

PERCEZIONE E ANALISI PSICOACUSTICA DI SCRICCHIOLII E BATTITI ALL'INTERNO DI ABITACOLI DI AUTOVEICOLI

Federico Rossi (1), Andrea Nicolini (1)

1) Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Perugia

1. Introduzione

Scricchiolii e battiti sono spesso responsabili di discomfort acustico negli abitacoli degli autoveicoli. Tali rumori possono essere generati da diverse cause: regolazione dei sedili, apertura e chiusura delle portiere, chiusura centralizzata. Tuttavia, può essere molto complesso valutare il discomfort acustico prodotto da tali cause [1-5]. Questa memoria consiste nella proposta di indici di valutazione dell'annoyance (disturbo) e della pleasantness (intesa come sensazione di fiducia nello stato generale del veicolo) prodotta da scricchiolii e battiti presenti negli abitacoli di autoveicoli. Gli indici suddetti rappresentano la sensazione media di un O.M.S. (Osservatore Medio Statistico) sottoposto a jury test. Lo studio è stato eseguito mediante la seguente metodologia:

- 1) Campagna sperimentale di misure per la registrazione degli scricchiolii e battiti.
- 2) Analisi oggettiva di scricchiolii e battiti per la determinazione dei valori delle più importanti metriche psicoacustiche associati ai segnali di cui al punto 1).
- 3) Analisi soggettiva in ascolto binaurale per la valutazione di annoyance e pleasantness prodotte da ogni segnale registrato. Sono stati usati a tale scopo i metodi del Differenziale Semantico e del Confronto di Coppia.
- 4) Analisi regressiva per la determinazione di indici psicoacustici che correlino per scricchiolii e battiti i parametri "No annoyance" e "Pleasantness" alle metriche psicoacustiche.

2. La campagna di misure sperimentali e l'analisi dei dati psicoacustici

Una campagna di misure sperimentali per la registrazione di scricchiolii e battiti all'interno degli abitacoli di autoveicoli è stata effettuata su un banco prove messo a disposizione dal CRF (Centro Ricerche Fiat) mediante un Digital Signal Recorder (DAT) ed una testa sperimentale per registrazioni binaurali. Le rumorosità individuate sono prodotte da attività di routine svolte solitamente dai passeggeri o dal conducente di autoveicoli, quali l'aggancio/sgancio delle cinture di sicurezza o il settaggio delle manopole.

le del condizionatore. Al termine delle registrazioni, sono stati selezionati 25 segnali di scricchiolio e 27 battiti, ciascuno avente una durata media pari a 2 secondi. Le cause che hanno prodotto i segnali selezionati sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1 - Cause che hanno generato i segnali di rumore selezionati

| <i>Tipo di segnale</i> | <i>Numero di riferimento</i> | <i>Causa</i> |
|------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Scricchiolio | dal n.1 al n.13 | Mostrina comandi del condizionatore |
| | dal n.14 al n.25 | tappetino che striscia con il pavimento del veicolo |
| Battito | dal n.1 al n.6 | mostrina in plastica che avvolge la leva cambio |
| | dal n.7 al n.11 | mostrina in plastica che sostituisce l'autoradio |
| | dal n.12 al n.15 | Battito prodotto dalla cintura di sicurezza contro le pareti laterali del veicolo |
| | dal n.16 al n.22 | Aggancio/sgancio cinture di sicurezza |
| | dal n.23 al n.27 | Schienale dei sedili |

L'analisi degli spettri dei segnali individuati ha mostrato che gli scricchiolii sono caratterizzati da componenti principali a basse frequenze (100-200 Hz) e da uno spettro monotono decrescente verso le alte frequenze, mentre i battiti sono caratterizzati da uno spettro discontinuo con componenti principali in un intervallo più ampio (300-1600 Hz).

La metodologia di analisi dei segnali suddetti al fine di ricavare indici psicoacustici che consentano di stimare la qualità acustica sulla base di ben selezionate metriche ha previsto due fasi principali:

- 1) Analisi oggettiva mediante un codice di calcolo numerico;
- 2) jury test in ascolto binaurale (analisi soggettiva).

La correlazione tra analisi oggettiva e soggettiva ha consentito di determinare relazioni matematiche tra metriche psicoacustiche; tali relazioni consentono di predire la "No annoyance" e la "Pleasantness" prodotte da scricchiolii e battiti a partire dalla sola analisi oggettiva. L'analisi oggettiva mediante un codice di calcolo ha consentito di valutare per ogni segnale le metriche più note ed importanti quali loudness stazionaria, statistica e statistica istantanea (media, massimi, minimi, deviazione standard, percentili), roughness, fluctuation strength, sharpness statistica con metodo di Zwicker e di Aures (media, massimi, minimi, deviazione standard, percentili) [6-8]. I risultati ottenuti sono mostrati in Tabella 2 (per brevità sono riportate solamente le metriche risultate utili nelle successive valutazioni).

Il jury test è stato eseguito come segue:

- 1) è stato selezionato un O.M.S. costituito da 60 persone di età tra 18 e 30 anni, sane dal punto di vista dell'organo uditivo;
- 2) è stata effettuata un'analisi preliminare mediante il metodo del Differenziale Semantico [9]; tale metodo è stato preferito al metodo del Confronto di Coppia perché gli ascoltatori possono perdere concentrazione se soggetti a molti confronti. I risultati ottenuti da questa analisi preliminare sono stati utilizzati per or-

dinare i segnali in termini di annoyance o pleasantness. A tal fine, si è utilizzata una procedura multisessione: l'O.M.S. è stato soggetto a tre differenti sessioni casuali costituite dai segnali individuati. Inoltre: ogni ascoltatore è stato esposto a cinque segnali campione prima di iniziare per meglio adattare l'organo uditivo al tipo di segnali da valutare; il tempo di valutazione dei segnali e la possibilità di riascoltarli sono state lasciate a libera scelta; alcuni ascoltatori sono stati esposti prima a scricchiolii poi a battiti, altri viceversa (in ordine casuale). Ciascun ascoltatore ha dovuto valutare due parametri: l'annoying/not annoying per caratterizzare il fastidio percepito nell'abitacolo, l'unpleasant/pleasant per caratterizzare la sensazione di solidità e stabilità del veicolo in presenza dei rumori suddetti. Entrambi i parametri sono stati proposti in scale da 1 a 7, dove più il valore è basso, più emerge l'idea di negatività che ne è implicita. I risultati medi delle tre sessioni ottenuti mediante tale tecnica sono riportati in Tabella 3.

Tabella 2: metriche psicoacustiche relative a scricchiolii e battiti individuati

| Metrica | Scricchiolio (Numero di riferimento) | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| N_{max} (son) | 7.78 | 7.86 | 10.56 | 7.85 | 9.09 | 8.46 | 10.24 | 9.77 | 8.93 |
| N_M (son) | 3.68 | 3.93 | 4.46 | 4.04 | 3.58 | 4.06 | 4.27 | 5.05 | 4.23 |
| N_σ (son) | 1.71 | 1.81 | 2.26 | 1.96 | 1.81 | 2.00 | 2.10 | 2.22 | 2.10 |
| S_{Aumax} (acum) | 2.55 | 2.60 | 2.65 | 1.86 | 2.39 | 2.63 | 2.84 | 2.46 | 2.52 |
| Metrica | Scricchiolio (Numero di riferimento) | | | | | | | | |
| | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | |
| N_{max} (son) | 12.95 | 9.22 | 10.57 | 8.05 | 11.94 | 14.73 | 12.50 | 9.48 | |
| N_M (son) | 5.13 | 2.90 | 5.36 | 2.92 | 3.98 | 5.45 | 4.50 | 4.05 | |
| N_σ (son) | 2.75 | 1.16 | 2.08 | 1.08 | 2.18 | 3.68 | 2.36 | 1.92 | |
| S_{Aumax} (acum) | 2.99 | 2.14 | 2.57 | 2.14 | 2.23 | 2.91 | 3.20 | 2.44 | |
| Metrica | Scricchiolio (Numero di riferimento) | | | | | | | | |
| | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | |
| N_{max} (son) | 10.43 | 7.77 | 11.83 | 10.34 | 11.68 | 9.86 | 15.54 | 2.46 | |
| N_M (son) | 4.25 | 3.81 | 4.63 | 3.91 | 4.34 | 3.70 | 4.07 | 2.20 | |
| N_σ (son) | 2.10 | 1.46 | 2.60 | 1.85 | 2.20 | 1.69 | 3.00 | 0.10 | |
| S_{Aumax} (acum) | 3.14 | 2.06 | 3.20 | 2.70 | 3.02 | 1.99 | 2.25 | 2.09 | |
| Metrica | Battito (Numero di riferimento) | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| N_M (son) | 2.93 | 2.77 | 3.02 | 3.15 | 2.89 | 2.86 | 3.01 | 3.04 | 3.04 |
| N_{10} (son) | 3.48 | 3.02 | 4.03 | 4.28 | 3.61 | 3.18 | 3.42 | 3.89 | 3.79 |
| N_{iM} (son) | 2.92 | 2.77 | 3.02 | 3.14 | 2.89 | 2.86 | 3.01 | 3.03 | 3.04 |
| S_{Aumax} (acum) | 1.78 | 1.79 | 1.79 | 1.82 | 1.81 | 1.73 | 2.75 | 2.66 | 2.58 |
| Metrica | Battito (Numero di riferimento) | | | | | | | | |
| | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| N_M (son) | 2.84 | 2.98 | 3.06 | 3.01 | 2.89 | 3.05 | 5.02 | 5.11 | 6.43 |
| N_{10} (son) | 3.04 | 3.51 | 3.60 | 3.43 | 3.34 | 3.55 | 12.48 | 12.01 | 17.90 |
| N_{iM} (son) | 2.84 | 2.97 | 3.05 | 3.01 | 2.89 | 3.05 | 4.98 | 5.08 | 6.39 |
| S_{Aumax} (acum) | 2.06 | 2.34 | 1.72 | 1.72 | 1.75 | 1.75 | 2.30 | 2.52 | 2.57 |
| Metrica | Battito (Numero di riferimento) | | | | | | | | |
| | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| N_M (son) | 4.15 | 5.73 | 5.28 | 4.97 | 2.56 | 2.26 | 2.13 | 2.30 | 2.38 |
| N_{10} (son) | 8.99 | 14.39 | 12.57 | 11.32 | 4.33 | 2.87 | 2.77 | 3.20 | 3.55 |
| N_{iM} (son) | 4.13 | 5.69 | 5.24 | 4.94 | 2.54 | 2.25 | 2.12 | 2.29 | 2.37 |
| S_{Aumax} (acum) | 1.91 | 2.54 | 2.39 | 2.43 | 0.93 | 0.81 | 0.85 | 0.82 | 0.79 |

Tabella 3: risultati ottenuti mediante il metodo del Differenziale Semantico

| <i>Scricchiolio (Numero di riferi- mento)</i> | <i>No annoyance</i> | <i>Pleasantness</i> | <i>Battito (Numero di riferimento)</i> | <i>No annoyance</i> | <i>Pleasantness</i> |
|-------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 4.26 | 5.01 | 1 | 4.96 | 4.96 |
| 2 | 3.86 | 4.11 | 2 | 5.24 | 4.82 |
| 3 | 3.34 | 3.57 | 3 | 4.74 | 5.05 |
| 4 | 4.21 | 4.52 | 4 | 4.67 | 4.67 |
| 5 | 4.10 | 4.00 | 5 | 5.00 | 4.92 |
| 6 | 3.47 | 3.95 | 6 | 5.44 | 4.75 |
| 7 | 3.41 | 3.66 | 7 | 4.55 | 3.53 |
| 8 | 3.22 | 3.10 | 8 | 4.51 | 4.15 |
| 9 | 3.67 | 3.91 | 9 | 4.38 | 4.04 |
| 10 | 2.78 | 3.03 | 10 | 4.48 | 4.30 |
| 11 | 5.36 | 4.45 | 11 | 4.33 | 4.28 |
| 12 | 2.71 | 3.00 | 12 | 5.03 | 4.58 |
| 13 | 5.66 | 4.69 | 13 | 5.49 | 4.31 |
| 14 | 4.09 | 3.58 | 14 | 5.55 | 4.88 |
| 15 | 2.53 | 3.29 | 15 | 5.14 | 4.23 |
| 16 | 2.83 | 3.15 | 16 | 4.27 | 5.14 |
| 17 | 3.92 | 3.88 | 17 | 4.05 | 4.61 |
| 18 | 3.28 | 3.64 | 18 | 3.53 | 5.38 |
| 19 | 4.36 | 4.29 | 19 | 4.42 | 5.22 |
| 20 | 3.02 | 3.34 | 20 | 3.82 | 4.55 |
| 21 | 3.62 | 3.86 | 21 | 3.85 | 4.44 |
| 22 | 3.45 | 3.55 | 22 | 3.98 | 4.25 |
| 23 | 4.55 | 3.75 | 23 | 5.71 | 5.74 |
| 24 | 3.92 | 3.38 | 24 | 5.71 | 5.58 |
| 25 | 6.28 | 5.19 | 25 | 5.71 | 5.71 |
| | | | 26 | 5.49 | 5.32 |
| | | | 27 | 5.33 | 5.65 |

- 3) il metodo del Confronto di Coppia è stato applicato a segnali caratterizzati da simili valori in termini di annoyance e pleasantness, come determinati dal metodo del Differenziale Semantico [10]. Lo scopo è stato quello di ottenere con la successiva analisi regressiva relazioni più accurate possibili che consentano di valutare annoyance e pleasantness prodotta dai rumori indagati sui passeggeri di autoveicoli. A tal fine, sono stati scelti gli otto peggiori segnali per ogni parametro ed ogni tipo di rumore sulla base delle valutazioni ottenute dal metodo del Differenziale Semantico. Si è verificato che in genere se uno scricchiolio è negativo in termini di annoyance, lo è anche in termini di pleasantness (ossia uno scricchiolio fastidioso dà anche una sensazione di fragilità del veicolo). Un andamento non omogeneo si è invece verificato per i battiti. La suddetta metodologia ha previsto che agli ascoltatori fossero poste le seguenti domande:

- Quale rumore è meno annoying?
- Quale rumore è più pleasant?

In questo caso, è stata ottenuta una scala da 0 a 1 dei due parametri, dove 0 corrisponde ad un segnale che non è mai stato scelto dall'O.M.S., 1 ad un segnale sempre selezionato dall'O.M.S. In tal modo, I valori più bassi corrispondono a caratteristiche negative dei segnali, come nel caso delle scale di merito scelte per il metodo del Differenziale Semantico. In questo caso, non ci sono problemi relativi all'ordine di presentazione, l'unica cautela è stata quella di evitare di presentare lo stesso segnale sempre come primo o secondo nella coppia proposta. Ogni ascoltatore è stato lasciato libero di scegliere l'intervallo di tempo tra i segnali della coppia proposta e tra due coppie contigue. I risultati ottenuti con tale metodo sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4: risultati ottenuti mediante il metodo del Confronto di Coppia

| <i>No Annoyance</i> | | <i>Pleasantness</i> | |
|------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------|------------------|
| <i>Scricchiolio</i> (Numero di Riferimento) | <i>Risultati</i> | <i>Scricchiolio</i> (Numero di Riferimento) | <i>Risultati</i> |
| 3 | 0.68 | 8 | 0.48 |
| 8 | 0.62 | 10 | 0.30 |
| 10 | 0.38 | 12 | 0.24 |
| 12 | 0.44 | 15 | 0.44 |
| 15 | 0.29 | 16 | 0.38 |
| 16 | 0.50 | 20 | 0.51 |
| 18 | 0.59 | 22 | 0.49 |
| 20 | 0.43 | 24 | 0.50 |
| <i>No Annoyance</i> | | <i>Pleasantness</i> | |
| <i>Battito</i> (Numero di Riferimento) | <i>Risultati</i> | <i>Battito</i> (Numero di Riferimento) | <i>Risultati</i> |
| 9 | 0.78 | 7 | 0.30 |
| 11 | 0.72 | 8 | 0.46 |
| 16 | 0.54 | 9 | 0.39 |
| 17 | 0.53 | 10 | 0.57 |
| 18 | 0.17 | 11 | 0.50 |
| 20 | 0.35 | 13 | 0.57 |
| 21 | 0.48 | 15 | 0.54 |
| 22 | 0.51 | 22 | 0.58 |

- 4) Al termine del Confronto di Coppia, sulla base dei risultati ottenuti, sono state ricavate mediante un'analisi regressiva alcune relazioni matematiche tra i parametri soggettivi individuati ("No annoyance" e "Pleasantness") e le metriche psicoacustiche. La validità delle relazioni proposte è stata verificata confrontando i risultati ottenuti dalla loro applicazione con quelli ricavati mediante il metodo del Differenziale Semantico.

3. Gli indici psicoacustici proposti

Un'analisi regressiva condotta sui risultati ottenuti dal Confronto di Coppia ha consentito di ottenere relazioni matematiche tra i parametri soggettivi "No annoyance" e "Pleasantness" ed alcune metriche psicoacustiche. Per quanto concerne gli scricchiolii, le relazioni proposte sono le seguenti:

$$(1) \quad \text{NoAn}_s = -0.32 \cdot N_M - 0.41 \cdot S_{\text{Aumax}} + 3.22$$

$$(2) \quad \text{Pl}_s = -0.10 \cdot N_{\text{max}} - 0.30 \cdot N_M + 0.39 \cdot N_\sigma + 2.08$$

dove: N_M è la loudness statistica media;

N_{max} è la loudness statistica massima;

N_σ è la deviazione standard della loudness statistica;

S_{Aumax} è la sharpness di Aures massima.

Le equazioni (1, 2) sono estremamente fedeli ai risultati ottenuti mediante il Confronto di Coppia. Infatti:

- l'errore medio di stima è 0.018 e la deviazione standard 0.021 per il parametro "No annoyance";
- l'errore medio di stima è 0.020 e la deviazione standard 0.021 per il parametro "Pleasantness".

Per quanto concerne i battiti, le relazioni proposte sono le seguenti:

$$(3) \quad \text{NoAn}_b = -0.30 \cdot N_M - 2.05 \cdot S_{\text{Aumax}} + 4.42$$

$$(4) \quad \text{Pl}_b = 0.32 \cdot N_{10} - 1.22 \cdot N_{iM} - 0.25 \cdot S_{\text{Aumax}} + 3.56$$

dove: N_M è la loudness statistica media;

N_{10} è il percentile 10% della loudness statistica;

N_{iM} è la loudness statistica istantanea media;

S_{Aumax} è la sharpness di Aures massima.

Anche in questo caso, le relazioni proposte sono estremamente fedeli ai risultati ottenuti con il Confronto di Coppia: Infatti:

- l'errore medio di stima è 0.016 e la deviazione standard 0.020 per il parametro "No annoyance";
- l'errore medio di stima è 0.018 e la deviazione standard 0.019 per il parametro "Pleasantness".

4. Conclusioni

Un'analisi regressiva su dati psicoacustici relativi a scricchiolii e battiti prodotti all'interno di autoveicoli ha consentito di proporre relazioni matematiche per stimare gli indicatori psicoacustici "No annoyance" e "Pleasantness" a partire da ben determinate metriche psicoacustiche. Gli indicatori e le relazioni proposte mostrano che l'annoyance e la pleasantness dovuta a scricchiolii e battiti dipende essenzialmente dalle metriche loudness e sharpness. In particolare:

- l'annoyance prodotta da scricchiolii e battiti aumenta con la loudness media e con il massimo valore della sharpness;
- la pleasantness dovuta a scricchiolii diminuisce all'aumentare della loudness media e del suo massimo valore, aumenta con la deviazione standard della loudness;
- la pleasantness dovuta a battiti diminuisce all'aumentare della loudness istantanea media e del massimo valore della sharpness, aumenta con il percentile N_{10} . Quindi, un battito di breve durata può dare sensazione di pleasantness.

Le relazioni proposte sono state validate confrontando l'ordine di preferenza ottenuto su tutti i segnali mediante il metodo del Differenziale Semantico con quello ottenuto mediante le relazioni stesse. Il confronto mostra che:

- per gli scricchiolii, per il parametro "No annoyance", la differenza media tra i due ordini di preferenza è 1.24 posti, con deviazione standard 1.65 posti; il coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman è 0.980 [11].
- per gli scricchiolii, per il parametro "Pleasantness", la differenza media tra i due ordini di preferenza è 1.20 posti, con deviazione standard 1.66 posti; il coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman è 0.975 [11].
- per i battiti, per il parametro "No annoyance", la differenza media tra i due ordini di preferenza è 1.26 posti, con deviazione standard 1.78 posti; il coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman è 0.975 [11].
- per i battiti, per il parametro "Pleasantness", la differenza media tra i due ordini di preferenza è 1.11 posti, con deviazione standard 1.47 posti; il coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman è 0.983 [11].

Pertanto, le relazioni proposte possono essere impiegate per valutare con elevate accuratezza l'impatto di scricchiolii e battiti sulla sensibilità acustica dei passeggeri di autoveicoli utilizzando le metriche loudness e sharpness.

Bibliografia

- [1] Kurtsev G.M., Kuklin D.A., Saveliev E.V., Elkin Y.I., "The Calculation of the Internal Noise of Moving Vehicles", Proceedings of Transport Noise and Vibration, St. Petersburg, Russia, 2002.
- [2] Biermayer W., Hussain M., Ronacher A.W., Stucklschwaiger W., "Evaluating Vehicle Interior Noise Quality Under Transient Driving Conditions", Proceedings of Noise and Vibration Conference & Exposition, Traverse City, Michigan, USA, code: 1999-01-1683, 1999.
- [3] Bisping R., "Car Interior Sound Quality: Experimental Analysis by Synthesis", Acta Acustica 1997; Vol. 83: 813-818.
- [4] Miśkiewicz A., Letowski T., "Psychoacoustics in the Automotive Industry", Acta Acustica 1999; Vol. 85: 646-649.
- [5] Kuwano S., Fastl H., Namba S., Nakamura S., Uchida H., "Quality of Door Sounds of Passenger Cars", Proceedings of 18th ICA, Kyoto, Japan, 2004.
- [6] Zwicker E., Fastl H., "Psychoacoustics - Facts and Models", Springer-Verlag, Berlino, 1999.
- [7] Fastl H., "The Psychoacoustics of Sound - Quality Evaluation", Acta Acustica 1997; Vol. 83: 754-764.
- [8] Aures W., "Berechnungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale (A model for Calculating the Sensory Euphony of Various Sounds)", Acustica 1985; Vol.59: 130-141.

- [9] Snyder J.G., Osgood C.E., “Semantic Differential Technique: A Sourcebook”, Aldine, Chicago, USA, 1969.
- [10] Kraft V., Portele T., “Quality Evaluation of Five German Speech Synthesis Systems”, *Acta Acustica* 1995; Vol. 3: 351-365.
- [11] Spearman C., “The proof and measurement of association between two rings”, *Amer. J. Psychol.* 1904; Vol.15: 72–101.