

**Università di Trieste
Istituto di Geodesia e
Geofisica
Sezione di Oceanografia e
Meteorologia**

**Rapporto Interno
N. 94/7**

Franco Stravisi

Taratura di un ecodistanziometro

Micros SLU1

Trieste, 1994

INDICE

	pag.
1. IL SENSORE AD ULTRASUONI	3
Misura della distanza con impulsi sonori	3
Caratteristiche del sensore	3
Modalità operative del sensore	4
Acquisizione delle misure di distanza	4
2. PROVE DI LABORATORIO	5
Misure in aria libera ed in guida d'onda	5
Relazione tra misure dirette e tramite M93	5
Programma di acquisizione dei dati con M93	6
Dipendenza delle misure di distanza dalla programmazione del sensore	6
Dipendenza delle misure di distanza dalla temperatura dell'aria	7
Dipendenza delle misure di distanza dall'umidità	8
Taratura dell'ecodistanziometro	9
Taratura della sonda di temperatura	10
Conclusioni	10
RIFERIMENTI	10

Taratura di un ecodistanziometro Micros SLU1

Franco Stravisi

Università di Trieste, Istituto di Geodesia e Geofisica

1. IL SENSORE AD ULTRASUONI

Misura della distanza con impulsi sonori. La distanza d_0 tra un emettitore di impulsi sonori ed una superficie riflettente è proporzionale alla velocità v del suono nell'aria ed al tempo t intercorso tra l'emissione e la ricezione dell'impulso:

$$d_0 = v t / 2 . \quad (1)$$

In generale la velocità del suono dipende dalla frequenza e dallo stato dell'atmosfera, ed è indipendente dalla pressione; a frequenza costante è perciò esprimibile con una funzione della temperatura dell'aria θ e dell'umidità relativa u :

$$v = v(\theta, u) = A(\theta, u) v_0 , \quad (2)$$

dove v_0 è la velocità del suono a 0 °C in aria secca. In particolare

$$d_0 = v_0 t_0 / 2 = A^{-1} v t_0 / 2 = A^{-1} d , \quad (3)$$

dove

$$d = d(\theta, u) = v t_0 / 2 \quad (4)$$

è la misura della distanza in funzione delle condizioni termoigrometriche dell'aria.

Caratteristiche del sensore. Il sensore di livello Micros SLU1 è dotato (a) di un trasduttore elettrostatico che emette in rapida successione n impulsi sonori della durata di 0.1 s ciascuno (un impulso è inviato solo dopo la ricezione dell'eco precedente) ad intervalli di tempo Δt , (b) di un sensore di temperatura per la correzione della velocità del suono, (c) di un'interfaccia a microprocessore ad 8 bit e (d) di un'uscita 4-20 mA. L'acquisizione dei dati è normalmente ottenuta con un data logger Micros M93 e con una scheda di conversione analogico/digitale M10AI.

Il sensore dispone inoltre di un'uscita seriale RS-232 per l'interfacciamento ad un PC. Il programma Micros ULTRAS.BAS permette di modificare la memoria E²PROM del sensore inserendovi il numero di echi n , il tempo di scansione Δt , ed altri parametri relativi alle modalità di esecuzione delle misure (Micros, 1993). Con lo stesso programma è inoltre possibile visualizzare sul PC le misure di distanza (corrette per la temperatura dell'aria) e di temperatura (in unità convenzionali ad uso del microprocessore interno).

Il fascio sonoro ha un angolo di apertura regolato a circa 12°, equivalente ad una sezione circolare di circa 30 cm di raggio a 3 m di distanza; può essere variato

sino ad un minimo di circa 3° agendo su di un trimmer multigiri accessibile dall'esterno della custodia del sensore. Il campo di misura del modello da noi usato è compreso tra 0.4 e 10 m. La risoluzione è di 1 mm.

Modalità operative del sensore. Il sensore SLU1 è concepito per la misura di distanze in verticale, in aria libera, da una superficie riflettente (lago, fiume); in tal modo il sensore di temperatura si trova all'interno di un "camino" verticale, riparato dalla radiazione solare diretta, e fornisce con buona approssimazione la temperatura dell'aria.

Con la programmazione iniziale del sensore (programma ULTRAS e interfaccia seriale) si stabiliscono:

- il tempo di scansione in secondi Δt ,
- l'eventuale eco di riferimento e la relativa distanza,
- il numero di echi da misurare (default :1),
- il numero n di campionamenti per una misura,
- il numero n_m di campionamenti da mediare,
- l'inizio D_a ed il fondo scala D_b ,
- la temperatura del momento θ .

Una misura di distanza d_s eseguita dal sensore è quindi la media aritmetica di n_m campionamenti ottenuti da un totale di n tralasciando un numero pari $n - n_m$ di valori estremi.

In base a θ il microprocessore calcola e memorizza un coefficiente di temperatura c_θ in base al quale effettua una correzione lineare della misura (4):

$$d_s = d(1 - a\theta) , \quad a = 100 / c_\theta . \quad (5)$$

Tipicamente $c_\theta \cong 56,000$ e $a \cong 0.0018$.

Acquisizione delle misure di distanza. L'uscita in corrente (i_a, i_b) = (4, 20 mA) del sensore SLU1 è collegata ad una resistenza r ; la tensione (x_a, x_b) = $r(i_a, i_b)$ ai capi della resistenza, in ingresso alla scheda di conversione analogico/digitale M10AI, è proporzionale alla distanza misurata nell'intervallo (D_a, D_b). La formula di conversione da inserire nella mappa del sistema di acquisizione M93 (Micros, 1994) per ottenere la distanza in funzione della tensione x è la seguente:

$$d_M = (D_b - D_a) (x/r - i_a)/(i_b - i_a) ; \quad (6)$$

se $D_a = 0$, $D_b = 10$ m, $r = r_t = 100 \Omega$ si ha:

$$d_M / m = 6.25 (10^{-6} x / \mu V - 0.4) . \quad (7)$$

Uno scostamento di r dal valore nominale r_t , piccoli scostamenti dai limiti di corrente, imprecisioni nell'amplificazione dei circuiti comportano una relazione lineare tra x e d_M diversa dalla (7). In generale le misure di distanza effettuate direttamente con il sensore (RS-232, ULTRAS) e tramite la M93 saranno legate da una funzione lineare

$$d_s = a_1 d_M + a_0 . \quad (8)$$

2. PROVE DI LABORATORIO

Le prove descritte in questo paragrafo sono state eseguite presso il laboratorio della Sezione di Oceanografia e Meteorologia dell'Istituto di Geodesia e Geofisica dell'Università di Trieste. Gli strumenti Micros usati sono:

- data logger M93, M10AI, CBM1,
sensore di livello SLU1 n. 439, due termometri Pt 100 STA;
- data logger UCS/USC16, CBM, SIP4, SA4I, SD2, SEV,
sensori meteorologici.

I termometri ad uso marino sono stati impiegati per misurare la temperatura dell'aria all'interno del laboratorio nella zona attraversata dal fascio sonoro; i sensori normalmente impiegati nella stazione meteorologica del laboratorio hanno fornito, oltre alla pressione atmosferica, la temperatura e l'umidità relativa usate per le correlazioni con le misure di distanza eseguite all'esterno.

Misure in aria libera ed in guida d'onda. L'impiego previsto per il sensore SLU1 è la misura continua del livello del mare. Misure in aria libera richiederebbero, al di sotto dello strumento, un cono di 4 m di altezza con una base di circa 1 m di diametro. Anche filtrando numericamente le variazioni di livello ad alta frequenza dovute al moto ondoso, la possibile presenza di ostacoli galleggianti e la non orizzontalità della superficie riflettente renderebbe incerta una parte delle misure. L'uso di un tubo verticale come guida d'onda per il fascio sonoro risolverebbe i problemi suddetti.

Sono state fatte pertanto delle prove in laboratorio, usando tubi di diametri diversi e variando l'angolo di apertura del fascio sonoro emesso dal sensore Micros. Il funzionamento del SLU1 è assicurato anche con tubi di piccolo diametro (6 cm) e con il sensore montato fuori asse. Si è infine optato per un'angolo di apertura di circa 3° e per un tubo in PVC con diametro interno di 12 cm. L'uso di due tubi ad incastro di 3 m permette di realizzare un'ottima guida d'onda sino a 6 m di lunghezza. La misura della distanza da una parete riflettente non varia sensibilmente con o senza guida d'onda.

Si è pertanto proceduto con l'esecuzione in laboratorio, in condizioni controllate, di una serie di prove atte a stabilire la dipendenza delle misure di distanza dalle modalità di lettura e di programmazione del sensore e dalle condizioni dell'aria (temperatura, umidità, pressione). Infine si è proceduto alla calibrazione delle misure in guida d'onda in un intervallo di distanza tra 1 e 6 m.

Relazione tra misure dirette e tramite M93. Abbiamo determinato la relazione (8) calcolando la retta di regressione su di una serie di misure eseguite in laboratorio (tubo in PVC, diametro 12 cm) a distanze comprese tra 1 e 6 m:

$$d_s = 1.00395 d_M + 1.39 \pm 0.07 \text{ cm} ; \quad (9)$$

è indicato l'errore probabile. La (9) è consistente con una resistenza $r = 100/a_1 = 99.61 \Omega$. Probabilmente il valore di r è stato aggiustato, in fabbrica, a 100Ω compresi i cavi di connessione al multimetro. Si è preferito non cambiare il

valore di r ed usare nella mappa la formula di calibrazione standard (7), comprendendo ogni trasformazione lineare nella formula finale di calibrazione.

Programma di acquisizione dei dati con M93. Il segnale del SLU1 è campionato dal canale n. 1 di una scheda Micros M10AI. Il valore medio è quello calcolato dalla scheda stessa. Le medie vengono scritte sulla memoria Micros CBM1 ad intervalli di 1 o 10 minuti. Oltre ai valori medi della distanza sono stati memorizzati all'occorrenza anche i valori medi di due sensori di temperatura Pt100 tipo STA, calibrati in precedenza, aventi un errore inferiore a 0.03 °C. La scheda M10AI calcola le medie eseguendo 2 campionamenti al secondo; naturalmente, nel caso del sensore SLU1, viene campionata più volte la stessa misura fino a che il sensore stesso non provvede ad aggiornarla.

Le misure medie di distanza registrate in tal modo sono indicate con d_M ; la formula di conversione inserita nella mappa del sistema è la (7).

Dipendenza delle misure di distanza dalla programmazione del sensore. Sono state fatte delle prove preliminari per constatare la variabilità delle misure di distanza d_M , eseguite a distanza fissa, con le modalità di programmazione del sensore. I dati d_M sono medie su 1 min; la distanza, in tubo di 12 cm, è di 311.1 cm. I risultati sono rappresentati nella Fig. 1.

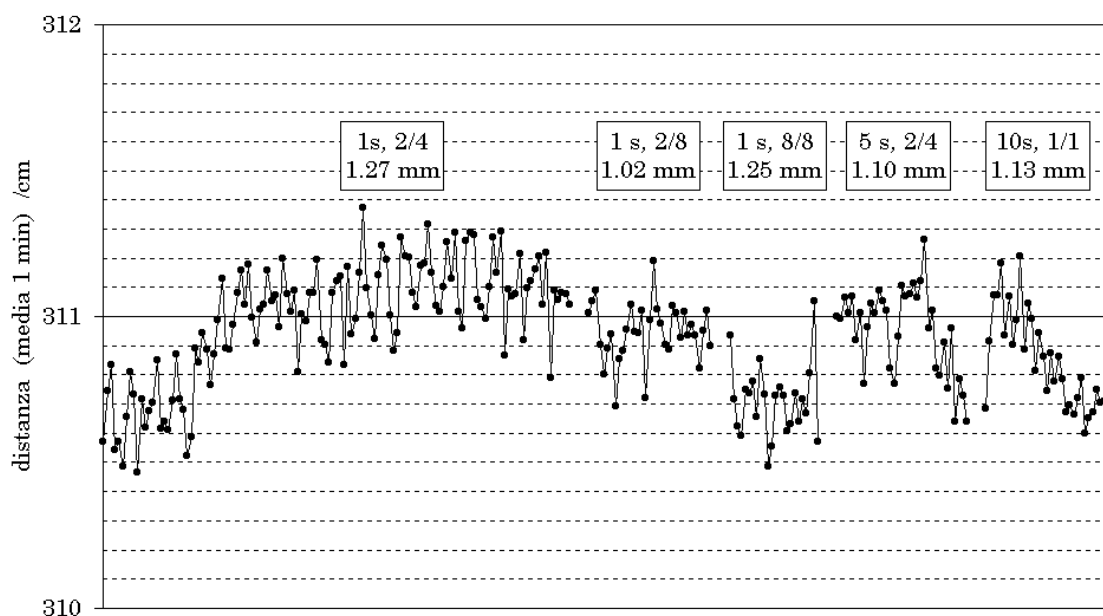


Fig. 1 - Prove di misura con diversi Δt , n_m , n . Differenze assolute medie in millimetri tra due misure successive.

Sono stati programmati tempi di intervento da 1 a 10 s, numero n di impulsi da 1 a 8, numero di impulsi mediati n_m da 1 a 8; sono indicati nella figura da n_m/n , assieme alla media dei valori assoluti delle differenze tra due misure successive.

E' stata scelta per le successive operazioni la combinazione 5 s, 2/4 poichè offre un "rumore" basso (1.10 mm, pari a $3.5 \times 10^{-4} d$) ed un tempo di intervento ragionevole.

Dipendenza delle misure di distanza dalla temperatura dell'aria. Il sensore SLU1 è stato posizionato sul tavolo del laboratorio, con il fascio emesso verticalmente verso l'alto e riflessione dal soffitto della stanza alla distanza di 267.7 cm. I dati d_M sono medie su 10 min. La temperatura dell'aria θ considerata è la media dei valori misurati dai due sensori STA posti rispettivamente a 70 e 170 cm sopra il sensore (al di fuori del fascio sonoro); anche i dati di temperatura sono medie su 10 min. Sono stati registrati 6726 dati tra il 15/7 ed il 31/8/94.

La regressione di d_M su θ mostra una residua dipendenza dalla temperatura (Fig. 2):

$$d_M = 267.95 (1 - 0.00030 \theta) \pm 0.14 \text{ cm} ; \quad (10)$$

il coefficiente angolare equivale ad una diminuzione di 1 % della misura di distanza per un aumento della temperatura di 30 °C. Questo dipende dal fatto che il SLU1 usa l'approssimazione lineare (5) al posto della formula teorica che descrive la variazione della velocità del suono con la temperatura. In base alla (3), possiamo scrivere:

$$d_0 = A^{-1} d = C(\theta) F(u) d . \quad (11)$$

Secondo la teoria:

$$C(\theta) = (1 + \theta/\alpha)^{-1/2} , \quad \alpha = 273.15 \text{ °C} , \quad (12)$$

mentre la misura di distanza, non compensata per la temperatura, si ricava dalla (5):

$$d = d_M / (1 - a\theta) ; \quad (13)$$

il coefficiente usato dal sensore è $a \cong \frac{1}{2}\alpha^{-1}$. Dai dati si ricava infatti che:

$$C d_M = 267.77 (1 - 0.00183 \theta) \pm 0.13 \text{ cm} , \quad (14)$$

per cui $a = 0.00183$. Definendo

$$C_M = 1 - 0.00183 \theta \quad (15)$$

abbiamo:

$$d_{M0} = F(u) d_{M\theta} , \quad (16)$$

$$d_{M\theta} = d_M C(\theta)/C_M . \quad (17)$$

La (17) fornisce la misura compensata per la sola temperatura dell'aria in funzione delle misure ottenute con il data logger Micros; la (16) fornisce la misura compensata anche per l'umidità. La funzione F deve essere ancora determinata.

Le misure d_M ed i corrispondenti valori $d_{M\theta}$ calcolati con la (17) sono rappresentati in funzione di θ nella Fig. 2.

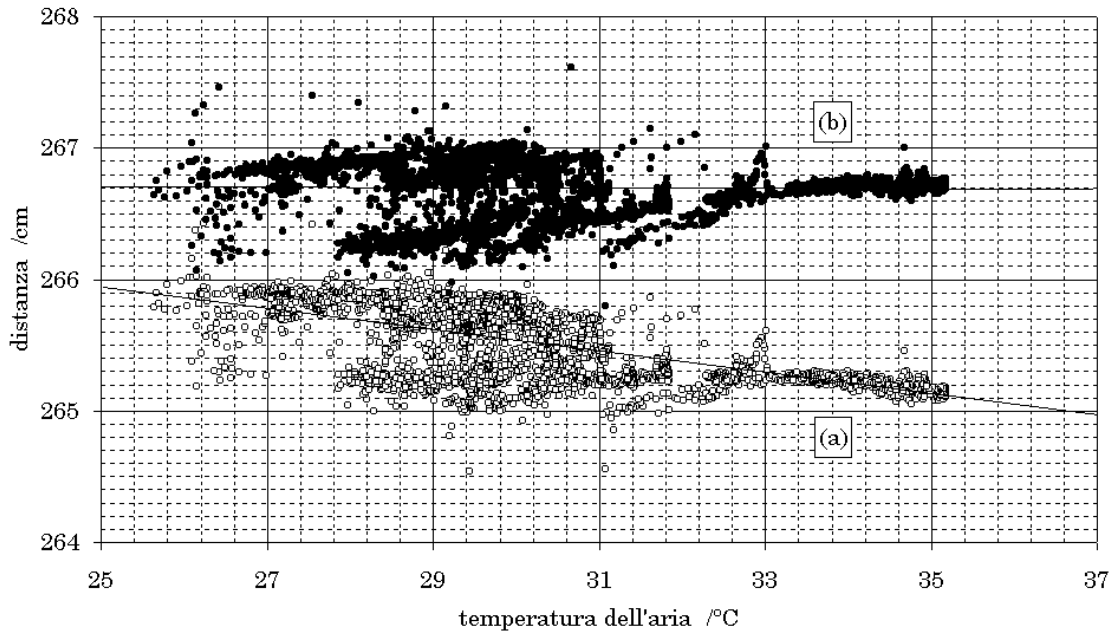


Fig. 2 - Distanze d_M (a) e $d_{M\theta}$ (b) in funzione della temperatura θ dell'aria.

Dipendenza delle misure di distanza dall'umidità. Il sensore SLU1 è stato montato sulla ringhiera della terrazza del laboratorio, al di fuori della terrazza stessa per evitare moti convettivi, in posizione orizzontale con un riflettore alla distanza di 234.1 cm. Il sensore è stato riparato dalla radiazione solare con un tettuccio a due pareti spioventi di colore bianco, in modo che il termometro interno potesse campionare in maniera accurata la temperatura dell'aria; in mancanza di questa protezione si sono riscontrate infatti notevoli variazioni nelle misure durante le ore di sole. Forti errori si hanno inoltre in caso di pioggia o di vento superiore ai 10 m/s.

Sono stati registrati i dati d_M medi su intervalli di 10 min. I corrispondenti dati di temperatura e di umidità sono stati ricavati dai sensori meteorologici Micros posti vicino al SLU1; i dati di pressione dal barometro Micros, posto nel laboratorio, sono stati ridotti alla stessa quota.

E' stato calcolato il coefficiente di correlazione con diversi parametri: pressione atmosferica, tensione di vapore, umidità specifica, umidità assoluta ed umidità relativa. Quest'ultima è risultata la più significativa per la descrizione delle variazioni di $d_{M\theta}$ (17). In base a 1224 dati (medi su 10 min) si è ricavato che:

$$F(U) = 1 + 0.000031 U , \quad (18)$$

dove $U = 100 u$ è l'umidità relativa percentuale. Dalle (16, 17, 18) si ha dunque:

$$d_{M_0} = d_M (1 - 0.00183 \theta)^{-1} (1 + \theta/273.15)^{-1/2} (1 + 0.000031 U) \quad (19)$$

che esprime la distanza corretta in funzione della misura Micros, della temperatura dell'aria in gradi Celsius e dell'umidità relativa percentuale. L'errore

residuo è di 0.23 cm, pari a $6.7 \times 10^{-4} d_{M0}$, circa il doppio del rumore caratteristico del sensore.

La (19) comporta una correzione sistematica delle misure Micros inferiore ad 1 cm/m (Tab. 1); la precisione complessiva è di ± 1 mm/m.

$\theta/^\circ\text{C}$	$C(\theta)/C_M$	U	$F(U)$
-10	1.0005	0 %	1
0	1	20 %	1.0006
10	1.0005	40 %	1.0012
20	1.0020	60 %	1.0019
30	1.0044	80 %	1.0025
40	1.0077	100 %	1.0031

Tab. 1 - Coefficienti di correzione delle misure di distanza Micros in funzione della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa.

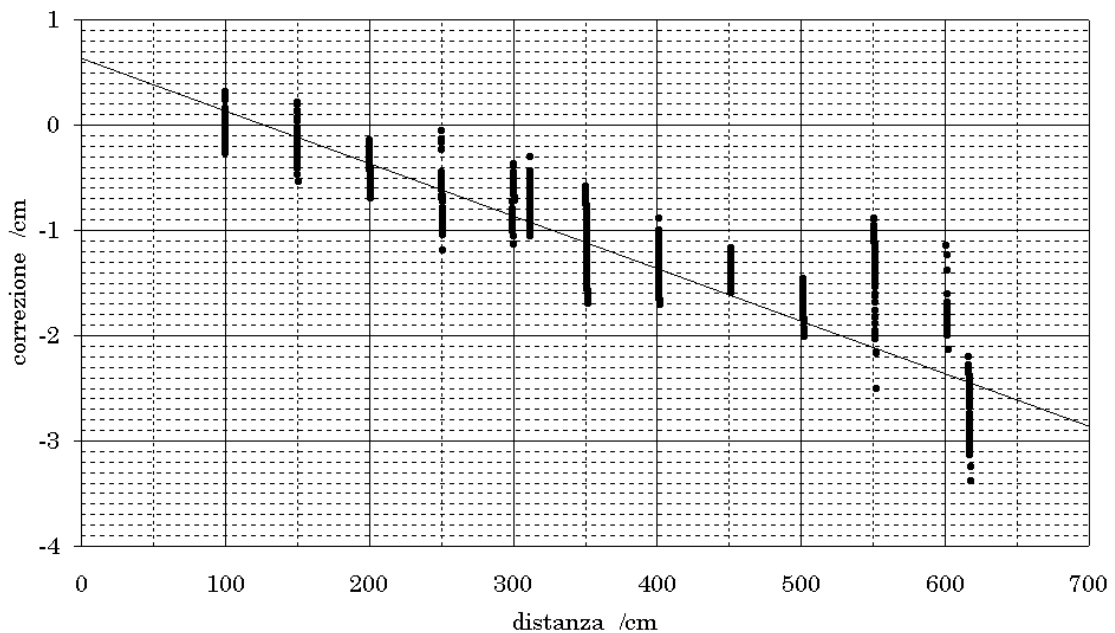


Fig. 3 - Correzione da applicare alla distanza misurata d_{M0} .

Taratura dell'ecodistanziometro. Le misure di distanza d_{M0} (19), ovvero le misure ottenute dal data logger Micros corrette per la temperatura dell'aria e per l'umidità relativa, sono state confrontate con le distanze reali. La prova è stata fatta in laboratorio con il sensore SLU1 montato ad un'estremità del tubo in PVC di 12 cm di diametro; un pistone mobile all'interno del tubo permetteva di variare la lunghezza da misurare. Le distanze effettive sono state misurate a partire dal circolo che rappresenta la giunzione tra la custodia metallica e la base conica del SLU1 con un metro flessibile di precisione. La temperatura dell'aria è stata misurata con le due sonde STA, attaccate esternamente al tubo in prossimità del sensore e della parete riflettente; l'umidità relativa, lentamente variabile

all'interno della stanza, è stata misurata con uno psicrometro. La distanza del riflettore è stata variata da 1 a 6 m con spostamenti di 50 cm.

Sono stati considerati 4123 dati (medie su 1 min) di distanza d_M con le corrispondenti temperature medie (acquisiti con la M93) ed umidità. Le correzioni $d_0 - d_{M0}$ in funzione di d_{M0} (19) sono rappresentate nella Fig. 3. La regressione lineare, calcolata con 3904 dati tra 1 e 5 m, è la seguente:

$$d_0 = 0.99499 d_{M0} + 0.63 \pm 0.11 \text{ cm} . \quad (20)$$

Le (19, 20) permettono quindi di calcolare la distanza reale in funzione della misura Micros, con un errore probabile di linearità di ± 1 mm.

Taratura della sonda di temperatura. Il sensore di temperatura del SLU1 è stato tarato per confronto con un termometro a resistenza NTC (accuratezza 0.02 °C). Il confronto è stato effettuato in aria, con i due sensori a stretto contatto, a temperature comprese tra 10 e 35 °C. La temperatura dell'aria in funzione della misura s fornita dal programma ULTRAS è data da:

$$\theta = 73.38 \log s - 413.18 \pm 0.2 \text{ °C} . \quad (21)$$

Il coefficiente di temperatura inserito nella memoria del sensore è 55569.

Conclusioni. Le distanze (d_0 ; 19, 20) misurate con il sensore Micros SLU1 (tempo di intervento 5 s, media di 2 dati su 4) ed il data logger M93, mediate su intervalli di almeno 1 min (in totale: media di circa 24 misure su 48 effettuate), compensate per la temperatura dell'aria, per l'umidità relativa e per l'errore lineare di scala hanno un'accuratezza di ± 3 mm nell'intervallo da 1 a 6 m.

Le misure d_s , s effettuate direttamente con il SLU1 tramite la porta seriale (programma Micros ULTRAS) forniscono la distanza corretta tramite le (9, 19, 20) e la temperatura dell'aria (21).

Per quanto riguarda la precisione questo strumento, impiegato con una guida d'onda di 12 cm di diametro, è quindi adatto all'uso mareografico.

RIFERIMENTI

- MICROS (1993): *Sensore ultrasuoni SLU1*, manuale *manslu1* ver. 1.0/19-10-93, 5 pag.
 MICROS (1994): *Sistemi di acquisizione dati - Meteorologia - Telecontrolli*, manuale PM5 ver. 22-2-94, 124 pag.