الفصل الثامن

تتابعات النبضات السريعة
Fast Pulse Sequences

هناك العديد من الأسباب التي تجعل من المرغوب فيه زيادة سرعة المسح.

- تسمح التتابعات السريعة للمستخدم بإجراء دراسات ديناميكية، مثلاً تتبع تباين وسط ناعم كروي bolus.
- إن الحصول على الإشارة في وقت قصير يجعلها أقل عرضة لتأثيرات الحركة غير المرغوبة، وبالذات مع المرضى غير المتعاونين.
- يمكن الحصول على التتابع السريع بما فيه الكفاية أثناء توقف التنفس وبذلك نحصل على صورة خالية من تأثيرات حركة التنفس.

هناك طرق مختلفة للحصول على زمن مسح أقصر:

- استخدام أحدث طرق الانحدار وأنظمة الراديو RF إلى أقصى سعة وتوقيت أكثر كفاءة للتتابعات العادية (انحدار الصدى GRE فائق السرعة).
- أخذ عينات من أصداء متعددة بتشفيرات طور مختلفة (صدى مغزلي سريع FSE، تصوير الصدى السطحي).
- الملء غير الكامل للفراغ–K (تصوير الصدى الجزئي، وتصوير فورير الجزئي، ومجال الرؤية المستطيل).

(١ ,٨) تتابعات الصدى المغزلي السريعة أو الدوامية

Fast or Turbo Spin Echo Sequences

تتابعات الصدى المغزلي السريعة (FSE) (تسمى أيضاً من بعض المصنعين بتتابعات الصدى الدوامية TSE) هي تتابعات صدى مغزلي SE معدلة لها زمن مسح قصير بدرجة معقولة. يتم ذلك عن طريق إعطاء عدة نبضات تمركز RF ١٨٠ درجة أثناء كل فترة زمن تكرار TR وباختصار يشغل انحدار تشفير الطور بين الأصداء. بهذه الطريقة، يتم الاستخدام الأمثل للفترة زمن التكرار TR عن طريق أخذ عينات من أصداء متعددة بتشفيرات طور مختلفة بعد كل نبضة إثارة (الشكل رقم ٣٣). التوالي في أصداء المغازل المتولدة بهذه الطريقة يسمى تتابعاً أو تالياً أو قطاراً من الصدى وعدد الأصداء التي تم أخذ عيناتها هي طول قطار الصدى (ETL Echo train length). زمن التصوير في تتابع صدى مغزلي سريع FSE يمكن حسابه كما يلي:

زمن المسح = زمن التكرار TR × عدد خطوات تشفير الطور × عدد متوسطات متوسطات الإشارة [ETL]

ETL هو طول قطار الصدى ويقصد به عدد الأصداء التي تم أخذ عيناتها لكل قطار صدى.

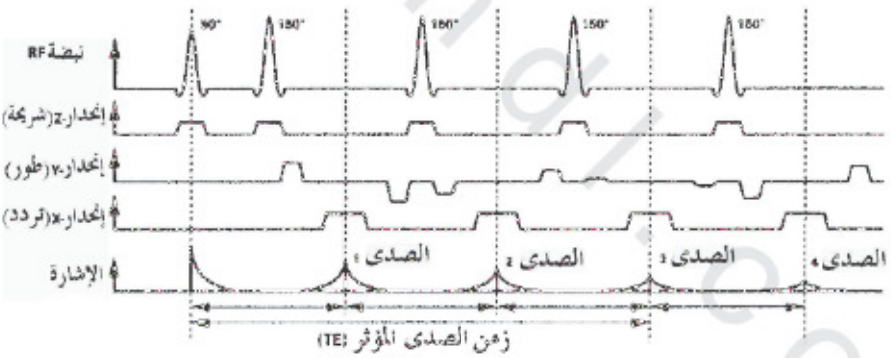
إن تتابعات الصدى المغزلي السريعة FSE ليست سريعة فقط، ولكنها تختلف عن طرق الصدى المغزلي SE العادي في أكثر من وسيلة كذلك:

- تتابعات الصدى المغزلي السريعة FSE لها زمن تكرار TR أطول لكي تعطى أكبر عدد ممكن من نبضات التمركز RF ١٨٠ درجة. زمن التكرار TR في حالة الصدى المغزلي السريعة FSE يكون ٤٠٠٠ ملي ثانية أو أكبر بالمقارنة مع ٢٠٠٠ حتى ٢٥٠٠ ملي ثانية لتتابعات الصدى المغزلي السريعة FSE. مع زمن تكرار TR أطول، تكون تتابعات الصدى المغزلي السريعة FSE أكثر ملاءمة للحصول على صور موزونة بالزمن الثاني T2.

- زمن الصدى TE لتتابعات الصدى المغزلي السريعة FSE للصور الموزونة بالزمن الثاني T2 يكون أطول أيضاً.

حقيقة أن أصداء متعددة يمكن أن تتولد بعد نبضة إثارة واحدة تستخدم بوضوح في التصوير العادي للحصول على صورة موزونة بكثافة البروتون (وزن مرحلة متوسطة) و صورة موزونة بالزمن الثاني T2 بنفس التتابع (المقطع ٨ , ٧). بالتبادل، فإن طرق الصدى المتعدد يمكن استخدامها للحصول على تتابعات أسرع.

يمكن استخدام تتابعات الصدى المغزلي السريعة FSE لإجراء صور الصدى المزدوج عن طريق تقسيم قطار الصدى. باستخدام قطار صدى طوله ثمانية، كمثال، فإن الأربع أصداء الأولى يمكن استخدامها لتوليد صورة موزونة بكثافة البروتون والأربع أصداء الأخيرة لتوليد صورة موزونة بالزمن الثاني T2.



الشكل رقم (٣٣). تتابع صدى مغزلي سريع. أربعة نبضات تمركز RF ١٨٠ درجة تم تطبيقهم لتوليد أربعة أصداء (قطار صدى)، على العكس من طريقة الصدى المتعدد، تم تشغيل انحدار تشفير الطور قبل كل صدى، الأصداء الأربعة التي يتم الحصول عليها بعد نبضة إثارة وحيدة لها تشفيرات طور مختلفة. في المثال الموضح، تباين الزمن T2 يتم تحديده أساسا في الصدى الثالث (زمن الصدى TE الفعال، المقطع ٩ , ٨).

(٨,٢) تتابعات الصدى المغزلي السريع ذو الطلقة الواحدة

Single Shot Fast Spin Echo (SSFSE) Sequences

تتابعات الصدى المغزلي ذو الطلقة الواحدة SSFSE والصدى المغزلي ذو الطلقة الواحدة المكتسب بنصف فورير half Fourier acquisition single shot fast spin echo(HASTE)، هي أسماء بديله لطريقة الرنين المغناطيسي MR السريعة جداً بزمن مسح مقداره ثانية واحدة أو أقل. تعتمد الطريقة على الملء غير الكامل للفراغ K (تصوير صدى كسري وفورير جزئي). "الطلقة الواحدة" توضح أن نصف خطوط الفراغ K يتم ملؤها بعد نبضة إثارة RF. سرعة الحصول أو التجميع تقلل تأثيرات الحركة إلى أقل ما يمكن. نتيجة طول أزمنة الصدى، فإن صور SSFSE أو HASTE توضح اختيارياً الأنسجة التي لها أزمنة تكرار TE طويلة، بمعنى الأماكن التي تحتوي على سوائل حرة، بينما الأنسجة التي لها TE قصيرة أو متوسطة تكون غير واضحة. لهذا السبب، فإن طريقة SSFSE أو HASTE تستخدم لتصوير الرنين المغناطيسي MR للنخاع myelography، والجهاز البولي urography ومخطط القنوات البنكرياسية cholangiopancreatography (MRCP).

(٨,٣) تتابعات الاسترداد العكسي السريع أو الدوامي

Fast or Turbo Inversion Recovery (Fast STIR) Sequences

إن تعديل قطار الصدى لتتابع الاستعادة العكسية IR يكون فعالاً خاصة لأن زمن التكرار TR الطويل جداً يسمح للتراخي الكامل للزمن الأول T1 بأن يحدث. تتابعات الاسترداد العكسي أو الدوامي لها نفس زمن العكس مثل تتابعات STIR العادية وتستخدم أيضا نبضة عكس ١٨٠ درجة ابتدائية ولكنها تأخذ عينات من كل الأصداء في قطار الصدى بتشفير طور مختلف.

(٨, ٤) تتابعات انحدار الصدى السريعة

Fast Gradient Echo (GRE) Sequences

تتابعات انحدار الصدى السريعة GRE (تُعرف أيضاً بانحدار الصدى التربيني أو تتابعات انحدار الصدى متناهية السرعة) تستخدم مع أحدث أنظمة الانحدار (العزل الفعال) للحصول على أزمنة صدى تحت الواحد ملي ثانية مع أزمنة تكرار ٥ ملي ثانية أو أقل. تتابع انحدار الصدى السريع GRE هو أساسا تتابع نداء الصدى GRE العادي والذي يعمل بسرعة ويستخدم بعض الحيل الحسابية، مبدئيا الملء غير الكامل للفراغ K (تصوير الصدى الكسري وفورير الجزئي، المقطع ٣, ٥). إن تتابعات انحدار الصدى GRE السريعة تعطي جودة صورة ممتازة بالرغم من أن الشريحة يمكن الحصول عليها في ثواني قليلة فقط (٢– ٣ ثانية تماما). مثل هذه التتابعات مناسبة جدا للتصوير الديناميكي، مثلاً، لتتبع التدفق الداخل لوسط تباين مضغة. فوق ذلك، فإن طرق انحدار الصدى GRE السريعة تستخدم لتصوير مناطق الجسم التي يجب فيها التخلص من تأثيرات الحركة مثل الصدر (حركة التنفس) والبطن.

تستخدم طرق انحدار الصدى GRE السريعة زاوية انقلاب صغيرة، تماماً أقل من ٤٥ درجة، للوزن المثالي بالزمن T1. إن هذا يحسن نسبة الإشارة للضوضاء SNR لأن هناك زمن أقل لتراخي الزمن T1 عندما يكون زمن التكرار TR قصيراً (التشبع، الفصل الثالث).

(٨, ٥) تتابع تصوير الصدى المستوي

Echo Planar Imaging (EPI) Sequence

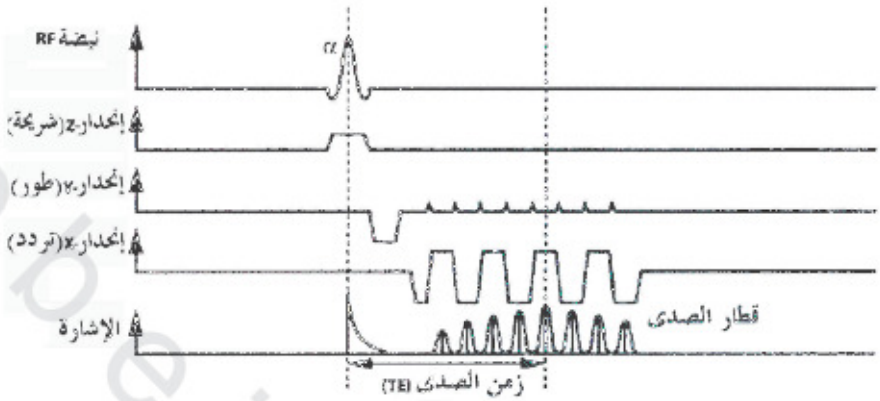
إن تصوير الصدى المستوي EPI يمكننا من التجميع المتناهي السرعة للبيانات، مما يجعله مرشحاً ممتازاً للتصوير الديناميكي والوظيفي بالرنين المغناطيسي MR. تتطلب هذه الطريقة انحدارات تشفير ترددي قوية وسريعة الفتح. يمكن الحصول على قطار

صدى يتكون من عدد من الأصداء التي تصل إلى ١٢٨ (الشكل رقم ٣٤). في هذه الطريقة، يمكن الحصول على صورة بتباين يصل إلى ٢٥٦ × ١٢٨ بعد نبضة إثارة واحدة (طلقة واحدة) في ٧٠ ملي ثانية، والتي تقابل ١٦ صورة في الثانية!. وبالرغم من ذلك، فإن تصوير الصدى المستوي EPI مازال عليه أن يجابه عدداً من المشاكل، والتي أخرت استخدامه حتى الآن في العيادات بشكل روتيني. هذه المشاكل هي:

- كطريقة انحدار الصدى GRE، فإن تصوير الصدى المستوي EPI لا يستطيع استرداد عدم التجانس في المجال وستضمحل الإشارة مع الزمن T2*.
- سرعة تشغيل الانحدار تسبب عدم تجانس في المجال يتراكم مع الزمن، مما يسبب تشوهات هندسية في صورة الرنين المغناطيسي MR.
- نتيجة اضمحلال T2* السريع للإشارة، سيكون هناك وقت قصير لتجميع الصدى. للحصول على عدد معقول من القياسات في هذه الفترة القصيرة، سنحتاج إلى انحدار قوي جدا وسريع. سرعة تشغيل الانحدار تتحدد بالعزم الكهربي لملفات الانحدار ومخاطر الضرر الذي قد يحدث للشخص الذي يتم تصويره كنتيجة للإثارة العصبية المصاحبة للمجالات المغناطيسية سريعة التغير. وفوق ذلك، فإن التردد السريع للانحدار يسبب ضوضاء تحتاج لحماية أذن المريض منها !.
- تباين الصورة يكون في العادة ضعيفاً لأن تجميع البيانات بالطلقة الواحدة لا يحتوي على تكرار ومن ثم فليس هناك تأثير للزمن T1.

(٨,٦) التتابعات المهجنة Hybrid Sequences

إن الطرق المهجنة تولد وتسجل تتابعات من الأصداء المغزلية SEs وانحدارات الصدى GREs بالتبادل. الانحدار وصدى المغازل gradient and spin echo (GRASE)) والتصوير الحلزوني هي طرق مهجنة.



الشكل رقم (٣٤). تصوير الصدى المستوى EPI. كما في طريقة الصدى المغزلي السريع FSE، يتم توليد عدة أصداء (ثمانية كما في المثال الموضح) بتشفيرات طور مختلفة. على العكس من الصدى المغزلي السريع FSE، فإن الأصداء لا تتولد بنبضة RF ١٨٠ درجة ولكن بتشفير انحدار ترددي كما في تتابع انحدار الصدى المغزلي GRE. تتطلب هذه الطريقة مكبرات عالية الكفاءة جداً لأن تشفير الانحدار الترددي يجب عكسه بسرعة كبيرة جداً. القمم في تشفير انحدار الطور تسمى الومضات «blips».

(٨,٧) تتابع الانحدار وصدى المغزل

Gradient and Spin Echo (GRASE) Sequence

تتابع الانحدار والصدى المغزلي هو تركيبة من الصدى المغزلي السريع FSE والتصوير بالصدى المستوي EPI. تتابع من نبضات الرايو RF ١٨٠ درجة يتم تطبيقه لتوليد عدد من الأصداء المغزلية (كما في الصدى المغزلي السريع FSE). بالإضافة لذلك، العديد من انحدارات الصدى GREs يتم إنتاجها لكل صدى مغزلي SE عن طريق التشغيل السريع لقراءة خرج قطبية الانحدار. هذا يجعل طريقة الـ GRASE أسرع حتى من الصدى المغزلي السريع FSE بدون أي تأثير على جودة الصورة لأن الإشارة تضمحل مع الزمن T2 بدلاً من الزمن T2*. التباين الذي سنحصل عليه هو نفسه مثل التباين الذي نحصل عليه مع تتابعات الصدى المغزلي SE العادية.

(٨,٨) التتابعات الحلزونية Spiral Sequences

اكتسبت التتابعات الحلزونية اسمها من حقيقة أن الفراغ K يتم ملؤه باستخدام مسار حلزوني. التصوير الحلزوني يتم إجراؤه باستخدام تتابع انحدار الصدى GRE بالترابط مع انحدارين متذبذبين. إنها طريقة واعدة، وخاصة لتصوير القلب في الزمن الحقيقي.

(٨,٩) زمن الصدى وتباين T2 في التتابعات السريعة

Echo Time and T2 Contrast in Fast Sequences

في تصوير الصدى المغزلي SE وانحدار الصدى GRE العادي، يتم توليد صدى واحد بعد كل إثارة. كنتيجة لذلك، فإن كل الأصداء التي تم أخذ عيناتها لصورة معينة يكون لها نفس زمن الصدى وبذلك نفس وزن الزمن T2. وزن الزمن T2 للصور المتولدة بهذه الطريقة يكون محدداً بدقة.

وعلى العكس، فإن تتابعات الصدى المغزلي SE وتصوير الصدى المستوي EPI السريعة تولد أصداء عديدة بأوزان الزمن T2 مختلفة، كلها تساهم في تباين الصورة الناتجة. وهذا هو السبب في اختيار واحد من الأصداء ليحدد أساساً تباين الزمن T2 (في الشكل رقم ٣٣ الثالث من أربع أصداء). زمن الصدى لها يسمى زمن الصدى الفعال (TE الفعال). وعلى الرغم من ذلك، يجب أن نكون حريصين على أن تكون أزمن الصدى TEs الأخرى تساهم في تباين الزمن T2.

تقنياً، يتم اختيار الصدى عن طريق تسجيله بطريقة تملأ مركز الفراغ K (المقطع ٢, ٤)، والذي يحتوي البيانات التي تؤثر بقوة في تباين الصورة.

المراجع References

1- Elster AD (1993) Gradient-echo MR imaging: Techniques and acronyms. Radiology 186:1

2- Frahm J, Häenicke W (1999) Rapid scan techniques. In: Stark DD, Bradley WG Jr (eds) Magnetic resonance imaging, 3rd edn. Mosby-Year Book no 87, Mosby, St. Louis.

obeikandl.com