



WAVES OF WHISPERING GALERY

Karel PELLANT¹, Michal MEJZLÍK², Karel PŘIKRYL³

Summary: *The results of the experimental acoustic measurements and the results of the mathematical modeling in the hall of the Austerlitz monument are presented. For the mathematical modeling of the spreading of sound in the acoustic volume is used the ray method (system RAYNOISE) and the final element method (system ANSYS). The comparison of the modeling with the experiment demonstrates the presence of waves in the solid structure of the barrel ceiling i.e. the presence of the waves of whispering gallery.*

1. Úvod

V literatuře zabývající se stavební akustikou je znám zvláštní akustický jev, který se někdy nazývá „efekt šeptající galerie“, nebo „efekt šeptající zdi“. Tento jev spočívá ve velmi dobrém přenosu hovoru dvou osob stojících v těsné blízkosti opačných rohů místnosti. K tomuto jevu přitom dochází i při jejich poměrně velké vzdálenosti, kdy v důsledku poklesu signálu přímé vlny geometrickým rozšiřováním tento přenos by za normálních okolností nenastával. Výskyt tohoto jevu je přitom zmiňován v prostoru některých budov s klenutými stropy (např. budova Mohyly míru u Slavkova, katedrála sv. Pavla v Londýně, pavilon v Kroměříži). Termín „efekt šeptající galerie“, je však také někdy používán pro přenosový jev vln mezi vysílačem a přijímačem (a to i vln elektromagnetických) při jejich polohách v ohniscích elipsy odrazných povrchů.

V akustice je efekt šeptající galerie zpravidla objasňován koncentrací energie pole odražených vln do jednoho místa, přitom se předpokládá šíření vln pouze v akustickém prostředí (Airyho hypotéza). Toto vysvětlení je zřejmě postačující pro zmiňovaný příjem v ohniscích rotačních elipsoidů nebo paraboloidů. Tato interpretace je však méně zřejmá pro objasnění komunikace mezi osobami v opačných rozích místnosti, které nejsou ohnisky ploch vytvářejících klenbu. V tomto případě nelze totiž vyloučit vznik vln zvaných „vlny šeptající galerie“, které se šíří v pevnofázovém prostředí v blízkosti kontaktu s prostředím fluidním tj. v daném případě uvnitř klenby stropu (Rayleighova hypotéza). Šíření těchto vln je zmiňováno i v seismologii [1], kde jsou tyto vlny popisovány jako vlny slabě refragované (někdy také zanořující se vlny) a jejich výskyt je podmiňován existencí vrstev s gradientem rychlosti. Z hlediska paprskové teorie se přitom jedná o vlny mimo rámec geometrické akustiky, tj. pro jejich popis je nutné uvážit vyšší členy paprskové řady [2]. Na příkladu památníku Mohyly míru si provedeme diskusi vln šířících se klenbou a akustickým prostorem na základě konfrontace výsledků experimentálních měření a matematického modelování.

¹ RNDr Karel Pellant, CSc, Institute of Mechanics, FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno, Czech Republic. E.mail: pellant@umtn.fme.vutbr.cz

² Ing. Michal Mejzlík, PGS of FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno, Czech Republic. E.mail: michal-mejzlik@email.cz

³ Docent ing. Karel Přikryl, CSc, Institute of Mechanics, FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno, Czech Republic. E.mail: prikryl@umtn.fme.vutbr.cz

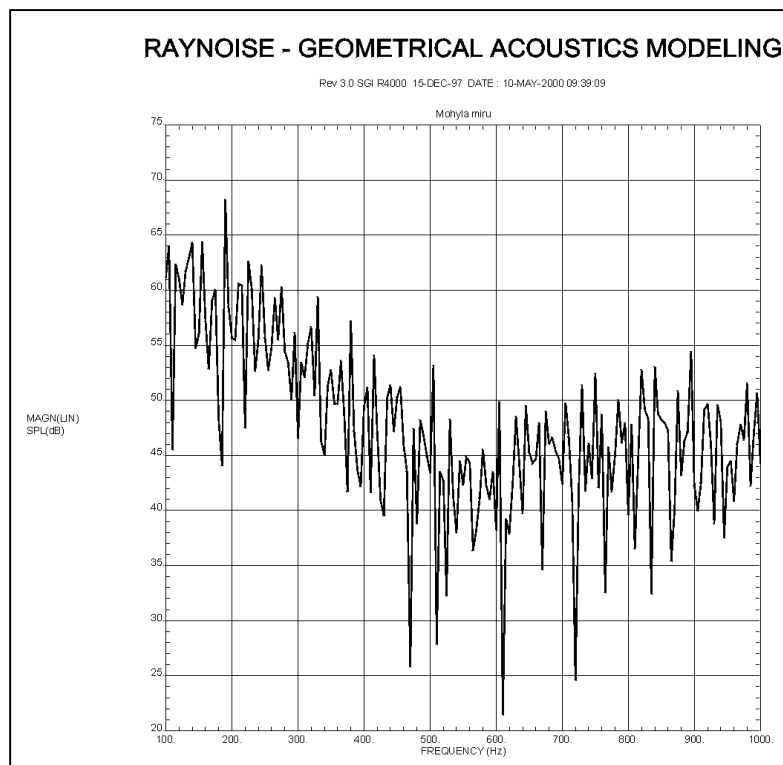
2. MODELOVÁNÍ ŠÍŘENÍ ZVUKU POD KLENBOU HALY

Pro účely objasnění jevu šeptající galerie v budově haly památníku Mohyly míru (obr. 1) byl v systému ANSYS vytvořen prostorový model vnitřních ploch v hale. Pro vytvoření prostorového modelu byla použita výkresová dokumentace (obr.2) firmy Project building s.r.o., která v tomto objektu prováděla opravy. Tvar klenby byl vytvořen vytažením a protínáním navzájem kolmých křivek, které jak se zjistilo z výkresů měli skutečně eliptický tvar. Pro vytvoření sítě konečných prvků byly použity skořepinové prvky SHELL63, které umožnili přesné namodelování zaoblené klenby, konečnoprvkový model je na obr. 3. Vlastní modelování šíření akustických vln ve vnitřním prostoru budovy bylo provedeno pomocí systému Raynoise. Poloha zdroje přitom odpovídala osobě šeptající v rohu místnosti (bodový zdroj ve výšce 1,65m ve vzdálenosti 0,2m od rohu klenby), pro omítku a kamenou podlahu byly uvaženy příslušné Sabinovy absorpční koeficienty. Mapy akustického tlaku byly vypočítávány pro různé frekvence byly vypočítány ve svislé popř. horizontální rovině. Při výpočtu hladin akustického tlaku byla uvažována superpozice signálů s ohledem na fázi.

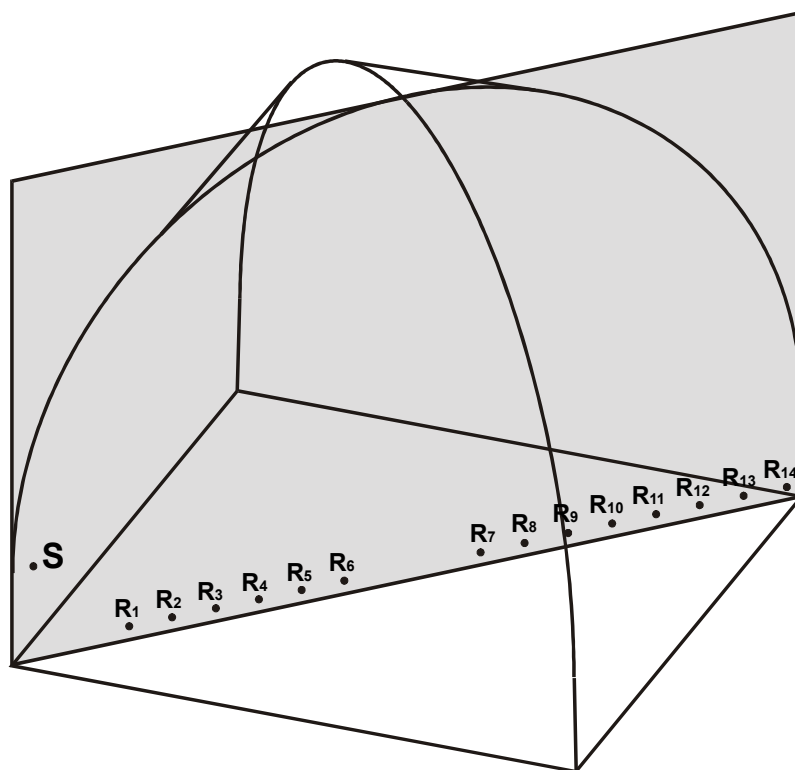
Nejdříve byla provedena spektrální analýza v pásmu 100-1000Hz tj. v oblasti lidské řeči pro přijímač umístěný v opačném rohu místnosti. Z vypočteného spektra (obr. 4) je zřejmé, že průměrná amplituda frekvencí klesá až do 500Hz, v oblasti nízkých frekvencí nejvyšší lokální maximum bylo pro 190Hz. Pro tuto frekvenci pak byl ve svislé rovině procházející úhlopříčkou vnitřní haly (obr. 5.) proveden výpočet mapy akustického tlaku (obr. 6). Výsledek potvrzuje pozorovaný jev tj. zesílení hodnot tlaku v oblasti opačného rohu místnosti. Jednou z hlavních příčin jevu je zřejmě fokuzace pole odražených vln v opačném rohu místnosti, jak naznačují i vypočtené paprskové diagramy (obr. 7).



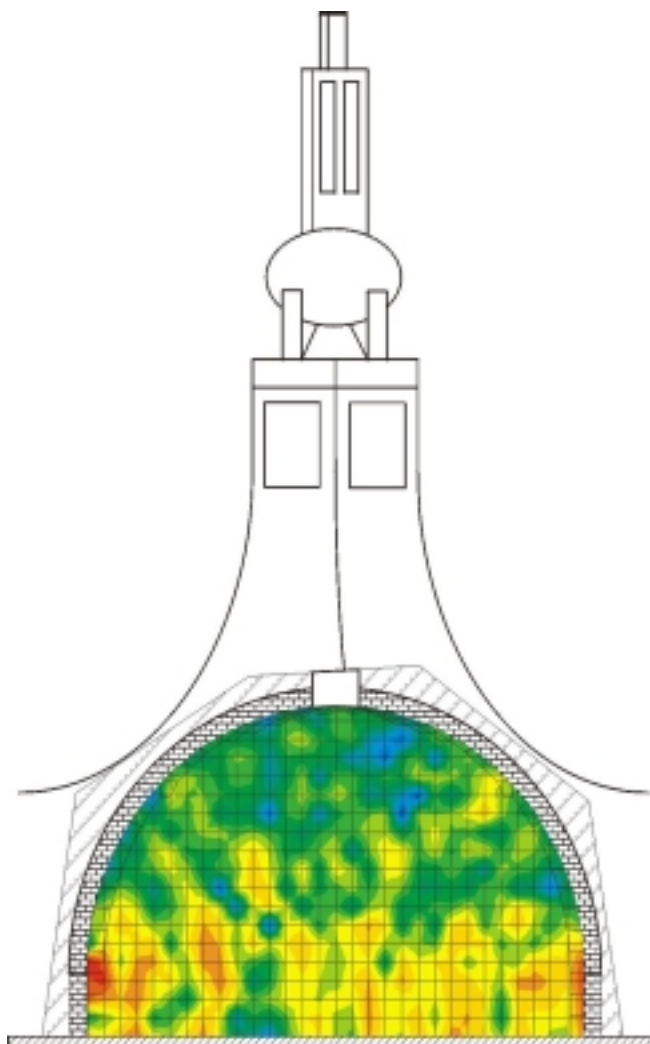
Obr. 1 Památník bitvy u Slavkova - budova Mohyly míru (foto P. Janíček)



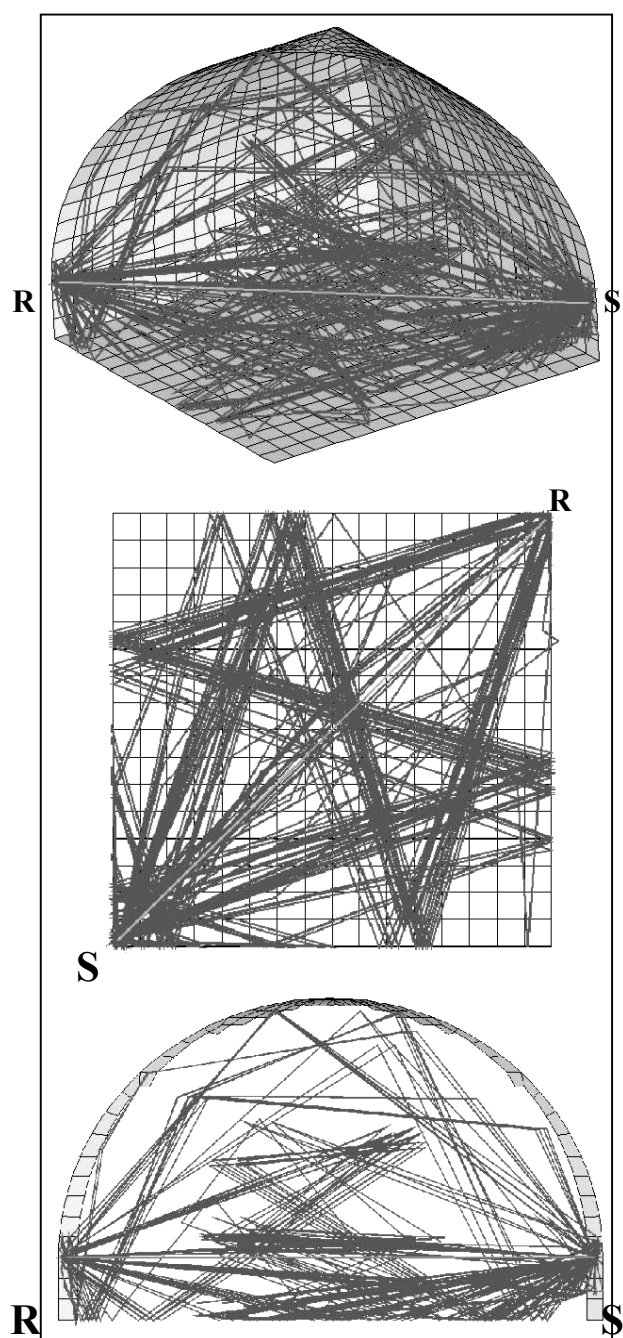
Obr. 4 Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci v pásnu 100-1000Hz pro výkon zdroje odpovídající spektru lidské řeči



Obr. 5 Svislá pozorovací rovina použitá při teoretických výpočtech map akustického tlaku a uspořádání zdroje S a přijímacích bodů R_i při experimentálním měření



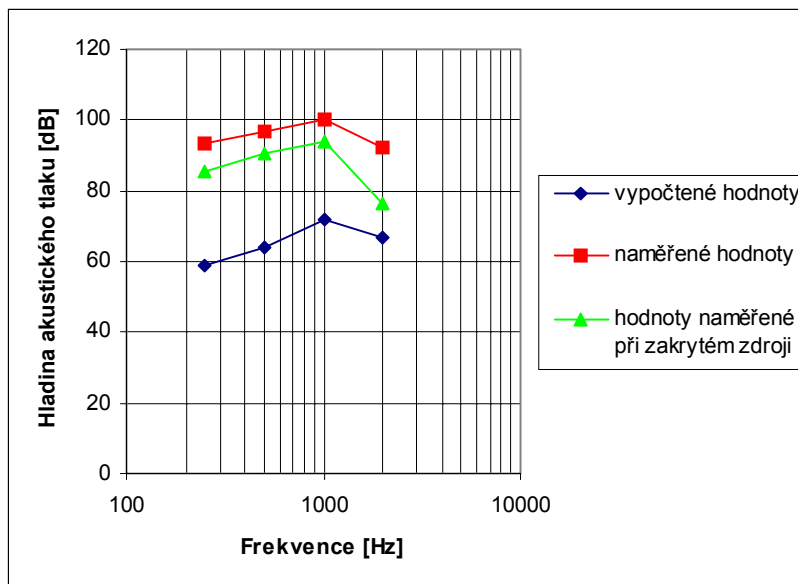
Obr. 6 Mapa izolinií akustického tlaku ve svislé rovině jdoucí úhlopříčkou haly pro frekvenci 190Hz, zdroj umístěn v levém rohu



Obr. 7. Paprskové diagramy přímé vlny a vln odražených při různých pohledech do haly. **S** a **R** označují polohu zdroje a přijímače

3. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ

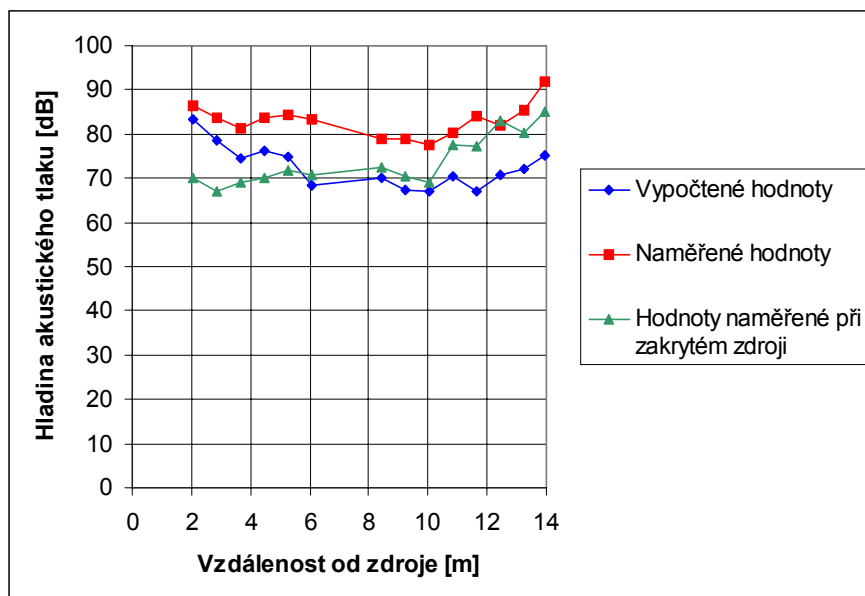
Při měření byl zdroj zvuku umístěn v rohu místnosti ve výšce 1,65 metrů a vzdálenosti 20 centimetrů od čela rohu. Před měřením byla kontrolována citlivost na umístění zdroje zvuku. Při výškové změně o 10 cm se hodnota akustického tlaku měnila až o 10 dB. Podobně při stejné změně polohy vysílače ve směru horizontálním činil rozdíl hladin akustického tlaku až o 3dB. Za zdroj zvuku byl použit plochý kazetový magnetofon, ve kterém byl vložen kazetový nosič s nahrávkou, která obsahovala jednotlivé oktávové frekvence v rozsahu 125 až 8000 Hz. Hodnoty vyzařovaného výkonu na jednotlivých frekvencích byly přecejchovány na stejnou hodnotu pomocí systému PULSE. K měření byl použit přenosný zvukoměr od firmy Brüel&Kjaer typ 2231. Na zvukoměru byl namontován mikrofon od stejné firmy pro měření ve volném poli o velikosti 1/2“ typ 4155 s lineární charakteristikou v rozmezí frekvencí 10 Hz až 20kHz. Měření bylo provedeno ve dvou variantách. Nejdříve byly naměřeny hodnoty pro odkrytý zdroj. Ve druhé variantě byl zdroj zakryt minerální vatou o tloušťce 20 cm, aby bylo možné posoudit podíl signálu šířícího se vzduchem. Pro porovnání vypočítaných a experimentálně naměřených hodnot byl teoretický výpočet prováděn s experimentálně zjištěnou hodnotou akustického výkonu. Vypočtené a naměřené hodnoty akustického tlaku v závislosti na frekvenci jsou na obr. 8.



Obr. 8 Závislost vypočtených a naměřených hodnot akustického tlaku na frekvenci pro poloha vysílače i přijímače odpovídající postavení osob v opačných rozích haly

Z obr. 8 je zřejmé, že pro frekvence v intervalu <250-2000Hz> při konfiguraci zdroje a přijímače v opačných rozích haly jsou vypočtené hodnoty tlaku nižší než hodnoty naměřené, přitom však existuje korelace mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami. Rozdíl by mohl být interpretován systematickou chybou způsobenou přibližností výpočtu (do výpočtů nebylo možné zahrnout vlny všech násobností, paprsková metoda je založena na vysokofrekvenční aproximaci tj. přibližném řešení elastodynamické rovnice). Tyto skutečnosti však zřejmě v daném případě nejsou podstatné, protože hodnoty vypočtené systémem RAYNOISE jsou v poměrně dobré shodě (kolem 2dB) s výsledky výpočtů provedených v rámci systému ANSYS.

K objasnění odchylky mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami lze však dospět na základě srovnání výsledků měření s odkrytým a zakrytým zdrojem(rozdíl je kolem 5dB). Přitom zakrytí zdroje (ve směru dovnitř haly) minerální vatou tloušťky 20cm by mělo na 1kHz odpovídat poklesu kolem 15dB . Část zvukového signálu se tedy zřejmě šíří nejen vzduchem ale také strukturou klenby.



Obr. 8 Závislost vypočtených a naměřených hodnot akustického tlaku na vzdálenosti od zdroje pro frekvenci 500Hz. Hodnota vzdálenosti 14m odpovídá poloze přijímače v opačném rohu místnosti než je zdroj

4. ZÁVĚR

Na základě konfrontace výsledků matematického modelování a výsledků experimentálních měření provedených v prostoru haly památníku Mohyly míru je objasněna podstata jevu šeptající galerie v tomto objektu. I když hlavní příčinou jevu je fokusace pole odražených vln v opačném rohu haly, k celkovému efektu přispívají také 10dB vlny šířící se jako slabě refragované vlny klenbou stropu. Studium vln šeptající galerie přitom nemá význam jenom jako akustická zajímavost. Zvládnutí podmínek jejich generace by mohlo přispět i pro řešení řady otázek ze stavební akustiky jako je např. ozvučení sálů, nahrávacích studií, potlačení existence koincidenčních jevů apod. Fyzikálně podobné jevy přitom nelze vyloučit i v oblasti zevního zvukovodu, vlny šeptající galerie mohou zřejmě hrát roli i při tzv. kostním slyšení.

Acknowledgement: This work has been supported by scientific and research schemes of the VUT Brno CEZ J22/98:262100001 and by the project of IGA ČR No. „NK/6179-3.

5. REFERENCES

- [1] Červený V., Molotkov I.A., Pšenčík I.: Ray Method in Seismology, Praha 1977
- [2] Červený V., Ravindra R.: Theory of seismic head waves. Univ. Toronto Press, Toronto 1971
- [3] Beranek L.L., Vér I.L.: Noise and vibration control engineering. New York, John Wiley and Sons 1992