

La localizzazione uditiva dei suoni nello spazio*

di Georges Canévet

1. Introduzione

La localizzazione delle fonti sonore è una delle funzioni fondamentali del sistema uditivo. Essa viene assicurata da una serie di strutture che vanno dall'orecchio esterno alle aree uditive corticali. Esse sono presentate in Barone¹ o nelle monografie delle edizioni INSERM/SFA.² Queste strutture operano una decodifica particolare del campo acustico che raggiunge i timpani. Esse procedono innanzi tutto a un trattamento appropriato del segnale acustico, in particolare la traduzione delle onde meccaniche in attività elettrica neurale. Le risposte uditive così generate vengono poi integrate alle altre informazioni sensoriali e cognitive disponibili, per giungere alla costruzione della nostra percezione dello spazio sonoro.

Le caratteristiche del campo acustico pertinenti alla localizzazione uditiva sono spesso chiamate "indici". Le più conosciute sono le differenze interaurali di livello, di fase e di tempo; esse vengono utilizzate per valutare la posizione laterale dei suoni rispetto all'osservatore. Ve ne sono altre, più complesse e più difficili da definire, che appaiono essenzialmente come delle modificazioni spettrali specifiche dei segnali incidenti. Questi indici spettrali ser-

*Versione rivista e ampliata dall'autore G. Canévet, "La localisation auditive des sons dans l'espace", in *Le Son et l'Espace*, Grame Aléas (1998).

1 P. Barone, "Bases neurophysiologiques de la localisation spatiale des sons", in H. Genevois, Y. Orlarey (a c. di), *Le son et l'espace*, Aléas - Grame, Lyon 1998, pp. 33-40.

2 Ad esempio in A. Dancer, "Biomécanique de l'audition", in J.M. Aran, A. Dancer, J.M. Dolmazon, R. Pujol e Tran Ba Huy (a c. di), *Physiologie de la cochlée*, Editions INSERM/SFA, Paris 1988; E.M. Rouiller, "Organisation fonctionnelle des voies auditives", in R. Romand (a c. di), *Le système auditif central - Anatomie et physiologie*, Editions INSERM/SFA, Paris 1992, pp. 1-50.

vono in particolare alla localizzazione nel piano verticale medio. In altre parole, si può ammettere in prima analisi che la localizzazione in una qualsiasi direzione dello spazio derivi dall'utilizzazione combinata di questi due tipi di indice. Aggiungiamo infine che nella percezione uditiva spaziale intervengono anche dei meccanismi detti "cognitivi" ma, attualmente, tali meccanismi sono poco conosciuti.

In questo scritto presenteremo in sintesi la questione della localizzazione di una fonte unica, poi affronteremo quella della localizzazione di fonti multiple. La prima categoria di problemi permetterà di analizzare in dettaglio gli aspetti psicoacustici puri della localizzazione uditiva. La seconda categoria servirà piuttosto a presentare alcuni fatti accertati della percezione degli ambienti sonori reali.

2. *Le differenze interaurali del campo acustico*

Per semplificare le cose i nostri predecessori hanno innanzi tutto esaminato la questione della localizzazione nel piano orizzontale, ovvero l'identificazione azimutale di una fonte acustica unica. Essi hanno stabilito che questa identificazione azimutale veniva effettuata tramite l'esame delle differenze di livello create dalla fonte sulle orecchie e delle differenze di fase o di tempo di arrivo dei segnali. Senza entrare nel dettaglio dell'analisi bibliografica, disponibile in Blauert³ o Canévet,⁴ è doveroso citare gli autori principali. I lavori più antichi hanno dimostrato il ruolo svolto dalle differenze interaurali di intensità.⁵ In seguito Rayleigh ha proposto nel 1877 una teoria più elaborata nella quale fa notare che da sole le differenze di intensità non pos-

3 J. Blauert, *Spatial Hearing. The psychophysics of human sound localization*, The MIT Press, Cambridge Mass. 1983.

4 G. Canévet, "Audition binaurale et localisation auditive: aspects physiques et psychoacoustiques", in *Psychoacoustique et perception auditive*, Editions INSERM/SFA/CNET, Paris 1989, pp. 83-119.

5 J.B. Venturi, *Considérations sur la connaissance de l'étendue que nous donne le sens de l'ouïe*, in «Magasin Encyclopédique ou Journal des Sciences, des Lettres et des Arts», 1796, n. 3, pp. 29-37.

sono spiegare tutto.⁶ A suo avviso è necessario ricorrere a un'altra grandezza fisica: la differenza interaurale di fase. Nella sua teoria Rayleigh ha precisato gli intervalli di frequenza entro i quali possono agire rispettivamente la fase e l'intensità. La fase è utile nei gravi e fino a circa 1500 Hz; l'intensità prende il sopravvento per i medi e gli acuti, al di sopra dei 1500 Hz. Le ricerche successive hanno confermato ed affinato le previsioni teoriche di Rayleigh.

Per quanto riguarda le differenze interaurali di tempo, bisogna comunque precisare che sono di due tipi. Quando si tratta di suoni puri prolungati, sufficientemente lunghi, la differenza di fase creata dalla diffrazione attorno alla testa permette l'identificazione dell'azimut della fonte, nei limiti delle frequenze indicate più sopra. Ma quando si tratta di impulsi, o di brevi serie di onde, quest'indice scompare. Il sistema uditivo deve quindi valutare le differenze istantanee degli involucri dei segnali a sinistra e a destra per dedurre l'azimut. Questo indice temporale è valido su tutto lo spettro udibile.

I valori esatti delle differenze interaurali di tempo sono delicati da determinare; essi dipendono dalle caratteristiche temporali precise dei segnali acustici considerati.⁷ Se si accetta la semplificazione dell'acustica geometrica, è tuttavia possibile determinarne un valore teorico approssimato. Il modello geometrico più noto è quello di Woodworth.⁸ In questo modello la testa dell'osservatore è schematizzata da una sfera, e la differenza interaurale di tempo d'arrivo a due punti diametralmente opposti si deduce dalla differenza di marcia (dT) di due raggi sonori provenienti dall'infinito con un'incidenza a . La formula risultante è $dT = r/c(a + \sin a)$, in cui r è il raggio della sfera e c la velocità del suono. D'altro canto, Feddersen e i suoi collaboratori hanno pubblicato i risultati di misurazioni su impulsi.⁹ Riportiamo la curva

6 Lord Rayleigh (J.W. Strutt), *Acoustical observations*, in «Philosophical Magazine», 1877, n. 3, pp. 456-464.

7 G.F. Kuhn, *Model for the interaural time differences in the azimuthal plane*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1977, n. 62, pp. 157-167; Idem, «Physical acoustics and measurements pertaining to directional hearing», in W.A. Yost, G. Gourevitch (a. c. di), *Directional Hearing*, Springer-Verlag, New York 1987, pp. 3-25.

8 R.S. Woodworth, *Experimental Psychology*, Henry Holt & Company, New York 1938.

9 W.E. Feddersen, T.T. Sandel, D.C. Teas e L.A. Jeffress, *Localization of high-frequency tones*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1957, n. 29, pp. 988-991.

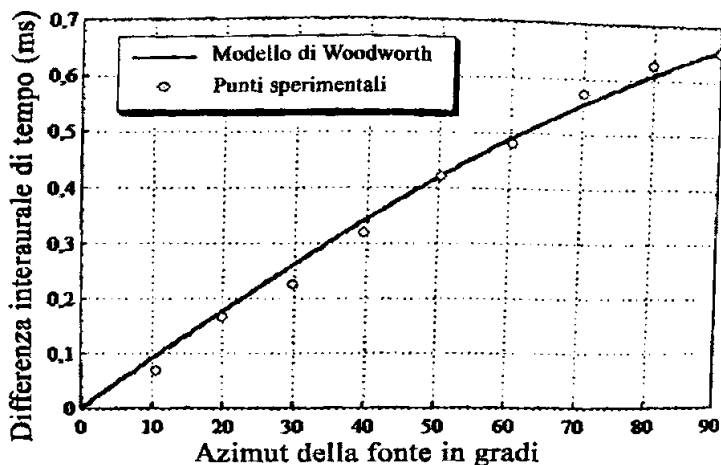


FIGURA 1 Differenze interaurali di tempo di arrivo di impulsi alle orecchie, misurate e calcolate a partire dal modello di Woodworth, in funzione della posizione laterale della fonte.

rappresentativa della funzione di Woodworth, assieme ad alcuni punti sperimentali di Feddersen. Si noter  che il massimo ritardo interaurale naturale   all'incirca di 700 microsecondi [FIGURA 1]. Introducendo artificialmente dei ritardi superiori tramite cuffia, si possono creare degli effetti percettivi interessanti che non sono ancora stati studiati.

Le differenze interaurali di fase sono state misurate e pubblicate a pi  riprese.¹⁰ La loro valutazione teorica   ugualmente possibile utilizzando il modello della sfera, ma soltanto prendendo in considerazione gli effetti di diffrazione.¹¹ Di seguito presentiamo i risultati teorici ottenuti (linea continua) cos  come un certo numero di punti sperimentali tratti da Mills [FIGURA 2]. La manipolazione separata di quest'indice pu  condurre a delle situazioni "conflittuali" dal punto di vista della percezione (cfr. par. "La localizzazione in sala").

¹⁰ Cfr. A.W. Mills, *On the minimum audible angle*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1958, n. 30, pp. 237-246.

¹¹ Cfr. G. Canévet, *Aspects physiques de la détection et de la localisation masqu es*, in «Acustica», 1985, n. 57, pp. 122-132; G. Canévet, "Audition binaurale et localisation...", cit.

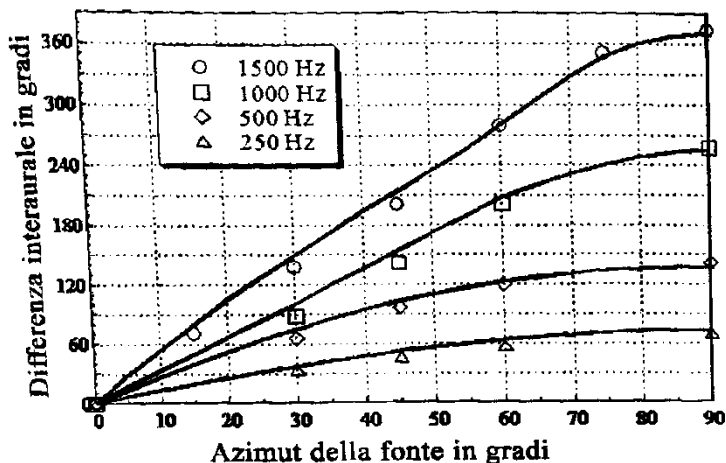


FIGURA 2 Differenze interaurali di fase in funzione dell'azimut della fonte. Valori calcolati (Canévet, linee continue) e valori misurati (Mills, simboli).

Le differenze interaurali di livello, invece, variano moltissimo con la frequenza e con l'azimut. Interi cataloghi sono stati pubblicati, e noi raccomandiamo in particolare quello di Abbagnaro e dei suoi coautori.¹² Sono tipiche le curve che forniscono la compressione sulle orecchie rispetto al campo incidente, in funzione della frequenza. In generale la compressione è prossima a 0 dB nelle basse frequenze: ciò significa che l'ascoltatore non provoca forti perturbazioni del campo acustico, perché la lunghezza d'onda è grande rispetto alle dimensioni della testa umana. In seguito, la compressione aumenta con la frequenza sino a circa 3-4 kHz, poi decresce, raggiungendo il minimo di antirisonanza intorno agli 8 kHz, per poi risalire di nuovo. Negli estremi acuti le variazioni di livello diventano effettivamente molto complesse, a causa degli effetti di diffrazione dovuti in particolare al padiglione (cfr. figure 1 e 2).

¹² L.A. Abbagnaro, B.B. Bauer e E.L. Torick. *Measurements of diffraction and interaural delay of a progressive sound wave caused by the human head*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1975, n. 58, pp. 693-700.

Munito di questi indici di livello, di fase e di tempo, l'ascoltatore può determinare la direzione dei suoni, grazie ad alcune strutture nervose specifiche del sistema uditivo,¹³ che esso utilizza come correlatori. La determinazione viene fatta con una buona approssimazione: tutte le ricerche effettuate sulla questione delle capacità di localizzazione nel piano orizzontale lo dimostrano. La piú recente di esse è forse quella di Middlebrooks.¹⁴ I fatti possono essere riassunti nel modo seguente: la precisione della localizzazione è massima per una fonte che si trova di fronte o vicina al piano sagittale, dove l'errore di giudizio è dell'ordine di 1°; man mano che la fonte si allontana sul lato, la precisione diminuisce e raggiunge un errore di una decina di gradi per una fonte laterale a 90°; esiste una discreta simmetria tra i risultati ottenuti davanti e dietro.

3. *Le bande di direzione del piano verticale mediano*

Per una fonte situata nel piano verticale mediano dell'osservatore la situazione è totalmente diversa; in questo caso praticamente non si dispone piú di differenze interaurali di campo acustico. In effetti, la localizzazione spaziale risulta qui piú difficile che nel piano orizzontale. Il potere di risoluzione è debole e l'incertezza nella localizzazione può raggiungere i 15-20 gradi per una fonte al di sopra della testa.¹⁵

In realtà ci si è accorti che nel piano verticale la direzione percepita non corrispondeva necessariamente alla direzione di incidenza reale dei suoni. Piú precisamente, è stato notato che il sistema uditivo sembrava localizzare la fonte in una direzione determinata dallo spettro del suo segnale. La dimostrazione è stata fatta da

13 Cfr. A. Aschoff, "Complexe de l'olive supérieure et lemnisque latéral", in R. Romand (a. c. di), *Le système auditif central - Anatomie et physiologie*, Editions INSERM/SFA, Paris 1992, pp. 109-150.

14 J.C. Makous, J.C. Middlebrooks, *Two-dimensional sound localization by human listeners*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1990, n. 87, pp. 2188-2200. J.C. Middlebrooks, *Narrow-band sound localization related to external ear acoustics*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1992, n. 92, pp. 2607-2624.

15 Cfr. P. Damaske, B. Wagener, *Richtungshörversuche über einen nachgebildeten Kopf*, in «Acustica», 1969, n. 21, pp. 30-35.

Blauert.¹⁶ Secondo le risposte degli ascoltatori sottoposti alla prova, i suoni sembrano quasi sempre provenire da davanti, se il loro spettro appartiene alle bande 250-500 Hz o 2-4 kHz. Sembrano al contrario provenire da dietro, quando il loro spettro è compreso nelle bande 700-2000 Hz e 10-15 kHz [FIGURA 3]. Infine, solo la regione degli 8 kHz può procurare l'impressione che un suono venga da sopra. Questa divisione in tre zone è arbitraria, e la si deve considerare come una prima approssimazione. Recenti misurazioni di Chateau hanno tuttavia confermato il tenore di questi risultati e li hanno anche precisati.¹⁷ Ne deriva che lo spettro udibile è diviso in diversi ambiti, ognuno dei quali condiziona la direzione apparente di un suono quando la sua frequenza appartiene a questo ambito; e tale direzione è indipendente dalla direzione di incidenza reale del suono. Questi intervalli di frequenza sono stati chiamati da Blauert "bande determinanti della direzione", o "bande di direzione". La loro descrizione, a partire dai risultati di Blauert e di Chateau, viene fornita nella figura 3: le ordinate indicano la percentuale di risposte "davanti", "sopra" e "dietro" in funzione della frequenza; per ragioni di chiarezza i dati corrispondenti sono stati suddivisi in tre grafici.

L'interpretazione di questi risultati è facile a partire dalla nozione di "funzioni di trasposizione delle orecchie" (rapporto tra lo spettro del campo acustico sui timpani e lo spettro del campo incidente). Queste funzioni sono state misurate per fonti situate rispettivamente di fronte, sopra e dietro rispetto all'osservatore. Le misurazioni permettono di distinguere nettamente degli intervalli di frequenze nei quali si osserva una compressione apprezzabile a livello del timpano per alcune posizioni particolari delle fonti. Esiste una strettissima correlazione tra gli intervalli di frequenze (dette "bande accentuate") nei quali appaiono tali compressioni

16 J. Blauert, *Sound localization in the median plane*, in «Acustica», 1969/70, n. 22, pp. 205-213.

17 N. Chateau, *Élévation apparente de sons purs dans le plan vertical médian: effets du masquage et de la sonie*, in «Acta Acustica united with Acustica» LXXXII (1996), n. 1, pp. 132-148; N. Chateau, *Localisation de sources multiples dans l'hémisphère supérieur*, Thèse de Doctorat d'Acoustique, Université d'Aix-Marseille II, septembre 1996.

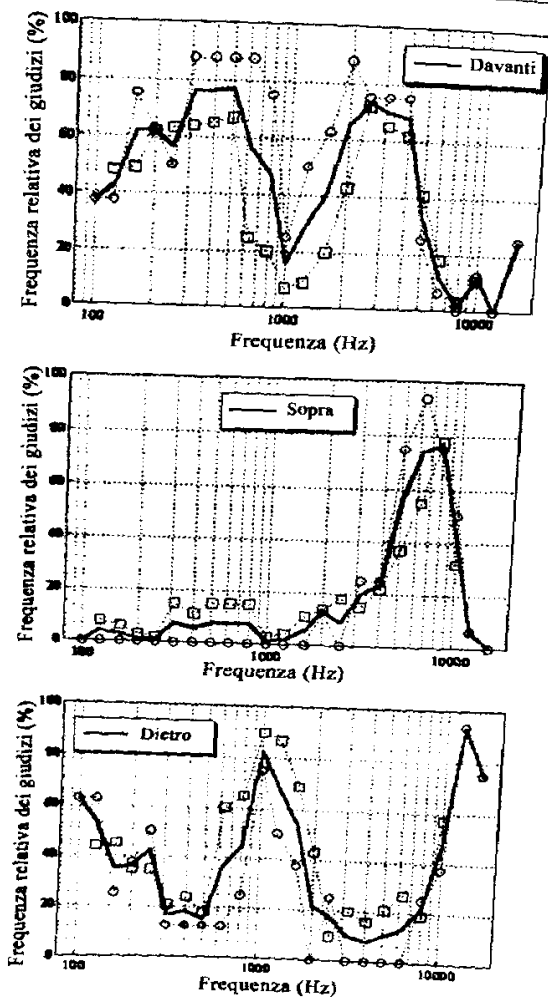


FIGURA 3 Direzione apparente dei suoni presentati nel piano verticale mediano. I punti di misura sono tratti da Blauert per i simboli quadrati e da Chateau per i simboli rotondi. La linea continua rappresenta la media dei due studi.

e quelli nei quali la direzione apparente della fonte coincide con la sua direzione reale.

La conclusione delle ricerche di Blauert, confermate da Chateau, è che la sensazione di direzione nel piano verticale mediano sia determinata dalle zone spettrali in cui il segnale possiede il massimo dell'energia. Se il segnale è un suono puro o dallo spettro limitato, esso può essere localizzato in una direzione completamente diversa da quella reale. Man mano che l'estensione spettrale del segnale aumenta, vi saranno sempre più bande di direzione "alimentate". La sensazione complessiva corrispondente permetterà allora un'identificazione sempre più precisa della direzione della fonte. Tuttavia, un segnale, il cui spettro presenti un picco intorno agli 8 kHz, tenderà sempre a creare un'impressione di elevazione della fonte che l'ha emesso.

4. Il ruolo fondamentale del padiglione

È accettato, da circa trent'anni, che la localizzazione al di fuori del piano orizzontale si basa in gran parte sulla codifica realizzata dai padiglioni delle orecchie.¹⁸ Diversi autori hanno in effetti dimostrato che il padiglione esercita un effetto di filtraggio sul segnale acustico che vi penetra. Questo filtraggio è estremamente complesso e particolare, e soprattutto varia specificamente con la direzione di incidenza del suono. Esso interviene se la frequenza del segnale è sufficientemente elevata, diciamo a partire dai 2 kHz, quando la lunghezza d'onda è sufficientemente piccola in rapporto alle dimensioni del padiglione. Ciò è stato ampiamente dimostrato dalle misurazioni di Shaw e Teranishi.¹⁹ Si può fornire una presentazione schematica dei risultati di questi autori, per due incidenze laterali differenti: una in orizzontale, l'altra in verticale [FIGURA 4].

¹⁸ Cfr. D.W. Bateau, *The role of the pinna in human localization*, in «Proceedings of the Royal Society of London», 1967, series B, vol. 168, n. 1011, pp. 158-180.

¹⁹ E.A.G. Shaw, R. Teranishi, *Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ears by a nearby sound source*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1968, n. 44, pp. 240-249.

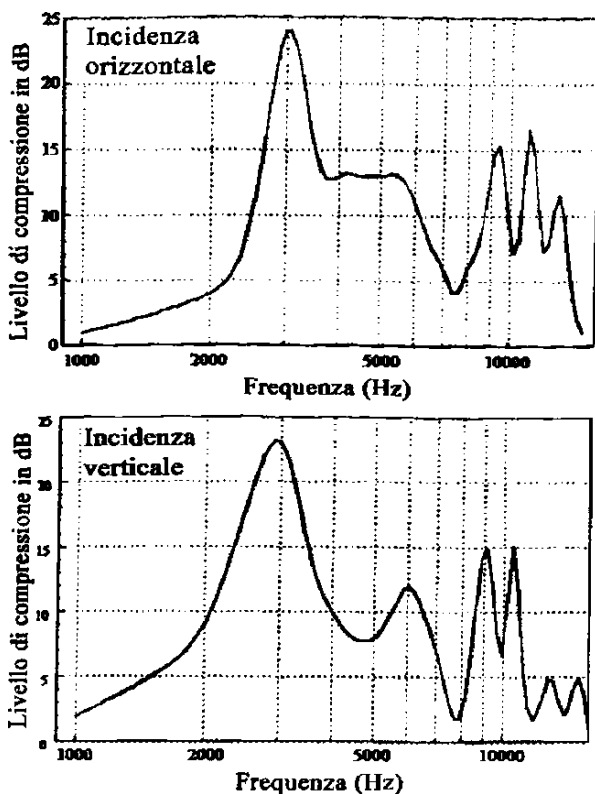


FIGURA 4 Funzioni di trasposizione in ampiezza del padiglione dell'orecchio per una fonte laterale situata nel piano orizzontale (grafico superiore) o nel piano verticale. Rappresentazione schematizzata, dedotta dai dati di Shaw e Teranishi.

Come viene interpretato questo filtraggio dal sistema uditivo? Si possono scegliere due approcci. Il primo, adottato da Shaw e Teranishi,²⁰ consiste nel considerare il padiglione e il condotto uditivo come un insieme di risonatori. Si vede bene, dai loro risul-

²⁰ *Ibidem.*

tati (cfr. figura 4), che l'orecchio esterno è la sede di molteplici risonanze la cui prima frequenza propria appare intorno ai 3 kHz. Le successive si collocano tra 7 e 15 kHz, seguendo la direzione della fonte. Di conseguenza, il dosaggio specifico delle diverse risonanze produce una risultante che dipende dalla direzione del suono. Questo dosaggio di risonanze, variabile con l'incidenza, costituirebbe una sorta di chiave che permette la localizzazione (è facile stabilire un'analogia tra la forma degli spettri nella figura 4 e quella di una chiave).

L'altro approccio è stato proposto da Batteau nel 1967 e ripreso da Wright e altri.²¹ e da Watkins.²² Questo secondo approccio considera il padiglione come sistema di molteplici riflettori. Secondo questo punto di vista, le diverse pieghe del padiglione rinviano una parte del segnale incidente verso il condotto uditivo. Ognuna di queste riflessioni viene ad aggiungersi al segnale primario incidente con un certo ritardo. Questi ritardi sono in funzione dell'incidenza (tra 2 e 80 microsecondi per l'azimut, tra 100 e 300 microsecondi per l'altezza). La combinazione delle onde dirette e riflesse sarebbe caratteristica del valore del ritardo, quindi dell'incidenza. Quando i ritardi sono brevi, il segnale ritardato introduce un'attenuazione delle frequenze acute. Man mano che i ritardi aumentano, lo spettro del segnale incidente si trova modulato in diversi massimi e minimi (come se subisse un filtraggio a pettine). Queste deformazioni spettrali non vengono percepite come modificazioni di timbro, ma come cambiamenti di direzione di uno stesso segnale.

In sintesi, l'effetto del padiglione su un segnale acustico è equivalente a quello di un filtro. Questo effetto si traduce con delle amplificazioni selettive, o delle attenuazioni spettrali, applicate al segnale incidente in un modo che dipende specificamente dalla direzione della fonte. La percezione spaziale, nel senso della localizzazione, dipende quindi dalle variazioni di questo filtraggio,

²¹ D. Wright, J.H. Hebrank e B. Wilson, *Pinna reflections as cues for localization*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1974, n. 56, pp. 957-962.

²² A.J. Watkins, *Psychoacoustic aspects of synthesized vertical local cues*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1978, n. 63, pp. 1152-1165.

una sorta di relazione biunivoca tra la posizione della fonte e il campo acustico sui timpani. A ogni filtraggio, quindi a ogni funzione di trasposizione, corrisponde una direzione di incidenza, che l'ascoltatore ha imparato a riconoscere. Ed è questa associazione acquisita tra filtraggio e direzione che viene impiegata nelle attuali tecniche di simulazione dello spazio sonoro soggettivo tramite cuffia (cfr. par. "Simulazione dello spazio sonoro soggettivo").

5. *Gli indici di percezione della distanza*

Il sistema uditivo generalmente non permette di valutare la distanza da una fonte. Può riuscirci in certi casi, per esempio se si tratta di una fonte nota o "familiare". Certe caratteristiche del campo acustico possono tuttavia creare la sensazione che la fonte si avvicini o si allontani: sono le variazioni di intensità, le variazioni del rapporto delle energie tra il suono diretto e il suono riverberato quando esso è presente, e infine alcune modificazioni spettrali particolari.

Quando una fonte, che emette a livello costante, si allontana da un ascoltatore, l'intensità acustica che raggiunge le orecchie dell'ascoltatore diminuisce. Al contrario, riducendo l'intensità globale di un suono prodotto da una fonte fissa deve essere possibile, in certe condizioni di ascolto, creare un'impressione di allontanamento di questa fonte. Stevens e Guirao,²³ poi Col e Canévet,²⁴ hanno studiato tale questione. Secondo loro, la distanza apparente di una fonte varia con il livello del suono come una funzione di potenza a esponente negativo; in altre parole, il logaritmo della distanza apparente decresce in modo lineare quando il livello aumenta. Ma questi studi dovrebbero essere approfonditi.

Il secondo indice fa riferimento all'esperienza quotidiana: quando in una sala un locutore si allontana, il rapporto tra il suono diretto e il suono riverberato decresce. Di conseguenza,

²³ S.S. Stevens, M. Guirao, *Loudness, reciprocity, and partition scales*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1962, n. 34, pp. 1466-1471.

²⁴ J.P. Col, G. Canévet, *Perception auditive spatiale en écoute monaurale*, in «Acustica», 1990, n. 71, pp. 50-57.

siamo abituati ad associare questo decrescere relativo del suono diretto ad un allontanamento della fonte. Per questo esso diventa un indice per la valutazione della distanza. Questo effetto è noto da molto tempo, ma è stato soprattutto esaminato recentemente da Mershon e King, che volevano in particolare tenere conto della riverberazione e della diminuzione di intensità del suono diretto.²⁵ I loro risultati possono essere sintetizzati nel modo seguente: le differenze di intensità, prese isolatamente, non permettono di valutare la distanza, ma sono utilizzabili per apprezzarne le variazioni in modo abbastanza sottile. Al contrario la riverberazione sembra avere una qualità di indice assoluto, che permette il posizionamento di una fonte soprattutto nello spazio vicino all'individuo. Maggiore è la riverberazione, maggiore è la distanza percepita.

Infine, sappiamo tutti che la densità spettrale di un segnale acustico varia nel corso della sua propagazione, a causa dell'assorbimento disuguale dei gravi e degli acuti. Così un soggetto è capace, dopo un certo allenamento, di valutare le distanze relative di emissione con una precisione accettabile. Inversamente, tramite filtraggio appropriato del segnale, è possibile creare la sensazione di allontanamento o di avvicinamento di una fonte immobile. È ciò che hanno fatto in particolare Butler e altri.²⁶ Manipolando la composizione spettrale dei segnali, sono riusciti a dare ad alcuni ascoltatori l'impressione che la loro distanza apparente variasse; in particolare, i rumori sottoposti a filtro passa-basso sembrano molto più lontani dei rumori sottoposti a filtro passa-alto. È inoltre interessante notare nei loro esperimenti che l'azimut percepito variava anch'esso un poco con le caratteristiche spettrali. I segnali dallo spettro grave tendono ad essere localizzati dietro e ciò tanto più quanto più sono gravi. I segnali dallo spettro acuto sono al contrario localizzati piuttosto correttamente.

²⁵ D.H. Mershon, L.E. King, *Intensity and reverberation as factors in the auditory perception of egocentric distance*, in «Perception & Psychophysics», 1975, n. 18, pp. 409-415.

²⁶ R.A. Butler, E.T. Levy e W.D. Neff, *Apparent distance of sounds recorded in echoic and anechoic chambers*, in «Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance», 1980, n. 6, pp. 745-750.

6. Effetto stereofonico, effetto di precedenza, adattamento

La presentazione proposta nei paragrafi precedenti riguardava la localizzazione di una fonte unica. Si tratta secondo noi dell'approccio migliore per descrivere i meccanismi di base della percezione uditiva spaziale. Nella realtà, è più frequente che si debba localizzare una fonte in presenza di altre fonti, o in mezzo al rumore, o in una sala. Il campo totale, che risulta dall'irradiazione di diverse fonti, genererà anche delle differenze interaurali di tempo e di intensità e creerà quindi una sensazione di localizzazione globale. Tuttavia, l'azimut apparente della fonte risultante non sarà, salvo eccezioni, confuso con quello di una delle fonti reali che l'hanno creata. Nel caso più frequente il suono sembrerà provenire da una direzione dello spazio nella quale non vi è alcuna fonte, ovvero proverrà da una cosiddetta fonte virtuale.

L'effetto stereofonico è l'esempio più conosciuto di fonti acustiche virtuali. Da molti anni siamo in grado di spostare l'immagine sonora creata da due altoparlanti agendo sulle differenze di livello dei segnali. Una presentazione generale di queste tecniche e dei loro effetti è stata fatta da Gardner.²⁷ Per quanto riguarda le differenze di livello, uno studio completo è stato condotto da Leakey, utilizzando due altoparlanti situati simmetricamente rispetto all'osservatore, nella posizione abituale dell'ascolto stereofonico.²⁸ Egli ha mostrato che l'azimut apparente si sposta costantemente dall'altoparlante di sinistra a quello di destra quando la loro differenza di livello passa da circa -15dB (sinistra più forte) a $+15\text{dB}$ (destra più forte). Anche una differenza di fase tra gli altoparlanti può spostare l'immagine risultante. In particolare manipolando correttamente le alimentazioni delle fonti, si può dare l'impressione di fonti in movimento.²⁹ Uno studio teorico

²⁷ M.B. Gardner, *Historical background of the Haas and/or precedence effect*, in «Journal of Acoustical Society of America», 1968, n. 43, pp. 1243-1248.

²⁸ D.M. Leakey, *Some measurements of the effects of interchannel intensity and time differences in two-channel sound systems*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1959, n. 31, pp. 977-986.

²⁹ Cfr. J.M. Chowning, *The simulation of moving sound sources*, in «Journal of the Audio Engineering Society», 1971, n. 19, pp. 2-6.

di questi effetti, basati su dei calcoli di diffrazione di una sfera, è stato effettuato da chi scrive.³⁰

Quando le fonti reali generatrici di fonti virtuali non funzionano simultaneamente, si possono presentare dei fenomeni speciali, e in particolare un effetto detto di *precedenza* (chiamato a volte "effetto di Haas"³¹), che è uno degli effetti fondamentali dell'ascolto stereofonico. Se si ascolta una registrazione stereofonica ponendosi a uguale distanza dagli altoparlanti, si ha la sensazione che il suono provenga da una fonte situata al centro dei due altoparlanti. Se invece ci si avvicina ad uno degli altoparlanti, il segnale arriva alle orecchie prima in tale direzione che nell'altra, e si ha la sensazione che il suono provenga solo dall'altoparlante più vicino. Ciò illustra il cosiddetto effetto di precedenza. Quindi il principio dell'effetto di precedenza è che quando uno stesso segnale viene emesso successivamente da due o più fonti con un lieve ritardo tra le emissioni, l'orecchio fonde l'insieme in un segnale che viene generalmente localizzato nella direzione della fonte che è stata alimentata per prima.

L'effetto di precedenza appare tuttavia unicamente sui transienti (percussioni, strumenti a corda e parlato, per esempio). Esso è inesistente con dei suoni puri continui, tranne che alla partenza. Esso dipende, inoltre, dal ritardo tra le fonti. Come regola generale, per una coppia di fonti situate simmetricamente rispetto ad un osservatore, la fonte virtuale passa dal centro all'altoparlante laterale quando il ritardo tra i segnali varia da 0 a 1 ms circa. Essa resta confusa con questo altoparlante per uno sfasamento compreso tra 1 e 50 ms, a seconda del tipo di segnale. Oltre i 50 ms la separazione diventa sempre più netta. Essa è totale per un ritardo tra i 70 e i 100 ms, ossia vengono percepiti due suoni successivi provenienti dai rispettivi altoparlanti.

Questa costruzione puramente uditiva della direzione apparente di una fonte sonora può essere fortemente influenzata da un certo numero di altre strutture o funzioni, non necessariamente

³⁰ G. Canévet, *Aspects physiques de la détection...*, cit.

³¹ H. Haas, *Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache*, in «Acustica», 1951, n. 1, pp. 49-58.

uditive. L'effetto piú noto è quello della vista, le cui vie nervose sappiamo che interagiscono con quelle dell'udito. Inoltre è stato rilevato l'intervento di meccanismi cognitivi molto discreti e sottili, ad esempio nell'apparizione dell'effetto di precedenza.³² Questa apparizione non è istantanea, poiché i processi cognitivi implicati agiscono lentamente (diverse centinaia di millisecondi). Essa può anche interrompersi facilmente, poiché l'effetto di precedenza si costruisce sullo "scenario sonoro" in atto: un cambiamento nello scenario richiederà una nuova risposta uditiva adeguata.³³ Infine, la presenza di rumore o di interferenze varie può modificare la costruzione dell'effetto di precedenza.³⁴

In certe condizioni, un altro fenomeno interessante appare per dei ritardi ancora maggiori: l'adattamento a medio termine.³⁵ L'adattamento modifica la direzione apparente di un suono quando l'ascoltatore è stato precedentemente esposto a un suono dalle stesse caratteristiche spettrali, ma di direzione differente. Le condizioni di apparizione di questo fenomeno non sono state ancora interamente determinate. Si possono tuttavia riportare qui le condizioni sperimentali nelle quali esso è stato scoperto. Si tratta di un esperimento in camera anecoica, durante il quale il soggetto si trova di fronte a un altoparlante che emette un suono continuo, e un secondo suono viene emesso da un altoparlante laterale (15° a destra). A seconda del ritardo tra il suono frontale e quello laterale, l'azimut apparente del secondo può variare considerevolmente. All'inizio (suoni simultanei) la posizione dell'immagine dipende dalla relazione di fase tra i suoni.³⁶ Dopo qualche millisecondo,

32 Cfr. T. Djelani, J. Blauert, *Investigations into the build-up and breakdown of the precedence effect*, in «Acta Acustica united with Acustica» LXXXVII (2001), pp. 253-261.

33 Cfr. R.K. Clifton, *Breakdown of echo suppression in the precedence effect*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1987, n. 82, pp. 1834-1835.

34 Cfr. E.R. Hafter, T.N. Buell, D.A. Basiji e E.E. Schriberg, "Discrimination of direction of complex sounds presented in the free field", in H. Duifhuis, J.W. Horst e H.P. Wit (a c. di), *Basic issues of Hearing*, Academic Press, London 1988, pp. 394-401. Cfr. anche J. Blauert, G. Canévet e T. Voinier, *The precedence effect: No evidence for an active release found*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1989, n. 85, pp. 2581-2586.

35 Cfr. G. Canévet, S. Meunier, *Effect of adaptation on auditory localization and lateralization*, in «Acustica», 1996, n. 82, pp. 149-157.

36 Cfr. G. Canévet, *Aspects physiques de la détection...*, cit.

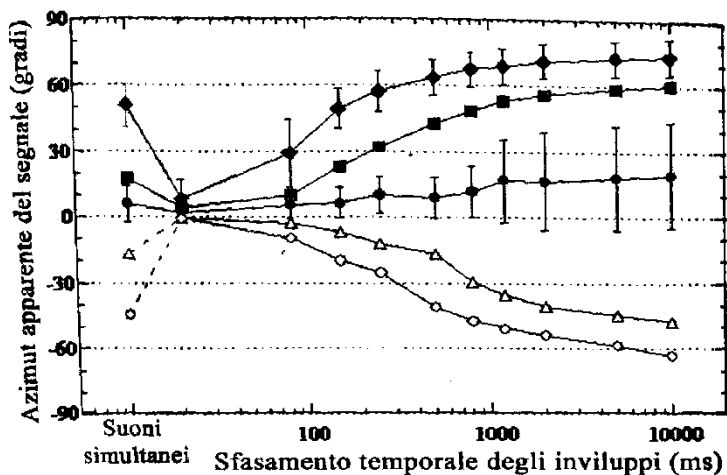


FIGURA 5 Azimut apparente di un suono breve a 4 kHz emesso a 15° sulla destra di un ascoltatore in camera anecoica, dopo esposizione allo stesso suono proveniente da una fonte frontale. L'ascissa indica lo sfasamento tra l'apparizione del suono frontale e quella del suono laterale.

per effetto di precedenza, il secondo suono viene attirato verso il centro. Al di là della zona temporale di azione dell'effetto di precedenza, l'azimut si sposta verso il lato, destro o sinistro, a seconda della posizione iniziale della coppia di suoni simultanei; da notare che lo spostamento può raggiungere i 60-70° [FIGURA 5].

La zona d'intervento dell'effetto di precedenza, una volta apparso, è dell'ordine del centinaio di millisecondi, come abbiamo indicato precedentemente; si tratta dello stesso risultato ottenuto da Rakerd nel corso di misurazioni (totalmente indipendenti) della localizzazione in sala (cfr. par. "La localizzazione in sala").³⁷ L'effetto che ne risulta, che consideriamo una forma di adattamento a medio termine, è certamente dovuto a una lenta variazione della sensibilità uditiva: col variare di tale sensibilità, le differenze interaurali del campo indu-

³⁷ B. Rakerd, W.M. Hartmann, *Localization of sound in rooms, III: onset and duration effects*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1986, n. 80, pp. 1695-1706.

cono una differenza di attività neurale variabile, e quindi una percezione variabile dello spazio sonoro (cfr. figura 5 adattata da Canévet³⁸).

I meccanismi neurofisiologici che sono alla base dell'effetto di precedenza non sono tuttavia ancora conosciuti con certezza. Zurek ha ipotizzato, in seguito a esperimenti appropriati che sarebbe troppo lungo esporre qui, che l'effetto di precedenza possa essere spiegato con una temporanea riduzione della sensibilità differenziale interaurale; una riduzione equivalente, negli effetti, a un'inibizione.³⁹

Prima di concludere, dobbiamo ancora menzionare una forma diversa di adattamento, derivante dalla plasticità del sistema uditivo, che è attualmente oggetto di studi interessanti. Si parte dalla constatazione che un ascoltatore può ancora localizzare abbastanza correttamente una fonte sonora quando le informazioni direzionali che raggiungono le sue orecchie sono falsate; perché ciò sia possibile, è necessario un certo apprendimento. Ad esempio, Savel e Drake hanno dimostrato che degli assidui subacquei (ascoltatori frequentemente esposti all'ambiente acquatico) identificano in modo ragionevole la direzione di un suono sott'acqua, in condizioni in cui dei non subacquei (ascoltatori senza esperienza di esposizione all'ambiente acquatico) non ne sono assolutamente capaci.⁴⁰ Questo effetto dell'esposizione a un ambiente alterato viene attribuito dagli autori a dei meccanismi di adattamento del sistema uditivo che permettono una riorganizzazione della cartografia uditiva individuale. Le ricerche di questi autori proseguono per valutare la realtà e i limiti di questa plasticità del sistema uditivo. Similmente, Blum e altri hanno valutato con successo l'adattabilità progressiva di ascoltatori in condizioni di ascolto artificiali che producevano un campo uditivo distorto, tramite "ricalibratura" delle loro funzioni uditive spaziali appropriate.⁴¹ Allo scopo, hanno

38 G. Canévet, S. Meunier, *op. cit.*, pp. 149-157.

39 Cfr. P.M. Zurek, *The precedence effect and its possible role in the avoidance of interaural ambiguities*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1980, n. 67, pp. 952-964.

40 S. Savel, C. Drake, *Adaptation in underwater sound localization by humans: towards a re-organization of spatial mapping*, in corso di stampa.

41 A. Blum, B.F.G. Katz e O. Warusfel, *Eliciting adaptation to non-individual HRTF spectral cues with multi-modal training*, Actes du Congrès commun CFA/DAGA '04, Strasbourg, 22-25 mars 2004, pp. 1225-1226.

utilizzato un tipo di allenamento particolare, detto multimodale, che sfrutta un metodo di ritorno propriocettivo manuale, i cui vantaggi sono spiegati nella pubblicazione citata.

7. La localizzazione in sala

Qualunque siano le basi fisiologiche dell'effetto di precedenza, si conosce la sua utilità in acustica delle sale, dove ogni suono primario viene seguito da una serie di echi, dovuti alle riflessioni sulle pareti. Nelle riflessioni con brevissimo ritardo si tende a percepire essenzialmente il suono diretto, cosa che va a tutto vantaggio della ricezione dei messaggi. I ritardi più lunghi vengono percepiti come riverberazione o veri e propri echi. Se il segnale è il suono del parlato, l'intelligibilità andrà scemando a causa del mascheramento esercitato dai segnali riflessi sul segnale primario. Questo aspetto dell'effetto di precedenza è stato oggetto di uno studio dettagliato di Santon.⁴²

Numerosi studi, condotti in particolare all'IRCAM,⁴³ hanno approfondito le questioni riguardanti la psicoacustica della localizzazione in sala. Una delle prime conclusioni generali da ricordare è che la localizzazione dipende certamente dall'acustica della sala ma anche dal tipo di segnale da localizzare. Così, la localizzazione di segnali impulsivi, e più generalmente di segnali ricchi di transienti, non dipende dalla riverberazione ma dalla geometria della sala. Ciò è facilmente comprensibile, da un lato per il fatto che l'effetto di precedenza orienta la direzione apparente del suono su quella dei transienti; la riverberazione interviene quindi troppo tardi per influenzare questa direzione. D'altro canto tuttavia, le riflessioni con brevissimo ritardo agiscono sulla percezione globale dei transienti e sono dunque capaci di influenzarne la localizzazione, giungendo in alcuni casi perfino a "delocalizzare" la fonte. Que-

⁴² F. Santon, *Contribution au problème de l'intelligibilité de la parole dans les salles*, Thèse de Doctorat, Univ. Aix-Marseille 1974; F. Santon, *Numerical prediction of echograms of the intelligibility of speech in rooms*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1976, n. 59, pp. 1399-1405.

⁴³ Cfr. W.M. Hartmann, *Localization of sound in rooms*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1983, n. 74, pp. 1380-1391.

st'ultimo fenomeno è equivalente a un effetto stereofonico nel quale la fonte virtuale infine percepita risulta dalla combinazione della fonte primaria reale e delle fonti dalle quali provengono le riflessioni. Si capisce quindi l'importanza dell'architettura della sala nell'organizzazione della sequenza delle riflessioni e di conseguenza nella possibilità di sfruttare l'effetto di precedenza per la qualità dei messaggi sonori.

Nel caso di segnali prolungati, per esempio di segnali musicali, le interferenze create dall'insieme dell'onda diretta e delle onde riflesse sono generalmente complesse. È allora possibile che il campo risultante produca sulle orecchie dei segnali le cui differenze istantanee, di intensità e di tempo ad esempio, sono incoerenti dal punto di vista della percezione. In tal caso, si dice che gli indici del campo acustico sono conflittuali,⁴⁴ e in teoria la localizzazione è impossibile. In effetti Hartmann ha osservato in diverse occasioni che gli ascoltatori sembrano effettuare un'analisi separata dei diversi indici di direzione, applicando poi ad essi una sorta di "ponderazione percettiva" per decidere la direzione probabile del suono.⁴⁵ È un modo di vedere le cose che Hartmann chiama "ipotesi di plausibilità", la quale sottintende l'intervento di meccanismi cognitivi, evidentemente indeterminati, nella valutazione dei diversi indici fisici disponibili, compresi eventuali indici visivi. I ventriloqui potrebbero testimoniare.

Altri fattori psicoacustici influenzano la percezione spaziale in sala. Dopo i lavori di Stevens sappiamo che i suoni possono dare un'impressione di "volume".⁴⁶ I suoni acuti vengono percepiti come piuttosto concentrati o puntuali, i suoni gravi appaiono piuttosto ampi e diffusi. Questo attributo elementare dei suoni è particolarmente importante nella percezione del paesaggio sono-

⁴⁴ Cfr. G. Canévet, *Aspects physiques de la détection...*, cit.

⁴⁵ B. Rakerd, W.M. Hartmann, *Localization of sound in rooms, II: the effects of a single reflecting surface*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1985, n. 78, pp. 524-533; W.M. Hartmann, B. Rakerd, *Localization of sound in rooms IV: the Franssen effect*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1989, n. 86, pp. 1366-1373.

⁴⁶ S.S. Stevens, *Psychophysics. Introduction to its perceptual, neural and social aspects*, J. Wiley, New York 1975.

ro. Esso viene a volte impiegato nel cinema per creare degli ambienti ("sensurround" o altri) propizi alla partecipazione soggettiva dello spettatore. Un'altra caratteristica acustica interviene nell'impressione spaziale: l'intercorrelazione interaurale. È facile dimostrare ad esempio che dei rumori presentati tramite cuffia creeranno l'impressione di un'immagine molto concentrata (verso il centro della testa), se i due rumori sono perfettamente coerenti. Al contrario, se essi sono totalmente incoerenti l'impressione ottenuta sarà quella di un'immagine diffusa, sparsa nello spazio uditivo intracranico. Con una coerenza intermedia l'immagine avrà una forma più o meno complessa e più o meno confinata.

In acustica delle sale appare lo stesso effetto, ossia l'impressione di spazio più o meno ampio viene assicurata dal grado di coerenza tra il suono diretto e i riflessi provenienti dalle pareti. Il grado di coerenza dei segnali binaurali contribuisce a creare un'impressione più o meno netta di "pienezza" spaziale, o di ingombro, che può superare il semplice contorno geometrico della fonte (l'orchestra ad esempio). In altre parole, le immagini uditive occupano un volume più vasto che se i suoni fossero stati emessi in campo libero, a parità di altri parametri.

Numerosi fattori supplementari contribuiscono evidentemente alla qualità acustica di una sala. E bisogna sottolineare al riguardo l'importanza degli studi svolti, in particolare all'IRCAM di Parigi, per la definizione dei parametri psicoacustici che determinano il giudizio su una sala.⁴⁷ Una serie di test percettivi ha permesso a questi ricercatori di discernere i criteri oggettivi utilizzati per caratterizzare la qualità acustica di una sala. Se ne sono persino potuti dedurre degli algoritmi per la simulazione di alcune di queste carat-

47 Cfr., ad esempio, O. Warusfel, J.P. Jullien, *Subjective validation of an objective model for the characterization of the room acoustic quality*, Meeting of the Audio Engineering Society, London March 1987, GI; O. Warusfel, J. P. Jullien, *Une campagne de mesures objectives et perceptives en acoustique des salles*, in «Journal de Physique» IV, colloque C1, vol. 2, (Congrès de la Société Française d'Acoustique, Arcachon, avril 1992), pp. 151-154; J.P. Jullien, C. Lavandier e O. Warusfel, *Compared analysis of the clarity and the reverberation in room acoustics*, Congrès International d'Acoustique, Belgrade 1989, pp. 169-172; C. Lavandier, O. Warusfel e J.P. Jullien, *Etude de facteurs perceptifs liés à la coloration en acoustique des salles*, Réunion du Groupe Audition de la SFA, St. Louis 1988.

teristiche tramite trattamento del segnale.⁴⁸ Questo tipo di studi è fondamentale per la definizione dei futuri luoghi d'ascolto perché essi permettono la caratterizzazione, la misurazione e poi la simulazione di "funzioni di trasposizione psicofisica"; tali funzioni mettono in relazione una grandezza fisica in entrata (il segnale acustico) e una grandezza sensoriale o percettiva in uscita. Lo stesso problema si pone ai compositori di musica prodotta da computer: come costruire dei segnali, e soprattutto come fissarne le caratteristiche fisiche in modo che inducano tale o tal'altra qualità soggettiva, referenziale o emozionale?

8. Simulazione dello spazio sonoro soggettivo

Parallelamente allo sviluppo della nozione di ambiente virtuale, si assiste a numerosi tentativi di ricreare un paesaggio sonoro virtuale, o simulato, tramite un numero limitato di fonti. In passato vi è stata la venerabile epoca della quadrifonia o dell'"ambiofonia". Ma a causa della mancanza di supporto teorico e soprattutto psicoacustico adeguato, il successo è stato limitato e i pochi effetti interessanti ottenuti riguardano più la distribuzione spaziale del suono che non la riproduzione controllata dello spazio sonoro soggettivo. Il primo approccio serio sembra essere stato quello di Jessel.⁴⁹ Alla base dei suoi lavori vi è il principio di Huygens, secondo il quale è possibile ricreare qualsiasi campo acustico a partire da una opportuna selezione di fonti secondarie. Il ruolo di queste fonti è di ricostruire in modo identico il campo primario. Quindi, per analogia con la celebre tecnica dell'elettromagnetismo, Jessel ha introdotto il termine di "olofonia" per designare la sua tecnica di ricostruzione delle immagini uditive. Nel senso opposto, ossia invertendo l'irradiazione delle fonti

⁴⁸ Cfr. J.M. Jot, A. Chaigne, *Digital delay networks for designing artificial reverberators*, Proceedings of the 90th Audio Engineering Society Convention, Paris 1991, preprint 3030(E-2); J.M. Jot, *Etude et réalisation d'un spatialisateur de sons par modèles physiques et perceptifs*, Thèse de Doctorat, Paris 1992.

⁴⁹ M. Jessel, *Acoustique théorique: propagation et holophonie*, Masson, Paris 1973.

secondarie, si ottiene il non meno celebre anti-rumore attivo. La difficoltà di questo approccio consisteva nel fatto che, volendo essere rigorosi, il numero di fonti secondarie avrebbe dovuto essere infinito per ottenere una ricostruzione esatta del campo prescelto. Il sistema Jessel ha dato vita a realizzazioni pratiche nel campo dell'anti-rumore, ma non in quello della simulazione dello spazio.

Qualche anno dopo è apparsa un'idea diversa. Prima di essere trasmesso agli altoparlanti, il segnale elettrico doveva essere trattato in modo da prendere in considerazione le "funzioni di trasposizione acustica", dal campo libero al timpano (simili alle funzioni rappresentate nella figura 4), frutto della diffrazione causata dal corpo umano. Sakamoto e i suoi collaboratori hanno tentato questa strada,⁵⁰ sviluppando così un progetto vicino a quello di M. Schröder e B. Atal.⁵¹ I risultati sono eccellenti ma valgono in generale, e in linea di principio, per un'unica posizione dell'osservatore, o in ogni caso per una regione limitata dello spazio.

Infine, i lavori attuali si concentrano sulla restituzione delle impressioni spaziali tramite un semplice paio di cuffie. Dal punto di vista tecnico, la simulazione dello spazio tramite cuffia richiede che si crei sui timpani dell'ascoltatore un campo acustico identico a quello che verrebbe prodotto da una fonte reale dell'ambiente. Teoricamente, ciò è possibile tramite la convoluzione di un segnale monofonico qualunque con le funzioni di trasposizione acustica dell'ascoltatore chiamate oggi "funzioni di trasposizione legate alla testa", e più frequentemente HRTF (sigla corrispondente ai termini inglesi *Head Related Transfer Functions*). Il risultato di questo trattamento è che il segnale, trasformato tramite convoluzione, riporta tutte le alterazioni che un segnale reale avrebbe subito nella propagazione fino al timpano. Esso contiene quindi tutte le informazioni spaziali di un segnale reale. Il primo autore a realizzare

⁵⁰ N. Sakamoto, T. Gotoh, T. Kogure, M. Shimbo e A. Clegg, *Controlling sound-image localization in stereophonic reproduction*, in «Journal of the Audio Engineering Society», 1981, n. 29, pp. 794-799.

⁵¹ M.R. Schröder, B.S. Atal, *Computer simulation of sound transmission in rooms*, IEEE International Convention Record, vol. 11, parte VII, 1963, pp. 150-155.

questo tipo di simulazione sembra essere stato Pösselt.⁵² La tecnica è stata in seguito affinata da Wightman⁵³ e da Pellieux e i suoi coautori.⁵⁴ Bisogna inoltre menzionare l'applicazione di questa tecnica alla progettazione di sale tramite CAD. In questo caso vengono inoltre introdotte nella convoluzione le risposte di impulso della sala progettata.

Numerosi problemi frenano tuttavia lo sviluppo di questi lavori sulla simulazione dello spazio sonoro soggettivo. I più importanti sono da un lato la difficoltà di creare tramite cuffia l'impressione di esteriorizzazione dei suoni, i quali tendono a restare soggettivamente in prossimità della testa, e dall'altro le frequenti confusioni davanti/dietro che riflettono un controllo e una conoscenza ancora insufficienti di tutti i meccanismi psicoacustici implicati nella localizzazione. Le ricerche fondamentali proseguono quindi attivamente in questo campo. Dopo i contributi di Chateau, Hammershoi, Hartung e Wightman⁵⁵ sulla psicoacustica della localizzazione,

⁵² C. Pösselt, J. Schröter, M. Opitz, P. Divenyi e J. Blauert, *Generation of binaural signals for research and home entertainment*, 12th Institute of Communication Acoustics, Toronto, July 1986, B1-6.

⁵³ F.L. Wightman, D.J. Kistler, *Headphone simulation of free-field listening. I: Stimulus synthesis*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1989, n. 85, pp. 858-867; F.L. Wightman, D.J. Kistler, *Headphone simulation of free-field listening. II: Psychophysical validation*, in «Journal of the Acoustical Society of America», 1989, n. 85, pp. 868-878.

⁵⁴ L. Pellieux, B. Piedecocq e P. Quandieu, *Stereophonic presentation of information: space simulation under headphones*, in «Journal de Physique» IV, colloque C1, vol. 2, (Congrès de la Société Française d'Acoustique, Arcachon, avril 1992), pp. 395-398; L. Pellieux, C. Gulli, P. Leroyer, B. Piedecocq, A. Leger e J.P. Menu, *Approche expérimentale du son 3D: méthodologie et résultats préliminaires*, actes du congrès "Interfaces virtuelles - Recherche et application", Lisbonne octobre 1993.

⁵⁵ N. Chateau, *Élévation apparente...*, cit.; N. Chateau, *Localisation de sources...*, cit.; D. Hammershoi, H. Moller, *Directional dependence of the free-field sound transmission to the human external ear*, Proceedings of the International Conference on Auditory Display, Santa Fe, Mexico 1994; K. Hartung, M. Miyoshi, M. Bodden e J. Blauert, "Merkmale der Vorn-Hinten-Lokalisation in der Horizontalebene unterhalb von 2 kHz", in *Fortschritte der Akustik, DAGA '93*, Bad Honnef 1993, pp. 836-839; F. Wightman, D. Kistler, *The importance of head movements for localizing virtual auditory display objects*, Proceedings of the International Conference on Auditory Display, Santa Fe, Mexico 1994, p. 283.

bisogna ora citare le ricerche più tecniche di Nicol e Emerit o di Daniel e altri sulla determinazione delle HRTF individuali.⁵⁶

La misurazione delle HRTF individuali pone delle enormi difficoltà. Innanzi tutto esse differiscono tutte da un individuo all'altro; sono un'impronta uditiva molto personale e bisogna quindi effettuare la misurazione per ogni ascoltatore interessato. Inoltre, la misurazione necessita di un equipaggiamento raro e costoso (in particolare una camera anecoica), ed è lunga e faticosa per il soggetto, soprattutto quando deve essere effettuata su dei bambini.⁵⁷ Oggi le ricerche si orientano quindi in due direzioni che permettono di aggirare la difficoltà: la determinazione tramite calcolo (quindi simulata) di HRTF individuali, e l'allenamento alla localizzazione su indici erronei, sfruttando la plasticità del sistema uditivo ossia l'adattamento delle facoltà di localizzazione come abbiamo detto in precedenza.

Il calcolo di HRTF individualizzate, realizzato a partire da un numero limitato di misurazioni, è allo studio in diversi laboratori. Per esempio, in Daniel e altri, esso è basato su di un principio di apprendimento statistico.⁵⁸ Partendo da un campione di HRTF rappresentative dell'individuo, ciascuna corrispondente a una direzione prescelta, si determinano tutte le altre funzioni ricorrendo a una rete neurale istruita in precedenza. Ad esempio, un insieme completo di HRTF può essere ottenuto da sole 50 funzioni misurate realmente. È anche possibile calcolare le HRTF alla maniera di Fels e altri.⁵⁹ Questi autori procedono innanzi tutto a una "fotogrammetria" dell'individuo, permettendo di stabilire un modello abbastanza preciso della testa e delle spalle. Un software di disegno automatico permette quindi la digitalizzazione dei dati geometrici corrispondenti. Infine, il campo acustico prodotto da una fonte sonora posta all'infinito viene calcolato (approssimativamente) utilizzando un metodo agli elementi

⁵⁶ J. Daniel, R. Nicol e S. Moreau, *Further investigations of high order ambisonics and wavefield synthesis for holophonic sound imaging*, 114th Convention of the Audio Engineering Society, Amsterdam, The Netherlands, 22-25 March 2003, Preprint 5788.

⁵⁷ Cfr. J. Fels, P. Buthmann e M. Vorländer, *Head-related transfer functions of children*, in «Acta Acustica united with Acustica», 2004, n. 90, pp. 918-927.

⁵⁸ J. Daniel, R. Nicol e S. Moreau, *op. cit.*

⁵⁹ J. Fels, P. Buthmann e M. Vorländer, *op. cit.*

finiti sulla frontiera. Ciò permette di dedurre la funzione di trasposizione tra il campo libero e le orecchie.

9. Conclusioni

È importante mantenere bene in mente la distinzione che deve essere fatta tra le nozioni affini di localizzazione, percezione spaziale e spazializzazione uditiva. In questo articolo abbiamo esposto unicamente le questioni relative alla localizzazione uditiva nei limiti di ciò che è noto con ragionevole certezza. La localizzazione, nel senso di posizionamento di fonti nello spazio, è tuttavia solo una parte, essenzialmente fisica e sensoriale, della percezione dello spazio sonoro in senso lato. I problemi puramente percettivi che subentrano alla localizzazione sono complessi, multidisciplinari, multidimensionali, perché quasi di pertinenza dell'esperienza individuale, e in ogni caso le ricerche in questo campo sono solo agli inizi. La spazializzazione, in compenso, è una tecnica fiorente che servirà certamente molto alla creazione musicale e artistica, nonché nelle ricerche sulla percezione.

(Traduzione di Fabrizio Giuffrida)