

VERSO UN UDITO ARTIFICIALE: APPROCCI FISICI E PSICOACUSTICI

Diego Gonzalez (1, 2), Alberto Maurizi (1, 2), Oreste Piro (3, 4), Domenico Stanzial (1), Giovanna Zimatore (1, 5)

- 1) CNR-IMM, Istituto di Microelettronica e Microsistemi, Via Gobetti 101, Bologna, Italia. gonzalez@bo.imm.cnr.it, alberto.maurizi@cnr.it, domenico.stanzial@cnr.it
2) Dipartimento di Scienze Statistiche "Paolo Fortunati" Università di Bologna, Italia
3) Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados-IMEDEA (CSIC-UIB), Esporles, Mallorca, Spagna, oreste.piro@uib.es
4) Departament de Física, Universitat de les Illes Balears, 07122 Palma de Mallorca, Spagna
5) eCampus University, Novedrate (Co), Italia; giovanna.zimatore@uniecampus.it

SOMMARIO

Il sistema uditivo viene studiato e riprodotto grazie all'integrazione di diversi approcci al fine di sviluppare e comprendere gli elementi fondamentali (fisici e psicoacustici) necessari per indirizzare la ricerca verso un udito artificiale. Integrando le informazioni ottenute da diversi modelli, si confronteranno i segnali simulati con segnali reali (emissioni otoacustiche). L'approccio intensimetrico può essere utilizzato sia per la registrazione delle emissioni otoacustiche che per l'identificazione della direzione di provenienza del suono nel sistema integrato, sfruttando le caratteristiche vettoriali del campo acustico.

1. Introduzione

Il sistema uditivo è un sistema complesso le cui prestazioni altamente sofisticate non riescono ad essere ancora completamente riprodotte da nessun dispositivo creato dall'uomo; a tal proposito l'intensa attività di ricerca che ha per oggetto l'udito ha caratteristiche fortemente multidisciplinari che coinvolgono diverse discipline, dalla matematica, alla fisiologia, alla fisica acustica, all'elettronica.

L'attività di ricerca proposta dal gruppo del Consiglio Nazionale delle Ricerche - IMM (Istituto di Microelettronica e Microsistemi) di Bologna prosegue un'esperienza più che decennale consolidata in questo settore e coinvolge anche alcune università internazionali; l'attività di ricerca si articola secondo le seguenti linee principali: i) ricerca teorica nell'ambito della definizione dell'altezza del suono (o pitch) con la proposta dell'ipotesi delle risonanze di tre frequenze [1-2]; ii) simulazione elettronica del sistema uditivo mediante tre diversi approcci e concretizzati in tre diversi circuiti elettronici [3-4-5]; iii) studi fisiologici del sistema uditivo mediante l'analisi e la comparazione dei segnali reali e dei segnali simulati; iv) la realizzazione di esperimenti psico-acustici e fisiologici che includono la registrazione delle emissioni otoacustiche con una metodologia intensimetrica [6-7].

Le emissioni otoacustiche (OAE) sono segnali registrabili all'interno del condotto uditivo esterno e ampiamente diffuse nello screening neonatale e forniscono importanti informazioni relative a tutto il sistema uditivo.

Dall'azione sinergica che scaturisce dal confronto delle diverse professionalità impiegate nel comune campo d'indagine, si intende: (i) approfondire le conoscenze teoriche sui meccanismi complessi del sistema uditivo, (ii) confrontare ed integrare i diversi approcci di modellizzazione ed infine, (iii) verificare le ipotesi teoriche e validare i segnali simulati con gli studi fisiologici mediante analisi non lineari dei segnali e la comparazione con le OAE registrate mediante le sonde impedenziometriche in via di sviluppo. Queste conoscenze teoriche costituiscono la base di alcuni dei fondamentali elementi fisici e psicoacustici necessari per indirizzare la ricerca verso un udito artificiale.

2. Metodologie

2.1 Approccio Teorico

Lo studio teorico delle risonanze dinamiche a tre o più frequenze spiegano la percezione del pitch. Si ritiene che questi studi siano particolarmente importanti per la modellizzazione non-lineare di sistemi forzati con due o più frequenze incommensurabili, pertanto potrebbero costituire il punto di svolta per la simulazione del sistema uditivo mediante un sistema elettronico integrato.

2.2 Modellizzazione spazio-temporale

Il dogma fondamentale che soggiace a tutta la ricerca è che l'esistenza di oscillatori bio-meccanici autonomi giocano un ruolo determinante nel funzionamento del sistema uditivo. L'anatomia e la fisiologia degli organi uditivi di diverse specie contribuiscono a dare solidità a questa ipotesi, insieme al concetto qualitativo a carattere generale consistente nella necessità che, qualsiasi meccanismo d'amplificazione del segnale acustico sorto evolutivamente, deve coinvolgere la presenza di processi di feedback neuro-meccanico, i quali, a loro volta, implicano la presenza collaterale di auto-oscillazioni. In questo senso si possono interpretare le coclee e le papille uditive di diversi organismi come un insieme di sezioni trasversali di potenziali oscillatori bio-meccanici, che, nelle situazioni nelle quali questi si eccitano, diventano essi stessi, sorgenti di emissioni otoacustiche. E' possibile anche che le emissioni otoacustiche siano state utilizzate in modo costruttivo da alcune specie. Questo è il caso ad esempio delle famiglie *Lacertidae* e *Gekkonidae*, nelle quali le emissioni otoacustiche spontanee (SOAE) si presentano con uno spettro di frequenze stabile e caratteristico. Stabilito che le papille (gli organi uditivi di queste specie) differiscono sostanzialmente nella loro anatomia dalle coclee dei mammiferi, dato che sono costituite da sezioni individuali debolmente accoppiate, è lecito interrogarsi sull'effettivo ruolo dell'accoppiamento nella produzione delle SOAE.

Recentemente, Piro [3] e collaboratori hanno proposto un modello bio-meccanico del sistema uditivo del gecko Tokkai in grado di riprodurre le emissioni otoacustiche spontanee e che ha permesso di esaminare i fattori che influenzano l'interazione cooperativa tra oscillatori papillari. Il risultato è che, scegliendo

un accoppiamento elastico fra gli oscillatori si ottiene uno spettro di emissioni molto più simile a quello reale rispetto al caso di un accoppiamento di tipo viscoso suggerito dall'anatomia dell'organo uditivo. Un'analisi più dettagliata degli aspetti fisico-matematici del modello sembra suggerire che una combinazione di entrambi tipi di accoppiamenti (elastico e viscoso) possa essere la chiave per riprodurre altri interessanti dettagli dello spettro delle OAE. Sulla base del principio degli oscillatori biomeccanici autonomi, è stato costruito anche un modello che riesce a descrivere l'altezza di suoni complessi nell'uomo sulla base di risonanze dinamiche [4]. Un recente sviluppo ha consentito di risolvere il problema della stabilità strutturale di queste risonanze, cioè, degli intervalli di esistenza delle stesse nello spazio dei parametri. Questo risultato rappresenta un passo importante verso la costruzione di un udito artificiale consentendo un'implementazione robusta, sia a livello di software che di hardware elettronico. Tali risultati hanno portato ad un brevetto che prevede l'applicazione del sistema in diversi ambiti [8].

Zimatore e collaboratori [5] hanno proposto un modello del sistema uditivo basato sull'analogia elettroacustica in grado di simulare le emissioni otoacustiche nell'uomo; questo modello è stato sviluppato ed implementato per studiare le emissioni otoacustiche reali normali e in condizioni di trauma acustico e di presbiacusia; questo tipo d'attività di ricerca ha anche delle ricadute applicative nel miglioramento della diagnosi precoce di alcune patologie uditive; in ambiti di grande attualità come quello della medicina preventiva, quello delle protesi uditive, e quello degli impianti cocleari.

2.3 Studi fisiologici e analisi dei segnali

Le emissioni otoacustiche generate da modelli elettronici introdotti nel paragrafo precedente saranno analizzate con metodi non-lineari. L'analisi non-lineare dei segnali generati da dinamiche complesse, infatti, risulta decisiva in quegli ambiti dove le tecniche convenzionali falliscono. Tale analisi beneficia dell'approccio interdisciplinare con altri settori della ricerca, quali lo studio delle emissioni acustiche prodotte nella crosta terrestre con l'approssimarsi di fenomeni sismici [9]; dell'analisi delle serie finanziarie (modellizzazione del prodotto interno lordo, PIL, secondo il modello di Kaldor per individuazione dei periodi di recessione) [10] e delle alterazioni del battito cardiaco durante esercizi fisici incrementali [11].

L'analisi delle ricorrenze (RQA) è una tecnica non-lineare nel dominio del tempo che permette di identificare pochi parametri che offrono una descrizione sintetica della complessità globale del segnale; utilizzata in combinazione con la ben nota analisi delle componenti principali è possibile filtrare le informazioni ridondanti presenti nelle emissioni otoacustiche ed esaltare quelle minoritarie. I risultati ottenuti [5] suggeriscono che le componenti minoritarie presenti nel segnale riflettano caratteristiche individuali potenzialmente utili sia negli studi di popolazione che per comprendere le basi biologiche dei processi uditivi. Grazie all'integrazione dei modelli si potranno ottimizzare queste procedure di analisi e si potranno validare i parametri di classificazione proposti nei precedenti lavori.

2.4 Approccio intensimetrico

La timpanometria è uno dei test audiologici oggettivi che trae vantaggio dall'impiego delle tecniche di misura basate sulle microsonde pressione-velocità. Al fine di misurare l'impedenza del timpano si è rivelata particolarmente utile la tecnica intensimetrica che può essere estesa all'acquisizione delle emissioni otoacustiche con piccole modifiche allo stesso protocollo speri-

mentale. Dal punto di vista tecnologico lo studio si basa sull'utilizzo di sensori di nuova generazione per la determinazione della velocità delle particelle di campo acustico e su un'attenta calibrazione delle sonde intensimetriche [12].

Stanzial e collaboratori avevano previsto la possibilità di utilizzare le tecniche intensimetriche per misurare l'impedenza del timpano già nel 2012 [6], e di estenderne l'utilizzo all'acquisizione OAE [7]; l'efficacia di questo tipo di applicazione è stata successivamente confermata dal lavoro di Moleti nel 2017 nel caso delle Distortion Product OAE [13]. Inoltre, l'approccio intensimetrico può sfruttare le caratteristiche vettoriali del campo acustico per identificare la direzione di provenienza del suono. Questo aspetto risulta di particolare importanza per la realizzazione di un udito artificiale binaurale con capacità di localizzazione.

3. Conclusione

La linea di ricerca proposta conduce a nuove conoscenze nel campo della percezione uditiva dirette, in particolare, verso la realizzazione di un sistema uditivo artificiale in cui sia possibile, ad esempio, la percezione di spazialità e la determinazione del pitch di un suono complesso; in un approccio integrato dei diversi aspetti multidisciplinari ci si propone di analizzare quegli elementi fisici e psicoacustici che condurranno verso una realtà virtuale acustica. In particolare, il modello del sistema uditivo apre le porte anche allo sviluppo di applicazioni sempre più efficienti che vanno dalla robotica (sensi artificiali), alla comunicazione cellulare (intelligibilità del parlato), alla medicina (diagnosi, protesi acustiche, coclee artificiali).

4. Bibliografia

- [1] Cartwright J.H., González D.L., Piro O., *Pitch perception: A dynamical-systems perspective*, Proceedings of the National Academy of Sciences, **98**(9), (2001), pp. 4855-9.
- [2] Cartwright J.H., González D.L., Piro O., *Dynamical Systems, Celestial Mechanics, and Music: Pythagoras Revisited*, The Mathematical Intelligencer, **23** (2020), pp.1-5.
- [3] Gelfand M., Piro O., Magnasco M.O., Hudspeth A.J., *Interactions between hair cells shape spontaneous otoacoustic emissions in a model of the tokay gecko's cochlea*, PLoS One, **5**(6) (2010), pp. e11116.
- [4] González D.L., Grassi L., Maurizi A., *A new kind of locked circuit: the Quasi-Periodic Locked Loop (Q-PLL)* (2020). TechRxiv. Preprint <https://doi.org/10.36227/techrxiv.13385591.v1>
- [5] Zimatore G., Cavagnaro M., Skarzynski P.H., Fetoni A.R., Hatzopoulos S., *Detection of Age-Related Hearing Losses (ARHL) via Transient-Evoked Otoacoustic Emissions*, Clinical Interventions in Aging, **15** (2020), p.927.
- [6] Stanzial D., Shiffner G., and Sacchi G., *On the physical meaning of the power factor in acoustics*, J. Acoust. Soc. Am. **131**, (2012) pp. 269–280
- [7] Zimatore G., Stanzial D. and Orlando M.P., *Otoacoustic emissions*, Chapter 9 of Acoustic Emission. Research and Applications, Dr. Wojciech Sikorski (Ed.), ISBN: 978-953-51-1015-6, InTech, XcityXX 2013
- [8] González D.L. and Maurizi A. "Circuit and method for modeling and emulating the pitch perception of complex sounds," Italian patent application IT102 019 000 021 111, Nov. 13, 2019
- [9] Zimatore G., Garilli, G.Pocolieri M., Rafanelli C., Gizzi F.T, Lazzari M. *The remarkable coherence between two Italian far away recording stations points to a role of acoustic emissions from crustal rocks for earthquake analysis*. Chaos (Woodbury, N.Y.) **27** (2017) pp. 043101. DOI: 10.1063/1.4979351 22. 2017.
- [10] Orlando G. and Zimatore G., *Recurrence Quantification Analysis on a Kaldorian Business Cycle Model Nonlinear dynamics*, Nonlinear Dynamics, **33** (2020) DOI 10.1007/s11071-020-05511-y
- [11] Zimatore G., Gallotta M.C., Innocenti L., Bonavolontà V., Ciasca G., De Spirito M., Guidetti L., Baldari C., *Recurrence quantification analysis of heart rate variability during continuous incremental exercise test in obese subjects*, Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science **30**(3), (2020)
- [12] Stanzial D., Graffigna C.E., *Effetti di diversi tipi di calibrazione sul monitoraggio energetico di guide d'onda acustiche*, 46° Convegno Nazionale Pesaro, 29-31 maggio 2019 Associazione Italiana di Acustica, ISBN: 978-88-88942-59-9
- [13] Sisto R., Cerini L., Sanjust F., Moleti A. *Intensimetric detection of distortion product otoacoustic emissions with ear canal calibration*. The Journal of the Acoustical Society of America, **142**(1) (2017), pp. EL13-7.