

Numerické řešení lidské fonace

Ing. Martin Lasota <martin.lasota@tul.cz>, doc. Ing. Petr Šidlof, Ph.D.

Abstrakt

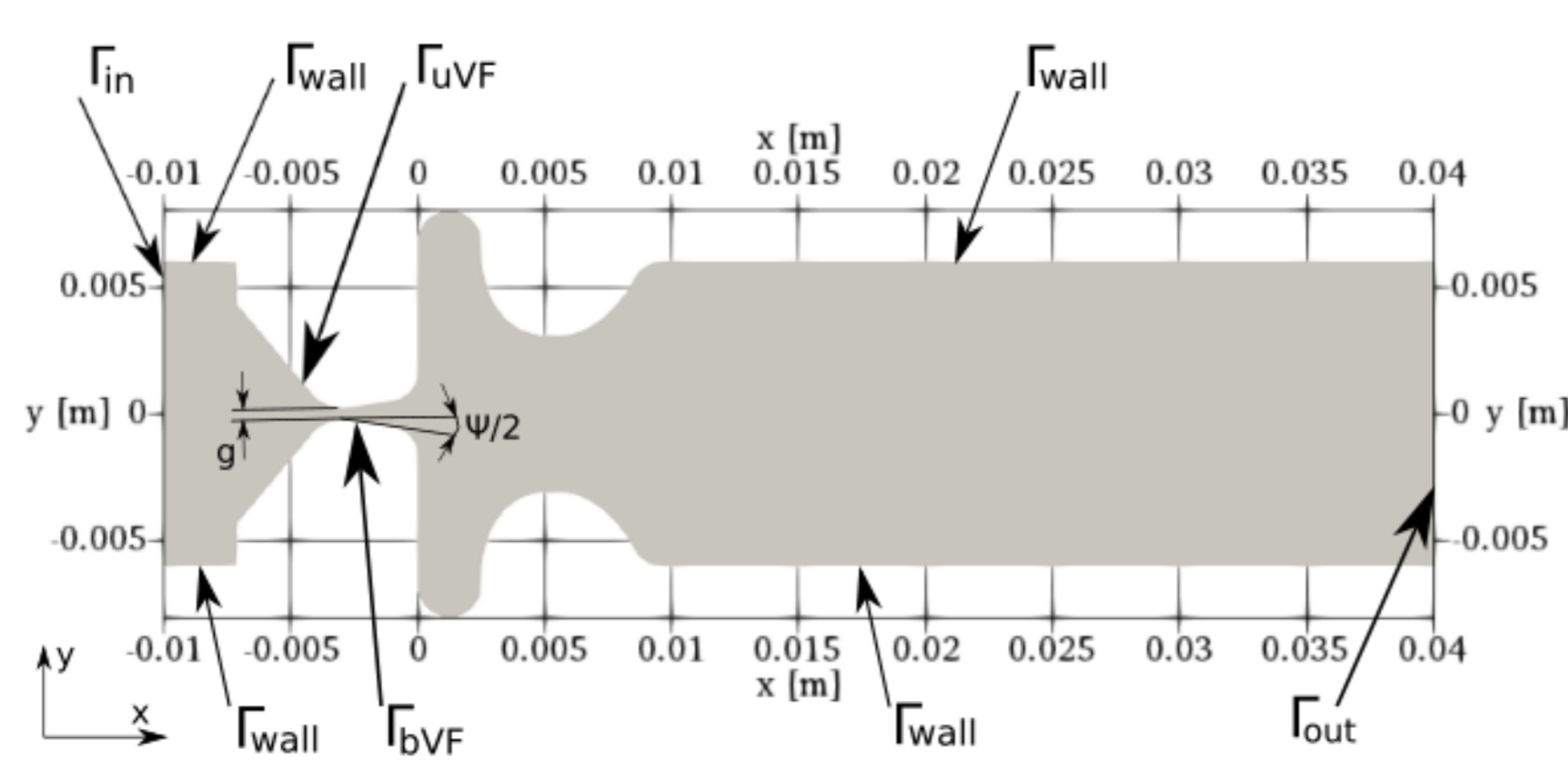
Konferenční příspěvek srovnává numerický výpočet s měřením. Zacieleno bylo na oblast lidského krku. Turbulence, která se vyskytuje v místech za hlasivkami, je použita jako akustický zdroj. Tato nahromaděná energie se musí někde vyzářit, větší část se tedy nese dutinami přes překážky až k výstce (rty). Tento biofyzikální proces stojí za tvorbou zvuku a artikulované řeči. Oblast respiračního traktu je pro výpočet zjednodušena. Vybrány byly jednotlivé samohlásky [u:] a [i:].

Definice cílů

- CFD výpočet turbulentního proudění při lidské fonaci
- Výpočet akustického zdroje z turbulentních struktur
- CAA výpočet šíření zvuku vokálním traktem

Metody

- 3D geometrický model hlasivek, Scherer [1]
- Ventrikulární řasy, Agarwal [2]



Obr. 1 – Mid-sagitální řez výpočetní oblasti hlasivek

- CFD model:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \bar{U}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

1. Jednorovnicový model, Davidson [3]

$$\frac{\partial k_{SGS}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_j k_{SGS}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial k_{SGS}}{\partial x_j} \right] = -\tau_{ij} : \bar{S}_{ij} - C_E \frac{k_{SGS}^{3/2}}{\Delta}$$

$$\nu_t^O = C_k \Delta \sqrt{k_{SGS}} \quad -\tau_{ij} : \bar{S}_{ij} = 2 \nu_t \sqrt{\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$$

2. Wale model, Nicoud [4]

$$\nu_t^W = (C_m \Delta)^2 \frac{(s_{ij}^d s_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (s_{ij}^d s_{ij}^d)^{5/4}}$$

- CAA model:

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p^a}{\partial t^2} - \nabla \cdot \nabla p^a = -\frac{1}{c_0^2} F_{p^a}, \quad F_{p^a} = \frac{\partial^2 p^{ic}}{\partial t^2}$$

3. PCWE model, Kaltenbacher [5]

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{D^2 \psi^a}{Dt^2} - \nabla \cdot \nabla (\psi^a) = -\frac{1}{\rho c_0^2} \frac{Dp^{ic}}{Dt}$$

kde:

Filtrovaná rychlost \bar{U} , filtrovaný tlak \bar{P} , molekulární kinematičká vazkost ν , tenzor vazkých napětí τ_{ij} , subgridní turbulentní energie k_{SGS} , subgridní turbulentní kinematičká vazkost ν_t , filtrovaný tenzor rychlosti deformace \bar{S}_{ij} , deviatorická část tenzoru rychlostního gradientu s_{ij}^d , modelové konstanty C_E , C_k a C_m , délkové měřítko Δ , rychlost zvuku c_0 , akustický tlak p^a , zdrojový člen F_{p^a} , akustický potenciál ψ^a a hustota ρ .

Numerická schémata

- Časová diskretizace: implicitní schéma 2. řádu (backward)
- Prostorová diskretizace:
 1. Centrální diferenční schéma (CDS)
 2. Total variation diminishing (TVD)

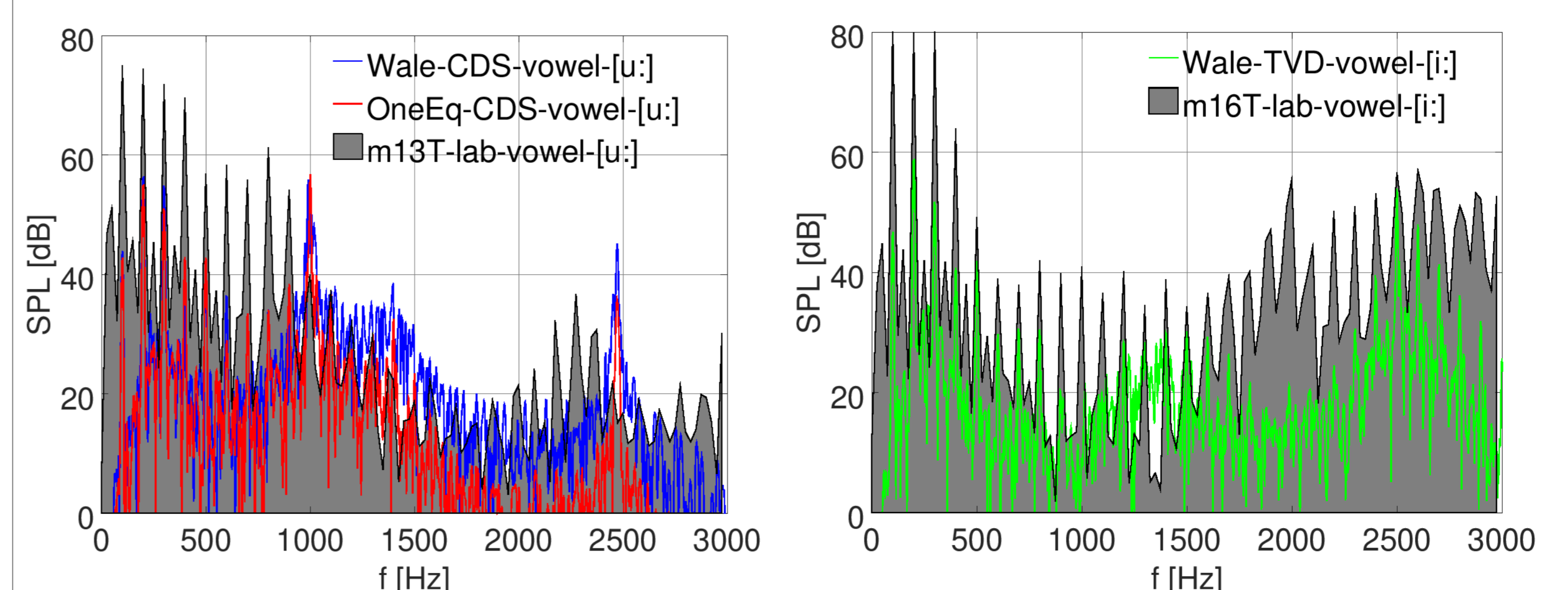
Výsledky

Obr. 2 zachycuje okamžik rozložení akustického tlaku při maximálním průtoku vzduchu hlasivkami. Horní model (kratší) odpovídá samohlásce [i:], dolní [u:]. Na řešení je vidět, že se mechanická vlna na konci vokálního traktu nevrací zpět, čehož je dosaženo tlumicí vrstvou okolo výstky.



Obr. 2 – Celá výpočetní oblast a zobrazení průběhu akustického tlaku

Obr. 3 ukazuje srovnání výpočtu a měření (m13T, m16T). První dominantní frekvence odpovídá předepsané frekvenci kmitání hlasivek (100 Hz). K identifikaci samohlásky dochází kolem 1 kHz a 2.5 kHz pro [u:] a 2.5 kHz pro [i:].



Obr. 3 – Akustická spektra. Rozložení hladiny akustického tlaku (SPL) na jednotlivé frekvence.

Závěr

- Použití modelu PCWE v kombinaci s WALE prokázalo nezanedbatelné zesílení SPL v oblasti druhého formantu pro [u:] (23 %) a zesílení vyšších harmonických složek frekvencí.
- Touto aplikací se potvrdila idea, že zahrnutí příspěvku deviatorické části tenzoru rychlostního gradientu do výpočtu turbulentní vazkosti predikuje poruchy proudu významně jinak a kladně se tento efekt projeví na získaném akustickém signálu.

References

- [1] Scherer, R. and Shinwari, D. and De Witt, J. and Zhang, Ch. and Kucinski, R. and Afjeh, A. Intraglottal pressure profiles for a symmetric and oblique glottis with a divergence angle of 10 degrees. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2001
- [2] Agarwal M., Scherer R. Hollien H. The false vocal folds: shape and size in frontal view during phonation based on laminagraphic tracings, *Journal of Voice* 17(2), pp. 97-113. 2003
- [3] Davidson, Lars. Hybrid LES--RANS: back scatter from a scale-similarity model used as forcing. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2009
- [4] Nicoud, F. and Ducros, F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. *Flow, turbulence and Combustion*. 1999
- [5] Kaltenbacher, M. and Hüppe, A. and Reppenhagen, A. and Zenger, F. and Becker, S. (2017) Computational aeroacoustics for rotating systems with application to an axial fan. *AIAA journal*. 55(11), 3831-3838.