UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

Corso di Laurea Specialistica in
Geofisica di Esplorazione ed Applicata

Anno Accademico 2011/2012

Candidato **Licciardi Andrea**
Laurea triennale in: **Scienze Geologiche**

Titolo della tesi

Earthquake-induced rotational ground motions from G-Pisa ring laser gyroscope

Relatore: **Saccorotti Gilberto**
Correlatore: **Belfi Jacopo** Controrelatore: **Mannella Riccardo**

Abstract

In order to fully characterize the local ground motion induced by earthquakes, one needs to determine three components of translation, six components of strain and three components of rotation (Aki and Richards, 2002). The first two quantities are commonly studied by seismologists with the use of classical seismological instrumentation, like accelerometers/seismometers and strainmeters.

Rotational motions in seismology have always been considered negligible, mainly because of the lack of instrumentation of adequate sensitivity. Indeed, the rotation rates which have been observed thus far, range from 10^-1 rad/s close to seismic sources (Nigbor, 1994), to 10^-11 rad/s for large telesismic earthquakes (Igel et al.2005, 2007). It is expected that collocated measurements of translations and rotations may (1) allow the estimate of velocities and propagation directions of the incoming wavefield (2) help to further constrain rupture processes and (3) provide additional hazard-relevant information to earthquake engineers (Igel et al.2007). But as reported just a decade ago by Aki and Richards (2002): *"..seismology still awaits a suitable instrument for making such measurements*."

Over the last few years ring laser gyroscopes, based on the Sagnac effect, demonstrated a high potential in investigating the rotational ground motion, and they appear to be the most promising instruments to address Aki and Richard's requirements.

Theory suggests a general link between rotational and translational motions induced by earthquakes. In the case of horizontally and vertically polarized surface waves (Love and Rayleigh-waves) the relations are particularly simple. Vertical acceleration and rotation rate about a

horizontal axis should be in phase and scaled by a factor that corresponds to local Rayleigh-waves phase velocity. By the same token, transverse acceleration and rotation rate about vertical axis should be in phase and scaled by two times Love-waves phase velocity.

According to the above relationships, under the plane-wave approximation, collocated measurements of translation and rotation can provide the estimate of phase velocities and propagation directions, otherwise only accessible through seismic array measurements, polarization analysis, or additional strain measurements.

This thesis focuses on the data collected by the G-Pisa ring laser gyroscope, developed by the University of Pisa (Department of Physics) and INFN. This instrument has been operating for almost 2 years at the European Gravitational Observatory in Cascina (Pisa), in the framework of the VIRGO project.

In particular, I report the very first seismic analysis of the rotational data from a gyrolaser lying in the vertical plane, which is sensitive to rotation about a horizontal axis (tilt). The main part of the thesis is dedicated to the analysis of the Mw=9.0, March 11th, 2011, Japan earthquake; in addition, I also account for recordings from some events occurred at regional distances.

The first objective of this work is to characterize the performance of G-Pisa in relation to a collocated accelerometer and to verify the ground-coupling of the instrument.

By calculating power spectral density (PSD) of rotation rate and acceleration I first identify the signal to noise ratio as a function of frequency and, by computing time-frequency transforms (spectrograms), I individuate the most energetic frequency bands as a function of time for both the instruments during several selected earthquakes. Then, rotation rates and accelerations are correlated within subsequent frequency bands, in order to quantify similarity between the signals.

The second objective of the thesis is to compare the recorded rotation rates with those obtained through an array-based analysis. Applying the seismo-geodetic method by Spudich et al. (1998), I derive the rotation rate from a tripartite array of three-components accelerometers. This method provides an independent estimation of ground rotations that should be in agreement with that directly recorded by the gyrolaser. Results from this analysis show that the two measurements are in general agreement; I attribute the discrepancies to both the geometrical setting of the array and the band limitations of its sensors.

The third objective concerns phase velocities estimation and derivation of surface waves dispersion curves from collocated measurements of rotation and translation. Following Igel et al. (2005, 2007) and Kurrle et al. (2010), I address this issue by calculating the zero-lag correlation coefficient between translational and rotational traces. When the correlation coefficient is above an arbitrary threshold, phase velocity is obtained through a linear regression within overlapping sliding time windows. Iterating the procedure after a narrow band-pass filtering of both traces, it is possible to derive a dispersion curve for the selected wave packet.

A theoretically equivalent dispersion curve could be derived in frequency domain as showed by Suryanto et al (2006), both for Love- and Rayleigh-waves, simply by calculating the spectral ratios between translation and rotation. I implemented this second procedure using a multitaper method (MTM, Thomson, 1982), in order to reduce variance and bias by averaging periodograms obtained using a properly-designed taper.

The dispersion curves calculated in this manner are compared to those obtained with a multi-frequency Plane Wave Fit (PWF) analysis. This method that consists in estimating wavefield slowness for an array of sensors provides independent information about velocities and direction of propagation (azimuth) for plane waves crossing the array.

Rayleigh-waves dispersion curves derived from the Japan earthquake, are then compared against the theoretical phase velocities derived from a standard (AK135) Earth Model.

Since Rayleigh-waves are fully recorded by the gyrolaser only when their direction of propagation is perpendicular to G-Pisa area vector, I implemented a rotation rate signal correction method that takes into account the different directions of propagation of Rayleigh-waves (as estimated from PWF inversion) with respect to G-Pisa axis of sensitivity. This correction leads to a more reliable result in estimating phase velocities, that otherwise would be overestimated.

Collocated measurements of rotation about vertical axis and transverse acceleration for horizontally-polarized seismic waves (SH- and Love-waves) allow estimating direction of propagation and azimuth of the incoming wavefield. Following Igel et al. (2007), and Hadziioannou et al. (2012), I conducted these estimates for Love waves recorded when G-Pisa was configured with area vector oriented vertically.

This thesis is organised into five chapters. In the first chapter, I briefly report the general theory behind rotational motions, and present the relationships between rotation and translation in the context of classical elasticity. Here I show that surface-waves phase velocities and thus dispersion curves can be obtained from collocated measurements or rotation and translation.

In the second chapter I present the instrumentation and data, with particular reference to G-Pisa and its ability to investigate both Rayleigh-and Love-waves with a sensitivity in the order of a few nrad/s/$\sqrt{Hz}$ over the 0.02-1 Hz frequency band.

In the third chapter I describe the data analysis methods, and their practical implementation in terms of Matlab scripts.

In the fourth chapter I present and critically comment the results from the analysis. This chapter is divided into two sections, dedicated respectively to the Love- and Rayleigh-waves results.

The last chapter is dedicated to the general discussion and conclusions.

Riassunto

Per descrivere completamente il moto del suolo indotto da un terremoto, sono necessarie tre componenti di traslazione, sei componenti del tensore di strain e tre componenti di rotazione rigida (Aki e Richards, 2002).

Le prime due quantità vengono comunemente misurate in sismologia attraverso l'utilizzo dei convenzionali sensori sismici (sismometri ed accelerometri) e degli strainmometri.
I moti rotazionali del suolo invece sono sempre stati considerati trascurabili, principalmente per la mancanza di strumenti sufficientemente sensibili. Infatti, le velocità di rotazione misurate fino ad oggi hanno mostrato un range di variabilità molto ampio che copre un intervallo di ampiezze tra 10^-1 rad/s vicino alla sorgente sismica (Nigbor, 1994) e 10^-11 rad/s osservati per grandi telesismi (Igel et al. 2005, 2007). Per questo, solo una decina di anni fa Aki e Richards (2002) scrivevano: "*...seismology still awaits a suitable instrument for making such measurements*.".

Negli ultimi anni, i progressi nell'ambito delle tecnologie laser hanno portato allo sviluppo di un nuovo tipo di strumenti che sempre più frequentemente trovano delle applicazioni nell'ambito della sismologia rotazionale, i giroscopi laser. Infatti, grazie alla loro elevata sensibilità nell'effettuare misure di rotazione e alla peculiarità di essere insensibili ai moti puramente traslazionali, sembrano rispondere esattamente alle esigenze espresse da Aki e Richards.
Dal punto di vista teorico, si possono derivare delle relazioni che collegano rotazioni e traslazioni indotte dal passaggio di onde sismiche. Nel caso di onde superficiali polarizzate orizzontalmente o verticalmente (onde di Love o di Rayleigh rispettivamente) queste relazioni sono particolarmente semplici. Più in dettaglio si può dimostrare che la componente verticale dell'accelerazione è in fase con la velocità di rotazione attorno ad un asse orizzontale, e le rispettive ampiezze sono scalate per un fattore uguale alla velocità di fase locale delle onde di Rayleigh. Allo stesso modo, anche la componente trasversale dell'accelerazione e la velocità di rotazione attorno all'asse verticale risultano essere in fase con le ampiezze scalate per un fattore uguale al doppio della velocità delle onde di Love.
Sfruttando queste relazioni, ed assumendo la propagazione di un'onda piana, effettuare misure puntuali di traslazioni e rotazioni, permette in teoria di stimare le velocità di fase delle onde superficiali e di determinarne la direzione di propagazione, informazioni che potrebbero essere ricavate altrimenti solo attraverso analisi di array.

Questo lavoro si concentra sui dati raccolti dal giroscopio laser G-Pisa, sviluppato dal Dipartimento di Fisica dell' Università di Pisa e dall' INFN, che è stato in funzione per quasi due anni all' European Gravitational Observatory in Cascina (Pisa) nel contesto del progetto VIRGO.
In particolare in questa tesi è riportato il primo esempio di analisi di dati rotazionali provenienti da un giroscopio laser orientato verticalmente e quindi sensibile a rotazioni attorno ad un asse orizzontale (tilt). La parte principale della tesi è dedicata all'analisi effettuata sul terremoto di

magnitudo 9.0 avvenuto in Giappone l' 11 marzo del 2011, ma sono riportati anche i risultati relativi ad altri eventi regionali registrati da G-Pisa sia in configurazione orizzontale che verticale.

Il primo obiettivo di questa tesi è quello di indagare le prestazioni di G-Pisa comparando il segnale rotazionale con quello traslazionale registrato da un accelerometro poco distante (co-locato) e di verificare l'accoppiamento al suolo dello strumento.
Calcolando le densità spettrali di potenza dei due segnali per prima cosa viene identificato il rapporto segnale rumore in funzione della frequenza e analizzando le trasformate tempo-frequenza (spettrogrammi) si individuano le bande di frequenza più significative in termini di energia in funzione del tempo durante i diversi eventi selezionati.
In seguito i segnali di rotazione e di traslazione vengono correlati in diverse bande di frequenza per quantificare la somiglianza tra i due segnali calcolando il coefficiente di correlazione a zero-lag.

Il secondo obiettivo consiste nel comparare il segnale di rotazione registrato da G-Pisa con quello ottenuto a seguito di un'analisi multicanale. Applicando il metodo di Spudich et al. (1998) è infatti possibile calcolare la velocità di rotazione direttamente dalle componenti traslazionali registrate da un array di almeno tre sensori sismici. Questo metodo fornisce una stima indipendente della velocità di rotazione che risulta generalmente in buon accordo con il segnale direttamente registrato dal giroscopio. Le differenze osservate tra i due segnali sono da attribuire alla geometria dell'array e a alle limitazioni di banda specifiche dei sensori che lo costituiscono.

Il terzo obiettivo riguarda la stima delle velocità di fase delle onde superficiali e delle relative curve di dispersione ottenute da misure co-locate di rotazioni e traslazioni.
Seguendo Igel et al. (2005, 2007) and Kurrle et al.(2010), tale obiettivo viene perseguito calcolando il coefficiente di correlazione a zero-lag tra i due segnali.
Quando quest'ultimo supera una soglia stabilita a priori, la velocità di fase per una certa frequenza viene calcolata attraverso una regressione lineare all'interno di finestre temporali scorrevoli e sovrapposte. Ripetendo il procedimento dopo un filtraggio in banda stretta, per diverse frequenze, è possibile ottenere una curva di dispersione per il pacchetto di onde prese in considerazione.
Teoricamente la stessa curva di dispersione può essere calcolata direttamente nel dominio delle frequenze come mostrato da Suryanto et al.(2006), sia per le onde di Love che per quelle di Rayleigh, semplicemente calcolando i rapporti tra gli spettri di accelerazione e di rotazione.
In questo lavoro tale procedura è stata implementata utilizzando un multitaper method (MTM, Thomson, 1982) per ridurre il bias e la varianza, mediando più spettri dello stesso segnale, ognuno dei quali è modificato da taper diversi appositamente costruiti.
Le curve di dispersione così ottenute vengono confrontate con quella ricavata da un'analisi di tipo Plane Wave Fit (PWF) multifrequenziale. Questo metodo, che consiste nello stimare le lentezze di un campo d'onda per un array di sensori, fornisce una stima indipendente delle velocità e della direzione di propagazione di onde piane che attraversano l'array.

Le curve di dispersione ottenute per il terremoto del Giappone, inoltre, sono comparate con quella teorica ricavata per un modello di Terra standard (AK135).

Poichè le onde di Rayleigh vengono registrate completamente dal giroscopio laser solo quando la loro direzione di propagazione è perpendicolare al vettore area di G-Pisa, in questa tesi viene proposto un metodo di correzione del segnale rotazionale che prende in considerazione le diverse direzioni di propagazioni delle onde di Rayleigh (già stimate con il metodo PWF) rispetto all'asse di sensibilità di G-Pisa. L'applicazione di questo tipo di correzione si traduce in valori di velocità più affidabili evitandone la generale sovrastima che si otterrebbe altrimenti.

Una specifica sezione di questo lavoro è dedicato alle misure co-locate di rotazione attorno all'asse verticale e di accelerazione trasversale che consentono il calcolo della direzione di propagazione di onde polarizzate orizzontalmente (onde SH e onde di Love) e dell'azimuth del campo d'onda.
Seguendo Igel et al. (2007), e Hadziioannou et al. (2012) tali stime sono state effettuate per le onde di Love registrate quando G-Pisa ha operato in configurazione orizzontale.

Questa tesi è organizzata in cinque capitoli.
Nel primo viene brevemente descritta la teoria alla base delle rotazioni sismiche e vengono derivate le relazioni che legano rotazioni e traslazioni nel contesto della teoria classica dell'elasticità. Qui viene mostrato che le velocità di fase e le curve di dispersione delle onde superficiali possono essere ricavate da misure co-locate di traslazioni e rotazioni.
Nel secondo capitolo vengono presentati gli strumenti e i dati utilizzati, con particolare attenzione a G-Pisa e alla possibilità di registrare sia le onde di Love che quelle di Rayleigh con una sensibilità di alcuni nrad/s/$\sqrt{Hz}$ nella banda di frequenza tra 0.02-1 Hz.
Nel terzo capitolo vengono descritti i metodi di analisi utilizzati e la loro implementazione pratica all'interno del software Matlab.
Il quarto capitolo contiene i risultati ottenuti e commentati. E' diviso in due parti dedicate ai risultati riguardanti le onde di Love e quelle di Rayleigh.
L'ultimo capitolo infine, contiene le conclusioni e i commenti generali.