



OSŁABIENIE FALI POPRZECZNEJ NISKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI
OTRZYMYWANE METODĄ MR

Attenuation of low frequency shear waves obtained by MR methods

Tomasz Klinkosz

Instytut Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Gdański, ul. Wita Stwosza 57, Gdańsk
fiztom@univ.gda.pl

STRESZCZENIE

Istotą tej propozycji jest wykorzystanie spektroskopii elasto-magnetycznego rezonansu (EMRS) [1] do pomiarów lokalnego tłumienia sprężystych fal poprzecznych wprowadzonych do próbki biologicznej. Pomiaru można dokonać poprzez połączenie metody EMRS z metodami, w których kolektywne przemieszczenie spinów jest indukowane poprzez różne, zewnętrzne czynniki fizyczne, np.: zmienne pole elektryczne, silny gradient pola magnetycznego lub podłużną falę sprężystą. W tej pracy omówiono podstawowe idee związane z takimi metodami jak: spektroskopia MR ruchliwości nośników ładunku (EMMRS) [2] i spektroskopia MR selektywnych stanów energetycznych (SSMRS)

1. WPROWADZENIE

Obrazowanie rozkładu współczynnika sprężystości (podłużnej lub poprzecznej fali sprężystej) stało się istotnym narzędziem diagnostycznym. Uzyskuje się go m.in. przy pomocy metod magnetycznego rezonansu jądrowego [3] jak również przy pomocy metod ultradźwiękowych (Sonoelasticity) [4]. W ostatnich latach zaproponowano kilka nowych metod określania własności mechanicznych tkanek zarówno w dziedzinie magnetycznego rezonansu [5] jak również wśród metod ultradźwiękowych. Elastografia znalazła liczne zastosowania w diagnostyce medycznej, np. do identyfikacji guzów nowotworowych takich organów jak: piersi, prostata, mózg czy wątroba, których sztywność zwykle różni się znacząco od tej dla zdrowych tkanek otaczających nowotwór. Ponadto w hipertermii, robotyce chirurgicznej, medycynie sportu itp. Jak podają ośrodki onkologiczne, niektóre rodzaje guzów nowotworowych piersi są wykrywalne tylko przy pomocy elastografii, a nie są wykrywalne w badaniach mammograficznych czy też w standardowym badaniu MRI (Magnetic Resonance Imaging - Obrazowanie Magnetyczno-Rezonansowe). Pojawia się więc potrzeba określania takich parametrów fizycznych tkanek, jak: moduł sztywności (dla fal sprężystych ścinających lub podłużnych), lepkość środowiska oraz współczynnik

osłabienia dla fal sprężystych. W literaturze najczęściej spotykamy się z badaniami dotyczącymi pomiarów współczynnika sztywności ośrodka, chociaż również ostatni z wymienionych parametrów fizycznych - współczynnik tłumienia fal sprężystych, stanowi cenną informację kliniczną, choćby w przypadku zwapnienia kości lub uszkodzenia tkanek w wyniku ich termicznej ablacji. Podgrzanie układu biologicznego do temperatury powyżej 60°C objawia się znaczącą zmianą tłumienia fal sprężystych.

W tej pracy omówione zostaną zupełnie nowe metody, zaproponowane przez autora kilka lat temu, pozwalające na określenie lokalnej wartości współczynnika tłumienia fal sprężystych poprzecznych w ośrodku, a polegające na połączeniu EMRS z podanymi niżej metodami.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Metody realizują się poprzez pomiar zmian fazy poprzecznej składowej magnetyzacji. Zmiany tej fazy są proporcjonalne do iloczynu skalarnego amplitudy gradientu pola magnetycznego \vec{G}_0 oraz efektywnego przemieszczenia $\vec{\zeta}_{eff}$ paramagnetycznych elementów próbki obdarzonych spinem. Efektywne przemieszczenie spinów jest superpozycją przemieszczenia $\vec{\zeta}_F$ wywołanego poprzez falę poprzeczną propagującą się w próbce oraz przemieszczenia $\vec{\zeta}_F(t)$ indukowanego poprzez zewnętrzne czynniki wymuszające zbiorowy ruch spinów w całej objętości próbki. Jeśli założymy, że gradient pola magnetycznego jest postaci: $G(t) = G_0 \sin \omega_G t$, czynnik zewnętrzny przyłożony do próbki ma postaci: $\vec{F}(t) = \vec{F}_0 \sin(\omega_F t - \varphi_F)$, oraz przemieszczenie spinów indukowane falą sprężystą poprzeczną: $\xi(t) = \xi_0 \sin(\omega_\xi t - kx + \varphi_\xi)$, wówczas wypadkowe zmiany fazy poprzecznej składowej magnetyzacji po n okresach T_G gradientu pola magnetycznego $G(t)$ są postaci:

$$\Delta\Phi = \frac{\gamma n \vec{G}_0 \cdot \vec{\zeta}_{\xi_0}}{\omega_G (\alpha - 1)} \exp(-\mu \cdot x) \cdot \cos \left[\omega_G (\alpha - 1) \left(t + \frac{nT_G}{2} \right) - kx + \varphi_\xi \right] \sin \left[\omega_G (\alpha - 1) \frac{nT_G}{2} \right] + \frac{\gamma n \vec{G}_0 \cdot \vec{\zeta}_{F_0}}{\omega_G (\beta - 1)} \cos \left[\omega_G (\beta - 1) \left(t + \frac{nT_G}{2} \right) + \varphi_F \right] \sin \left[\omega_G (\beta - 1) \frac{nT_G}{2} \right] \quad (1)$$

gdzie: γ - współczynnik giromagnetyczny, k - wektor falowy fali sprężystej, $\omega_G, \omega_\xi, \omega_F$ - częstości odpowiednio gradientu pola magnetycznego $G(t)$, fali poprzecznej oraz czynnika zewnętrznego, $\alpha = \omega_\xi / \omega_G, \beta = \omega_F / \omega_G, x$ - kierunek rozchodzenia się fali sprężystej, μ - współczynnik tłumienia fali sprężystej, $\vec{\zeta}_{F_0}, \vec{\zeta}_{\xi_0}$ - przemieszczenie spinów wywołane odpowiednio przez czynnik zewnętrzny oraz falę poprzeczną, φ_ξ, φ_F - faza początkowa odpowiednio fali poprzecznej oraz czynnika zewnętrznego.

Zmiany fazy poprzecznej składowej magnetyzacji $\Delta\Phi$ opisane powyższą zależnością są: niezależne od czasu, wykazują charakter rezonansowy - maksimum zmian obserwuje się dla potrójnego rezonansu $\omega_G = \omega_F = \omega_\xi$, czyli gdy $\alpha = \beta = 1$ (wzór 1), wykazują selektywność przestrzenną. Umożliwia to precyzyjne określanie ich przestrzennej zależności a tym samym stanowi wiedzę pozwalającą na kalibrację wybranych metod, przemiatanie badanej próbki poprzez zmianę fazy i częstotliwości czynników fizycznych odpowiedzialnych za ruch

spinów, pomiar lepko-sprężystych własności materii w wybranych rejonach złożonych próbek, oraz dystrybucji przestrzennej ruchliwości nośników ładunku przy połączeniu EMRS z EMMRS. Możliwe jest więc zobrazowanie rozkładu współczynnika tłumienia fali sprężystej poprzecznej o zadanej częstotliwości.

3. POSTACIE CZYNNIKA WYMUSZAJĄCEGO

Zewnętrzny czynnik indukujący zbiorowe przemieszczenie spinów może pochodzić, od: a) pola elektrycznego, b) silnego gradientu pola magnetycznego, c) podłużnej fali sprężystej o niskiej częstotliwości - rzędu setek herców. Tabela 1 przedstawia proponowane postacie czynnika zewnętrznego oraz odpowiadające im przemieszczenie elementów ośrodka.

TABELA 1. Postacie czynnika zewnętrznego oraz odpowiadające mu przemieszczenie spinów w próbce (\vec{E}_0 - amplituda pola elektrycznego o częstotliwości ω_E przyłożonego do badanej próbki, $\vec{G}_{SG,0}$ - amplituda silnego gradientu pola magnetycznego o częstotliwości ω_{SG} , \vec{u}_0 - amplituda długiej fali sprężystej o częstotliwości ω_u ; $\varphi_E, \varphi_{SG}, \varphi_u$ - fazy odpowiednio pola elektrycznego, gradientu pola magnetycznego, q - ładunek nośników ładunku, m - stan energetyczny wybranej grupy spinów, $\hbar = h/2\pi$, h - stała Planck'a).

Rodzaj czynnika zewnętrznego	Postać czynnika zewnętrznego	Przemieszczenie wywołane przez czynnik zewnętrzny
zmienne pole elektryczne	$\vec{E}(t) = \vec{E}_0 \sin(\omega_E t + \varphi_E)$	$\vec{\zeta}_E(t) = \frac{q}{6\pi\eta a_{ef}} \vec{E}_0 \sin(\omega_E t + \varphi_E)$
silny gradient pola magnetycznego	$\vec{G}_{SG}(t) = \vec{G}_{SG,0} \sin(\omega_{SG} t + \varphi_{SG})$	$\vec{\zeta}_{SG}(t) = \frac{\hbar m}{6\pi\eta a_{ef}} \vec{G}_{SG,0} \sin(\omega_{SG} t + \varphi_{SG})$
podłużna fala sprężysta	$\vec{u} = \vec{u}_0 \sin(\omega_u t + \varphi_u)$	$\vec{\zeta}_u(t) = \vec{\zeta}_{u,0} \sin(\omega_u t + \varphi_u)$

4. PROPOZYCJA POMIARU WSPÓLCZYNNIKA TLUMIENIA FALI POPRZECZNEJ

Ponieważ ogólnie zewnętrzny czynnik $\vec{F}(t)$ powoduje zbiorowy ruch spinów w całej objętości badanej próbki, czyli niezależnie od położenia na kierunku rozchodzenia się fali poprzecznej (oś x), proponuje się dokonać pomiaru w następujący sposób. Jako punkt charakterystyczny funkcji $\Delta\phi$ wybiera się jej minimum lokalne (lub też maksimum lokalne). Poprzez zmianę fazy fali sprężystej o $\Delta\varphi_\xi$, dokonujemy przemieszczenia wybranego minimum funkcji (a tym samym przemieszczamy w przestrzeni punkt, z którego pochodzi odpowiedź MR) o wartość Δx . Następnie zmieniając wartość amplitudy czynnika przemieszczającego spiny w całej objętości próbki, \vec{F}_0 , możemy „sprowadzić” wybrane minimum do wartości zerowej, czyli skompensować przemieszczenie elementu ośrodka

wywołane falą poprzeczną, przy pomocy zewnętrznego czynnika. Pomiar zmian fazy magnetyzacji $\Delta\Phi$, realizowany jest przy pomocy sekwencji obrazującej zaprogramowanej w tomografii MR. Powtarzając powyższe czynności wiele razy możemy „przeskanować” wybrany obszar próbki i określić jego wartości lepko-sprężyste, oraz podać wartość współczynnika tłumienia fali poprzecznej z rozdzielczością Δx .

Biorąc pod uwagę równanie (1) można stwierdzić, że w metodzie elastografii MR zmiany fazy poprzecznej składowej magnetyzacji są proporcjonalne do: wartości gradientu pola magnetycznego \vec{G}_0 i jego okresu T , amplitudy przemieszczenia elementu ośrodka obdarzonego spinem $\vec{\zeta}_0$ oraz ilości akumulacji N : $\Delta\Phi = c \cdot N \cdot T \cdot (G_0 \cdot \zeta_0)$, c - stała. Zmiana wzajemnej fazy pomiędzy sinusoidalnym gradientem pola magnetycznego a falą poprzeczną i czynnikiem zewnętrznym, przemieszcza w przestrzeni punkt obserwacji, z którego pochodzi odpowiedź MR, a w wyniku połączenia MRE z czynnikiem zewnętrznymi indukującymi dodatkowe przemieszczenie spinów, pozwala dokonać pomiaru lokalnego współczynnika tłumienia fali sprężystej w ośrodku, stosując na przykład sposób pomiaru opisany powyżej. Rozdzielczość przestrzenna metody jest uwarunkowana parametrami technicznymi tomografu MR i sprowadza się do rozmiaru piksela na obrazie tomograficznym. Przy założeniu stosunkowo niewielkiej macierzy obrazu, rzędu 256x256 punktów wynosi ona około 1 mm. Stanowi to ułamek długości rozpatrywanej fali poprzecznej propagującej się w ośrodku. Zasadniczym ograniczeniem metody jest zależność zmian fazy magnetyzacji od iloczynu skalarnego $(\vec{G}_0 \cdot \vec{\zeta}_{eff})$. Z uwagi na osłabienie rozpatrywanej poprzecznej fali elastycznej w próbce, rozdzielczość metody będzie malała wraz ze spadkiem amplitudy $\vec{\zeta}_\varepsilon(t)$.

6. PODSUMOWANIE

Metoda oparta na połączeniu EMRS z zewnętrznymi czynnikiem powodującymi zbiorowe przemieszczenie spinów pozwala na określenie i obrazowanie współczynnika tłumienia fal sprężystych poprzecznych na odcinku będącym ułamkiem ich długości fali. Pomiar osłabienia fali poprzecznej dokonuje się metodą *transformacji przemieszczenie – faza* poprzecznej składowej magnetyzacji $\Delta\Phi$.

LITERATURA

1. C. J. LEWA, Elasto-magnetic resonance spectroscopy, Europhys. Lett., **35(1)**, 73-76 (1996).
2. C. J. LEWA, Electrical mobility magnetic resonance spectroscopy, Spectr. Lett., **30(4)**, 771-781 (1997).
3. J. B. FOWLKES, et. all., Magnetic-resonance imaging techniques for detection of elasticity variation, Med. Phys., **22(11)**, 1771-1778 (1995).
4. E. J. CHEN, R. S. ADLER, P. L. CARSON, W. K. JENKINS, W. D. O'BRIEN, Ultrasound tissue displacement imaging with application to breast cancer, Ultras. Med. Biol., **21(9)**, 1153-1162 (1995).
5. N. BARIL, C. J. LEWA, J. D. DE CERTAINES, P. CANIONI, J. M. FRANCONI, E. THIAUDIÈRE, MR detection of mechanical vibration using radiofrequency field gradient, J. Magn. Reson., **153**, 1-6 (2001).