

PSYCHOACOUSTIC PARAMETERS OF AUTO CAB FROM MATHEMATICAL MODELLING

K. Pellant*, **K. Příkryl***, **M. Zvonek***

Summary: *After a short introduction to psychoacoustic parameters evaluation the most common methods of mathematical acoustic modeling – ray tracing and the image source model- are discussed briefly. It is shown how the information contained in an echogram obtained by ray- tracing can be used for the determination of psychoacoustic parameters of an enclosure. The process is applied for the evaluation of the speech intelligibility index in the vehicle cab for different sound sources (radio loudspeakers or passenger). The modeling is performed in system Raynoise and the cab of Skoda Octavia Combi is used as the modeling entity.*

1. Úvod

Pro akustický komfort uvnitř kabiny motorových vozidel je důležitá absolutní hladina hluku, jeho charakter a jeho spektrum (Pelant 1997). Kromě toho je však také důležité, jakým způsobem se v kabině šíří i „užitečné“ zvuky jako je mluvená řeč a hudební produkce autorádia. Např. z hlediska komunikace mezi pasažéry motorového vozidla popř. srozumitelnosti mluveného slova z autorádia je důležité, aby signál přímé vlny (tj. tok řeči) byl co nejméně porušován interferencemi s poruchovými vlnami (hlukem pozadí) popř. s vlnami o delším časovém zpoždění (hlavně vlny odražené). Na druhé straně z hlediska kvality poslechu hudby z autorádia je zase důležité „zvukové zabarvení“ vnímaných zvuků tj. jejich auralizace (Kuttruff 1993). Pro ni je zase nutné, aby pokles amplitud násobných vln byl plynulý a s malými oscilacemi. Dosažený akustický komfort přitom obecně závisí na celkovém objemu uzavřeného prostoru, jeho tvaru, součiniteli odrazivosti stěn, umístění přijímače a zdrojů apod. (Beranek 1947). Proto jednou ze základních aplikací psychoakustiky při vývoji osobních vozů je např. optimalizace typu a rozmístění reproduktorových soustav autorádia uvnitř kabin automobilů s ohledem na oba zmiňované požadavky.

Pro charakterizaci zvukových vjemů v uzavřených prostorách je používána v literatuře řada psychoakustických parametrů. Hodnoty psychoakustických parametrů jsou přitom zjišťovány buď na základě analýzy experimentálně naměřených časových odezev (např. systém Bruel&Kjaer Sound Quality Control) nebo na základě matematického modelování tj. z frekvenční odezvy vypočítané pro danou konfiguraci příjmu a vysílačů

* doc. RNDr. Karel Pellant, CSc, Ústav mechaniky těles FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno, tel. 420541142856, e-mail:pellant@umtn.fme.vutbr.cz

* doc. ing. Karel Příkryl, CSc, Ústav mechaniky těles FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno, tel. 420541142861, e-mail:prikryl@umtn.fme.vutbr.cz

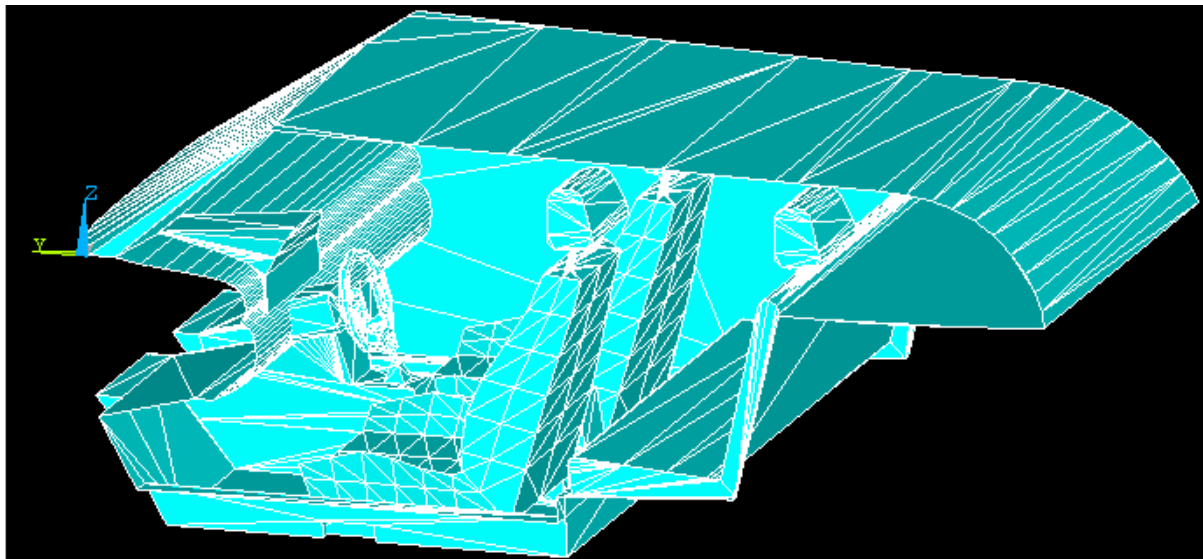
* Martin Zvonek, student FSI VUT Brno, e-mail: ZvonekMartin@seznam.cz

umístěných v počítačovém modelu studovaného prostoru. Výhodou matematického modelování je přitom to, že umožňuje predikci akustických vlastností poslechového prostoru již ve stadiu vývoje. V současné době toto akustické projektování je již samostatnou technickou disciplínou (Acoustic CAD či Computer Aided Acoustic design – CAAD).

2. Použitá metodika modelování a vztahy pro základní psychoakustické parametry

Při počítačové simulaci šíření akustických vln ve velkých uzavřených prostorech (koncertní sály, přednáškové místnosti, nádražní haly apod.) jsou hlavně používány paprskové metody. Kabiny motorových vozidel jsou svými rozměry na rozhraní použitelnosti paprskových metod a metod numerického řešení elastodynamických rovnic (FME resp. BME). Paprskové metody jsou výhodné jednak pro rychlost výpočtů a jednak z toho důvodu, že umožňují identifikaci příspěvků od jednotlivých odrazujících ploch. Pro akustické účely jsou hlavně používána varianta založená na určení drah paprsků (tzv. ray-tracing) nebo metodou zrcadlových zdrojů. Použitý systém Raynoise (LMS Numerical Technologies, Leuven) přitom používá kombinování obou postupů.

Na základě měření v kabině vozidla Škoda Octavia Combi byla v systému Ansys nejprve vytvořena síť plošných elementů vymezujících vnitřní vzduchový prostor kabiny. Vzniklá struktura je na obr. 1. Samostatně byla mimo prostor vozidla namodelována i postava sedícího člověka, která pomocí booleovských operací umožnila vytvářet modely s uvážením obsazení kabiny pasažéry. pro generování sítě byly použity prvky SHELL63. Jednotlivým odrazným plochám pak byly přiřazeny frekvenčně závislé součinitele odrazu (viz tab. 1). Při výpočtu byla uvážena směrovost vyzařování zvuků při mluvení člověka, z hlediska odrazivosti byly uvažovány difusní odrazy.



Obr. 1 Model kabiny Škoda Octavia Combi

Tabulka 1 Hodnoty Sabinových reflexních koeficientů pro jednotlivé materiály používané v kabině vozidel

	125 Hz	250 Hz	500Hz	1000Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000Hz
Sklo	0,07	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
Plast	0,02	0,02	0,06	0,13	0,46	0,44	0,56	0,66
Dveře	0,31	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10	0,11
Střecha	0,08	0,08	0,01	0,15	0,45	0,75	0,85	0,85
Sedačky	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,85
Plst'	0,4	0,69	0,45	0,56	0,59	0,61	0,55	0,57
Textil	0,02	0,02	0,06	0,13	0,46	0,44	0,56	0,66

Pro zvukový vjem v ohraničeném prostoru má základní význam doba dozvuku charakterizující časový pokles amplitud vln přicházejících za vlnou přímou. Dozvukový čas bývá definován pro různé hodnoty tohoto poklesu tj T_{60} , T_{30} , T_{20} , T_{10} , kde T_x znamená čas potřebný k tomu, aby hladina efektivní hodnoty amplitudy akustického tlaku poklesla právě o x dB, při výpočtech byla sledována nejčastěji používaná hodnota T_{60} . Za předpokladu existence difusního pole lze pro dobu dozvuku použít vztah odvozený na bázi statistické akustiky

$$T_{60} = \frac{0,161V}{S\bar{\alpha}}, \quad (1)$$

kde V je objem prostoru, S celková plocha stěn a $\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sqrt{S_i \alpha_i}$ je střední hodnota součinitele absorpce. Při počítačové simulaci se vyhodnocuje doba dozvuku pro zadaný bod příjmu z vypočítaných echogramů (obr. 3) tj. ze spádu amplitud odražených vln v závislosti na čase. Tímto způsobem je možné zjišťovat hodnoty doby dozvuku v jednotlivých místech prostoru kabiny popř. vytvářet mapy hodnot dozvuku. na řezech kabinou.

Z hlediska akustického komfortu v kabině nás zajímá srozumitelnost mluvené řeči pronášené ať již některým z pasažérů nebo z reproduktorů autorádia. Pro její posouzení se jako kritérium používá tzv. ztráta srozumitelnosti souhlásek ZSS. V případě že odstup signálu od okolního šumu je větší než 25dB a difusního pole lze pro výpočet tohoto parametru použít vztah

$$ZSS[\%] = \frac{200T^2 D^2 N}{VQ}, \quad (2)$$

kde T je doba dozvuku, D je vzdálenost mezi zdrojem a místem příjmu, V je objem uzavřeného prostoru [m^3], Q je součinitel směrovosti zdroje, A je počet zdrojů. Pomocí matematického modelování na bázi geometrické akustiky je srozumitelnost řeči posuzována podle hodnot modulační transformační funkce MTF, která se určuje normalizací Fourierovy transformace impulsní odezvy $p(t)$ tj.

$$MTF(f) = \left[\frac{\int_0^{\infty} e^{2\pi jft} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right] * \left[1 + 10^{-SNR/10} \right]^{-1/2}, \quad (3)$$

kde f je modulační frekvence. V rámci systému Raynoise je na základě zprůměrování hodnot modulační funkce vyhodnocován index srozumitelnosti řeči STI popř. jeho průměrná hodnota pro frekvence 500Hz a 2000Hz tj. index srozumitelnosti rychle mluvené řeči RASTI – viz tab.2

Tabulka 2 Vztah mezi subjektivním hodnocením srozumitelnosti a hodnotou indexu RASTI

Subjektivní hodnocení	Hodnota RASTI
Nejhorší	0,00 – 0,30
Horší	0,30 – 0,45
Dostatečné	0,45 – 0,60
Dobré	0,60 – 0,75
nejlepší	0,75 – 1,00

3. Analýza výsledků

Mapa hodnot indexu srozumitelnosti řeči STI v rovině probíhající podélně středem kabiny vypočítaná pro případ mluvícího řidiče při použití standardních materiálů odrazných ploch je na obr. 2a. Z mapy je zřejmé, že srozumitelnost řeči je při poslechu v úrovni hlav spolujezdců poměrně dobrá tj. vypočítané hodnoty indexu STI dosahují hodnot nad 0,6. Při použití materiálů s vyšší pohltivostí (střecha, boky dveří, zadní odkládací deska obloženy plstí místo textilií) se hodnoty STI ještě o něco zvýšily – obr. 2b. Jak je však zřejmé z echogramů vypočítaných pro poslech pasažéra na zadním sedadle, při použití materiálů se zvýšenou pohltivostí dochází ke zrychlení poklesu amplitud odražených vln a snížení jejich četnosti (obr. 3), což zřejmě signalizuje snížení doby dozvuku a zhoršení auralizace přijímaných akustických signálů. Čili při obkládání stěn kabiny zvukoizolačními materiály sice dochází ke snižování hluku v kabině ale zároveň také ke snižování kvality poslechu hudby.

Z hlediska srozumitelnosti poslechu řeči z autorádia je z obr. 4a zřejmé, že pro dosažení únosných hodnot STI i pro posluchače na zadních sedadlech je nutné umístění reproduktorů i v zadní části vozu. Přitom však zároveň dochází i k jistému snížení srozumitelnosti řeči z autorádia pro pasažéry na předních sedadlech – viz srovnání 4a a 4b.

4. Závěr

Pomocí metod matematického modelování na bázi geometrické akustiky lze provádět odhad kritérií akustické kvality kabin motorových vozidel. Do výpočtů je přitom možné zahrnout poměrně jednoduchým způsobem směrovost zdrojů a příjmu, vliv pohltivosti odrazných ploch, efekt binaurálního příjmu. Jistým omezením je nemožnost výpočtu celé impulsové odezvy studovaného poslechového prostoru z důvodu. Pro srovnání s experimentálními výsledky je zřejmě žádoucí spolupráce s většími firmami vybavenými potřebným experimentálním zařízením. Pro srovnání počítačové simulace a experimentálních měření je zřejmě také žádoucí standardizace používaných psychoakustických indexů, s konečností výpočetních časů.

5. Poděkování

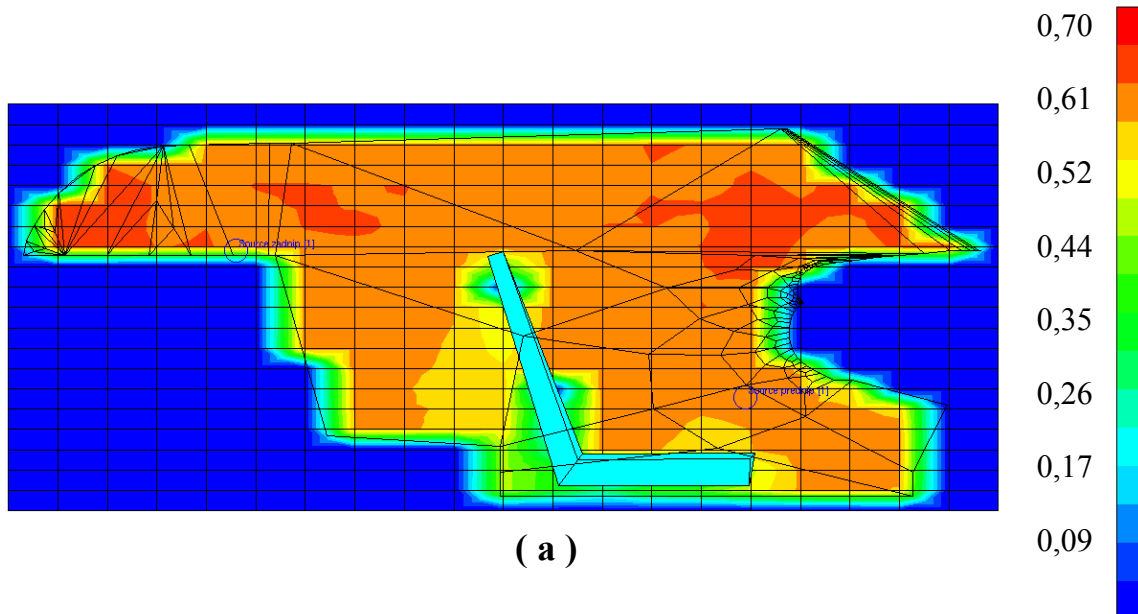
Práce byla podporována prostředky CEZ MSM262100001 „Výpočtové a fyzikální modelování problémů inženýrské a termofluidní mechaniky těles a fázových přeměn”.

6. Literatura

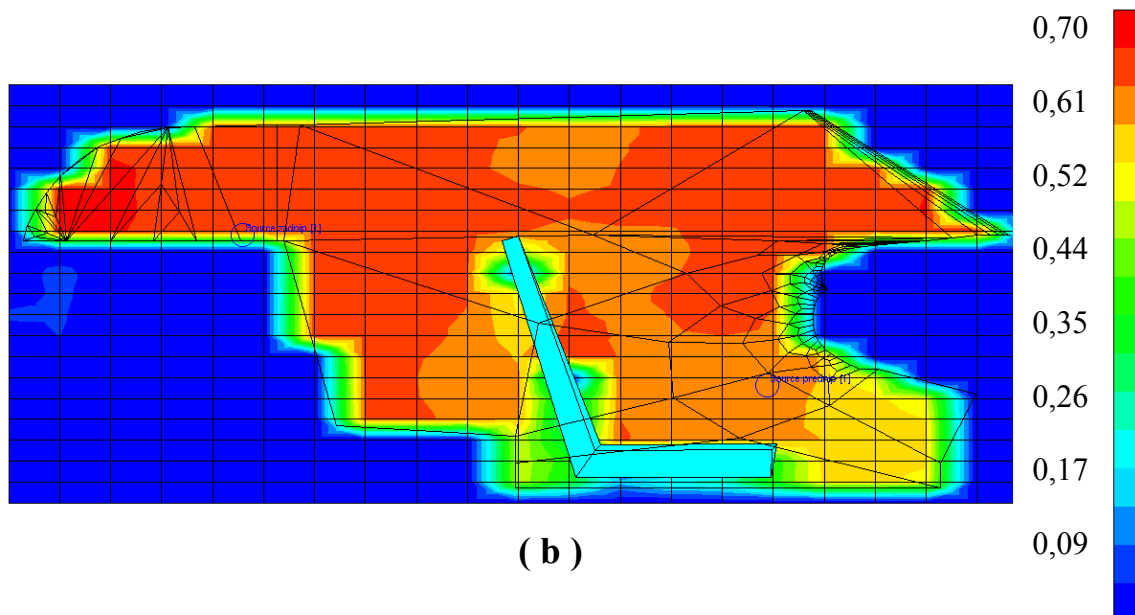
Beranek L.L. (1947) Design of Speech Communication System. *Proceedings of the IRE*, Vol. 35, pp. 880-889.

Kuttruff, K.H. (1993) Auralization of Impulse Response Modeled on the Basis of Ray-Tracing Results. *J. Audio Eng. Soc.* Vol. 41, No. 11, pp. 876-880.

Pelant P. (1997) Zavádění psychoakustických metod do vývoje osobních vozů Škoda. *Sborník 55. akust. sem.*, Koutv, pp. 121-126.

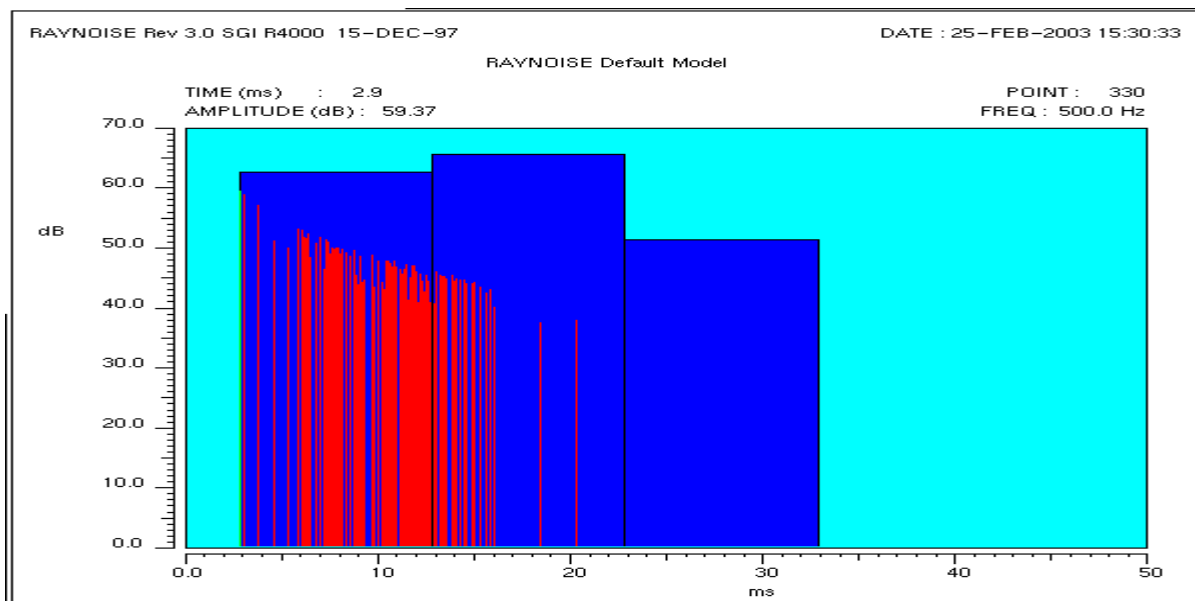


z

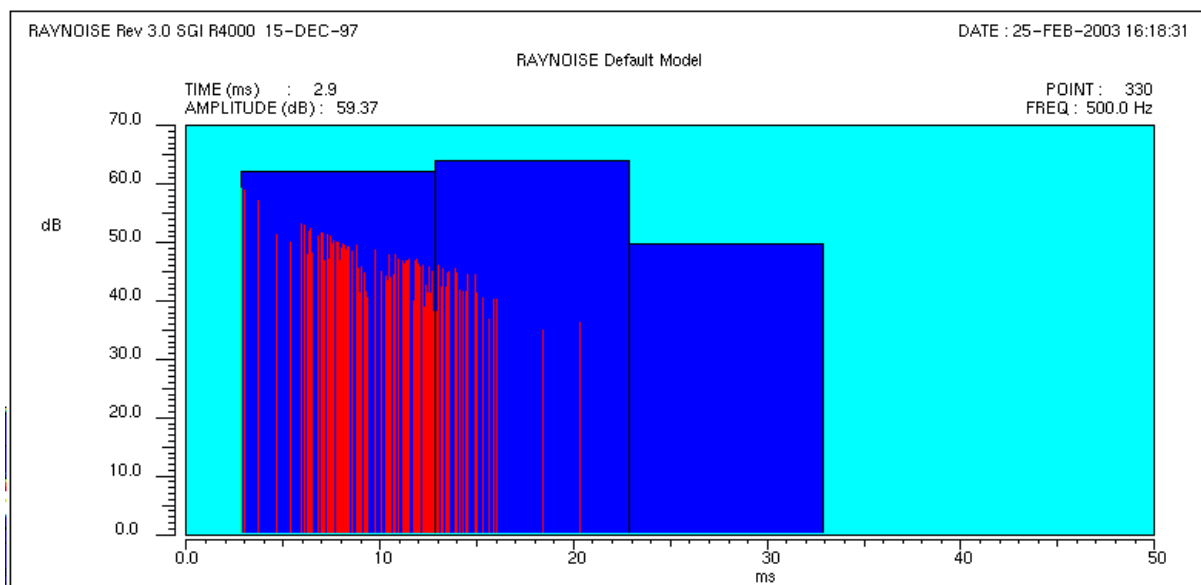


z

Obr. 2 Mapa izolinií indexu srozumitelnosti řeči řidiče STI v kabině vozidla Škoda Octavia Combi pro frekvenci 500Hz : (a)- standardní hodnoty pohltivosti odrazných ploch; (b) – zvýšené hodnoty pohltivosti odrazných ploch

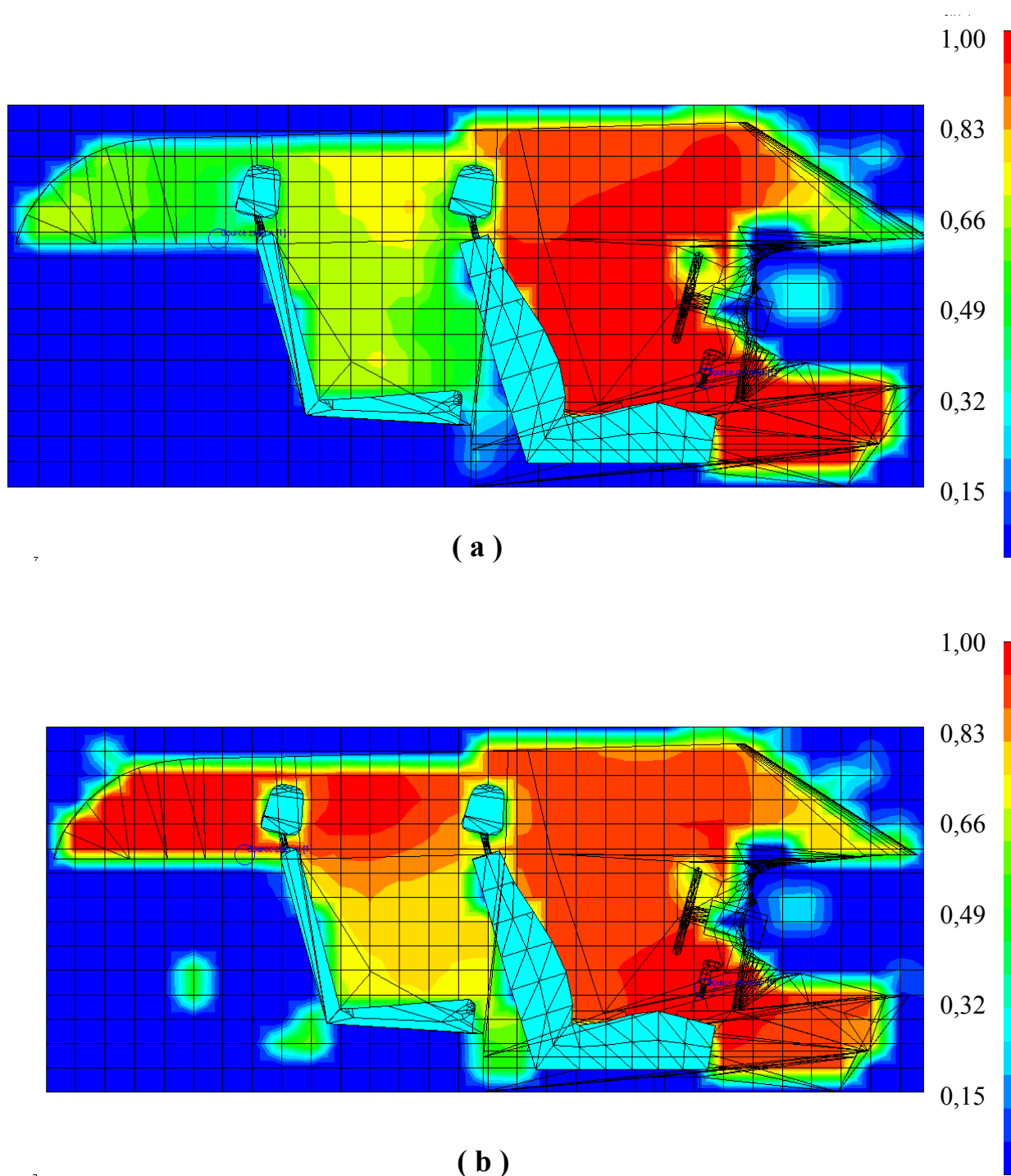


(a)



(b)

Obr. 3 Echogram od řidiče v místě spolujezdce na pravém zadním sedadle pro frekvenci 500 Hz : (a)- standardní hodnoty pohltivosti odrazných ploch; (b) – zvýšené hodnoty pohltivosti odrazných ploch



Obr. 4 Mapa indexu srozumitelnosti lidské řeči STI při poslechu autorádia pro frekvenci 500 Hz ; (a) – reproduktory umístěné v jen v předních dveřích, (b) – reproduktory v předních dveřích a na zadním platu zavazadlového prostoru