

RILIEVO DI COMPONENTI INFRASONORE NELL'ATMOSFERA

R.U.Pisani (*) — G.E.Perona (**)

(*) Istituto Elettrotecnico Nazionale "Galileo Ferraris" Torino

(**) Istituto di Elettronica - Politecnico di Torino

Rilievi degli infrasuoni naturali nell'atmosfera sono stati eseguiti da molti autori. I sensori (microbarometri assoluti o differenziali) sono connessi ad un filtro spaziale, allo scopo di ridurre il livello di rumore generato dalla turbolenza del vento. Nel lavoro viene presentata una breve rassegna di tali tecniche. Per progettare correttamente i filtri spaziali (Daniel's pipes) è necessario conoscere la turbolenza al livello del suolo. Per tale ragione, sono state effettuate alcune misure adoperando due microfoni per infrasuoni a differenti distanze, ed è stata calcolata la funzione di coerenza in varie situazioni.

Allo scopo di illustrare il significato fisico dei rilevamenti, e cioè la loro attitudine a rivelare fluttuazioni di pressione dovute al vento, è stato inoltre eseguito un confronto con i dati ottenuti mediante un anemometro a filo caldo.

1. — Introduzione

Le componenti infrasonore, con frequenze inferiori ad 1 Hz, possono essere originate da vari fenomeni naturali (temporali, venti incidenti sulle montagne, aurore boreali, esplosioni vulcaniche, terremoti, meteoriti, onde marine, ecc.) o artificiali (esplosioni, onde d'urto generate da aerei supersonici, ecc.). Queste onde rivestono un notevole interesse scientifico sia perchè possono propagarsi fino a distanze di migliaia di chilometri senza notevoli perdite di energia, sia perchè consentono di caratterizzare diversi fenomeni fisici. Inoltre, la propagazione nell'alta atmosfera di tali onde crea effetti sensibili sulle regioni inferiori della ionosfera, rilevabili con ionosonde.

E' ben noto che un volume infinitesimo di atmosfera, supposto spostato dalla sua posizione di equilibrio, oscilla attorno a tale posizione a causa della forza di gravità con una frequenza tipica, funzione delle caratteristiche atmosferiche e che prende il nome di "frequenza di Brunt-Vaisala"

Nelle condizioni normali presenti al suolo tale frequenza risulta essere dell'ordine di 2 mHz. Tuttavia, già a frequenze dell'ordine di 10 mHz, occorre tener conto della forza di gravità nella equazione di dispersione. Perciò l'anisotropia del mezzo fa sì che la velocità di fase delle onde dipenda dalla direzione di propagazione.

Per convenienza, si indicano col termine di infrasuoni le frequenze al di sopra della frequenza di Brunt-Vaisala, e onde di gravità quelle al di sotto: queste due bande sono ben distinte dall'andamento profondamente diverso della velocità di fase in funzione della direzione [1].

Rilievi di variazioni di pressione di origine naturale effettuate da diversi autori permettono di valutare l'ampiezza minima, massima e media dei segnali ricevuti in funzione della frequenza [2]. Orientativamente, si può dire che i valori di picco riscontrati normalmente a 1 mHz sono dell'ordine di 10 Pa e a 100 mHz sono dell'ordine di 0,1 Pa: valori massimi e minimi possono differire di un'ordine di grandezza.

2. - Trasduttori e loro caratteristiche

Il rilievo della pressione infrasonora è eseguito mediante opportuni trasduttori che si discostano dai microfoni tradizionali. Tali strumenti sono essenzialmente di due tipi: assoluti e differenziali. Tralasciando la descrizione di microbarometri ottenuti collegando in serie delle capsule aneroidi e microfoni progettati specificatamente per rilievo di infrasuoni, di ingombro eccessivo, ci si sofferma sui microbarometri, spesso usati come altimetri sugli aerei, il cui principio di funzionamento è identico a quello dei microfoni a condensatore. L'elemento sensibile è costituito da una cavità chiusa da una membrana, affacciata ad un elettrodo, che si deforma a causa della differenza di pressione tra le due superfici. Lo spostamento della membrana rispetto all'elettrodo viene rilevato mediante un sistema a portante ⁽¹⁾. Particolari accorgimenti devono essere adottati per ridurre l'influenza della temperatura, che può essere contenuta in limiti accettabili mediante una opportuna rete elettrica di correzione. Le caratteristiche di questi trasduttori sono tali da consentire misure di pressione comprese, ad esempio, tra 85.000 Pa e 105.000 Pa con una sensibilità di 0,5 mV/Pa, e la loro banda di frequenza si estende dalla continua fino a qualche decina di Hz. In tale banda, la risoluzione, limitata dal livello di rumore, si aggira su 0,03% del fondo scala. Questo fatto limita fortemente la possibilità di rilevare infrasuoni nella banda più alta delle frequenze poichè la risoluzione risulta essere dell'ordine di 6 Pa.

Ovviamente risoluzioni maggiori possono essere conseguite filtrando il segnale in uscita e rilevando frequenze più basse. Tuttavia, altre fonti di errore, non riducibili con il filtraggio, sono quelle relative all'isteresi (inferiore a $\pm 10^{-3}\%$ del fondo scala) e alla non ripetibilità delle misure (inferiore a 0,03% del fondo scala).

⁽¹⁾ Si rileva cioè la variazione di frequenza di una portante dovuta alla variazione della capacità tra gli elettrodi che fanno parte di un circuito risonante.

I microbarometri differenziali, invece, si discostano da quelli assoluti perchè la cavità può essere mantenuta ad una pressione di riferimento nota. Per i rilievi sperimentali la cavità viene collegata all'ambiente esterno mediante un capillare di equalizzazione; cavità e capillare costituiscono un filtro passa basso per la pressione atmosferica, con frequenza di taglio $1/\tau$. Tale frequenza dovrà essere scelta non inferiore a quelle per le quali gli infrasuoni rilevati possono eccedere la portata dello strumento. Caratteristiche tipiche di un trasduttore differenziale possono essere le seguenti: fondo scala dell'ordine di ± 100 Pa e sensibilità dell'ordine di 25 mV/Pa, con risoluzione, isteresi e non ripetibilità simili a quella dei microbarometri assoluti. E' evidente il notevole miglioramento (quasi due ordini di grandezza) nella sensibilità e risoluzione per le misure a frequenze superiori a $1/\tau$, rispetto ai microbarometri assoluti.

Nel caso presentato, τ non dovrà essere superiore a 100 - 200 s, tenendo conto dei livelli di infrasuoni misurabili. Al di sotto di tale frequenza di taglio, la sensibilità dello strumento decresce di 6 dB per ottava. Tuttavia questo fatto non è una limitazione eccessiva in quanto, come precedentemente detto, i livelli degli infrasuoni e delle onde di gravità riscontrabili in natura tendono a crescere al diminuire della frequenza. Ovviamente occorre tener presente che la costante termica del sistema deve essere superiore a quella acustica, per limitare gli errori dovuti a variazioni di temperatura. Normalmente i microbarometri differenziali non sono forniti di cavità. Queste possono essere facilmente calcolate; ad es., una cavità di $0,001 \text{ m}^3$ con un capillare lungo 0,1 m e diametro $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ha una frequenza di taglio di 200 mHz.

Nell'effettuare misure di infrasuoni, è importante distinguere tra variazioni di pressione dovute alle onde sonore e quelle dovute alla turbolenza prodotta dal vento che investe gli ostacoli (edifici, alberi, ecc.). Le variazioni di pressione Δp collegate a variazioni della velocità Δv del vento sono uguali a $\rho v \Delta v$, dove ρ è la massa volumica dell'aria e v la velocità del vento. Si dimostra che tali fluttuazioni possono essere anche molto superiori alle onde che si vogliono rilevare. Operando una trasformata quadrupla di Fourier (nel tempo e nello spazio) sul campo di velocità del vento, si mettono in evidenza le frequenze caratteristiche, f_v , delle fluttuazioni del vento e i corrispondenti numeri d'onda K_v spaziali: si verifica che $2\pi f_v / K_v \ll c$ dove c è la velocità del suono. Ciò significa che la lunghezza caratteristica delle turbolenze corrispondenti ad una determinata frequenza f_v è molto minore della lunghezza d'onda sonora relativa alla medesima frequenza. Questa proprietà viene sfruttata nel progetto di opportuni filtri spaziali (Daniel's pipes [3]) che permettono di diminuire il rumore atmosferico introdotto dalla turbolenza [4]. Il sistema, descritto in fig. 1, consiste in un tubo di lunghezza $2L$ su cui vengono inseriti

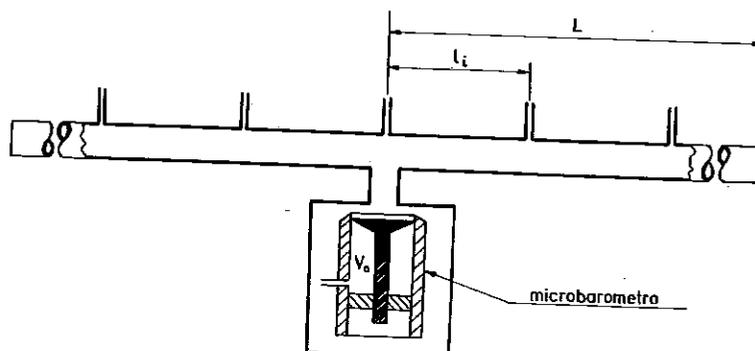


Fig. 1 – Rappresentazione schematica del filtro spaziale (Daniel's Pipe) collegato al microbarometro differenziale.

dei capillari a distanza l_i [5]. L ed l_i devono essere dimensionate in modo tale da ridurre il rumore atmosferico ai livelli ritenuti necessari. La struttura rappresentata in figura, può essere pensata come una schiera di punti di rilevamento della pressione atmosferica. Supponendo che Δp siano le variazioni di pressione dovute alla turbolenza di "periodo" T_v , una loro riduzione a $\Delta p/N$ può essere ottenuta campionando la pressione atmosferica in N^2 punti spazialmente distanziati di l_v , in modo tale da essere statisticamente indipendenti. La quantità l_v è legata al "periodo" T_v ed alla velocità e direzione del vento medio. Stabilita la lunghezza d'onda λ dell'infrasuono alla frequenza più alta che si vuole rivelare, L dovrà essere molto minore di λ ; d'altra parte la distanza minima l_i tra i capillari dovrà essere dell'ordine della lunghezza caratteristica delle turbolenze di "periodo" λ/c .

3. – Rilievi sperimentali

Misure di turbolenza atmosferica sono state condotte da vari autori (ad es. [6]), ed utilizzate in numerose analisi teoriche [7] [8]. Per determinare la lunghezza caratteristica l_v della turbolenza sono state eseguite analisi dei segnali rilevati tra due microfoni posti al livello del tetto piano di un edificio e a distanza variabile tra di loro.

I segnali sono stati rilevati in condizioni tali da potersi ritenere rappresentativi di una rumorosità atmosferica nettamente superiore al livello di infrasuoni presenti.

La fig. 2 rappresenta l'andamento temporale della pressione rilevata da uno dei due microfoni per la durata di 100 s.

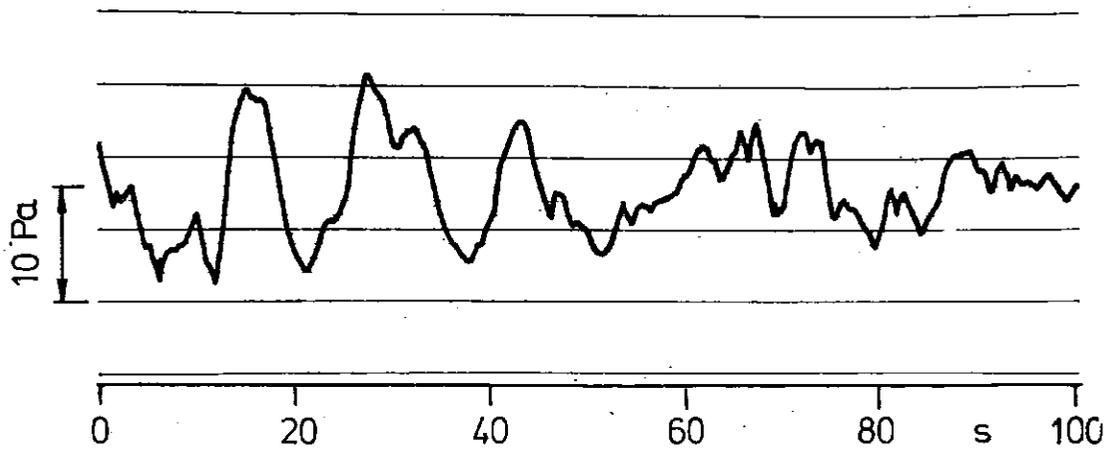


Fig. 2 - Pressione in funzione del tempo rilevata da un microfono per infrasuoni.

Nella fig.3 è riportato lo spettro di potenza di riferimento del segnale: il livello, corrispondente a 0 dB, è di 20 Pa. Si noti il decrescere dello spettro in

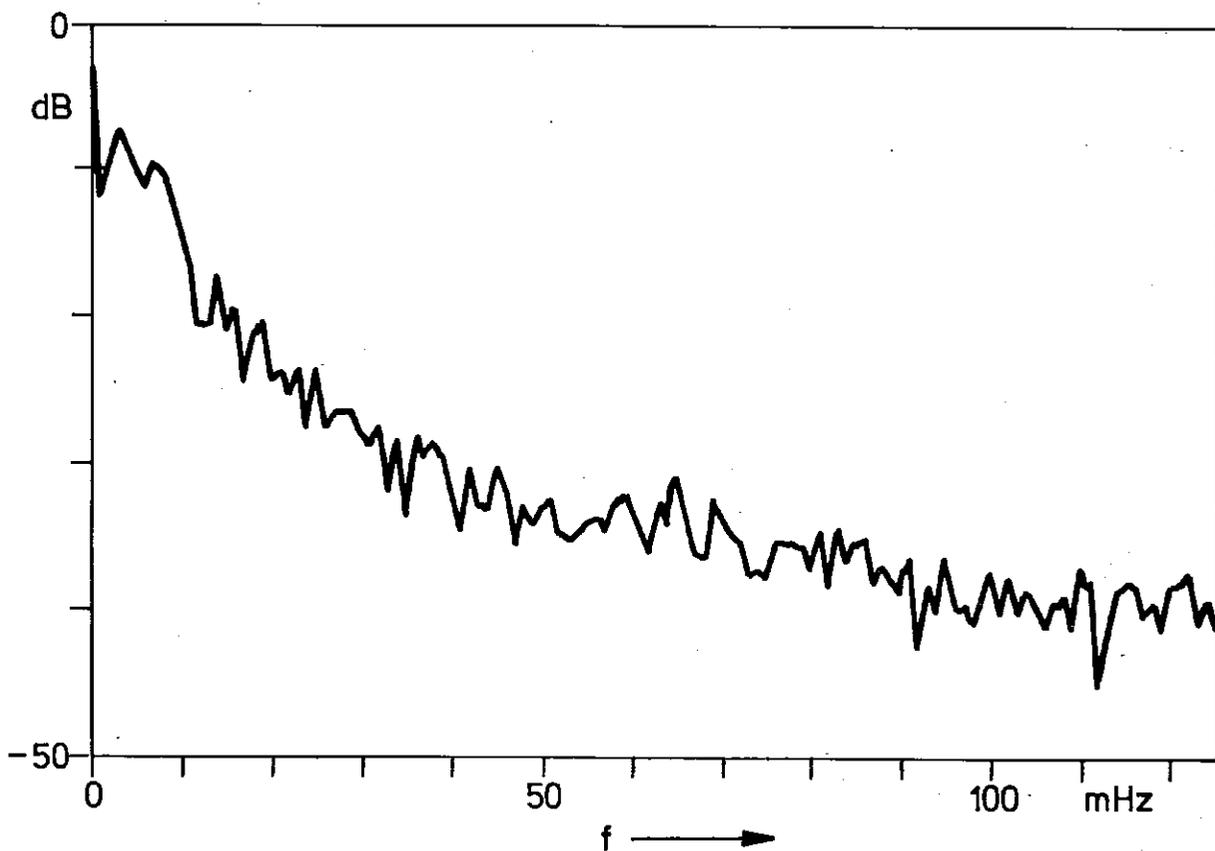


Fig. 3 - Spettro di potenza del segnale rilevato dal microfono.

funzione della frequenza: questo andamento è simile a quello delle componenti infrasonore di origine naturale, che possono verificarsi in particolari condizioni meteorologiche.

La lunghezza l_v per le varie "frequenze" viene individuata ricorrendo a misure di coerenza. La funzione di coerenza γ^2 è definita dalla relazione:

$$\gamma^2 = \frac{|G_{xy}|^2}{G_x G_y}$$

dove G_{xy} è il cross-spettro tra i segnali rilevati dal microfono X ed Y , mentre G_x e G_y sono gli spettri di potenza dei segnali X ed Y . La funzione di coerenza, così normalizzata, vale 1 se X ed Y sono strettamente dipendenti; la coerenza si riduce a valori inferiori ad 1 per segnali meno correlati.

La fig.4 rappresenta le funzioni di coerenza tra i segnali dei due microfoni X ed Y a distanza d , di 2 m, 4 m e 8 m rispettivamente. Si noti il progressivo

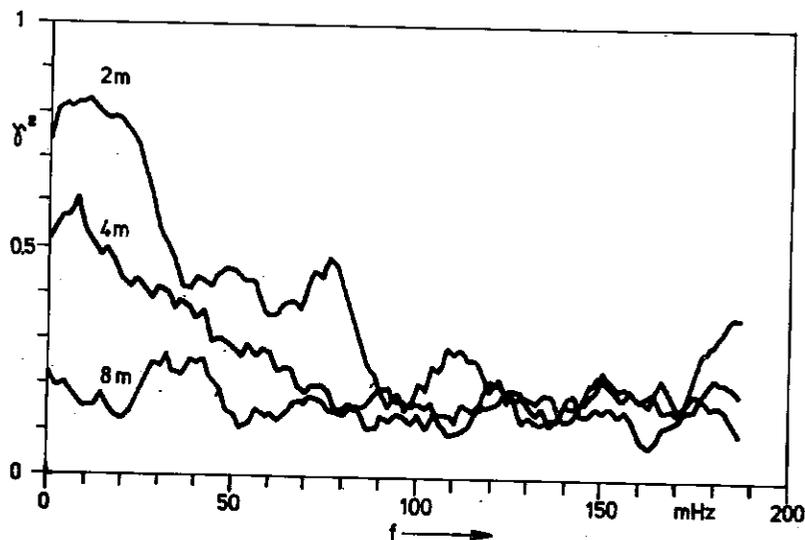


Fig. 4 -- Funzioni di coerenza tra segnali rilevati alle varie distanze.

decadere di γ^2 a valori sempre più bassi al crescere della distanza d e tanto più rapidamente quanto più alta è la frequenza.

La fig.5 rappresenta, in funzione della frequenza, la distanza l a cui la funzione γ^2 scende a valori di 0,2 circa.

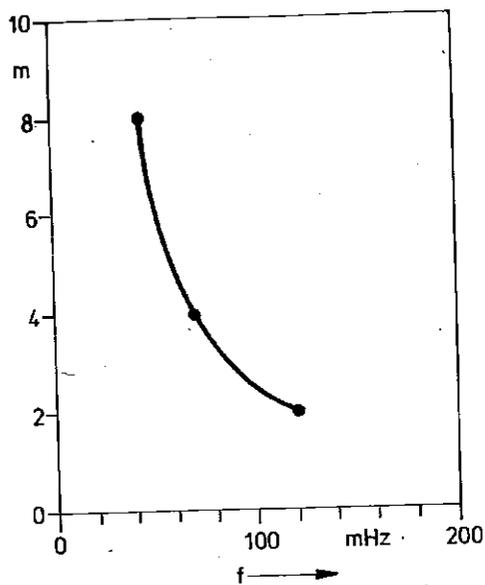


Fig. 5 — Distanza a cui la funzione di coerenza raggiunge il valore di 0,2.

Per poter meglio interpretare i dati rilevati dai microfoni sono state effettuate misure di vento con un anemometro a filo caldo posto a pochi centimetri di distanza da uno dei microfoni. La fig. 6 rappresenta lo spettro di potenza del segnale: il livello di riferimento è di 1,1 m/s, ed i valori delle varie componenti corrispondono al quadrato dei valori di picco delle relative sinusoidi. Usando i valori così ottenuti per il vento medio (circa 0,7 m/s) e per Δv alle varie frequenze, è possibile valutare i corrispondenti valori di $\Delta p = \rho v \Delta v$ misurati dal microfono. Si noti che alle frequenze più alte tali valori sono dell'ordine di qualche millesimo di Pa al di sotto del livello di sensibilità del microfono stesso.

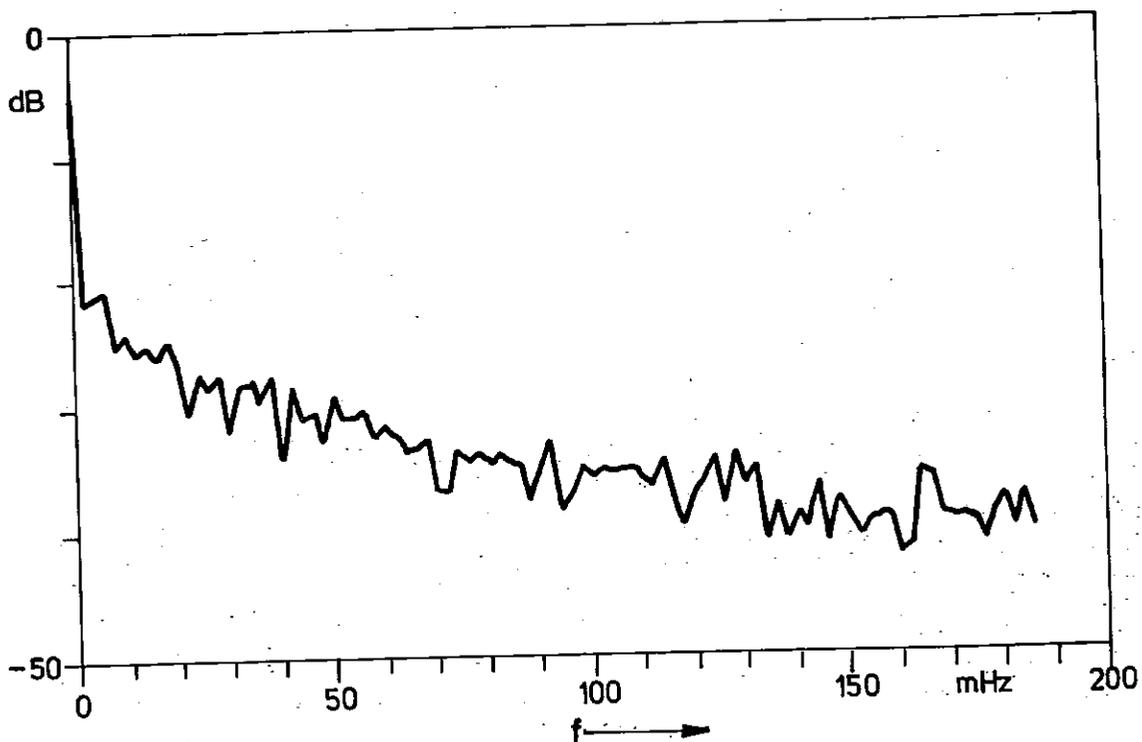


Fig. 6 — Spettro di potenza della velocità del vento.

so. La notevole sensibilità dell'anemometro usato, suggerisce la possibilità di ridurre le fluttuazioni di pressione dovute al vento mediante correlazioni tra segnale anemometrico e segnale microfónico; si fa notare che, alle basse frequenze, le indicazioni dell'anemometro e del microfono si equivalgono.

Ringraziamenti: Questa ricerca è stata eseguita nell'ambito del piano finalizzato CNR "Promozione della qualità dell'ambiente" contratto n.77-00478.90.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gossard E.E., Hooke W.H. - *Waves in the atmosphere* - Elsevier (1975).
- [2] Georges T.M., Young J.M. - *Passive sensing of natural acoustic-gravity waves at earth's surface* - tratto da: Derr V.E. (Editor): *Remote sensing of the troposphere* - U.S. Government Printing Office (1972) p. 21.1 - 21.20.
- [3] Daniels F.B. - *Noise reducing line microphone for frequencies below 1 Hz* - Journ. Acoustical Society of America, vol. 31 (1959), p. 529-531.
- [4] Cook R.K., Bedard A.J. - *On the measurement of infrasound* - Geophys Journ. R. astr. Soc. vol.26 (1971), p. 5-11.
- [5] Burridge R. - *The acoustics of pipe arrays* - Geophys Journ. R. astr. Soc. vol. 26 (1971), p. 53-69.
- [6] Larsen S.E., Busch N.E. - *Hot-wire measurements in the atmosphere* - DISA Information n. 16 (1974), p. 5-21.
- [7] Meecham W.C. - *Atmospheric turbulence* - tratto da: Derr V.E. (Editor) - *Remote sensing in the troposphere* - U.S. Government Printing Office (1972), p. 4.1 - 4.17.

SUMMARY

THE MEASUREMENT OF INFRASOUND IN THE ATMOSPHERE

The measurements of natural infrasound in the atmosphere have been performed by many authors using similar techniques. The sensor (absolute or differential microbarographs) are connected to a spatial filter (Daniel's pipes) in order to reduce the noise generated by wind turbulence. In the present work a brief review is presented of such techniques. In order to correctly design the noise reducing Daniel's pipes, it is necessary to know the turbulence properties at ground level. For this reason, a few measurements have been performed using two infrasound microphones at different distances. The coherence function has been computed in different situations. The decay of the coherence is presented as a function of frequency at various distances. In order to show the physical meaning of the microphone data, that is their ability to detect wind fluctuations, a comparison has been performed with a hot-wire anemometer signal.