果は、小信号利得で -1.9 dB、ビーム効率では 0.4% の差異で測定結果と一致し、本研究で作成した 3D モデルは妥当であると考えられる。

また、同モデルを用いて最適設計手法の提案を行った。本研究では、従来の軸対称二次元モデルで正確に考慮することが困難であったアッテネータのロスパターンおよびヘリックスのピッチプロファイルを最適化し、K 帯 150 W 級 TWT において不安定性を考慮しながら、同時にビーム効率を改善することを行った。アッテネータのロスパターンに関しては、3D モデル上の誘電体に Bulk 導電率を設定する手法でモデル化を実施し、3D モデル上でロスパターンを変化させることで TWT の不安定動作現象および主要性能に変化が生じることを計算上で確認することが可能となった。この手法を用いることで、主要性能が最大かつ不安定動作が発生しない最適なロスパターン設計が可能となることが考えられる。また、ピッチプロファイルにおいては出力側遅波回路の速度テーパを 3D モデルによる計算結果から得られた電子ビームの速度から決定する手法を用いることで、ビーム効率を最大で 4.3% 改善することが可能であることを示した。以上のように、本研究で提案する手法を用いることで TWT の主要性能と不安定動作現象を同時に考慮した最適設計が可能となることを示した。

今後も通信システムの高度化の傾向は続くことが予想され、それに伴って TWT にも高性能化が要求されることが予想される。このような将来のニーズに応えるためには本研究で示したような実機を詳細に模擬した設計手法の適用が必要となると考える。