UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

Propuesta TFG. Curso 2025/2026

GRADO: Grado en Física

CÓDIGO DEL TFG: 267-312-2025/2026

1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

Título: Modelado numérico de propagación electromagnética en plasmas anisótropos mediante el método numérico FDTD.

Descripción general (resumen y metodología):

Breve descripción del trabajo:

El uso del método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) para la resolución de las ecuaciones de Maxwell es relativamente directo si el medio modelado posee propiedades isótropas e independientes de la frecuencia. Básicamente, cada propiedad del campo eléctrico o magnético se actualiza en cada paso temporal en función de valores anteriores del campo y esta actualización es independiente del resto de componentes del campo.

Un plasma electromagnético es básicamente un gas ionizado. La presencia de estas cargas libres le confiere unas características especiales, entre las que destacan su comportamiento dependiente de la frecuencia, dispersivo, y que su respuesta a un campo magnetostático externo depende de la dirección, es decir, es anisótropo. Estas propiedades complican sustancialmente la aplicación del método FDTD con respecto a su formulación original presentada por Yee en 1966 y que ha sido ampliamente utilizada en diferentes campos de la física y la ingeniería, más allá del ámbito electromagnético.

En este TFG se propone estudiar e implementar las modificaciones que deben añadirse al método FDTD para ser capaz de simular la anisotropía y la dependencia con la frecuencia inherentes a un plasma magnetizado.

El estudio de la anisotropía se plantea considerando a ésta como una propiedad que obliga a tener en cuenta rodas las componentes del campo de forma simultánea, de manera que la actualización temporal de los campos se debe realizar como la resolución de un sistema de ecuaciones en diferencias finitas que evoluciona con el tiempo.

Por otro lado, y en cuanto se refiere a la dispersión, la bibliografía recoge diferentes opciones. La primera en aparecer es más cercana a cuestiones teóricas y se basa en implementar el comportamiento dependiente de la frecuencia como una convolución añadida al método FDTD original. Esta situación, aun habiéndose tratado con éxito en diferentes ocasiones, fue posteriormente mejorada mediante la incorporación de técnicas de tratamiento de señal tales como la transformación bilineal y la transformada Z.

Establecidas las bases de ambos métodos, el modelado de un plasma magnetizado pasa por combinar ambos métodos en un solo algoritmo.

En este TFG se plantea la resolución mediante FDTD de esta problemática en tres etapas: 1) simulación de medios anisótropos no dispersivos, 2) simulación de medios dispersivos, y 3) simulación de un plasma magnetizado como ejemplo final de medio anisótropo y dispersivo.

Metodología:

Se estudiarán los conceptos fundamentales del método FDTD, particularizadas para la resolución de las ecuaciones de Maxwell y la ecuación de ondas que de ellas se desprende.

Inicialmente se abordará el modelado con FDTD de medios isótropos y no dispersivos: el vacío y materiales con permitividad, permeabilidad magnética y conductividad constantes. Tras comprender el esquema discreto inherente al método, se modelará la propagación de una onda plana en el vacío primero y otros medios después. Sobre este ejemplo se estudiarán las opciones de alimentación, la utilidad de la Transformada de Fourier y se comprobará cómo la dispersión numérica limita la bondad del resultado obtenido.

El segundo paso será la modificación del medio para tener en cuenta la anisotropía de u medio. Se planteará el problema mediante un proceso de actualización simultánea que requiere de la resolución de un sistema de ecuaciones.

En tercer lugar, se planteará la simulación mediante el uso de trasformación bilineal y la transformada Z parea describir el comportamiento dependiente de la frecuencia. Se plantearán ejemplos canónicas con medios cuya permitividad o permeabilidad sigan modelos de Debye o Lorentz.

Finalmente, se abordará la resolución de la propagación de ondas en un plasma en presencia de un campo magnetostático que requiere la implementación e la anisotropía y la dispersión de menara simultánea.

El estudiante podrá sustituir estos casos de aplicación por otros de complejidad e interés similar.

Los pasos seguidos en este trabajo culminarán en una memoria estructurada, en la que el estudiante aprenda a presente un problema y justifique su interés, presente el fundamento del problema a tratar y los entresijos del método de resolución, culminando con unas conclusiones extraídas del trabajo. Todo ello apoyado de las referencias bibliográficas que apoyen aspectos no desarrollados y reconozcan el trabajo realizado previamente por otros autores.

Tipología: Estudio de casos, teóricos o prácticos, relacionados con la temática del Grado.

Objetivos planteados:

Familiarización del estudiante con la resolución numérica de sistemas de ecuaciones diferenciales acopladas en el dominio del tiempo.

Comprender los aspectos fundamentales relacionados con la descripción de sistemas electromagnéticos anisótropos dispersivos, desde puntos de vista teórico y numérico.

Familiarización con el método numérico FDTD y los aspectos necesarios en un problema de simulación mediante un método de baja frecuencia (TLM, Diferencias Finitas, ...): discretización, dispersión numérica, alimentación, análisis de resultados, condiciones de frontera, ...

Familiarización con técnicas de análisis de señal: transformada Z, transformación bilineal, ...

Aplicación al modelado de propagación electromagnética en medios anisótropos y/o dispersivos.

Familiarización con el diseño de escenarios numéricos, así como con la interpretación y presentación de resultados numéricos.

Bibliografía básica:

1.- Kunz, K.S. & Luebbers, R.J. (1993). The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/97802037367082.- J.H. Ferziger and M. Perić. Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer, 2002.

2.- Kane Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 14, no. 3, pp. 302-307, May 1966, doi: 10.1109/TAP.1966.1138693.

3.- J. Schuster and R. Leubbers, "Application of FDTD to anisotropic materials," Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting, Seattle, WA, USA, 1994, pp. 1422-1425 vol.3, doi: 10.1109/APS.1994.408233.

4.- R. Luebbers, F. P. Hunsberger, K. S. Kunz, R. B. Standler and M. Schneider, "A frequency-dependent finite-difference time-domain formulation for dispersive materials," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 32, no. 3, pp. 222-227, Aug. 1990, doi: 10.1109/15.57116.

5.- D. M. Sullivan, “Frequency-Dependent FDTD Methods Using Z Transforms,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 40, No. 10, 1992, pp. 1223-1230.

6.- D. M. Sullivan, "Z-transform theory and the FDTD method," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, no. 1, pp. 28-34, Jan. 1996, doi: 10.1109/8.477525.

7.- Joo Hwa Lee and D. K. Kalluri, "Three-dimensional FDTD simulation of electromagnetic wave transformation in a dynamic inhomogeneous magnetized plasma," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 47, no. 7, pp. 1146-1151, July 1999, doi: 10.1109/8.785745.

8.- L. Xu and N. Yuan, "FDTD Formulations for Scattering From 3-D Anisotropic Magnetized Plasma Objects," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 5, pp. 335-338, 2006, doi: 10.1109/LAWP.2006.878901.

Recomendaciones y orientaciones para el estudiante:

Plazas: 1

2. DATOS DEL TUTOR/A:

Nombre y apellidos: JORGE ANDRÉS PORTÍ DURÁN

Ámbito de conocimiento/Departamento: FÍSICA APLICADA

Correo electrónico: jporti@ugr.es

3. COTUTOR/A DE LA UGR (en su caso):

Nombre y apellidos:

Ámbito de conocimiento/Departamento:

Correo electrónico:

4. COTUTOR/A EXTERNO/A (en su caso):

Nombre y apellidos:

Correo electrónico:

Nombre de la empresa o institución:

Dirección postal:

Puesto del tutor en la empresa o institución:

Centro de convenio Externo:

5. DATOS DEL ESTUDIANTE:

Nombre y apellidos:

Correo electrónico: