

Magnetni rezonantni signal

ŽELJKO Đ. VUJOVIĆ, Podgorica, Crna Gora

Stručni rad

UDC: 621.317:537.63

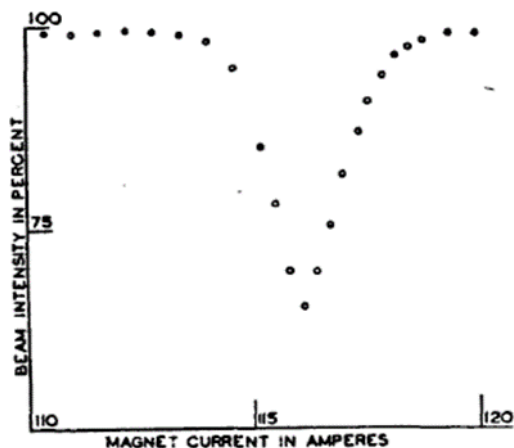
DOI:10.5937/tehnika1903415V

Cilj ovog rada je da opiše magnetni rezonantni signal, kako nastaje, koje vrste, tog signala, postoje i za šta se koriste. Za postizanje tog cilja kao polazna osnova uzet je originalni članak Isidora Ajzaka Rabija, kojim je objavljeno otkriće magnetne rezonancije između molekula LiCl i spoljašnjeg magnetnog polja, koje je mijenjano promjenom jačine električne struje, koja je stvarala to polje. Objašnjena je razlika između „tehnike neprekidnog talasa” i „impulsne NMR tehnike”. Prikazan je presjek tunela s glavnim magnetima savremenih uređaja za magnetno rezonantno slikanje. Date su definicije vektora neto magnetizacije, pojmova spin-rešetka relaksacija, spin-spin relaksacija, longitudinalna i transverzalna relaksacija, „Rabijeva precesija”, T_1 , T_2 i T_2^* vremenskih konstanti, prikazani su grafički i opisani FID, SE, MSE, FSE, TR, TE i kompjuterska animacija spin eha s njegovim raspadom.

Ključne riječi: magnetna rezonancija, indukovani signal, precesija, relaksacija, raspad, kompjuterska animacija, Free Induction Decay, spin echo

1. UVOD

U jeku priprema za Drugi svjetski rat, Isidor Ajzak Rabi je radio svoj mirnodopski posao. Godine 1938. objavio je crtež. Nekoliko tačaka. Evo tog crteža:



Slika 1 – Rezonancija LiCl iz Rabijevog članka iz 1938. godine

Na apscisi je jačina struje koja stvara glavno magnetno polje, a na ordinati jačina zraka u procentima.

Adresa autora: Vujović Željko, Podgorica, Bulevar Save Kovačevića 20/6

e-mail: etracon@t-com.me

Rad primljen: 14.05.2019.

Rad prihvaćen: 05.06.2019.

Na grafiku se vidi, pri vrijednosti jačine struje od oko 116A, šiljak, pad, apsorpcija „molekulskog zraka”.

Za ovaj crtež i njegovo objavljivanje dodijeljena mu je Nobelova nagrada za fiziku 1944. godine.

Rabi je, sa svojim saradnicima, pokušavao da izmjeri magnetna svojstva različitih jezgara atoma, uključujući vodonik, deuterijum i litijum. Koristili su prilagođeni Oto-Šternov aparat i opisali kako mogu da se pobude jezgra, oscilirajućim magnetnim poljem, da bi preokrenuli orijentaciju glavnog magnetna.

Rabijev eksperiment se sastojao od upotrebe elektromagneta, od otprilike 0,2T, i zavojnice koja je proizvodila oscilatorni RF talas od oko 3,5 MHz. Frekvencija RF polja je održavana da se ne mijenja, a glavno magnetno polje je mijenjano promjenom struje, koja ga je stvarala.

Rabi je, zatim, propustio „molekularni zrak” molekula litijum hlorida (LiCl), kroz vakuumsku komoru i, poslije toga, kroz magnetni aparat.

Godine 1938, on i njegov tim, prijavili su šiljke apsorpcije/rezonancije energije za LiCl, prikazan na prethodnoj slici, kao što su i predviđali da će da se desi. Taj fenomen, Rabi je nazvao „nuklearna magnetna rezonancija”.

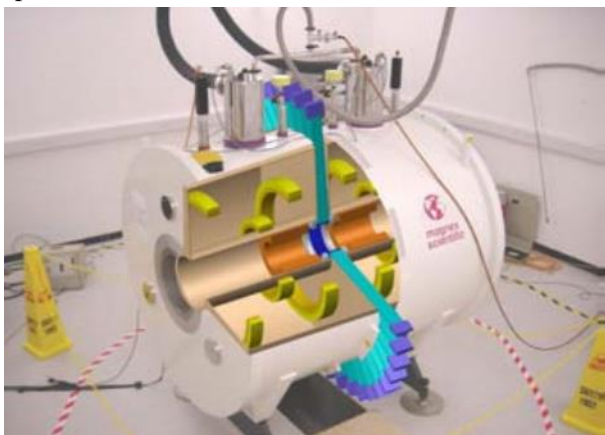
„Tehniku neprekidnog talasa”, u kojoj je frekvencija RF polja B_1 bila nepromijenjena, a glavno magnetno polje B_0 je tumaralo oko rezonancije, koristili su, poslije Rabija, Parsel i Bloh. Oni su primijetili nestalne

promjene napona u namotaju. Nazvali su ih „signal nuklearne indukcije” i „rezonantna apsorpcija”.

Desetak godina poslije toga, Ervin Hahn je ispitivao impulsne NMR tehnike. Glavno magnetno polje nije mijenjao, održavao ga je da bude konstantno, a RF polje na Larmorovoj frekvenciji je uključivao i isključivao. Neposredno poslije RF impulsa, zapazio je nepostojanu oscilaciju. Taj signal je nazvao „raspad nuklearne indukcije” ili „slobodna indukcija”. Danas je, za taj signal, ustaljen naziv „raspad slobodne indukcije”.

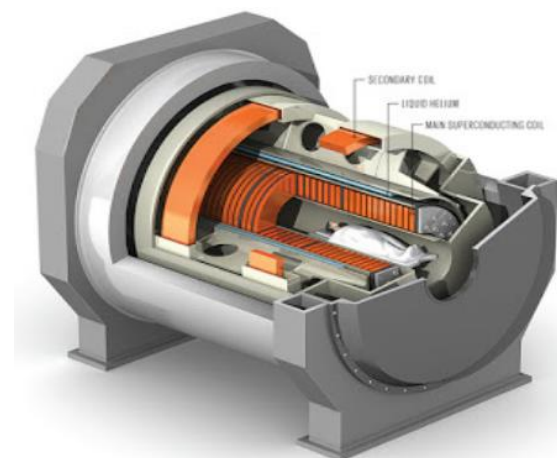
2. SAVREMENI APARATI ZA MAGNETNO REZONANTNO SLIKANJE

Danas se, kao standard u medicinskoj dijagnostici, koriste aparati s tunelom i magnetima, koji stvaraju magnetnu indukciju jačine 3T. Nestandardno, mogu da se nađu i aparati 7T. Evo primjera glavnih tunela tih aparata:



Slika 2 – Glavni magnet MRI skenera

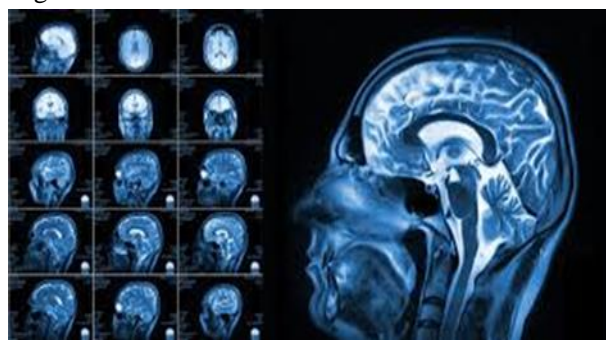
Složena mašina, napravljena od superprovodnih žica dugačkih nekoliko kilometara, može da ima i do 15 tona. Vrhunska, naučna, medicinska dijagnostika ne može da se zamisli bez ovakve mašine.



Slika 3 – Glavni magnet od supraprovodljivih provodnika

Kakve veze ima ova mašina s tačkama koje je zapisao i objavio Isidor Ajzak Rabi 1938. godine?

Stvorena je na osnovu ideje prilagođenog Štern-Gerlahovog aparata, a čovjekovo tijelo u njoj je ono što je bio „molekularni zrak” u Rabijevom eksperimentu. Osnovne komponente aparata za magnetno rezonantno slikanje su: tunel s glavnim magnetima, gradijentni namotaji za magnetizaciju duž x, y i z - ose, radiofrekventni kalemovi za emitovanje i prijem signala, računar za obradu podataka i stvaranje slika. Magnetni rezonantni signal je osnovni podatak-informacija na osnovu koje se dobija slika, krajnji rezultat rada mašine. Radiofrekventni kalemovi, za emitovanje i prijem signala, su iskra, koja pobuđuje i omogućava rad čitavog sistema.



Slika 4 – Primjer slike dobijene aparatom za magnetno rezonantno slikanje

3. VEKTOR NETO MAGNETIZACIJE

Vektor neto magnetizacije je zbir svih spinova pojedinih jezgara vodonika. U odsustvu spoljašnjeg polja spinovi su orjentisani haotično. U tom slučaju, vektor neto magnetizacije jednak je nuli.

Kada se postave u jako magnetno polje, spinovi se poravnavaju s jednim od dva paralelna pravca: poravnato s pravcem polja (parallel), suprotno pravcu polja (antiparallel). Paralelni i antiparalelni spinovi se poništavaju međusobno. Uprkos tome, uvijek postoji malo više spinova, koji su paralelni polju. Ta mala razlika se naziva NMV (net magnetization vector – vektor neto magnetizacije) i označava M.

Relaksacija (opuštanje) je dinamički process u kojem se sistem vraća iz stanja neravnoteže u ravnotežu. Za spinove, to je process u kojem spinovi otpuštaju energiju, koju su dobili od pobudnog radiofrekventnog impulsa.

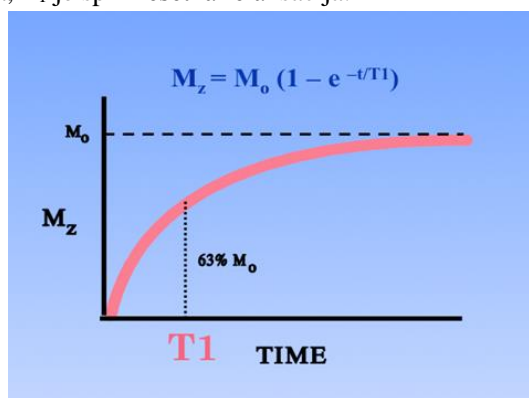
T₁ relaksacija (spin-rešetka relaksacija) je proces vraćanja, oporavka vektora neto magnetizacije (NMV) do njegovog osnovnog stanja u pravcu B₀. Vraćanje vektora neto magnetizacije iz stanja visoke energije u stanje niske energije ili osnovno stanje, posledica je gubitka energije u susjedna jezgra. Opisuje se T₁ konstantom – vremenom koje pokazuje brzinu kojom se dešava proces.

Proces može da se posmatra kao gubitak informacija iz sistema u okolinu, jer je svaki sistem labavo sparen s energetskim stanjem njegove okoline. Istovremeno, to je process kojim kvantni sistem djeluje uzajamno sa svojom okolinom na takav način da slaganje između stanja sistema ne može da se posmatra.

Vrijednost vektora neto magnetizacije data je izrazom:

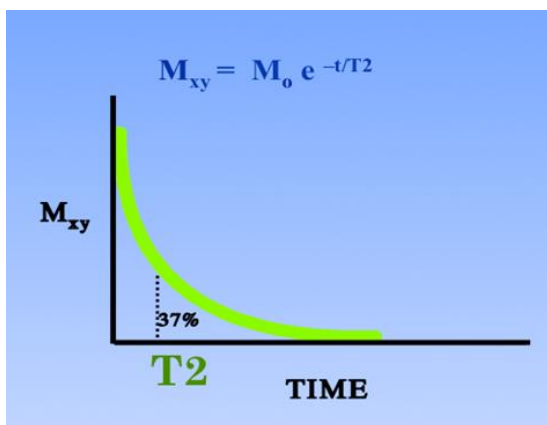
$$M_z = M_0(1 - e^{-t/T_1})$$

M_z je magnetizacija u trenutku t , poslije 90° impulsa, M_0 je potpuno oporavljena maksimalna magnetizacija, T_1 je spin-rešetka relaksacija.



Slika 5 – Eksponencijalni rast

Transverzalna magnetizacija (M_{xy}) je komponenta vektora neto magnetizacije u transverzalnoj ravni, koja je normalna na primijenjeno magnetno polje. Kada se primijeni radiofrekventni talas (RF polje), M_{xy} se nagnje i precesuje oko pravca tog polja. To je dodatna, tzv. „Rabijeva precesija”. Projekcija nagnutog vektora M_{xy} na ravan normalnu na pravac RF polja, takođe je transverzalna magnetizacija. Ona rotira u svojoj ravni oko pravca RF polja i indukuje električni napon u prijemnom namotaju. Promjena ovog napona u vremenu je MR signal. Odmah poslije RF pobude, ova magnetizacija opada na nulu s vremenskom konstantom T_2 (idealno) ili T_2^* (realno).



Slika 6 – Eksponencijalni raspad transverzalne magnetizacije

Transverzalna relaksacija (spin-spin relaksacija) je raspad (nestanak) transverzalne magnetizacije zbog gubljenja usklađenosti faza spinova, koji precesuju, odnosno, zbog uzajamne razmjene energije između spinova poslije 90° impulsa. Dešava se zbog specifičnih karakteristika tkiva u kojima se nalaze spinovi.

Djelovanjem 90° impulsa, svi spinovi unutar transverzalnog presjeka imaju usklađene faze. Neposredno poslije toga, gube usklađenost faza. Neki precesuju brže od ostalih. Proces izvođenja spinova iz faze predstavlja se slikovito kao otvaranje kineske lepeze. Rezultat je da se transverzalna komponenta magnetizacije, nastala uticajem RF polja, eksponencijalno smanjuje kao funkcija vremenske konstante T_2 . Nazvana je tako da bi se razlikovala od T_1 vremenske konstante (spin-rešetka vrijeme relaksacije).

Tkivo u kojem postoji spin jedinstveno je za svaki spin pojedinačno. U svim tkivima postoje mala magnetna polja ($\sim 1\text{mT}$), koja potiču od spinova jezgara atoma vodonika, koji precesuju.

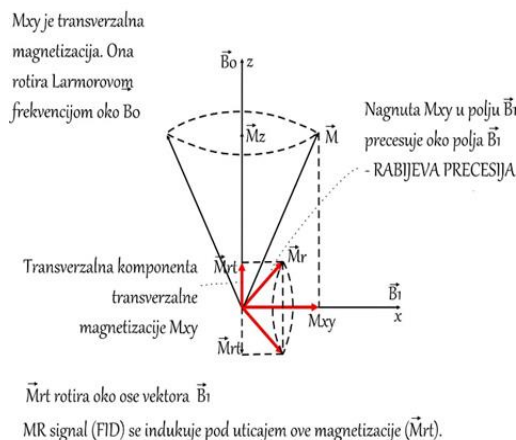
Transverzalna magnetizacija se raspada mnogo brže nego što se oporavlja longitudinalna magnetizacija ($T_2 \ll T_1$). Zbog toga što je T_2 različito od T_1 , vektor neto magnetizacije se ne vraća nazad jednostavno.

T_2 konstanta je osobena vremenska konstanta tkiva, koja opisuje raspad transverzalne magnetizacije u jednom idealnom homogenom magnetnom polju. Ona je parameter tkiva, koji određuje kontrast.

Poslije vremena T_2 , transverzalna magnetizacija je izgubila 63% svoje optimalne vrijednosti.

T_2^* konstanta je osobena vremenska konstanta tkiva, koja opisuje raspad transverzalne magnetizacije uzimajući u obzir nehomogenosti u statičkim magnetnim poljima u ljudskom tijelu.

VEKTORSKI PRIKAZ
“RABIJEVE PRECESIJE”



Ž. V.
5. maj 2019.

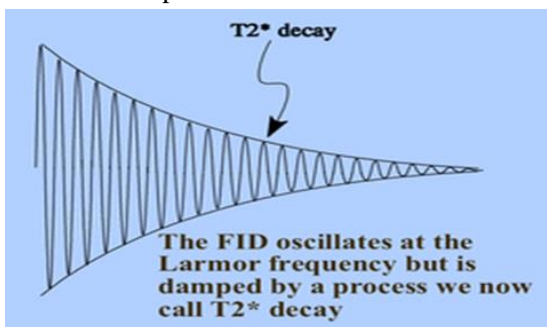
Slika 7 – „Rabijeva precesija”

Ove nehomogenosti, varijacije u statičkom magnetnom polju, prisiljavaju spinove da brže izađu iz faze. One doprinose raspadu spinova mnogo brže od T_2 relaksacije. To je T_2^* raspad. ($T_2^* < T_1$)

Biološka tkiva se razlikuju po T_2 vremenskoj konstanti. Tečnosti imaju duže T_2 , voda u opsegu 40 – 200 ms, mast 10 – 100 ms, amorfnu čvrstu tijela u opsegu milisekunde.

4. FID – FREE INDUCTION DECAY

Kada se unese provodnik u magnetno polje transverzalne komponente transverzalne magnetizacije glavnog polja, nastale usled „Rabijeve precesije”, koja rotira, u njemu se, pod uticajem tog polja, indukuje električni signal. Taj signal se naziva FID – Free Induction Decay. On osciluje Larmorovom (rezonantnom) frekvencijom jer je to frekvencija pobudnog RF polja B_1 , koje ga je izazvalo, ali oscilacija je prigušena procesom T_2^* raspad.

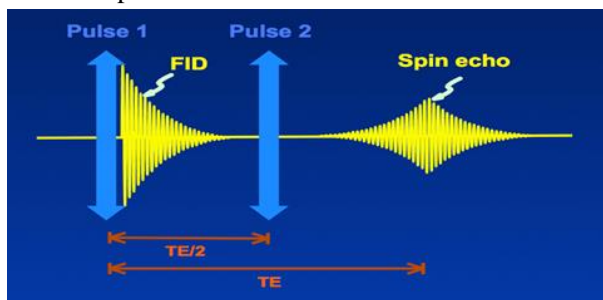


Slika 8 – FID - Raspad slobodne indukcije

Transverzalne komponente transverzalne magnetizacije glavnog polja, od kojih potiče FID, u početku su fazno usklađene. Neposredno poslije toga, one postaju neusklađene i raspadaju se s vremenskom konstantom T_2^* . Dobijeni FID signal je sinusni talas oblika $(\sin\omega_0 t)e^{-t/T_2^*}$.

5. SPIN ECHO (SE)

SE se generiše pomoću dva uzastopna RF impulsa, standardno parom $90^\circ - 180^\circ$. Spinovi su se rastrojili, FID se raspao s vremenskom konstantom T_2^* .



Slika 9 – Stvaranje spin eha pomoću dva RF impulsa. Prvi RF impuls generiše FID, a drugi impuls generiše SE. Eho vrijeme (TE) je dvostruki interval između impulsa

Cilj je da se, rastrojani spinovi, koji su izvan faze, vrate u fazu i generiše novi MR signal. Spin-spin relaksacija je mehanizam pomoću kojeg transverzalna komponenta magnetizacije, nastala kao posledica „Rabijeve precesije”, opada eksponencijalno na njenu ravnotežnu vrijednost. Karakteriše se spin-spin vremenom relaksacije, poznatim kao T_2 vremenska konstanta. Nazvana je tako da bi se razlikoval od T_1 vremenske konstante (spin-rešetka vrijeme relaksacije).

Kada pobuđeni nuklearni spinovi djeluju uzajamno jedan s drugim, njihove akumulirane faze odstupaju od očekivane vrijednosti, zbog lokalnih nehomogenih polja.

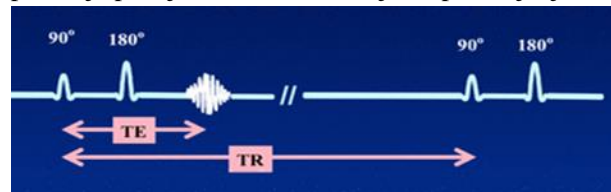
Impuls daje komandu „obrni” sistemu. Cio sistem spinova se okreće u suprotnom smjeru. Poslije prevrtanja, spinovi koji brže precesuju nalaze se na zadnjem kraju paketa spinova. Oni brži dostižu sporije spinove postepeno. Posledica ovog obrtanja je oporavak FID i stvaranje novog signala, spin eha, poslije vremena $TE=2\tau$ (echo time). Poslije vremena 2τ , brži spinovi ostavljaju sporije iza sebe. Sistem se oporavlja, vraća u stanje kakvo je imao prije pobuđivanja.

U prostim slučajevima, jačina eha, u odnosu na početni signal, data je pomoću e^{-2t/T_2} , gdje je T_2 vremenska konstanta za spin-spin relaksaciju.

180° impuls preoblikuje spinove, koji su prošli T_2 raspad. On ponovo usmjerava spinove, koji su se rastrojili zbog nehomogenosti statičkog magnetnog polja. ($T_2^* < T_2 < T_1$) Odnos između T_2 i T_2^* prikazan je pomoću multi-spin eho niza na sledećoj slici: SE je obnavljanje informacija o spinu, koje su izgubljene za vrijeme raspada FID. „Ponovno rađanje” FID-a kao SE je moguće jer su mnogi procesi T_2^* , koji su proizveli raspad FID-a, simetrično povratni. U suštini, veći dio FID signala nije uništen. On je, samo, postao „neorganizovan” zato što su pojedini spinovi, od kojih potiče, postali fazno neusaglašeni. Za sistem se kaže da ima „skriveni red” ili „atomska memorija”.

6. SINGLE SPIN ECHO

Najjednostavniji oblik spin-eho (niza impulsa) sastoji se od 90° impulsa, 180° impulsa i, poslije toga, ehoa. Vrijeme između sredine prvog RF impulsa i vrha spin-eha naziva se echo vrijeme (TE). Niz se, zatim ponavlja poslije vremena TR, vrijeme ponavljanja.



Slika 10 – Uobičajeni SE niz impulsa (jedan eho)

180° impuls preusmjerava nepokretne spinove čije faze su bile rasute konstantnim izobličenjima polja i

nehomogenostima. Impuls ne ispravlja T_1 i T_2 efekte zbog slučajnih procesa na nivou atoma i molekula. Ne ispravlja fazne pomake spinova koji se kreću, protiču, difunduju ili prolaze kroz hemijsku razmjenu. Za razliku od toga, ako je spin izašao iz faze samo time što se nalazi blizu komada hemosiderina, krvnog pigmenta koji se stvara od hemoglobin u živom tkivu (ćelijama), ili blizu nekog nedostatka u glavnom magnetnom polju bilo kog uzorka, 180° impuls će to da ispravi.

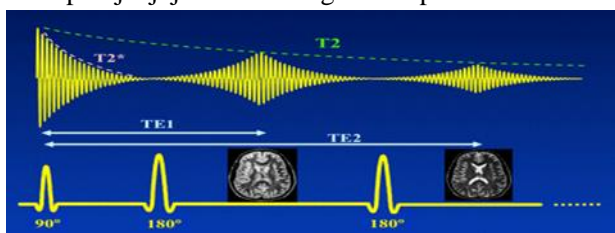
SE se formira u sledećim koracima: 1. Prevrtnanje spinova u transverzalnu ravan 90° impulsom; 2. Rastrojavanje ovih spinova lokalnim magnetnim poljima. 3. Prevrtnanje čitavog ansambla spinova kao palačinke u transverzalnoj ravni impulsom 180° ; i 4. Preusmeravanje spinova u SE u vremenu $TE=2\tau$.

7. MULTI ECHO SPIN ECHO

Dokle god T_2 relaksacija nije potpuno uništila MR signal, moguće je da se stimuliše sistem dodatnim 180° impulsom i da se generiše dodatni eho. Amplituda svakog eha se brzo smanjuje zbog raspadanja T_2 .

Do nedavno, nizovi SE s dvostrukim ehom bili su standard. Prvi eho (u kratkom TE) dešava se kada je prošlo malo vremena da bi se završio T_2 raspad. Zbog toga se, tkiva, ne razlikuju dobro. Kontrast slike je mali. Drugi eho (u dugom TE) dešava se kada je prošlo dosta vremena od početka T_2 raspada. To utiče da se, tkiva, dobro razlikuju. Kontrast slike je veliki.

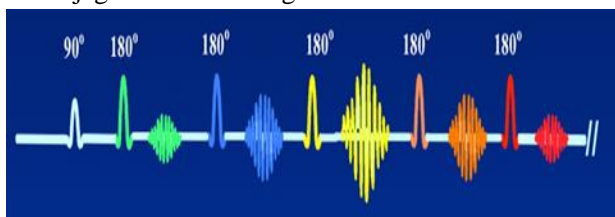
U oba ova slučaja kontrast slike se procenjuje na osnovu T_2 raspada. Multi eho SE se srijeće samo povremeno, u poslednje vrijeme. Zamijenio ga je, u velikoj mjeri, T_2 FLAIR, tehnika u kojoj se kontrast slike procenjuje na osnovu gustine spina.



Slika 11 – Niz SE s dvostrukim ehom

8. FAST (TURBO) SPIN ECHO (FSE)

Multi-echo SE se razlikuje od FSE, u kojem više 180° impulsa prati svaki 90° impuls. Na slici je prikazan dijagram vremenskog odziva za FSE.

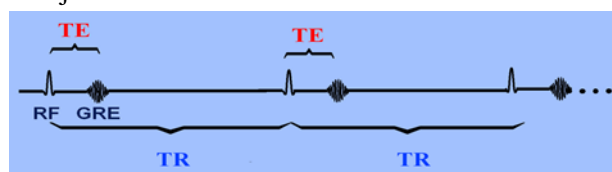


Slika 12 – Brzi (turbo) SE dijagram – FSE

Na prvi pogled se vidi razlika u odnosu na MSE. Ehoi se ne smanjuju jednakom veličinom s povećanjem TE multi-echo SE, kao što bi se očekivalo. To je zbog toga što se ovdje primjenjuju različiti gradijenti kodiranja faza sa svakim impulsom od 180° . Kod jednostrukog eho i multi-echo SE slikanja, gradijent faznog kodiranja se uključuje samo jednom u svakom TR interval. U zavisnosti od broja odjeka, u FSE slikanju, fazno kodiranje može da se promijeni 8, 16, 32 ili više puta u svakom TR interval.

9. TR I TE

TR (repetition time) je vrijeme ponavljanja između odgovarajućih tačaka. TE (echo time) je vrijeme između sredine prvog impulsa do sredine eha. Obično se mjere milisekundama.

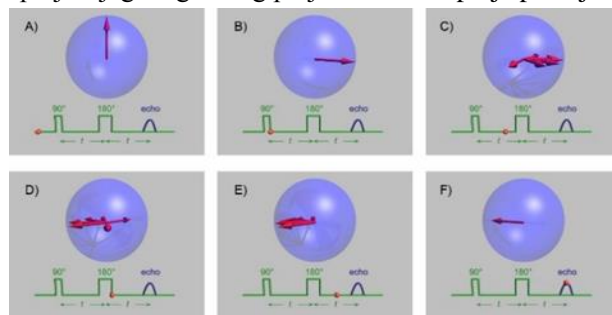


Slika 13 – Vrijeme ponavljanja i eho vrijeme

10. KOMPJUTERSKA ANIMACIJA SPIN EHA

Šta se dešava sa spinom jezgra jednog atoma u čovječjem tijelu, koje je podvrgnuto dejstvu stalnog spoljašnjeg magnetnog polja, kada se pobudi naizmjeničnim RF impulsima.

Vektor neto magnetizacije M precesuje stalno oko spoljašnjeg magnetnog polja B_0 , dok to polje postoji.



Slika 14 – Kompjuterska animacija, koja prikazuje obrtanje vektora neto magnetizacije (crvene strelice), u plavoj Bloh sferi, kao odgovor na par zelenih impulse 90° i 180° , i stvaranje spin eha

A) Vertikalna crvena strelica je vektor neto magnetizacija. Gornje slike su pravljene posmatranjem vektora neto magnetizacije iz koordinatnog sistema koji rotira. U tom koordinatnom sistemu, spinovi (vertikalna crvena strelica) su nepokretni.

B) 90° impuls je primijenjen. On preokreće strelicu u horizontalnu (x-y) ravan. U namotaju, koji je unesen u polje 90° impulsa, indukuje se MR signal (FID).

C) Zbog lokalnih nehomogenosti magnetnih polja (varijacije magnetnog polja na različitim djelovima

uzorka, koje se ne mijenjaju s vremenom) neki spinovi počinju da usporavaju zbog manje jačine polja (I počinju, postepeno, da zaostaju). Drugi spinovi ubrzavaju zbog veće jačine polja (I počinju da prednjače). FID signal se raspada.

D) 180° impuls se primijeni. On obrće lepezu vektora neto magnetizacije kao palačinku. Posledica toga je da sporiji spinovi idu ispred glavnog spina i oni brži zaostaju.

E) Brži spinovi postepeno stižu do glavnog spina, a sporiji spinovi se vraćaju ka glavnom spinu.

F) Dogodilo se potpuno preusmjeravanje. U ovom trenutku može da se izmjeri tačan T_2 eho s uklonjenim T_2^* efektima. Sasvim odvojeno, povratak crvene strelice prema vertikali (nije prikazan) odražavao bi T_1 relaksaciju.

11. ŽIVOTNI VIJEK POJAVE REZONANCIJE (T_2)

Početnim djelovanjem RF impulsa spinovi su fazno usklađeni. MR signal se indukuje pod uticajem transverzalne magnetizacije, koja je nastala od ovog impulsa.

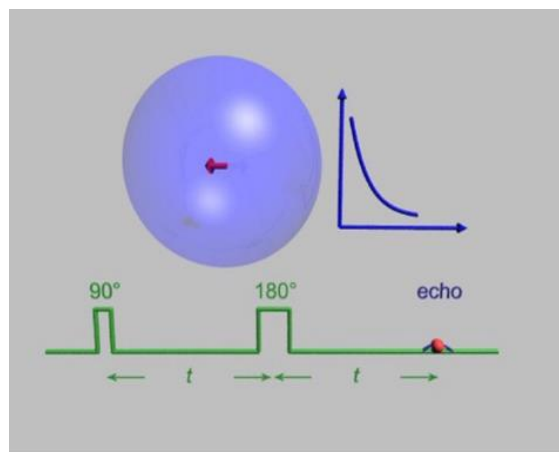
Lokalna magnetna polja utiču da se spinovi fazno rastrojavaju. Transverzalna magnetizacija se raspada zbog tog rastrojavanja spinova. Raspad transverzalne magnetizacije dovodi do toga da se indukovani MR signal (FID) pogoršava. Taj process se naziva transverzalna relaksacija. Ona određuje maksimalno vrijeme u kojem postoji magnetna rezonancija. Izvođenje spinova iz faze, njihovo rastrojavanje, znači raspad transverzalne magnetizacije. Poslije vremena T_2 , fazna usklađenost je pala na 37%. Za toliko se smanjila transverzalna magnetizacija.

Spinovi gube usklađenost faza zbog kolebanja, nestabilnosti lokalnih polja, koja su nestabilna zbog T_1 relaksacije (spin-rešetka relaksacija). To je doprinos T_1 relaksacije T_2 relaksaciji.

12. RASPAD SPIN EHA

Spin eho efekat je otkrio Ervin Han, kad je primijenio dva uzastopna 90° impulsa, razdvojena kratkim periodom vremena, detektovao je signal, eho, u trenutku u kojem nije bio primijenjen impuls. Umjesto 90° impulsa, povoljnije je da se koristi 180° impuls, kao drugi impuls za preusmjeravanje.

Raspad Han eha može da se koristi za mjerenje spin-spin vremena relaksacije. Veličina eha se bilježi za različite razmake dva impulsa. Time se otkriva da 180° impulsom nije ponovo uspostavljena povezanost, odnosno, nepovezanost postoji i dalje. U prostim slučajevima se bilježi eksponencijalni raspad opisan T_2 konstantom. T_2 raspad se dešava i razmatra u skladu s međusobnim djelovanjem ansambla spinova, koji odstupaju fazno jedan od drugog.



Slika 15 – Raspad spin eha

13. ZAKLJUČAK

MR signal, FID – Free Induction Decay je kratkotrajni električni signal, koji se pojavljuje odmah nakon 90° RF impulsa. Indukuje se u prijemnom namotaju pod uticajem rotirajuće transverzalne komponente magnetizacije. Ovaj signal je sinusoidalan, s frekvencijom koja je jednaka Larmorovoj frekvenciji, i prigušen je. Opada eksponencijalno s vremenskom konstantom T_2^* .

Dva su razloga zbog kojih se FID raspada: a) Statičke nejednakosti magnetnog polja unutar svakog voksela utiču da različiti spinovi, u uzorku, precesuju različitim brzinama. Ove nejednakosti nastaju zato što magnet skenera nije savršeno konstruisan. Uz to, sama sredina djeluje raznovrsno svojom osobinom da bude magnetizovana. b) Spinovi se fazno rastrojavaju i između njih postoje uzajamna dejstva (spin-spin relaksacija T_2).

Spin eho je novi signal, koji se stvara djelovanjem 180° impulsa, pošto se raspadne FID s T_2^* vremenskom konstantom. Generiše se dok još traje T_2 raspad. Različite vrste spin eha postoje, zavisno od broja 180° impulsa koji djeluju: SSE – Single Spin Echo, MSE – Multy Spin Echo i FSE – Fast Spin Echo.

FID i spin eho su osnovni podaci – informacije, koji se sakupljaju, čuvaju i obrađuju da bi se, na osnovu toga, dobile medicinske dijagnostičke magnetne rezonantne slike.

LITERATURA

- [1] Željko Vujović, *Od nuklearnog spina do magnetnog rezonantnog slikanja*, knjiga u pripremi, 2019.
- [2] I. I. Rabi, J. R. Zacharias, S. Millman, and P. Kusch, A new method of measuring nuclear magnetic moment, *Phys. Rev.* 53, 318 – Published 15 February 1938.
- [3] <http://mriquestions.com/index.html>

- [4] <http://radiologijazabolesnike.blogspot.com/2015/07/magnetska-rezonancija-mr.html>
- [5] <https://www.semanticscholar.org/paper/Multimodality-in-vivo-imaging-systems%3A-twice-the-or-Cherry/26946e71e43f441e67348e76a764204ac1ea474c/figure/7>
- [6] <https://www.semanticscholar.org/paper/NOVEL-SVDD-BASED-ALGORITHM-FOR-MOVING-OBJECT-AND-Wang-u/7388a791ed7f9aa25e35d3219edfc62198ad0983/figure/5>
- [7] <https://www.tvanouvelles.ca/2018/05/03/vih-le-traitement-precoce-pour-prevenir-latrophie-cerebrale>
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Bloch_sphere
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Spin_echo
- [10] <https://www.podkarpakahistoria.pl/wiadomosci/358,31-lat-temu-zmarl-izydor-rabi-noblista-urodzony-na-podkarpaciu>
- [11] <https://radiopaedia.org/articles/t-relaxation?Lan-20=us>

SUMMARY

MAGNETIC RESONANCE SIGNAL

The aim of this paper is to describe the magnetic resonance signal, how it occurs, what types of the signal there are and what they are used for. In order to achieve that goal, the original article of Isidor Isaak Raby was given, which disclosed the discovery of magnetic resonance between the LiCl molecules and the external magnetic field, which was changed by the change in the power of the electric current that created that field. The difference between „continuous wave technique” and „pulsed NMR technique” is explained. The cross section of the tunnel with the main magnets of modern devices for magnetic resonant imaging is shown. There are given the definitions of the net magnetization vector, concepts of spin-lattice relaxation, spin-spin relaxation, longitudinal and transversal relaxation, „Raby's precession”, T_1 , T_2 and T_2^ time constants, FID, SE, MSE, FSE, TR, TE, are graphically presented and described, as well as computer animation of spin echo and its decay.*

Key words: magnetic resonance, induced signal, precession, relaxation, decay, computer animation, Free Induction Decay, spin echo