



**Dipartimento di Fisica e Tecnologie Relative
Seminario di Fisica Interdisciplinare**

“Comprendere la Complessità”

**Risonanza stocastica nel riconoscimento e nel
corteggiamento di specie di *Nezara viridula***

S. Spezia

Palermo, 16 Aprile 2009

Risonanza stocastica

- **E' il fenomeno che si manifesta in sistemi non lineari dove un debole segnale può essere amplificato e ottimizzato mediante il contributo del rumore.**
- **Questo *effetto indotto dal rumore* richiede tre ingredienti fondamentali: (i) una soglia energetica di attivazione o, più generalmente, un livello di soglia; (ii) un debole segnale d'ingresso; (iii) una sorgente di rumore interna al sistema o aggiunta esternamente insieme al segnale d'ingresso. In queste condizioni, la risposta del sistema mostra un comportamento risonante in funzione dell'intensità di rumore**
- **Fenomeni di risonanza stocastica sono stati osservati su un gran numero di diversi sistemi:**
 - **Laser**
 - **Dispositivi a semiconduttore**
 - **Reazioni chimiche**
 - **Celle recettive di pesci elettrici**
 - **...**

Origine storica della risonanza stocastica

Nel 1981 Benzi, Parisi e Vulpiani, studiando la periodicità delle ere glaciali terrestri, scoprirono un fenomeno nuovo e a dir poco sconcertante. Il loro modello climatico prevedeva due stati stabili: uno caldo (reso stabile dall'effetto serra) e uno freddo (reso stabile dall'aumento dell'albedo collegato alla comparsa dei ghiacci).

Classicamente la transizione tra questi due stati era stata spiegata con le variazioni di eccentricità dell'orbita terrestre, il cui periodo è proprio quello delle glaciazioni (circa 100.000 anni).

Ma i tre fisici romani si accorsero che quest'effetto è troppo piccolo per spiegare il fenomeno: in realtà delle simulazioni (e una teoria nata conseguentemente) hanno mostrato come il rumore dovuto alle fluttuazioni termiche e ad altre perturbazioni nell'orbita terrestre è in grado di amplificare il “segnale” deterministico, rappresentato dalla variazione dell'eccentricità.

Quest'effetto è stato chiamato *risonanza stocastica*.

Modello dinamico bistabile

- Vediamo un video chiarificatore



Spieghiamo il filmato che abbiamo visto...

- Consideriamo il moto sovrasmorzato di una particella browniana nel predetto potenziale bistabile in presenza di rumore e di una forzante periodica

$$\dot{x}(t) = -V'(x) + A_0 \cos(\Omega t + \varphi) + \xi(t)$$

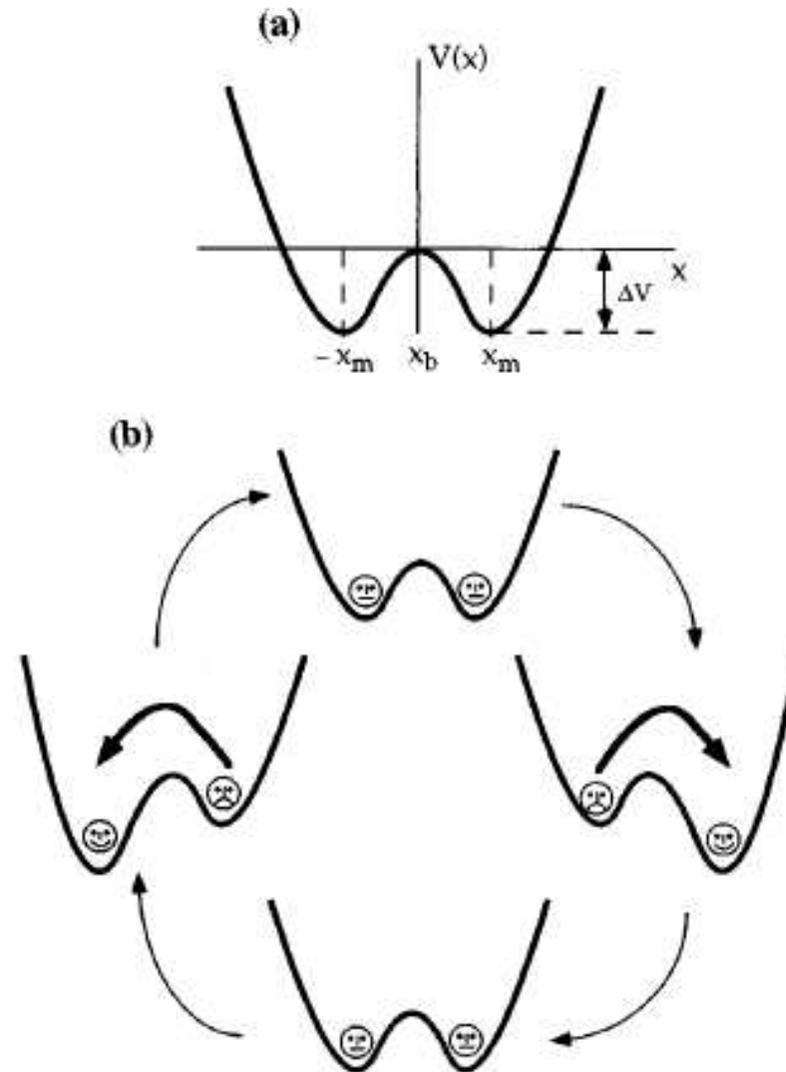
dove con $V(x)$ indichiamo il potenziale quartico che è a simmetria pari

$$V(x) = -\frac{a}{2}x^2 + \frac{b}{4}x^4.$$

e con $\xi(t)$ un rumore bianco gaussiano a media nulla e funzione di autocorrelazione

$$\langle \xi(t)\xi(0) \rangle = 2D\delta(t)$$

ed intensità D .

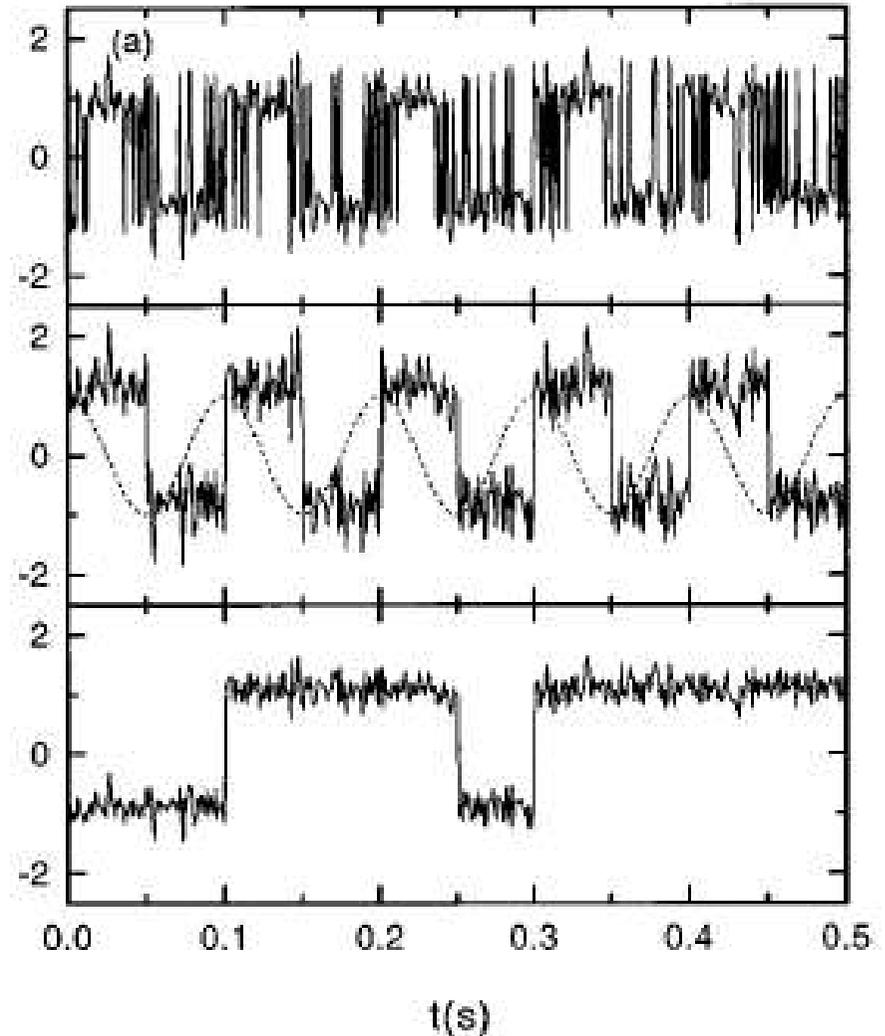


Risposta periodica al variare di D

- In assenza di forzante periodica, $x(t)$ fluttua attorno ai punti di equilibrio a stabilità locale con un varianza proporzionale all'intensità di rumore D.
- In presenza di una debole forzante periodica, dei salti vengono indotti dal rumore tra i due stati di equilibrio locale con una frequenza data dall'equazione di Kramers:

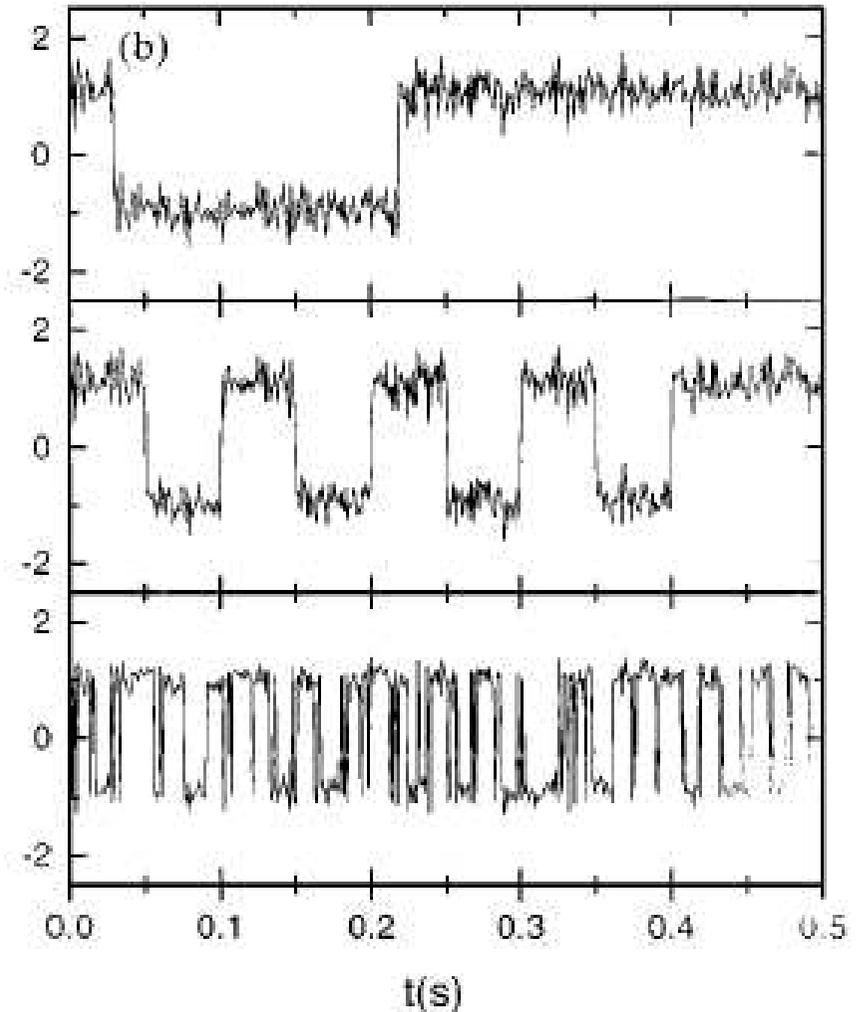
$$r_K = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\Delta V}{D}\right)$$

- Nella figura a destra è riportato un esempio di sincronizzazione input-output al variare dell'intensità di rumore mantenendo costante la frequenza della forzante periodica.

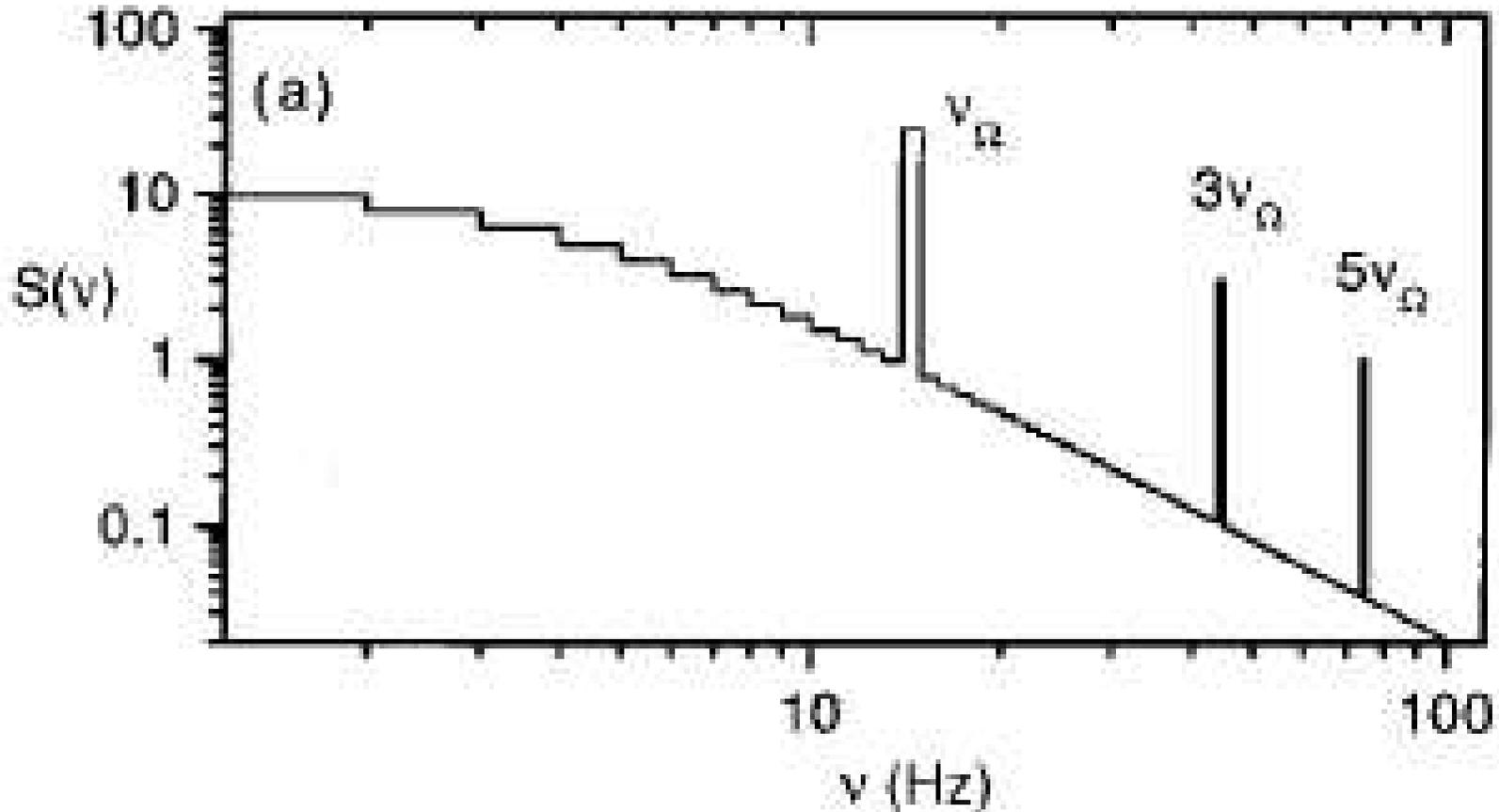


Risposta periodica al variare di Ω

- Nella figura a destra è riportato un esempio di sincronizzazione input-output al variare della frequenza della forzante periodica mantenendo costante l'intensità di rumore.



Densità spettrale di potenza (PSD) dell'uscita

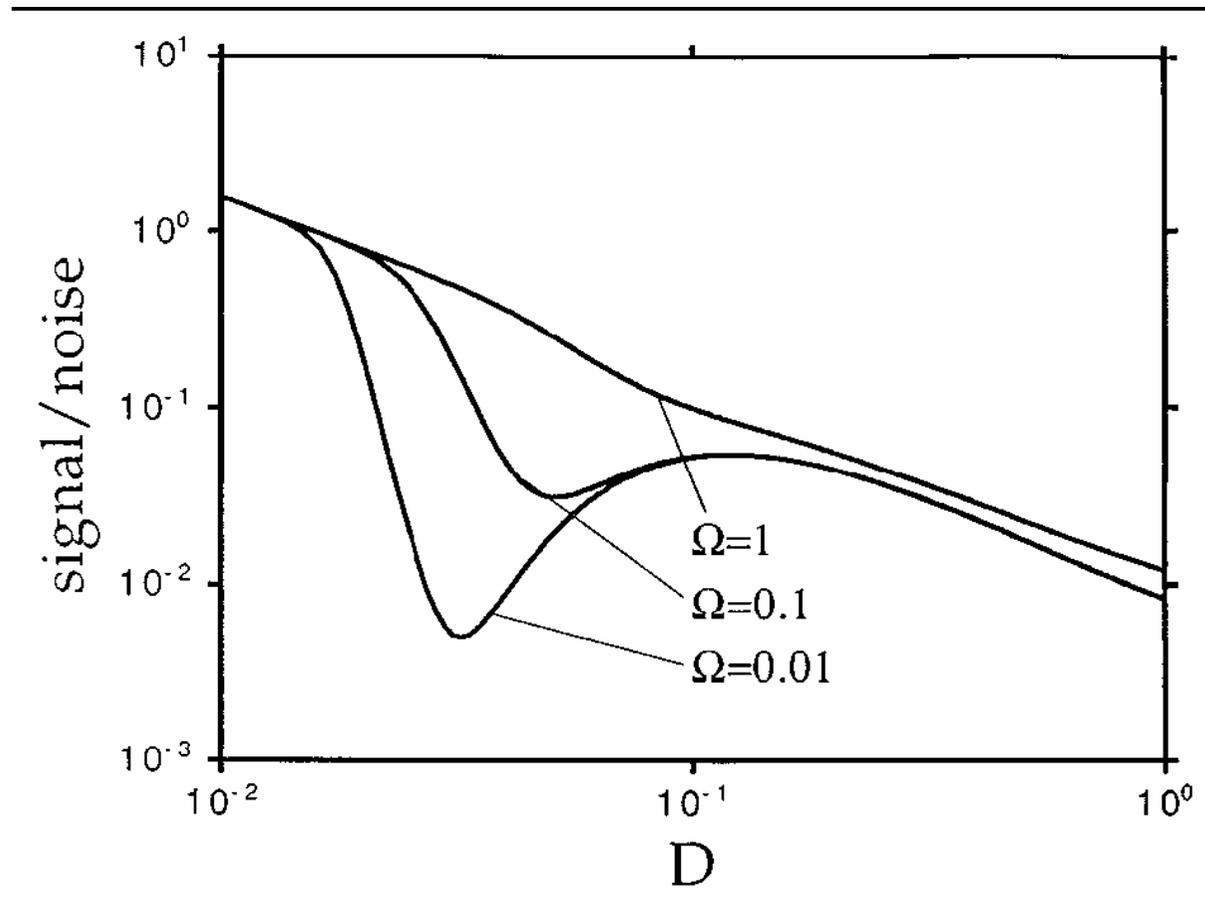


Gammaitoni et al., Rev. Mod. Phys., Vol. 70, No. 1, January 1998

Come misurare l'effetto di risonanza stocastica?

Il rapporto segnale-rumore (SNR)

- La risonanza stocastica può essere vista come un particolare problema di rivelazione di un segnale da un canale rumoroso.
- E' abbastanza naturale caratterizzare la risonanza stocastica con il formalismo dell'analisi dei segnali, in particolare utilizzando il concetto di rapporto segnale-rumore (signal-to-noise ratio, *SNR*).

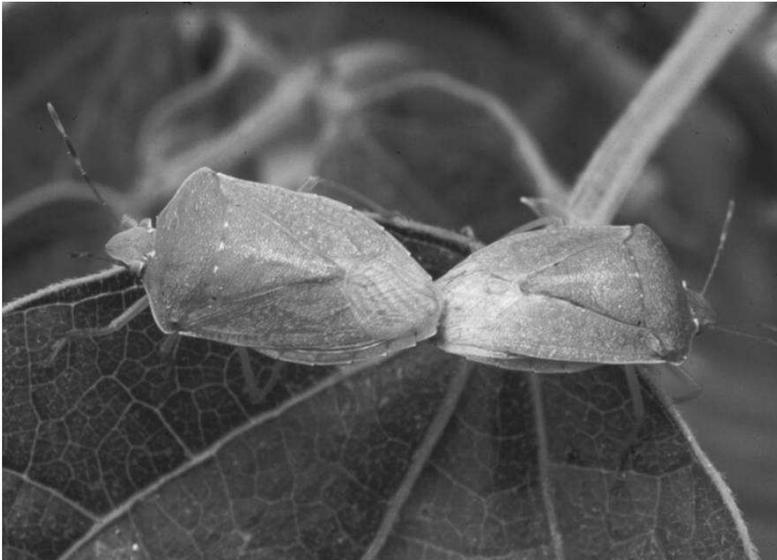


Studi successivi al 1981

- **Ai primi studi Benzi del 1981 seguirono studi su Trigger Schmitt nel 1983 sino ai fondamentali esperimenti di McNamara sui laser bistabili ad anello nel 1988.**
- **Negli anni novanta sono stati studiati sistemi che presentano SR in tutte le branche della fisica, dalla fisica delle particelle alla neurofisiologia.**
- **Fra il 1993 ed il 1996 fu dimostrata l'esistenza di tale fenomeno nei sistemi biologici, soprattutto a livello percettivo, come negli esperimenti di Douglass sui meccanorecettori posti sulla coda del gamberone di fiume.**
- **Infine nel 2008 è stata mostrata l'esistenza della risonanza stocastica nel comportamento di attrazione sessuale mediante stimoli acustici tra individui di sesso opposto di una particolare specie di insetti: *Nezara viridula***

Nezara viridula (L.)

- In questa presentazione riportiamo la risposta comportamentale di individui di *Nezara viridula* (L.) (Heteroptera Pentatomidae) a segnali sotto soglia di rivelazione.
- Specificamente investighiamo il ruolo giocato dal rumore nella comunicazione tra individui di sesso opposto di *N. viridula* (L.) attraverso il riconoscimento delle vibrazioni meccaniche trasmesse attraverso una pianta (Čokl et al. 1999).



Perchè investigare il comportamento delle *N. viridula*?

N. viridula, nota anche come cimice verde, è un insetto ampiamente diffuso nel mondo.

Questa specie essendo altamente polifaga, è una delle più importanti specie di insetti dannose all'agricoltura. (Todd, Annu Rev. Entomol. 34, (1989) 273-292).

Questo tipo di ricerca è diretta a migliorare le tecniche di monitoraggio della popolazione attraverso la trasmissione di vibrazioni meccaniche emesse artificialmente e riconoscibili dagli insetti al fine di costruire delle trappole che attraggono gli insetti al fine di catturarli.

Come comunica questa specie di insetto?

- Il comportamento di avvicinamento tra individui di sesso opposto di NV può essere diviso in una prima fase di localizzazione a lungo raggio ed in una seconda fase di corteggiamento a breve raggio. La prima fase comprende quelle componenti del comportamento che portano all'avvicinamento delle femmine ai maschi. Essa avviene attraverso l'utilizzo da parte dei maschi di feromoni attrattivi che permettono ad entrambi i sessi di raggiungere la stessa pianta.
- La seconda fase di corteggiamento a breve raggio comprende quelle componenti che coordinano l'interazione dei sessi opposti quando sono in forte vicinanza. In quest'ultima condizione gli stimoli acustici hanno un ruolo fondamentale.
- L'organo che produce queste vibrazioni meccaniche è posto sull'addome dell'insetto ed è presente negli insetti adulti. Le vibrazioni prodotte hanno una frequenza vicina a 100Hz. Questi segnali meccanici sono trasmessi attraverso le zampe dell'insetto alla pianta e rivelate da vibro-recettori posti nelle zampe dell'insetto ricevente.

Materiale e metodi utilizzati

- Tutti gli esperimenti sono stati effettuati usando individui di *N. viridula* raccolti nelle vicinanze di Palermo e allevati in condizioni di laboratorio. Gli individui adulti sono stati testati almeno 10 giorni dopo la loro muta finale per assicurarsi della loro maturità sessuale e sottoposti ad un periodo di isolamento di 5 giorni dall'altro sesso.
- I segnali vibratori di interesse sono la chiamata sessuale ed il segnale di corteggiamento di entrambi sessi. Questi segnali sono stati registrati mediante la membrana di un altoparlante per basse e medie frequenze, e memorizzati in un computer per l'analisi. Il cono dell'altoparlante è stato usato come trasduttore acustico-elettrico, accuratamente scelto per ottenere una buona risposta frequenziale a partire dai 20 Hz.

L'acquisizione dei segnali è stata fatta all'interno di una camera anecoica ad una temperatura compresa nell'intervallo 22-26 °C, un'umidità relativa del 70-80% e in presenza di luce artificiale.

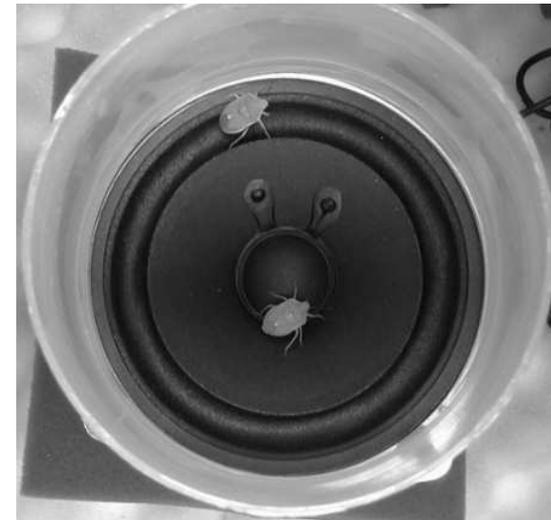
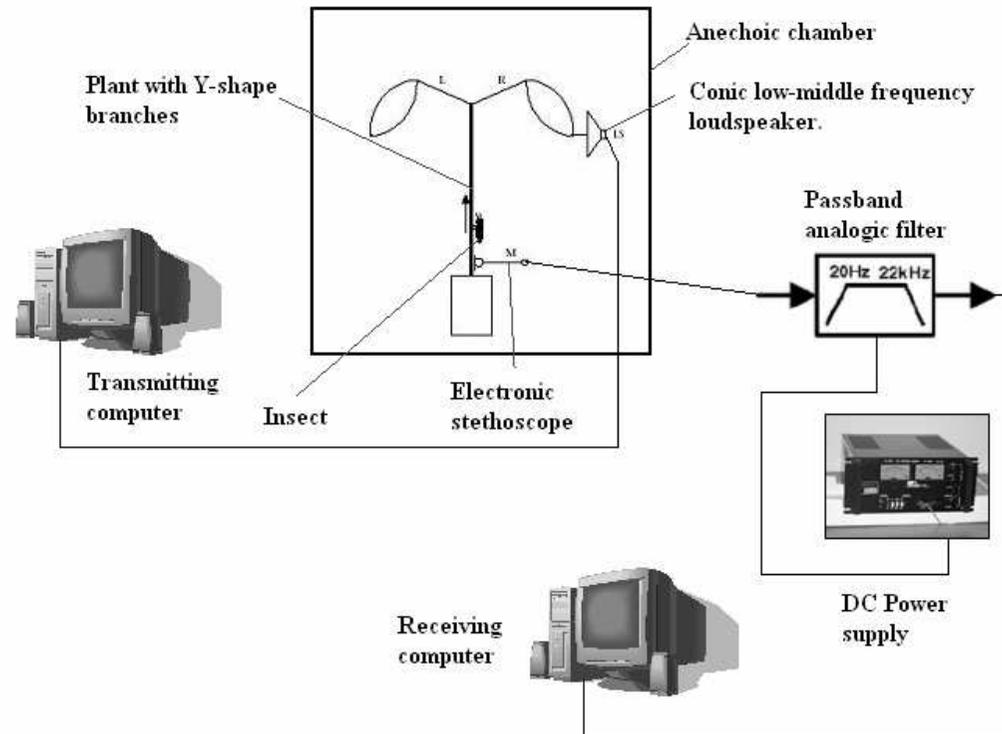


Diagramma a blocchi del sistema sperimentale e di elaborazione dei segnali

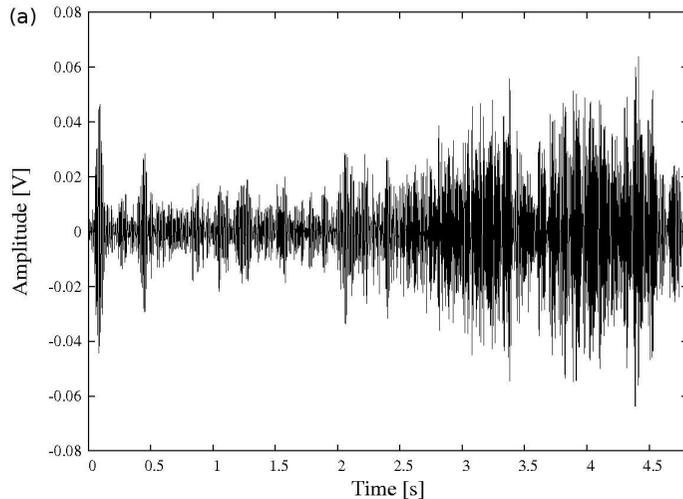


I suoni ottenuti sono stati campionati ad una frequenza di 44.1kHz con campioni di 16 bit e poi filtrati mediante un filtro numerico di Tchebychev del 1° tipo con una banda passante da 60 a 400 Hz.

Questo filtraggio è stato fatto per eliminare: (i) le basse frequenze dovute alla rete elettrica (50 Hz ed armoniche) e alla non idealità della membrana conica dell'altoparlante, e (ii) le alte frequenze dovute all'intero apparato elettronico.

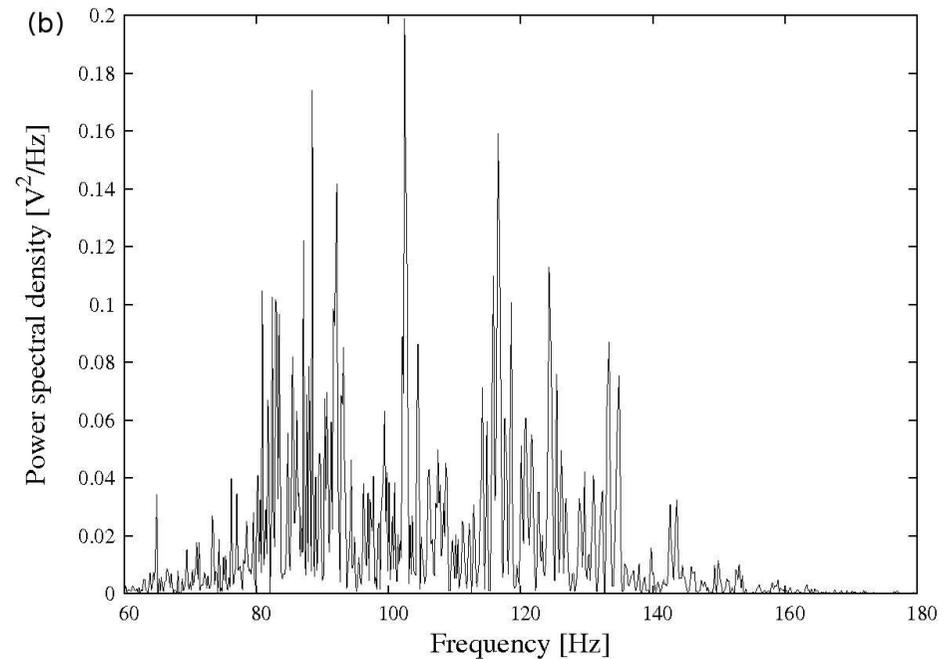
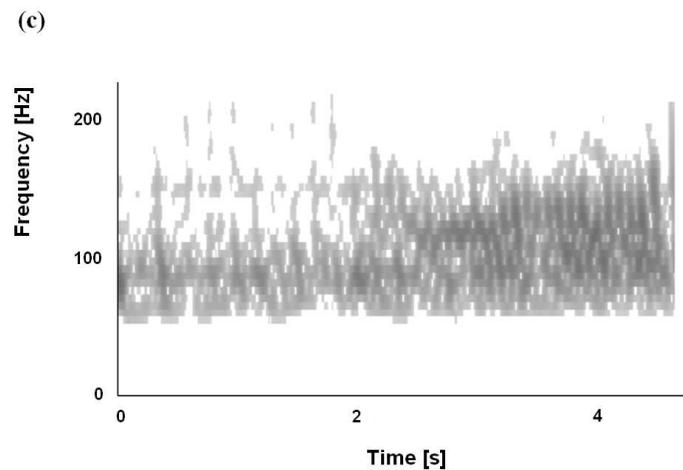
Segnale di chiamata sessuale della femmina

- Oscillogrammi, spettri e sonogrammi dei segnali emessi dalle *N. Viridula* che sono stati registrati e confrontati con quelli riportati nella letteratura Nordamericana



Chiamata sessuale non pulsata della femmina

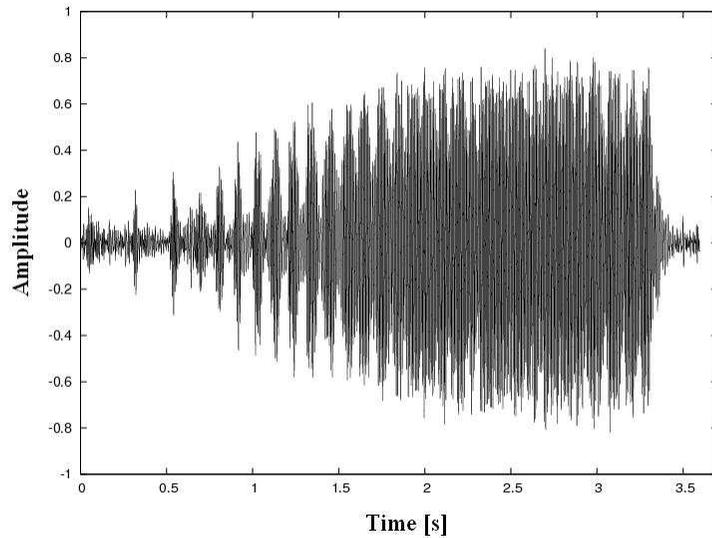
← Lunghezza temporale $T_s=4.78$ s.



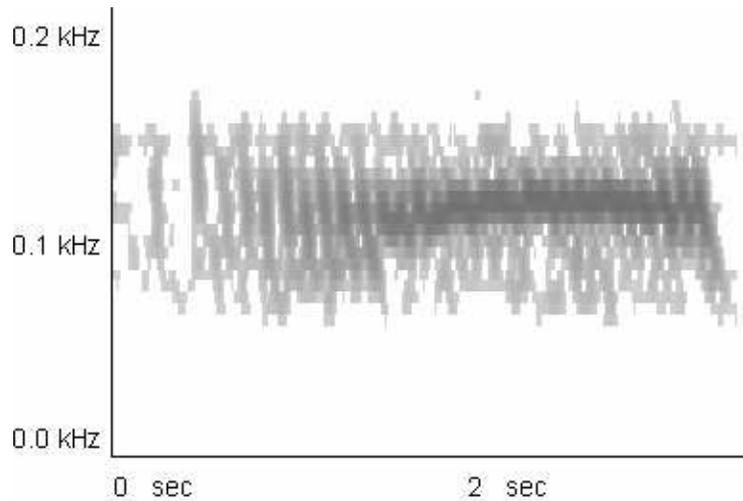
Il picco massimo dello spettro è a alla frequenza di 102.5 Hz.



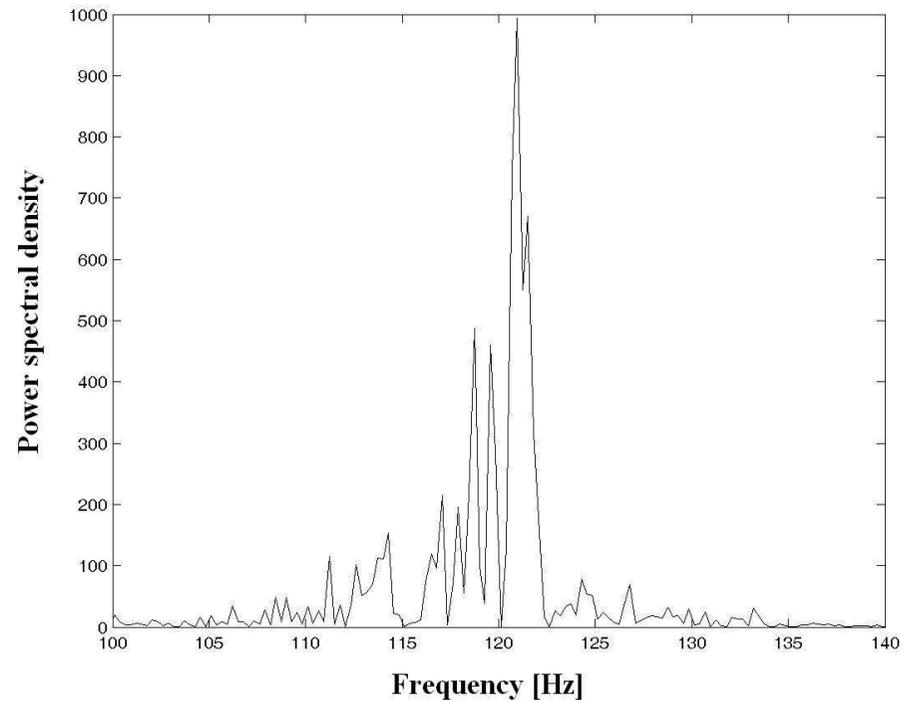
Altri segnali: corteggiamento del maschio



Oscillogramma

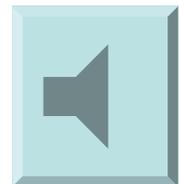


Sonogramma o spettrogramma

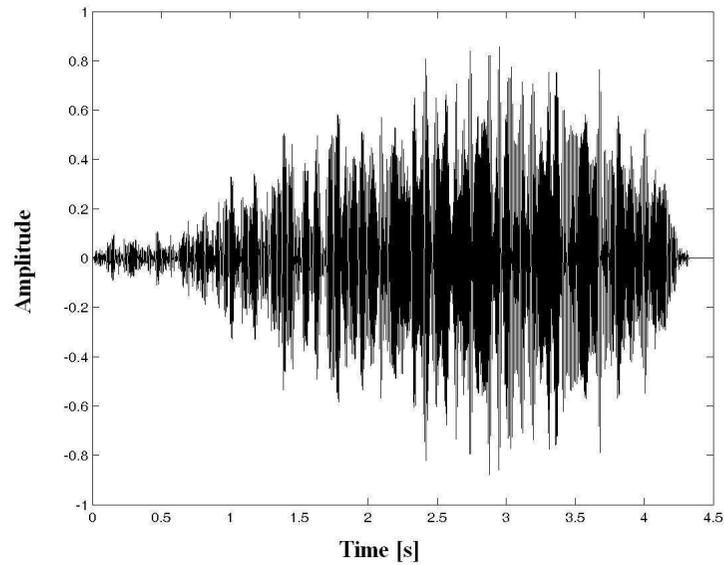


Spettro

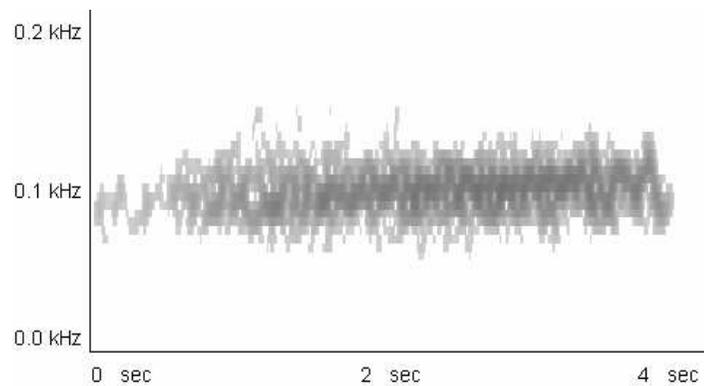
Il picco massimo è alla frequenza di 120.95 Hz.



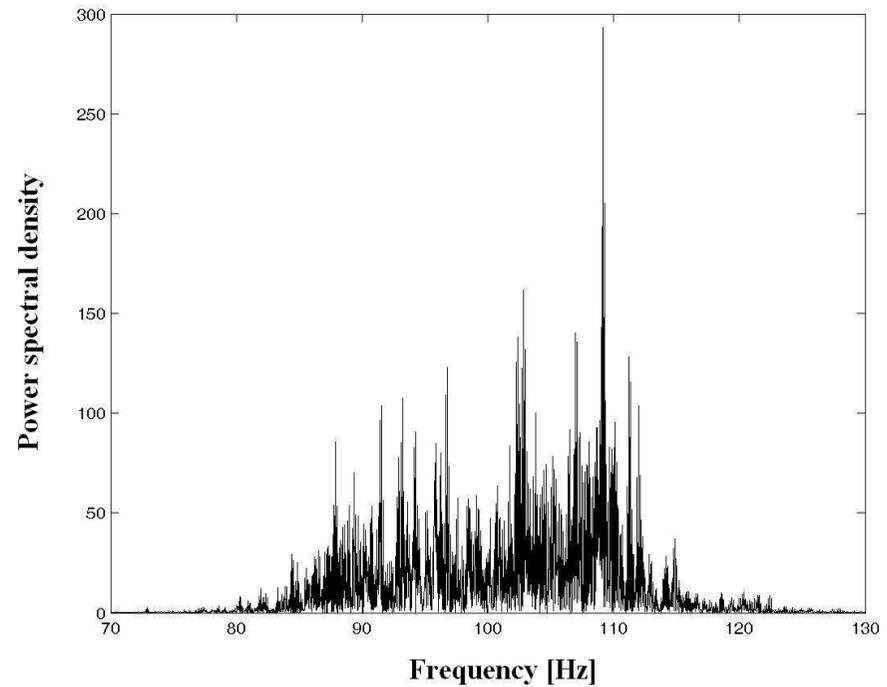
Altri segnali: di corteggiamento della femmina



Oscillogramma

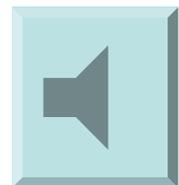


Sonogramma o spettrogramma

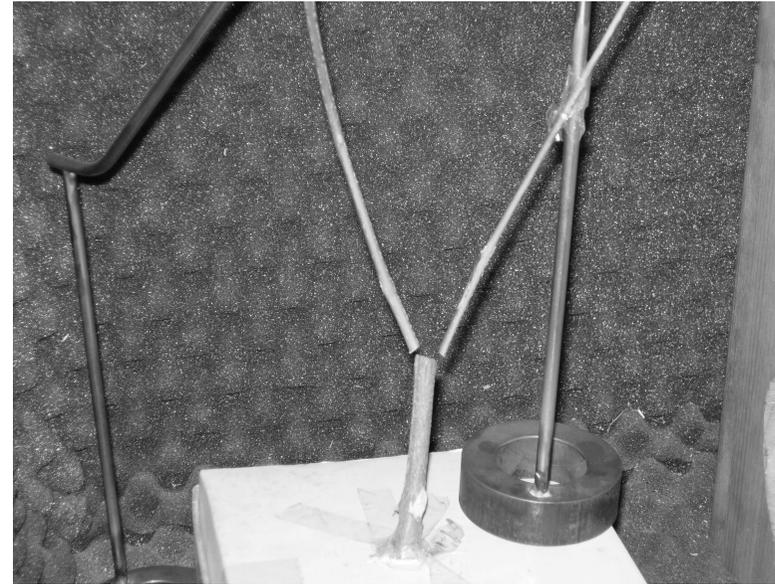


Spettro

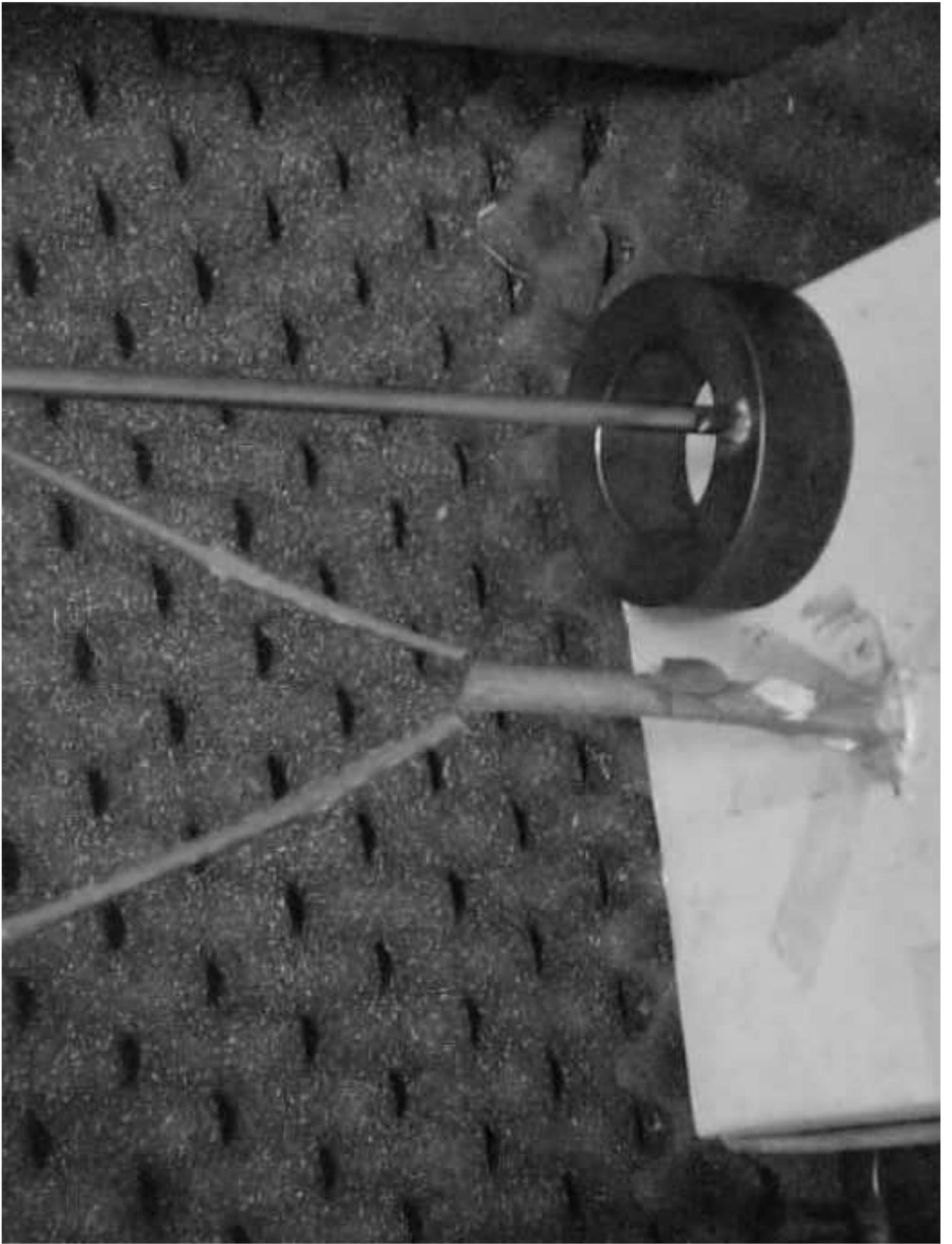
Il picco massimo dello spettro è a 109.18 Hz.



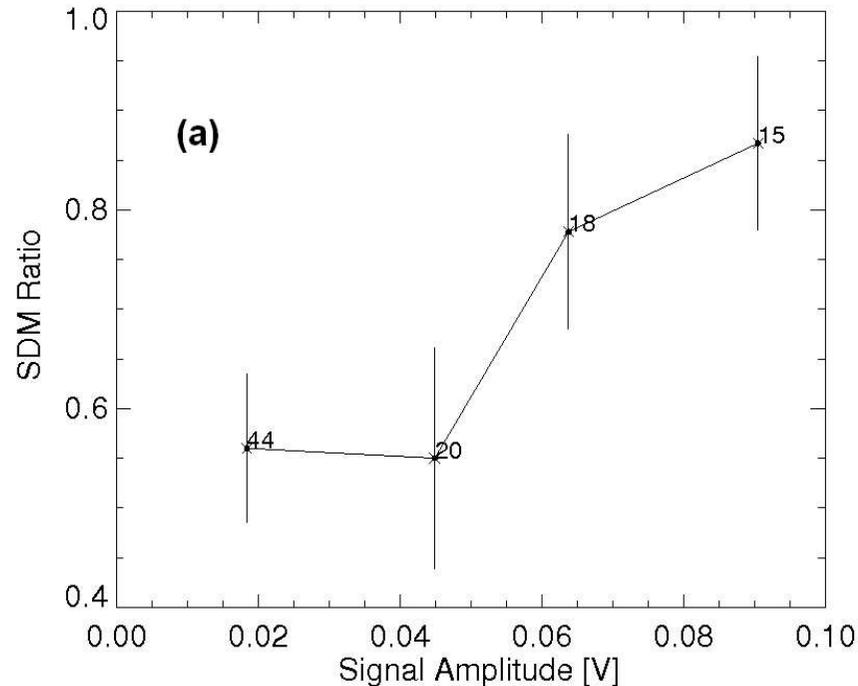
Prove di direzionalità



- **Noi studiamo la statistica del comportamento degli insetti maschi nel localizzare la sorgente delle vibrazioni. Allo scopo abbiamo preparato una pianta a forma di Y all'interno di una camera anecoica.**
- **L'esperimento consiste nell'inviare un segnale su un ramo della pianta predisposta e nell'osservare il comportamento dell'individuo maschio inizialmente posto al centro dello stelo verticale.**
- **Una risposta al nostro test è ottenuta quando l'insetto prima di scegliere una delle due direzioni, ha toccato entrambi gli estremi inferiori dei bracci obliqui della struttura ad Y.**



Source-direction movement (SDM) ratio al variare dell'ampiezza del segnale



- Abbiamo effettuato diverse prove per ciascun valore fissato dell'intensità del segnale, contando ed annotando le scelte (destra o sinistra) degli insetti.

- Abbiamo definito con SDM ratio il numero di movimenti verso la sorgente diviso il numero totale di prove, effettuate per fissata intensità di segnale.

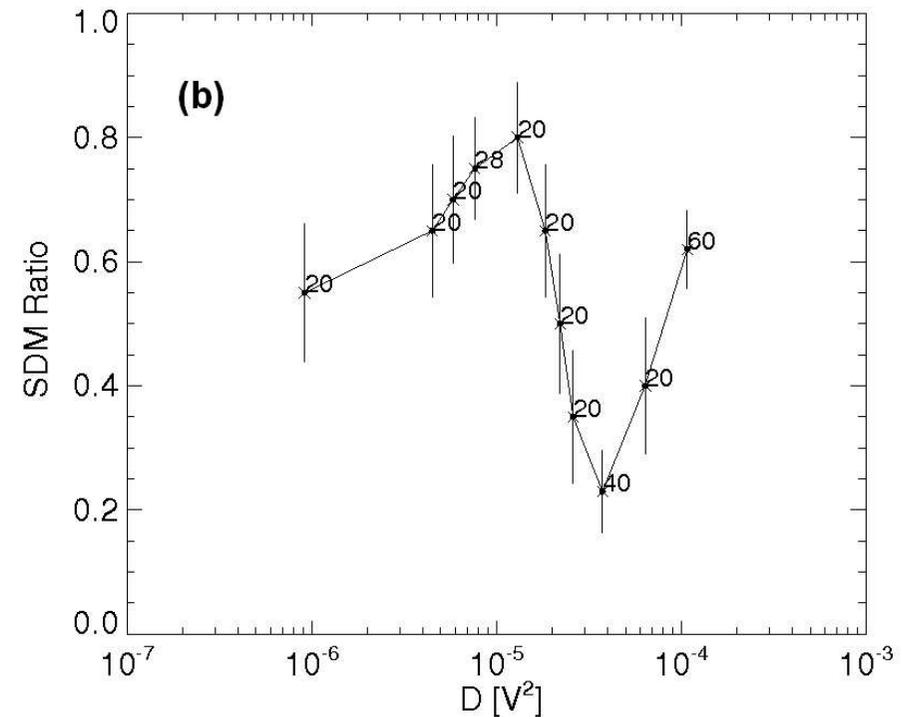
S. Spezia et al., Eur. Phys. J. B 65, 453 (2008)

- Per valori dell'ampiezza del segnale inferiori a 0.045 V, l'SDM ratio è approssimativamente pari al 50%.
- Osservato ciò abbiamo scelto come soglia di riconoscibilità dei segnali da parte degli insetti il valore di 0.045 V

Source-direction movement (SDM) ratio al variare dell'intensità di rumore

Usando un segnale sotto soglia, mescolato ad un rumore gaussiano bianco, abbiamo investigato la risposta degli insetti per differenti livelli di intensità di rumore D . Il segnale di rumore impiegato ha uno spettro piatto fino a 22050 Hz, con un tempo di correlazione di circa 45 μ s. Questa frequenza di taglio è più di due ordini di grandezza superiore alla massima frequenza emessa dagli insetti adulti di *Nezara viridula*.

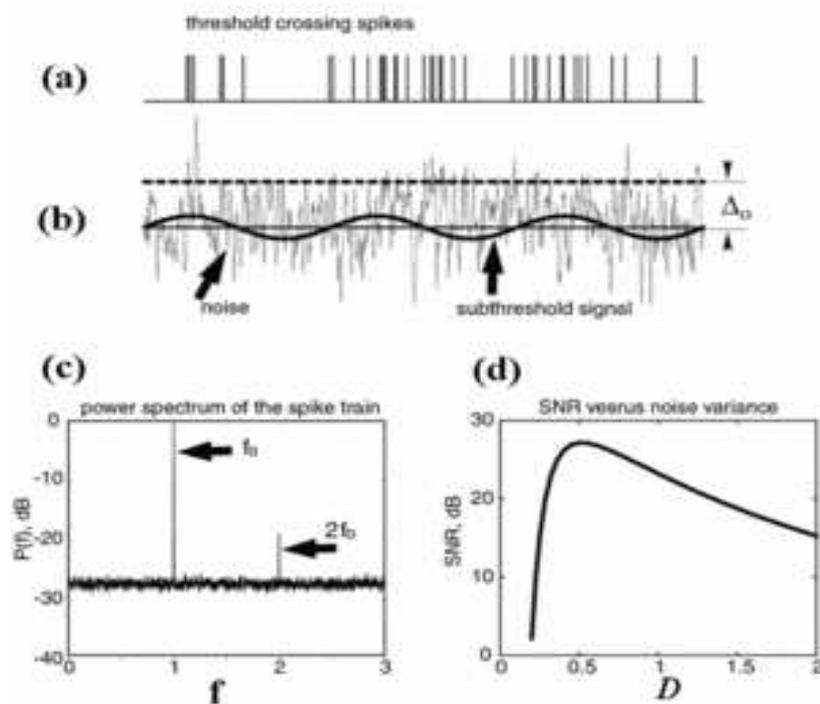
Abbiamo trovato come valore di intensità ottimale di rumore che massimizza il riconoscimento tra individui di sesso opposto (SDM): $D=1.30E-05$



S. Spezia et al., Eur. Phys. J. B 65, 453 (2008)

Un modello teorico: a soglia dura

- E' un modello estremamente semplice che è stato proposto per altri fenomeni di risonanza stocastica da F. Moss. Esso consiste solo di una soglia, di un segnale debole sottosoglia mescolato ad un segnale di rumore come mostrato in fig.(a) e (b).
- E' un sistema non dinamico.

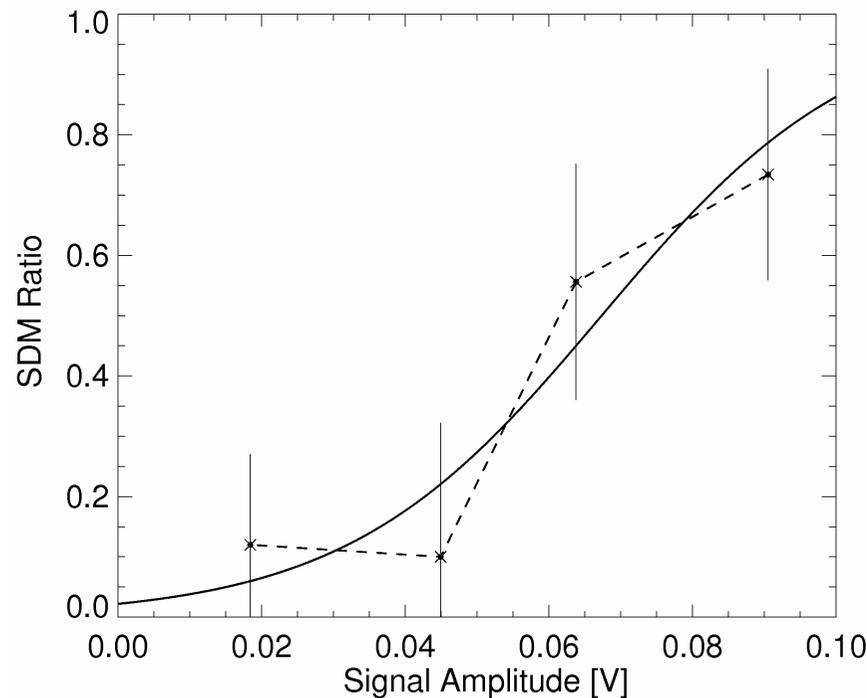


- La densità spettrale di potenza di questa serie di impulsi è mostrata in fig. (c).

- Il SNR (in dB) al variare dell'intensità di rumore D , è mostrato nella fig. (d).

Modello teorico appropriato: a soglia morbida

- Il massimo nel SDM ratio al variare di D può essere spiegato mediante il fenomeno della risonanza stocastica a soglia morbida (STSR)
- L'SDM ratio al variare dell'ampiezza del segnale, mostra chiaramente che gli individui di NV esibiscono una soglia morbida nella risposta, che può essere rappresentata da una funzione logistica o sigmoide.



- All'uopo abbiamo riscaldato i valori sperimentali del SDM ratio utilizzando la seguente relazione

$$SDMratio_{re-scaled} = 2 * (SDMratio(\vartheta) - 0.5)$$

dove θ è l'ampiezza del segnale. Come miglior fitting dei dati sperimentali abbiamo usato la seguente sigmoide

$$f(\vartheta) = \frac{1}{1 + a \cdot \exp(-(\vartheta - c)/b)}$$

dove $a=2.00464$, $b=0.0177468$, e $c=0.055$

Abbiamo simulato il nostro sistema biologico utilizzando come segnale d'ingresso il segnale sotto soglia di ampiezza massima pari a 0.045 V rappresentato dalla chiamata sessuale della femmina, ed impiegando il seguente modello a soglia morbida

$$y(t) = \begin{cases} s(t) \cdot f(s(t)), & s(t) \geq 0 \\ 0, & s(t) < 0 \end{cases}$$

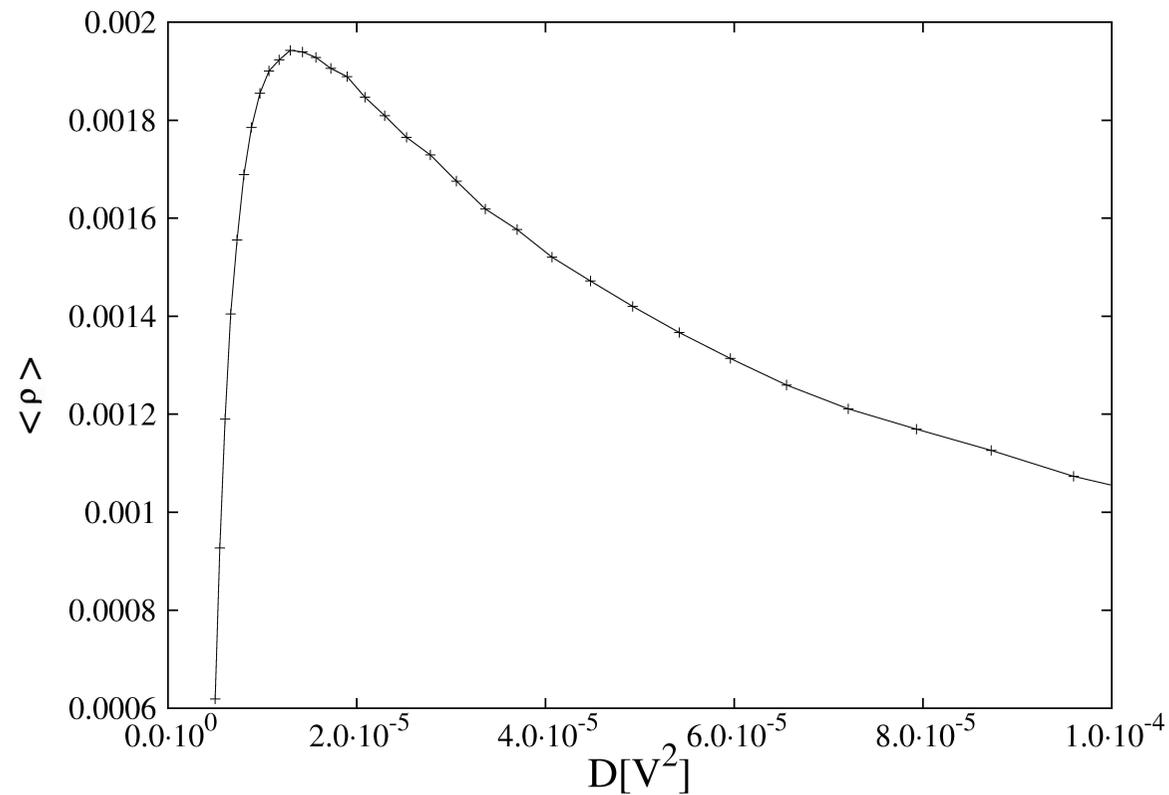
dove $s(t)=x(t)+n(t)$. Qui $x(t)$ è il debole segnale d'ingresso, $n(t)$ è il rumore in ingresso e $y(t)$ è il segnale d'uscita. A causa della non periodicità del segnale di chiamata sessuale della femmina e del suo ampio spettro, il rapporto segnale-rumore non è una misura adeguata per il fenomeno di risonanza stocastica. Quindi abbiamo usato come misura, la media statistica della cross-correlazione

$$\langle \rho \rangle = \left\langle \frac{\overline{x(t) \cdot y(t)}}{\sqrt{(\overline{(x(t) - \bar{x})^2}) \cdot \overline{(y(t) - \bar{y})^2})}} \right\rangle,$$

dove la sopra lineatura indica la media temporale nell'intervallo temporale ampio $T_s=4.78$ s, e le parentesi angolari la media statistica.

$\langle \rho \rangle$ al variare dell'intensità di rumore

- La media statistica della cross-correlazione ha il suo massimo a $D=1.29 \cdot 10^{-5} \text{ V}^2$, valore molto prossimo al valore dell'intensità di rumore che massimizza l'SDM ratio.



S. Spezia et al., Eur. Phys. J. B 65, 453 (2008)

Conclusioni

- In questo lavoro abbiamo investigato il ruolo del rumore nella comunicazioni acustiche durante il comportamento di accoppiamento delle *N. viridula*.
- Abbiamo trovato che il comportamento di risposta ai segnali rumorosi degli insetti, descritto dal Source-Direction Movement Ratio, ha un comportamento non monotono in funzione dell'intensità di rumore D , con un massimo a $D=1.30E-05 \text{ V}^2$ quando un rumore bianco è usato. Questo valore rappresenta il valore d'intensità di rumore ottimo che massimizza l'efficienza della comunicazione sessuale tra gli individui di *N. viridula* (L.).
- Utilizzando un modello a soglia morbida siamo stati in grado di confrontare i valori d'intensità di rumore ottimali ottenute negli esperimenti e nelle simulazioni numeriche.
- La media statistica del coefficiente di cross-correlazione $\langle \rho \rangle$ mostra un massimo al valore di intensità di rumore D che massimizza l'SDM ratio, osservato nei nostri esperimenti.

Grazie per l'attenzione

