

QUADERNI di GEOFISICA

Telerilevamento di vibrazioni delle
strutture tramite telesensore infrasonico



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

169

Direttore Responsabile

Valeria DE PAOLA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (luigi.cucci@ingv.it)
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Mario CASTELLANO (mario.castellano@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Milena MORETTI (milena.moretti@ingv.it)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

Segreteria di Redazione

Francesca DI STEFANO - Coordinatore
Rossella CELI
Robert MIGLIAZZA
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Patrizia PANTANI
Tel. +39 06 51860068
redazione@ingv.it

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale
di Geofisica e Vulcanologia
Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

QUADERNI di GEOFISICA

Telerilevamento di vibrazioni delle strutture
tramite telesensore infrasonico

*Vibration detection of structures through
infrasonic remote sensor*

Emanuele Giacomozzi e Cesidio Bianchi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Aeronomia, Geomagnetismo e Geofisica Ambientale

Accettato 13 novembre 2020 | Accepted 13 November 2020

Come citare | How to cite Giacomozzi E., Bianchi C., (2021). Telerilevamento di vibrazioni delle strutture tramite telesensore infrasonico. Quad. Geofis., 169: 1-36, <https://doi.org/10.13127/qdg/169>

In copertina Ampiezza spettrale in $\text{rad}/(\text{s}\cdot\sqrt{\text{Hz}})$ vs. frequenza mostrante l'effetto del rumore (15%) sull'algoritmo di correlazione | Cover Spectral amplitude in $\text{rad}/(\text{s}\cdot\sqrt{\text{Hz}})$ vs. frequency showing the effect of noise (15%) on the correlation algorithm.

169

INDICE

Riassunto	7
Abstract	7
Introduzione	8
1. Principi di funzionamento del TIS	8
1.1. Descrizione dell'ottica ricevente	9
1.2. Indipendenza della misura dall'angolo di elevazione del TIS	12
1.3. Algoritmo di correlazione e rumore	12
1.3.1. Effetto del rumore digitale del CCD sul segnale	14
1.3.2. Effetto del rumore ambientale sul segnale	15
2. Relazione angolo-spostamento	16
3. Influenza della microsismicità sulla misura	18
4. Analisi e risultati delle misure	22
5. Conclusioni	25
Bibliografia	26
Appendice 1	27
Appendice 2	31

Riassunto

Nell'ambito del progetto EDI-SECUR, finanziato della regione Lazio, è stato sviluppato un prototipo di telesensore infrasonico, TIS, a tracciamento di speckle per la misura della velocità angolare, delle frequenze fondamentali e delle armoniche di una superficie sottoposta a oscillazioni. Il TIS si presta particolarmente per il rilevamento e il monitoraggio nel tempo degli edifici, ponti e altri manufatti. Conoscere lo stato vibrazionale di queste strutture può essere d'interesse sia per la loro caratterizzazione dinamica che per la sicurezza. Questo prototipo, sufficientemente compatto, si presta a una misura immediata della velocità angolare e, con semplici operazioni, si possono dedurre spostamenti e accelerazioni angolari.

Dalle grandezze angolari e dalla conoscenza geometrica della superficie, tramite alcuni schemi ed esempi, si mostra come sia possibile determinare anche altri parametri cinematici lineari. Il telesensore può essere impiegato nelle misure delle vibrazioni di superfici a lunga distanza di varia natura, anche laddove non fosse possibile accedere per eseguire una misura diretta. Lo strumento copre un campo di frequenze fino alle decine di Hz, ha una sensibilità e una dinamica tale da rilevare le vibrazioni indotte dal rumore industriale, dal traffico, dal vento e altro. Questo lavoro è principalmente rivolto alle applicazioni del TIS nel rilevamento delle vibrazioni delle strutture ed è in questo ambito che vengono spiegate le modalità, i limiti e i vantaggi del suo impiego insieme agli errori insiti nella tecnica di misura. Dato che il TIS misura un movimento relativo tra lo stesso strumento e la superficie-bersaglio, sono stati valutati gli errori delle vibrazioni dovute alla microsismicità e altre cause ambientali. Vengono infine riportati due preliminari esempi di misura su una struttura edile.

Abstract

In the framework of EDI-SECUR project, funded by the Lazio region, a prototype of speckle tracking remote infra-sonic sensor, TIS, for measuring the fundamental angular velocity, and harmonics of a surface subject to oscillations, was developed. TIS is particularly suitable for the detection and monitoring over time of buildings, bridges and other artefacts. Knowing the vibrational state of these structures can be of interest both for their dynamic characterization and for safety. This compact prototype, gives an immediate measure of angular velocity and, with simple operations, it is possible to deduce angular displacements and accelerations. From the angular quantities and the geometric dimension of the surface, it is shown how it is possible to determine other linear kinematic parameters as well. The remote sensor can be used to measure long distance surfaces of various kinds, even where it is not possible to access to perform a direct measurement. The instrument covers a frequency range up to tens of Hz, has a sensitivity and dynamics to detect vibrations induced by industrial noise, traffic, wind and more. This work is mainly aimed at TIS applications in the detection of vibrational state of structures and the methods, limits and advantages of its use are explained together with the errors of this technique. Since the TIS measures a relative movement between the same instrument and the target surface, the errors of the vibrations due to micro seismicity and other environmental causes have been evaluated. Finally, two preliminary examples of measurement on a building structure are presented.

Keywords Telesensore di vibrazioni; Telesensore infrasonico; Sensore a tracciamento di speckles | Vibration remote sensor; Infrasonic remote sensor; Speckle tracking sensor.

Introduzione

Il Telesensore InfraSonico, TIS, a tracciamento di speckle è un dispositivo che rileva a distanza vibrazioni meccaniche di una superficie sottoposta ad oscillazioni, nel campo di frequenza infrasonico. Rispetto ad altri rilevatori di vibrazioni, i quali acquisiscono la luce riflessa da una superficie liscia, il dispositivo qui descritto può funzionare su superfici ruvide le quali diffondono la luce su tutto l'angolo solido. Inoltre il TIS, non basandosi su tecniche interferometriche o eterodina, non necessita di sorgenti laser con grande lunghezza di coerenza per poter rilevare vibrazioni a grande distanza. Esso si basa su semplici principi che saranno di seguito decritti [Bianchi, 2014]. Quando un fascio di luce coerente illumina una superficie ruvida, la luce viene diffusa dando luogo a una figura di diffrazione casuale (ma stazionaria nel tempo) comunemente chiamata pattern di speckle [Dainty, 1975]. Il pattern di speckle è estremamente sensibile al dettaglio microscopico della superficie riflettente, il che significa che una eventuale deformazione di quest'ultima dà luogo a una modifica del pattern di speckle. Se, ad esempio, la superficie cambia l'orientazione di un angolo θ , il pattern di speckle risultante sarà grosso modo lo stesso ma traslato di θL (dove L è la distanza di osservazione) [Bianchi e Giacomozzi, 2019]. Se l'orientazione locale di una superficie cambia a causa di una vibrazione questa può essere dunque rilevata a distanza [Zalevsky et al., 2009]. È questa specie di "leva ottica" che permette di determinare cambi di inclinazioni di piccolissimi angoli, in teoria intorno ai nano radianti. Il TIS, è uno strumento di nuova concezione, soprattutto se applicato in ambito infrasonico, in quanto misura la variazione nel tempo (t) degli angoli θ di oscillazione/vibrazione delle superfici ($d\theta/dt$ o velocità angolare ω). Poiché altri strumenti in commercio non misurano questa grandezza, questo lavoro è principalmente rivolto alle applicazioni del TIS nel rilevamento delle vibrazioni delle strutture ed è in questo ambito che vengono spiegate le modalità, i limiti e i vantaggi dell'impiego di un tale dispositivo.

1. Principi di funzionamento del TIS

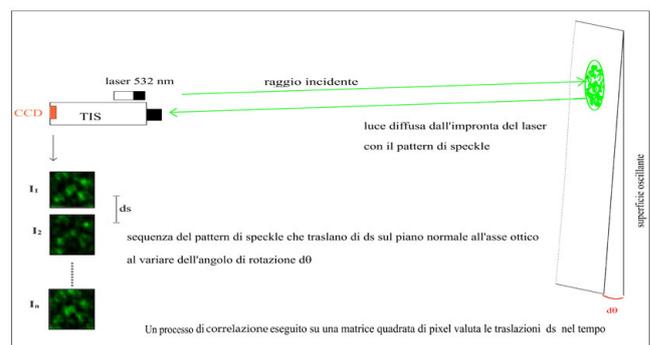
Come è stato accennato nell'introduzione di questo documento, il TIS si basa sul principio di tracciamento del pattern di speckle diffuse da una superficie illuminata da una luce laser, quindi coerente. La Figura 1 mostra la traslazione del pattern di speckle di una quantità Δs quando la superficie illuminata dal laser ruota di un angolo θ . La relazione che lega la traslazione del pattern con l'angolo di rotazione della superficie è semplicemente:

$$\Delta s = L \cdot \theta \quad (1)$$

L'ottica ricevente del TIS ha quindi il compito di intercettare il pattern di speckle e proiettarlo su un sensore digitale CCD per registrarne i movimenti nel tempo.

Figura 1 Spostamento del pattern di speckle in relazione a piccoli angoli di rotazione della superficie.

Figure 1 Speckle pattern displacement related to a small rotation angles of the surface.



1.1 Descrizione dell'ottica ricevente

L'ottica ricevente del TIS è costituita da un sensore digitale CCD, una lente convergente ed una divergente dimensionate opportunamente per garantire le misurazioni alla massima distanza L di circa 70 metri. Questo si traduce in diverse considerazioni di carattere tecnico:

- Il pattern di speckle è una figura di interferenza che si forma nello spazio ed il loro diametro medio d dipende dalla granulosità della superficie, dalla lunghezza d'onda λ , dalla grandezza dell'impronta w della luce laser che illumina la superficie e dalla distanza L dalla superficie illuminata [Goodman, 2010]. In particolare, la dimensione media del singolo speckle è data dalla formula:

$$d = 1.22\lambda \frac{L}{w} \quad (2)$$

La (2) mostra che all'aumentare della dimensione dell'impronta del laser w , diminuiscono le dimensioni medie.

- Per rilevare il pattern di speckle a distanza L , è necessario che questo sia osservato in contrasto all'impronta del laser sulla superficie che lo sta diffondendo. Ciò implica che l'ottica sia in grado di proiettare su una porzione del CCD, che ha le dimensioni di circa 0.5×0.5 mm, un'area (l'impronta del laser) di circa 3 cm di diametro distante 70 metri dal CCD stesso.
- La dimensioni di speckle proiettate sul CCD devono essere maggiori delle dimensioni di un pixel per consentire una corretta rilevazione degli spostamenti del pattern.

Se da un lato quindi si vorrebbe ingrandire l'impronta del laser per rilassare l'ingrandimento ottico del sistema a grande distanza, dall'altro, secondo la formula precedente, un'impronta w troppo grande produrrebbe speckle troppo piccole. Va considerato inoltre che aumentando w , diminuisce la densità di energia del laser riflessa rendendo più difficoltosa la rilevazione del pattern dal CCD, peggiorando il rapporto segnale rumore. Il dimensionamento del sistema ottico quindi è il risultato di un compromesso tra w e l'ingrandimento ottico. Entrando più in dettaglio nella descrizione del sistema ottico, la Figura 1 mostra la configurazione adottata inizialmente nel telesensore che consente di spiegare sinteticamente il principio di funzionamento del ricevitore.

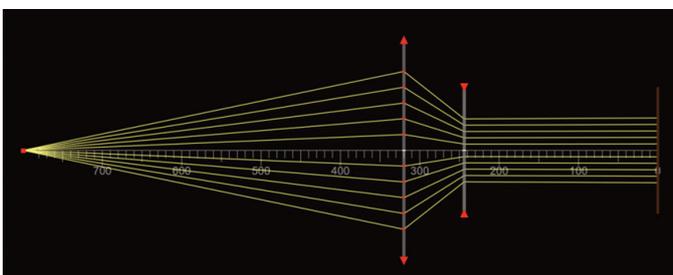


Figura 2 Sistema ottico in configurazione afocale.

Figure 2 Optical system in non-focal configuration.

Nella Figura 2 ogni raggio rappresenta la direzione di propagazione del pattern di speckle al variare dell'angolo di inclinazione della superficie illuminata. Si può osservare che il sistema ottico composto da f_1 e f_2 , proietta raggi con inclinazioni diverse in punti diversi del sensore. In questo modo l'oscillazione della superficie viene rilevata dal sensore come una traslazione del pattern di speckle sul CCD. La relazione tra l'angolo di inclinazione della superficie e la traslazione sul CCD è data dall'equazione seguente:

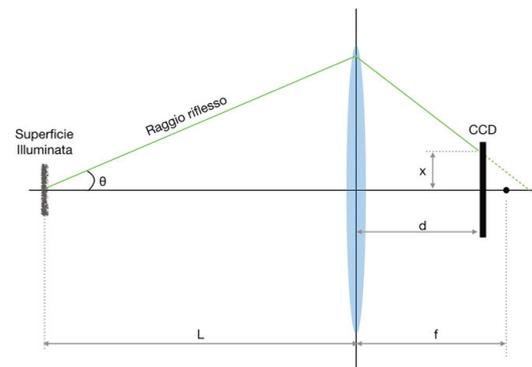
$$x_p = \frac{f_2}{f_1} L \cdot \tan \theta \cong \frac{f_2}{f_1} L \cdot \theta \quad (3)$$

dove x_p è la traslazione del pattern sul CCD, L è la distanza tra la superficie e la lente di focale f_1 e θ è l'angolo di inclinazione della superficie (e quindi del raggio da essa riflesso rispetto all'asse ottico del sistema). Si è inoltre operata l'approssimazione per piccoli angoli che consente di affermare che $\tan \theta \cong \theta$. Come si può osservare, la traslazione del pattern x_p è direttamente proporzionale alla distanza L di osservazione quindi, con questa configurazione, per risalire all'angolo θ è necessario conoscere anche la distanza di osservazione L . Inoltre, senza entrare nel dettaglio matematico, al variare di L è necessario variare anche la distanza tra f_1 e f_2 affinché i raggi uscenti da f_2 siano tutti paralleli all'asse ottico del sistema, condizione che rende valida la relazione (3). È facile capire che la calibrazione di un sistema siffatto introduce non poche complicazioni ed inoltre, la necessità di conoscere L e di variare la distanza tra le lenti, limita la praticità di utilizzo del telesensore. È stato studiato quindi un sistema ottico alternativo in grado di rendere $x_p(\theta)$ indipendente da L .

Il sistema mostrato in Figura 3 è uno schema semplificato dell'ottica ricevente del telesensore. Per semplicità il sistema ottico è stato schematizzato con una singola lente avente la focale equivalente f del sistema completo che sarà esposto successivamente.

Figura 3 Schema ottico per la configurazione indipendente dalla distanza.

Figure 3 Optical diagram for distance independent configuration.



La relazione generica tra lo spostamento del pattern di speckle x e l'angolo di inclinazione θ della superficie in funzione dei parametri L , f e d che rappresentano rispettivamente la distanza tra la superficie e la lente, la focale equivalente del sistema ottico e la distanza tra la lente ed il sensore CCD è riportata di seguito:

$$x = \left(L - \frac{L-f}{f} d \right) \theta \quad (4)$$

L'equazione 4 mostra che, fissati L , f e d , la relazione tra x e θ è di tipo lineare e può essere riscritta come:

$$x = k \cdot \theta \quad (5)$$

con

$$k = L \left(1 - \frac{d}{f} \right) + d \quad (6)$$

Il fattore di proporzionalità k può essere reso indipendente da L se $d = f$ e cioè se si posiziona il sensore CCD esattamente sul punto di fuoco all'infinito del sistema ottico. In questa configurazione quindi l'equazione (3) si riduce a:

$$x = f \cdot \theta \quad (7)$$

e quindi anche la proporzionalità tra x e θ non dipende più dalla distanza L tra il telesensore e la superficie osservata. L'equazione (7) mostra anche che la lunghezza focale del sistema ottico è un parametro fondamentale del telesensore in quanto ne determina la sensibilità. Maggiore è la lunghezza focale, maggiore sarà la sensibilità del telesensore.

Come accennato precedentemente, il sistema ottico deve essere in grado di proiettare l'impronta del laser sulla superficie osservata (3 cm di diametro a 70 metri) sul CCD (area di 0.5 x 0.5 mm) e con semplici calcoli si può determinare che la lunghezza focale necessaria è di circa un metro. Per ridurre le dimensioni del sistema ottico sono state utilizzate due lenti, una convergente e una divergente poste a distanza d_l in modo da ottenere un sistema con focale equivalente f_e data dall'equazione (8).

$$f_e = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - d_l} \quad (8)$$

Dall'equazione (8) si può osservare che esistono infinite combinazioni tra f_1 , f_2 e d_l in grado produrre una stessa f_e e quindi, la scelta della coppia di lenti è stata operata in principio selezionando le focali facilmente reperibili in commercio e successivamente, verificando quale fosse la combinazione più compatta per ottenere una focale equivalente di circa un metro.

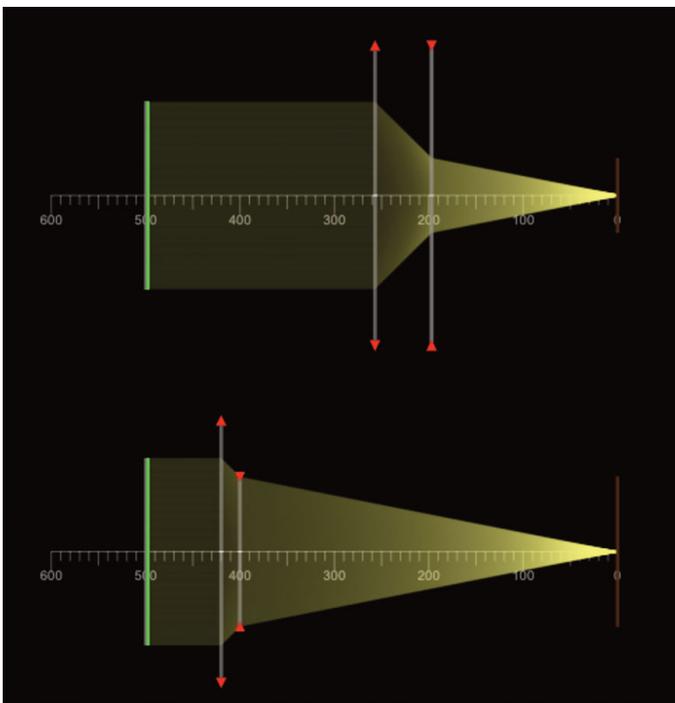


Figura 4 Due configurazioni con stessa focale equivalente.

Figure 4 Two configurations with the same equivalent focal length.

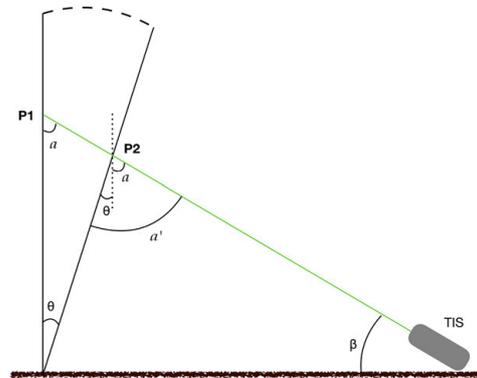
Nella Figura 4 sono riportate due combinazioni differenti di lenti le cui focali equivalenti sono identiche e pari a 500 mm. Come si può notare, il sistema in alto risulta essere più compatto rispetto a quello in basso in quanto la distanza tra la prima lente ed il sensore è di circa 250 mm mentre nell'altro è più di 400 mm.

1.2 Indipendenza della misura dall'angolo di elevazione del TIS

La Figura 5 è uno schema che, trascurando la reale dinamica di oscillazione di un edificio perché ininfluente in questa analisi, mostra come la misura effettuata dal TIS sia indipendente dal proprio angolo di elevazione β .

Figura 5 Dimostrazione schematica dell'indipendenza della misura dall'angolo d'elevazione.

Figure 5 Schematic demonstration of the independence of the measurement from the elevation angle.



Più precisamente, nello schema è stato rappresentato il lato di un edificio le cui oscillazioni sono monitorate nei punti P1 e P2 e si ipotizza che l'edificio sia passato dalla posizione P1, corrispondente alla verticale, a quella P2 corrispondente a quella di inclinazione di un angolo θ . Siccome l'algoritmo di correlazione utilizzato per il tracciamento del pattern di speckle è in grado di rilevare variazioni di angolo tra diversi campioni temporali, è immediato capire che la misura fornita dal TIS nel caso rappresentato in figura, è la differenza tra l'angolo $\alpha' = \alpha + \theta$ in P2 e l'angolo α in P1. Quindi $\alpha' - \alpha = \theta$ che è proprio l'angolo di inclinazione dell'edificio nel passaggio dalla posizione P1 a P2.

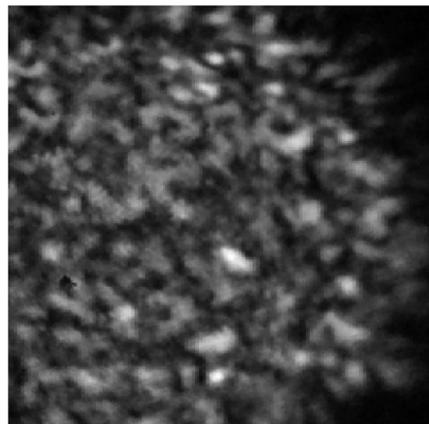
Fin qui non si è volontariamente tenuto conto di alcuni effetti fisici legati all'angolo di elevazione del TIS, o in maniera equivalente, dell'angolo di incidenza della luce laser con la superficie osservata.

1.3 Algoritmo di correlazione e rumore

Come è stato descritto nel paragrafo 1, il sistema ottico del ricevitore ha il compito di proiettare il pattern di speckle sul sensore CCD. In questo paragrafo sarà descritto l'algoritmo utilizzato nel telesensore per l'elaborazione delle immagini acquisite. La Figura 6 mostra un esempio del pattern di speckle acquisito dal telesensore.

Figura 6 Pattern di speckle acquisito dal CCD.

Figure 6 Speckle pattern acquired by CCD.



Come già accennato le traslazioni orizzontali e verticali di questa figura corrispondono a rotazioni della superficie osservata. L'algoritmo del telesensore utilizza un processo di correlazione (implementato attraverso il calcolo di FFT) tra le immagini acquisite ad una frequenza f_c di 90 fps (Frame Per Second) ed in particolare sono stati implementati due diversi tipi di correlazione. Il primo processo di correlazione consente di determinare la traslazione del pattern sul piano tra un frame ed il successivo (Figura 7) calcolando così le quantità $\Delta x/\Delta t$ e $\Delta y/\Delta t$ con $\Delta t = 1/f_c$. Successivamente, attraverso l'equazione 3 o l'equazione 7, è possibile calcolare le corrispondenti rotazioni della superficie osservata. È immediato comprendere quindi che la quantità rilevata dal telesensore in questa configurazione è una velocità angolare. In questo caso, è possibile attivare nell'algoritmo un processo di filtraggio e di integrazione per ricavare le rotazioni angolari. Il filtro menzionato è un filtro digitale passa banda alla butterworth dell'ottavo ordine con frequenze di taglio a 0.1 Hz e 40 Hz ed è utilizzato come filtro anti aliasing (frequenza a 40 Hz) e per eliminare eventuali offset prodotti dal processo di correlazione (frequenza a 0.1 Hz) che farebbero divergere l'integrazione del segnale.

Il secondo processo di correlazione, a differenza del primo che correla frame successivi tra loro, correla un frame al tempo t_0 con ogni frame successivo al tempo t_n (Figura 7). In questo caso il processo di correlazione fornisce direttamente la variazione angolare $\theta(t_n)$, dove con t_n si è indicato un tempo discretizzato alla frequenza di campionamento f_c . In questo caso non è necessaria quindi l'integrazione successiva del segnale ed il filtro implementato è un filtro digitale anti aliasing con frequenza di taglio a 40 Hz. Inoltre, il segnale prodotto è comprensivo della componente continua e non è influenzato dagli effetti di memoria del filtro passa banda attivabile per il primo algoritmo. La Figura 7 mostra i due diversi algoritmi di correlazione.

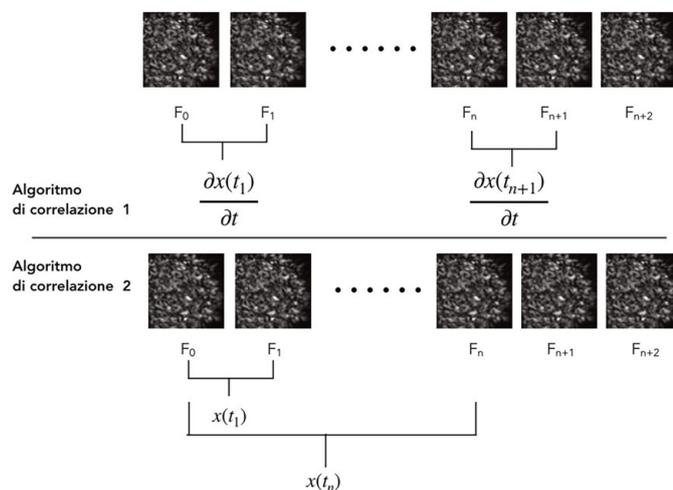


Figura 7 Algoritmi di correlazione. Con F_n è indicato il frame al tempo t_n e con x una generica direzione di analisi (orizzontale o verticale).

Figure 7 Correlation algorithms. With F_n is indicated the frame at time t_n and with x a generic direction of analysis (horizontal or vertical).

Ognuno dei due algoritmi presenta vantaggi e svantaggi.

Il primo algoritmo, analogamente ad un velocimetro, esalta maggiormente le alte frequenze ed è più idoneo per la rilevazione di grandi ampiezze di oscillazione. Questo è dovuto al fatto che frame adiacenti differiscono poco tra loro ed il processo di correlazione risulta più stabile. Lo svantaggio invece consiste nell'utilizzare l'ulteriore processo di integrazione perché un eventuale errore numerico commesso dalla correlazione, viene propagato nel processo di integrazione.

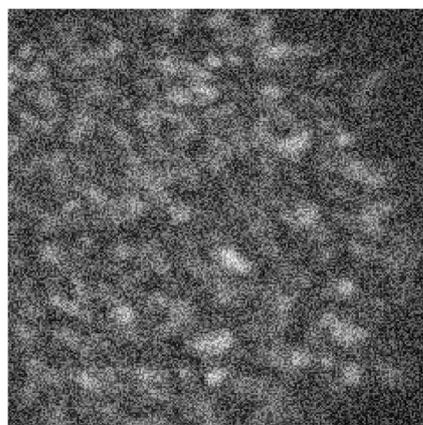
Il secondo algoritmo esalta maggiormente le basse frequenze ma potrebbero risultare poco visibili se sovrapposte al rumore sismico che ha un tipico andamento del tipo $1/f$. Al contrario del primo algoritmo, non è affetto dalla propagazione dell'errore numerico poiché non necessita dell'integrazione, ma non può essere utilizzato per oscillazioni di grandi ampiezze perché correlando frame distanti temporalmente tra loro, questi potrebbero essere troppo differenti ed inficiare la bontà del processo di correlazione.

1.3.1 Effetto del rumore digitale del CCD sul segnale

In questo paragrafo sarà analizzato l'effetto del rumore digitale prodotto dal sensore CCD sull'elaborazione delle immagini e quindi sulla ricostruzione del segnale rilevato. Il sensore utilizzato è un CCD RGB in cui ogni colore ha una dinamica di 8 bit. Come detto precedentemente, il telesensore utilizza una luce laser con lunghezza d'onda di 532 nm (verde) quindi le immagini sono acquisite solamente dal canale Green del CCD. Il sensore inoltre ha la possibilità di cambiare la propria sensibilità (o guadagno) in funzione della quantità di luce rilevata e come è facile intuire, più la luce rilevata è debole, più il sensore aumenta la propria sensibilità con un inevitabile innalzamento del rumore di fondo. Tale rumore si presenta come una nebbia uniforme che si sovrappone all'immagine acquisita come mostrato nella Figura 8.

Figura 8 Esempio di immagine affetta dal rumore digitale introdotto dal CCD.

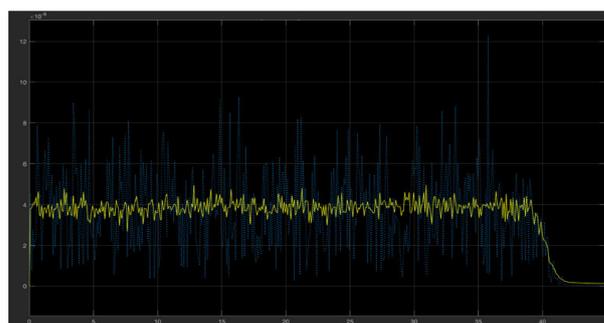
Figure 8 Example of image affected by digital noise introduced by the CCD.



L'esempio mostrato in figura è stato creato artificialmente, sommando un rumore bianco ad un frame acquisito dal telesensore, allo scopo di evidenziare il fenomeno in oggetto. In realtà, per la potenza del laser utilizzata, e per la luminosità dell'ottica, il fenomeno descritto è molto meno evidente. Si vuole comunque indagare e cercare di quantificare come questo rumore disturbi l'algoritmo di correlazione. A tale scopo, è stato prodotto un flusso di immagini artificiali composte dalla stessa immagine, registrata realmente dal telesensore e normalizzata sull'intera dinamica del sensore, su cui è stato sovrapposto un pattern di rumore diverso per ogni frame e con distribuzione uniforme. Nella Figura 9 è mostrato lo spettro prodotto da un rumore uniforme sui frame con intensità del 5% della dinamica del CCD con l'algoritmo di correlazione 2. Per brevità è stata riportata solo una delle due componenti poiché il fenomeno si produce in maniera uguale su tutte e due le componenti. Lo spettro di rumore è uniforme e con ampiezza di $4 \cdot 10^{-8}$ rad.

Figura 9 Ampiezza spettrale del rumore simulato (5% della dinamica del CCD) in $\text{rad}/(\text{s} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ vs. frequenza.

Figure 9 Spectral amplitude in $\text{rad}/(\text{s} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ vs. frequency of simulated noise (5% of CCD dynamics).



In Figura 10 è mostrato lo spettro del rumore con intensità del 15%. Lo spettro di rumore è uniforme e con ampiezza di $1 \cdot 10^{-7}$ rad.

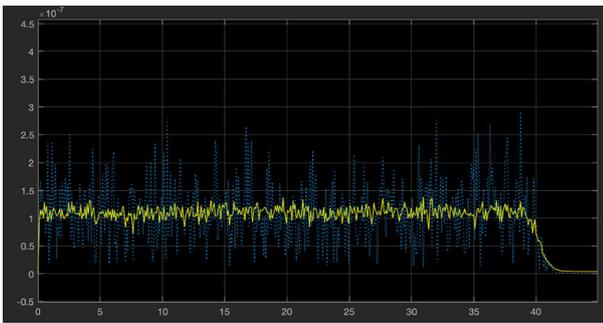


Figura 10 Ampiezza spettrale del rumore simulato (15% della dinamica del CCD) in $\text{rad}/(\text{s} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ vs. frequenza.

Figure 10 Spectral amplitude in $\text{rad}/(\text{s} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ vs. frequency of simulated noise (15% of CCD dynamics).

Come si può notare, un rumore sulle immagini con distribuzione uniforme, produce un rumore uniforme anche sulla quantità $\theta(t_n)$.

Nella Figura 11 è mostrato lo spettro del rumore con intensità del 5% per l'algoritmo di correlazione 1. Ricordando che l'algoritmo 1 produce delle velocità angolari, lo spettro prodotto dal rumore uniforme ha sul segnale un andamento linearmente crescente con la frequenza. Il valore massimo prodotto dal rumore è di circa $7 \cdot 10^{-6}$ rad/s a 45 Hz (massima frequenza di analisi).

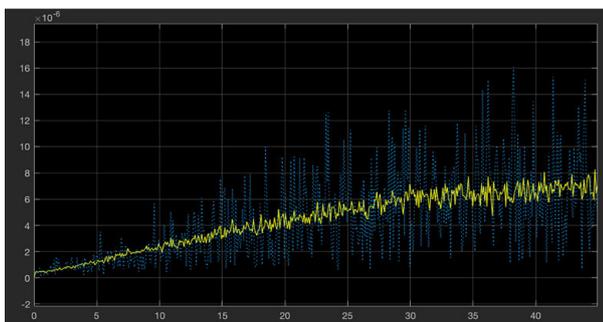


Figura 11 Ampiezza spettrale in $\text{rad}/(\text{s} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ vs. frequenza mostrante l'effetto del rumore (5%) sull'algoritmo di correlazione.

Figure 11 Spectral amplitude in $\text{rad}/(\text{s} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ vs. frequency showing the effect of noise (5%) on the correlation algorithm.

Nella Figura 12 è mostrato lo spettro del rumore con intensità del 15% per l'algoritmo di correlazione 1. Il valore massimo prodotto dal rumore è di circa $2 \cdot 10^{-5}$ rad/s a 45 Hz.

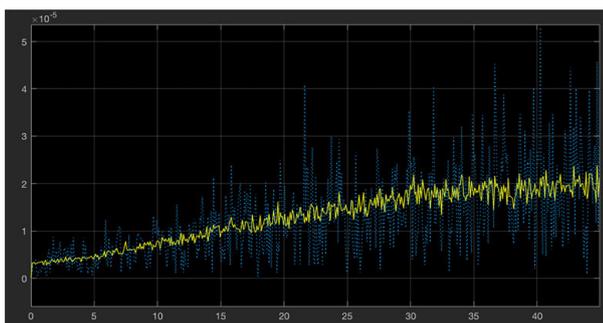


Figura 12 Ampiezza spettrale in $\text{rad}/(\text{s} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ vs. frequenza mostrante l'effetto del rumore (15%) sull'algoritmo di correlazione.

Figure 12 Spectral amplitude in $\text{rad}/(\text{s} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ vs. frequency showing the effect of noise (15%) on the correlation algorithm.

Quanto esposto aiuta a capire che maggiore è la quantità di luce diffusa dalla superficie o la luminosità dell'ottica ricevente, minore è il rumore numerico introdotto nella misurazione.

1.3.2 Effetto del rumore ambientale sul segnale

L'algoritmo di correlazione è stato testato anche rispetto ad un eventuale rumore ambientale in grado di produrre una rotazione relativa della superficie osservata intorno all'asse ottico del telesensore (Figura 13).

Figura 13 Rotazione della superficie rispetto all'asse ottico del telesensore.

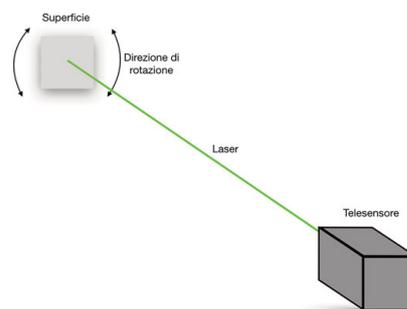


Figure 13 Rotation of the surface with respect to the optical axis of the remote sensor.

Analogamente a quanto esposto del paragrafo precedente, per testare l'algoritmo di correlazione è stato generato un flusso di immagini costituite dalla stessa immagine a cui ad ogni frame è stata applicata una rotazione casuale tra $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ rad, secondo una distribuzione uniforme. La Figura 14 mostra gli spettri del rumore prodotto dalla rotazione sui segnali lungo gli assi x e y .

Figura 14 Ampiezza spettrale in $\text{rad}/(\text{s} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ vs. frequenza mostrante l'effetto del rumore di una rotazione simulata sull'asse x (sopra) e sull'asse y (sotto).

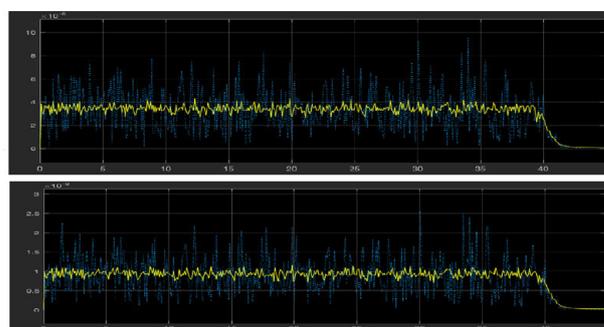


Figure 14 Spectral amplitude in $\text{rad}/(\text{s} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ vs. frequency showing the noise distribution of a simulated rotation on the x -axis (above) and y -axis (below).

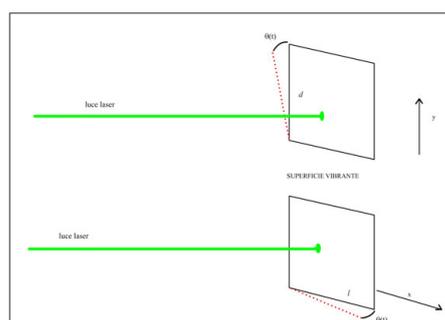
Si può osservare che la distribuzione del rumore per l'algoritmo 2 è uniforme lungo tutte e due le direzioni di analisi ed ha un valore medio di circa $3.5 \cdot 10^{-8}$ sull'asse x e di circa $1 \cdot 10^{-8}$ sull'asse y . Ciò significa che l'algoritmo di correlazione è piuttosto robusto rispetto a questo tipo di disturbo in quanto il rumore prodotto risulta essere cinque ordini di grandezza inferiore rispetto al disturbo stesso.

2. Relazione angolo-spostamento

Se il TIS illumina una superficie di altezza d e di larghezza l , come rappresentato in Figura 15, e se essa ruota di un angolo θ a seguito di vibrazioni e/o di sollecitazioni, il TIS è in grado di rilevare questo angolo. Si premette che tale angolo di rotazione θ , che esprimeremo in radianti (rad), è in generale, evidentemente, dipendente dal tempo t .

Figura 15 Superficie in vibrazione illuminata dal TIS.

Figure 15 Vibrating surface illuminated by TIS.



Sotto opportune ipotesi geometriche e vincolari, gli spostamenti lineari di un punto appartenente alla superficie si possono facilmente calcolare dagli spostamenti angolari. Se ad esempio, come si vede dalla Figura 15, la superficie di altezza d fosse un semplice muro rigido vincolato alla sua fondazione a terra, esso subirebbe degli spostamenti lineari s alla sua estremità superiore pari a $s = d \cdot \theta$, per piccoli angoli. A puro titolo esemplificativo un'altezza $d = 10$ m (tipica di un edificio a 2 piani con seminterrato e tetto) e un angolo di rotazione di un milionesimo di radiante $\theta = 10^{-6}$, produce uno spostamento lineare della sua estremità superiore $s = d \cdot \theta = 10 \cdot 10^{-6} = 10^{-5}$, cioè un centesimo di mm.

Lo stesso discorso si può ripetere per una struttura vincolata a ruotare intorno a un asse verticale. In tal caso si hanno spostamenti compatibili con una rotazione orizzontale θ_h , esempio $s_x = l \cdot \theta_h$, avendo indicato con s_x gli spostamenti orizzontali. Quindi in base alle ipotesi esemplificative appena fatte il legame tra l'angolo e lo spostamento lineare è abbastanza immediato. Pertanto dalla conoscenza della superficie geometrica investigata, con le grandezze angolari spostamento θ velocità ω e accelerazione a_ω , si possono dedurre le altre grandezze cinematiche lineari $s(t)$, $v(t)$ e $a(t)$ così come è stato fatto per il passaggio angolo spostamento semplicemente moltiplicando per d o l .

È necessario sottolineare che quanto affermato è solo una prima approssimazione per definire la relazione tra le quantità angolari e quelle lineari ma può essere considerata come una fase iniziale per uno studio successivo più approfondito. In particolare, l'approssimazione suggerita ipotizza che l'edificio monitorato ruoti rigidamente intorno ad un asse trascurando l'effetto di flessione progressiva che esso subisce dalle fondamenta verso l'apice. In realtà, come mostrato nella Figura 16, in questa approssimazione, l'angolo di oscillazione dell'edificio sarebbe sempre lo stesso indipendentemente dal punto osservato (p1 e p2 sono i punti di osservazione a cui corrispondono angoli a1 e a2 e spostamenti d1 e d2).

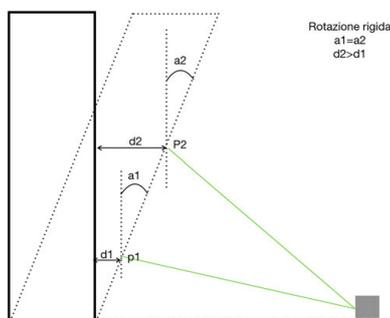


Figura 16 Struttura rigida.

Figure 16 Rigid structure.

Se si considera il caso reale in cui l'edificio subisce una flessione (Figura 17) allora ci si dovrebbe aspettare una dipendenza dell'angolo in funzione del punto in cui si effettua la misurazione. Più esattamente, all'aumentare dell'altezza, aumenta l'angolo come anche lo spostamento lineare.

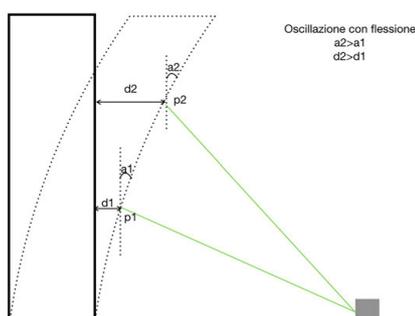


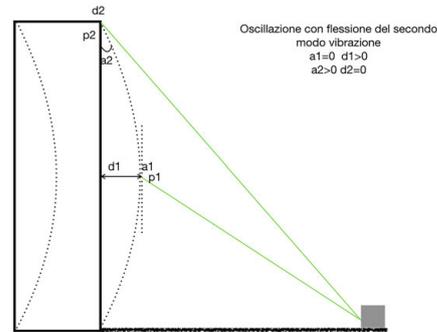
Figura 17 Struttura sottoposta a flessione. Primo modo vibrazionale.

Figure 17 Structure subjected to bending. First vibrational mode.

La relazione tra angoli e spostamenti lineari per il secondo modo vibrazionale è molto più complessa rispetto ai casi precedenti. Nella Figura 18 è mostrato il caso in cui si effettuano due diverse osservazioni in p1 e p2. Come caso limite, si è scelto p1 coincidente con il ventre della deformazione dell'edificio e p2 coincidente con un nodo. In questo caso, in p1 il TIS non rileverebbe nessuna variazione di angolo ma questo punto si sposta con la massima ampiezza lineare. In p2, al contrario, il TIS rileva il massimo angolo di oscillazione ma il punto p2, essendo un nodo, non subisce nessuno spostamento lineare.

Figura 18 Struttura sottoposta a flessione. Secondo modo vibrazionale.

Figure 18 Structure subjected to bending. Second vibrational mode.



Nel paragrafo 4 di questo documento, in cui sono mostrati alcuni risultati sperimentali, ci si limita ad analizzare e interpretare i dati ottenuti dal TIS come appartenenti al primo modo vibrazionale perché tipicamente è quello con ampiezza maggiore e con frequenza prossima a quelle tipiche di un terremoto. Si ritiene comunque che sia necessario effettuare uno studio più approfondito sulle metodologie di utilizzo e di interpretazione dei dati prodotti da TIS pensando, per esempio, a come questi possano essere integrati alle attuali tecniche di modellazione degli edifici che utilizzano informazioni prodotte da accelerometri o velocimetri lineari. Inoltre, analogamente alle attuali tecniche di modellazione, se anche il TIS fosse in grado di monitorare contemporaneamente più punti, sarebbe possibile ottenere informazioni più esaustive sul comportamento dinamico di un edificio. Allo stato attuale di sviluppo del TIS, possono comunque essere ideate e sperimentate metodologie di misurazione basate sul monitoraggio non simultaneo di più punti di una stessa costruzione allo scopo di inferire informazioni sui modi vibrazionali.

3. Influenza della microsismicità sulla misura

La tecnica di misura qui presentata risente inevitabilmente del movimento relativo del telesensore rispetto alla superficie investigata. Tale criticità è dovuta alle vibrazioni proprie del TIS per varie cause quali: microsismicità, traffico, vento, attività umane e altri fattori ambientali, che devono essere quantificate e per quanto possibile mitigate. La microsismicità è tipicamente presente nella banda di frequenza di operazione del TIS 0.1 – 45 Hz, è ineludibile e sostanzialmente sempre presente, con una certa variabilità in tutti i punti della superficie terrestre, mentre per il traffico, vento ecc., si ha una certa libertà nella scelta del luogo e del periodo opportuno per eseguire i rilevamenti. In questo paragrafo si cercherà di quantificare gli spostamenti del suolo dovuti a questo fenomeno in relazione all'influenza che possono avere su queste misure che utilizzano la leva ottica.

Le traslazioni del pattern di speckle lungo l'asse y della camera sono dovute principalmente alle variazioni dell'inclinazione locale della superficie bersaglio. Tuttavia, le vibrazioni dello strumento possono disturbare la misura e introdurre degli errori y_{err} che si possono quantificare. Abbiamo visto che il TIS si può configurare con due diverse disposizioni delle lenti (f_2/f_1), sia nella loro

reciproca disposizione che rispetto al sensore ottico. Nel capitolo 1 sono stati presentati i due casi che si riassumono con le formule $\Delta\theta \cong [(f_2/f_1)/L] \cdot \Delta y$ e $\Delta\theta \cong k \cdot \Delta y$, quest'ultima indipendente dalla distanza L . Poniamo che il dispositivo sia in grado di rilevare le variazioni di inclinazione locale $\theta(t)$ della superficie illuminata lungo l'asse y (il caso lungo l'asse x viene trascurato al momento). Se la distanza di osservazione L è sufficientemente grande rispetto al rapporto delle due focali, a uno spostamento angolare $\Delta\theta = \theta(t_0)$, in un certo istante t_0 , cioè indipendente dal tempo, corrisponde una traslazione massima del pattern di speckle lungo l'asse y pari a:

$$\Delta y \cong y_{err} + \frac{f_2}{f_1} L \cdot \Delta\theta \quad (9)$$

dove, y_{err} è l'errore traslazionale del cavalletto-sensore lungo l'asse y . Dalla relazione sopra si nota che y_{err} agisce semplicemente come un rumore additivo (prevalentemente bianco ad alte frequenze e colorato alle basse). Quindi esso agisce sulle misure qualunque sia la distanza L . Però in accordo con la relazione sopra, si nota che, a parità di spostamento $\Delta\theta$ della superficie bersaglio, per distanze L sempre maggiori, y_{err} ha minore influenza perché costante, mentre il secondo termine cresce in ampiezza. Applicando l'equazione (9) e non considerando y_{err} , con un rapporto $(f_2/f_1) = 2$ a parità di spostamento angolare $\Delta\theta$ dell'ordine di $5 \cdot 10^{-8}$ rad, si valutano le traslazioni Δy che il TIS può rilevare. In Tabella 1 si evidenzia che gli spostamenti traslazionali Δy aumentano linearmente con la distanza.

L [m]	Δy [m]
1	10^{-7}
10	10^{-6}
50	$5 \cdot 10^{-6}$
100	10^{-5}

Tabella 1 Valori Δy determinati con la configurazione ottica del TIS dipendente dalla distanza L , con il rapporto tra le focali $(f_2/f_1) = 2$ e per un fissato spostamento angolare $\Delta\theta = 5 \cdot 10^{-8}$ rad.

Table 1 Values Δy determined with the optical configuration of the TIS depending on the distance L , with the ratio between the focal lengths $(f_2/f_1) = 2$ and for a fixed angular displacement $\Delta\theta = 5 \cdot 10^{-8}$ rad.

La configurazione del gruppo ottico del TIS indipendente dalla distanza è più immediata. In tal caso il coefficiente $(1/f = 2.325)$ fornisce un valore per Δy sempre dell'ordine di 10^{-6} .

Effettivamente per spostamenti verticali del terreno $y_{err} \approx 10^{-6} - 10^{-7}$ m, tale valore diventa critico e già misure eseguite a 10 m necessitano di una correzione, perché il rumore microsismico produce sul sensore traslazioni Δy comparabili con l'effetto rotazionale della superficie investigata. Nella configurazione ottica del TIS dipendente dalla distanza, questi valori sono comparabili con i valori della Tabella 1 per distanze ≤ 10 m. Invece per la configurazione del TIS indipendente dalla distanza tale confronto è sicuramente più immediato, in quanto un errore $y_{err} \leq 10^{-6}$ non influenzerebbe la misura, se si volessero rilevare spostamenti angolari di $\Delta\theta = 5 \cdot 10^{-8}$ rad delle superfici bersaglio, per qualsivoglia distanza. È stato considerato il valore $\Delta\theta = 5 \cdot 10^{-8}$ rad poiché è stato effettivamente rilevato puntando il laser su un piezoelettrico

opportunamente eccitato per produrre oscillazioni di questa entità. Tale valore è stato anche preso come riferimento attuale della sensibilità del TIS.

Ci si chiede se il terreno abbia effettivamente spostamenti di questa entità. In letteratura si trovano numerosi lavori sulla microsismicità, sia su scala locale che su scala globale [Peterson, 1993]. Riferendoci alla distribuzione globale, la grandezza che meglio rappresenta la microsismicità è il cosiddetto *Power Spectrum Density*, PSD, delle accelerazioni (Figura 19). Di seguito si ricaverà almeno l'ordine di grandezza degli spostamenti microsismici.

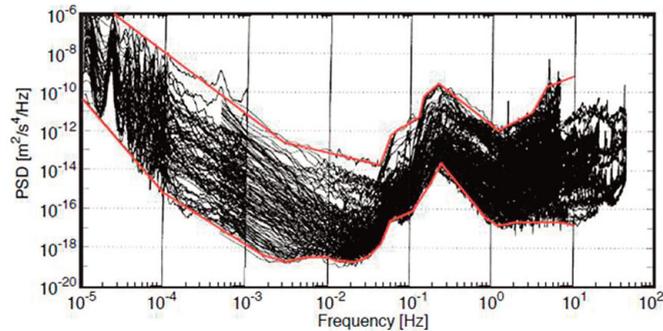


Figura 19 I tracciati rappresentano la densità dello spettro di potenza (PSD) delle accelerazioni misurate dalle stazioni sismiche distribuite sull'intero pianeta [Peterson, 1993]. Dal PSD delle accelerazioni è possibile stimare la deviazione standard σ_y degli spostamenti verticali a cui è sottoposto lo strumento.

Figure 19 The plots represent the power spectrum density (PSD) of the accelerations measured by the seismic stations distributed over the entire planet [Peterson, 1993]. From PSD of the acceleration it is possible to estimate the standard deviation σ_y of the vertical displacements to which the instrument is subjected.

Per i nostri scopi conviene passare dal $PSD_{\ddot{x}}$ allo spettro degli spostamenti $y(f)$ o ancora più rappresentativa la grandezza σ_y , sapendo che il "power spectrum density" è un valore quadratico medio degli spostamenti distribuiti sull'asse delle frequenze f :

$$\sigma_y = \sqrt{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{PSD_{\ddot{x}}}{(2\pi f)^4} df} \quad (10)$$

Se mettiamo che il valore di $PSD_{\ddot{x}}$ preso dalla figura sopra sia in rozza approssimazione un valore costante pari a 10^{-13} , avremo:

$$\sigma_y = \sqrt{\int_{0.1}^{10} \frac{10^{-13}}{(2\pi f)^4} df} \quad (11)$$

$$\sigma_y \approx 1.46 \cdot 10^{-7} \quad (12)$$

La traslazione tipica σ_y (quadratica media), dovuta alle accelerazioni microsismiche del terreno di questa entità, può essere confrontabile con i valori presentati nella seconda colonna della Tabella 1. Questa grandezza rappresenta l'errore y_{err} di cui abbiamo discusso precedentemente. In altri termini gli spostamenti angolari $\Delta\theta$ rilevati dal TIS sono affetti da un errore y_{err} il quale

è una frazione del pixel del foto-rivelatore che si produce lungo la verticale e di cui bisogna tener conto nella valutazione della misura. La correzione o mitigazione di tale errore apporta un aumento significativo dell'accuratezza dello strumento.

Ciò posto, valutiamo ora un altro contributo. Le vibrazioni del terreno, oltre a traslare lo strumento lungo y , possono anche inclinarlo causando di conseguenza l'inclinazione del fascio del telesensore (Figura 20). Pertanto ammettiamo che a questa vibrazione y_{err} si accompagni una rotazione ($\Delta\alpha$). Questo errore si aggiunge alla pura traslazione e l'equazione (9) si modifica come nella seguente:

$$\Delta\theta \cong y_{err} + \frac{f_2}{f_1} L \cdot \Delta\alpha + \frac{f_2}{f_1} L \cdot \Delta\theta \tag{13}$$

Per cercare di quantificare questo errore (secondo termine dell'equazione (13) assumiamo che le onde sismiche nel terreno abbiano una lunghezza d'onda λ_{sm} e si propaghino alla velocità v_{sm} , cioè: $\lambda_{sm} = v_{sm}/f$. Riferendoci alla Figura 20 e approssimando la tangente con l'angolo, si ha il seguente errore angolare $\Delta\alpha$:

$$\Delta\alpha = \frac{y_{err}}{\lambda_{sm}} = y_{err} \frac{f}{v_{sm}} \tag{14}$$

Ripetendo quanto è stato fatto per il calcolo di σ_y per l'errore quadratico medio angolare $\Delta\alpha = \sigma_{\alpha y}$ si ha:

$$\sigma_{\alpha y} = \sqrt{\int_{0.1}^{10} \frac{PSD_{\ddot{x}}}{(2\pi f)^4} \frac{f^2}{v_{sm}^4} df} \tag{15}$$

Con $PSD_{\ddot{x}}$ costante 10^{-13} circa nell'intervallo di frequenza 0.1 -10 Hz considerato, il valore della radice dell'integrale definito è:

$$\sigma_{\alpha y} \approx 10^{-11} \tag{16}$$

dove è stato assegnato un valore di velocità delle onde sismiche v_{sm} di ≈ 1000 m/s. Questo è un valore forse approssimato per difetto nell'intervallo di frequenze prima specificato. Pertanto avremo un errore quadratico medio angolare $\Delta\alpha$ dell'ordine di grandezza di $\sigma_{\alpha y}$. Da questa valutazione di massima, si evince che il contributo dell'errore della rotazione angolare prodotta dalla microsismicità è inferiore di qualche ordine di grandezza rispetto al puro effetto traslazionale y_{err} .

Alla stessa stregua si possono trattare eventuali rotazioni sull'altro asse x che producono un x_{err} , con un errore sull'angolo $\sigma_{\alpha x}$ dello stesso ordine di grandezza.

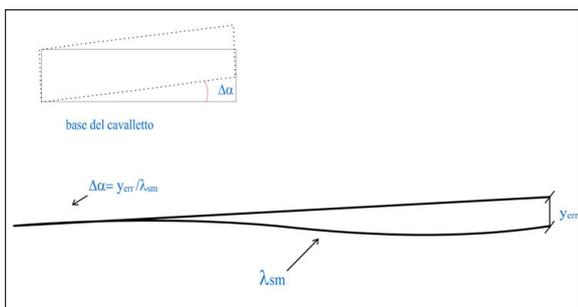


Figura 20 Schematizzazione dell'inclinazione angolare $\Delta\alpha$ in dipendenza dello spostamento del suolo y_{err} lungo l'asse verticale e della lunghezza d'onda sismica λ_{sm} .

Figure 20 Schematization of the angular inclination $\Delta\alpha$ depending on the movement of the soil y_{err} along the vertical axis and the seismic wavelength λ_{sm} .

I dati in letteratura ci hanno permesso di quantificare, in linea molto generale, i movimenti di cui risente il TIS a causa del rumore microsismico. Si accennerà solo sommariamente a possibili soluzioni per mitigare le vibrazioni del cavalletto quando esso è poggiato a terra oppure su un banco, ecc. La Figura 19 mostra il campo di frequenza dove le accelerazioni dovute alla microsismicità sono rilevanti e cadono soprattutto nell'intervallo di frequenza 0.1- 4 Hz.

In questo campo di frequenze, non è semplice eliminare le vibrazioni, com'è noto nelle tecniche di ottica microscopica, olografica, leva ottica e nella interferometria, come nella rivelazione di onde gravitazionali [Takamori et al., 2007]. La tecnologia offre principalmente due categorie di isolatori/assorbitori di vibrazioni, passivi o attivi. Nel controllo attivo le difficoltà sono maggiormente relative alla complessità e alle dimensioni dei dispositivi. Nel controllo passivo si studiano materiali e sistemi molto sofisticati, dato che la risposta elastica dei materiali diviene meno efficace al diminuire della frequenza. In tutti e due i casi, tali sistemi non si applicano in maniera soddisfacente al TIS perché troppo costosi o ingombranti per un piccolo dispositivo. Tuttavia si sono sperimentate soluzioni con isolatori passivi con strati di materiale in gommapiuma o memory che hanno permesso di ridurre gli errori quasi di un fattore 2 per le frequenze più basse sotto i 3-4 Hz e in misura maggiore per le frequenze più alte.

4. Analisi e risultati delle misure

Misura di vibrazione del muro spina che sorregge la scala di sicurezza nel parcheggio lato NO. Il telesensore fornisce l'andamento nel tempo delle velocità angolari $\omega(t)$ lungo gli assi orizzontale e verticale e contestualmente, esegue la trasformata di Fourier ogni 1024 campioni (circa 11 secondi di acquisizione). Le FFT di 1024 punti sono denominate in questo documento "istantanee" per distinguerle da quella risultante dalla media di 30 FFT istantanee.

In Tabella 2 è riportato il picco dei valori delle velocità angolari $\omega(t)$, mediati nel tempo V_m ed istantaneo V_i a meno di un fattore di correzione introdotto dall'ottica ricevente, sia sull'asse orizzontale x che sull'asse verticale y .

L in m	V_m (in pixel mediato)	V_i (in pixel istantaneo)	f in Hz	Note
31	x) $3 \cdot 10^{-6}$ y) rumore	$4.5 \cdot 10^{-6}$	24	Livello vibrazionale basso ad alta frequenza. Vedi Figura 21
31	x) $3.1 \cdot 10^{-6}$ y) $0.8 \cdot 10^{-6}$		24	

Tabella 2 Valori dei picchi nello spettro.

Table 2 Peak values in the spectrum.

Dopo aver calibrato la parte ottica del telesensore (descritta in Appendice 2), si è potuto ricavare il fattore di correzione che è circa $1/f = 2.325$. La Tabella 3 mostra i valori riportati in Tabella 2 moltiplicati per $1/f$.

V_m (24 Hz) in rad/s non calibrato	ω_m in rad/s calibrato	$\theta_m (\omega_m / 2\pi \cdot f)$ in rad	$a_{\omega m} (\omega_m \cdot 2\pi \cdot f)$ in rad/s ²
x) $3 \cdot 10^{-6}$	$1.39 \cdot 10^{-5}$	$9.21 \cdot 10^{-8}$	$2.09 \cdot 10^{-3}$
y) $0.8 \cdot 10^{-6}$	$3.72 \cdot 10^{-6}$	$2.47 \cdot 10^{-8}$	$5.6 \cdot 10^{-4}$

Tabella 3 Valori mediati angolari di velocità ω_m , spostamenti θ_m , e accelerazioni $a_{\omega m}$ del picco a 24 Hz.

Table 3 Angular mean values of velocity ω_m , displacement θ_m , and acceleration $a_{\omega m}$ of 24 Hz peak.

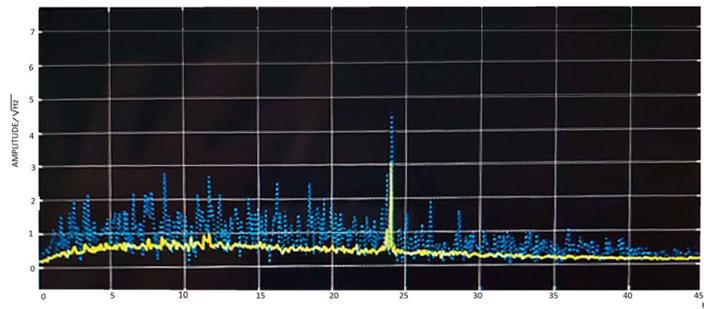


Figura 21 Spettro delle vibrazioni lungo l'asse x. In giallo sono rappresentati i valori mediati, in celeste quelli istantanei. Emerge un picco a 24 Hz lungo x (orizzontale) $V_m = 3.1 \cdot 10^{-6}$ e un valore istantaneo $V_i = 4.5 \cdot 10^{-6}$.

Figure 21 Vibration spectrum along the x-axis. In yellow are plotted the mean values, in celestial the instantaneous values. A 24 Hz peak along x (horizontal) emerges $V_m = 3.1 \cdot 10^{-6}$ and an instantaneous value $V_i = 4.5 \cdot 10^{-6}$.

Lo schema dell'operazione di rilevamento sul muro, mostrato nella Figura 24, con le relative approssimazioni geometriche è riportato in Figura 22.

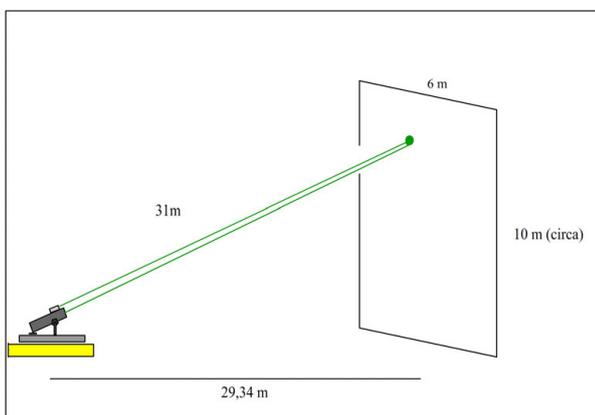


Figura 22 Schema della misura con le relative geometrie.

Figure 22 Measurement scheme with related geometries.

In Tabella 4, sono riportati i valori mediati lineari di velocità v_m , spostamenti s_m , e accelerazioni a_m del picco a 24 Hz (rispettivamente in m/s, m e m/s^2) sia lungo l'asse x che lungo l'asse y. Per ricavare tali valori le grandezze angolari sono state moltiplicate per i rispettivi segmenti (d e l). Sono pertanto stati considerati i valori estremi di questi segmenti a partire dal vincolo. Inoltre, queste grandezze lineari sono con buona approssimazione indipendenti dell'angolo di elevazione del TIS.

Lunghezza del segmento in m	v_m in m/s	s_m in m	a_m m/s^2
x) 6	$8.34 \cdot 10^{-5}$	$5.52 \cdot 10^{-7}$	$1.25 \cdot 10^{-2}$
y) 10	$3.72 \cdot 10^{-5}$	$2.47 \cdot 10^{-7}$	$5.6 \cdot 10^{-3}$

Tabella 4 Valori mediati lineari velocità v_m , spostamenti s_m , e accelerazioni a_m del picco a 24 Hz lungo gli assi indicati x e y.

Table 4 Mean values of velocity v_m , displacement s_m , and acceleration a_m of 24 Hz peak.

Altri rilevamenti sono stati eseguiti sulla scala dietro al muro Figura 24b. Da una prima analisi qualitativa, mostrata in Figura 23, si nota uno spettro vibrazionale più elevato rispetto al precedente rilevamento sul muro, per cause che si possono attribuire ad una maggiore elasticità della struttura. Nella Figura 23 si nota un picco a 3.91 Hz solo lungo x (orizzontale), il resto dello spettro non dà nessuna informazione immediata (Tabella 5).

V_m in rad/s non calibrato	ω_m in rad/s	$\theta_m (\omega_m / 2\pi \cdot f)$ in rad	$a_{\omega_m} (\omega_m \cdot 2\pi \cdot f)$ in rad/s ²
x) $2.2 \cdot 10^{-6}$	$1.02 \cdot 10^{-5}$	$4.15 \cdot 10^{-6}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$

Tabella 5 Valori medi angolari di velocità ω_m , spostamenti θ_m , e accelerazioni a_{ω_m} , a 3.91 Hz.
Table 5 Angular mean values of velocity ω_m , displacement θ_m , and acceleration a_{ω_m} of 3.91 Hz peak.

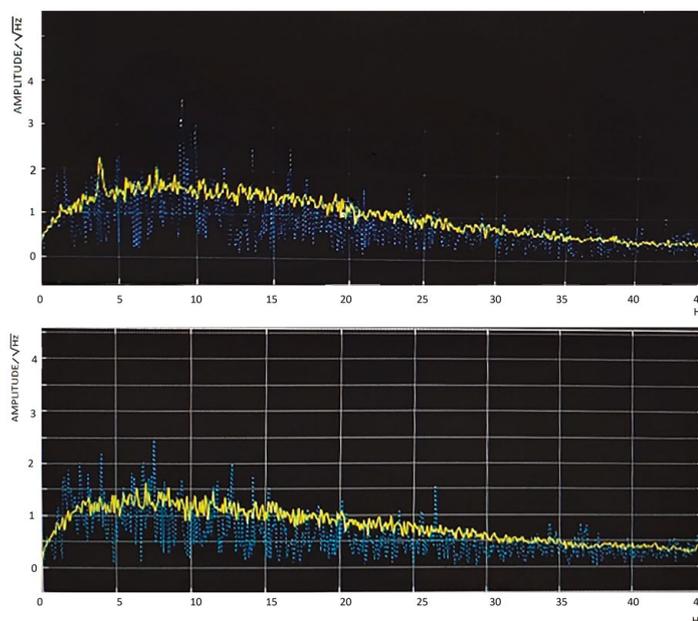


Figura 23 Il valore di picco di $2.2 \cdot 10^{-6}$ a una frequenza di 3.91 Hz che emerge dal fondo di rumore vibrazionale (asse x nel grafico in alto). In giallo sono rappresentati i valori mediati, in celeste quelli istantanei.

Figure 23 A peak value frequency of $2.2 \cdot 10^{-6}$ at 3.91 Hz emerges from the background vibrational noise (upper plot x -axis). In yellow are plotted the mean values, in celestial the instantaneous values.

Misura di vibrazione del muro spina su cui si appoggia anche la scala di sicurezza nel parcheggio lato NO della sede Centrale dell'INGV (Figura 24).

Il telesensore infrasonico TIS visibile in basso nella precedente figura si presenta come in Figura 25 con una base in alluminio un cavalletto che permette la regolazione dell'angolo d'elevazione per facilitare il puntamento sui particolari della struttura investigata, l'ottica ricevente di 2'' su profilato di circa 25 cm, il laser verde 532 nm di 50 mW, e il computer costituito da una Raspberry con telecamera CCD interna.



Figura 24 Punti del rilevamento sul muro e sull'angolo a destra della scala nel parcheggio lato NO dell'INGV.

Figure 24 Survey points on the wall and on the corner to the right of the staircase in the parking lot on the NW side of the INGV.



Figura 25 Telesensore infrasonico TIS.

Figure 25 Infrasonic remote sensor TIS.

5. Conclusioni

Nell'ambito del progetto EDI-SECUR è stato sviluppato un telesensore ottico che sfrutta la tecnica del tracciamento di speckle per la misura a distanza delle vibrazioni di edifici e strutture. Com'è noto la caratterizzazione degli edifici, da un punto di vista dinamico, si effettua attraverso il rilevamento di vibrazioni e l'analisi delle frequenze e delle ampiezze della struttura sottoposta ad indagine. Attualmente sono disponibili sensori di tipo inerziali (accelerometri, velocimetri, ecc.) che permettono di determinare le vibrazioni locali e quindi di ottenere la caratterizzazione dinamica di un edificio. Recentemente insieme a queste tecniche classiche, in virtù dello sviluppo delle tecniche interferometriche, si impiegano anche interferometri ottici ed elettromagnetici. Per rimanere nell'ambito dell'interferometria ottica, attualmente tra i tanti sono comuni i cosiddetti Laser Doppler Velocimeter (LDV) [Lutzman et al., 2016; Sutton, 1990] o sistemi meno diffusi che impiegano tecniche olografiche [Poggi et al., 2016]. Queste tecniche sono adatte al rilevamento delle oscillazioni delle strutture anche senza installare in sito gli strumenti e l'ausilio di dispositivi forzanti che inducono delle vibrazioni, come talvolta avviene per tecniche più tradizionali. Questi nuovi sistemi di rilevamento hanno una risoluzione che copre un ambito frequenziale e una dinamica tale da rilevare le vibrazioni indotte dal rumore sismico di fondo, dal traffico e dal vento. Rispetto a questi ultimi che risentono del rumore di speckle, il prototipo qui descritto lavora proprio sul moto d'insieme di speckle diffuse dalla superficie che entrano nel sistema ottico creando una sequenza di immagini nel tempo (tracciamento di speckle). Questo ha permesso di arrivare a distanze maggiori ma con risoluzione leggermente inferiore rispetto ai menzionati sistemi ottici di rilevamento. I potenziali punti di forza della tecnica qui impiegata sono: maggiore distanza coperta, discreta insensibilità rispetto al tipo di superficie illuminata,

indipendenza dalla distanza e dall'angolo di inclinazione anche se in relazione alla potenza del laser impiegato. Le misure presentate nell'ultimo paragrafo, eseguite con un laser di 50 mW e un'ottica ricevente di 2 pollici, mostrano che è possibile sfruttare questa tecnica in ambito infrasonico, soprattutto se si superano le limitazioni dovute all'oscillazione propria del telesensore.

Bibliografia

- Bianchi S., (2014). *Vibration detection by observation of speckle patterns*. Applied Optics Ed. Optical Society of America, 53, 931–936.
- Bianchi S., Giacomozzi E., (2019). *Long- range detection of acoustic vibration by speckle tracking*. Applied Optics. Ed. Optical Society of America. Vol.58 (28) pp. 3397-3406.
- Dainty J.C., (1975). *Laser Speckle and Related Phenomena* Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 286.
- Goodman J.W., (2010). *Speckle phenomena in optics*. Editor Freeman ISBN:1936221144.384.
- Lutzmann P., Göhler, B., Chris A.H., van Putten F.D.M., (2016). *Laser vibration sensing at Fraunhofer IOSB: review and applications*. Optical Engineering. 56 (3): 031215.
- Peterson J., (1993). *Observation and modeling of seismic background noise*. U.S.G.S. Tech. Rept., 93- 322, 1-95.
- Poggi P., Locatelli M., Pugliese E., Delle Donne D., Lacanna G., Meucci R., Ripepe M., (2016). *Remote monitoring of building oscillation modes by means of real-time Mid Infrared Digital Holography*
Scientific Reports | 6:23688 | DOI:10.1038/srep23688.
- Sutton C.M. (1990). *Accelerometer Calibration by Dynamic Position Measurement Using Heterodyne Laser Interferometry*. Metrologia. 27 (3): 133.
- Takamori A., Raffai P., Márka S., DeSalvo R., Sannibale V., Tariq H., Bertolini A., Cella G., Viboud N., Numata K., Takahashi R., Fukushima M., (2007). *Inverted pendulum as low frequency pre-isolation for advanced gravitational wave detectors*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 582(2) pp.683-692.
- Zalevsky Z., Beiderman Y., Margalit I., Gingold S., Teicher M., Mico V., and Garcia J., (2009). *Simultaneous remote extraction of multiple speech sources and heart beats from secondary speckles pattern*. Opt. express 17, 21566.

APPENDICE 1

Il TIS, contrariamente ad altri strumenti, misura la velocità angolare $\omega(t) = d\theta(t) / dt$ della superficie investigata. È ovvio che da questa possiamo ricavare, a partire dalla funzione $\omega(t)$ gli spostamenti e accelerazioni angolari con semplici operazioni di integrazione e derivazione. Ora una qualunque funzione come $\omega(t) = d\theta(t) / dt$, si può scomporre in una serie armonica di seni o coseni che la rappresentano completamente. Inoltre, a meno di fattori $2\pi f$ al denominatore o al numeratore si possono calcolare rispettivamente lo spostamento angolare $\theta(t)$ e l'accelerazione angolare $a_\omega(t)$. Qui consideriamo solo le funzioni armoniche ben sapendo che tutte le altre si possono descrivere come una somma pesata di quest'ultime. Assumiamo che $\omega(t)$ abbia la forma:

$$\omega(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (\text{A1.1})$$

Dove: A è il valore di picco, f è la frequenza e φ è la fase. A seguire per gli spostamenti avremo la seguente formula:

$$s(t) = \int A \sin(2\pi f t + \varphi) dt = -\frac{A}{2\pi f} \cos(2\pi f t + \varphi) + cost \quad (\text{A1.2})$$

In regime oscillatorio, se si è interessati solo ai valori medi, tanto φ che $cost$ non hanno importanza. Mentre per le accelerazioni si avrà:

$$a_\omega(t) = \frac{d A \sin(2\pi f t + \varphi)}{dt} = 2\pi f A \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (\text{A1.3})$$

Ciò detto il passaggio dalla velocità angolare ω allo spostamento angolare θ e all'accelerazione angolare a_ω si può riassumere nella Tabella A.1.

Velocità angolare ω	Spostamento angolare θ	accelerazione angolare a_ω
A	$A/2\pi f$	$A \cdot 2\pi f$

Tabella A.1.

APPENDICE 2

Il telesensore, per poter restituire la corretta velocità angolare di rotazione della superficie osservata, indipendentemente dalla distanza di rilevazione, necessita di una fase di calibrazione. Nel paragrafo 1.1 è stato mostrato che la misura effettuata dal telesensore può essere resa indipendente dalla distanza di osservazione se il sensore CCD è posizionato nel punto di fuoco all'infinito del sistema ottico. In questo caso infatti, la (7) mostra la relazione tra gli angoli di rotazione della superficie osservata e le traslazioni del pattern di speckle x sul sensore CCD:

$$\theta = \frac{x}{f} \quad (\text{A2.1})$$

Come si può osservare, noto lo spostamento x del pattern, è sufficiente dividerlo per la focale f del sistema ottico per ottenere l'angolo θ di rotazione in radianti. È necessario quindi conoscere l'effettiva focale del sistema ottico e contemporaneamente, garantire che il sensore CCD sia esattamente nel piano focale all'infinito.

L'ottica ricevente del telesensore è stata quindi progettata in modo da consentire una piccola variazione della focale del sistema (attraverso la variazione della distanza tra le due lenti) intorno a quella di progetto di circa 500 mm, al fine di far ricadere il piano focale nella posizione prefissata del sensore CCD. La prima fase di calibrazione consiste quindi nel misurare una superficie vibrante di riferimento a diverse distanze e aggiustare la distanza tra le lenti finché il valore restituito dal telesensore non subisce variazioni con la distanza. Il raggiungimento di questa condizione consiste con la condizione di coincidenza tra il piano focale del sistema ottico ed il CCD. Successivamente, noti θ della superficie di riferimento e la corrispondente x restituita dal telesensore, è stato possibile ricavare l'effettiva focale $f = 430$ mm del sistema ottico e, di conseguenza, $1/f = 2.325$. In conclusione, se si considera che l'algoritmo di correlazione restituisce spostamenti del pattern di speckle in frazioni di pixel, la trasformazione da pixel a radianti è data dalla seguente formula:

$$\theta = \text{pixel} \cdot 1.12 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4}{2} \cdot \frac{1}{f} \quad (\text{A2.2})$$

Dove: *pixel* è lo spostamento del pattern di speckle espresso in frazioni di pixel, cioè $1.12 \cdot 10^{-6}$ m; il fattore 4 tiene conto del funzionamento del sensore alla risoluzione e alla frequenza di campionamento utilizzate (in particolare, il sensore CCD per raggiungere la frequenza di campionamento di 90 fps, adotta una tecnica di *binning* e *skipping* che consistono rispettivamente nel fondere l'informazione di due pixel adiacenti e saltarne altri due adiacenti presentandoli come un unico pixel. In altre parole, se l'algoritmo di correlazione registra uno spostamento di un pixel, in realtà, il pattern di speckle ha subito uno spostamento di quattro pixel); il fattore 2 lega l'angolo θ di rotazione della superficie e l'angolo di inclinazione che subisce il pattern diffuso e misurato.

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Francesca DI STEFANO, Rossella CELI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico e impaginazione

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

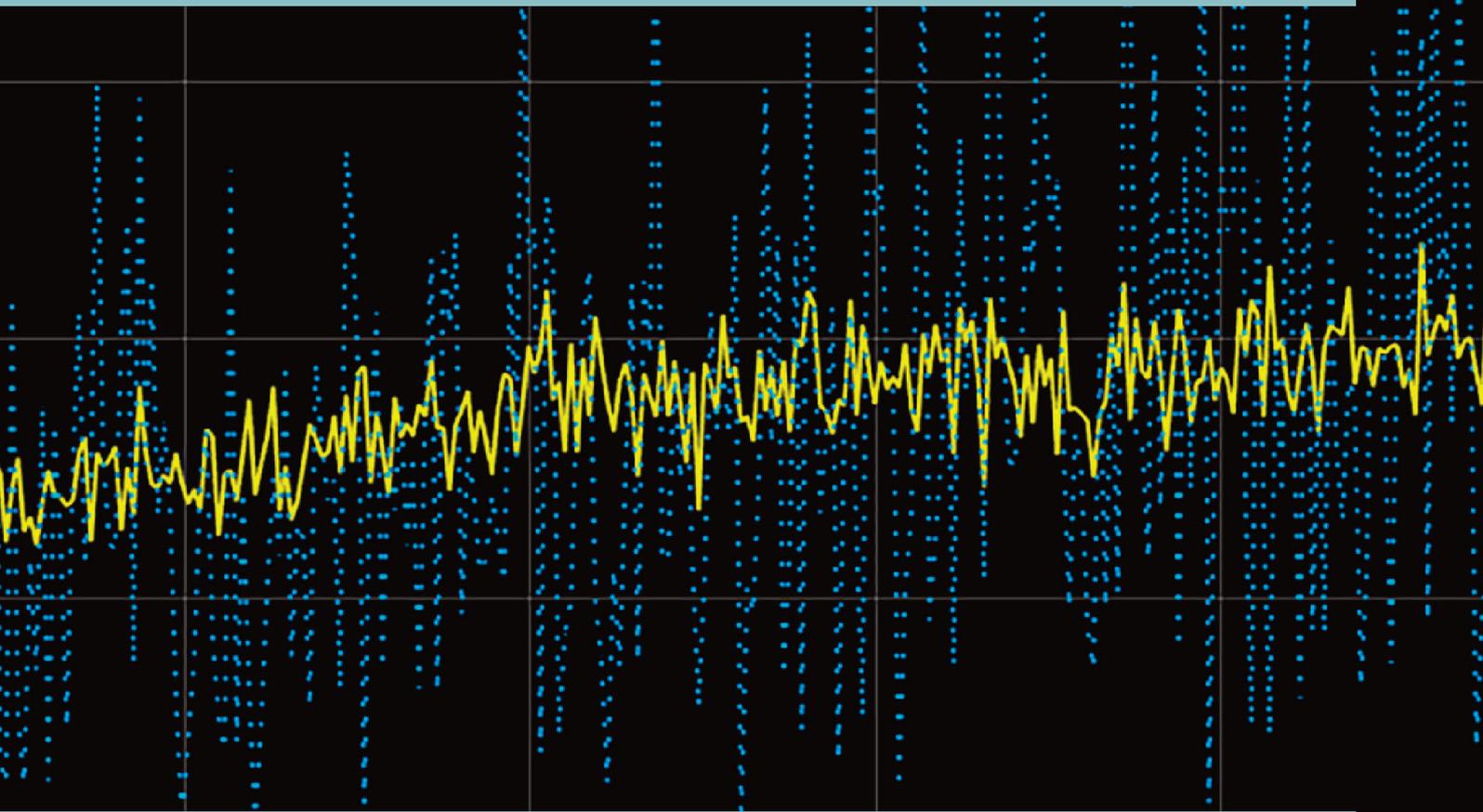
©2021

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA