

M. Soldani ⁽¹⁾, C.S. Regazzoni ⁽²⁾, R. Bozzano ⁽³⁾, O. Faggioni ⁽¹⁾ e M. Musso ⁽²⁾

⁽¹⁾ INGV - Stazione di Geofisica Marina, Fezzano (Portovenere, SP)

⁽²⁾ DIBE - Università degli Studi di Genova, Genova

⁽³⁾ CNR - ISSIA (Sezione di Genova), Genova

MISURE AMBIENTALI IN MARE APERTO: SVILUPPO DI TECNOLOGIE PER L'ACQUISIZIONE E L'ANALISI DI DATI METEO-MAREOGRAFICI MISURATI DA UNA BOA OCEANOGRAFICA IN MAR LIGURE

Riassunto. Obiettivo del presente lavoro è lo sviluppo di un metodo di analisi in grado di stimare i parametri fondamentali del moto ondoso, a partire dai dati acquisiti da tre altimetri acustici installati a bordo di una boa meteo-oceanografica operante in mare aperto. Il metodo di analisi sviluppato compie opportune operazioni di filtraggio sulle sequenze temporali delle misure effettuate dai tre altimetri, quindi, elaborando tali sequenze, fornisce le stime di alcuni parametri caratteristici del moto ondoso (tra cui l'altezza e la direzione di propagazione). I diversi tipi di filtraggio ed il metodo di stima sviluppati si basano sul calcolo di alcuni parametri statistici (tra cui media, mediana e deviazione standard) delle serie temporali di dati acquisiti, sulla conoscenza delle loro densità spettrali di potenza (calcolate mediante FFT), e sul calcolo delle funzioni di crosscorrelazione delle sequenze di dati prese a due a due. Il procedimento di stima realizzato è stato sperimentato su una notevole quantità di dati reali acquisiti in Mar Ligure tramite l'utilizzo della stazione di misura fissa su cui sono montati gli altimetri acustici, ed ha fornito risultati soddisfacenti per quanto riguarda affidabilità e precisione. Nell'ambito della valutazione delle prestazioni del sistema di acquisizione dati e del metodo di stima, i risultati ottenuti sono stati confrontati con misure provenienti da altri sensori a bordo della stazione e con stime analoghe effettuate a partire dai dati acquisiti da un'altra stazione di misura, operante anch'essa in Mar Ligure, ma dotata di strumentazione di altro tipo.

ENVIRONMENTAL MEASUREMENTS IN OPEN SEA: DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES TO ACQUIRE AND ANALYSE METEO-MAREOGRAPHIC DATA MEASURED BY AN OCEANOGRAPHIC BUOY IN THE LIGURIAN SEA

Abstract. The object of this work is the development of an analysis method able to estimate the principal wave parameters by processing data acquired by three acoustic altimeters installed on an offshore meteo-oceanographic buoy. The developed algorithm carries out appropriate filtering operations on the temporal sequences of the measurements acquired from the three altimeters, hence, by analysing these sequences, also provides estimates of some wave parameters (including wave height and direction of propagation). Different types of filters and methods for the estimation have been developed on the basis of some statistical parameters (as mean, median and standard deviation) of acquired time-series, on the knowledge of their spectral power densities (calculated by FFT), and on the calculation of the crosscorrelation functions of coupled sequences. The developed estimation procedure has been tested on a considerable amount of real data acquired in the Ligurian Sea by using a moored large spar buoy on which the acoustic altimeters were installed at 10 m depth. This procedure provided satisfying results in terms of reliability and precision of the estimates. In order to evaluate the performance of the acquisition system and the relate processing algorithms, the obtained results have been also compared with estimates provided by other sensors on board the buoy and with analogous estimations carried out from data acquired by another measurement station (belonging to the *Rete Ondametrica Nazionale*), working in the same area, but equipped with different kind of instrumentation.

INTRODUZIONE

Nel quadro degli studi ambientali sull'erosione e l'insabbiamento costieri e sulla diffusione marina delle sostanze prodotte dall'attività umana nei centri urbani (ed in particolare negli impianti portuali, v. Faggioni et al., 2005), ricopre notevole importanza l'integrazione dei parametri meteo-mareografici costieri con quelli *offshore*. La misura di tali parametri risulta agevole da un punto di vista tecnico-logistico nei comprensori portuali o in acque costiere, mentre diviene assai più complessa in *offshore* profondo. Tale problema può efficacemente essere risolto mediante l'impiego di stazioni di misura permanenti *in situ*, quali le boe o le piattaforme dotate di strumentazione per la misura di parametri meteo-oceanografici, le quali permettono la raccolta continua di lunghe serie temporali di dati, in qualunque condizione meteo-marina (Krogstad et al., 1999a; Krogstad et al., 1999b; Shih e Basileo, 1996).

Il presente lavoro sviluppa un metodo di analisi in grado di stimare i parametri fondamentali del moto ondoso (in particolare l'altezza e la direzione di propagazione) a partire dai dati acquisiti mediante una stazione di misura operante in Mar Ligure, a circa 40 miglia nautiche (1 mn = 1852 m) a Sud di Genova (Fig. 1), la boa meteo-oceanografica ODAS (*Oceanographic Data Acquisition System*) Italia 1, illustrata in Fig. 2 (Soldani, 2004; Bozzano et al., 1998; Siccardi e Montanari, 1997).

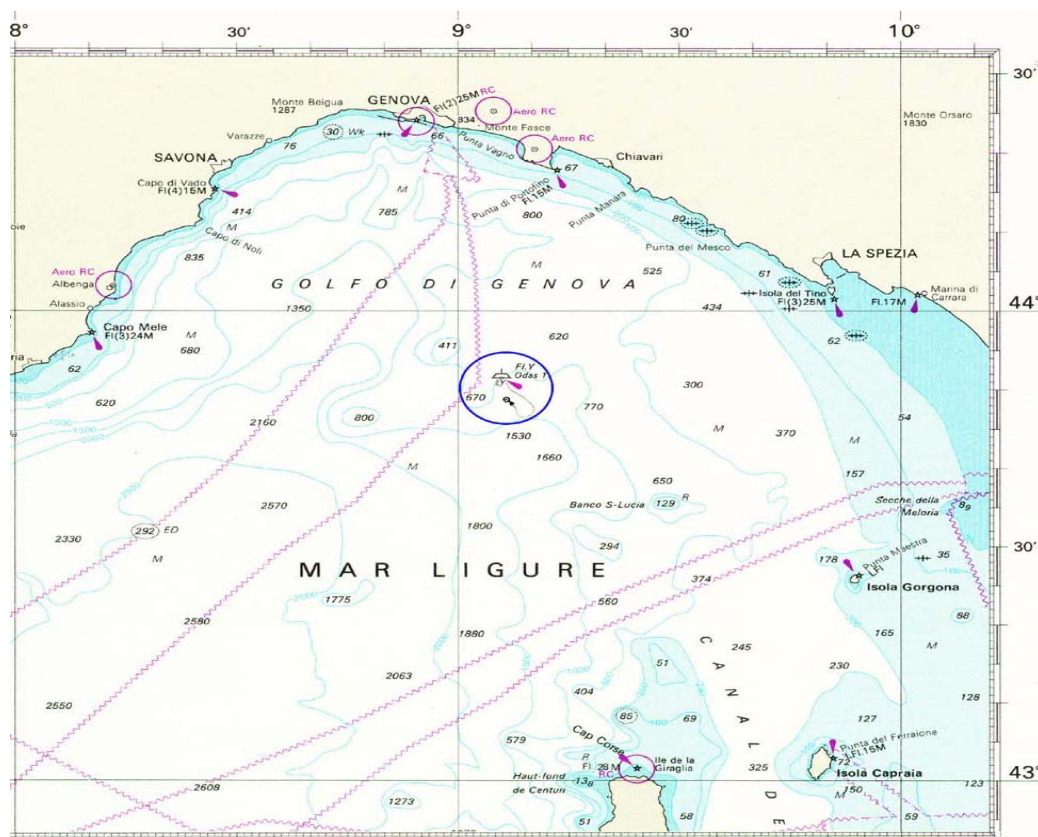


Fig. 1 - L'area di lavoro della boa meteo-oceanografica ODAS Italia 1. Un particolare tipo di ormeggio consente alla boa di muoversi liberamente entro circa 0.7 miglia nautiche intorno al punto di ancoraggio, situato nella posizione $43^{\circ}48'54''N$ $09^{\circ}06'48''E$, su un fondale di circa 1300 m (Siccardi e Montanari, 1997).

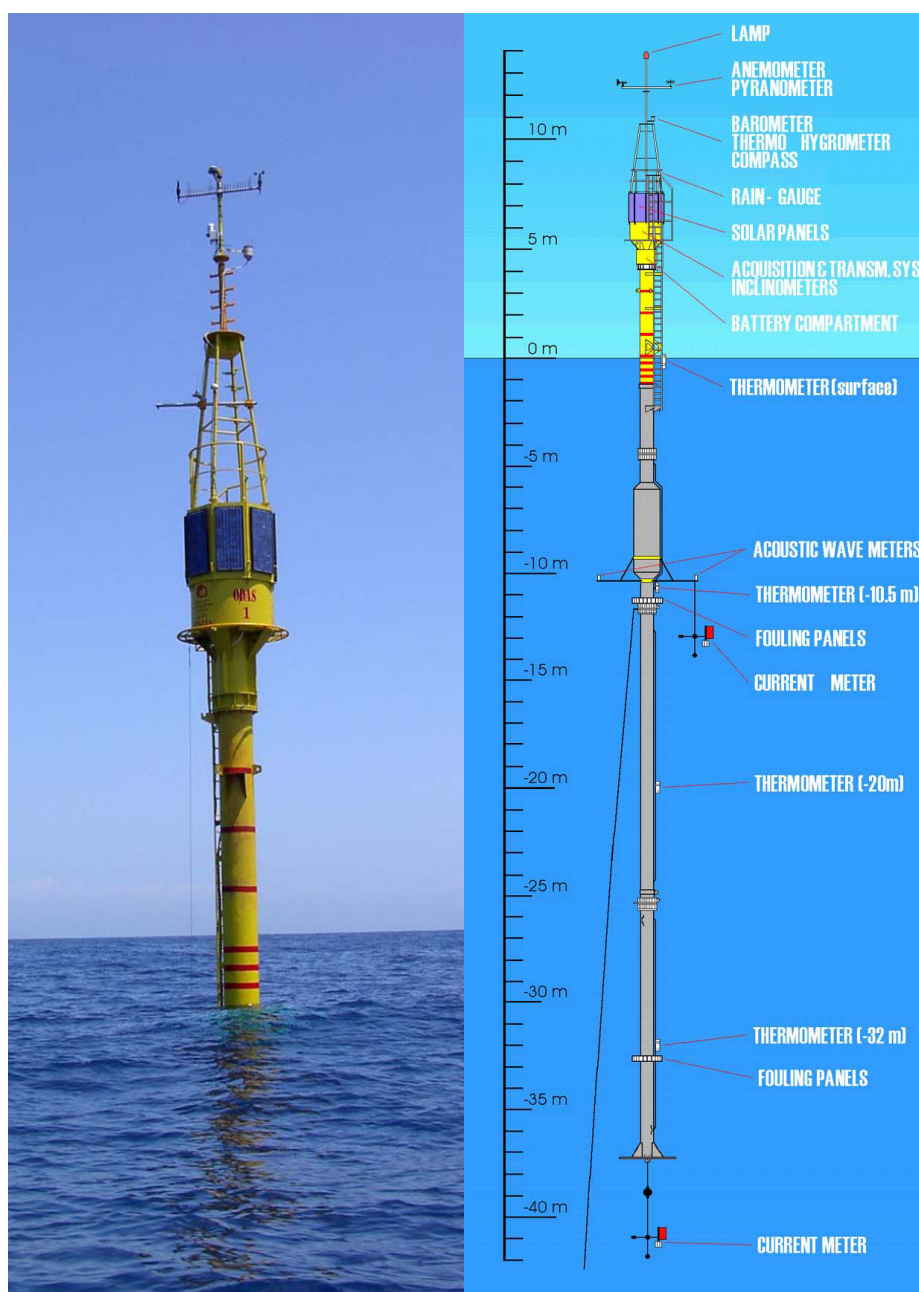


Fig. 2 - La boa ODAS Italia 1 e la sua struttura (Siccardi and Montanari, 1997). Il peso della boa e la spinta di galleggiamento che riceve sono tali da conferire stabilità alla struttura: sotto l'azione del moto ondoso, tipicamente l'inclinazione della boa rispetto alla verticale non supera i 10°.

La boa ODAS Italia 1 è dotata di strumentazione per la misura di una notevole quantità di parametri meteo-marini e di un sistema di telecomunicazione di bordo, per comunicare a terra in tempo reale le misure effettuate.

Il sistema di misura ondometrico operante a bordo della boa ODAS Italia 1 è costituito da una terna di altimetri acustici rivolti verso l'alto, installati a 10 m di profondità su tre bracci lunghi 2.5 m disposti a 120° l'uno dall'altro.

Ad istanti successivi ogni altimetro trasmette un impulso acustico verso la superficie del mare, attende il ritorno dell'eco riflesso dall'interfaccia acqua-aria e, sulla base del tempo trascorso tra la trasmissione del segnale e la ricezione dell'eco, fornisce (con una risoluzione di circa 5 cm) la misura della propria distanza dalla

superficie del mare (Weiergang, 1992; Datasonics, Inc., 1991; Lataitis et al., 1990), come rappresentato in Fig. 3.

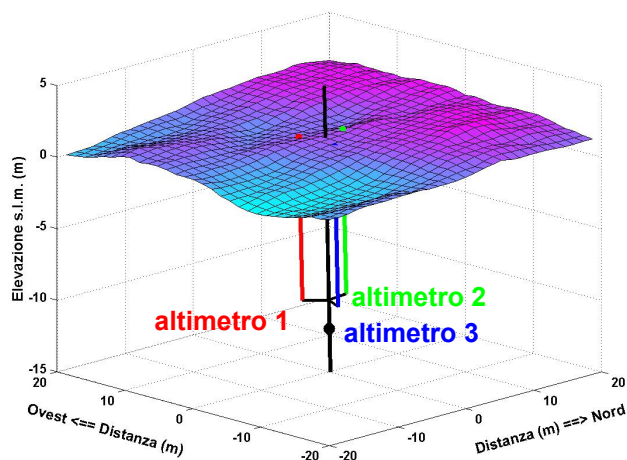


Fig. 3 - Rappresentazione del funzionamento dei sensori ondametrici collocati a bordo della boa ODAS Italia 1 a 10 m di profondità.

A partire dalle misure effettuate dai tre altimetri acustici, i quali acquisiscono ogni ora una sequenza di 300 campioni a 2 Hz (un esempio di acquisizione è riportato in Fig. 4), e tenendo conto delle rotazioni (*roll*, *pitch* e *yaw*) che il corpo boa compie in risposta al moto ondoso (misurate a 2 Hz e con una risoluzione di circa 0.1° da due inclinometri e da una bussola a bordo della boa), il metodo di analisi sviluppato stima alcuni parametri statistici del moto ondoso, i più importanti dei quali sono l'altezza e la direzione di propagazione (Huang e Chen, 1998; Wang e Freise, 1997; Massel, 1996; Steele e Earle, 1991; Earle e Bishop, 1984).

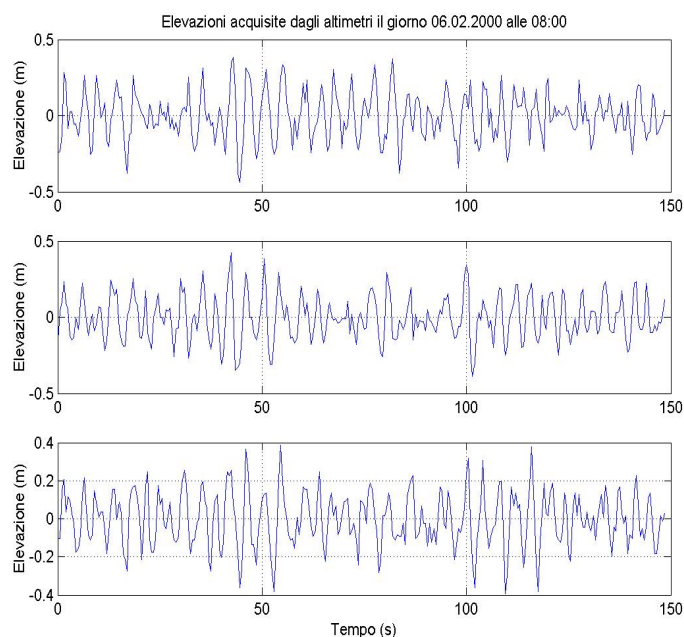


Fig. 4 - Sequenze acquisite dai tre altimetri il giorno 06.02.2000 alle ore 08:00. L'elevazione della superficie del mare è calcolata sottraendo alla distanza misurata da ogni altimetro il valore della profondità a cui sono collocati gli altimetri stessi (10 m).

Aspetti innovativi del lavoro svolto sono l'utilizzo di un *array* di sensori acustici e delle funzioni di crosscorrelazione per la stima dei parametri di interesse, la realizzazione di tecniche di filtraggio *ad hoc* per l'eliminazione di disturbi ambientali e lo sviluppo di un simulatore per la modellizzazione del sistema ondometrico reale e la messa a punto del metodo di analisi.

IL METODO DI ANALISI

Innanzitutto, valutando alcuni parametri statistici (ad es. medie, mediane e deviazioni standard) delle sequenze di dati acquisite dagli altimetri, vengono individuate e scartate le sequenze misurate durante periodi di malfunzionamento degli strumenti. Inoltre, utilizzando anche la conoscenza delle densità spettrali di potenza (calcolate tramite la *Fast Fourier Transform*; Fahy and Pérez, 1993; Harvey and Cerna, 1993) delle successioni di dati misurate dagli altimetri, sono state messe a punto delle tecniche di filtraggio che eliminano dalle misure effettuate sia eventuali errori isolati dovuti a fattori ambientali (ad es. il passaggio di pesci nel campo di misura, Fig. 5), sia il disturbo (che si manifesta con la presenza di un'elevata componente continua) provocato dall'azione di tiro esercitata sulla boa dall'ormeggio.

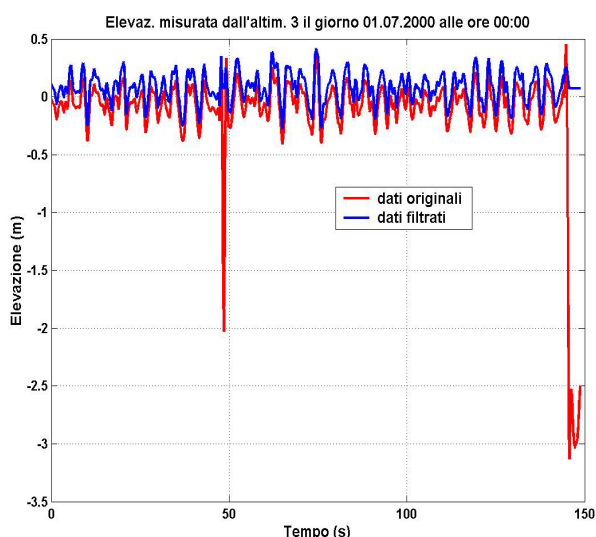


Fig. 5 - Correzione di errori di misura dovuti a fattori ambientali (ad es. il passaggio di pesci nel campo di misura).

Successivamente, a partire dalle statistiche e dalle densità spettrali di potenza $S(\omega)$ delle sequenze misurate dagli altimetri, vengono stimati l'altezza, il periodo e la larghezza spettrale del moto ondoso:

- altezza d'onda significativa: $\bar{H}_{1/3} \approx 4.005 \sigma_\zeta$, oppure $H_{m_0} \approx 4.005 \sqrt{m_0}$, dove σ_ζ è la deviazione standard della sequenza acquisita ed m_r è il momento spettrale di ordine r , definito come $m_r = \int_0^{+\infty} \omega^r S(\omega) d\omega$.
- periodo medio: $\bar{T} = 2\pi \frac{m_0}{m_1}$

- periodo medio di *zero-crossing*: $\bar{T}_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$
- larghezza spettrale: $v^2 = \frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1$

Per quanto riguarda invece la stima della direzione di propagazione del moto ondoso, è stata realizzata una procedura basata essenzialmente sul calcolo delle funzioni di crosscorrelazione delle sequenze acquisite dai tre altimetri prese a due a due (Fig. 6).

Le posizioni dei massimi di tali funzioni forniscono una misura dei ritardi relativi tra gli altimetri; da ciò, nota la geometria del sistema di acquisizione e tenendo conto delle rotazioni che la boa compie su sollecitazione del moto ondoso, si risale alla direzione di propagazione.

È stato verificato che l'intervallo di campionamento di 0.5 sec con cui gli altimetri acquisiscono i dati comporta una risoluzione angolare nella stima della direzione di propagazione dell'ordine di 30°.

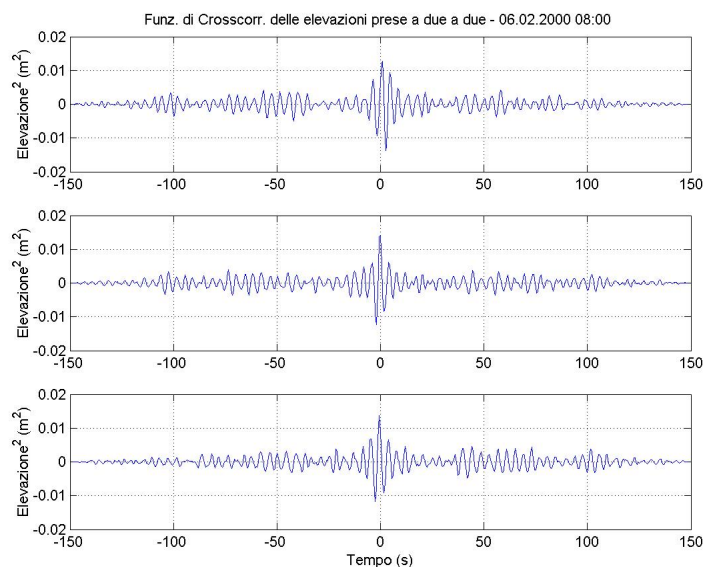


Fig. 6 - Funzioni di crosscorrelazione delle sequenze acquisite dagli altimetri prese a due a due.

Il metodo di stima realizzato è stato inizialmente provato su dati ottenuti mediante simulazioni. A tale scopo è stato realizzato un simulatore che, basandosi su un'opportuna rappresentazione di un moto ondoso noto (Mosetti, 1964) e sulla conoscenza della geometria della boa, delle caratteristiche di funzionamento degli altimetri acustici e delle rotazioni compiute dalla boa stessa in risposta al moto ondoso (Yoshikawa, 1990; Fu et al., 1989), genera delle sequenze di dati simili a quelle realmente misurate dalla strumentazione presente a bordo della boa. Tali dati sono stati utilizzati come *input* del processo di stima, per la messa a punto di quest'ultimo.

RISULTATI

Il procedimento di stima realizzato è stato quindi sperimentato su una notevole quantità di dati reali acquisiti in Mar Ligure tramite l'utilizzo della stazione di misura fissa su cui sono montati gli altimetri acustici, ed ha fornito risultati soddisfacenti per quanto riguarda affidabilità e precisione. A titolo di esempio in Fig. 7 è riportata la stima dell'altezza del moto ondoso per il periodo Febbraio-Dicembre 2000.

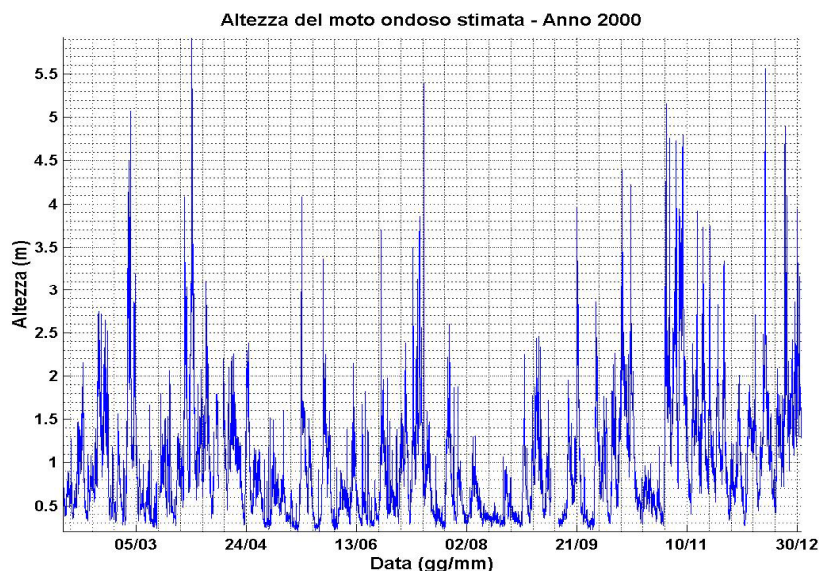


Fig. 7 - Stima dell'altezza del moto ondoso, per quanto riguarda il periodo Febbraio-Dicembre 2000.

Le stime dell'altezza e della direzione di propagazione del moto ondoso ottenute sono state confrontate con l'intensità e la direzione di provenienza del vento, misurate da un anemometro ed una banderuola collocati sulla testa della boa, per valutare le prestazioni del metodo di stima.

In particolare, l'andamento dell'altezza del moto ondoso stimata in funzione dell'intensità del vento misurata dall'anemometro di bordo non si discosta troppo dall'andamento parabolico teorico (Fig. 8).

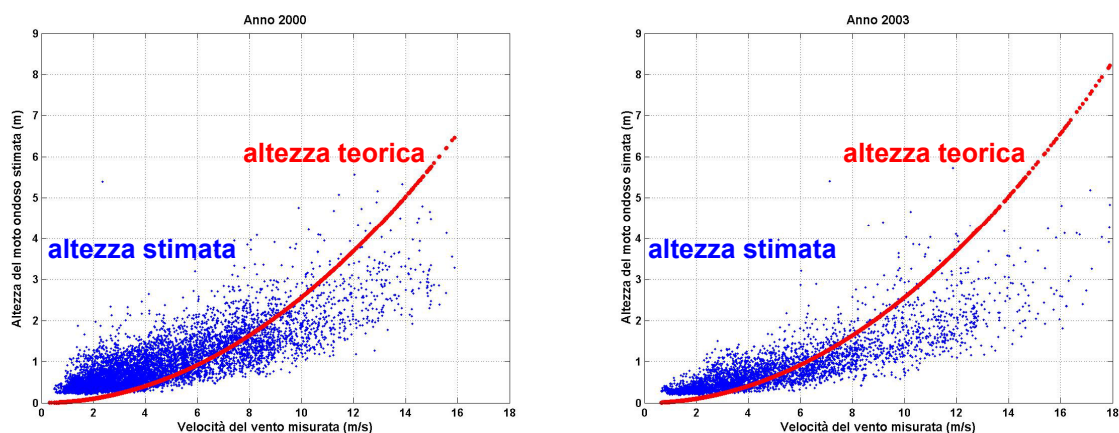


Fig. 8 - Andamento dell'altezza del moto ondoso stimata in funzione dell'intensità del vento misurata dall'anemometro di bordo e confronto con l'andamento parabolico teorico, relativamente agli anni 2000 e 2003.

La distribuzione dell'altezza del moto ondoso stimata approssima invece in maniera soddisfacente la distribuzione teorica *log-normal* di uguali media e varianza (Fig. 9).

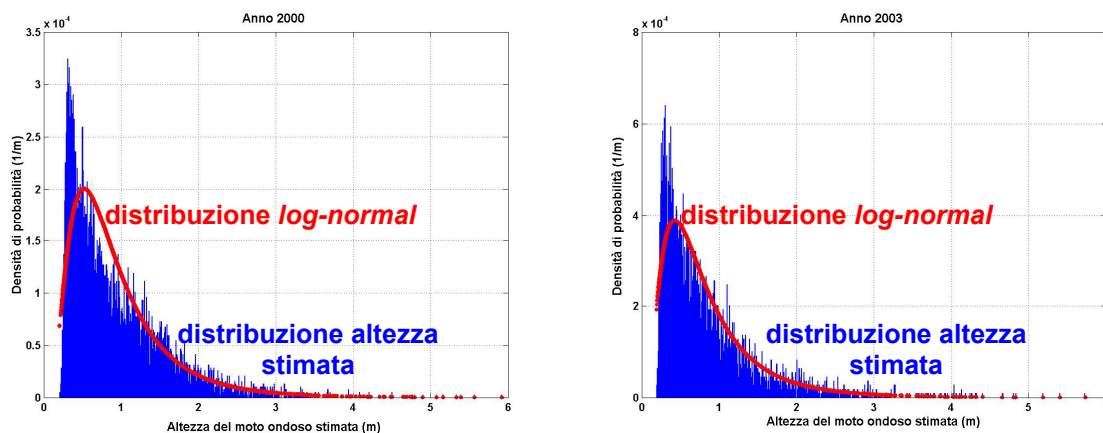


Fig. 9 - Confronto tra la distribuzione dell'altezza del moto ondoso stimata e la distribuzione teorica *log-normal*, relativamente agli anni 2000 e 2003.

Per quanto riguarda invece la direzione di propagazione del moto ondoso stimata, essa si rivela sostanzialmente concorde alla direzione in cui soffia il vento, misurata dalla banderuola di bordo (Fig. 10).

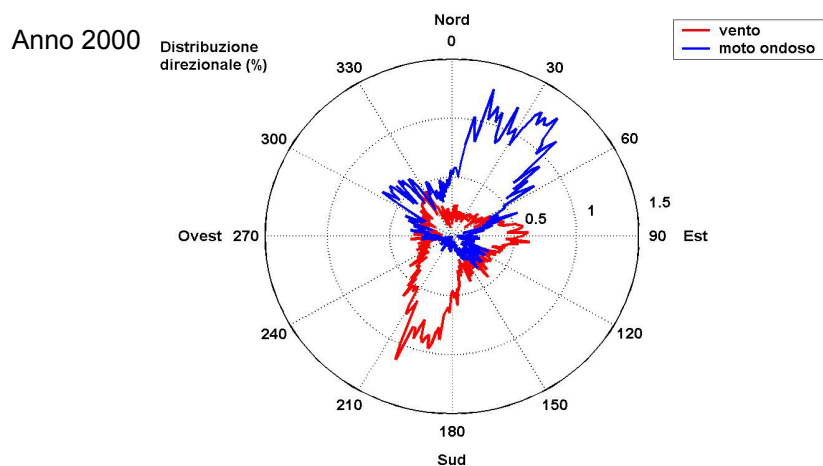


Fig. 10 - Diagramma polare delle distribuzioni della direzione di propagazione del moto ondoso stimata e della direzione di provenienza del vento misurata dalla banderuola di bordo, relativamente all'anno 2000.

Aspetto caratteristico del lavoro svolto è stato il poter disporre di una gran quantità di dati reali, derivanti dalle misure effettuate tramite la strumentazione posta a bordo della boa ODAS Italia 1 (o durante campagne di raccolta dati in mare realizzate con l'ausilio di navi oceanografiche).

Nell'ambito della valutazione delle prestazioni del sistema di acquisizione dati e del metodo di stima, è risultato inoltre utile (per un confronto con i risultati ottenuti) avere a disposizione anche una grande quantità di stime analoghe basate sulle misure effettuate tramite un'altra stazione di misura permanente, una boa ondometrica operante anch'essa in Mar Ligure, al largo della Spezia, ed

appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale (RON, Fig. 11; Corsini et al., 2000; Inghilesi et al., 2000).



Fig. 11 - Mappa della RON. La stazione al largo della Spezia è ormeggiata nella posizione $43^{\circ}.55'.07''\text{N } 09^{\circ}49'.06''\text{E}$. Immagine tratta dal sito <http://www.idromare.com/>.

Il confronto tra i due sistemi di misura ha evidenziato notevoli somiglianze per quanto riguarda le grandezze stimate, come evidenziato in Fig. 12 e in Fig. 13.

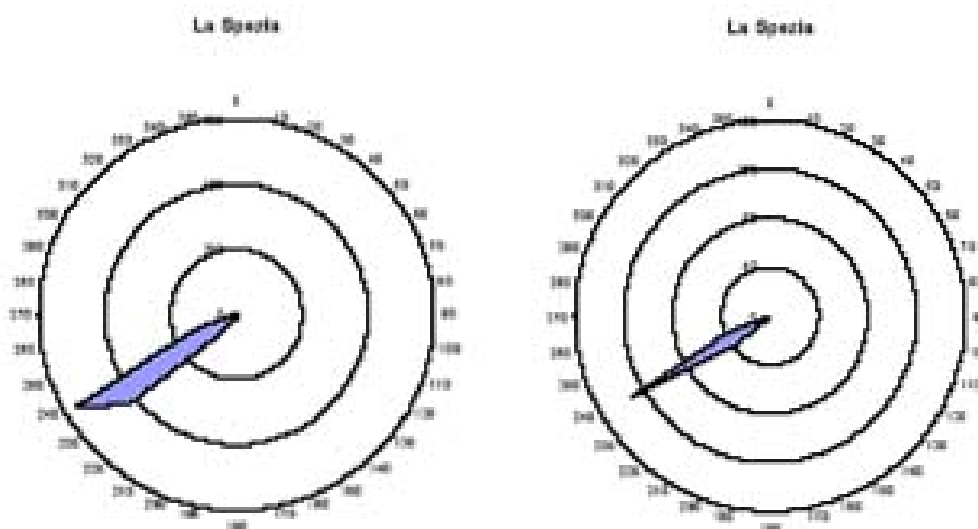


Fig. 12 - Diagrammi polari della distribuzione della direzione di provenienza del moto ondoso stimata a partire dalle misure effettuate dalla boa appartenente alla RON ed operante al largo della Spezia, nel periodo Luglio 1989-Giugno 1999, rispettivamente per moto ondoso moderato ed alto ($2 \text{ m} < H_{m_0} \leq 3.5 \text{ m}$, a sinistra) e per moto ondoso molto alto ($H_{m_0} > 3.5 \text{ m}$, a destra). Immagini tratte da Corsini et al., 2000.

Si può notare una certa somiglianza sia nella direzione di provenienza del moto ondoso, sia nell'andamento temporale dell'altezza, con un anticipo della stima sull'altezza derivante dalle misure della boa ODAS Italia 1 dovuto al fatto che il fronte del moto ondoso (statisticamente diretto in prevalenza all'incirca verso Nord-Est nella zona di interesse) tende ad investire prima la boa ODAS Italia 1 (posizionata in mezzo al Mar Ligure) e poi la boa RON al largo della Spezia (più vicina alla costa). Inoltre le stime derivanti dalla boa ODAS Italia 1 rivelano un'altezza stimata del moto

ondoso mediamente maggiore, in accordo col fatto che tale stazione si trova in acque più profonde (dove il moto ondoso è in media più alto) rispetto alla boa RON.

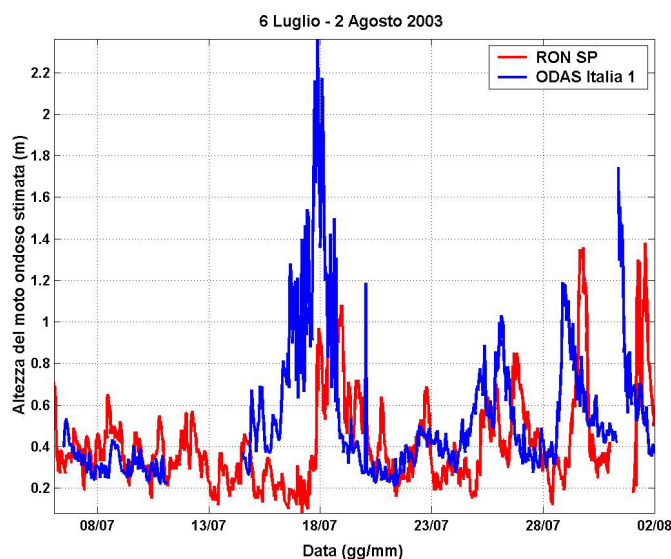


Fig. 13 - Altezza del moto ondoso stimata a partire dalle misure effettuate dalla boa ODAS Italia 1 e confronto con la stessa grandezza derivante dalle misure della boa appartenente alla RON ed ormeggiata al largo della Spezia, per quanto riguarda il periodo 06.07-02.08 2003. Si nota la presenza di periodi durante i quali, a causa di malfunzionamenti degli strumenti, non è stato possibile effettuare le stime desiderate.

CONCLUSIONI

I confronti effettuati con i risultati teorici e con quelli provenienti da altri sensori denotano una soddisfacente affidabilità delle stime effettuate.

Mediante simulazioni sono stati individuati i limiti di validità del metodo di analisi, in funzione dei parametri di *input* del simulatore utilizzato; in particolare, sono stati valutati gli errori commessi sulle stime dell'altezza e della direzione di propagazione del moto ondoso in funzione delle grandezze caratteristiche del vento considerate a 10 m s.l.m. (quota alla quale sono collocati l'anemometro e la banderuola a bordo della boa): dai parametri relativi al vento dipendono infatti sia le grandezze caratteristiche del moto ondoso (l'altezza dipende dall'intensità del vento mentre la direzione di propagazione approssima la direzione in cui soffia il vento), sia le ampiezze delle oscillazioni compiute dalla boa in risposta al moto ondoso stesso.

Per quanto riguarda l'altezza del moto ondoso, si è osservato che per valori dell'intensità del vento compresi tra 2 e 16 m/s (corrispondenti all'incirca ad una lunghezza d'onda del moto ondoso compresa tra 2 e 120 m) l'errore sulla stima dell'altezza si mantiene entro il 12% rispetto al valore teorico (calcolato a partire dall'intensità del vento).

Per ciò che concerne invece la stima della direzione di propagazione, per valori dell'intensità del vento compresi tra 4 e 17 m/s (corrispondenti all'incirca ad una lunghezza d'onda del moto ondoso compresa tra 8 e 160 m) l'errore commesso si mantiene entro i 23°.

Al di sotto dei suddetti valori di intensità del vento, la quasi totale assenza di moto ondoso pregiudica la validità delle stime.

Al di sopra di tali intervalli di valori, a causa dell'occupazione spettrale del moto ondoso (a frequenze molto basse, a causa dell'intensità del vento molto elevata), la lunghezza d'onda del moto ondoso è talmente elevata che i *records* di onde acquisiti dagli altimetri contengono pochi periodi o addirittura frazioni di essi, quindi diminuisce la validità delle stime stesse.

Infine, utilizzando il simulatore realizzato, sono state individuate possibili modifiche da apportare al sistema di acquisizione dati, che consentirebbero di migliorare l'affidabilità e la precisione delle stime effettuate.

In particolare, si è verificato che aumentare la frequenza di campionamento degli altimetri ed il numero di campioni di ogni acquisizione ed allungare i bracci che reggono gli altimetri migliorerebbe la risoluzione angolare e quindi la stima della direzione di propagazione.

Questo procedimento di ricostruzione del moto ondoso è volto a fornire in tempo reale informazione utile per studi ambientali, meteorologici ed oceanografici, e per realizzare un servizio sperimentale di ausilio alla navigazione a disposizione della comunità.

Ringraziamenti. Gli Autori ringraziano il CNR-ISSIA e l'APAT-Servizio Mareografico per aver fornito i dati e le immagini relativi, rispettivamente, alla boa ODAS Italia 1 ed alla RON.

Questo scritto è dedicato alla memoria del Prof. Giorgio Tacconi, che larga parte ha avuto in questo lavoro. Faggioni qui Lo ricorda quale Maestro prima, Collega poi, Amico sempre.

BIBLIOGRAFIA

- Bozzano R., Mantovani R., Siccardi A., Soldani M. e Tacconi G.; 1998: Sea wave direct acoustic measurement from an oceanographic buoy. Proc. of IEEE OCEANS '98, vol. 1, 184-188.
- Corsini S., Guiducci F. e Inghilesi R.; 2000: Statistical extreme wave analysis of the Italian Sea Wave measurement Network data in the period 1989-1999. Proc. of the 10th International Offshore and polar Engineering Conference, 1-7.
- Datasonics, Inc.; 1991: Model PSA-900 Programmable Sonar Altimeter Reference Manual. Datasonics, Inc., Cataumet, MA, USA, 29 pp.
- Earle M.D. e Bishop J.M.; 1984: A practical guide to ocean wave measurement and analysis. Endeco Inc., Marion, MA, USA, 78 pp.
- Faggioni O., Arena G., Bencivenga M., Bianco G., Bozzano R., Canepa G., Lusiani P., Nardone G., Piangiamore G.L., Soldani M., Surace L. e Venzano G.; 2005: The newtonian approach in the meteorological tide waves forecasting: preliminary observations in the East Ligurian harbours. Annals of Geophysics, In Press.
- Fahy K. e Pérez E.; 1993: Fast Fourier Transforms and Power Spectra in LabVIEW®. National Instruments Corporation, Application Note 040, 18 pp.
- Fu King-Sun, Gonzalez R.C. e Lee C.S.G.; 1989: Robotica. McGraw-Hill Libri Italia srl, Milano, Italia, 711 pp.
- Harvey A.F. e Cerna M.; 1993: The fundamentals of FFT-based signal analysis and measurement in LabVIEW and LabWindows. National Instruments Corporation, Application Note 041, 20 pp.
- Huang M.-C. e Chen J.-Y.; 1998: Wave direction analysis from data buoys. Ocean Engineering, vol. 25 (8), 621-637.
- Inghilesi R., Corsini S., Guiducci F. e Arseni A.; 2000: Extreme waves on the Italian Coasts in the period 1989-1999. Bollettino Nazionale di Geofisica, vol.41, 1-19.
- Krogstad H.E., Barstow S.F., Aasen S.E. e Rodriguez I.; 1999: Some recent developments in wave buoy measurement technology. Coastal Engineering, vol. 37, 309-329.
- Krogstad H.E., Wolf J., Thompson S.P. e Wyatt L.R.; 1999: Methods for intercomparison of wave measurements. Coastal Engineering, vol. 37, 235-257.
- Lataitis R.J., Crawford G.B. e Clifford S.F.; 1990: A simple low-frequency acoustic technique for remote measurement of the temporal ocean wave spectrum. Journal of Acoustical Society of America, vol. 87 (1), 111-118.

- Massel S.R.; 1996: Ocean surface waves: their physics and prediction. World Scientific, Singapore, 491 pp.
- Mosetti F.; 1964: Oceanografia. Del Bianco Editore, Udine, 462 pp.
- Shih H.H. e Basileo M.A.; 1996: Extraction of wave information from NOAA's water level measurement network. Proc. of IEEE OCEANS '96, CD-ROM proceedings.
- Siccardi A. e Montanari V.; 1997: ODAS Italia 1 - Laboratorio marino d'altura in Mar Ligure - Il progetto ed il gruppo di ricerca. CNR Istituto per l'Automazione Navale, Genova, 40 pp.
- Soldani M.; 2004: Sviluppo di metodologie per l'analisi statistica di dati ondametrici misurati da trasduttori acustici su una boa meteo-oceanografica in mare aperto. Università degli Studi di Genova, Tesi di Laurea, 147 pp.
- Steele K.E. e Earle M.D.; 1991: Directional ocean wave spectra using buoy azimuth, pitch and roll derived from magnetic field components. IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 16 (4), 427-433.
- Wang H.T. e Freise C.B.; 1997: Error analysis of the directional wave spectra obtained by the NDBC 3-m pitch-roll discus buoy. IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 22 (4), 639-648.
- Weiergang J.; 1992: Wave measurements by single beam acoustic profiling. Proc. of European Conference on Underwater Acoustics, 157-160.
- Yoshikawa T.; 1990: Foundations of robotics: analysis and control. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 285 pp.