

## Návod na laboratorní úlohu

### Solving Microwave Imaging Problems by means of Global Optimization

**Název studijního předmětu:** Advances in Microwave Imaging

**Vedoucí cvičení/experimentu:** Ing. Tomáš Pokorný

**Připravil:** Ing. Jan Tesařík, Doc. Dr.-Ing. Jan Vrba, M.Sc.

## Úvod:

Mikrovlnné lékařské zobrazování má velký potenciál nahradit konvenční zobrazovací metody. Hlavní výhodou je využívání neionizujícího záření, které umožňuje zvýšit frekvenci screeningů oproti rentgenu, CT nebo mamografu, dále pak kompaktnost a cena oproti MRI. Momentální nevýhodou je výpočetní náročnost. Proto se v současné době velmi často využívají výpočetní clustery.

V rámci tohoto cvičení vytvoříme 2D numerický model tomografu s 10ti anténními elementy a zobrazované oblasti (model hlavy s oblastí postiženou cévní mozkovou příhodou) a implementujeme 3 rekonstrukční algoritmy. Samotná implementace algoritmů počítá s využitím výpočetního clusteru pro zvýšení rychlosti rekonstrukce, neboť na desktopovém PC rekonstrukce dielektrických parametrů trvá desítky hodin.

Rekonstrukční algoritmy jsou založené na iterativním řešení inverzní úlohy. Nejprve bude simulován model tomografu s modelem hlavy s cévní mozkovou příhodou ischemického nebo hemorhagického typu. Výstupem simulace bude matice rozptylových parametrů. Algoritmus bude iterativně pouštět ekvivalentní ale prázdný model tomografu s měnícími se dielektrickými parametry v zobrazované oblasti, dokud nezíská ekvivalentní matici rozptylových parametrů. Úkolem algoritmu je nalézt extrém funkce tvořené z neznámých dielektrických vlastností. Musíme vytvořit vhodnou funkci pro optimalizaci. Tato funkce se nazývá Fitness funkce (v některé literatuře Cost funkce). Funkce tvoří samostatný skript, kde se spouští model pro optimalizaci, kam se dosazují hodnoty proměnných. Vstupními parametry Fitness funkce je matice neznámých  $x$ , referenční matice rozptylových parametrů a matice známých parametrů. Na výstupu funkce je číslo, které udává míru shody referenční matice s maticí vypočítanou. Matice rozptylových parametrů získaná ve fitness funkci se porovnává s referenční maticí rozptylových parametrů. Rovnice, která porovnává obě rozptylové matice má následující zápis:

$$fit = 1^{10} \cdot \sum_{n=1}^{10} \sum_{m=1}^{10} \frac{|(ref_{nm} - opt_{nm})^2|}{|ref_{nm}^2|},$$

kde  $n$  jsou řádky,  $m$  jsou sloupce,  $ref$  je referenční matice rozptylových parametrů a  $opt$  je matice rozptylových parametrů získaná v každé iteraci. Vynásobení celé rovnice je kvůli vhodnému posunutí rozsahu.

Fitness funkce má na vstupu i matici známých parametrů. Jakákoli doplňující informace nám pomůže zrekonstruovat obraz. I z tohoto důvodu náš model pro optimalizaci bude obsahovat kompletní geometrii a dielektrické vlastnosti tkání, kromě mozkové oblasti, která bude rozdělena na několik čtverců (pixelů). V těchto čtvercích budeme hledat dielektrické vlastnosti. Jelikož bude zobrazovaná oblast pouze v mozku, můžeme zvolit počáteční hodnoty dielektrických vlastností pixelů ekvivalentní mozku. Takto předáme algoritmu doplňující informace a zrychlíme proces rekonstrukce i její přesnost. V rámci testování algoritmů zobrazování můžeme vyzkoušet algoritmu poskytnout různé doplňující informace.

V praxi bude vhodné algoritmy rekonstrukce dielektrických vlastností v zobrazované oblasti kombinovat např. s radarovou metodou, která určí hranice jednotlivých tkání. Tkáním pak můžeme přiřadit jejich průměrné dielektrické vlastnosti získané z databáze. Těmito doplňujícími informacemi na vstupu do algoritmu zrychlíme a zpřesníme rekonstrukci dielektrických vlastností.

## Cíl

Cílem této úlohy je představit algoritmus rekonstrukce dielektrických parametrů u mikrovlnného zobrazování na příkladu detekce patologického jevu (cévní mozkové příhody, nádoru) v mozku. Úloha je rozdělena do tří hlavních částí. První z nich zahrnuje vytvoření 2D modelu MWI systému a fantomu lidské hlavy rozdělených na zobrazované regiony. Dále nastavení numerické simulace a jako poslední testování algoritmu pro rekonstrukci dielektrických parametrů v definované oblasti na výpočetním clusteru.

## Úkoly

- Vytvořte zjednodušený 2D model mikrovlnného zobrazovacího systému s 10 anténami rovnoměrně rozmístěnými kolem hlavy dospělého člověka
- V prostředí MATLAB implementujte algoritmus rekonstrukce obrazu (Genetický algoritmus, Nelder-Med, Particle swarm)
- Zhodnoťte efektivitu algoritmů a vytvořte hybridní algoritmus

## Použité zařízení a přístroje:

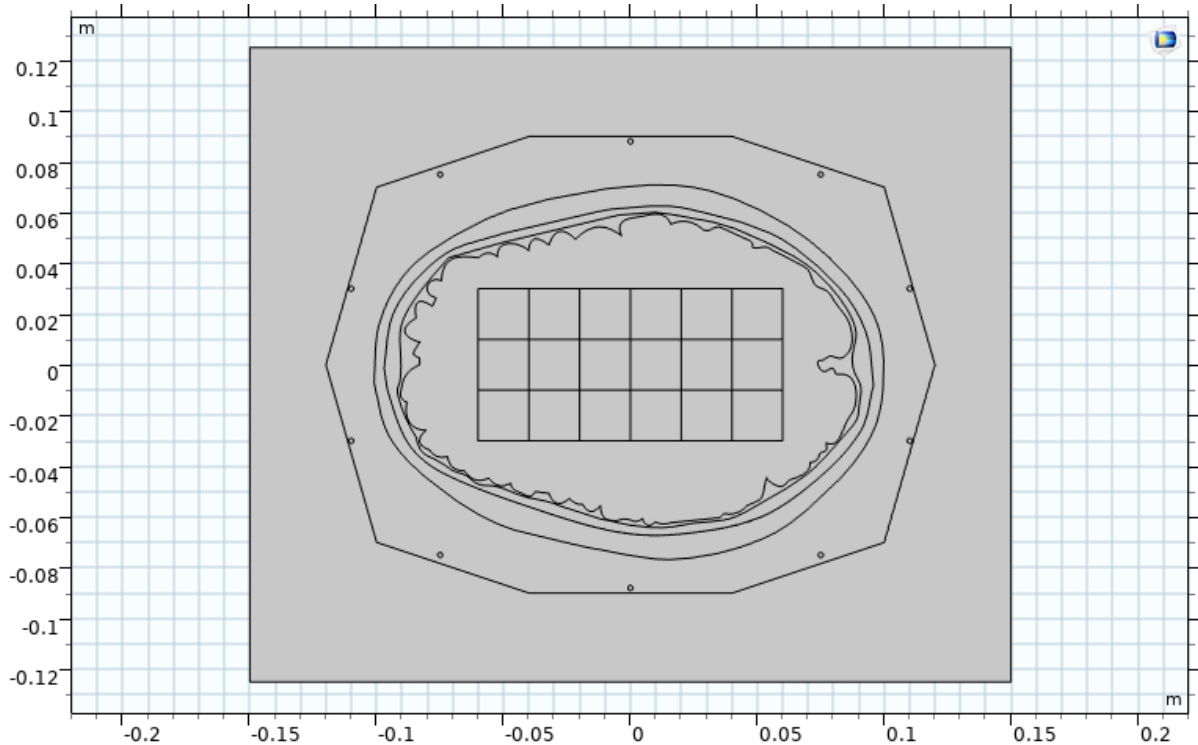
- Výpočetní Cluster
- COMSOL Multiphysics
- MATLAB

## Tvorba modelu v COMSOL Multiphysics a nastavení numerických simulací

V kartě Model Wizard si zvolte 2D geometrii. V sekci Radio Frequency zvolte fyziku: Electromagnetic Waves, Frequency Domain. V dalším kroku vyberte studii: Frequency Domain. Tlačítkem Done spustíte modelační prostředí Comsol Multiphysics.

### 1) Tvorba geometrie

Model se skládá z mikrovlnného systému s 10 anténami (bodové zdroje intenzity elektrického pole), reálné geometrie hlavy (kůže, kost, mozkomíšni mok a mozek) zjednodušené pro účely simulací a z geometrie cévní mozkové příhody umístěné v oblasti mozku.



Obrázek 1.: Geometrie mikrovlnného systému s 10 anténami a fantomem lidské hlavy (kůže, kost, mozkomíšní mok, mozek a pole čtverců).

**Návod:**

- a) **Import geometrie lidské hlavy:** V okně Model Builder kliknutím pravým tlačítkem myši na sekci Geometry vyberte z nabídky Import. V okně Settings klikněte Browse a vyberte soubor s 2D geometrií hlavy s koncovkou .mphbin, klikněte import. Nyní se Vám nahraje geometrie lidské hlavy obsahující kůži, kost, mozkomíšní mok a mozek.
- b) **Vytvoření mikrovlnného systému:** Vytvořte mikrovlnný systém o obklopující hlavu. V okně Model Builder kliknutím pravým tlačítkem myši na sekci Geometry vyberte z nabídky Polygon, a v okně Settings nastavte požadované parametry x a y. Velikost systému by neměla přesáhnout 26 cm x 20 cm
- c) **Vytvoření antén:** V okně Model Builder kliknutím pravým tlačítkem myši na sekci Geometry vyberte z nabídky Circle, a v okně Settings nastavte požadované parametry. Zvolte vhodné umístění kruhů, co nejbližší středu každé stěny. Rozměry definujte parametricky v sekci Global Definition – Parameters. Velikost antény volte 1 mm. Antény se nesmí dotýkat stěn. Tip: stačí vytvořit 3 antény a využít funkci mirror.
- d) **Vytvoření prostředí:** V okně Model Builder kliknutím pravým tlačítkem myši na sekci Geometry vyberte z nabídky Rectangle, a v okně Settings nastavte velikost alespoň 30 cm x 25 cm.
- e) **Vytvoření mřížky pro odhad dielektrických parametrů** algoritmem. V okně Model Builder kliknutím pravým tlačítkem myši na sekci Geometry vyberte z nabídky Polygon. Pomocí polygonu rozdělte oblast mozku na několik čtverců.

## 2) Přidání materiálů

Pro celý model definujte materiály: Vnějšího prostředí (vzduch), systému (kapalina), kůže, kosti, mozkomíšního mok, mozku a ischemické a hemorrhagické cévní mozkové příhody. Budeme uvažovat hodnoty dielektrických vlastností pro frekvenci 1 GHz (frekvence, kterou využívá mikrovlnný systém). Hodnoty dielektrických paraemtrů jsou převzaty z databáze [IT IS FOUNDATION](#). Hodnotu dielektrických vlastností pro mozek vypočítáme jako průměr dielektrických vlastností pro šedou hmotu mozkovou, bílou hmotu mozkovou a mozeček. Při hemorrhagické CMP dochází ke krvácení do mozku (použijeme dielektrické vlastnosti pro krev) a při ischemické CMP dochází k poklesu dielektrických vlastností (budeme uvažovat pokles o 20 %). Jako výplň systému zvolíme tekutinu, která slouží jako impedanční přizpůsobení antén.

**Návod:** V okně Model Builder pravým klikem na sekci Materials si přidejte nový materiál. Poté jsem v okně Settings každému materiálu přiřaďte příslušnou doménu (část modelu) a nastavte hodnoty relativní permitivity, relativní permeability a elektrické vodivosti.

Permitivitu a vodivost každého ze čtverců je nutné definovat samostatně a pomocí parametrů v sekci Global Definition – Parameters. Jedině tak zajistíme pozdější změnu parametrů algoritmem pomocí Live Linku pro Matlab.

	Permitivita (-)	Vodivost (S/m)	Permeabilita
<b>Přizpůsobovací kapalina*</b>	40	1	1
<b>Kůže</b>	40.9	0.9	1
<b>Kost</b>	11.97	0.09	1
<b>Mozkomíšní mok</b>	68.44	2.46	1
<b>Mozek</b>	46.57	0.97	1
<b>Ischemická CMP</b>	37.26	0.78	1
<b>Hemorrhagická CMP</b>	61.08	0.78	1
<b>Vzduch</b>	1	0	1

\*Kapalina obklopující model hlavy pro zajištění přenosu EM vlny do prostředí hlavy a pro eliminaci tzv. jevu cross-coupling (komunikace mezi anténami).

## 3) Přidání portů

Po vytvoření geometrie je nutné anténám přiřadit porty. Porty definujte tak, aby vždy jeden port vysílal a všechny ostatní přijímaly – postupné přepínání portů během výpočtu.

**Návod:** V okně Model Builder pravým klikem na sekci Electromagnetic Waves, Frequency Domain otevřete nabídku, ze které si vyberte Port, který se pak zobrazí v seznamu pod sekci Electromagnetic Waves, Frequency Domain. Každému portu přiřaďte vždy celou jednu kružnici reprezentující anténu a v sekci Electric mode field nastavte souřadnici z na hodnotu 1. Ve vlastnostech antén dále nastavte konstantu šíření vlny:  $(2 \cdot \pi \cdot \text{freq}) \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{const}} \cdot 45 \cdot \mu_{\text{const}}}$ . Přepínání portů se nastaví v sekci Electromagnetic Waves, Frequency Domain, kde je v okně Settings zaškrťovací políčko Activation port sweep. Poté je potřeba si nastavit přepínání portů tak, že kliknete pravým tlačítkem na sekci Study 1 a přidáte funkci s názvem Parametric Sweep, u které v okně Settings nastavíte parametr PortName a hodnoty 1 – 10, tj. range(1,1,10) a nebo jednotlivě viz 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10.

#### 4) Definice okrajových podmínek a spuštění simulace

Nyní je třeba definovat okrajové podmínky modelu (Scattering Boundary Condition). Tato podmínka tzv. ohraničuje výpočetní oblast, kdy EM vlna dopadající na tuto hranici je plně absorbována. Model se bude tedy chovat tak, jako kdyby se vlna rozptýlila do okolního prostředí čímž se zmenší oblast výpočtu pouze do okolí modelu, které nás zajímá. Jelikož máme pouze 2D geometrii, je třeba dále nastavit, aby se EM vlny šířily tak, že vektor elektrického EM vlny je kolmý na zobrazovanou rovinu. Dále je potřeba vypnout modelování šíření vlny uvnitř antén.

**Návod:** V sekci Wave Equation si zkontrolujte, zda jsou označeny všechny domény, nastaveny typy materiálů na Solid a získání relativní permitivity, permeability a vodivosti z materiálu. Klikněte pravým tlačítkem myši na sekci Electromagnetics Waves, Frequency domain a přidejte sekci Scattering Boundary Condition, kde označte hranice prostředí.

V okně Settings v sekci Electromagnetic Waves, Frequency Domain nastavte řešení komponent pro elektrické pole na Out-of-plane vector odeberte všechny domény patřící anténám.

V sekci Study, Step 1 nastavte frekvenci jako proměnnou, jejíž hodnota je 1 GHz (proměnná Freq). Po nastavení frekvence tlačítkem Compute spustíte simulaci.

#### 5) Mesh – diskretizace modelu

Jelikož COMSOL k výpočtu používá řešení Maxwellových rovnic (PDE) pomocí metody konečných prvků (FEM), je potřeba geometrii celého model diskretizovat na konečný počet prvků, tedy vytvořit síť, ve které v uzlových bodech dochází k řešení PDE. COMSOL využívá k této diskretizaci elementy tvaru čtyřstěnu pro 3D geometrie, respektive trojúhelníku pro 2D geometrie. K dosažení věrohodných výsledků je potřeba respektovat použitou frekvenci a relativní permitivitu daných vrstev ve vztahu k maximální velikosti čtyřstěnu (pětina vlnové délky v daném prostředí). Je zřejmé, že čím menší velikosti elementu sítě, tím náročnější je výpočet, ale o to věrohodnější výsledky dostáváme.

**Návod:** V okně Model Builder a sekci Mesh nadefinujete mesh. Doporučení: Type: Physics-controlled mesh; Element size: Extra Fine

#### 6) Výstupy numerických simulací

Zobrazte si tabulku S-parametrů. V nabídce Results klikněte pravým tlačítkem na sekci Derivated Values a přidejte Global Matrix Evaluation. V settings poté zobrazte data v proměnné emw.SdB ze Study 1/Parametric solution. Zkontrolujte, zda se Vám zobrazuje kompletní matice rozptylových parametrů.

## Implementace algoritmů rekonstrukce dielektrických vlastností

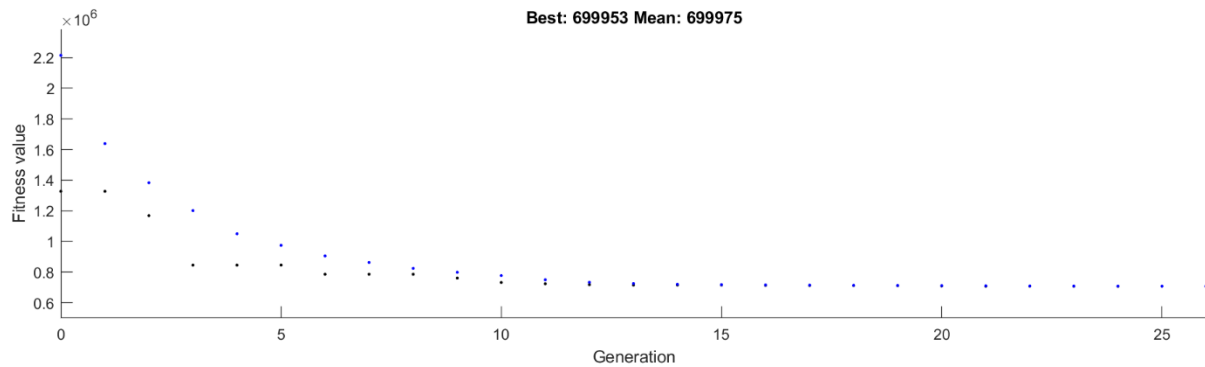
Spusťte COMSOL LiveLink pro MATLAB a otevřete skript control.m a dále postupujte podle návodu ve skriptu.

- 1) Načtení vytvořeného modelu
- 2) Vytvoření matice permitivity a vodivosti pro jednotlivé čtverce v modelu
  - Čtverce mají permitivitu a vodivost mozku
  - Jeden čtverec bude obsahovat permitivitu a vodivost cévní mozkové příhody
- 3) Zapsání hodnot matice do modelu.
- 4) Spuštění simulace a získání referenční matice rozptylových parametrů
  - Pro získání s-matice musíme znát její proměnou a dataset
  - Pokud máme N antén, tak matice rozptylových parametrů musí být velikosti NxN
  - Oříznutí sloupečku frekvence
- 5) Vytvoření matice počátečních hodnot algoritmu
  - Jako počáteční hodnoty proměnných algoritmu volíme předpokládané hodnoty, tedy permitivitu a vodivost mozku.
- 6) Nastavení fitness funkce (cost funkce) algoritmu
  - Fitness funkce algoritmu se nachází ve skriptu fce\_fit.m
  - Vstupem funkce je model, referenční s-matice a počáteční hodnoty proměnných
  - Počáteční hodnoty proměnných se nachází v matici x a zapisují se do modelu
  - Je spuštěna simulace modelu a je získána optimalizovaná matice
  - Rovnice porovnání optimalizované matice s referenční maticí
- 7) Nastavení algoritmu rekonstrukce obrazu
  - Skriptu najdete celkem 3 algoritmy vhodné na vyzkoušení: Genetický algoritmus, Nelder – Med algoritmus a algoritmus optimalizace hejnem částic (Particle swarm).
  - V případě potřeby je možné vytvořit hybridní algoritmus
- 8) Testování algoritmů
  - K testování algoritmů je nutné využít výpočetní cluster, neboť běh algoritmu na desktopovém PC trvá téměř 24 hodin.
  - Vyzkoušejte různé možnosti nastavení algoritmů
  - Vytvořte hybridní algoritmus

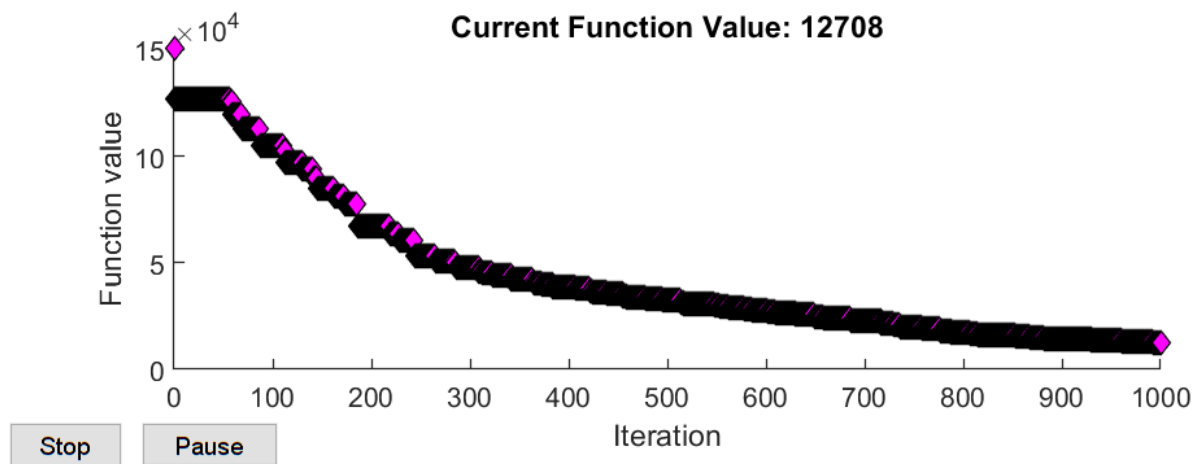
## Zhodnocení efektivity algoritmů

Zhodnoťte výpočetní a časovou aktivitu algoritmů. Určete, jaký algoritmus je vhodný na detekci a klasifikaci cévní mozkové příhody a najděte nejlepší nastavení algoritmů. Analyzujte možnost využití hybridního algoritmu. U hybridního algoritmu určete ideální bod ukončení algoritmu.

## Ukázkové výsledky:



Obrázek 2.: Optimalizace Fitness funkce pomocí genetického algoritmu.



Obrázek 2.: Optimalizace Fitness funkce pomocí Nelder-med algoritmu.

Všechny obrázky jsou autorským dílem.