



Compressed SENSE

Krótszy czas i wysoka jakość obrazowania

Piotr Winiarczyk

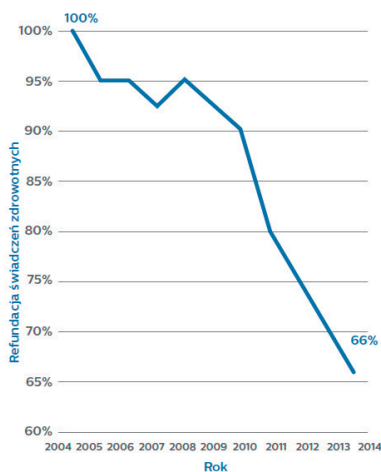
Philips

Dzięki zastosowaniu techniki Compressed SENSE w wielu sekwencjach badania MRI, możemy je przyspieszyć nawet o 20-40%, a to bardzo dobra wiadomość także dla pacjentów.

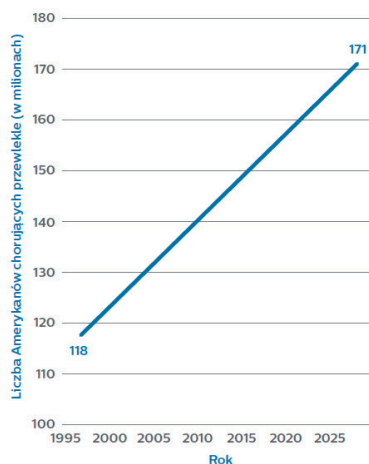
Jedną z niewątpliwych wad obrazowania metodą rezonansu magnetycznego jest bardzo długi czas trwania badania, co w obliczu wzrostu zapadalności na choroby przewlekłe i ograniczenia refundacji świadczeń zdrowotnych zrodziło potrzebę opracowania technologii umożliwiających skrócenie czasu jego trwania. Niniejszy artykuł zawiera objaśnienie najważniejszych zasad działania technologii Compressed SENSE oraz sposobów, w jakie przekłada się ona na wzrost wydajności diagnostyki oraz jakość obrazowania MR.

a od wyników leczenia pacjentów. Niedawno przeprowadzone badanie wykazało, że zarówno świadczeniodawcy, jak i płatnicy finansujący świadczenia zdrowotne spodziewają się, że do 2020 roku system refundacji oparty na wartości znacznie być stosowany częściej od systemu płatności za wykonane usługi [5]. Ta zmiana wymaga zarówno podniesienia jakości opieki zdrowotnej, jak i obniżenia jej kosztów.

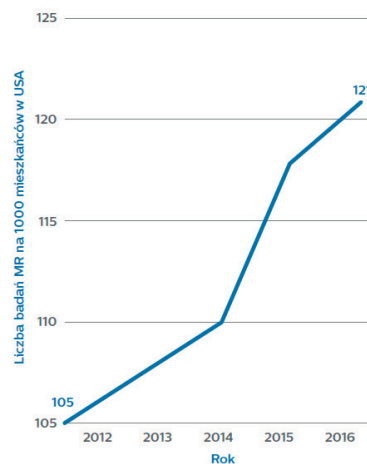
Jednym ze sposobów osiągnięcia tego celu jest przyspieszenie obrazowania. Technika obrazowania równoległego SENSE,



Spadek refundacji świadczeń zdrowotnych^[3]



Wzrost zachorowań na choroby przewlekłe^[3]



Wzrost liczby badań MR^[2]

Wydatki na opiekę medyczną na całym świecie rosną w alarmującym tempie. Szacowany wzrost kosztów w tym sektorze do roku 2025 w Stanach Zjednoczonych wyniesie na przykład 20% wartości PKB. W Chinach koszty te w latach 2010-2015 zwiększyły się o wynoszący 15% skumulowany roczny wskaźnik wzrostu, a szacuje się, że do roku 2020-2021 wyniosą aż bilion dolarów.

Trend ten zaowocował opracowaniem systemu refundacji opartego na wartości, w którym zwrot poniesionych kosztów świadczeń zdrowotnych zależy nie od wykonanej procedury,

którą po wprowadzeniu platformy dStream rozwinięto do techniki dS SENSE, znacznie przyspieszyła akwizycję obrazów MR. Było to możliwe dzięki podpróbkowaniu danych i odtworzeniu całości obrazu z wykorzystaniem danych dotyczących czułości cewki. Pomimo tych i innych innowacyjnych rozwiązań, konieczne jest jeszcze większe przyspieszenie badań.

Ostatni rozwój techniki **próbkiowania skompresowanego (ang. compressed sensing)**, która w porównaniu z obrazowaniem równoległym pozwala na jeszcze większe skrócenie czasu

akwizycji, umożliwił dalszą poprawę wydajności badań. Wykorzystując zasady próbkowania skompresowanego oraz największe zalety techniki SENSE, firma Philips opracowała nową technikę Compressed SENSE, która zapewnia jeszcze krótszy czas badań z zachowaniem wysokiej jakości obrazowania.

Na czym polega technika próbkowania skompresowanego?

Próbkowanie skompresowane jest techniką przetwarzania sygnałów zakładającą nadmiarowość zawartych w nich informacji. Technika próbkowania skompresowanego została opracowana przez Davida Donoho, a zasady jej działania potwierdzili w tym samym czasie Emmanuel Candès, Terence Tao wraz ze współpracownikami. Pierwsze dowody na możliwość kompresowania danych pochodzą z fotografii cyfrowej. W celu rozwiązania problemu związanego z przechowywaniem dużych plików obrazów cyfrowych opracowano kilka technik kompresji obrazów, między innymi JPEG. Odkrycie, że kompresja obrazów bez utraty jego szczegółów jest możliwa sprawiło, że zaczęto zastanawiać się nad tym, czy tę zasadę można zastosować w drugą stronę. Jeśli do rejestracji istotnych informacji nie są potrzebne wszystkie dane, to czy konieczna jest ich akwizycja?

Ponieważ w przypadku obrazowania MR czas akwizycji zależy od właściwości relaksacji i gęstości protonowej tkanek, właściwe pytanie dotyczące próbkowania skompresowanego brzmi następująco: czy można zrekonstruować cały obraz na podstawie danych pozyskanych z zastosowaniem znacznego podpróbkowania w przestrzeni k? Odpowiedzi na to pytanie udzielił Lustig i współpracownicy, a wkrótce potem kilka grup badawczych zajmujących się wykorzystaniem tej techniki w ściśle określonych zastosowaniach. Choć wszystkie badania skupiały się na

pojedynczych rodzajach akwizycji i badań, ich rezultaty potwierdziły możliwość skrócenia czasu obrazowania przy zachowaniu niemalże takiej samej jakości obrazowania.

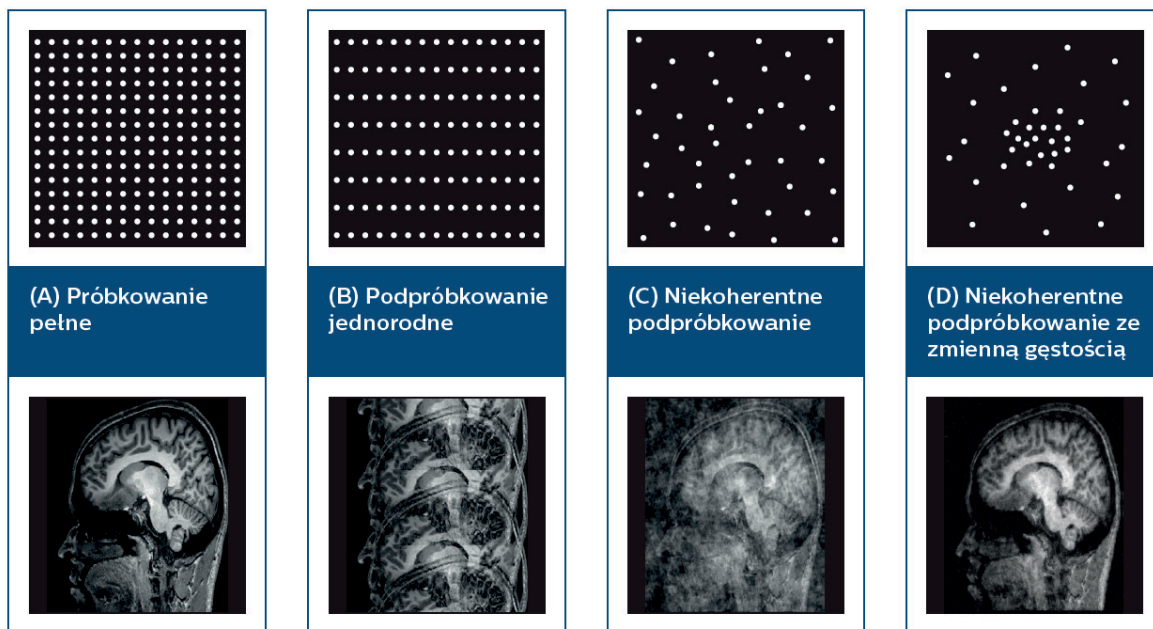
Warunki wymagane do stosowania próbkowania skompresowanego w praktyce klinicznej

Technika próbkowania skompresowanego obejmuje cały łańcuch strategii akwizycji, przetwarzania sygnału i rekonstrukcji. Zasadniczo można je wykorzystać w praktyce klinicznej po spełnieniu poniższych czterech warunków:

- schemat podpróbkowania musi umożliwiać powstawanie przypominających szum niekoherentnych artefaktów;
- dane muszą być „rozrzedzone” zarówno bezpośrednio, jak i w dziedzinie transformaty.
- w celu jeszcze większego skrócenia badań z użyciem cewek powierzchniowych, wymagane jest jednoczesne stosowanie aktualnie dostępnej techniki obrazowania równoległego;
- konieczne jest zastosowanie rekonstrukcji iteracyjnej, zapewniającej równowagę między spójnością a rozrzedzeniem danych.

W jaki sposób „rozrzedzenie” danych przekłada się na lepsze próbkowanie skompresowane?

W ogólnym pojęciu rozrzedzenie oznacza „bardzo małą ilość czegoś”, na przykład rzadkością są drzewa na pustyni. W obrazowaniu rozrzedzenie odnosi się do obrazów zawierających wiele czarnych (zerowych) pikseli oraz niewiele szarych lub białych pikseli (jak na przykład w badaniu angiograficznym metodą



Rys. 1 Różne schematy próbkowania i uzyskane obrazy



rezonansu magnetycznego (MRA)). W próbkowaniu skompresowanym rozrzedzenie ma duże znaczenie, ponieważ względnie ułatwia wychwycenie istotnych informacji oraz zignorowanie pozostałych. Postępując się dalej przykładem pustyni: względnie łatwo jest zauważyć pojedyncze drzewo na pustyni, co z pewnością byłoby bardzo trudne w przypadku dżungli.

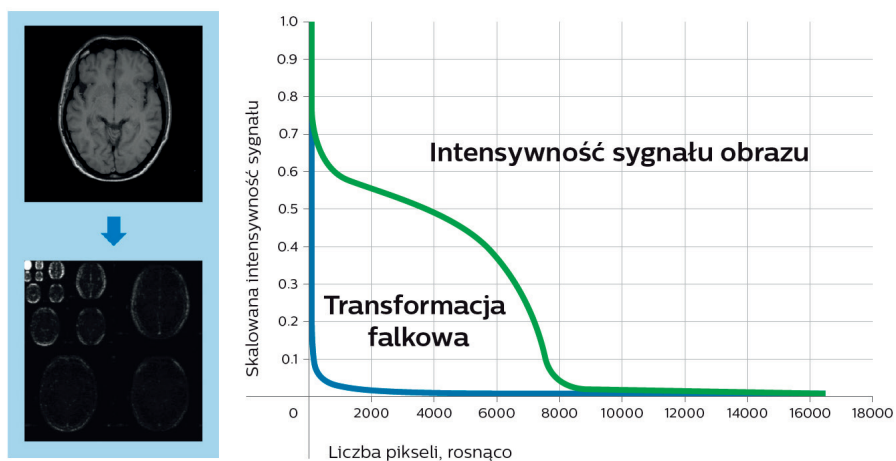
Zasadniczo obrazy MR nie są z natury „rozrzedzone” – większość pikseli na obrazie MR nie jest czarna, lecz zawiera wiele poziomów czerni, szarości i bieli. W przypadku próbkowania skompresowanego przekształcenie obrazu do innej dziedziny, na przykład trans-

formaty falkowej, wymusza rozrzedzenie obrazu. Należy zwrócić uwagę, że informacje przenoszone z jednej dziedziny do innej i z powrotem zostają zachowane. Po przekształceniu za pomocą transformaty falkowej informacje na obrazie są przedstawiane w innej skali przestrzennej, w bardzo podobny sposób, jak ma to miejsce w wyniku zastosowania na obrazie filtrów pasmowo-przepustowych o różnych szerokościach. Ponieważ informacje w tej dziedzinie są rozrzedzone, ich pozyskiwanie przebiega znacznie szybciej, dzięki czemu można zaoszczędzić więcej czasu. Rysunek 2 przedstawia histogram powstały w wyniku przekształcenia obrazu za pomocą algorytmu falkowego, dzięki czemu łatwiej jest odróżnić piksele składające się na istotne informacje na obrazie od tych, które nie mają znaczenia.

Dlaczego technika Compressed SENSE firmy Philips jest jedyna w swoim rodzaju?

Zalety techniki Compressed SENSE firmy Philips obejmują jej wszechstronne zastosowanie, możliwość współpracy z cewkami powierzchniowymi i aktualnie dostępnymi technikami obrazowania równoległego, automatyzację oraz optymalizację szybkości rekonstrukcji.

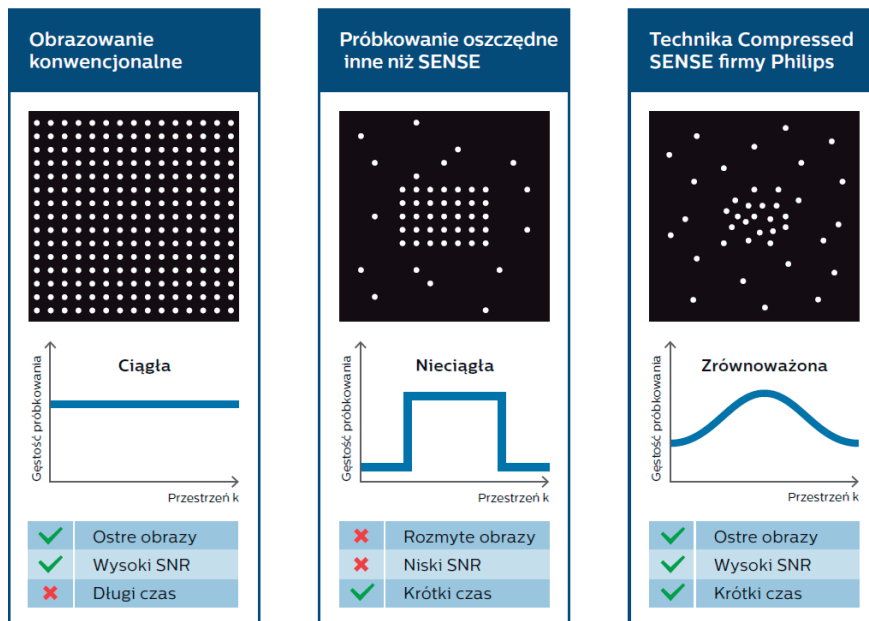
Wiele rozwiązań opartych na próbkowaniu skompresowanym skupia się wokół rozrzedzenia danych w dziedzinie czasu. W przeciwieństwie do tych rozwiązań technika Compressed SENSE firmy Philips wykorzystuje rozrzedzenie w dziedzinie przestrzeni. Dzięki temu można ją stosować w przypadku wszystkich badań struktur anatomicznych i wszystkich rodzajów badań, w tym T1, T2, PCA, MRA i innych oraz technik oceny ilościowej, takich jak mDIXON-Quant i mapowanie T2. Technika ta może być używana z różnymi metodami akwizycji, takimi jak mDIXON-XD oraz FFE, TFE,



Rys. 2 Liczba pikseli zawierających istotne/niezerowe informacje

SE, TSE (w połączeniu z impulsami wstępnymi techniki supresji sygnału od tkanki tłuszczowej oraz REST), oraz akwizycją 2D i 3D. Technikę Compressed SENSE można również wykorzystać w celu skrócenia badań dynamicznych w ramach akwizycji 4D.

Niektóre rozwiązania oparte na próbkowaniu skompresowanym w obrazowaniu MR często wymagają akwizycji linii do automatycznej kalibracji, co sprawia, że schemat próbkowania jest mniej elastyczny. Aby osiągnąć stopień przyspieszenia porównywalny do technik, które nie wymagają akwizycji linii do automatycznej kalibracji (takich jak SENSE), metody próbkowania skompresowanego oparte na technice innej niż SENSE muszą naruszyć schemat próbkowania, wprowadzając nieciągłą gęstość próbkowania i powodując niską gęstość próbkowania linii na obrzeżach przestrzeni k. W takim przypadku powstałe obrazy będą rozmyte, będą zawierać szum strukturalny obniżający ich jakość (Rys. 3) lub nie będą nadawać się do wykorzystania w przypadku niektórych struktur anatomicznych, rodzajów badań lub sekwencji.



Rys. 3 Różne strategie akwizycji, powiązana z nimi gęstość próbkowania w przestrzeni k oraz jakość obrazów i czas skanowania

Czy korzystanie z techniki Compressed SENSE firmy Philips jest łatwe?

Wdrożenie nowych technik obrazowania MR nie zawsze jest łatwe. Radiolodzy muszą mieć pewność, że nowa technika nie wpłynie ujemnie na możliwość opisanie obrazów, a technicy, że opanowali nową technikę na tyle dobrze, aby móc stosować ją w protokołach badań.

W odróżnieniu od wielu skomplikowanych opcji, technika Compressed SENSE jest niezwykle łatwa w użyciu, a jej wdrożenie jest całkowicie zautomatyzowane. Dotyczy to zarówno tworzenia schematu próbkowania, jak i równoważenia spójności i algorytmu rozrzedzania danych. Równoważony techniką SENSE schemat próbkowania podlega automatycznej optymalizacji, z wykorzystaniem niekoherentnego schematu podpróbkowania, ze zmienną gęstością, w którym środek przestrzeni k jest próbkowany gęściej niż jej obrzeża. Schematy próbkowania automatycznie minimalizują również inne źródła artefaktów, takie jak prądy wirowe i ruchy pacjenta. Wystarczy:

1. Włączyć funkcję Compressed SENSE.
2. Wybrać żądany współczynnik przyspieszenia (skrócenia czas) techniki Compressed SENSE w skali od 1 do 32.
3. Wybrać żądany poziom eliminacji szumów (bez eliminacji szumów, eliminacja szumów w stopniu niskim, średnim lub wysokim bądź zgodnie z ustawieniem domyślnym systemu).

SENSE	nie
C-SENSE	tak
redukcja	10
eliminacja szumów	domyślna

Rys. 4 Łatwy w obsłudze, intuicyjny interfejs użytkownika funkcji Compressed SENSE firmy Philips

Technika Compressed SENSE firmy Philips zapewnia możliwości zwiększenia wydajności i precyzji badań oraz poprawy komfortu pacjenta.

Wyższa wydajność

Technika Compressed SENSE firmy Philips pozwala na przyspieszenie badań nawet o 50% z zachowaniem takiej samej rozdzielczości i praktycznie takiej samej jakości obrazowania, co w przypadku obrazowania techniką dS SENSE. Zaoszczędzony czas pozwala na przebadanie większej liczby pacjentów w ciągu dnia. Ponadto dzięki skróceniu czasu obrazowania, łatwiej jest przeprowadzać badania u pacjentów z ograniczoną możliwością wstrzymania oddechu. Poniższy przykład pokazuje, w jaki sposób technika Compressed SENSE może skrócić całkowity czas badania MR.

Wyższa precyzja

Technika Compressed SENSE pozwala uzyskać obrazy o wyższej rozdzielczości w tym samym czasie obrazowania, który obecnie przeznaczają się na badanie w celu uzyskania wyników zapewniających pewność diagnostyczną. Korzyści mogą być odczuwalne w przypadku wielu różnych typów badań. Technika Compressed SENSE umożliwia poprawę rozdzielczości przy podobnym czasie obrazowania w badaniach piersi, poprawę rozdzielczości przy podobnym czasie obrazowania w przypadku protokołów 3D PelvisVIEW T2 oraz eTHRIVE bez obniżenia jakości obrazowania, a także pozwala na szybkie, zajmujące mniej niż 5 minut, pozyskiwanie izotropowych obrazów 3D o dokładności poniżej milimetra (0,7 mm lub mniej) przy użyciu technik akwizycji PD, T1,

Do 50% szybciej z zachowaniem jakości obrazowania

Examcard badania 2D i 3D mózgu

16:52 min

9:06 min

T1w SE	0.9 x 1.3 x 5.0 mm	2:35 min	S 1.0	T1w SE	0.9 x 1.3 x 5.0 mm	1:14 min	CS 2.8	52%
T2w TSE	0.6 x 0.7 x 5.0 mm	2:04 min	S 1.6	T2w TSE	0.6 x 0.7 x 5.0 mm	1:30 min	CS 3.2	27%
DWI (b1000)	1.8 x 1.4 x 5.0 mm	0:45 min	S 2.0	DWI (b1000)	1.8 x 1.4 x 5.0 mm	0:45 min	CS 2.0	
T2w FLAIR	1.0 x 1.2 x 5.0 mm	2:12 min	S 1.9	T2w FLAIR	1.0 x 1.2 x 5.0 mm	1:30 min	CS 2.5	41%
T2w FFE	0.9 x 1.1 x 5.0 mm	1:15 min	S 2.0	T2w FFE	0.9 x 1.1 x 5.0 mm	0:49 min	CS 3.0	35%
3D Inflow	0.7 x 1.3 x 1.4 mm	7:11 min	S 2.0	3D Inflow	0.7 x 1.3 x 1.4 mm	3:06 min	CS 4.5	57%

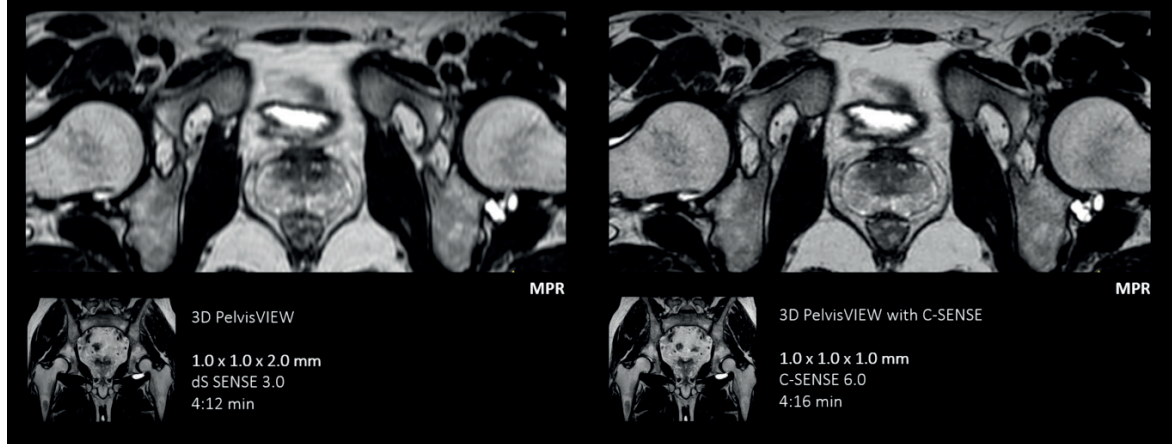
Rys. 5 Porównanie badań wykonanych tradycyjnie i z wykorzystaniem Compressed SENSE pod kątem optymalizacji czasu badania



Wyższa rozdzielczość bez wydłużania czasu badania



Obrazowanie stawów biodrowych 3D PelvisVIEW



Rys. 6 Porównanie badań wykonanych tradycyjnie i z wykorzystaniem Compressed SENSE pod kątem optymalizacji jakości obrazowania

T2 oraz SPAIR, wynikiem czego są obrazy o niemal takiej samej jakości, co w konwencjonalnym obrazowaniu, które mogą służyć do diagnostyki trudnych przypadków i struktur anatomicznych.

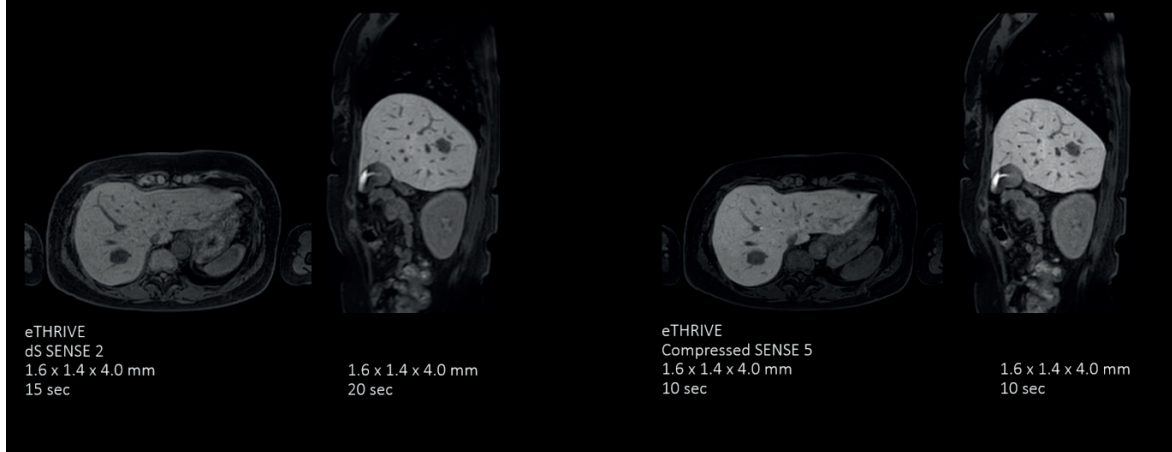
Wyższy komfort pacjenta

Technika Compressed SENSE firmy Philips została opracowana także z myślą o potrzebach pacjenta. Możliwość skrócenia czasu obrazowania zmniejsza niepokój związany z badaniem, zwłaszcza u 35% pacjentów cierpiących na klaustrofobię lub odczuwających znaczne obawy w związku z koniecznością przebywania

w zamkniętym tunelu aparatu MR. Ponadto wielośrodkowe badanie wewnętrzne wykazało, że ponad 50% pacjentów doświadcza trudności z wstrzymaniem oddechu. Dzięki technice Compressed SENSE można skrócić wymagany czas wstrzymania oddechu. Kolejną korzyścią dla pacjenta jest zmniejszenie współczynnika SAR. Jednak prawdziwym testem dla techniki obrazowania jest to, w jaki sposób wpływa ona na proces diagnostyczny, a doskonała jakość obrazów osiągnięta dzięki technice Compressed SENSE jest niezaprzeczalnym dowodem na jej skuteczność.

Krótsze bezdechy

Badanie wątroby



Rys. 7 Porównanie badań wykonanych tradycyjnie i z wykorzystaniem Compressed SENSE pod minimalizacji czasu bezdechów




Dzięki możliwości zastosowania w przypadku wszystkich struktur anatomicznych i badań, sekwencji 2D, 3D i 4D, różnych technik skanowania oraz w aparatach o sile pola 1,5 T i 3 T, technika Compressed SENSE firmy Philips, wykorzystująca zrównoważone próbkowanie bazujące na technice SENSE, wyznacza nowy standard wydajności badań, umożliwiając pracownikom diagnostycznym sprostać rosnącemu zapotrzebowaniu na badania MR, przy jednoczesnym spadku ich refundacji. Skrócenie czasu trwania badania pacjenta pozwala szpitalom na zmniejszenie liczby osób oczekujących na badanie, obrazowanie większej liczby pacjentów w ciągu dnia, ograniczenie występowania artefaktów ruchowych na obrazach oraz poprawę komfortu pacjenta. Możliwość uzyskiwania obrazów o wyższej rozdzielczości bez wydłużania czasu skanowania to także większa pewność diagnostyczna. Technika Compressed SENSE poprawia komfort pacjenta, a lekarzom i personelowi medycznemu umożliwia skupienie się na jego potrzebach.

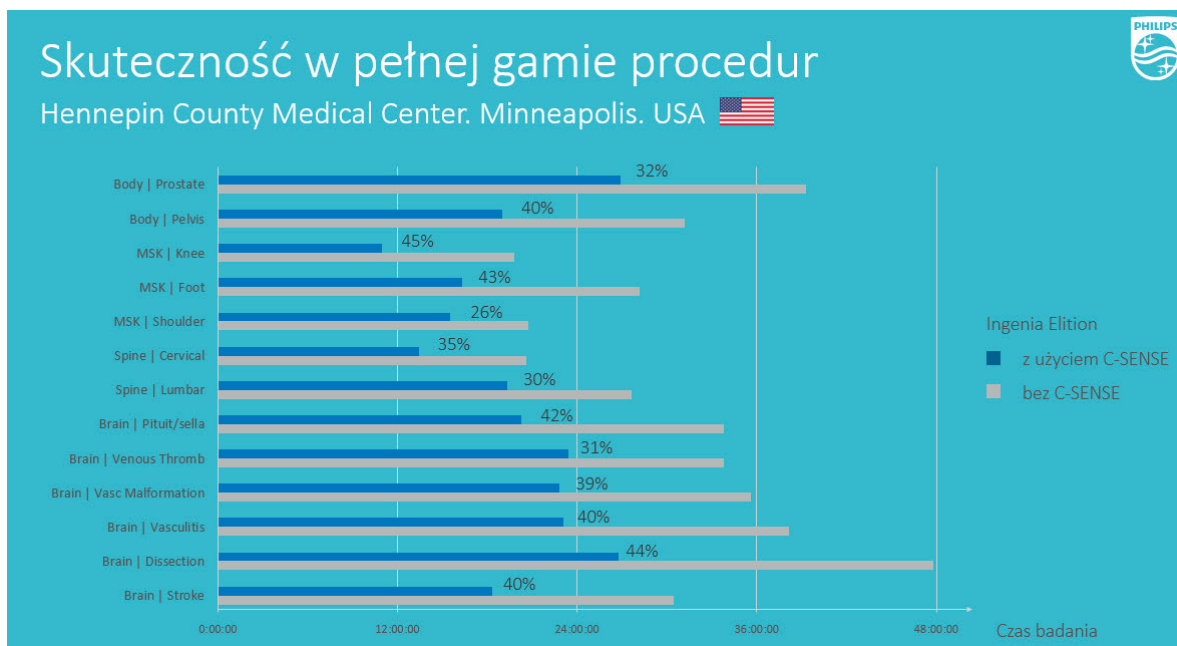


Niniejsza praca opublikowana została w dokumencie „white paper” pt. „Compressed SENSE – Krótszy czas i wysoka jakość obrazowania”, który dostępny jest na stronach internetowych Philips pod adresem: <https://www.philips.pl/healthcare/resources/landing/compressed-sense>

Warto spojrzeć na szybkość adopcji techniki Compressed SENSE w środowisku rezonansu magnetycznego. Od premiery, w czasie Kongresu RSNA 2017, przez pierwszy rok dostępności, Compressed SENSE został zainstalowany na 298 systemach rezonansu magnetycznego Philips, a przy jego użyciu wykonano nieco ponad 230 tysięcy badań. W kolejnych trzech miesiącach, czyli w czasie czterokrotnie krótszym, przybyło kolejnych 200 instalacji, a liczba wykonanych badań wzrosła do ponad 400 tysięcy. Dobrym przykładem korzyści wynikających z instalacji Compressed SENSE jest porównanie czasu badań ze szpitala County Medical Center w USA, przed i po zaimplementowaniu tej techniki.

U podstaw niewątpliwego sukcesu techniki Compressed SENSE, oprócz wymienionych w artykule rozlicznych zalet, stoi również możliwość instalacji we wszystkich systemach rezonansu magnetycznego firmy Philips, aktualnie produkowanych, a także wieloletniej bazy instalacyjnej systemów Achieva, Ingenia, Prodiva zarówno o polu 1,5 T, jak i 3 T.

Użytkowników systemów Philips zachęcamy do testowania Compressed SENSE w swoich systemach, co jest najlepszą metodą sprawdzenia użyteczności i możliwości klinicznych nowej opcji. Może się okazać, że Compressed SENSE jest doskonałą odpowiedzią na rosnące potrzeby w zakresie ilości wykonywanych badań i oczekiwań w zakresie zaawansowanej diagnostyki obrazowej. 



Rys. 8 Przekrojowy obraz wpływu Compressed SENSE na czas trwania poszczególnych typów badań MR