



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2016년10월06일

(11) 등록번호 10-1663365

(24) 등록일자 2016년09월29일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

A61B 5/055 (2006.01) G01R 33/36 (2006.01)

G01R 33/483 (2006.01) G01R 33/54 (2006.01)

G01R 33/561 (2006.01) G01R 33/565 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2014-0096820

(22) 출원일자 2014년07월29일

심사청구일자 2015년05월21일

(65) 공개번호 10-2015-0014887

(43) 공개일자 2015년02월09일

(30) 우선권주장

10 2013 214 867.4 2013년07월30일 독일(DE)

(56) 선행기술조사문헌

US04727325 A

US20110241675 A1

US20120146641 A1

JP2000279396 A

(73) 특허권자

지멘스 악티엔게젤샤프트

독일 뮌헨 80333 비델스파히프라츠 2

(72) 발명자

스테파, 알토

독일 91054 에를랑겐 시에글리츠호프 스트라세 53

(74) 대리인

양영준, 백만기, 정은진

전체 청구항 수 : 총 15 항

심사관 : 최성수

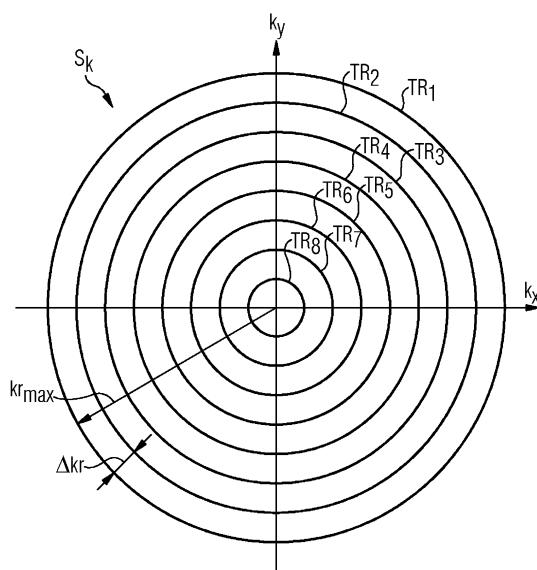
(54) 발명의 명칭 자기 공명 제어 시퀀스 결정

(57) 요 약

검사 대상(O) 내의 제한적이고 회전 대칭적 여기 프로파일(EP)을 여기하기 위해 적어도 2개의 공간 방향(x, y)으로 선택적으로 활동하는 펄스 배열(PA, PA', PA'')을 갖는 자기 공명 제어 시퀀스(AS)를 결정하는 방법이 설명된다. 펄스 배열(PA, PA', PA'')의 RF 여기 펄스(RFE, RFE', RFE'')가 다수의 부분 RF 펄스(RF₁, RF₂, RF₃, …, RF_n)로 구현되는 경우, 각각의 RF 펄스(RF₁, RF₂, RF₃, …, RF_n)는 각각의 펄스 배열(PA, PA', PA'')의 RF 여기 펄스(RFE, RFE', RFE'')와 동일한 방향으로 회전 대칭적이다.

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도2



RF_n, \dots, RF_8)의 시퀀스를 포함하고, 2개의 공간 방향(x, y)의 조화된 경사 펄스들($GP_x, GP_y, GP_x', GP_y', GP_x''$, GP_y'')이 다수의 부분 RF 펄스($RF_1, RF_2, RF_3, \dots, RF_n, \dots, RF_8$)의 시퀀스와 병렬 배치되어 전송 k-공간(S_k)에서의 상이한 부분 RF 펄스들($RF_1, RF_2, RF_3, \dots, RF_n, \dots, RF_8$)의 RF 에너지 도입은 서로 동심인 원형 k-공간 전송 궤적($TR_1, TR_2, TR_3, \dots, TR_8$)에서 각각 일어난다. 부분 RF 펄스들($RF_1, RF_2, RF_3, \dots, RF_n, \dots, RF_8$)의 RF 포락선의 진폭(b_1)은 원형 k-공간 궤적($TR_1, TR_2, TR_3, \dots, TR_8$)의 횡단의 지속시간($T, T_1, T_2, T_3, \dots, T_n, \dots, T_8$) 동안 각각 일정하다. 더구나, 자기 공명 시스템(1)의 동작 방법 및 교정 방법; 자기 공명 제어 시퀀스(AS)를 결정하기 위한 제어 시퀀스 결정 디바이스(22); 및 그러한 제어 시퀀스 결정 디바이스(22)를 구비한 자기 공명 시스템(1)이 설명된다.

명세서

청구범위

청구항 1

검사 대상(O) 내에 제한적인 회전 대칭 여기 프로파일(EP)을 여기하기 위해 적어도 2개의 공간 방향(x, y)으로 선택적으로 활동하는(act) 펄스 배열(PA, PA', PA'')을 갖는 자기 공명 제어 시퀀스(AS)를 결정하는 방법으로서, 상기 펄스 배열(PA, PA', PA'')의 RF 여기 펄스(RFE, RFE', RFE'')는 다수의 부분 RF 펄스들(RF₁, RF₂, RF₃, …, RF_n, …, RF₈)의 시퀀스를 포함하고, 상기 2개의 공간 방향(x, y)의 조화된 경사 펄스들(coordinated gradient pulses)(GP_x, GP_y, GP_{x'}, GP_{y'}, GP_{x''}, GP_{y''})이 다수의 부분 RF 펄스(RF₁, RF₂, RF₃, …, RF_n, …, RF₈)의 시퀀스와 병렬 배치되어 전송 k-공간(S_k)에서의 상이한 부분 RF 펄스들(RF₁, RF₂, RF₃, …, RF_n, …, RF₈)의 RF 에너지 도입(energy introduction)이 서로 동심인 원형 k-공간 전송 궤적들(TR₁, TR₂, TR₃, …, TR₈)에서 각각 일어나고, 상기 부분 RF 펄스들(RF₁, RF₂, RF₃, …, RF_n, …, RF₈)의 RF 포락선(envelope)의 진폭(b₁)은 원형 k-공간 궤적(TR₁, TR₂, TR₃, …, TR₈)의 횡단(traversal)의 지속 시간(duration)(T, T₁, T₂, T₃, …, T_n, …, T₈) 중에 각각 일정한, 자기 공명 제어 시퀀스 결정 방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 원형 k-공간 궤적(TR₁, TR₂, TR₃, …, TR₈)의 횡단의 지속시간(T)은 상이한 부분 RF 펄스들(RF₁, RF₂, RF₃, …, RF_n, …, RF₈)에 대해 동일한 길이인, 자기 공명 제어 시퀀스 결정 방법.

청구항 3

제1항 또는 제2항에 있어서, 상기 원형 k-공간 궤적(TR₁, TR₂, TR₃, …, TR₈)의 횡단의 지속시간(T, T₁, T₂, T₃, …, T₈)은 상이한 부분 RF 펄스들(RF₁, RF₂, RF₃, …, RF_n, …, RF₈)에 대해 개별적으로 각각 결정되는, 자기 공명 제어 시퀀스 결정 방법.

청구항 4

제1항 또는 제2항에 있어서, 상기 원형 k-공간 궤적(TR₁, TR₂, TR₃, …, TR₈)의 횡단의 지속시간(T, T₁, T₂, T₃, …, T₈)은 상기 경사 펄스들(GP_x, GP_y, GP_{x'}, GP_{y'}, GP_{x''}, GP_{y''})이 미리 결정된 최대 경사 슬루율(maximum gradient slew rate)을 초과하지 않도록 최대 길이를 갖도록 선택되는, 자기 공명 제어 시퀀스 결정 방법.

청구항 5

제1항 또는 제2항에 있어서, 상기 경사 펄스들(GP_{x''}, GP_{y''})은 시간적으로 인접한 부분 RF 펄스들(RF₁, RF₂, RF₃, …, RF_n, …, RF₈)과 관련된 2개의 동심 원형 k-공간 궤적들(TR₁, TR₂, TR₃, …, TR₈)이 전송 k-공간(S_k)에서 반대 방향으로 횡단되도록 설계되는, 자기 공명 제어 시퀀스 결정 방법.

청구항 6

제1항 또는 제2항에 있어서, 상기 경사 펄스들(GP_x, GP_y, GP_{x'}, GP_{y'}, GP_{x''}, GP_{y''})은 상기 원형 k-공간 궤적들(TR₁, TR₂, TR₃, …, TR₈)이 전송 k-공간(S_k)에서 등거리 고리들(equidistant rings)을 형성하도록 설계되는, 자기 공명 제어 시퀀스 결정 방법.

청구항 7

제1항 또는 제2항에 있어서, 상기 경사 펄스들은 동심 원형 k-공간 궤적들(TR₁, TR₂, TR₃, …, TR₈)이 서로에 대

한 방사상 간격($\Delta kr_1, \Delta kr_2, \Delta kr_3, \dots$)이 공통 중심의 방향으로 더 작아지는 고리들을 형성하도록 설계되는, 자기 공명 제어 시퀀스 결정 방법.

청구항 8

제1항 또는 제2항에 있어서, 상기 동심 원형 k-공간 궤적들($TR_1, TR_2, TR_3, \dots, TR_8$)의 개수(N)는 상기 여기 프로파일(EP)의 직경(d)에 대한 제1 사이드 로브(side lobe; SL)의 간격(S_{SL})의 비에 의존하여 선택되는, 자기 공명 제어 시퀀스 결정 방법.

청구항 9

제1항 또는 제2항에 있어서, 상기 부분 RF 펄스들($RF_1, RF_2, RF_3, \dots, RF_n, \dots, RF_8$)의 포락선의 진폭은 원통형(유리하게 가우시안(Gaussian)) 여기 프로파일(EP) 내의 목표 플립 각도(target flip angle)가 원통형 여기 프로파일(EP)의 원통 축(cylinder axis)으로부터의 방사상 간격에 의존하도록 결정되는, 자기 공명 제어 시퀀스 결정 방법.

청구항 10

제1항 또는 제2항에 있어서, 상기 부분 RF 펄스들($RF_1, RF_2, RF_3, \dots, RF_n, \dots, RF_8$)의 포락선의 진폭은 목표 플립 각도가 원통형 여기 프로파일(EP) 내에 본질적으로 일정하도록 결정되는, 자기 공명 제어 시퀀스 결정 방법.

청구항 11

자기 공명 시스템(1)을 작동시키는 방법으로서, 자기 공명 제어 시퀀스(AS)가 제1항 또는 제2항에 따른 방법에서 초기에 결정되고, 그 다음에 상기 자기 공명 시스템(1)은 이 자기 공명 제어 시퀀스(AS)를 사용하여 작동되는, 자기 공명 시스템 작동 방법.

청구항 12

자기 공명 시스템(1)을 조정 및/또는 교정(calibrate)하는 방법으로서, 상기 자기 공명 시스템(1)은 경사 지연 시간의 변형 하에서 제11항에 따른 방법을 이용하여 반복적으로 동작하고, 그에 의해 자기 공명 영상 데이터(BD)가 생성되고, 상기 경사 지연 시간과 관련한 상기 자기 공명 시스템(1)의 조정 및/또는 교정이 상기 자기 공명 영상 데이터(BD)의 분석에 기반하여 일어나는, 자기 공명 시스템 조정 및/또는 교정 방법.

청구항 13

자기 공명 제어 시퀀스(AS)를 결정하기 위한 제어 시퀀스 결정 디바이스(22)로서,

검사 대상(O) 내에 여기될 제한적인 회전 대칭 여기 프로파일(EP)의 공간적 규모(spatial extent)를 규정하는 여기 프로파일 데이터(d)를 수신하는 입력 인터페이스 배열(23); 및

적어도 2개의 공간 방향(x, y)으로 선택적으로 활동하는 적어도 하나의 펄스 배열(PA, PA', PA'')을 결정하는 펄스 배열 결정 유닛(26)

을 포함하며,

상기 펄스 배열(PA, PA', PA'')의 RF 여기 펄스(RFE, RFE', RFE'')는 다수의 부분 RF 펄스들($RF_1, RF_2, RF_3, \dots, RF_n, \dots, RF_8$)의 시퀀스를 포함하도록 결정되고, 상기 2개의 공간 방향(x, y)의 조화된 경사 펄스들($GP_x, GP_y, GP_x', GP_y', GP_x'', GP_y''$)이 다수의 부분 RF 펄스($RF_1, RF_2, RF_3, \dots, RF_n, \dots, RF_8$)의 시퀀스와 병렬 배치되어 전송 k-공간(S_k)에서의 상이한 부분 RF 펄스들($RF_1, RF_2, RF_3, \dots, RF_n, \dots, RF_8$)의 RF 에너지 도입이 서로 동심인 원형 k-공간 전송 궤적들($TR_1, TR_2, TR_3, \dots, TR_8$)에서 각각 일어나고, 상기 부분 RF 펄스들($RF_1, RF_2, RF_3, \dots, RF_n, \dots, RF_8$)의 RF 포락선의 진폭(b_1)은 원형 k-공간 궤적($TR_1, TR_2, TR_3, \dots, TR_8$)의 횡단의 지속 시간($T, T_1, T_2, T_3, \dots, T_n, \dots, T_8$) 중에 각각 일정한, 제어 시퀀스 결정 디바이스.

청구항 14

자기 공명 시스템(1)으로서,

고주파 전송 디바이스(5, 12), 경사 시스템(4), 및 고주파 펄스 시퀀스(RFS)를 방출하고, 이와 연동하여 미리 결정된 자기 공명 제어 시퀀스(AS)에 기반하여 원하는 측정을 구현하기 위해 상기 경사 시스템을 통해 경사 펄스열(gradient pulse train)(GP)을 방출하도록 설계된 제어 디바이스(10)를 포함하고, 자기 공명 제어 시퀀스(AS)를 결정하고 상기 자기 공명 제어 시퀀스(AS)를 상기 제어 디바이스(10)에 전달하기 위해 제13항에 따른 제어 시퀀스 결정 디바이스(22)를 포함하는, 자기 공명 시스템(1).

청구항 15

제어 시퀀스 결정 디바이스(22)의 메모리로 직접 로딩될 수 있는 컴퓨터 프로그램이 저장된 컴퓨터 판독 가능 기록 매체로서, 상기 프로그램이 상기 제어 시퀀스 결정 디바이스(22)에서 실행되는 경우 제1항 또는 제2항에 따른 방법의 모든 단계들을 실행하기 위해 프로그램 코드 세그먼트들(program code segments)을 포함하는, 컴퓨터 판독 가능 기록 매체.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 검사 대상 내의 제한적이고 회전 대칭적인 여기 프로파일(excitation profile)을 여기시키기 위해 적어도 2개의 공간 방향으로 선택적으로 활동하는(act) 펄스 배열을 이용하여 자기 공명 제어 시퀀스를 결정하는 방법에 관한 것이다. 나아가, 본 발명은 이러한 자기 공명 제어 시퀀스로 자기 공명 시스템을 동작시키는 방법, 이러한 방법을 사용하여 자기 공명 시스템을 교정(calibrate)하는 방법, 이러한 자기 공명 제어 시퀀스를 결정하기 위한 제어 시퀀스 결정 디바이스, 및 이러한 제어 시퀀스 결정 디바이스를 갖는 자기 공명 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 자기 공명 단층촬영 시스템(자기 공명 시스템이라고도 지칭됨)에서, 검사될 신체는 기본 자장 자석 시스템을 이용하여 통상적으로 상대적으로 높은, 최적으로 균일한 기본 자장(B_0 자장), 예를 들어, 1, 5, 3, 또는 7 테슬라(Tesla)에 노출된다. 경사 시스템(gradient system)을 이용하여 자장 경사(magnetic field gradient)가 추가적으로 적용된다. 고주파 여기 신호(RF 신호, 또는 RF 여기 펄스, 또는 간략히 RF 펄스라고도 지칭됨)는 고주파 전송 시스템을 통해 적절한 안테나 디바이스들에 의해 방출되는데, 이는 소위 규정된 "플립 각도(flip angle)"에 의해 공명 상태로 여기된 특정 원자들의 핵 스핀들이 기본 자장의 자장선(magnetic field line)들에 대해 플립되는 상황을 초래해야 한다. 핵 스핀들의 이완 시에, 적절한 수신 안테나를 이용하여 수신되고 나서 더 처리되는 고주파 신호들(소위 자기 공명 신호들)이 방사된다. 마지막으로, 원하는 영상 데이터가 이러한 방식으로 획득된 원시 데이터로부터 재구성된다.

[0003] 규정된 측정의 경우, 방출될 고주파 펄스 시퀀스 및 이와 연동하여 (슬라이스 선택 방향, 위상 코딩 방향, 및 판독 방향의 매칭 경사 펄스들(matching gradient pulses)을 이용하여) 전환될 경사 펄스 시퀀스를 이용하여 펄스 시퀀스가 방출될 수 있다. 특히, 시퀀스 내의 타이밍, 즉, 어떤 시간 간격에 어느 펄스들이 서로의 다음에 오는지는 영상화(imaging)에 상당히 중요하다. 복수의 제어 파라미터 값들은 규정된 측정을 위해 미리 생성되고 (예를 들어, 메모리로부터) 검색되는 소위 측정 프로토콜에 보통 규정되어 있고, 추가적인 제어 파라미터 값들, 예를 들어 측정될 슬라이스들의 스택의 규정된 슬라이스 간격, 슬라이스 두께 등을 제공할 수 있는 현장 조작자(operator)에 의해 필요에 따라 수정될 수 있다. 자기 공명 제어 시퀀스 또는 펄스 시퀀스가 이를 제어 파라미터 값들의 전부에 기반하여 계산된다.

[0004] 고전적인 절차에서, 대상의 내부의 영상들의 획득은 슬라이스마다 일어난다. 상대적으로 얇은, 통상적으로 1 내지 10mm 사이의 평면의 슬라이스가 선택적으로 각각 여기된다. 이러한 선택적 여기는 고주파 여기 펄스와 연동하여 슬라이스 선택 방향으로 경사가 적용된다는 점에서 달성된다. 여기 고주파 펄스 및 관련 경사로 구성된 이러한 펄스 배열을 통해, 공명 조건이 슬라이스 선택 방향에 수직한 슬라이스에만 충족된다는 점이 달성된다. 슬라이스 선택 방향으로의 여기 슬라이스의 두께는 슬라이스 선택 경사의 진폭 및 고주파 펄스의 주파수 대역폭에 의해 결정된다. 여기된 슬라이스는 고주파 자장의 캐리어 주파수의 "시프트(변위)"만큼 슬라이스 선택 방향을 따라 변위될 수 있다. 이를 1차원 선택 RF 펄스들의 선택 볼륨은 슬라이스 평면에 수직한 방향으로만 제한된다. 이러한 슬라이스 선택 방향은 소위 z축(단층 촬영기(tomograph)의 종축) 또는 단층 촬영기에 누워있는

환자의 종축에 평행하게 진행한다. 슬라이스 내의 공간 코딩은 일 방향(대부분의 경우 y축 방향)의 위상 코딩을 통해 한편에서 일어나고, 제2 방향(대부분의 경우 x축 방향)의 판독 코딩을 통해 일어난다. 이와 같이, 원시 데이터가 입력되는 2차원 공간 주파수 공간(소위 k-공간)이 채워진다. 슬라이스의 영상은 2차원 푸리에 변환을 통해 이들 원시 데이터로부터 생성된다.

[0005] 게다가, 다차원 선택 RF 펄스들이 알려져 있다. 예를 들어, 2차원 선택 RF 펄스가 막대 축에 수직한 양 방향 또는 원통 축에 수직한 방사 방향으로 공간적으로 제한되는 긴 막대 또는 원통을 선택할 수 있다. 예를 들어, 3차원 선택 RF 펄스는 3개의 모든 공간 방향으로 제한되는 단일 복셀(voxel)을 여기시킬 수 있다.

[0006] 이들 다차원 RF 펄스들의 하나의 중요한 적용 분야는 소위 "내부 볼륨 영상화(inner volume imaging)"이다. 다차원 RF 펄스는 여기 펄스로서 사용된다. 제한적인 여기 볼륨은 에일리어싱 아티팩트(artifact)들이 생성되지 않고 ("FoV"라고 약칭되는) 시야(field of view)가 검사 대상보다 작도록 선택되게 한다. 2번째 중요한 적용 분야는 소위 "내비게이터 기법(navigator technique)"이다. 여기에서, 예를 들어, 원통형 막대가 진동판 에지(diaphragm edge)를 통해 2차원 선택 RF 펄스(소위 펜슬 빔 여기(pencil beam excitation))를 이용하여 여기되고, 호흡 운동의 검출을 위한 정보는 원통 축을 따라 1차원적으로 이후에 판독된다. 원통형 막대의 여기 및 이를 위한 데이터 획득은 데이터 획득을 게이트들과 동일하게 관련시켜서 움직임을 일치시키거나, 원시 데이터 또는 이들로부터 재구성된 영상 데이터를 움직임 위상 또는 위치와 관련시키고/거나, 데이터를 정정하기 위해 영상화 시퀀스 내의 상이한 시간 세그먼트에서 반복적으로 일어난다.

[0007] 시간적으로 달라지는 선택 경사들(즉, 매칭 경사 펄스들)이 RF 방사 동안 RF 펄스의 2개의 선택적 방향을 따라 전환된다는 점에서 2차원 선택 RF 펄스 또는 펄스 배열이 실현된다. 이들 선택 경사는 전송 k-공간에서의 궤적을 설명하는데, 이는 다음에서 "전송 k-공간 궤적" 또는 그냥 "궤적"이라고 지정된다. 이러한 전송 k-공간 궤적은 어떠한 k-공간 영역들에 RF 에너지가 여기를 위해 축적(deposit)되어야 하는지를 결정한다. RF 펄스의 B_1 자장의 위상 및 포락선(envelope)(진폭)이 시간의 함수로서 선택되어 전송 k-공간을 통해 선택된 궤적을 일치시킨다는 점에서, 정밀하게 규정된 공간 선택 볼륨("여기 프로파일"이라고도 지정됨)은 영상 공간(즉, 지리적 공간)에 실현될 수 있다.

[0008] 실제로, ("에코 평면 영상화(echoplanar imaging)"를 위한 EPI라고 간략화된 에코 평면 기법에서의 판독 경사에 대응하는) EPI 궤적들 및 (마찬가지로 판독 경사로부터 알려진) 나선형 궤적들만이 사용된다. EPI 궤적들은 내부 볼륨 영상화에 사용되는 것이 바람직하고, 나선형 궤적들은 소위 펜슬 빔 여기들에 주로 사용된다.

[0009] 다차원 RF 펄스들의 실현에서의 공지된 실제 문제는 소위 경사 지연 시간들이다. 이들 지연 시간은 의도된 경사 형상과 실제 적용된 경사 자장 사이의 시간 편차를 초래한다. 그러나, 동시에 방사되고 시간적으로 달라지는 RF 펄스 형상은 그에 따라 경사 자장에 일치되지 않고, 이는 원하는 여기 볼륨으로부터의 왜곡 및 편차를 초래한다. 이들 지연 시간의 원인은 와전류(eddy current)에 의해 유도된 경사 코일 시스템 및 추가적인 경사 자장의 시스템 결함이다. 적어도 2개의 포함된 경사 코일을 위한 지연 시간들은 보통 상이하다. 더 상세한 설명은 저널 기사 『"On spatially selective RF excitation and its analogy with spiral MR image acquisition", by Peter Bornert and Bernd Aldefeld, MAGMA 7 (1998), P.166-178』에 공지되어 있다.

[0010] 1차원 선택 RF 펄스를 감안하면, 선택 경사는 보통 일정하다. 지연 시간으로 인한 B_1 펄스 형상과 실제 적용 경사 자장 사이의 편차는 그에 따라 방사의 시작 부분 또는 마지막 부분에서만 일어난다. 축적된 RF 에너지가 이들 시간 간격에서 보통 낮기 때문에, 경사 지연 시간들은 "다루기 쉽게(docile)" 거동하여 선택 프로파일에 대해 약간의 영향만을 미친다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0011] 본 발명의 목적은 회전 대칭적인 여기 프로파일의 2차원 선택적인 여기에서의 경사 지연 시간들로 인한 전술한 문제들이 회피되거나 적어도 감소될 수 있는 전술한 타입의 자기 공명 제어 시퀀스를 결정하는 방법 및 대응 제어 시퀀스 결정 디바이스를 특정하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0012] 이러한 목적은 특히 청구항 1에 따른 방법 및 특히 청구항 13에 따른 제어 시퀀스 결정 디바이스를 통해 달성된다.

다.

[0013] 전술한 바와 같이, 본 발명에 따른 방법에서, 검사 대상 내의 제한적인 회전 대칭적인 여기 프로파일("여기 볼륨"이라고도 지정됨)을 여기하기 위해, 자기 공명 제어 시퀀스가 (서로 수직하게 위치하는 것이 유리한) 적어도 2개의 공간 방향으로 선택적으로 활동하는 펄스 배열을 이용하여 결정된다. 이러한 펄스 배열은 다수의 일련의 별도의(즉, 시간에 있어서 서로 이격 배치된) 부분 RF 펄스들 포함하는 2차원 선택 RF 여기 펄스를 갖는다. 일련의 부분 RF 펄스들과 평행하게, 원하는 선택 효과를 달성하기 위해, 전송 k-공간에서 고려되는 바와 같이, 펄스 배열은 상이한 부분 RF 펄스들의 RF 에너지 도입(즉, RF 에너지의 축적)이 서로 동심인 원형 k-공간 전송 궤적들에서 일어나도록 2개의 공간 방향으로 연동하여 위치하는 경사 펄스들을 포함한다. 이는 별도의 원형의 전송 궤적(이하 "고리형 궤적"이라고도 지칭됨)이 개별 부분 RF 펄스들과 각각 관련되어 있고, 경사들의 공간적 방향들과 관련된 k-공간 방향들에 의해 범위가 정해지는(spanned) 평면에 이들 고리형 궤적들이 서로 동심적으로 놓여 있다는 것을 의미한다. (진폭 변조된) 부분 RF 펄스들의 포락선(이하 b_1 진폭이라고도 지정됨) 포락선의 진폭은 (즉, 부분 RF 펄스의 RF 방사의 지속 시간(T) 동안) 관련된 고리형 궤적의 전달(pass)의 지속시간 동안 각각 일정하다.

[0014] 이러한 궤적 형상을 이루기 위해, 시간 간격(T) 동안 주기(T)를 가지고 사인파로 발진하는 진폭을 갖고, 여기 볼륨의 대칭 축에 수직한 방향을 갖는 제1 부분 경사 펄스(또는 제1 경사 자장) 및 그와 동시에 그 동안 주기(T)를 가지고 코사인파로 발진하는 진폭을 갖고, 대칭 축에 수직하고, 제1 경사 자장의 방향에 수직한 방향을 갖는 제2 부분 경사 펄스(또는 제2 경사 자장)는 시간 간격(T) 동안, 즉 전송 궤적의 개별 궤도에서의 공전 시간 또는 부분 RF 펄스의 전송 시간 동안 정적이고 적어도 대략적으로 균일한 B_0 자장에 각각 중첩될 수 있다.

[0015] 근본적으로, 이러한 부분 RF 펄스들은 미국 특허 제US4,812,760호에 설명된 공간 선택 반전 또는 리포커싱 펄스("π 펄스")와 유사하게 구성되는데, 직사각형 포락선 및 제1 경사 방향에 따른 사인파 경사 곡선뿐 아니라 제2 경사 방향에 따른 코사인파 경사 곡선을 갖는다. 그러나, 충분한 공간 로컬화는 이러한 "π 펄스"를 이용하여 달성되지 않는다. 원하는 원통 대칭적 여기 프로파일은 서로 동심인 고리형 궤적들 상에 다수의(즉, 적어도 2개지만 특히 바람직하게는 더 많은) 부분 RF 펄스들로 구성된 공간 선택적 RF 펄스의 본 발명에 따른 구성을 통해서만 선택적으로 여기될 수 있다.

[0016] 본 발명에 따르면, 복수의 동심 고리형 궤적들이 EPI 궤적 또는 나선형 궤적 대신에 선택적인 여기를 위해 선택되고, (후술되는 바와 같이) B_1 진폭은 개별적인 고리형 궤적의 전달 동안 일정할 수 있다는 점에서, (시간적으로 달라지는 B_1 진폭을 감안하여 일정한 경사 진폭을 갖는) 1차원 선택 RF 펄스들을 감안하는 바와 유사하게 경사 지연 시간들의 존재에도 불구하고, 선택 프로파일의 비범한 강건성이 달성된다.

[0017] 이 경우, 펄스 배열이 복수의 추가적인 RF 펄스 및 경사 펄스를 가질 수 있다는 점에 유의하며, 여기서 이들 펄스는 선택적으로 여기한 펄스들일 수 있다. 따라서, 동심 고리형 궤적들에 모든 부분 펄스들이 반드시 있어야 하는 것은 아니다. 예를 들어, 공간 선택적으로 활동하는 펄스열(pulse series)은 나선형 궤적들에 있는 RF 펄스들을 추가적으로 가질 수 있다. 특히, 예를 들어, k-공간의 외부 영역이 (고속) 나선형 궤적을 사용하여 여기되고, k-공간의 내부 영역이 본 발명에 따른 (더 정밀한) 동심 고리형 궤적을 사용하여 여기된다.

[0018] 이러한 자기 공명 제어 시퀀스의 결정을 위해 본 발명에 따른 제어 시퀀스 결정 디바이스는 검사 대상 내에 여기될 제한되고 회전 대칭적인 여기 프로파일의 공간 규모(spatial extent)를 규정하는 여기 프로파일 데이터를 수신하는데 적어도 하나의 입력 인터페이스 배열을 요구한다. 예를 들어, 이러한 여기 프로파일 데이터는 회전 대칭적인 여기 프로파일의 위치 데이터, 예를 들어 여기될 볼륨의 직경뿐 아니라 회전축의 위치 또는 자세(attitude)일 수 있다. 예를 들어, 입력 인터페이스 배열은 예를 들어, 이러한 위치 데이터를 수동으로 입력하기 위한 사용자 인터페이스를 포함할 수 있고, 특히 검사 대상의 도시된 영상 데이터에서의 원하는 여기 프로파일을 지시하기 위해(또는 다른 방식으로 마킹하기 위해) 그래픽 사용자 인터페이스를 포함할 수 있다. 대안적으로 또는 추가적으로, 검사 대상(예를 들어, 내비게이터 애플리케이션)에 적절한 여기 프로파일 데이터를 자동으로 생성하거나 대응 디바이스 또는 메모리로부터 이들을 검색하기 위해 입력 인터페이스 배열은 디바이스를 가질 수 있다.

[0019] 더구나, 본 발명에 따르면, 제어 시퀀스 결정 디바이스는 정밀하게 규정되고 제한된 방식으로 (입력 인터페이스 배열을 이용하여 미리 정해진) 여기 프로파일을 여기시키기 위해 적어도 2개의 공간 방향으로 선택적으로 활동하는 적어도 하나의 펄스 배열을 결정하기 위해 펄스 배열 결정 유닛을 요구한다. 이러한 펄스 배열 결정 유닛은 다수의 부분 RF 펄스의 시퀀스를 포함하도록 펄스 배열의 RF 여기 펄스를 결정하도록 설계되고, 전송 k-공간

에서의 상이한 부분 RF 펄스들의 RF 에너지 도입이 서로 동심적인 원형 k-공간 전송 궤적들(고리형 궤적들)에서 각각 일어나도록 - 부분 RF 펄스의 시퀀스와 병렬로 - 조화된 경사 펄스들(coordinated gradient pulses)이 2 개의 공간 방향에 배치되고, 부분 RF 펄스들의 포락선의 진폭은 고리형 궤적의 전달의 지속 시간 동안 각각 일정하다.

[0020] 더구나, 제어 시퀀스 결정 디바이스는 자기 공명 단층촬영 시스템의 다른 제어 유닛들에 이 시퀀스를 전달하기 위해 적절한 제어 시퀀스 출력 인터페이스를 가져야 한다. 예를 들어, 제어 시퀀스 출력 인터페이스는 측정을 직접 제어하기 위해 자기 공명 제어기에 시퀀스를 송신하는 인터페이스일 수 있고, 또한 네트워크를 통해 데이터를 전송하고/거나 차후 사용을 위해 메모리에 저장하는 인터페이스일 수 있다.

[0021] RF 펄스들을 방출하기 위한 고주파 전송 디바이스뿐 아니라, 본 발명에 따른 자기 공명 시스템은 필요한 경사들을 전환시키기 위한 경사 시스템 및 미리 결정된 자기 공명 제어 시퀀스에 기반하여 원하는 측정을 구현하기 위해 고주파 펄스열(pulse train)(즉, RF 펄스들)을 방출하고, 이와 함께 경사 시스템을 통해 경사 펄스열(즉, 관련 경사 펄스들)을 방출하기 위해 설계된 제어 디바이스를 갖는다. 더구나, 자기 공명 시스템은 본 발명에 따른 방식으로 제어 시퀀스를 결정하고 이것을 제어 디바이스로 전달하기 위해 전술한 제어 시퀀스 결정 디바이스를 갖는다.

[0022] 전술한 방법에 따른 자기 공명 시스템의 동작을 위한 본 발명에 따른 방법에서, 제어 시퀀스가 그에 따라 결정되고, 그 다음에 자기 공명 시스템은 제어 시퀀스를 사용하여 동작된다.

[0023] 테스트 측정을 사용하여 후에 사용되는 바와 같이, 본 발명에 따른 제어 방법들은 또한 경사 지연 시간에 관해 자기 공명 시스템의 조정 및/또는 교정을 위한 방법 내에 유리하게 사용될 수 있다. 예를 들어, 이를 위해, 자기 공명 시스템은 경사 지연 시간들의 인위적인 변화 하에서, 즉 상이한 조정된 경사 지연 시간들을 갖는 모든 단일 측정을 감안하여, 본 발명에 따른 방법을 이용하여 반복적으로 제어(즉, 작동)될 수 있다. 그에 의해 자기 공명 영상 데이터(예를 들어, 규정된 여기 프로파일의 간단한 슬라이스 영상들)가 각각 생성되는데, 이들은 검사 대상 또는 조정 및/또는 교정 측정에 제공되는 팬텀(phantom) 등에서 매우 특정한 지점에 있어야 한다. 동일한 여기 프로파일은 이를 반복된 측정에서 항상 다시 선택적으로 여기되는 것이 바람직하다. 경사 지연 시간들에 대해 자기 공명 시스템의 원하는 조정 또는 교정은 이를 자기 공명 영상 데이터의 분석에 기반하여 일어날 수 있다. 이러한 분석은 예를 들어, 조작자가 상이한 획득 사이에 경사 지연 시간들을 다시 변형시키고, 여기 프로파일이 원하는 지점에 위치하는지 여부를 영상 데이터에서 시각적으로 확인한다는 점에서 특히 조작자에 의해 시각적으로 수행될 수 있다. 이를 조정 및/또는 교정 측정들은 측정된 여기 프로파일이 원하는 위치에 정밀하게 위치할 때까지 경사 지연 시간을 변화시키면서 반복되고, 이로써 시스템 고유의(초기에 알려지지 않은) 지연 시간은 정확하게 보상된다. 예를 들어, 이렇게 결정된 지연 시간들은 프로토콜화되어(protocolled) 추가 측정에서 고려될 수 있다.

[0024] 제어 시퀀스 결정 디바이스의 중요 부분들은 소프트웨어 컴포넌트 형태로 형성될 수 있다. 특히, 이는 펄스 배열 결정 유닛에 적용된다. 마찬가지로, 인용된 인터페이스들은 소프트웨어의 형태로 적어도 부분적으로 형성되어 가능하게는 기존의 컴퓨터의 하드웨어 인터페이스들에 액세스할 수 있다. 본 발명은 또한 프로그램이 제어 시퀀스 결정 디바이스에서 실행되는 경우 본 발명에 따른 방법의 모든 단계를 실행하기 위해 프로그램 코드 세그먼트를 이용하여, 제어 시퀀스 결정 디바이스의 메모리에 직접 로딩될 수 있는 컴퓨터 프로그램 또는 컴퓨터 프로그램 제품을 포함할 수 있다. 소프트웨어에서의 이러한 구현은 제어 시퀀스들을 결정하는데 사용되는 이전의 디바이스들이 본 발명에 따른 방식으로 최적화된 제어 시퀀스들을 결정하기 위해 프로그램의 구현을 통해 적절히 변형될 수 있다는 이점을 갖는다.

[0025] 다음의 상세한 설명뿐 아니라 종속 청구항들은 특히 본 발명의 유리한 개발(development) 및 실시예들을 포함하는데, 여기서 하나의 카테고리의 청구항들은 특히 다른 청구항 카테고리의 종속 청구항들과 유사하게 개발되고, 상이한 예시적인 실시예들의 특징들은 추가의 예시적인 실시예를 형성하기 위해 결합될 수 있다.

[0026] 개별적인 고리형 궤적들에 대한 부분 RF 펄스들의 정밀한 실시예를 위한 다양한 가능성성이 존재한다. 하나의 가능한 파라미터는 고리형 궤적을 횡단(traverse)하기 위해 요구되는 지속시간이다.

[0027] 제1 변형예에서, 원형 고리형 궤적의 횡단의 지속시간이 원형 고리형 궤적을 따라 활동하는 RF 여기 펄스의 (모든 부분 RF 펄스들에 대한 극단적인 경우의) 상이한 부분 RF 펄스 중 적어도 2개에 대해 동일한 길이라는 점이 보장된다. 이는 가장 간단한 가능성이다. 이러한 절차는 2차원 나선 펄스를 감안하면(즉, k-공간에서 나선 형상의 궤적을 따르는 RF 펄스의 방출을 감안하면) 일정한 각속도와 유사하다.

- [0028] 대안적인 변형예에서, 부분 RF 펄스들 및 관련 경사 펄스들은 원형 k-공간 궤적의 횡단의 지속시간이 적어도 2개의 상이한 부분 RF 펄스에 대해 각각 개별적으로 결정되도록 설계되는데, 이는 상이한 부분 RF 펄스들이 특히 상이한 길이를 갖는다는 것을 의미한다. 실행 시간의 개별화(individualization)를 통해, RF 여기 펄스의 총 지속시간이 최소화될 수 있는 한도에서 시퀀스의 최적화가 가능하고, 그럼에도 불구하고, 경계 조건들, 예를 들어 경사 펄스들의 최대 허용가능 슬루율(slew rate) 및/또는 최대 허용가능 경사 진폭은 안전하게 컴파일될 수 있다.
- [0029] 이를 달성하기 위해, 부분 RF 펄스들 각각의 원형 k-공간 궤적의 횡단의 지속시간은 너무 짧아서 경사 펄스들이 미리 결정된 최대 슬루율을 (직접) 초과하지 않도록 선택되는 것이 바람직할 수 있다. 이는 일정한 경사 슬루율을 갖는 나선 형상 여기와 거의 유사하다.
- [0030] 상이한 부분 RF 펄스들의 펄스 지속시간이 동일한 길이를 갖는지 개별적으로 설정되는지에 독립적으로, 부분 RF 펄스의 포락선의 개개의 진폭(즉, b_1 진폭), 즉 원형의 전송 궤적의 횡단의 지속 시간 동안 일정하게 유지되는 진폭은 개별적으로 구축되는 것이 유리하며, 이는 부분 RF 펄스들이 특히 상이한 b_1 진폭을 가질 수 있다는 것을 의미한다.
- [0031] 특히 고속 RF 여기 펄스를 달성하기 위해, 즉 모든 동심 고리형 궤적들의 총 횡단 시간을 가능한 짧게 유지하기 위해, 경사 펄스들은 인접하고, 동심원 형태의 원형 k-공간 전송 궤적들이 2개의 시간적으로 인접한 부분 RF 펄스들이 전송 k-공간에서 반대 방향으로 횡단되도록 설계되는 것이 바람직할 수 있다. 이는 예를 들어, 제1 고리형 궤적이 시계 방향으로 횡단되고 나서, 바로 인접한 고리형 궤적이 반시계 방향으로 횡단되고, 그 다음의 다음 고리형 궤적은 다시 시계 방향으로 횡단되도록 보장되는 것을 의미한다. 후술되는 바와 같이, 이러한 변형예에서 특히 더 큰 시간량은 개별적인 부분 RF 펄스들의 전후에 프리페이징 경사들(prepaging gradients) 및 리페이징 경사들(rephasing gradients)을 조합함으로써 절감될 수 있다.
- [0032] 동심 고리형 궤적을 갖는 RF 여기 펄스의 정밀한 설계에 적절한 추가 파라미터는 고리형 궤적들 간의 간격이다.
- [0033] 제1 변형예에서, 경사 펄스들은 원형 k-공간 전송 궤적들이 공통 중심에 대해 전송 k-공간에서 등거리 고리들을 형성하도록 설계된다. 이 변형예에서, 2개의 고리형 궤적 사이의 방사상 간격들은 항상 같다. k-공간으로의 에너지의 특히 균일한 도입은 이를 이용하여 달성된다.
- [0034] 대안적인 변형예에서, 경사 펄스들은 동심 원형 k-공간 전송 궤적들이 서로에 대한 방사상 간격이 상이한 고리들을 형성하도록 설계된다. 특히 바람직한 변형예에서, 서로에 대해 방사상 간격이 공통 중심을 향하는 방향으로 더 작아지는 고리들을 형성한다. k-공간 중심을 향해 더 조밀한 고리형 궤적 간격을 통해, 특히 여기 프로파일에 대해 주요한 정보를 갖는 중요한 주파수 범위에서 충분한 에너지가 축적되는 것이 보장될 수 있다. 서로에 대한 고리형 궤적들의 간격이 더 작다는 점에서, 이에 요구되는 시간은 k-공간의 덜 중요한 에지 영역들에서 절감될 수 있다.
- [0035] 추가적인 조정 가능 파라미터는 RF 여기 펄스의 고리형 궤적들의 개수이다. 한편, 충분한 밀도를 갖는 공간의 여기를 달성하기 위해 상대적으로 밀집하여 고리형 궤적을 위치하는 것이 유리하다. 한편, 고리형 궤적들의 개수가 증가함에 따라 RF 여기 펄스를 위한 총 시간은 불가피하게 증가한다.
- [0036] 이를 위해, 동심 원형 k-공간 전송 궤적의 개수가 여기 프로파일의 직경에 대한 제1 측면 여기의 간격의 비에 따라 선택되는 경우, 특히 유리하다. 제1 측면 여기의 영역에서의 여기가 더 이상 원하지 않고, 이로써 여기 프로파일의 대칭 축으로부터의 측면 여기의 간격 및 (원통 대칭) 여기 프로파일의 직경은 여기를 위한 결정적 파라미터이기 때문에, 제1 측면 여기의 간격의 값의 두 배를 여기 프로파일의 직경으로 나눈 값에 대응하는 고리형 궤적들의 개수를 선택하기에 충분하다는 것이 판명되었다. 이로써 서로에 대한 고리형 궤적들의 간격이 나이퀴스트 이론(Nyquist theorem)에 따른 샘플링을 고려한 적어도 최소 간격에 대응한다는 점이 보장된다.
- [0037] 추가적인 파라미터는 여기 프로파일 내의 여기를 감안하면 달성될 목표 플립 각도(목표 여기 각도) 또는 목표 플립 각도 분포이다.
- [0038] 제1 변형예에서, 부분 RF 펄스들의 포락선의 진폭은 원통형 여기 프로파일 내의 목표 플립 각도가 원통형 여기 프로파일의 원통 축으로부터 방사상 간격(r)에 의존하도록 결정된다. 이는 목표 플립 각도가 내부로부터 외부로 감소한다는 것을 의미한다. 이로써, 방사상 간격에 대한 의존성은 가우시안(Gaussian)인 것이 특히 바람직하다.

- [0039] 대안적인 방법에서, 부분 RF 펄스들의 포락선의 진폭은 원통형 여기 프로파일 내의 목표 플립 각도가 본질적으로 일정하도록, 즉 가능한 허용오차(tolerance) 내에 있도록 결정된다. 이러한 변형예에서, 목표 플립 각도 분포는 따라서 여기 프로파일에 걸쳐서 최적으로 균일하다.
- [0040] 게다가, 다만, 다른 분포들 또한 가능한데, 예를 들어 내부 영역에서 거의 일정하거나 균일한 여기 및 이 균일한 영역의 외부에서의 하락(특히 가우시안)이다.
- [0041] 이 점에서, (고리형 궤적 내의 실행 시간, 고리형 궤적들의 간격, B_1 진폭 또는 플립 각도 분포와 같은) 개별 파라미터들에 대한 전술한 상이한 변형예가 임의로 결합될 수 있다는 점에 다시 명확히 유의한다.
- [0042] 본 발명은 첨부 도면을 참조하여 예시적인 실시예들을 사용하여 이하 상세히 설명된다.

도면의 간단한 설명

- [0043] 도 1은 본 발명에 따른 자기 공명 시스템의 예시적인 실시예의 개략도이다.
- 도 2는 본 발명의 제1 예시적인 실시예에 따른 k-공간의 x/y 평면에서의 등거리 동심 고리형 궤적들의 개략도이다.
- 도 3은 위치 공간의 팬텀(phantom) 내의 제1 측면 여기 및 원통 대칭 여기 프로파일의 자기 공명 슬라이스 영상이다.
- 도 4는 개별적인 부분 RF 펄스들의 설계의 설명을 위한 펄스도의 간략도이다.
- 도 5는 궤적들의 밀도를 설명하기 위해 k-공간의 x/y 평면의 1번째 사분면에서 등거리 동심 고리형 궤적들의 개략적인 확대도이다.
- 도 6은 본 발명에 따른 방법의 제1 예시적인 실시예에 따른 RF 여기 펄스의 펄스도의 간략도이다.
- 도 7은 본 발명에 따른 방법의 제2 예시적인 실시예에 따른 RF 여기 펄스의 펄스도의 간략도이다.
- 도 8은 본 발명에 따른 방법의 제3 예시적인 실시예에 따른 RF 여기 펄스의 펄스도의 간략도이다.
- 도 9는 도 8에 따른 펄스도의 일부의 확대도이다.
- 도 10은 본 발명의 제2 예시적인 실시예에 따른 k-공간의 x/y 평면에서의 동심 고리형 궤적들의 개략도이다.
- 도 11은 본 발명의 제3 예시적인 실시예에 따른 k-공간의 x/y 평면에서의 외부 영역의 나선형 궤적 및 내부 영역의 동심 고리형 궤적을 갖는 궤적의 개략도이다.
- 도 12 내지 도 14는, 각각 상부의 EPI 여기에 의한 것과 하부의 본 발명에 따른 방법의 변형예에 의한 것의 비교를 위한 상이한 경사 지연 시간이 주어진 상이한 여기 프로파일들의 여기들의 상이한 슬라이스 영상 노출들이다.
- 도 15는 자기 공명 시스템을 교정하는 가능한 방법을 위한 조절 및/또는 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0044] 본 발명에 따른 자기 공명 시스템(1)이 도 1에 개략적으로 도시되어 있다. 한편, 자기 공명 시스템(1)은 그 안에 검사 공간(8) 또는 환자 터널(patient tunnel)이 위치한 실제 자기 공명 스캐너(2)를 포함한다. 침상(7)은 이러한 환자 터널(8) 안으로 구동되어 상기 침상(7) 위에 누운 환자(0) 또는 시험 대상이 검사 중에 (내부에 배열된 마그넷 시스템 및 고주파 시스템에 비해) 자기 공명 스캐너(2) 내의 규정된 위치에서 지탱될 수 있거나, 또는 상기 침상(7) 위의 환자(0) 또는 시험 대상은 측정 중에 상이한 위치 사이에서 이동될 수 있다.
- [0045] 여기에서 자기 공명 스캐너(2)의 구성요소들 사이에 기본 자장 자석(3), x 방향, y 방향, z 방향으로 자기장 경사를 생성하기 위한 자기장 경사 코일들을 구비한 경사 시스템(4), 및 전신 고주파 코일(5)을 포함한다. x 방향, y 방향, z 방향의 자기장 경사 코일들은 서로 독립적으로 제어 가능하며, 이로써 미리 결정된 조합을 통해, 공간 좌표 시스템의 축들에 평행하게 반드시 위치할 필요가 없는 임의의 논리 공간 방향들(예를 들어, 슬라이스 선택 방향, 위상 코딩 방향, 또는 판독 방향)로 경사들이 적용될 수 있다. 검사 대상(0)에서 유도된 자기 공명 신호들의 획득은 자기 공명 신호들의 유도를 위한 고주파 신호들이 정상 방출되고 있는 전신 코일(5)을 통해 일어날 수 있다. 그러나 이들 신호는 통상적으로 로컬 코일 배열(6)을 이용하여 수신되는데, 예를 들어 로컬 코

일들(여기에는 단 하나의 로컬 코일이 도시됨)은 환자(0) 위 또는 아래에 배치된다. 이들 컴포넌트 전부는 원칙적으로 당업자에게 알려져 있으며, 이에 따라 도 1에는 대략적으로만 도시된다.

[0046] 자기 공명 스캐너(2)의 컴포넌트들은 제어 디바이스(10)로부터 제어될 수 있다. 이는 (적절한 케이블 등을 통해 서로 공간적으로 분리 및 연결되는 것이 가능한) 복수의 개별 컴퓨터를 포함할 수도 있는 제어 컴퓨터일 수 있다. 이 제어 디바이스(10)는 단말기 인터페이스(17)를 통해 단말기(20)와 연결되는데, 이를 통해 조작자는 전체 시스템(1)을 제어할 수 있다. 본 케이스에서, 이러한 단말기(20)는 키보드, 하나 이상의 모니터, 및 추가적인 입력 디바이스(예를 들어, 마우스 등)가 있는 컴퓨터(21)를 갖거나, 그래픽 사용자 인터페이스가 조작자에게 제공되도록 하는 이러한 컴퓨터(21)로서 설계된다.

[0047] 특히, 제어 디바이스(10)는 다수의 서브 컴포넌트를 포함할 수 있는 경사 제어 유닛(gradient control unit; 11)을 갖는다. 개별 경사 코일들에는 이러한 경사 제어 유닛(11)을 통해 경사 펄스 시퀀스(GS)에 따라 제어 신호들이 공급될 수 있다. 전술한 바와 같이, 이들은 정확하게 제공된 시간적 위치에서, 측정 중에 정확하게 미리 정해진 시간 곡선을 이용하여 설정되는 경사 펄스들이다.

[0048] 더구나, 제어 디바이스(10)는 제어 시퀀스(AS)의 미리 결정된 고주파 펄스 시퀀스(RFS)에 따라 전신 고주파 코일(5)로 개별 고주파 펄스들을 공급하기 위해 고주파 전송 유닛(12)을 갖는다. 고주파 펄스 시퀀스(RFS)는 전술한 선택 여기 펄스들을 포함한다. 그 다음, 자기 공명 신호들의 수신은 로컬 코일 배열(6)을 이용하여 일어나고, 이에 의해 획득된 원시 데이터(RD)는 RF 수신 유닛(13)에 의해 판독 및 처리된다. 디지털 형태의 자기 공명 신호들은 원시 데이터(RD)로서 재구성 유닛(14)으로 전달되는데, 재구성 유닛(14)은 이들로부터 영상 데이터(BD)를 재구성하여 메모리(16)에 저장하고/거나, 조작자가 이것들을 볼 수 있도록 인터페이스(17)를 통해 단말기(20)로 전달한다. 영상 데이터(BD)는 저장 및/또는 디스플레이될 수 있고, 네트워크(NW)를 통해 다른 위치에서 평가될 수 있다. 대안적으로, 고주파 펄스 시퀀스가 로컬 코일 배열을 통해 방출되고/되거나, 자기 공명 신호들이 전신 고주파 코일(미도시)에 의해 수신될 수 있다.

[0049] 추가 인터페이스(18)를 통해, 제어 명령들이 자기 공명 스캐너(2)의 다른 컴포넌트(예를 들어, 침상(7) 또는 기본 자장 자석(3))에 송신되거나, 측정 값을 또는 다른 정보가 수신된다.

[0050] 경사 제어 유닛(11), RF 전송 유닛(12), 및 RF 수신 유닛(13)은 측정 제어 유닛(15)에 의해 연동하여 각각 제어된다. 대응하는 명령어를 통해, 이는 펄스 시퀀스의 원하는 경사 펄스 시퀀스(GS) 및 고주파 펄스 시퀀스(RFS)가 방출되는 것을 보장한다. 더구나, 로컬 코일 배열(6)의 로컬 코일들에서의 자기 공명 신호들이 시간에 있어서 매칭 포인트에서 RF 수신 유닛(13)에 의해 판독되어 더 처리되는 것이 보장되어야 하며, 이는 예를 들어, RF 수신 유닛(13)의 ADC들이 수신하도록 전환된다는 점에서 판독 윈도우들이 설정되어야 한다는 것을 의미한다. 마찬가지로, 측정 제어 유닛(15)은 인터페이스(18)를 제어한다.

[0051] 그러나, 이러한 자기 공명 측정의 기본 작업 흐름 및 인용된 제어용 컴포넌트들은 당업자에게 알려져 있으며, 이로써 이들은 여기서 더 상세히 설명될 필요가 없다. 더구나, 이러한 자기 공명 스캐너(2) 및 관련된 제어 디바이스(10)는 복수의 추가 컴포넌트를 더 가질 수 있으며, 마찬가지로 여기에 상세히 설명되지 않는다. 이 점에서, 자기 공명 스캐너(2)는 또한 상이하게 (예를 들어, 측면으로 개방된 환자 공간을 이용하여) 설계되거나, 하나의 신체 부위만이 위치할 수 있는 소형 스캐너로서 설계될 수도 있다.

[0052] 측정을 시작하기 위해, 단말기(20)를 통해, 조작자는 상이한 측정을 위한 복수의 제어 프로토콜(P)이 저장되는 메모리(16)로부터 이러한 측정에 제공되는 제어 프로토콜(P)을 통상적으로 선택할 수 있다. 이러한 제어 프로토콜(P)은 특히 개별 측정을 위한 다양한 제어 파라미터 값을(SP)을 포함한다. 이들 제어 파라미터 값을(SP)은 예를 들어, 시퀀스 탑입; 개별 고주파 펄스들을 위한 목표 자화; 에코 시간들(echo times); 반복 시간들(repetition times); 다양한 선택 방향들 등을 포함한다. 슬라이스 두께, 해상도, 슬라이스 개수, 또는 (3D 여기의 경우) 임의적인 여기 프로파일(즉, 여기 프로파일 데이터)의 석판 두께 또는 추가 치수들이 마찬가지로 여기에 제공될 수 있다. 더구나, 제어 파라미터 값을(SP)은 개별 측정이 내비게이터(navigator)를 이용한 측정인지 여부, 만약 그렇다면, 이러한 환경 하에 여기 프로파일(EP)을 위한 여기 프로파일 데이터가 이러한 내비게이터 애플리케이션에 필요한지 여부에 관한 정보를 포함할 수 있다. 도 1에 대체적으로 도시된 적용 분야를 감안하면, 이러한 여기 프로파일(EP)은 환자(0)의 신체에서 z 방향으로 원통 대칭적으로 연장되는 소위 "펜슬 빔(pencil beam)"일 수 있고, 여기서 펜슬 빔은 환자(0)의 진동판(9)을 통해 진행한다.

[0053] 이들 제어 파라미터 값을(SP)의 전부는 매칭 제어 시퀀스(AS)를 결정하도록 (특히) 제어 시퀀스 결정 디바이스(22)의 입력 인터페이스(24)를 통해 제공된다. 마찬가지로, 제어 파라미터 값을(SP)은 이러한 프로토콜의 검색

시에 채택을 위해 조작자에게 초기에 제공될 수 있고, 상기 조작자는 사용자 인터페이스를 이용하여 값들을 임의로 변화시켜 현재의 검사 작업에 맞출 수 있다. 특히, 이로써 조작자는 관련된 그래픽 사용자 인터페이스를 갖는 단말기(20)의 컴퓨터(21)를 통해 여기 프로파일 데이터(예를 들어, 회전 대칭적 여기 프로파일(EP)의 대칭 축의 정확한 위치, 직경 d 등)를 구축하거나, 제어 파라미터 값들(SP)을 통해 프로토콜(P)에 이미 규정된 여기 프로파일 데이터를 수정할 수 있다. 이는 도 1의 인터페이스 배열(23)에 의해 지시된다.

[0054] 더구나, 사용자는 또한 대응 제어 파라미터 값들(SP)을 이용하여 (메모리(16)로부터가 아니라) 예를 들어, 자기 공명 시스템의 제조사로부터 네트워크(NW)를 통해 제어 프로토콜들을 검색할 수 있고, 그 다음에 아래 설명되는 바와 같이 이들을 사용할 수 있다.

[0055] (여기 프로파일 데이터를 포함하는) 제어 파라미터 값들(SP)에 기반하여, 제어 시퀀스(AS)가 결정되고, 이에 따라 측정 제어 유닛(15)을 통한 나머지 컴포넌트들의 제어가 궁극적으로 일어난다. 그 후, 이러한 제어 시퀀스는 (특히) 선택된 여기 프로파일(EP)을 선택적으로 여기하기 위해 펠스 배열을 포함한다. 전술한 바와 같이, 제어 시퀀스(AS)는 단말기(20)의 일부로서 설명된 제어 시퀀스 결정 디바이스(22)에서 계산되고, 제어 시퀀스 출력 인터페이스(25)를 통해 자기 공명 스캐너(2)의 제어 디바이스(10)에 전달된다. 특히(추가 컴포넌트들이 명확성을 위해 도 1에 도시되지 않음), 제어 시퀀스 결정 디바이스(22)는 여기 프로파일(EP)의 선택적 여기를 위해 전술한 펠스 배열을 결정하는 펠스 배열 결정 유닛(26)을 포함한다. 예를 들어, 전체 제어 시퀀스 결정 디바이스(22) 및 그 컴포넌트들은 하나 이상의 적절한 프로세서 상의 소프트웨어 형태로 실현될 수 있다. 제어 시퀀스 결정 디바이스(22) 및 그 개별 컴포넌트들의 정확한 기능은 다음에 더 설명되고, 여기에서 전술된 펜슬 빔 여기는 단순히 일례로서 본 발명을 이것으로 제한하지 않는다.

[0056] 이러한 평면에서의 여기 프로파일뿐 아니라 원통 대칭 여기 프로파일(EP)의 위치 공간에서의 대칭 축(s)에 수직 하도록 위치한 x/y 평면을 여기하도록 2차원 RF 펠스를 설계하기 위해, 2차원 k-공간 전송 궤적은 (이하 (k_x, k_y))라고도 약칭되는 k-공간에서의 시간 종속 좌표($k_x(t), k_y(t)$)에 의해) k-공간에서의 관련 x/y 평면 내에서 일 반적으로 초기에 선택되어야 한다. 이로써, 여기 프로파일은 좌표 값들(x 및 y)을 갖는 위치에서의 함수($P(x, y)$)에 의해 결정된다. 함수($P(x, y)$)는 정상 상태 자화의 크기에 대한 횡단 자화(transversal magnetization)의 원하는 크기를 표시하며, 이로써 단위가 없다. 이러한 궤적의 k-공간 커버리지(규모)는 원하는 선택 프로파일이 실현될 수 있는 공간 해상도를 결정한다. k-공간에서의 궤적의 샘플링 밀도는 위치 공간에서의 여기의 제1 측면 밴드(lateral band)의 간격을 결정하는데, 이는 시야(FOV)라고도 지칭된다. 이러한 측면 밴드는 이산 샘플링(discrete sampling)으로 인해 회피할 수 없다.

[0057] 선택된 k-공간 궤적(k_x, k_y)을 이용하면, 고주파 방사 중에 2차원 경사 자장($g_x(t), g_y(t)$)은 다음을 통해 링크 된다.

수학식 1

$$(k_x(t), k_y(t)) = -\frac{\gamma}{2\pi} \int_t^T (g_x(\tau), g_y(\tau)) d\tau$$

[0058]

[0059] 또는

수학식 2

$$(g_x(t), g_y(t)) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{dk_x(t)}{dt}, \frac{dk_y(t)}{dt} \right)$$

[0060]

[0061] 이로써 수학식(1)에서의 음의 부호는 RF 펠스의 마지막($t = T$)에서 적분을 시작하는 컨벤션(convention)의 결과이다. 이로써 시간(t)은 RF 펠스의 마지막까지 남은 시간을 지시한다.

[0062] RF 펠스의 관련 펠스 형상($b_l(t)$)($b_l(t)$ 는 시간 종속 진폭임)은 원하는 여기 프로파일($P(x, y)$)에 의해 원하는

공간 여기 프로파일($P(x, y)$)의 가중 2차원 푸리에 변환(weighted two-dimensional Fourier transformation)을 통한 결과이다.

수학식 3

$$[0063] b_1(t) \propto \frac{|(g_x(t), g_y(t))|}{\rho(k_x(t), k_y(t))} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) e^{2\pi i (k_x x + k_y y)} dx dy$$

[0064] 이 수학식은 (예각 여기)(small angle excitation)의 한계에서) 블로흐(Bloch) 방정식으로부터 유도될 수 있는데, 예를 들어, 『J. Pauly et al. "A k-Space Analysis of Small-Tip-Angle Excitation", in Journal of Magn. Res. 81, Pages 43 to 56, 1989』 및 『C. J. Hardy et al. "Correcting for Nonuniform k-Space Sampling in Two-Dimensional NMR Selective Excitation", in Journal of Magn. Res. 87, Pages 639 to 645, 1990』를 참조한다.

[0065] 수학식(3)에서, 제1 가중 인자(weighting factor)는 k-공간에서의 횡단 속도로서, 다음과 같다.

수학식 4

$$[0066] |(g_x(t), g_y(t))| = \sqrt{g_x^2(t) + g_y^2(t)}$$

[0067] 제2 인자는 k-공간의 위치(k_x, k_y)에서 k-공간 샘플링의 밀도를 다음과 같이 가중한다.

수학식 5

$$[0068] \rho(k_x, k_y) = \frac{\Delta l(k_x, k_y)}{\Delta A(k_x, k_y)}$$

[0069] 수학식(5)에서, $\Delta A(k_x, k_y)$ 는 k-공간 지점(k_x, k_y)의 환경에서 k-공간의 작은 영역이고, $\Delta l(k_x, k_y)$ 는 영역에 의해 둘러싸인 궤적의 길이이다. 수학식(4) 및 수학식(5)에 따른 인자들은 RF 진폭이 감소될 수 있다고 명확히 지시하며, 여기서 k-공간은 느리게 또는 고밀도로 스캔되는데, 그 반대일 수 있다.

[0070] 본 발명에 따른 방법에 따르면, 적어도 2개의 동심 고리형 궤적을 갖는 k-공간 궤적이 여기 프로파일의 선택적 여기를 위해 선택되어야 한다. k-공간(S_k)의 중심점에 대해 점 대칭적으로(point-symmetrically) 서로에 대해 등거리 방사상 거리(Δkr)에서 개별적으로 진행하는 총 8개의 동심 고리형 궤적(TR_1, TR_2, \dots, TR_8)을 갖는 이러한 k-공간 궤적은 도 2에서 일례로서 도시된다.

[0071] 2개의 선택 경사들(즉, 선택적 RF 펄스 중에 방출되어 선택을 위해 서빙하는(serving) 경사 펄스들)이 RF 방사 중에 사인 함수 또는 코사인 함수에 의해 변조된다는 점에서 동심 고리형 궤적이 실현 가능하다.

수학식 6

$$[0072] g_{x,n}(t) = A_n \sin\left(2\pi \frac{t}{T_n}\right)$$

$$g_{y,n}(t) = A_n \cos\left(2\pi \frac{t}{T_n}\right)$$

[0073] 여기서 n 은 1과 N 사이의 값을 가정하는 여기 인덱스(또는 고리형 궤적의 인덱스)이고, 여기서 N 은 선택된 궤적의 고리들의 개수이다(도 2에 따른 예시에서는 $N=8$ 이 적용됨). A_n 은 n 번째 여기 중에 경사 진폭의 크기이고, T_n 은 n 번째 여기(즉, n 번째 고리에서의 RF 방사)의 지속 시간이다. 하나의 가능한 공통 위상 인자는 수학식들을 가능한 한 단순하게 유지하기 위해 - 보편성을 제한하지 않고 - 수학식(6)에서 생략된다.

[0074] 수학식(3)에서의 제1 가중 인자, 즉 k -공간 횡단 속도는 고리형 궤적의 횡단 중에 일정하다.

[0075] [수학식 4']

$$|(\mathbf{g}_{x,n}(t), \mathbf{g}_{y,n}(t))| = \sqrt{g_{x,n}^2(t) + g_{y,n}^2(t)} = A_n$$

[0076] [0077] 제2 가중 인자, 즉 밀도 보상 인자는 k -공간에서의 인접 고리 사이의 방사상 공간(Δkr)의 역수 값(reciprocal value)을 통해 등거리 고리형 궤적들에 대해 다음과 같이 추정될 수 있다.

[0078] [수학식 5']

$$\rho_n(k_x, k_y) = \frac{\Delta l_n(k_x, k_y)}{\Delta A_n(k_x, k_y)}$$

[0079] [0080] 이는 도 5를 이용하여 더 상세히 설명된다. 밀도 보상 인자는 오직 고리형 궤적에 의한 k -공간의 가변 밀도 할당(variable density allocation), 이로써 고리형 궤적의 등거리가 아닌 간격(non-equidistant spacing)을 고려할 때 중요하다. 특정 고리형 궤적들의 경우, 2개의 최근접 이웃 고리들로부터 평균 방사상 간격으로 인해 밀도 보상 인자로서 n ($1 < n < N$)이 사용될 수 있다(예를 들어, 1).

[0081] 본 발명에 따르면, 원하는 여기 프로파일($P(x, y)$)은 회전 대칭이고, 이로써 방사상 간격($r = \sqrt{x^2 + y^2}$)에만 의존하고, 편각 또는 방위각(ϕ_r)에 의존하지 않는데, 이는 $P(x, y) = P(r)$ 가 적용된다는 것을 의미한다.

[0082] 데카르트(Cartesian) 극 좌표들의 수학식(3)에서의 푸리에 변환의 좌표 변환을 통해,

[0083] [수학식 3']

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) e^{2\pi i (k_x(t)x + k_y(t)y)} dx dy =$$

$$\int_{r=0}^{\infty} \int_{\phi_r=-\pi}^{\pi} P(r) e^{2\pi i kr \cos(\phi_r - \phi_i)} r dr d\phi_r =$$

$$\int_{r=0}^{\infty} \int_{\phi_r=-\pi}^{\pi} P(r) \left(\sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m J_m(kr) e^{im(\phi_r - \phi_i)} \right) r dr d\phi_r$$

[0084] [0085] 여기서 Φ_r 는 공간 벡터($(x, y) = (r, \Phi_r)$)의 방위각이고, Φ_k 는 파수 벡터($(k_x, k_y) = (k, \Phi_k)$)의 방위각이고, J_m 은 m 차 베셀(Bessel) 함수이다. 원하는 여기 프로파일이 회전 대칭이라는 전제 하에, 공간 방위각에 대한 적분은 합으로 통합될 수 있고, 0차 항(term)만이 남는다. 따라서 수학식(3')은 다음과 같이 간략화될 수 있다.

수학식 7

$$[0086] b_1(t) \propto 2\pi \frac{|(g_x(t), g_y(t))|}{\rho(k_x(t), k_y(t))} \int_0^{\infty} P(r) J_0(k(t)r) r dr$$

[0087] 파수 벡터($k(t) = k$)의 크기가 궤도(orbit) 상에서 일정하기 때문에, 우변에서의 적분이 규정된 궤도(여기), 및 이로써 단일 고리형 궤적 중에 b_1 전폭에 대해 일정하다는 점이 이러한 설명으로부터 바로 뒤따른다. 전술한 바와 같이, 경사 코일들의 전환 지연들은 그에 따라 더 이상 중요하지 않다.

[0088] 본 발명에 따른 2차원 RF 펄스는 다수의 이러한 부분 펄스들을 갖는 "합성(composite)" RF 펄스로서 구성될 수 있는데, 여기서 각 부분 펄스는 지속기간(T_n)의 일정한 진폭($b_1(n)$)을 갖는 "직사각형 펄스"를 포함하고, 경사들은 방사 지속기간(T_n) 중에 주기(T_n)를 갖는 사인파 또는 코사인파로 발진하여, 이로써 관련된 여기 k -공간에서의 궤도(즉, 관련 n 번째 고리형 궤적)가 획단된다.

[0089] 구체적으로, 고리형 궤적들은 개별 부분 펄스들의 설계 전에 규정된 볼륨 또는 여기 프로파일의 여기를 위해 초기에 더 정확히 구축되어야 한다. 다음으로, (예를 들어, 내비게이터 기법에서 사용될 수 있는) 직경이 d 인 원통형 막대 볼륨은 일례로서 다시 가정된다.

[0090] 사용자에게 적절한 (사용자에 의해 특정된) 파라미터들은 막대의 직경(d) 및 제1 측면 여기 SL(사이드 로브(side lobe))의 간격(S_{SL})이다. 사이드 로브는 k -공간의 이산 샘플로 인해 회피할 수 없다. 사용자는 제1 사이드 로브(SL)의 간격(S_{SL})이 너무 커서 검사 대상의 외부에 놓이고, 어떠한 조직도 이를 이용하여 여기되지 않도록 선택할 것이다. 검사 대상이 성인다면, 통상적인 값들은 전술한 내비게이터 애플리케이션을 고려할 때 여기 직경에 대해 $d \sim 25\text{mm}$ 이고, 제1 사이드 로브의 간격에 대해 $S_{SL} \sim 400\text{mm}$ 이다.

[0091] 수학식(7)으로부터, 복소수 값인(complex-valued) b_1 자장 및 원하는 여기 프로파일($P(r)$)이 푸리에 변환 쌍을 형성한다는 것이 명백하다.

[0092] $r > S_{SL}$ 에 대한 $P(r) = 0$ 인 특성 및 나이퀴스트(Nyquist) 이론으로부터, k -공간에서의 샘플링의 최소 간격은 다음과 같다.

수학식 8

$$\Delta kr \leq \frac{1}{2 \cdot S_{SL}}$$

[0093]

[0094] 스캔된 k -공간의 직경($2 \cdot kr_{\max} = 2 \cdot N \cdot \Delta kr$)에 대한 여기(excitation)의 특정된 직경(d)은 다음과 같이 고리형 궤적의 개수 N 를 결정한다.

수학식 9

$$[0095] \frac{d}{2} = \frac{1}{2 \cdot kr_{\max}} \rightarrow d = \frac{1}{N \cdot \Delta kr}$$

[0096] $kr > kr_{\max}$ 인 경우, 원하는 여기 프로파일의 푸리에 변환이 0이기 때문에, 주파수 스펙트럼이 제한된다. 그러므로, 나이퀴스트 이론이 적용 가능하고, 관계식(9)은 이의 직접적인 결과이다.

[0097] 명시된 파라미터들(d (여기 프로파일의 직경) 및 S_{SL} (제1 사이드 로브의 간격))의 함수로서 수학식(8) 및 수학식

(9)로부터 고리형 궤적의 최소 개수(N)가 다음과 같이 획득된다.

수학식 10

$$N = 2 \cdot \frac{S_{SL}}{d}$$

[0098]

[0099] 명확화를 위해, 도 3은 직경(d)을 갖고, 거리(S_{SL})에서 사이드 로브(SL)를 갖는 막대 형상의 여기 프로파일(EP)을 통해 슬라이스의 위치 공간 영상(이로 인한 단면)을 도시한다. 위치 공간 영상은 직경이 240mm인 구형 팬텀의 영상이다. FLASH 시퀀스에서, 종래의 여기 프로파일은 본 발명에 따른 여기 궤적을 갖는 2차원 선택 RF 펄스에 의해 동심 고리형 궤적으로 대체되었다. 고리들의 개수가 $N=8$ 로 설정되었고, 제1 측면 고리의 간격은 64mm로 설정되었다. 이는 도 2에 도시된 궤적에 대응하는데, 이는 도 2 및 도 3이 2개의 푸리에 도메인에서 여기의 상관관계를 또한 예시한다는 것을 의미한다(도 3에서의 위치 공간 및 도 2에서의 관련 여기 k -공간(S_k)에서 여기 프로파일). 수학식(10)에 따르면, 중심 여기 프로파일의 직경($d = 2 \cdot 64/8\text{mm} = 16\text{mm}$)이 이를 이용하여 예측될 것이다. 도 3에 따른 측정에서 결정된 치수들은 이러한 계산에 잘 부합한다. 제2 측면 밴드는 128mm 또는 256mm의 반경 또는 직경을 가질 것이며, 이로써 구의 외부에 이미 위치한다. 획득에서, 판독 방향 및 위상 코딩 방향으로 각각 256개의 퍽셀을 갖는 이차 행렬이 사용되었다. 도 3에서의 영상의 생성에서 나머지 시퀀스 파라미터들은 $TR = 50\text{ms}$, $TE = 6.3\text{ms}$, 플립 각도 = 30° , 및 공명 주파수 = 123MHz이다.

[0100]

수학식(1) 및 수학식(2)을 이용하여 여기 프로파일의 직경(d) 및 사이드 로브 간격(S_{SL})에 기반하여 고리형 궤적의 개수(N) 및 고리형 궤적의 반경($kr_n = n \cdot \Delta kr$)($n=1$ 내지 N)이 구축되면, 최대 경사 진폭(A_n) 및 펄스 지속 시간(T_n)은 고리형 궤적 각각에 대해 구축된다. 1/4 주기 동안 수학식(6)의 적분을 통해, 반경($kr_n = n \cdot \Delta kr$)과 경사 진폭(A_n)의 크기뿐 아니라 n번째 고리형 궤적의 지속시간(T_n) 사이에 다음의 관계가 획득된다.

수학식 11

$$A_n = \frac{2\pi}{(\gamma/2\pi)} \frac{n \cdot \Delta kr}{T_n}$$

[0101]

[0102] 여기 펄스의 지속시간을 최소화하기 위해, 수학식(11)의 T_n 은 너무 짧아서 (예를 들어) 특정 최대 경사 진폭(G_{max}) 및 특정 최대 허용가능 경사 슬루울(gradient slew rate)(S_{max})이 특히 초과되지 않도록 선택된다. 최대 허용가능 경사 진폭(G_{max})이 경사 시스템의 능력에 의해 정상 구축되는 동안, 경사 시스템의 능력 및 검사 받는 사람의 가능한 신경 자극이 최대 허용가능 경사 슬루울 S_{max} 의 사양에 유리하게 고려된다.

[0103]

도 4는 단일 고리형 궤적의 부분 RF 펄스(RF_n)의 설계의 일례를 도시한다. 여기에서의 설명은 시퀀스도 또는 펄스도로부터의 작은 발췌의 형태로 일어난다. 이러한 펄스도에서, 고주파 펄스들은 상부 시간 축에서 통상적인 방식으로 도시되고, 상기 고주파 펄스들과 연동하여 전환될 경사 펄스들은 시간(t)에 따라 그 아래 있는 다양한 시간 축에 도시되어 있다. 여기에서, 슬라이스 내의 선택적 여기에 관련된 x 방향 및 y 방향의 경사 펄스들(경사 곡선들의 진폭(A_n))($GP_{x,n}$, $GP_{y,n}$)만이 도시된다. 관련된 경사 곡선으로 인한 스핀(spin)들에서 작용하는, 활성 방향에 의존하는 상이한 극성을 갖는 개별 축적된 0번째 모멘트(개별 경사 펄스 아래의 영역의 크기)(F_1 , F_2)는 경사들 아래 개별적으로 그려진다.

[0104]

시간축의 제로 포인트는 부분 RF 펄스(RF_n)의 중간과 일치하고; 수학식(6)에 대응하여, x 경사 펄스($GP_{x,n}$)는 사인파 곡선을 갖고, y 경사 펄스($GP_{y,n}$)는 코사인파 곡선을 갖는데, 이를 곡선 각각은 주기 지속시간(T_n)(즉, 고리형 궤적의 시간 길이)을 갖는다. 이러한 선택은 보편성의 제한 없이 임의로 일어날 수 있다. 각각의 프리페이징(prephasing) 펄스(VP_x , VP_y)는 시점($t = -T_n/2$)에서의 고주파 펄스의 사용 전에 경사 방향 모두에

도시된다. 고주파 펄스(RF_n)가 시점($t = T_n/2$)에서 중단된 후, 각각의 리페이징 펄스(RP_x , RP_y)가 전환된다.

[0105] 그러므로, 경사 자장이 시점($t = -T_n/2$)에서 영으로부터 A_n 까지 순간적으로 급증하지 않을 수 있기 때문에, y 방향의 프리페이징 펄스(VP_y)는 합당하다. 이에 따라, 그것은 경사 코일을 통해 전류를 급증시키는 역할을 한다. 따라서, y 방향의 리페이징 경사(RP_y)는 경사 전류를 급감시키는 역할을 한다. 2개의 경사 펄스(VP_y , RP_y)의 전체 모멘트는 각각의 부분 RF 펄스에 대해, 즉, 각각의 고리형 궤적에 대해 0이다($-F_2 + F_2 = 0$). 이로써 횡단 평면에서 이전의 부분적인 펄스(프리페이징 경사) 또는 이러한 부분적인 펄스 또는 이전의 부분적인 펄스(리페이징 경사)에 의해 여기되었던 (정적) 스핀들이 이들 경사의 결과로서 아무런 위상을 획득하지 않는다는 점이 얻어진다. 도 4에 도시된 특별한 실시예에서, 삼각형(또는 사다리꼴) 곡선이 프리페이징 또는 리페이징 경사(VP_y , RP_y)를 위해 선택되었는데, 그 이유는 경사의 지속시간은 소정의 최대 진폭(G_{max}) 및 슬루율(S_{max})에 대해 최소화될 수 있기 때문이다. 그러나, 여기에는 상당한 자유가 있다. 예를 들어, 경사 잡음은 4분의 3 사인파(three-quarters sine wave)를 이용하여 감소될 수 있다. 게다가, y 방향으로 흐르는 스핀들에 영향을 미치지 않도록 남겨두기 위해 제1 모멘트가 사라진 3개의 루프로부터 경사 곡선이 선택될 수 있다.

[0106] x 방향의 프리페이징 펄스(VP_x)는 k -공간 궤적을 집중시키는 역할을 한다. 0번째 모멘트(F_1)은 RF 초기 동안 사인 경사 펄스($GP_{x,n}$)의 $1/4$ 주기 하의 0번째 모멘트(F_1)와 동일하다. x 방향의 리페이징 경사(RP_x)는 동일한 절대 영역(F_1) 및 반대 극성을 갖는다. 이는 원점으로 되돌아가는 k -공간 궤적을 초래한다. (RF 방사를 이용하거나 이용하지 않거나) x 방향의 경사의 전체 모멘트는 영이다. 그러므로, 이전의 부분적인 펄스에 의해 이미 여기되었던 (정적) 스핀들은 영향을 받지 않는 대로 남는다. 도 4에 도시된 실시예에서, 요구 시간을 최소화하기 위해 삼각 곡선이 다시 선택되었다. 예를 들어, 여기에 사다리꼴 곡선 또는 반-사인파(half-sine wave)가 대안적으로 가능하다. 예를 들어, 길이 방향의 여기 이전에 모든 스핀들이 위치하는 무효 경사 애코 시퀀스(spoiled gradient echo sequence)에서 여기 펄스로서 2차원 선택 RF 펄스가 사용되면, 프리페이징 경사(VP_x)는 예를 들어, 여기의 제1 부분 펄스를 위해 x 방향으로 생략될 수 있으며, 그 이유는 종축 배열을 갖는 스핀들에 어떠한 영향을 미치지 않기 때문이다.

[0107] 전술한 바와 같이, b_1 진폭은 개별 부분 펄스들 각각에서 일정하다. N 개의 부분 펄스의 합($b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1N}$)의 계산은 미리 결정된 원하는 회전 대칭 여기 프로파일($P(r)$)을 고려하여 수학식(7)을 이용하여 일어난다. 그러나, 이러한 수학식(7)은 각각의 부분 펄스의 상대적 b_1 진폭 또는 그 비례성(proportionality)만을 특정한다. 그러나, 이는 충분하다. 그러므로, b_1 진폭의 물리적 합(예를 들어, μT 단위)은 다음과 같이 결정될 수 있다:

[0108] (부분) RF 펄스의 대역폭 내에 공명 주파수를 갖는 스핀들의 자화는 펄스의 마지막에서 다음의 플립 각도에 의해 정상 상태 밖으로 플립될 것이다.

수학식 13

$$\alpha = \gamma \int_{t_0}^{t_0 + T} b_1(t) dt$$

[0109]

[0110] t_0 는 부분 펄스의 활성화 시간이고, 자기회전비(gyromagnetic ratio)(γ)는 여기된 핵에 의존하는 물리적 상수이다. 양성자들의 경우, 이들의 값은 $\gamma = 2\pi \cdot 42.57 \text{ MHz/T}$ 이다.

[0111] b_1 진폭이 부분 펄스 동안 일정하기 때문에, n 번째 부분 펄스의 플립 각도 기여의 경우, 수학식(13)으로부터 다음과을 직접 따른다.

[0112] [수학식 13b]

$$\alpha_n = \gamma b'_{1n} T_n$$

[0113] b_{1n} 은 (비례 부호(proportionality sign) 대신 등호를 갖는) 수학식(7)을 이용하여 계산되는 n 번째 부분 펄스를

위한 값이고; $b_{1n}' = c \cdot b_{1n}$ 는 n번째 부분 펠스의 초기 알려지지 않은 물리적 b_1 진폭이다. RF 펠스의 전체 지속 시간이 이완 시간에 비해 짧다는 전제 하에(이로써 스크린들은 RF 방사 중에 적절한 규모로 다시 이완되지 않음), 합성 펠스의 플립 각도(α)가 n번째 부분 펠스들의 플립 각도 기여(α_n)의 합과 같다는 것은 사실이다.

수학식 14

$$\alpha = \sum_{i=1}^N \alpha_i = \sum_{i=1}^N \gamma b'_{1i} T_i$$

[0115]

[0116] i 는 오직 모든 부분 펠스들에 대해 추가적인 실행 변수(running variable)이고; N 은 부분 펠스의 총 개수이다.

[0117]

수학식(14)으로부터, n번째 부분 펠스의 플립 각도 기여(α_n)는 다음에 따라 획득된다.

수학식 15

$$\alpha_n = \frac{\alpha \alpha_n}{\alpha} = \frac{\alpha \alpha_n}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} = \frac{\alpha \cdot \gamma \cdot b'_{1n} T_n}{\sum_{i=1}^N \gamma \cdot b'_{1i} T_i} = \frac{\alpha \cdot \gamma \cdot c \cdot b_{1n} T_n}{\sum_{i=1}^N \gamma \cdot c \cdot b_{1i} T_i} = \frac{\alpha \cdot \gamma \cdot c \cdot b_{1n} T_n}{\gamma \cdot c \cdot \sum_{i=1}^N b_{1i} T_i} = \frac{\alpha \cdot b_{1n} T_n}{\sum_{i=1}^N b_{1i} T_i}$$

[0118]

[0119] b_{1n}' 과 b_{1n} ($b_{1n}' = c \cdot b_{1n}$) 사이의 비례 상수(c)가 부분 펠스(n)에 독립적이기 때문에 마지막 등호가 적용된다. 이로써 상수(c)는 합산 전에 분모로 이동되어 단축될 수 있다.

[0120]

수학식(15)의 우변의 모든 항들의 계산은 이미 도시되어 있다. 수학식(13b)을 이용하면, n번째 부분 펠스의 b_1 진폭의 찾으려는 물리적 값은 플립 각도(α_n)로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

수학식 16

$$b'_{1n} = \frac{\alpha_n}{\gamma T_n}$$

[0121]

[0122]

전술한 바와 같이, 부분 펠스의 b_1 진폭은 2개의 인자(즉, k-공간 횡단 속도 및 밀도 보상 인자)를 이용하여 가중되는 원하는 방사상 프로파일의 1차원 푸리에 변환이다. 수학식(7)에서의 적분은 원하는 여기 프로파일에 따라 분석적 또는 수치적으로 계산될 수 있다. 실제 실시예에서, 가우시안 여기 프로파일은 다음과 같이 선택되었는데,

수학식 17

$$P(r) = \frac{a^2}{\pi} e^{-\frac{a^2 r^2}{\pi}}$$

[0123]

[0124]

여기서 총 면적의 90%가 직경(d) 내의 가우시안 함수 하에 있도록 변수(a)는 원하는 직경(d)에 대해 구축되었다.

[0125]

제1 가중 인자, 즉 k-공간 횡단 속도는 다음과 같이 경사 진폭의 크기(A_n)와 같다.

수학식 18

$$[0126] \quad \left\| \left(g_{x,n}(t), g_{y,n}(t) \right) \right\| = \sqrt{g_{x,n}^2(t) + g_{y,n}^2(t)} = A_n$$

[0127] 경사 진폭의 크기(A_n)는 전체 고리형 궤적 중에 일정하고, 미리 결정된 파라미터(d 및 S_{SL})의 함수로서 수학식 (8) 내지 수학식(11)을 통해 특정된다.

[0128] 제2 가중 인자, 즉 밀도 보상 인자의 계산은 등거리 고리 간격을 갖는 동심 고리형 궤적의 일례로서 다음에 설명된다.

[0129] 수학식(5)에 따르면, 밀도 보상 인자는 이러한 영역(ΔA)에 의해 둘러싸인 궤적의 면적($\Delta A(k_x, k_y)$) 및 길이($\Delta l(k_x, k_y)$)로부터의 봇에 의해 근사될 수 있으며, 여기서 면적 및 길이는 k -공간 샘플 지점(k_x, k_y)과 관련되어 있다. RF 진폭은 실제 구현마다 디지털화된다. M_n 은 n 번째 부분 펄스의 RF 샘플 지점("샘플들")의 개수이다. 각각의 샘플 지점과 관련된 n 번째 궤적의 길이(Δl_n)는 n 번째 고리형 궤적의 직경이 샘플 지점들의 개수에 의해 나누어진 것이다.

수학식 19

$$[0130] \quad \Delta l_n = \frac{2\pi \cdot kr_n}{M_n} = \frac{2\pi \cdot n \cdot \Delta kr}{M_n}$$

[0131] 도 5(음영 영역)에서 이해되는 바와 같이, 단일 샘플과 연관되어 있는 면적(ΔA)은 단순히 2개의 인접 고리형 궤적 사이의 간격(Δkr)이 곱해진 길이(Δl_n)이다.

수학식 20

$$[0132] \quad \Delta A_n = \Delta l_n \Delta kr$$

[0133] n 번째 고리형 궤적을 위한 밀도 보상 인자(ρ_n)는 다음과 같다.

수학식 21

$$[0134] \quad \rho_n = \frac{\Delta l_n}{\Delta A_n} = \frac{1}{\Delta kr}$$

[0135] 도 2 및 도 5에 도시된 예시(등거리 고리 간격)에서, 밀도 보상 인자는 모든 부분 펄스에 대해 동일하다. 등거리가 아닌 고리 간격(예를 들어, 도 10 참조)을 고려하면, 고리형 궤적의 경우, 수학식(20) 및 수학식(21)에서의 방사 고리 간격(Δkr)은 2개의 이웃 고리형 궤적으로부터의 평균 간격에 의해 대략적으로 대체될 수 있다.

[0136] 회전 대칭 여기 프로파일의 중심은 b_1 자장이 현재 경사 모멘트에 선형 비례하는 위상 인자를 이용하여 변조된다 는 점에서 경사 시스템의 등각점(isocenter)으로부터 멀어지는 거리($\delta x, \delta y$)에 의해 변위될 수 있다.

수학식 22

$$[0137] b_{1n, \text{complex}}(t, \delta x, \delta y) = b_{1n} e^{-2\pi i (k_{x,n}(t)\delta x + k_{y,n}(t)\delta y)}$$

[0138] b_{1n} 는 등각점에서의 여기를 위한 n 번째 부분 펄스의 시간 독립 b_1 진폭이고, $(k_{x,n}(t), k_{y,n}(t))$ 는 n 번째 고리의 횡단 시에 시점(t)에서의 파수 벡터이다. 여기에서 RF 펄스는 종래 기술의 공지된 2차원 선택 RF 펄스와 상이하지 않다.

[0139] 본 발명에 따른 펄스 배열의 실시예를 위한 다양한 가능성이 존재하는데, 2차원 선택 RF 펄스는 전술된 이러한 부분 펄스의 합성에 의해 생성된다.

[0140] 가장 간단한 실시예에서, 부분 펄스들은 발생 순서로 간단히 실행된다. 개별 펄스들 사이의 시간 간격은 원칙적으로 자유롭게 선택될 수 있다. 이전의 부분 펄스에 의해 영향을 받는 스핀들의 불가피한 T_1 및 T_2 이완으로 인해, 그리고 이미 여기된 스핀들의 신호의 디페이징으로 인해(예를 들어 이후의 부분 펄스들의 실행 중에 B_0 비균일성의 결과로서), 전체 펄스의 최적의 짧은 지속시간이 대부분의 경우에 더 선호된다. 특히, RF 방사가 일어나지 않는 시간 주기를 최소화하도록 추구되는 것이 유리하다.

[0141] 도 6은 x 방향 및 y 방향의 관련 경사 펄스(GP_x , GP_y)(도 4에서와 유사하지만, 완벽한 2차원 선택 RF 펄스(RFE))와 함께, 도 3에서의 영상을 획득하는데 사용된(이와 관련하여 도 2에서의 고리형 궤적들을 참조) 본 발명에 따른 2차원 선택 RF 펄스(RFE)의 시뮬레이션의 펄스 배열(PA)의 펄스도를 도시한다. 부분 RF 펄스들의 b_1 진폭은 임의의 단위([a.u.])로 상부 축에 도시된다. 이를 아래 위치하는 축에는 경사 진폭들이 마찬가지로 임의의 단위로 도시된다. 시간 축의 단위는 각각 μs 이다. 선택 RF 펄스는 8개의 부분 펄스들(RF_1 , RF_2 , RF_3 , ..., RF_8)로 세분될 수 있다. 최대 k -공간 반경(kr_{\max})을 갖는 제1 부분 펄스(RF_1)의 지속시간(T)은 소정의 최대 허용가능 경사 진폭(G_{\max}) 및 소정의 최대 허용가능 경사 슬루율(S_{\max})에 대해 가능한 짧게 선택된다. 추가적인 부분 펄스들(RF_2 , RF_3 , ..., RF_8)의 지속 시간(T)은 경사 제한적이지 않다. 오히려, 모든 고리형 궤적들(TR_1 , TR_2 , TR_3 , ..., TR_8)의 횡단을 위한 지속시간(T)(및 그에 따른 개별 직사각형 RF 펄스(RF_1 , RF_2 , RF_3 , ..., RF_8)의 지속시간(T))은 모든 부분 펄스들에 대해 동일하게 선택된다. 2차원 선택 나선 펄스들을 고려한 명명법에 따라, 여기서는 일정한 각속도("일정한 각도 레이트(constant angular rate)")를 갖는 실행이 설명될 것이다.

[0142] 개별적인 직사각형 부분 펄스들(RF_1 , RF_2 , RF_3 , ..., RF_8)의 (일정한) 진폭(b_1)은 앞서 설명된 바와 같이 계산되었다.

[0143] 도 7은 x 방향 및 y 방향의 관련 경사 펄스들(GP_x' , GP_y')과 함께 본 발명에 따른 2차원 선택 RF 펄스(RFE')의 다른 실시예 변형을 갖는 펄스 배열(PA')의 대응(시뮬레이션된) 펄스도를 도시한다. 도 6에 따른 변형에 대한 중요한 차이는 여기서는 각각의 개별 펄스(RF_1 , RF_2 , RF_3 , ..., RF_8)의 지속 시간(T_1 , T_2 , T_3 , ..., T_8)이 개별적으로 계산되었고, 사실상 소정의 최대 허용가능 경사 진폭(G_{\max}) 및 최대 허용가능 경사 슬루율(S_{\max})이 각각의 n 번째 고리형 궤적(TR_1 , TR_2 , TR_3 , ..., TR_8)의 소정의 k -공간 반경($kr_n = (N - n + 1) \Delta kr$)에 대해 특히 초과되지 않는다는 것이다. 다시 2차원 선택 나선 펄스들을 고려한 명명법에 따라, 이는 일정한 (경사) 슬루율을 갖는 실시예로서 지정될 수 있다.

[0144] 도 6 및 도 7에 제시된 2개의 실시예에서, n 번째 부분 펄스의 리페이징 경사들은 각각 $(n+1)$ 번째 부분 펄스의 프리페이징 경사와 통합된다. 2개의 경사들의 이러한 조합은 발생 순서로 2개의 경사를 실행하는 것 대신에, 단 하나의 경사(경사 펄스)가 전환되는데, 그 경사의 0번째 모멘트는 개별 경사의 0번째 모멘트의 합과 같다. 조합의 목적은 주로 시간 절감이다. 인접한 경사 펄스들의 조합의 추가적인 이점은 경사 코일들 및 경사 증폭기들의 경사 잡음, 와전류, 및 열이 감소될 수 있다는 것이다.

[0145] 도 7에 따른 실시예에서, RF 방사가 일어나는 시간 간격(T_1 , T_2 , T_3 , ..., T_8)은 최적이다. 임의의 추가적인 단축화는 최대 허용가능 경사 슬루율(S_{\max}) 또는 최대 허용가능 경사 진폭(G_{\max})의 초과를 초래할 것이다. 2차원

선택 RF 펄스(RFE') 또는 전체 펄스 배열(PA')의 전체 지속시간의 추가적인 단축은 리페이징 경사 및 프리페이징 경사가 실행되는 RF 방사 없이 시간의 단축을 통해서만 가능하다.

[0146] 이와 관련하여, 도 8은 x 방향 및 y 방향의 관련 경사 펄스들(GP_x'' , GP_y'')과 함께 본 발명에 따른 2차원 선택 RF 펄스(RFE'')의 실시예 변형을 갖는 펄스 배열(PA'')의 대응 (시뮬레이션된) 펄스도를 도시하는데, 여기서 RF 방사에 의한 간격들 사이의 시간이 다시 감소된다. 이는 k-공간에서의 인접 고리형 궤적들이 상이한 회전 방향으로 횡단된다는 점에서 달성된다. 예를 들어, 홀수 인덱스를 갖는 부분 펄스들의 회전 방향이 반시계 방향이고, 짝수 인덱스를 갖는 부분 펄스들의 시계 회전 방향의 반대이다.

[0147] 이러한 변형예의 이점은 도 9를 사용하여 명확해질 수 있는데, 도 9는 2개의 인접 부분 RF 펄스(RF_n'' , RF_{n+1}'') 및 y 방향의 경사 펄스(GP_y'')의 관련 세그먼트에 대한 확대 섹션을 도시한다(예를 들어, 도 9에 구체적으로 도시된 부분 RF 펄스(RF_n'' , RF_{n+1}'')는 2개의 라인에 의해 특징 지워지는 세그먼트에 있는 도 8에서의 펄스들(RF_3 , RF_4)에 대응할 수 있지만, 이러한 원리는 다른 모든 발생 순서로 연속적인 부분 펄스들(RF_n'' , RF_{n+1}'')에 이와 같이 적용됨).

[0148] 도 9에서 명확해 지는 바와 같이, y경사는 시간 간격(T_n)과 시간 간격(T_{n+1}) 사이의 2개의 삼각형 경사로 구성된다. 제1 경사는 진폭(A_n) 및 램프 지속시간(RT_n)을 갖고; 제2 경사는 진폭(A_{n+1}) 및 램프 지속시간(RT_{n+1})을 갖는다. 이는 다음과 같이 적용된다.

수학식 23

$$A_n RT_n + A_{n+1} RT_{n+1} = 0$$

[0149] [0150] 2개의 삼각형 경사의 면적의 크기(즉, 0번째 경사 모멘트의 크기)는 동일하다. 이를 이용하면, 횡단 평면에서 n번째 여기 펄스 후에 위치하는 (정적) 스픈들은 이를 경사의 결과로서 아무런 위상을 얻지 못한다. n번째 y-리페이징 경사 및 (n+1)번째 y-프리페이징 경사의 모멘트가 각각 0이라는 원시 조건은 합성 경사(수학식(23) 참조)의 총 모멘트가 사라지는 더 약한 조건에 의해 대체될 수 있다(상이한 극성의 진폭(A_n 및 A_{n+1})으로 인해 반대 방향으로 각각 진행하는 인접 고리형 궤적들을 고려함). 이는 이러한 방법 변형에서 추가적인 시간 이득의 원인이다.

[0151] (도 2에서와 유사한) k-공간(S_k)의 전송 궤적의 추가 예시적인 실시예가 도 10에 도시되어 있다. 마찬가지로, 총 전송 궤적은 k-공간 중심을 기준으로 하는 동심 고리형 궤적들로 구성된다. 그러나, 개별 고리형 궤적(TR_1 , TR_2 , TR_3 , ...)은 도 1에 따른 예시적인 실시예에서와 같이 더 이상 균일한 방사상 간격을 갖지 않는다. 이를 대신하여, 고리 간격(Δkr_1 , Δkr_2 , Δkr_3 , ...)은 k-공간 중심을 향해 조금씩 감소된다. 특히, k-공간 중심이 오버샘플링될 수 있는데, 이는 고리 간격이 수학식(8)의 우변에 의해 정해진 값보다 중심에 가깝도록 더 작게 선택된다는 것을 의미한다. k-공간 중심의 더 조밀한 스캐닝을 통해, 원치 않는 여기들이 원하는 여기 프로파일($P(r)$)의 외부로 감소된다고 예상된다. k-공간 중심의 더 조밀한 스캐닝으로 인해 총 펄스의 연장을 회피하기 위해, k-공간 주변부는 언더샘플링될 수 있으며, 이는 고리 간격(Δkr_1 , Δkr_2 , Δkr_3 , ...)이 수학식(8)에 의해 요구되는 것보다 더 크게 선택될 것임을 의미한다.

[0152] 본 발명에 따라 구성된 (도 2에 도시된 바와 유사한) k-공간(S_k)에서의 전송 궤적의 예시적인 실시예는 도 11에 도시되는데, k-공간 중심 둘레의 동심 고리형 궤적들로부터 형성된 전송 궤적이 오직 k-공간(S_k)의 내부 영역에 (예를 들어, 최대 반경(kr_{max})의 절반까지 반경 영역(Δkr_i)에) 있다. 이를 대신하여, 나선형 궤적(TR_S)이 k-공간(S_k)의 주변 반경 영역(Δkr_a)에 사용된다. 이미 전술하였고, 테스트를 사용하여 다시 후에 도시된 바와 같이, 종래의 나선형 궤적들에 비해 동심 고리형 궤적들의 이점은 특히 경사 지연에 대하여 더 큰 강건성이다. 그러나, 나선형 궤적의 하나의 이점은 신속성이다. 이점들 모두를 활용하기 위해, 이 변형예에서, 여기 k-공간의 주변 영역들은 (불완전한) 나선형 궤적을 갖는 부분 펄스를 이용하여 초기에 횡단되고, 그 후 k-공간의 중심 영역은 동심 고리형 궤적을 각각 실현하는 부분 펄스들을 이용하여 횡단된다.

- [0153] 원칙적으로, 당연히 역배열이 또한 가능할 것이고, 이는 동심 고리형 케적들이 외부로 사용되고, 나선형 케적이 내부로 사용되는 것을 의미한다. 그러나, 도 11에 도시된 변형예는 주변 k-공간 영역의 정보가 k-공간 중심으로부터의 정보보다 덜 적절하기 때문에 다소 유리하다. 이는 다른 도시된 변형예에서 k-공간 중심이 항상 마지막에 커버되는 이유이다(도 2 및 도 10 참조).
- [0154] 전술한 바와 같이, 고리형 케적에서 방사되는 각각의 부분 펠스의 b_1 진폭이 일정한데, 이는 EPI 또는 나선형 케적들을 갖는 공지된 2차원 선택 RF 펠스들이 주어진 경우와 상이하다. 따라서 방사된 RF 에너지와 실제 적용 경사 자장 사이의 원치 않는 지연은 오직 부분 펠스의 시작 부분의 우측 및 부분 펠스의 마지막 부분의 우측에서의 오류를 초래한다. 이는 경사 지연 유닛들의 존재를 고려할 때 선택 프로파일의 비범한 강건성으로 이어진다.
- [0155] 도 12 내지 도 14는 이러한 강건성의 실험적 검증을 보여 준다. 이를 위해, 2차원 선택 FLASH 시퀀스에서, 여기 펠스는 2차원 선택 RF 펠스에 의해 대체된다. 모든 3개의 도 12 내지 도 14의 상부 행에서, 이러한 2차원 선택 RF 펠스는 각각 EPI 케적을 갖는 종래의 펠스이고; 하부 행에서, 그것은 본 발명에 따른 동심 고리형 케적을 갖는 합성 RF 펠스이다.
- [0156] 모든 도면에서, 적용된 경사 자장에 비해 방사된 RF 자장이 추가로 $15 \mu\text{s}$ 또는 $45 \mu\text{s}$ 만큼 고의로 지연된다는 점에서(지연 시간이 각각 Del로 지정됨) 중간 및 우측 열의 영상들은 각각 좌측 열의 관련 영상들과 상이하다. 측정에 사용되는 팬텀은 팬텀 유체(phantom fluid)로 채워진 구이다. 제1 측면 밴드의 클리어런스(clearance)는 모든 경우에 128mm이고, 이로써 팬텀의 외부에 있다.
- [0157] EPI 케적들을 갖는 모든 여기들을 고려하면, 원하는 여기 프로파일은 각각 정사각형 막대이고, 케적들의 기본적인 기하학적 구조에 여기 프로파일의 형상을 각각 적용시켜서 비교성(comparability)을 확보하기 위해, 동심 고리형 케적을 갖는 모든 여기들을 고려하면, 원하는 여기 프로파일은 각각 원통형이다. 고리형 케적들의 개수(N)는 본 발명에 따른 여기에서 8이고, 이에 따라 원통의 직경은 대략 32mm가 된다. 정사각형 막대의 에지 길이가 (적어도 이론적으로) 마찬가지로 32mm가 되도록 EPI 펠스의 파라미터들이 선택되었다.
- [0158] 판독 시야는 모든 경우에 각각 256mm이고, 막대 축 또는 원통 축에 수직하게 배향된다. 영상들은 Siemens 3T MAGNETOM Verio에서 획득되었다.
- [0159] 도 12에서, 팬텀은 MR 시스템의 등각점(isocenter)에 위치한다. 도 13 및 도 14에서, 팬텀 및 여기의 원하는 위치는 x 방향 또는 y 방향으로 50mm만큼 변위되었다. 모든 경우에 막대 축 또는 원통 축은 자석의 z 방향(따라서 B_0 자장의 방향)으로 가리킨다.
- [0160] 3개의 모든 실험예에서, EPI 케적의 프로파일은 소정의 $15 \mu\text{s}$ 지연 시간만큼 상당히 방해 받고, 전체적으로 소정의 $45 \mu\text{s}$ 만큼 방해 받는데, 동심 고리형 케적들의 프로파일은 대개 유지된다. 약간의 스미어링(smearing)이 오직 $45 \mu\text{s}$ 에서 명백하다.
- [0161] 중심 이탈 여기(off-center excitation)를 고려하면(도 13 및 도 14), 지연 시간은 (판독 시야의 중간에 놓인) 원하는 위치에 비해 여기의 약간의 변위를 생성한다. 그러나, 이러한 오류는 여러 애플리케이션, 특히 내비게이터 애플리케이션에서 해가 없는데, 그 이유는 예를 들어 여기될 막대 형상의 볼륨은 호흡 움직임을 정확히 검출하기 위해 (예를 들어) 간의 돔(dome)에 반드시 로컬화될 필요는 없기 때문이다.
- [0162] 게다가, 본 방법의 이러한 특성은 유리하게 지연 시간들을 조정 및/또는 교정하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 이를 위해, 인공적으로 삽입된 추가 지연 시간은 측정된 여기 프로파일이 정확히 원하는 위치에 위치할 때까지 달라질 수 있으며, 이로써 시스템 고유의(초기 공지되지 않은) 지연 시간은 정확히 보상된다. 이러한 교정이 한 번 또는 생체 내에서(in vivo) 일어나야 하는지 여부는 지연 시간의 원인에 의존한다.
- [0163] 이를 위한 방법을 위한 간략화된 워크플로우 방식이 도 15에 개략적으로 제시된다. 단계 I에서, 정밀하게 규정된 여기 프로파일의 2차원 선택 여기는 본 발명에 따른 방법을 이용하여 초기에 일어난다. 단계 II에서, 단계 I에 구현된 이러한 측정에 기반하여 재구성된 영상 데이터는 조작자에게 후속 제시된다. 그 후, 이러한 조작자는 여기 프로파일이 원하는 지점에서 정밀하게 위치하는지 여부를 판정할 수 있다. 이러한 경우가 아니면, 단계 III에서, 조작자는 경사 지연 시간을 인공적으로 수정한다. 이로써 경사들은 상이한 공간 방향으로 달라질 수 있다. 단계 I에서, 새로운 측정이 동일한 여기 프로파일을 이용하여 후속으로 구현되고, 획득된 영상들이 단계 II에서 다시 디스플레이된다. 조작자가 단계 II에서의 결과에 만족하면, 자기 공명 시스템은 조정되고(또는 값들의 대응하는 프로토콜화 후에 교정이 일어남), 실제 측정은 단계 IV에서 일어날 수 있다. 조작자에 의

한 시각적 모니터링 대신에, 영상 데이터의 자동 분석이 더 안락한 변형예에서 일어날 수 있다. 예를 들어, 영상 데이터의 여기 프로파일의 위치는 영상 인식 소프트웨어를 이용하여 구축될 수 있고, 그 다음에 경사 지연 시간들의 조정이 최종적으로 지연 시간들이 영상 데이터에 따라 보상될 때까지 단계 III 등에서 이에 기반하여 자동으로 일어날 수 있다.

[0164] 결과적으로, 전술한 설명에서 상세히 설명된 방법 및 디바이스들이 예시적인 실시예이고, 기본 원리가 청구항에 의해 제공되는 한에 있어서, 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 당업자에 의해 광범위하게 변형될 수 있다는 점에 유의한다. 예를 들어, 단말기에서 실현되는 대신에, 제어 시퀀스 결정 디바이스(22)는 제어 디바이스(10) 자체의 일부일 수 있고, 특히 측정 제어 유닛(15)의 컴포넌트일 수 있다. 마찬가지로, 제어 시퀀스 결정 디바이스는 예를 들어, 네트워크(NW)를 통해 자기 공명 시스템(1)과 연결된 별도의 컴퓨터 시스템에서 실현될 수 있다. 완전함을 위해, 단수 표현의 사용이 부속 특징들이 여러 차례 존재할 수도 있다는 점을 배제하지 않는다는 점에 유의한다. 유사하게, "유닛" 및 "모듈"이라는 용어는 이것들이 공간에서 분산될 수 있는 다수의 컴포넌트를 포함한다는 점을 배제하지 않는다.

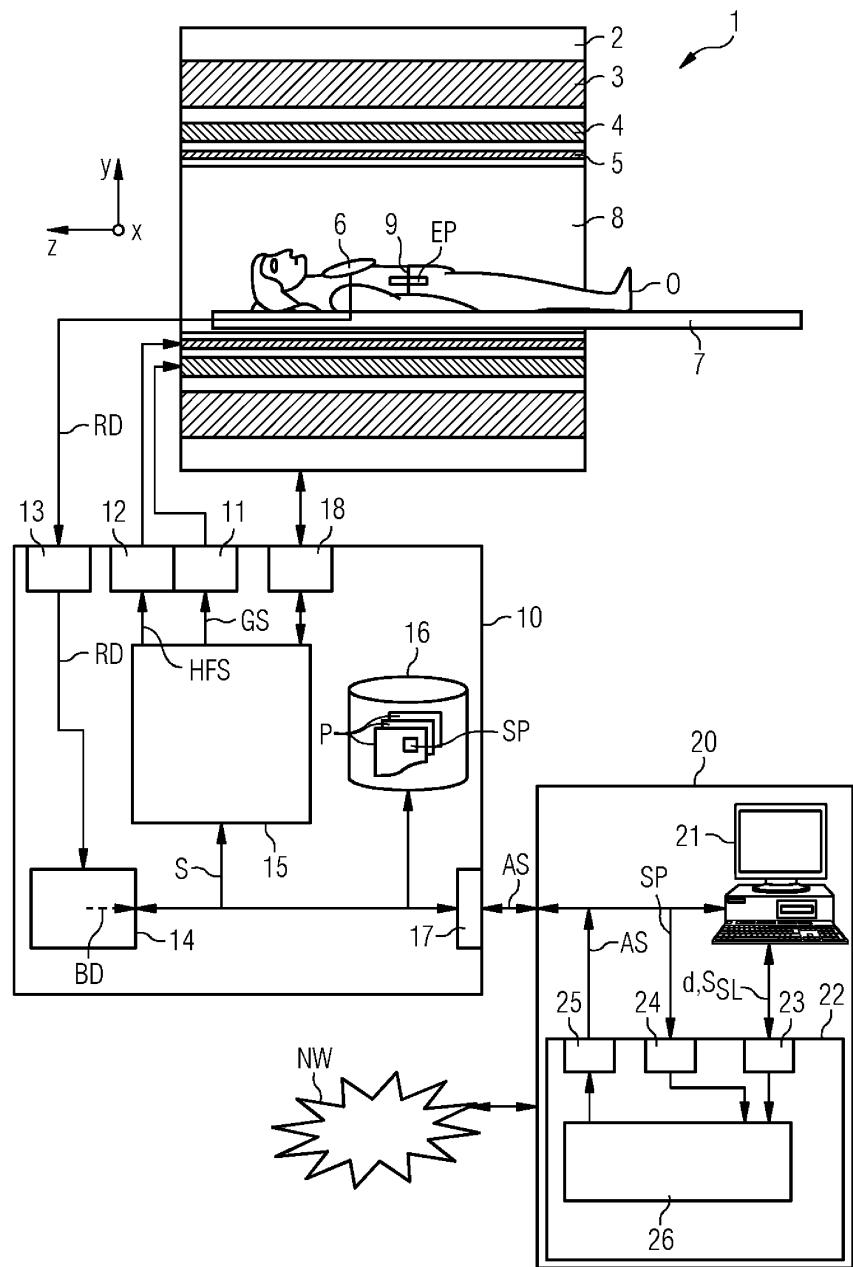
부호의 설명

[0165]

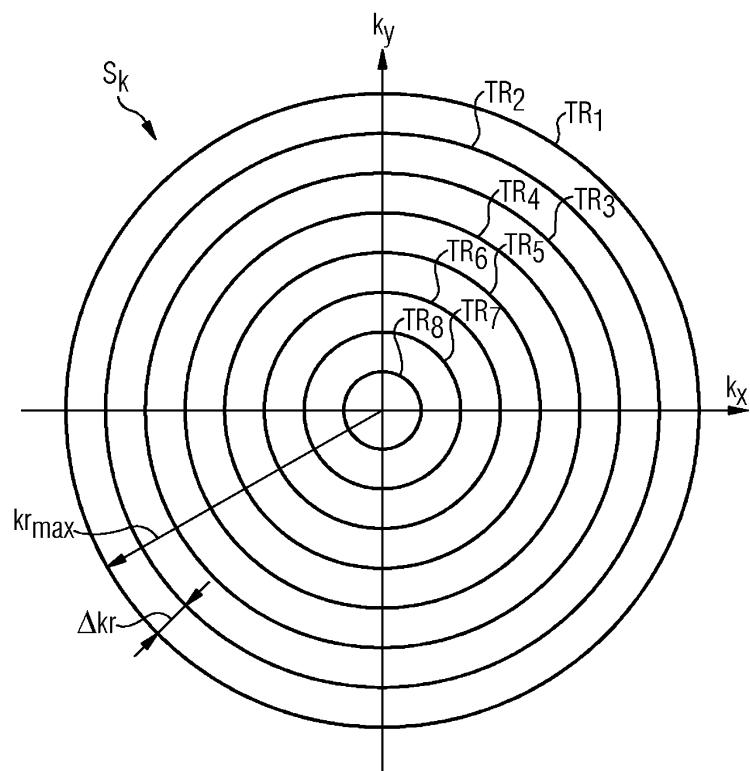
- 1: 자기 공명 시스템
- 2: 자기 공명 스캐너
- 3: 기본 자장 자석
- 4: 경사 시스템
- 5: 전신 고주파 코일
- 6: 로컬 코일 배열
- 7: 침상
- 8: 검사 공간
- 9: 진동판
- 10: 제어 디바이스
- 22: 제어 시퀀스 결정 디바이스

도면

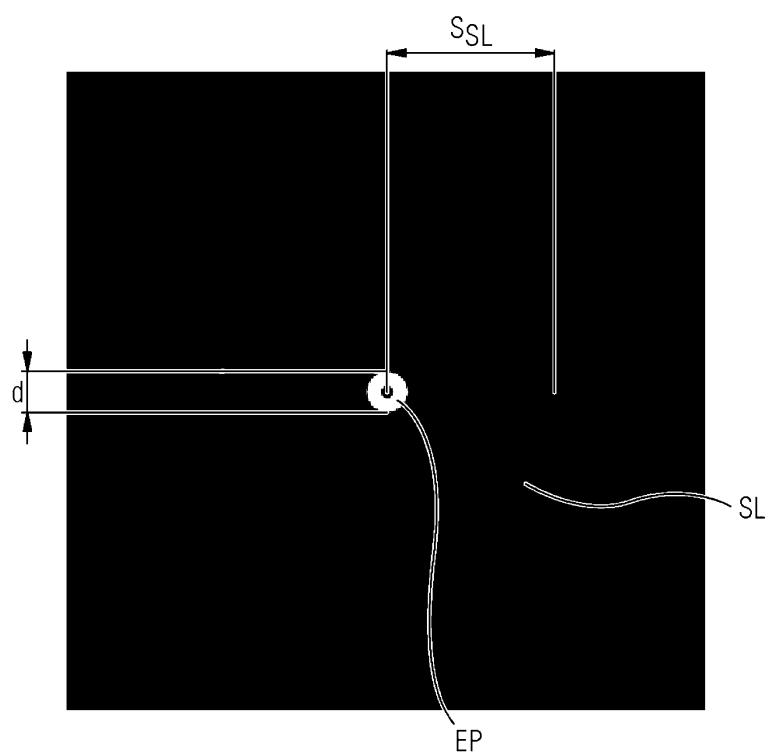
도면1



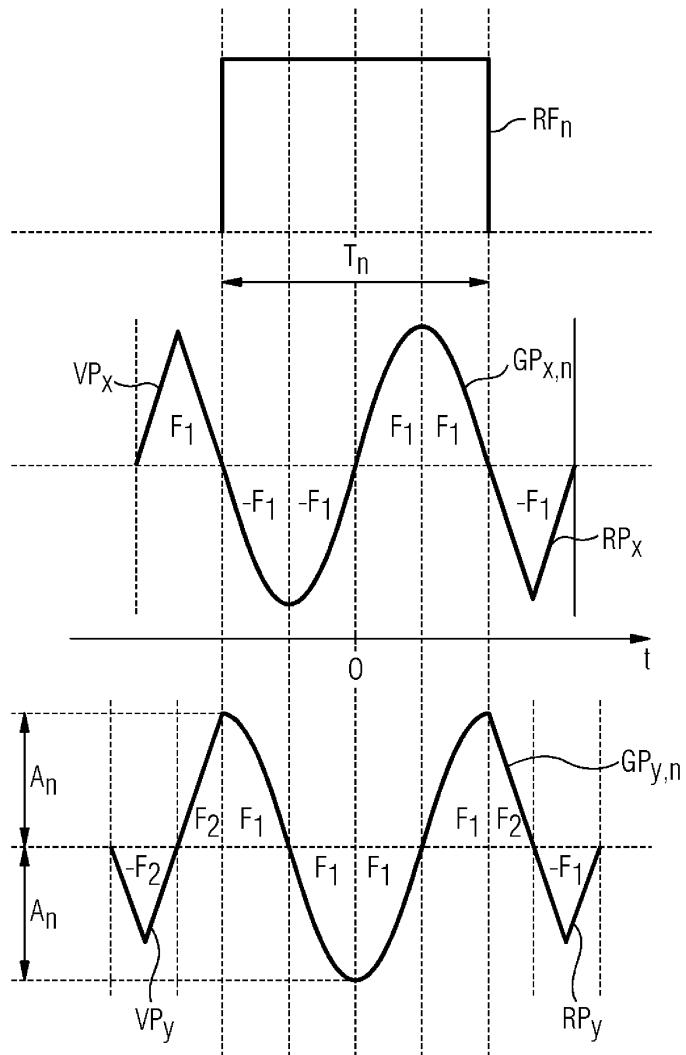
도면2



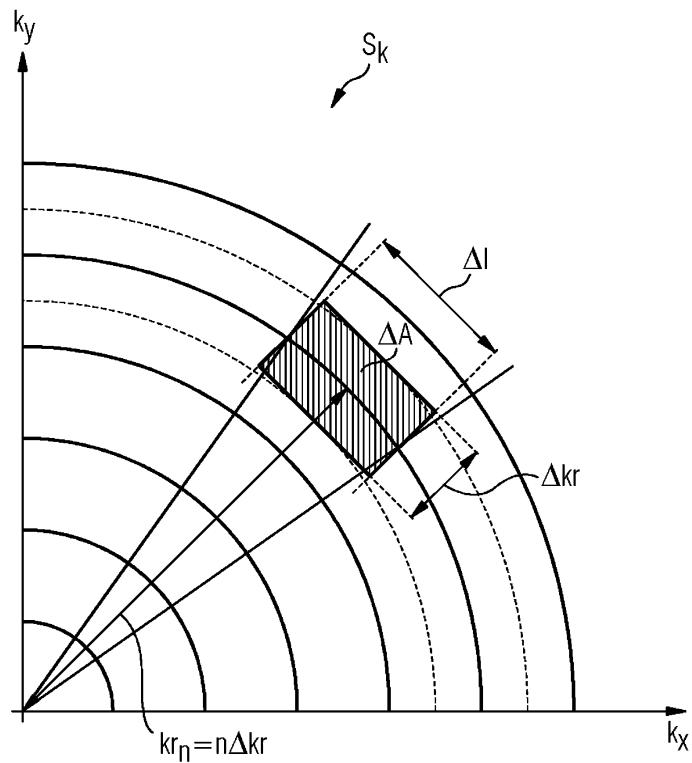
도면3



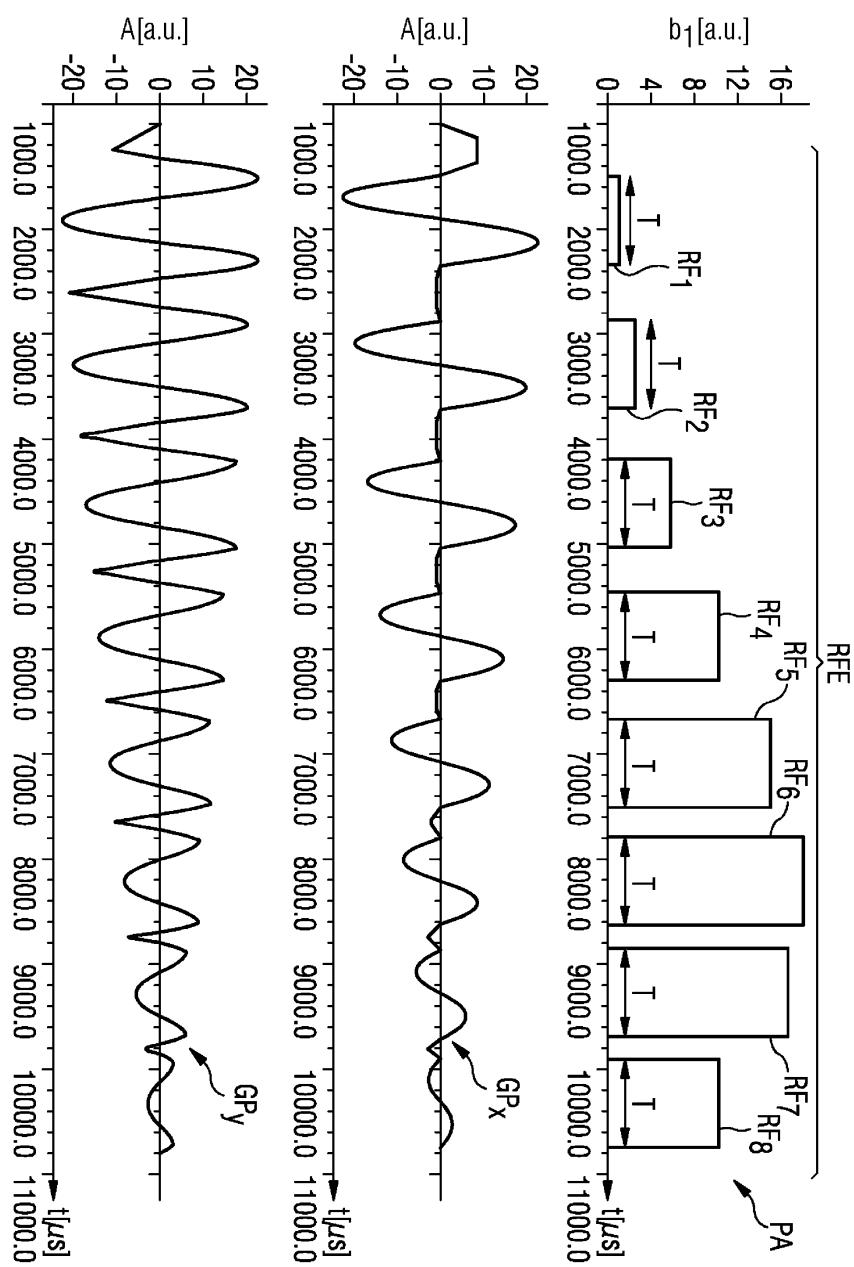
도면4



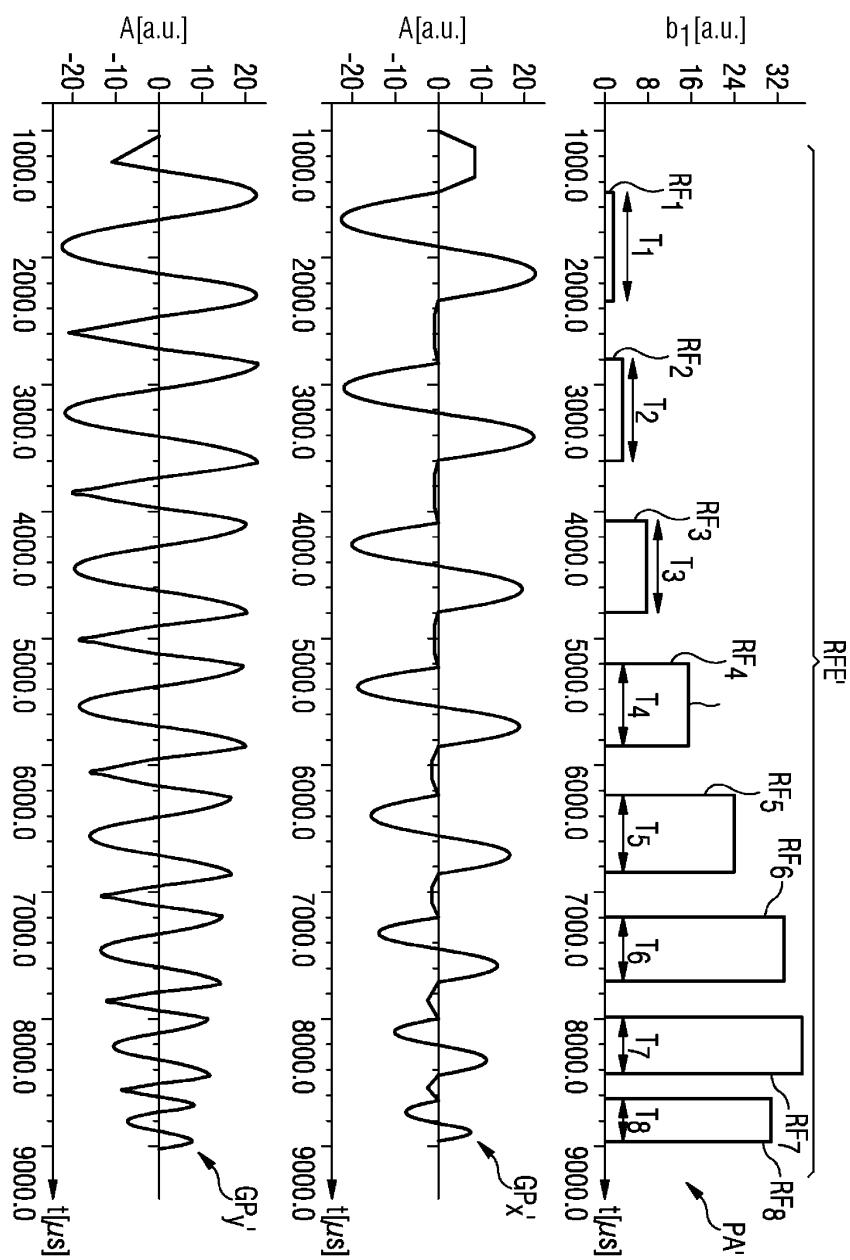
도면5



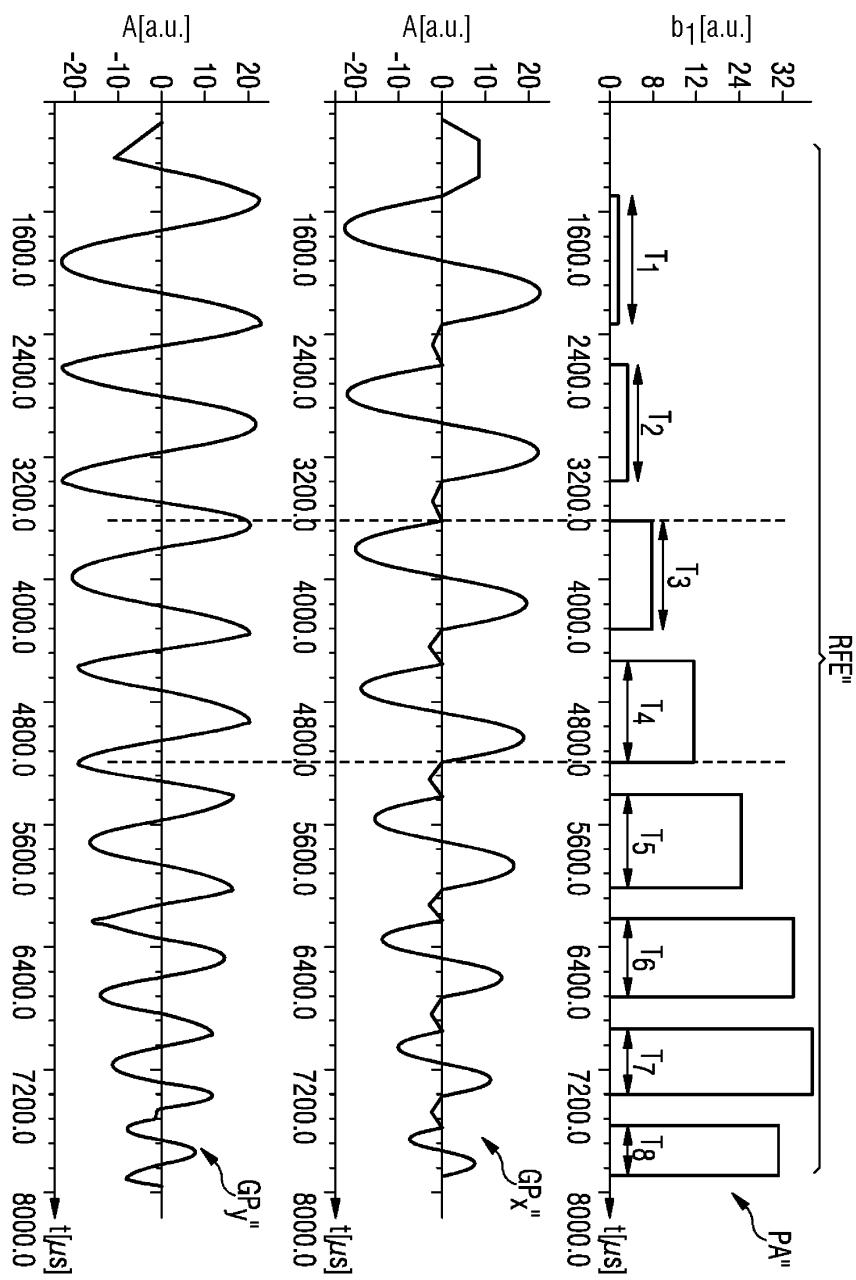
도면6



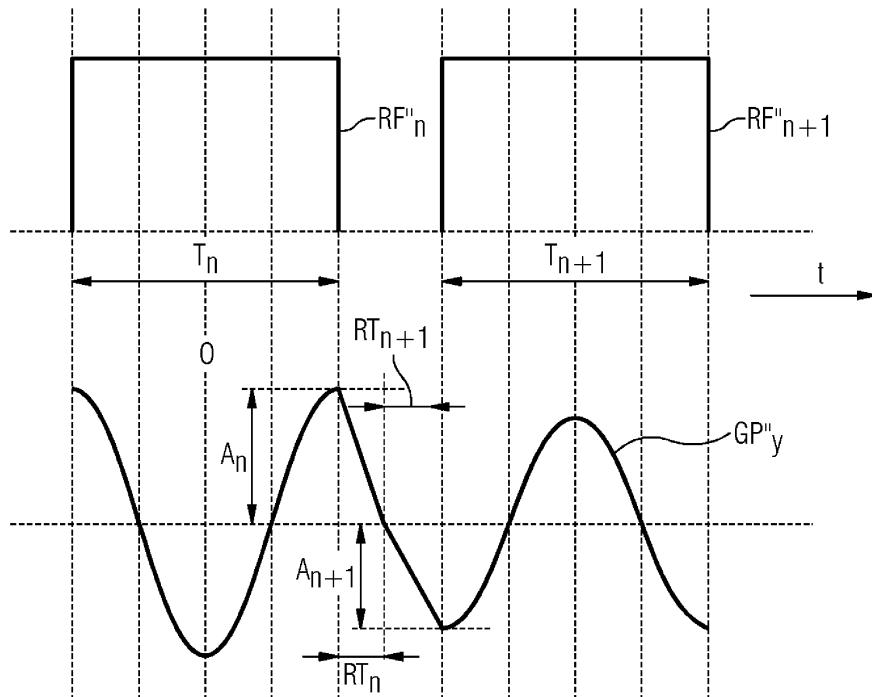
도면7



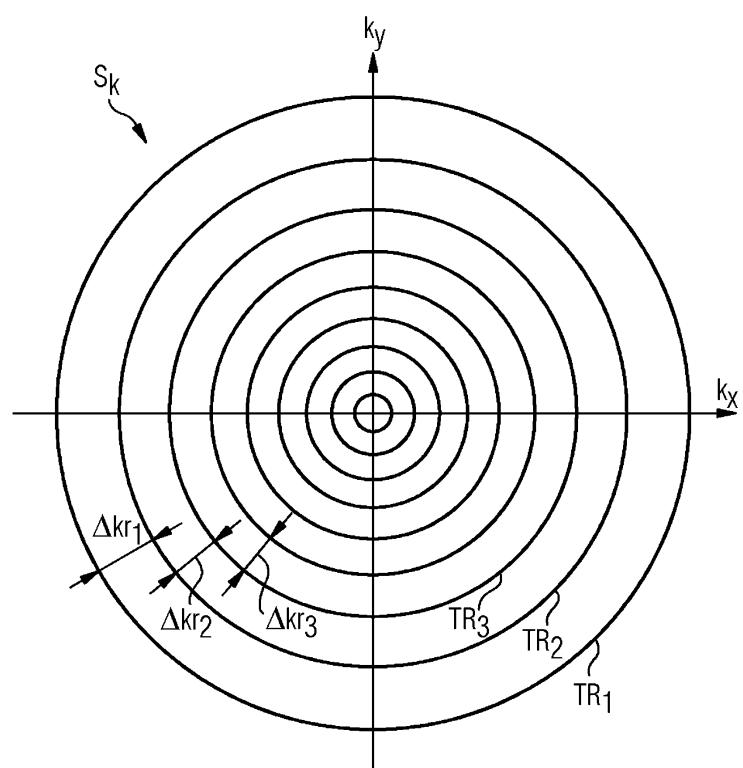
도면8



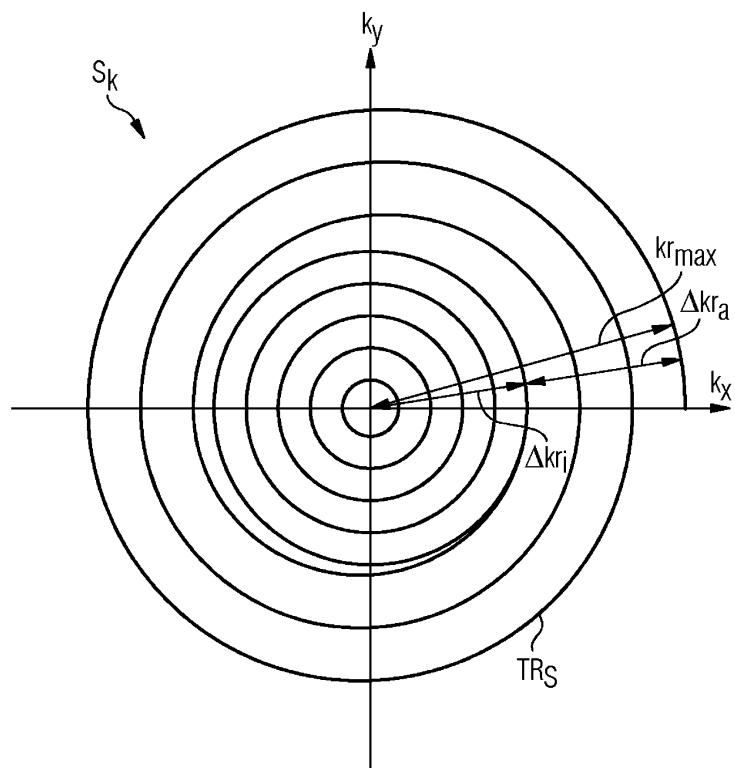
도면9



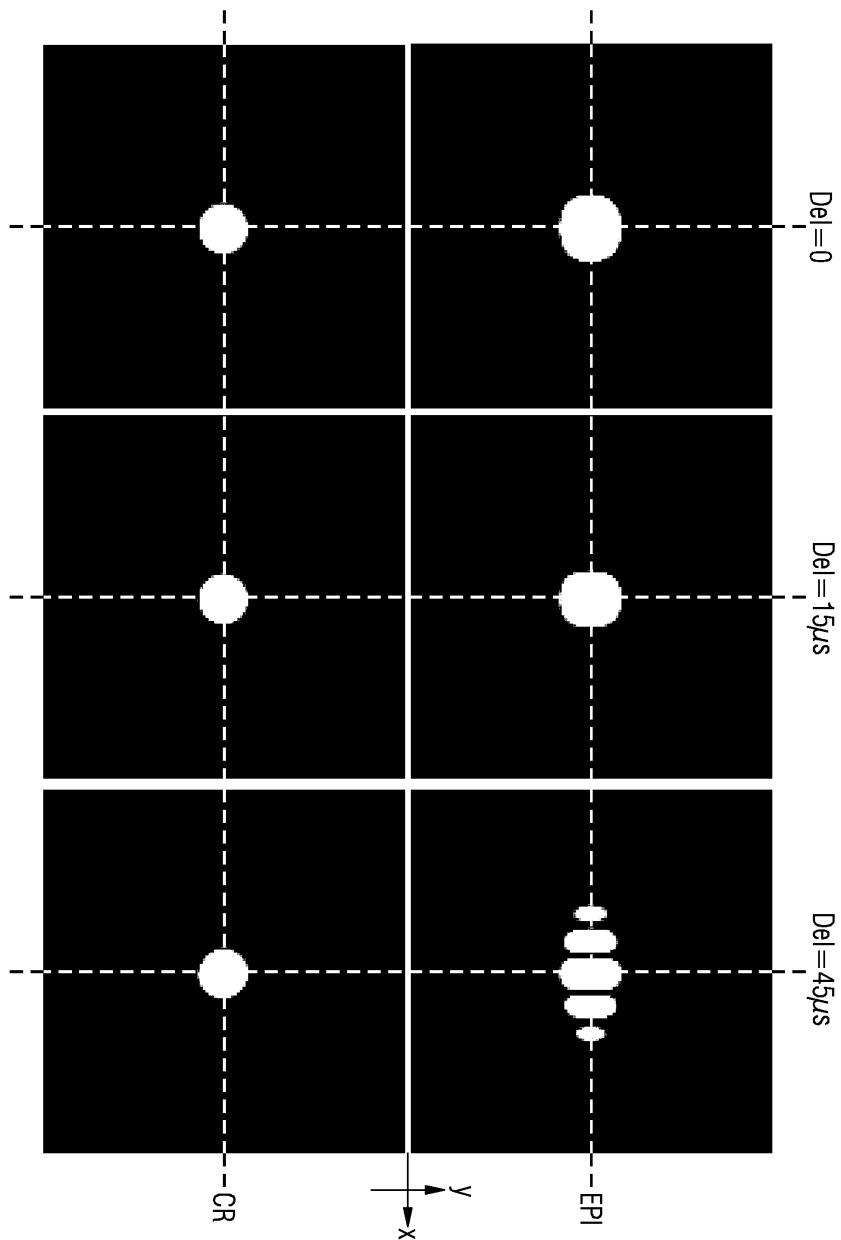
도면10



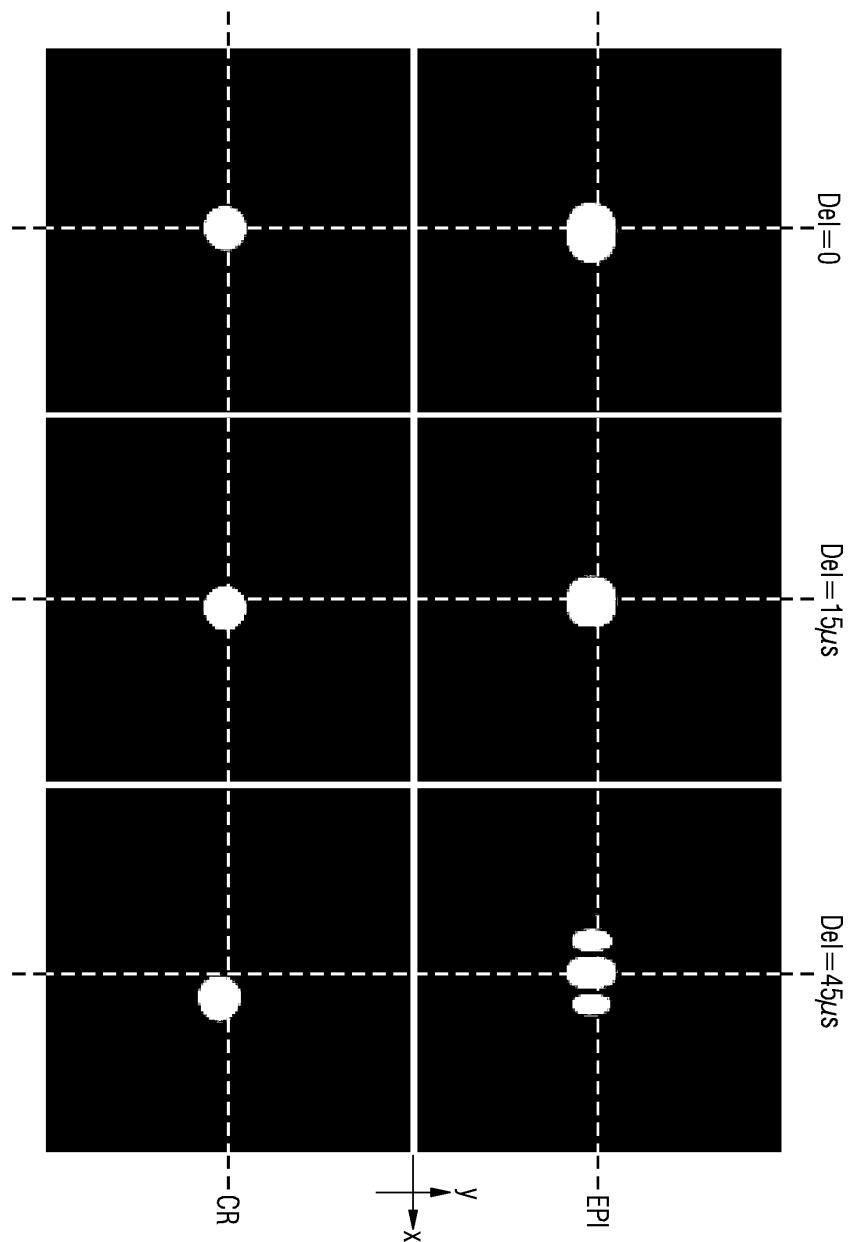
도면11



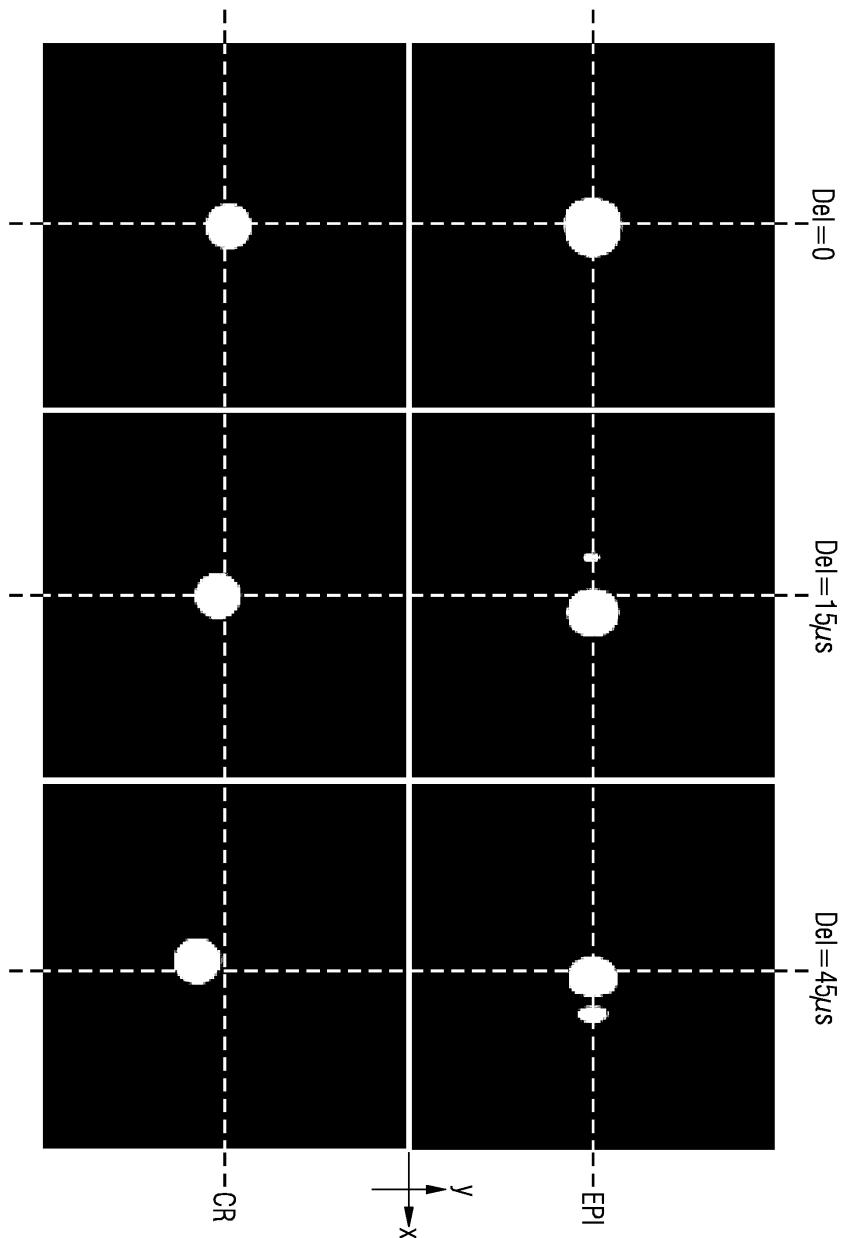
도면12



도면13



도면14



도면15

