Možnosti zobrazení brachiálního a lumbosakrálního plexu pomocí pokročilých technik magnetické rezonance

**MUDr. Ivan Humhej¹, Mgr. Ibrahim Ibrahim, Ph.D.², prof. MUDr. Martin Sameš, CSc.¹,
doc. Ing. Jaroslav Tintěra, Ph.D.², doc. MUDr. Igor Čižmář, Ph.D.³**

¹Neurochirurgická klinika FZS UJEP, Masarykova nemocnice v Ústí nad Labem, o.z., Krajská zdravotní, a.s.

²Základna radiodiagnostiky a intervenční radiologie, Institut klinické a experimentální medicíny, Praha

³Traumatologická klinika LF UP a FN, Olomouc

Zobrazení brachiálního plexu (BP) a lumbosakrálního plexu (LSP) pomocí magnetické rezonance (MR) umožní získat detailní informace využitelné v rámci diagnostiky i léčby postižení těchto komplexních nervových pletení. Techniky MR využitelné ke zobrazení BP a LSP zahrnují metody konvenční, MR neurografie (MRN), zobrazení difuzního tenzoru (DTI) a MR traktografie (MRT). MRN poskytuje data o detailní anatomické struktuře, DTI a MRT vypovídají o funkční integritě nervových vláken. S dalším vývojem a zlepšováním těchto pokročilých technik MR lze předpokládat jejich postupné zavádění do standardních vyšetřovacích protokolů MR.

Klíčová slova: zobrazení magnetickou rezonancí, MR neurografie, zobrazení difuzního tenzoru (DTI), MR traktografie, brachiální plexus, lumbosakrální plexus.

Imaging possibilities of the brachial and lumbosacral plexus using advanced magnetic resonance techniques

Visualization of the brachial plexus (BP) and lumbosacral plexus (LSP) by magnetic resonance imaging (MRI) allows us to obtain detailed information useful in diagnosing and treatment of disorders affecting these complex nerve structures. MR techniques helpful in visualising BP and LSP include conventional methods, MR neurography (MRN), diffuse tensor imaging (DTI) and MR tractography (MRT). MRN provides detailed analysis of anatomical structure, DTI and MRT inform us on the functional integrity of the nerve fibers. With continuing development and improvement of these advanced MR techniques, we can assume their gradual introduction into standard MR protocols.

Key words: magnetic resonance imaging, MR neurography, diffusion tensor imaging (DTI), MR tractography, brachial plexus, lumbosacral plexus.

Úvod

Zobrazení magnetickou rezonancí (MR) je v dnešní době dobře etablovanou vyšetřovací modalitou hojně využívanou pro diagnostiku nejrozličnějších onemocnění nejen mozku a míchy, ale stále častěji i periferních nervů (PN). Jedná se o metodu zcela neinvazivní, disponující vysokou kvalitou zobrazení a excelentním kontrastem měkkých tkání. Možnosti zobrazení

pomocí MR jsou velmi široké a heterogenní, neboť tato metoda umožňuje využití velkého množství zobrazovacích sekvencí, z nichž každá nabízí jiné charakteristiky výsledného obrazu vyšetřovaných tkání ve smyslu kontrastu a prostorového rozlišení (Keřkovský et al., 2014). S rychlým technologickým vývojem dochází i k postupnému rozvoji nových zobrazovacích technik magnetické rezonance.

Sestava zobrazovacích sekvencí vytváří vyšetřovací protokol. Neexistuje specifický univerzálně použitelný protokol ke standardnímu vyšetření afekcí PN. Spíše se používají kombinace zobrazovacích sekvencí přizpůsobené klinické indikaci vyšetření, dostupné technologii MR a preferenci vyšetřujícího radiologa, umožňující komplexní a zevrubné zobrazení příslušné patologie (Mallouhi et al., 2012). Vyšetřovací

KORESPONDENČNÍ ADRESA AUTORA: MUDr. Ivan Humhej, ivan.humhej@kzcr.eu
Neurochirurgická klinika Fakulty zdravotnických studií Univerzity Jana Evangelisty Purkyně
Masarykova nemocnice v Ústí nad Labem, o.z., Krajská zdravotní, a.s.
Sociální péče 12A, 401 13 Ústí nad Labem

Cit. zkr: Neurol. praxi 2019; 20(1): 49–53
Článek přijat redakcí: 18. 4. 2018
Článek přijat k publikaci: 24. 5. 2018

Obr. 1. 3D MR neurografie (MIP rekonstrukce z koronární 3D STIR SPACE sekvence) (a) a MR traktografie (b) zachycující průběh oboustranného brachiálního plexu (kořeny C5–8 označeny šipkami) u zdravého dobrovolníka

Obr. 2. 3D MR neurografie (MIP rekonstrukce ze sagitální a koronární 3D STIR SPACE sekvence) (a, b) a MR traktografie (c) zachycující průběh oboustranného lumbosakrálního plexu (kořeny L3–S3, nervus femoralis a nervus ischiadicus označeny šipkami) u zdravého dobrovolníka

Obr. 3. MR traktografie (a) a 3D MR neurografie (MIP rekonstrukce ze sagitální 3D STIR SPACE sekvence) (b) levostranného lumbosakrálního plexu (kořeny L3–S2, nervus femoralis a nervus ischiadicus označeny šipkami) u zdravého dobrovolníka

protokol by měl umožňovat detailní zachycení morfologie nervových struktur i získání informace o mikrostruktuře a integritě nervo-

vých vláken. Adekvátně sestavené vyšetřovací protokoly tak mohou přinést v diagnostickém procesu zásadní informace vedoucí ke správnému diagnostickému závěru a stanovení terapeutického postupu.

Zejména u postižení komplexních struktur brachiálního plexu (BP) a lumbosakrálního plexu (LSP) představuje stanovení patologie, míry a rozsahu postižení často diagnostický problém.

Vyšetřovací protokoly k zobrazení těchto nervových pletení zahrnují standardní konvenční sekvence a tak zvané pokročilé metody MR, které umožní získat podrobné strukturální a mikrostrukturální informace o vyšetřovaných nervových elementech. Mezi konvenční sekvence patří například T1 vážené (T1W) a T2 vážené (T2W) sekvence s potlačením tuku (STIR; short tau inversion recovery) k zobrazení extradurálních komponent BP či LSP a sekvence MR myelografie (Upadhyaya et al., 2015) k zachycení intradurálního průběhu nervových kořenů. Aplikace kontrastní látky (chelátů gadolinia) se provádí u tumorózních, zánětlivých, infekčních a postradiačních postižení nervových pletení, stejně tak u pooperačních kontrol k odlišení živý (Mallouhi et al., 2012). K pokročilým metodám MR patří MR neurografie, zobrazení difuzního tenzoru (DTI) a MR traktografie.

Zmíněné pokročilé techniky MR využíváme k vyšetřování našich pacientů s patologiemi PN od roku 2013. Vzhledem k faktu, že se jedná o způsoby zobrazení spíše výzkumného charakteru (zejména zobrazení PN pomocí DTI a MR traktografie), které doposud nepatří k rutinně využívaným technikám v klinické praxi, museli jsme postupně vytvořit a technicky vyladit vlastní vyšetřovací sekvence, jak na zdravých dobrovolnících, tak na pacientech po získání jejich informovaného souhlasu. V následující části práce uvedeme kromě stručného metodologického popisu pokročilých technik MR i naše výsledky zobrazení BP a LSP. Vyšetření jsme prováděli na 3T MR přístroji (Siemens Magnetom Trio, Erlangen, Germany).

MR neurografie (MRN)

MR neurografie (MRN) byla v klinické praxi poprvé použita v roce 1992 (Howe et al., 1992). Představuje specifickou techniku MR určenou k znázornění PN. Umožňuje multiplanární selektivní vizualizaci nervových struktur a jejich patologie formou detailního morfologického dvoudimenzionálního (2D) i třídimenzionálního (3D) zobrazení (Chhabra et al., 2014). Pomocí MRN dosahujeme kvalitnější vizualizace PN než

Obr. 4. 3D MR neurografie (MIP rekonstrukce z koronární 3D STIR SPACE sekvence) oboustranného brachiálního plexu u pacientky s pravým neurogenním syndromem horní hrudní apertury (TOS) vpravo. Šipky označují rozšířený kořen C8 a Th1 vpravo odpovídající diagnóze TOS

s využitím konvenčních sekvencí MR. Zejména zavedení 3D sekvencí s vysokou rozlišovací schopností umožňuje podrobnou analýzu anatomie a struktury nervových kořenů, trunků, divizí, fascikulů a terminálních větví BP a LSP (Vargas et al., 2015). Preferujeme zobrazení s využitím 3T MR přístroje, který poskytuje vyšší poměr signál/šum (SNR; signal/noise ratio) a tudíž umožňuje vyšší kontrast a potenciálně kratší čas vyšetření při zachování minimální tloušťky řezů. Tenké řezy umožňují excelentní rozlišení jak 2D, tak 3D sekvencí (Chhabra et al., 2014). 3T MR oproti 1,5T MR poskytuje lepší detail s rozlišením intraneurálně lokalizovaných fascikulů (zejména na axiálních snímcích), což může být důležité pro charakterizaci a přesnou lokalizaci neuropatií (Chhabra, Madhuranthakam et Andreisek, 2018). Především u komplexních nervových pletení BP a LSP představuje detailní morfologické zobrazení zásadní požadavek.

Pro účely MRN lze použít například sekvenci STIR s 3D akvizicí (SPACE; sampling perfection with application optimized contrast using varying flip angle evaluation) a prostorovým rozlišením kolem 1 mm³, což umožní zobrazení i relativně drobných nervových struktur. Následná rekonstrukce maximální intenzity signálu (MIP; maximum intensity projection) z 3D STIR SPACE sekvencí umožní excelentní finální vizualizaci PN a jejich patologií. Konkrétní typ použité sekvence k MRN a její nastavení záleží na výrobci MR systému a síle magnetického pole. Vždy je

také nutné optimalizovat vyšetřovací protokol pro danou oblast, kterou chceme vyšetřit. K následnému zpracování získaných dat lze využít například program MedINRIA (<https://med.inria.fr/>), který jsme využívali i při zpracování našich dat (Ibrahim et al., 2017).

Příklad zobrazení oboustranného BP pomocí MRN u zdravého dobrovolníka představuje obrázek 1a, zobrazení LSP pak obrázek 2a+b a 3b. Obrázek 4 zachycuje rozšířený kořen C8 a Th1 vpravo, ještě před jejich fúzí v dolní trunkus BP. Jedná se o pacientku s těžkým pravým neurogenním thoracic outlet syndromem (TOS), pokročilé hypotrofie intrinsických svalů ruky inervovaných cestou nervus (n.) medianus a n. ulnaris s klinickým obrazem Gilliatt-Sumner hand zobrazují fotografie na obrázku 5. Peroperační nález úzkého vazivového pruhu (struny) jdoucího od transverzálního výběžku obratle C7 na I. žebro, přes který se kořen C8 a Th1 zalamoval, prezentuje obrázek 6. Při operaci jsme provedli vytěti vazivového pruhu, tím došlo k uvolnění obou kořenů formujících dolní trunkus BP.

Obecně lze rozdělit změny na strukturách BP a LSP při MRN, podobně jako na PN v jiných lokalitách, na přímé a nepřímé. Mezi přímé neurografické změny patří odchylky ve velikosti, charakteru fascikulární morfologie, diskontinuity, signálové změny, anomálie průběhu/zalomení a případně rozdíly v postkontrastním sytění nervových struktur. K nepřímým neurografickým nálezům řadíme vymizení perineurálního

tuku jako výsledku fokální fibrózy nebo expanze a změny v regionálních denervovaných svalech (Soldatos et al., 2013; Neufeld et al., 2015).

Zobrazení difuzního tenzoru (DTI; diffusion tensor imaging) a MR traktografie (MRT)

Zobrazení difuzního tenzoru (DTI), na rozdíl od strukturálních kvalitativních konvenčních metod MR a MRN, přináší mikrostrukturální kvantitativní zobrazení odrážející integritu nervových vláken (Jeon et al., 2017). Představuje poměrně novou zobrazovací techniku, jejíž základy byly poprvé posány v roce 1994 (Basser, Mattiello et LeBihan, 1994). K první úspěšné aplikaci metody DTI k zobrazení PN došlo v roce 2004 (Skorpiol, Karlsson et Nordell, 2004).

Technika vychází z principů difuzně váženého zobrazení (DWI; diffusion weighted imaging), které odráží difuzivitu molekul vody (protonů vodíku vázaných v molekulách vody) ve vyšetřované tkáni. Míra difuze poskytuje informaci o mikrostruktuře dané tkáně, protože přítomnost některých struktur omezuje pohyb molekul vody v určitých směrech. Neuronální axony jsou příkladem prostředí, ve kterém míru difuze významně ovlivňuje mikroarchitektura nervových vláken. Nejsnadněji probíhá ve směru dlouhé osy axonů, naopak v kolmé ose je omezená, protože difuzi brání myelinové pochvy axonů a neuronální buněčné membrány (anizotropní difuze) (Keřkovský et al., 2010). Rozpad myelinových pochev či buněčných membrán axonů u nejruznějších patologií PN je spojený se snížením anizotropie zachytitelným pomocí DTI (Ibrahim et Tintěra, 2013). Následné softwarové zpracování získaných dat umožňuje 3D zobrazení průběhu nervových drah v prostoru, takzvanou MR traktografii (MRT). K vytvoření přesnější anatomické představy MRT umožňuje vytvoření projekce průběhu nervových svazků do základních strukturálních obrazů konvenčních MR sekvencí.

Fakt, že DTI měří funkční integritu a odráží i mikrostrukturální poškození PN lze využít zejména u zavřených poranění PN (například trakčních lézí BP nebo LSP), některých vzácných či atypických úžinových syndromů (například TOS nebo piriformis syndrom), tumorů, zánětlivých onemocnění (chronické demyelinizační polyradikuloneuropatie, Parsonage-Turner syndromu a jiných) a postradiačních plexopatií (Cejas et al.,

Obr. 5. Foto ruky pacientky s pravým neurogenním TOS vpravo s obrazem Gilliatt-Sumner hand (hypotrofie intrinsických svalů ruky inervovaných n. medianus a n. ulnaris). Jedná se o tutéž pacientku jako na obrázku 4. Šipkami jsou označeny pokročilé hypotrofie thenarového svalstva, interoseálních svalů, neschopnost addukce malíku (a) a rozvíjející se drápotivá ruka (b)

2015). U zmíněných patologií PN mohou informace z DTI ovlivnit strategii léčebného postupu.

Pro měření difúzně vážených obrazů (DWI) jsme použili sekvenční spinového echa s akvizicí dat technikou echo-planar imaging (SE-EPI) s různými směry difúzních gradientů (30 nebo 64 směrů) a dvěma hodnotami b-faktoru (například 0 a 700–800 s/mm²). Naměřená data jsou velmi citlivá k různým artefaktům (zejména pohybovým a susceptibilním) a vyžadují následnou korekci. Korekce pohybu a vířivých proudů byla provedena v programu FSL ([https://fsl.fmrib.](https://fsl.fmrib.ox.ac.uk/)

[ox.ac.uk/](https://fsl.fmrib.ox.ac.uk/)). Po korekci následoval výpočet difúzního tenzoru a následná rekonstrukce průběhu nervových svazků v programu DSI studio s tzv. Generalized Q-sampling Imaging (GQI) modelem (<http://dsi-studio.labsolver.org/>).

Při získávání a následném zpracování dat jsme zaznamenali některé limitace, v jejichž důsledku nebylo možné provést zobrazení nervových struktur BP a LSP metodou DTI u všech vyšetřených jedinců. Jednalo se zejména o pohybové artefakty znemožňující získání dat odpovídající kvality, ať už volní (vyšetřovaným

ovlivnitelné), dané pohybem vyšetřované části těla, tak mimovolní (vyšetřovaným neovlivnitelné), způsobené například respiračními pohyby, pulzací srdce a velkých cév. Další potíž mohou představovat efekty susceptibility, které zapříčiňují u některých jedinců geometrické distorze v DWI obrazech. S tím se setkáváme například u pacientů s přítomností metalických implantátů v blízkosti zobrazovaných nervových struktur.

Zmíněné problémy byly z velké části odstraněny využitím adekvátních vyšetřovacích cívek na 3T MR přístroji, optimalizací zobrazovacích protokolů s jejich zkrácením a metodikou následného zpracování dat.

Zobrazení oboustranného BP a LSP pomocí metody MRT s možností korelace znázornění nervových struktur s metodou MRN u zdravých dobrovolníků ilustruje obrázek 1b a 2c. MRT levostranného LSP zachycuje obrázek 3a. Na obrázku 7 můžeme pozorovat útlum signálu BP vlevo v oblasti kostoklavikulárního trojúhelníku u pacienta s TOS.

Diskuze

Využití pokročilých technik MRN, DTI a MRT v diagnostice začíná v posledních letech prudký rozvoj, mimo jiné i díky dostupnosti MR přístrojů se silnějším magnetickým polem a propracovaným softwarovým metodám pro zpracování získaných dat. Zmíněné neinvazivní techniky umožňují 3D zobrazení a kvantitativní posouzení integrity PN. Tím vhodně doplňují standardní konvenční zobrazovací sekvenční MR a nálezy elektrofyziologických vyšetření (EMG), které neposkytují v některých případech dostatečné informace ohledně přesného umístění a rozsahu poškození PN. Na rozdíl od EMG umožňuje MRN také lepší hodnocení segmentů hluboko lokalizovaných PN (Filler, 2009).

Fascinující technika DTI a MRT umožňuje kvalitní zobrazení dobře organizovaných struktur, jako jsou například nervy nebo svaly. K posouzení integrity zmíněných tkání se používají difúzní parametry. Nejpoužívanější difúzní parametr představuje frakční anizotropie (FA), která kvantitativně charakterizuje uspořádání a mikroarchitekturu tkáně. Hodnoty FA se pohybují od 0 (izotropní prostředí) až do 1 (vysoce anizotropní prostředí). U PN a svalů jsou hodnoty FA velmi podobné, což v některých případech představuje problém při odlišení a separaci těchto tkání a následné rekonstrukci průběhu PN. K dosažení relevantních

Obr. 6. Peroperační nález vazivového pruhu jdoucího z transversálního výběžku C7 na l. žebro a utlačujícího kořen C8 a Th1 u pacientky s pravým neurogenním TOS vpravo. Jedná se o tutěž pacientku jako na obrázku 4 a 5

TS – trunci superior brachiálního plexu; TM – trunci medius brachiálního plexu; AS – arteria subclavia

výsledků rekonstrukce PN je velmi důležitá nejen kvalita získaných dat, ale i jejich následné zpracování (postprocessing), zahrnující korekci dat, výběr a umístění startovacích bodů (seed points), prahování FA, zkušenost s použitým softwarem pro rekonstrukci a detailní anatomická znalost vyšetřované oblasti.

Závěr

Zobrazovací techniky MR hrají zásadní roli v diagnostice, sledování dynamiky změn v čase i pooperačním monitoringu neuropatií PN včetně plexopatií BP a LSP. Rozvoj pokročilých technik MR, v současné době dostupných jen na vybraných radiologických pracovištích, po-

Obr. 7. MR traktografie oboustranného brachiálního plexu u pacientky se syndromem horní hrudní apertury (TOS) vlevo. Na obrázku je patrné oslabení signálu levého brachiálního plexu v místě kostoklavikulárního triangu (šipka)

souvá výtěžnost vizualizace nervových struktur na vyšší úroveň a může tak zásadním způsobem ovlivnit terapeutický proces. S dalším rozvojem těchto pokročilých zobrazovacích technik a jejich integrací do rutinních vyšetřovacích protokolů MR lze v budoucnu předpokládat zkvalitnění péče o postižené pacienty, ať už formou cílené terapie bez zbytečné časové prodlevy, možností lepšího předoperačního plánování, nebo eliminací nepotřebné chirurgické intervence s pokračováním v konzervativním postupu.

Tato práce byla podpořena grantem

AZV MZ ČR č. 17-28587A.

LITERATURA

1. Basser PJ, Mattiello J, LeBihan D. MR diffusion tensor spectroscopy and imaging. *Biophys J* 1994; 66(1): 259–267.
2. Cejas C, Escobar I, Serra M, Barroso F. High resolution neurography of the lumbosacral plexus on 3T magnetic resonance imaging. *Radiologia* 2015; 57(1): 22–34.
3. Filler A. Magnetic resonance neurography and diffusion tensor imaging: origins, history, and clinical impact of the first 50,000 cases with an assessment of efficacy and utility in a prospective 5000-patient study group. *Neurosurgery* 2009; 65(Suppl. 4): A29–43.
4. Howe FA, Filler AG, Bell BA, Griffiths JR. Magnetic resonance neurography. *Magn Reson Med*. 1992; 28(2): 328–338.
5. Chhabra A, Flammang A, Padua A Jr, Carrino JA, Andreisek G. Magnetic resonance neurography: technical considerations. *Neuroimaging Clin N Am*. 2014; 24(1): 67–78.
6. Chhabra A, Madhuranthakam AJ, Andreisek G. Magnetic resonance neurography: current perspectives and literature review. *Eur Radiol*. 2018; 28(2): 698–707.
7. Ibrahim I, Tintěra J, Škoch A, Jirů F. MR traktografie mozku a MR neurografie periferních nervů. *Ces Radiol* 2017; 71(4): 345–352.
8. Ibrahim I, Tintěra J. Teoretické základy pokročilých metod magnetické rezonance na poli neurověd. *Ces Radiol* 2013; 67(1): 9–19.
9. Jeon T, Fung MM, Koch KM, Tan ET, Sneag DB. Peripheral nerve diffusion tensor imaging: overview, pitfalls, and future directions. *J Magn Reson Imaging*. 2017 Oct 30. [Epub ahead of print].
10. Keřkovský M, Špráková-Puková A, Kašpárek T, Fadrus P, Mechl M, Válek V. Diffusion tensor imaging – současné možnosti MR zobrazení bílé hmoty mozku. *Cesk Slov Neurol N* 2010; 73/106(2): 136–142.
11. Keřkovský M, Tintěra J. MR zobrazení tenzorů difuze centrálního nervového systému. Multimediální podpora výuky klinických a zdravotnických oborů: Portál Lékařské fakulty Masarykovy univerzity [online] 6.1.2014, poslední aktualizace 14.2.2014 [cit. 2018-04-09] Dostupný z WWW: <<http://portal.med.muni.cz/clanek-614-mr-zobrazeni-tenzoru-difuze-centralniho-nervoveho-systemu.html>>. ISSN 1801-6103.
12. Mallouhi A, Marik W, Prayer D, Kainberger F, Bodner G, Kasprian G. 3T MR tomography of the brachial plexus: structural and microstructural evaluation. *Eur J Radiol*. 2012; 81(9): 2231–2245.
13. Neufeld EA, Shen PY, Nidecker AE, Runner G, Bateni C, Tse G, Chin C. MR imaging of the lumbosacral plexus: a review of techniques and pathologies. *J Neuroimaging* 2015; 25(5): 691–703.
14. Skorpil M, Karlsson M, Nordell A. Peripheral nerve diffusion tensor imaging. *Magn Reson Imaging*. 2004; 22(5): 743–5.
15. Soldatos T, Andreisek G, Thawait GK, Guggenberger R, Williams EH, Carrino JA, Chhabra A. High-resolution 3-T MR neurography of the lumbosacral plexus. *Radiographics* 2013; 33(4): 967–987.
16. Upadhyaya V, Upadhyaya DN, Kumar A, Gujral RB. MR neurography in traumatic brachial plexopathy. *Eur J Radiol*. 2015; 84(5): 927–932.
17. Vargas MI, Gariani J, Delattre BA, Dietemann JL, Lovblad K, Becker M. Three-dimensional MR imaging of the brachial plexus. *Semin Musculoskelet Radiol*. 2015; 19(2): 137–148.