

Titolo: Analisi numerica e sperimentale di metamateriali a modulazione temporale

Descrizione del Progetto di Ricerca

Il progetto di ricerca proposto è dedicato allo studio, alla progettazione e alla validazione sperimentale di metamateriali a modulazione temporale per la propagazione di onde elastiche. Attraverso la variazione controllata nel tempo della rigidezza effettiva e della densità di massa, tali metamateriali permettono di ottenere fenomeni innovativi come la propagazione d'onda non reciproca, la conversione di frequenza e la manipolazione delle forme d'onda.

La ricerca si concentrerà in particolare sulle vibrazioni flessionali di travi e lastre bidimensionali, con l'obiettivo di coniugare lo sviluppo di conoscenze fondamentali con la realizzazione di piattaforme funzionali per l'elaborazione e il controllo del segnale in campo elastodinamico.

In questo contesto verranno progettate **interfacce temporali** in grado di manipolare selettivamente la propagazione delle vibrazioni elastiche, svolgendo funzioni di isolamento, mixing di frequenza e filtraggio. Le potenzialità di tali approcci trovano applicazione in settori quali il monitoraggio strutturale, l'imaging ultrasonico e l'elaborazione analogica del segnale a basso consumo energetico. La ricerca combinerà metodi analitici, simulazioni numeriche ed esperimenti di laboratorio per porre le basi di un quadro sistematico sui metamateriali elastici a modulazione temporale.

Piano delle Attività

Nell'ambito del progetto, il/la candidato/a sarà impegnato/a nelle seguenti linee di lavoro:

1. Sviluppo teorico e modellazione analitica

- Definire modelli analitici per descrivere la dinamica di travi e lastre soggette a modulazione temporale.
- Studiare i meccanismi fondamentali associati all'instabilità, alla conversione di frequenza e alla generazione di componenti armoniche.
- Analizzare le proprietà delle interfacce temporali e il loro ruolo nella manipolazione della propagazione delle vibrazioni elastiche.

2. Progettazione numerica e ottimizzazione

- Sviluppare modelli numerici ad alta fedeltà e modelli ridotti per guidare la progettazione di metamateriali a modulazione temporale.
- Definire strategie di modulazione programmabile per controllare la propagazione e la distribuzione dell'energia elastica.
- Progettare discontinuità temporali dedicate a operazioni specifiche come la conversione di frequenza e la manipolazione delle forme d'onda.
- Validare numericamente i meccanismi di trasferimento energetico tra modi e frequenze.

3. Realizzazione sperimentale e validazione

- Progettare e realizzare dimostratori sperimentali basati su travi e lastre con attuatori integrati (ad esempio array piezoelettrici) in grado di introdurre modulazioni temporali programmabili.

- Condurre campagne sperimentali con tecniche quali vibrometria laser e analisi spettrale per caratterizzare il comportamento dinamico dei prototipi.
- Confrontare i risultati sperimentali con le previsioni teoriche e numeriche, dimostrando funzionalità avanzate quali trasporto non reciproco, conversione di frequenza ed elaborazione analogica del segnale.

Title: Numerical and Experimental Analysis of Time-Modulated Metamaterials

Description of the Research Project

The proposed research project focuses on the study, design, and experimental validation of time-modulated metamaterials for the propagation of elastic waves. By means of controlled temporal variation of effective stiffness and mass density, these metamaterials enable innovative phenomena such as nonreciprocal transport, frequency conversion, and waveform manipulation.

The research will focus particularly on flexural vibrations and bidimensional plates, with the aim of combining the development of fundamental knowledge with the realization of functional platforms for signal processing and control in elastodynamics.

In this framework, **time interfaces** will be designed to selectively manipulate the propagation of elastic vibrations, performing functions such as isolation, frequency mixing, and filtering. The potential of such approaches can be exploited in applications including structural health monitoring, ultrasonic imaging, and energy-efficient analog signal processing. The research will integrate analytical methods, numerical simulations, and laboratory experiments to establish a systematic foundation for time-modulated elastic metamaterials.

Plan of Activities

Within the project, the candidate will be involved in the following activities:

1. Theoretical development and analytical modeling

- Formulate analytical models to describe the dynamics of beams and plates under temporal modulation.
- Investigate fundamental mechanisms related to instabilities, frequency conversion, and the generation of harmonic components.
- Analyze the properties of time interfaces and their role in manipulating the propagation of elastic vibrations.

2. Numerical design and optimization

- Develop high-fidelity numerical models and reduced-order models to guide the design of time-modulated metamaterials.
- Define programmable modulation strategies to control the propagation and distribution of elastic energy.
- Design temporal discontinuities dedicated to specific operations such as frequency shifting and waveform manipulation.
- Validate numerically the mechanisms of energy transfer across modes and frequencies.

3. Experimental realization and validation

- Design and fabricate experimental demonstrators consisting of beams and plates with integrated actuators (e.g., piezoelectric arrays) capable of programmable temporal modulation.
- Conduct experimental campaigns using techniques such as laser vibrometry and spectral analysis to characterize the dynamic response of the prototypes.

- Compare experimental results with theoretical and numerical predictions, demonstrating advanced functionalities such as nonreciprocal transport, frequency conversion, and analog signal processing.