



La Fiera delle Costruzioni
progettazione, edilizia, impianti



Associazione laboratori di
ingegneria e geotecnica

Controlli Non Distruttivi sulle strutture

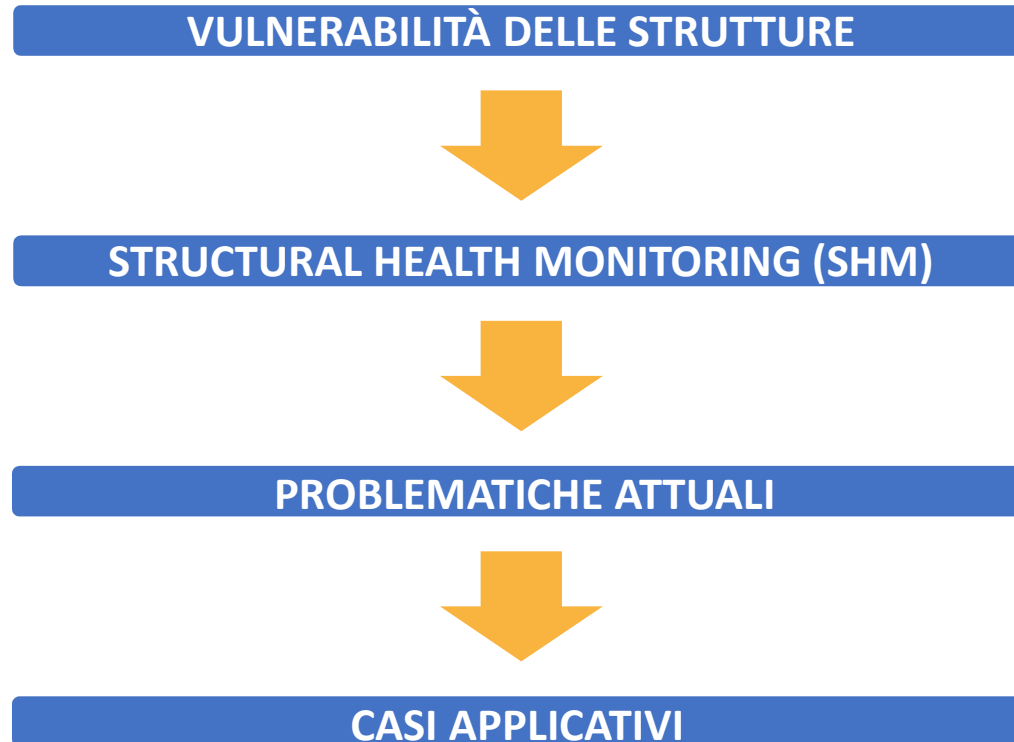
Tecniche di indagine innovative: Interferometria radar

Domenico Camassa, Antonio Curri



Politecnico
di Bari

Indice



VULNERABILITÀ DELLE COSTRUZIONI

L'elevata vulnerabilità del patrimonio edilizio e infrastrutturale italiano è associata a diversi fattori, tra cui il naturale degrado delle strutture, spesso accompagnato da una non adeguata attività di manutenzione, e il verificarsi di eventi critici, come quelli sismici, che possono portare a gravi conseguenze in termini di:

- perdita di vite umane
- perdita del patrimonio
- perdite economiche

GLI EVENTI CRITICI MOSTRANO L'ELEVATA VULNERABILITÀ DELLE COSTRUZIONI E L'INADEGUATEZZA DEGLI INTERVENTI MESSI IN ATTO PER LA LORO SALVAGUARDIA



Crolli di Cavalcavia – 2017/2020



Crollo Ponte ad Aulla - 2020

Crollo edificio a Napoli - 2014

Structural Health Monitoring (SHM)

CHE COS'È ?

Il monitoraggio strutturale punta ad acquisire informazioni sullo stato di integrità di una costruzione nel tempo.

Le tecniche di monitoraggio si sviluppano a diverse scale, da quella territoriale a quella della singola struttura

Il monitoraggio strutturale gioca un ruolo fondamentale per la **sicurezza pubblica e la salvaguardia del costruito**, in quanto consente di rilevare e monitorare modificazioni del comportamento meccanico di una struttura, attraverso cui redigere un piano di ispezioni e interventi mirati a prevenire eventuali stati di danneggiamento strutturale.

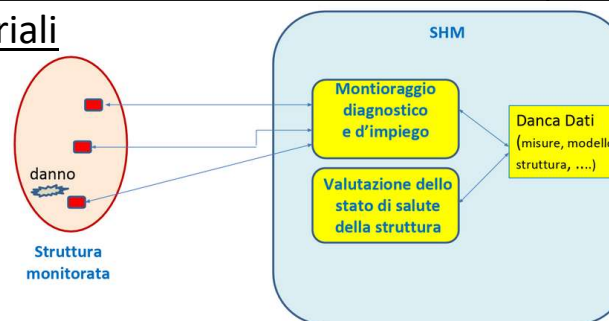
Il PNRR pone notevole attenzione allo sviluppo e all'applicazione di strategie SHM

A COSA SERVE ?

GARANTIRE
L'early Warning
di eventuali stati di
danneggiamento

EVITARE POTENZIALI
COLLASSI, che generano
gravi conseguenze
economiche e sociali

Individuare variazioni strutturali legate a danneggiamenti locali, cambiamenti anomali della geometria o variazioni del comportamento dei materiali

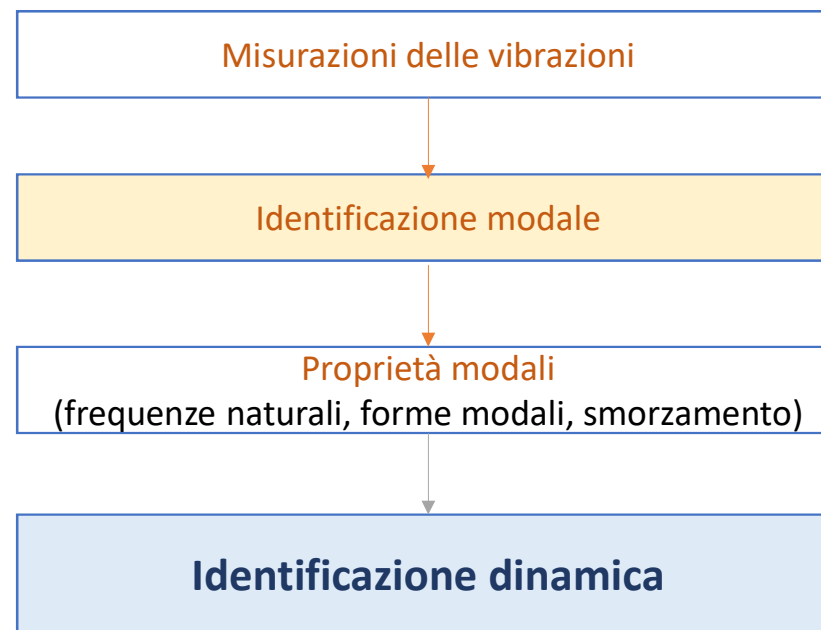


Identificazione Dinamica Strutturale

Insieme di tecniche analitiche e sperimentali di tipo non distruttivo volte a identificare le caratteristiche dinamiche di una struttura in termini di proprietà modali, vale a dire frequenze proprie, forme modali e coefficienti di smorzamento, a partire dalla misurazione delle vibrazioni strutturali

LA CONOSCENZA DELLE PROPRIETÀ MODALI CONSENTE DI:

- caratterizzare il **comportamento dinamico** della struttura, e quindi anche la **risposta sismica**
- **calibrare** modelli meccanici (analitici e/o numerici) delle strutture
- caratterizzare l'eventuale **danno strutturale** presente in una costruzione



Tecniche Accelerometriche

Problematiche Attuali

COMPLESSITÀ

delle tecniche di monitoraggio strutturale impiegate attualmente, basate sull'installazione di sensori fisici «accelerometri» e dei relativi cablaggi

INTERRUZIONE

accesso completo all'oggetto da misurare

COSTI

per l'esecuzione delle prove

RAPPRESENTANO AD OGGI UN FORTE OSTACOLO ALL'APPLICABILITÀ E ALLA DIFFUSIONE CAPILLARE DEL MONITORAGGIO STRUTTURALE

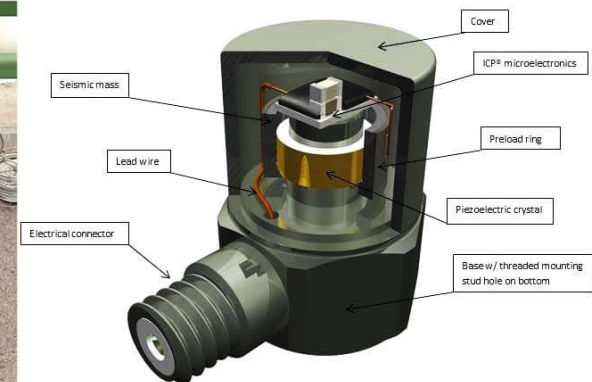


Figure 1: Typical ICP® Accelerometer

Tecniche di Misurazione Innovative

Nell'ultimo decennio sono state sviluppate soluzioni tecniche innovative per il monitoraggio periodico dello stato di conservazione di strutture e infrastrutture e, in particolare, per la caratterizzazione delle proprietà dinamiche delle stesse

Tra le tecnologie emergenti in tale ambito:
i sistemi di telerilevamento, come

L'INTERFEROMETRIA RADAR TERRESTRE



Radar IBIS-FS

VANTAGGI

- La rapidità di installazione della strumentazione e acquisizione dei dati,
- L'elevata risoluzione spaziale e l'elevata frequenza di campionamento,
- Non richiede l'accesso alla struttura funzionando completamente da remoto

Interferometria Radar Terrestre

Che cos'è il radar interferometrico?

È un radar coerente che consente di misurare simultaneamente e a distanza gli spostamenti in diversi punti di una struttura.

Il funzionamento si basa su due tecniche:

- Stepped Frequency Continuous Wave (SFCW)
- Interferometry technique

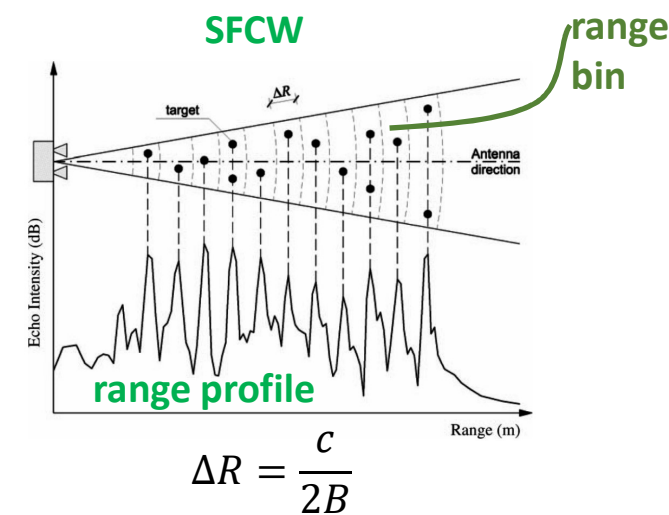
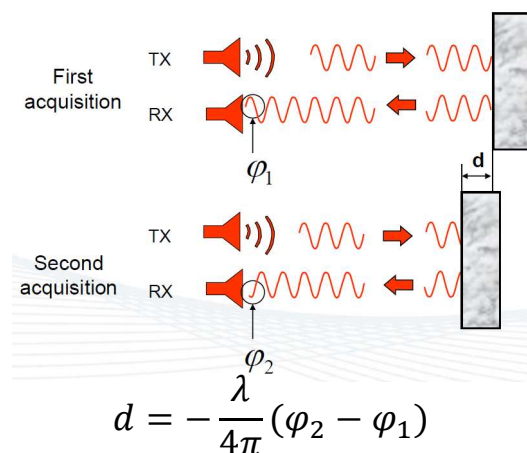
Lo spostamento di un punto lungo la linea di vista del radar può essere determinato valutando le differenze di fase delle onde elettromagnetiche riflesse dall'oggetto in istanti diversi.



Radar IBIS-FS



Interferometry technique

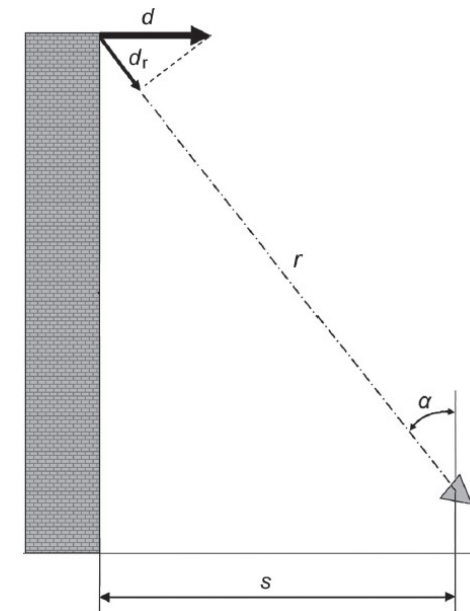
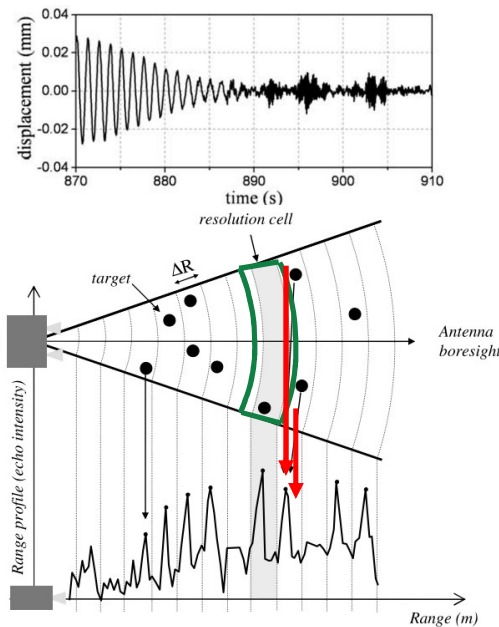


Interferometria Radar Terrestre

L'applicazione dell'interferometro radar all'identificazione dinamica strutturale presenta diverse problematiche, le quali derivano dalle caratteristiche di funzionamento dello strumento

PROBLEMATICHE

- accuratezza e SNR (max 0,01 mm in caso di SNR elevato)
- scenario 1D █
- scenario discreto ($\Delta R = 0,5m$) █
- solo spostamenti radiali



IN GENERE L'INTERFEROMETRO RADAR CONSENTE DI DETERMINARE LE PRIME FREQUENZE NATURALI DELLE STRUTTURE

Casi applicativi

IDENTIFICAZIONE DINAMICA STRUTTURALE MEDIANTE INTERFEROMETRIA RADAR

VIADOTTO FERROVIARIO IN C.A. SUL PARCO NORD F.S.I

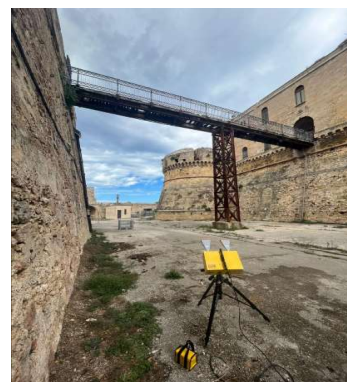
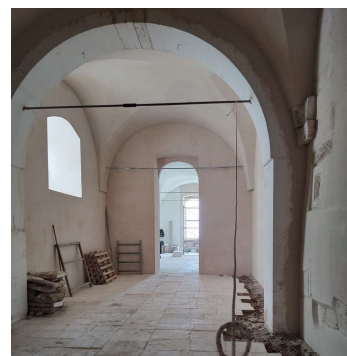
TURBINA EOLICA –SANTERAMO IN COLLE

LA PASSERELLA METALLICA DEL CATELLO SVEVO DI

FARO DI PUNTA SAN CATALDO- BARI

BRINDISIPONTE DI LAMA MONACHILE POLIGNANO A MARE

DETERMINAZIONE DELLA FORZA ASSIALE NEI TIRANTI PER MURATURA STORICA



VIADOTTO FERROVIARIO IN C.A. SUL PARCO NORD F.S.I



Politecnico
di Bari

Domenico Camassa, Antonio Curri

VIADOTTO FERROVIARIO IN C.A. SUL PARCO NORD F.S.I

INTRODUZIONE AL CASO



L'indagine è stata svolta in condizioni operative, con alcuni treni in transito durante le prove interferometriche



Politecnico di Bari

Domenico Camassa, Antonio Curri

VIADOTTO FERROVIARIO IN C.A. SUL PARCO NORD F.S.I

SETUP SPERIMENTALE



Prima Acquisizione



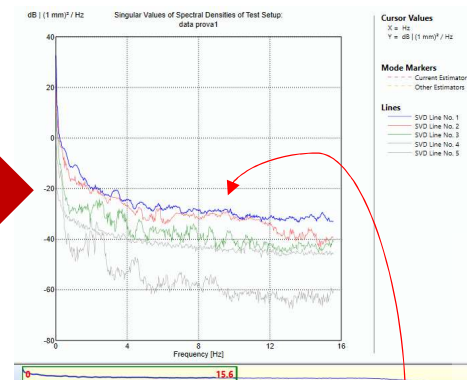
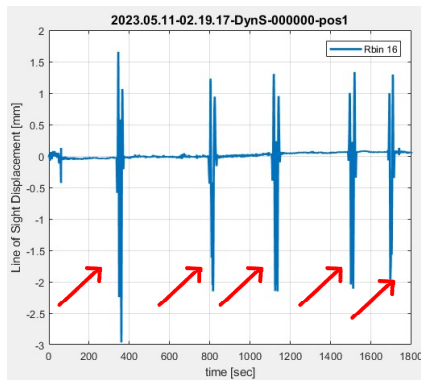
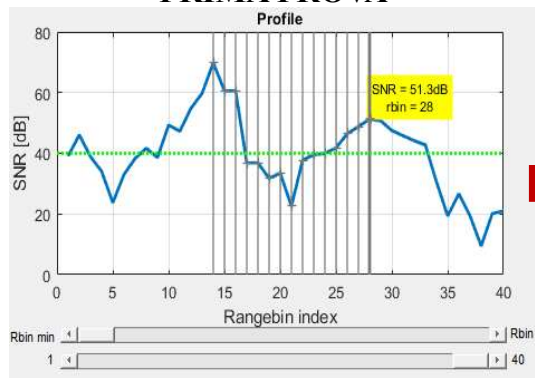
Seconda Acquisizione



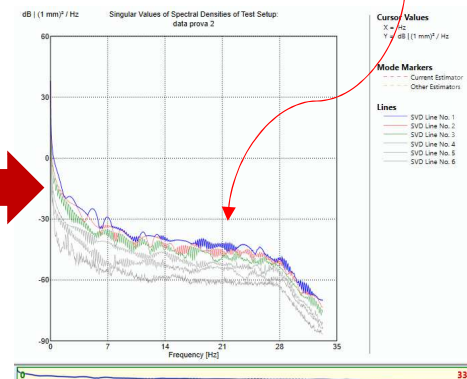
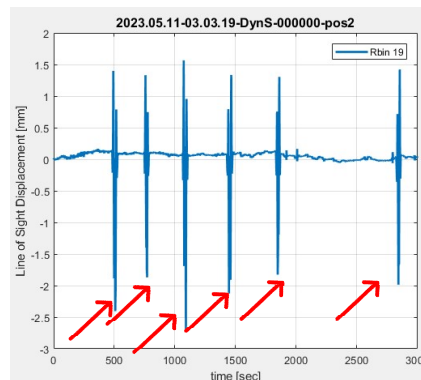
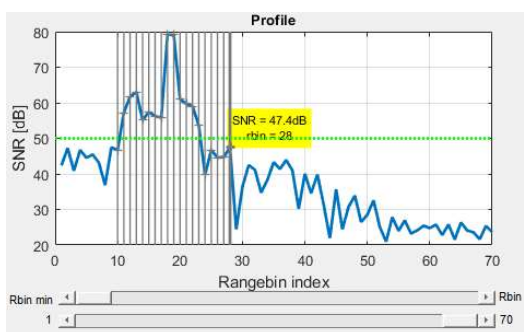
VIADOTTO FERROVIARIO IN C.A. SUL PARCO NORD F.S.I

ELABORAZIONE DEI DATI

PRIMA PROVA



SECONDA PROVA



Gli spettri dei segnali acquisiti non forniscono alcuna informazione rilevante

VIADOTTO FERROVIARIO IN C.A. SUL PARCO NORD F.S.I

ELABORAZIONE DEI DATI

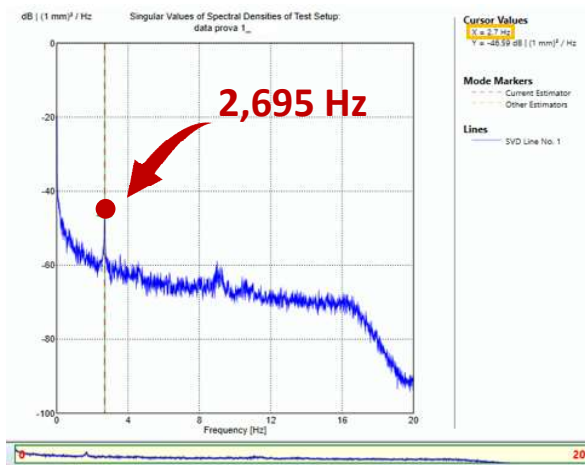
SEGMENTAZIONE DEI SEGNALI



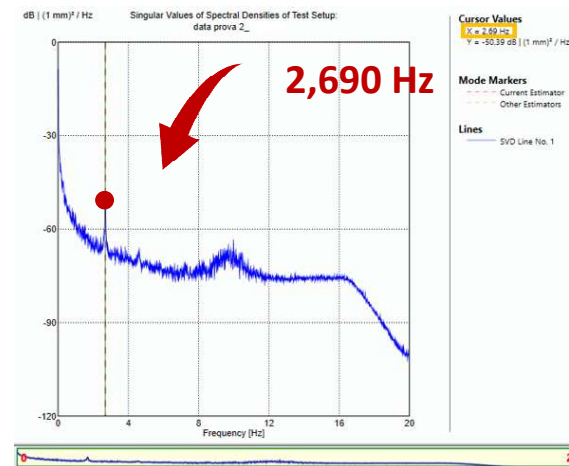
Attraverso un codice sviluppato in linguaggio *Python*, i segnali sono stati segmentati eliminando le vibrazioni indotte dal passaggio dei treni

PRIMA PROVA

	T start [s]	T end [s]
Segmento 1	70	335
Segmento 2	375	790
Segmento 3	835	1100
Segmento 4	1150	1485
Segmento 5	1530	1680
Segmento 6	1720	end



SECONDA PROVA



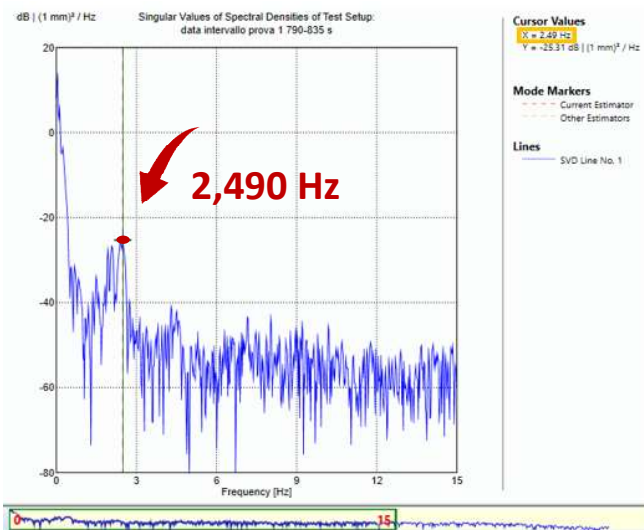
	T start [s]	T end [s]
Segmento 1	0	480
Segmento 2	530	745
Segmento 3	785	1060
Segmento 4	1105	1430
Segmento 5	1490	1830
Segmento 6	1875	2820
Segmento 7	2865	end

VIADOTTO FERROVIARIO IN C.A. SUL PARCO NORD F.S.I

ELAORAZIONE DEI DATI DURANTE IL PASSAGGIO DEI TRENI

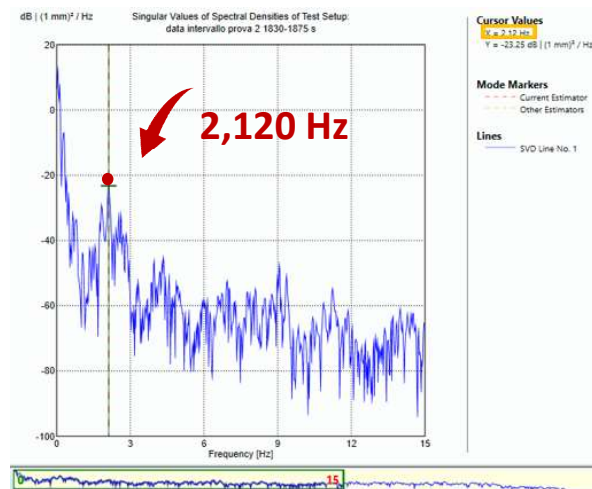
**PRIMA
PROVA**

	T start [s]	T end [s]
Segmento 1	335	375
Segmento 2	790	835
Segmento 3	1100	1150
Segmento 4	1485	1530
Segmento 5	1680	1720

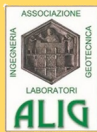


**SECONDA
PROVA**

	T start [s]	T end [s]
Segmento 1	480	530
Segmento 2	745	785
Segmento 3	1060	1105
Segmento 4	1430	1490
Segmento 5	1830	1875
Segmento 6	2820	2865



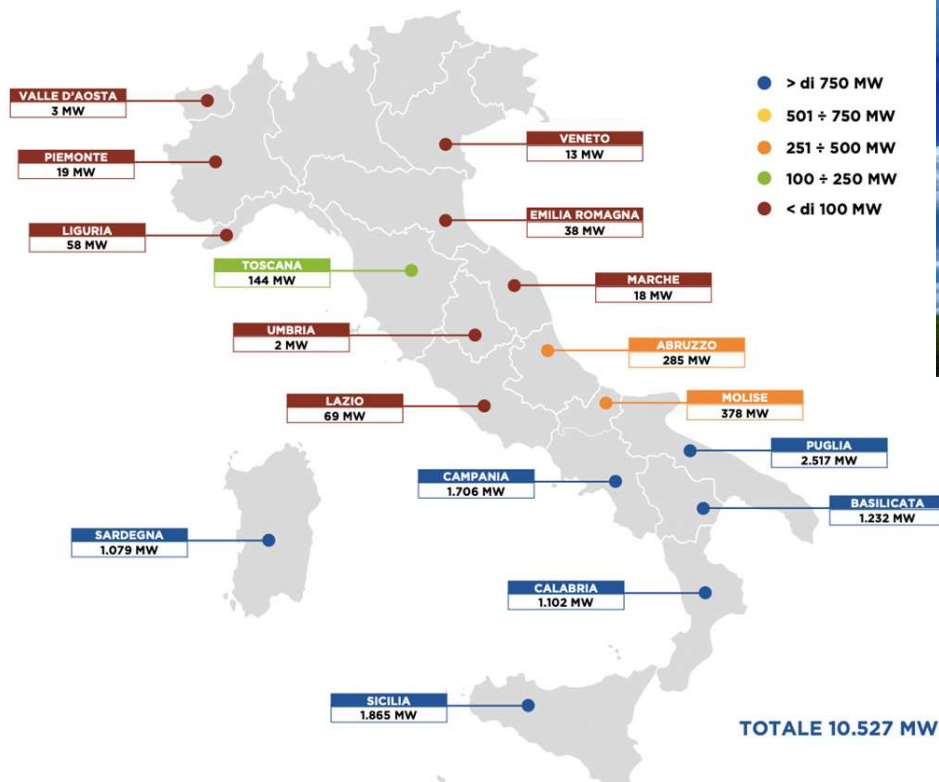
IDENTIFICAZIONE DINAMICA DI UNA TURBINA EOLICA



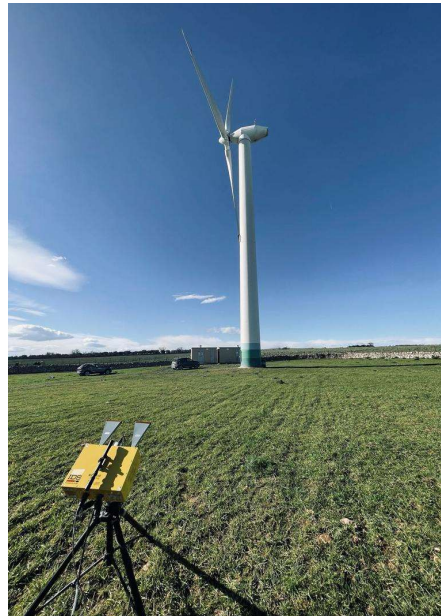
Politecnico
di Bari

Domenico Camassa, Antonio Curri

Turbina Eolica

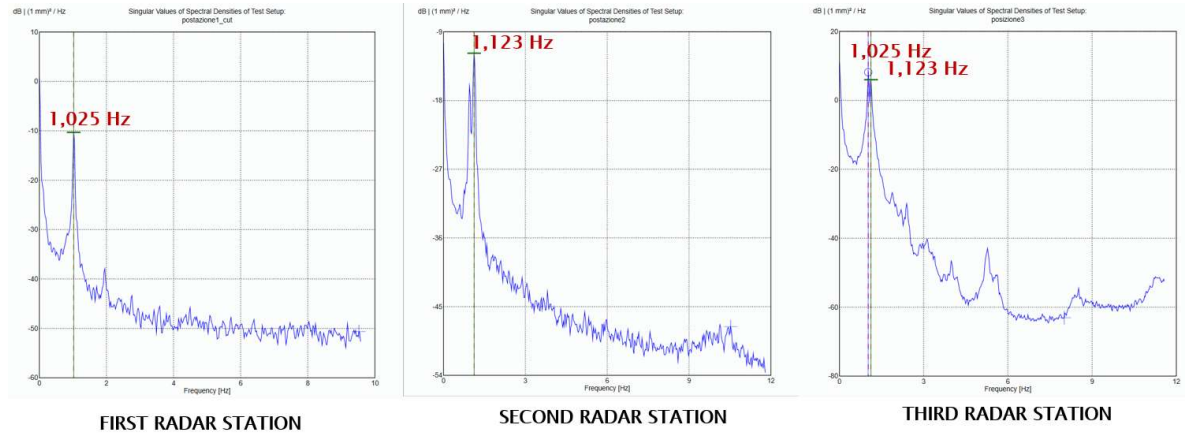


Turbina Eolica



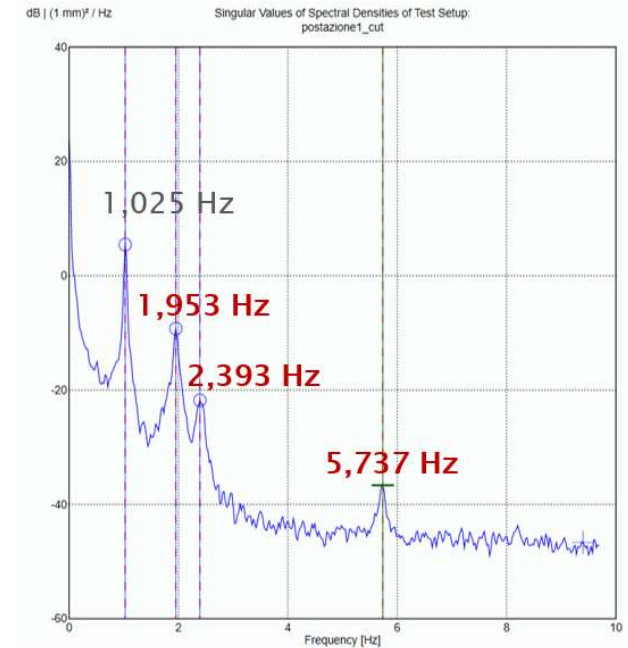
Caratterizzazione delle proprietà modali di un aerogeneratore da 300 kW situato nel territorio di Santeramo in Colle (BA), nella regione Puglia.

Turbina Eolica



Frequenze delle torri identificate dall'interferometro radar in ognuna delle tre stazioni radar

Frequency Domain Decomposition (FDD) method



FIRST RADAR STATION

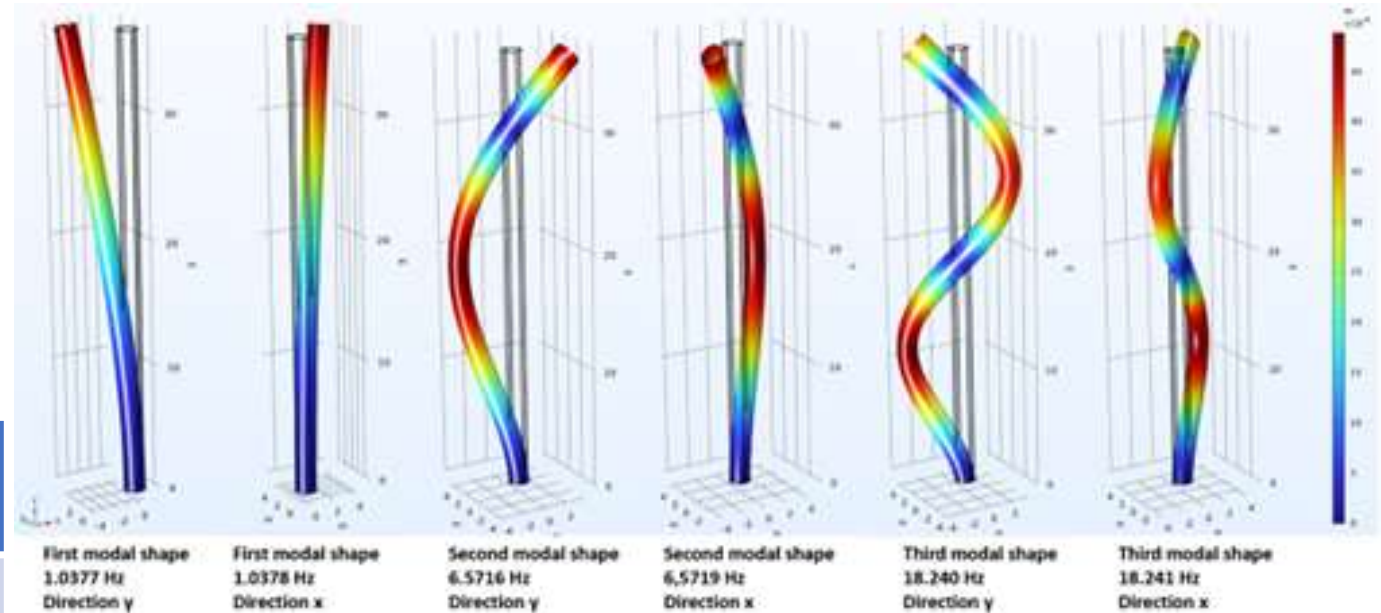
Frequenza della torre e frequenze delle singole pale identificate dall'interferometro radar durante la prima acquisizione radar

Turbina Eolica



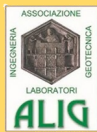
Abbiamo sviluppato un modello numerico di turbina eolica non danneggiata.

n.	f_{model} (Hz)	f_{IBIS} (Hz)	D_f (%)
1	1,0377	1,025	1,22
2	1,0378	1,123	8,21



Risultati numerici di una turbina eolica non danneggiata: le prime tre forme di modo principali con le loro frequenze associate

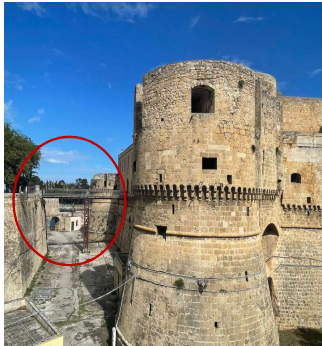
PASSERELLA METALLICA DEL CASTELLO SVEVO DI BRINDISI



Politecnico
di Bari

Domenico Camassa, Antonio Curri

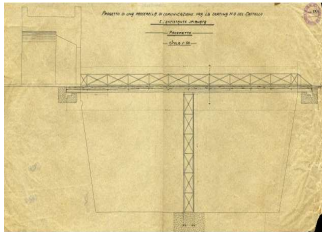
PASSERELLA METALLICA DEL CASTELLO SVEVO DI BRINDISI



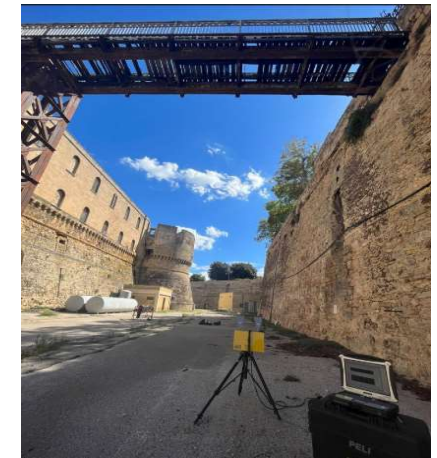
Castello federiciano, il cui impianto originario risale al 1227. Strutture di epoca angioina e ampliamenti cinquecenteschi. Dal 1909 sede del Comando della Marina Militare

Fase 1:

Installazione del radar IBIS in 5 diverse posizioni, analisi e confronto dei risultati relativi alle postazioni 1 e 3.



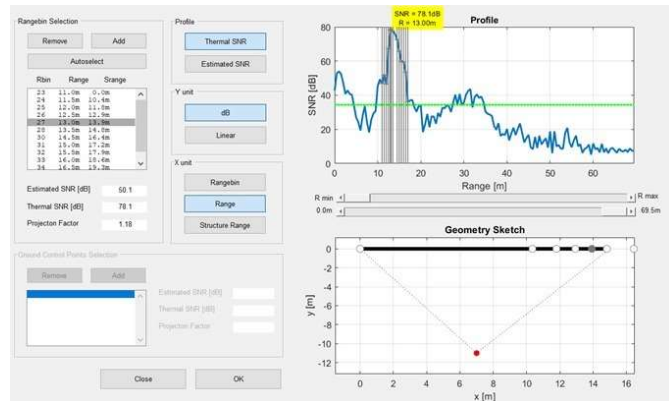
Posizione 1



Posizione 3

PASSERELLA METALLICA DEL CASTELLO SVEVO DI BRINDISI

ELABORAZIONE DEI DATI DI AUISIZIONE MEDIANTE SOFTWARE IBIS DATA VIEWER E ANALISI DEL RANGE PROFILE



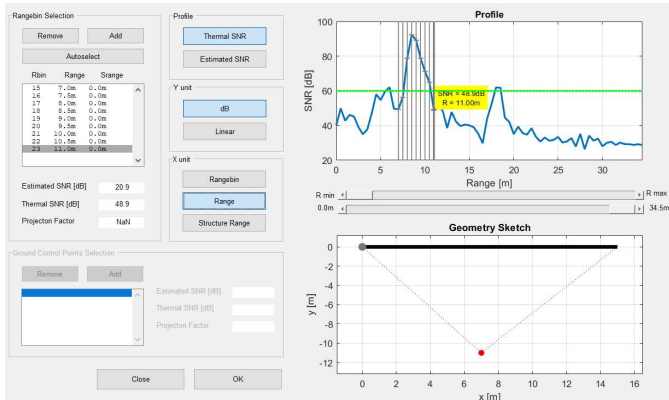
Pos. 1

Individuazione di 14 Range bin in corrispondenza dei picchi di maggiore riflettività posti ad una distanza dall'interferometro compresa tra 10,5 e 17m.

POSTAZIONE	R_{max} (m)	ΔR (m)	f_s (Hz)	DURA TA (minuti)	ANTE NNA
1	70	0,5	197,2 4	40	IBIS ANT 5

Parametri di acquisizione con il software
IBIS-FS Survey

POSTAZIONE	R_{max} (m)	ΔR (m)	f_s (Hz)	DURA TA (minuti)	ANTE NNA
3	35	0,5	199,6	43	IBIS ANT 5



Pos.3

Individuazione di 9 Range bin in corrispondenza dei picchi di maggiore riflettività posti ad una distanza dall'interferometro compresa tra 7 e 11m.

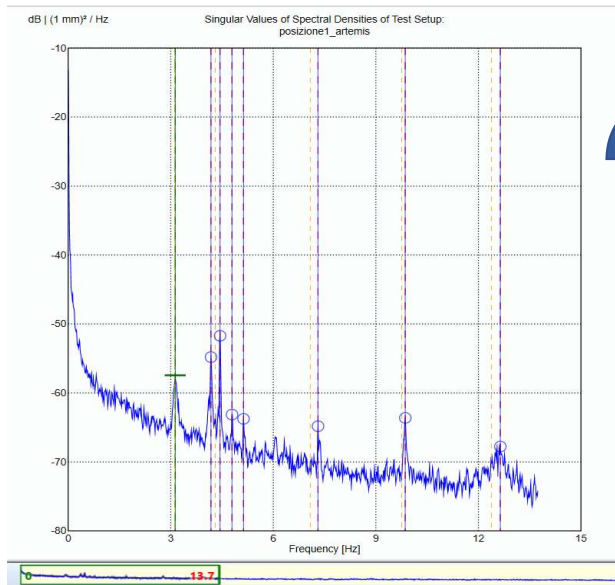
PASSERELLA METALLICA DEL CASTELLO SVEVO DI BRINDISI

Analisi modale su **Artemis Modal** del Range bin 30 per la posizione 1 e dei Range bin 18 e 19 per la posizione 3:

POSTAZIONE 1			
rbin	range [m]	thermal SNR [dB]	estimated SNR [dB]
30	14,5-15,0	72,5	45,5

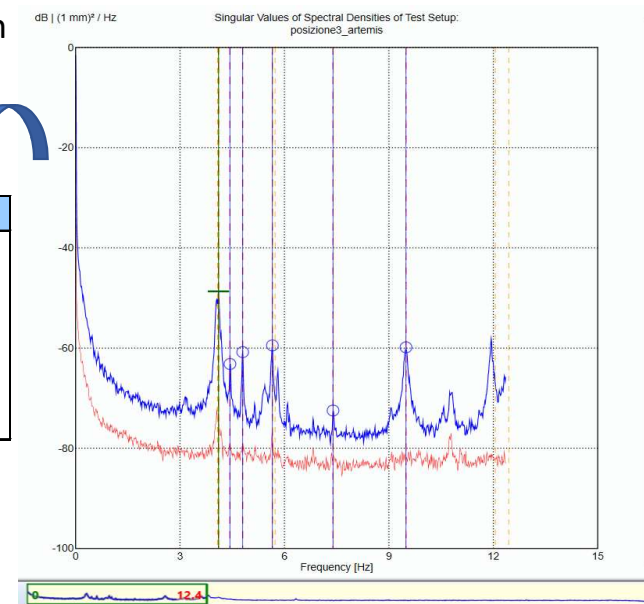
POSTAZIONE 3			
rbin	range [m]	thermal SNR [dB]	estimated SNR [dB]
18	8,5-9,0	92,3	52,2
19	9,0-9,5	89,2	50,8

È stato utilizzato il metodo FDD (Frequency Domain Decomposition) e sono stati selezionati i picchi di densità spettrale nella funzione di risposta in frequenza della struttura



n.	freq. [Hz]
1	3,130
2	4,177
3	4,442
4	4,791
5	5,128
6	7,307
7	9,860

n.	freq. [Hz]
1	4,106
2	4,434
3	4,800
4	5,653
5	7,395
6	9,490



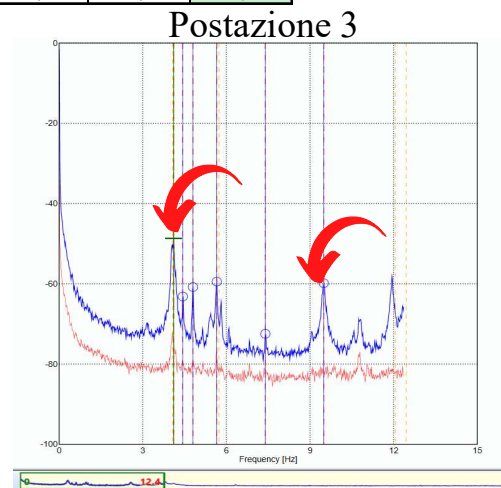
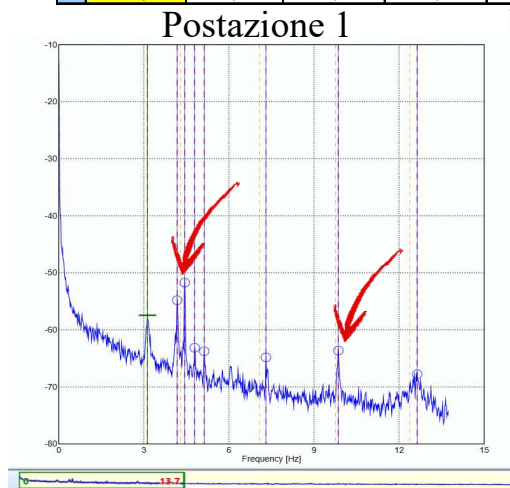
PASSERELLA METALLICA DEL CASTELLO SVEVO DI BRINDISI

RISULTATI SPERIMENTALI

freq. [Hz]	postazione 1							
	3,130	4,177	4,442	4,791	5,128	7,307	9,860	
postazione 3	4,106	23,77%	1,73%	8,18%	16,68%	24,89%	77,96%	140,14%
4,434	29,41%	5,80%	0,18%	8,05%	15,65%	64,79%	122,37%	
4,800	34,79%	12,98%	7,46%	0,19%	6,83%	52,23%	105,42%	
5,653	44,63%	26,11%	21,42%	15,25%	9,29%	29,26%	74,42%	
7,395	57,67%	43,52%	39,93%	35,21%	30,66%	1,19%	33,33%	
9,490	67,02%	55,99%	53,19%	49,52%	45,96%	23,00%	3,90%	

È stata effettuata una comparazione tra le frequenze individuate nelle due postazioni di misura

In verde sono evidenziate le caselle corrispondenti a coppie di frequenze con differenza percentuale inferiore al 5%, che risultano essere probabili frequenze naturali della struttura



Frequenze naturali del ponte

Frequenza naturale 1: **4,14 Hz**

Frequenza naturale 2: **9,68 Hz**

FARO DI PUNTA SAN CATALDO - BARI



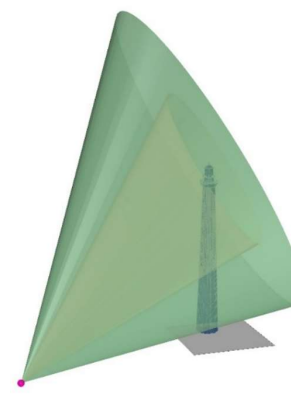
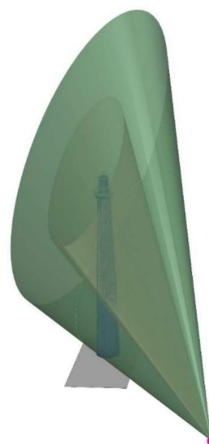
Politecnico
di Bari

Domenico Camassa, Antonio Curri

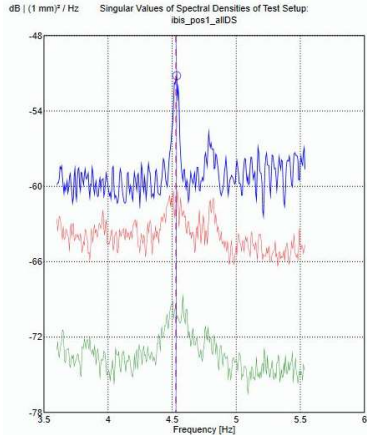
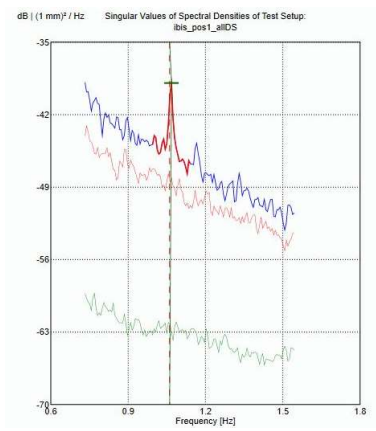
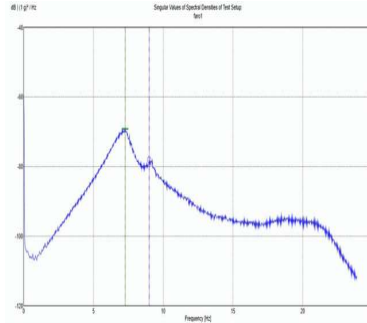
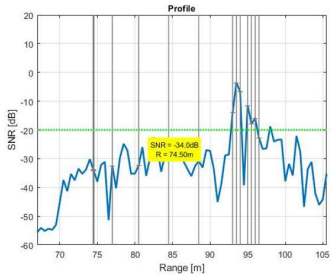
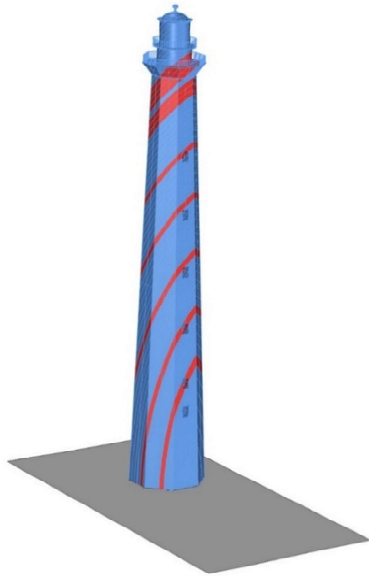
Faro di Punta San Cataldo - Bari



Prove di identificazione dinamica sul faro in muratura "Faro di Punta San Cataldo", a Bari (Italia).



Faro di Punta San Cataldo- Bari



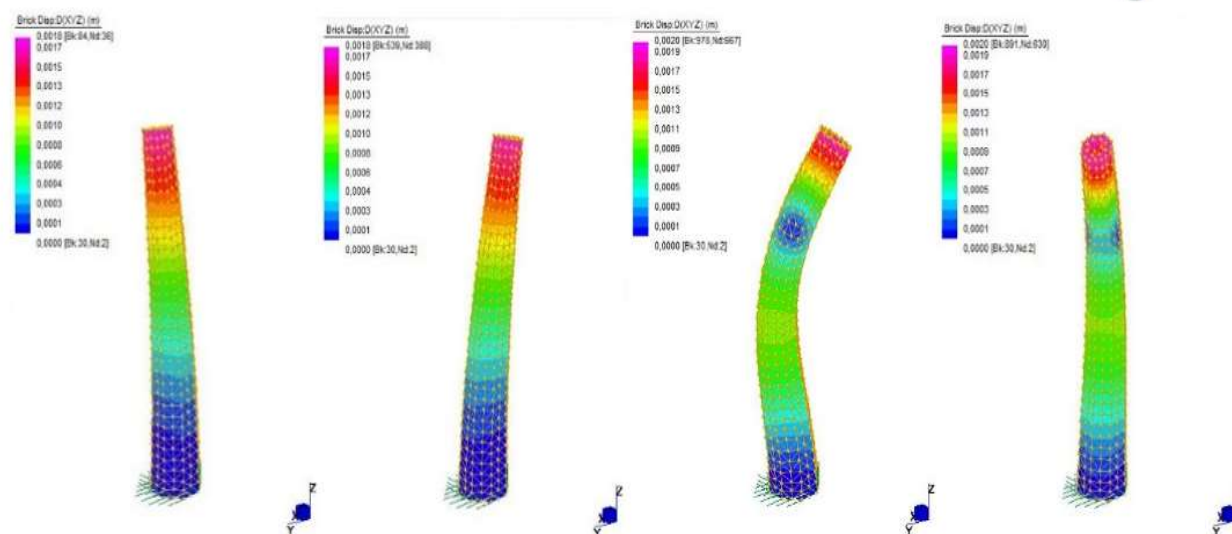
TEST DI VIBRAZIONE AMBIENTALE

Applicando il metodo OMA Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) ai segnali registrati, sono state identificate due frequenze naturali

n.	f_{IBIS} (Hz)	f_{acc} (Hz)
1	1.064	---
2	4.677	---
3	7.135	7.135
4	8.880	8.881

Faro di Punta San Cataldo- Bari

Abbiamo sviluppato un modello numerico della struttura e calibrato il modulo di Young attraverso il confronto delle frequenze naturali del modello con quelle sperimentali



1st mode

2nd mode

3rd mode

4th mode

(Young's modulus: 3300 MPa; Poisson ratio: 0.2; material density: 1631.52 kg/m³)

n.	f_{IBIS} (Hz)	f_{model} (Hz)	D_f (%)
1	1.064	1.030	3.30
2	---	1.034	---
3	4.677	4.204	11.25
4	---	4.245	---

PONTE DI LAMA MONACHILE POLIGNANO A MARE



Politecnico
di Bari

Domenico Camassa, Antonio Curri

Ponte di Lama Monachile – Polignano a Mare

Esplorare la possibilità di utilizzare il radar interferometrico per identificare le prime frequenze naturali dei ponti storici in muratura



Lama Monachile bridge, Polignano a Mare, Italy

Test con
interferometro radar



Test con
accelerometri



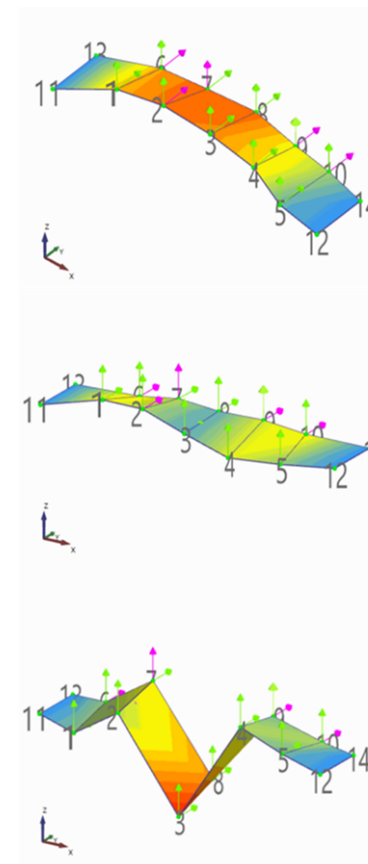
Confronto delle frequenze naturali

Ponte di Lama Monachile – Polignano a Mare

TEST CON ACCELEROMETRI



metodo OMA:
Frequency Domain Decomposition (FDD) method

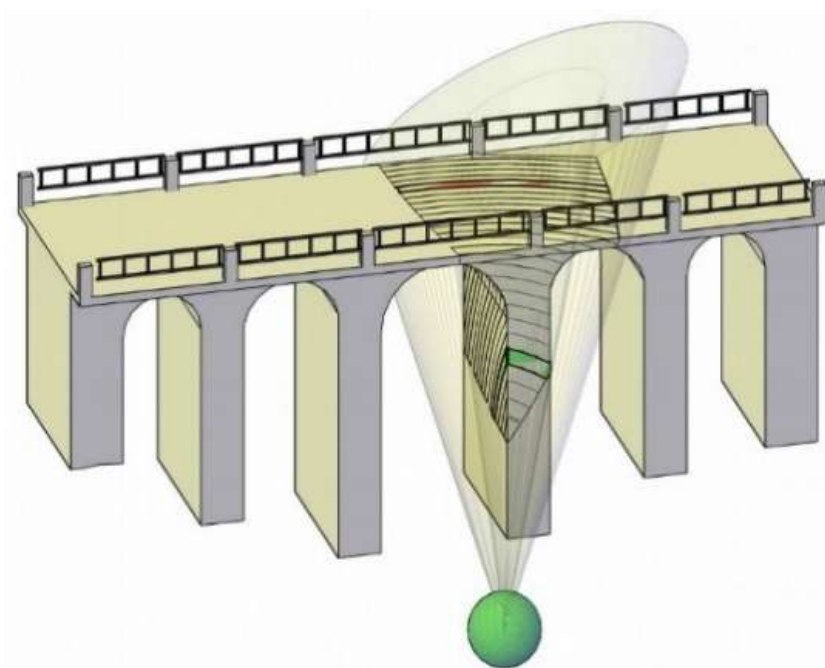


modo 1
7.351 Hz

modo 2
11.222 Hz

modo 3
16.615 Hz

Ponte di Lama Monachile – Polignano a Mare



Interferometric radar:
IBIS-FS system (IDS Georadar)

IMPOSTAZIONE SPERIMENTALE

1. Vibrazioni del treppiede

Sulla testa del radar è stato installato un accelerometro piezoelettrico monoassiale ad alta sensibilità in direzione delle antenne.

2. Vibrazioni della balaustra

Abbiamo effettuato alcuni test di vibrazione preliminari colpendo ripetutamente la balaustra e misurando le vibrazioni con il radar interferometrico.

Ponte di Lama Monachile – Polignano a Mare

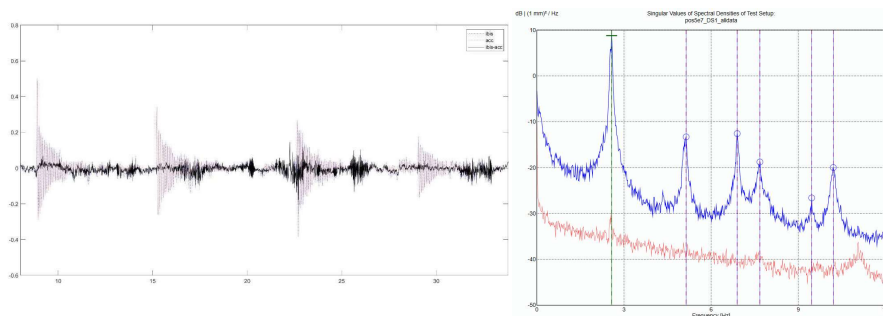
frequency (Hz)		relative difference (%)
bridge	balustrade	
2.576	2.417	6.58
5.139	4.672	10.00
6.897	6.362	8.41
7.678	---	---
---	8.595	---
9.460	9.367	0.99
10.205	---	---

ELABORAZIONE DEI DATI E RISULTATI

1. Eliminazione delle vibrazioni del treppiede
2. Analisi delle vibrazioni del ponte (metodo FDD)
3. Analisi delle vibrazioni della balastra

Le frequenze evidenziate in rosso corrispondono alle frequenze naturali della balastra, in quanto la differenza relativa è inferiore al 10%.

Per esclusione, le frequenze naturali del ponte sono quelle evidenziate in verde



Ponte di Lama Monachile – Polignano a Mare

modo	frequenza (Hz)		differenza percentuale (%)
	accelerometri	radar interferometro	
1	7.351	7.678	4.45
2	11.222	10.205	9.06
3	16.615	---	---

La differenza relativa tra le prime due frequenze naturali del ponte stimate attraverso il radar interferometrico e quelle stimate con gli accelerometri è inferiore al 9,1 %.

DETERMINAZIONE DEL TIRO NEI TIRANTI METALLICI



Politecnico
di Bari

Domenico Camassa, Antonio Curri

Determinazione Del Tiro Nei Tiranti Metallici

Applicazione dell'interferometria radar terrestre per determinare sperimentalmente la forza di trazione in tiranti metallici

"Palazzo Vescovile"- Ostuni



Grandezze note al momento della prova:

- forza di trazione
- prime frequenze naturali del tirante

Senza corner reflector

Tirante monitorato



lunghezza totale: 5,85 m
lunghezza libera: 4,50 m
sezione trasversale: circolare ($\phi 30$)
materiale: acciaio strutturale

Acquisizione radar



piano: 1,50 x 2,25 m
altezza: 4,44 m
portata massima: 100 m

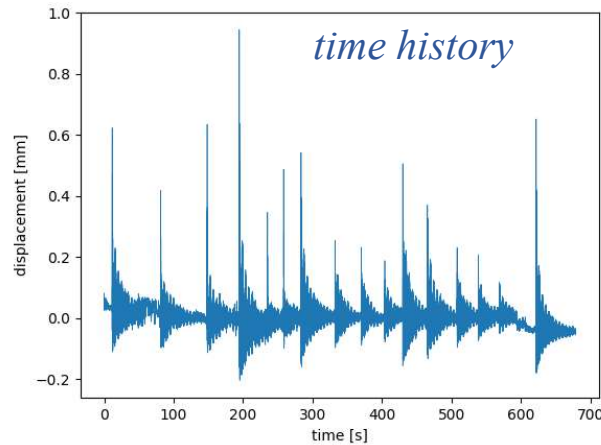
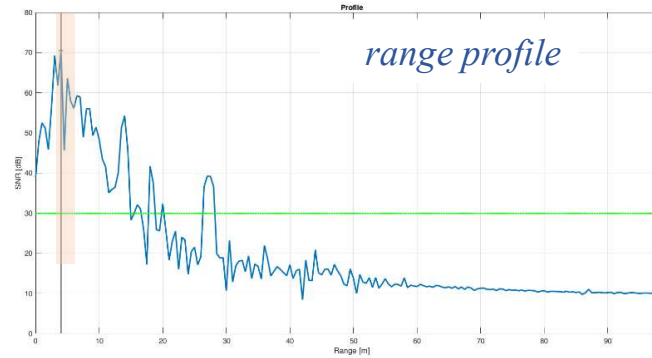
Determinazione Del Tiro Nei Tiranti Metallici

TEST MODALI

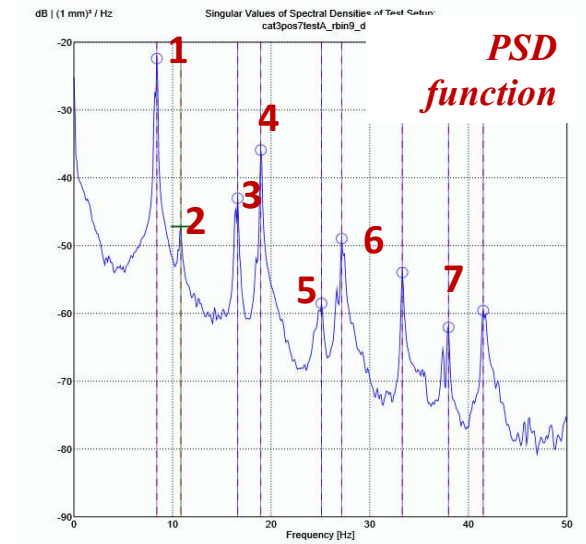


rumore ambientale

impulsi meccanici

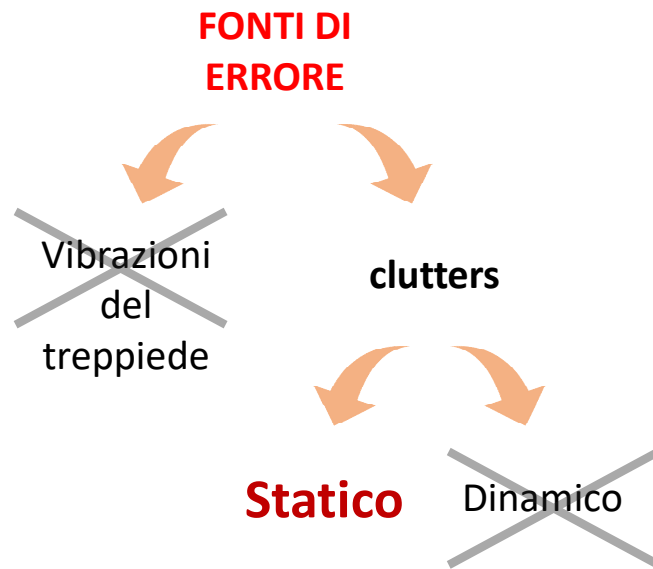


n.	frequency (Hz)
1	8.398
2	10.840
3	16.602
4	18.945
5	25.098
6	27.148
7	33.301



È necessario effettuare un'analisi più approfondita per identificare le frequenze naturali del tirante.

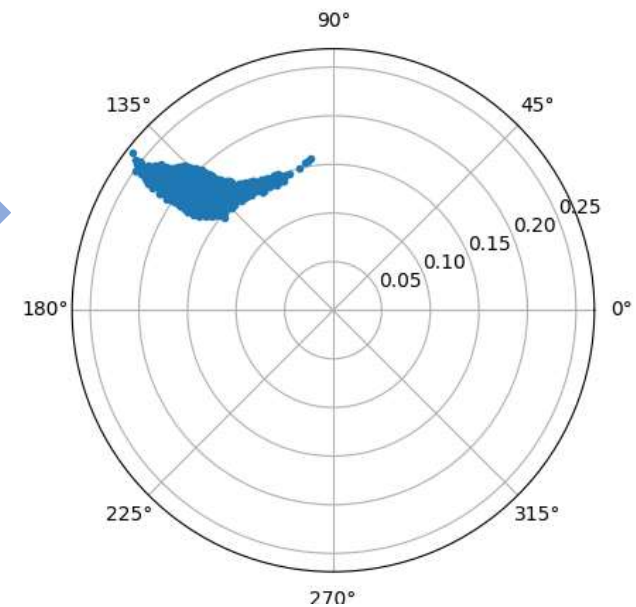
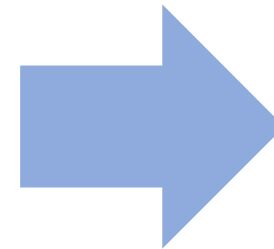
Determinazione Del Tiro Nei Tiranti Metallici



I **clutter statici** sono echi indesiderati provenienti da oggetti **stazionari** presenti nello scenario.

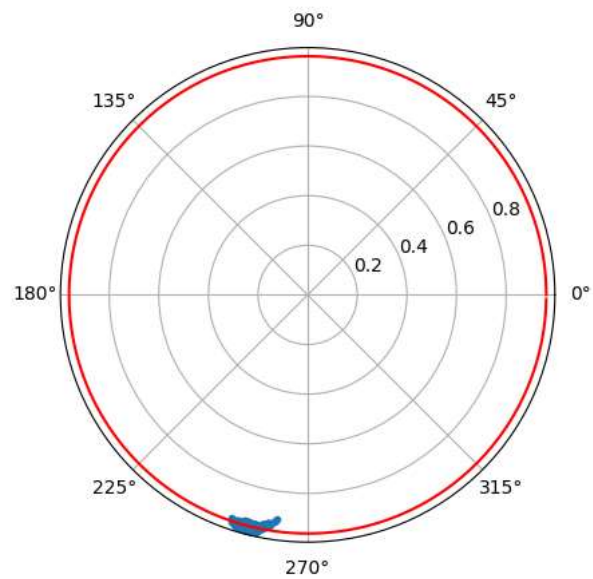
ANALISI DEL PHASOR PLOT

Il **phasor plot** è la rappresentazione del fasore degli echi ricevuti

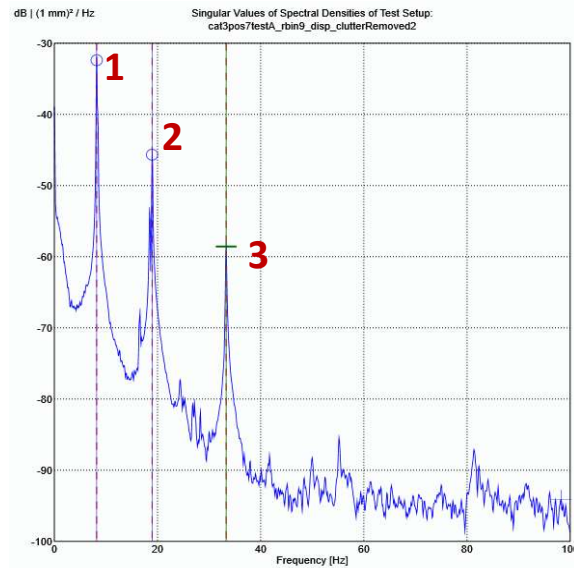


Determinazione Del Tiro Nei Tiranti Metallici

ANALISI DEL PHASOR PLOT



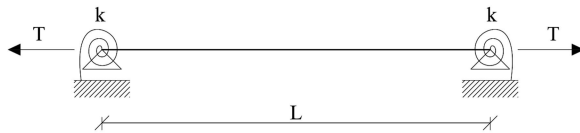
PSD function



n.	frequenza (Hz)
1	8.203
2	18.945
3	33.301

Determinazione Del Tiro Nei Tiranti Metallici

MODELLO STRUTTURALE



IPOSTESI

- trave di Eulero-Bernoulli
- proprietà del materiale costanti
- stessa rigidità delle molle applicate agli estremi

Input data (misurazioni dinamiche)

3 frequenza modale $\omega_1, \omega_2, \omega_3$

Incognite

T, EJ, k

SOLUZIONE DEL PROBLEMA DI OTTIMIZZAZIONE

PROBLEMA DI OTTIMIZZAZIONE

funzione obiettivo

$$G(\varphi, \gamma, \delta) = g_1^2 + g_2^2 + g_3^2$$

INCOGNITE

$$T, EJ, k \Rightarrow T, k$$

n.	frequenza [Hz]				differenza relativa (%)
	dati originali	Algoritmo geometrico	algoritmo modificato	accelerometri	
1	8.398	8.203	8.203	8.260	0.69
2	10.840	---	---	---	---
3	16.602	16.602	---	---	---
4	18.945	18.945	18.945	18.67	1.43
5	25.098	---	---	---	---
6	27.148	27.344	---	---	---
7	33.301	33.301	33.301	33.529	0.68

$$T = 16.745 \text{ kN}$$

$$k = 1.433 \text{ kNm}$$

Il valore reale della forza di trazione applicata al tirante è di circa 17.000 kN.

differenza percentuale:
1.5 %

Conclusioni

L'INTERFEROMETRIA RADAR TERRESTRE

- Visti i risultati ottenuti nelle campagne sperimentali svolte, il sensore IBIS-FS si è rivelato una valida e conveniente alternativa a tecniche di misura più tradizionali per contatto;
- Rispetto ai tradizionali sensori, l'interferometro radar non richiede il contatto e quindi l'accesso diretto alla struttura, e può misurare simultaneamente lo spostamento in diversi punti di una struttura, come se fossero installati diversi sensori virtuali sulla struttura. Inoltre, la sua installazione è semplice e rapida.
- Le principali problematiche attuali legate all'impiego dell'interferometro radar per l'identificazione dinamica strutturale riguardano **la corretta identificazione dei punti misurati, la possibilità di misurare soltanto la componente dello spostamento lungo la linea di vista, e l'accuratezza di misura**. In merito a quest'ultimo punto, in particolare, si evidenzia che il sensore IBIS-FS presenta un ottimo valore teorico di accuratezza di misura; tuttavia, tale valore è strettamente legato al SNR (*Signal to Noise Ratio*) degli echi ricevuti dal radar. Pertanto, è importante che durante le prove sperimentali si tenga conto del fatto che l'accuratezza di misura dell'interferometro radar non è un valore fisso ma dipende dalla qualità degli echi ricevuti.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE



**Politecnico
di Bari**

Domenico Camassa, Antonio Curri