



(12) **Patentschrift**

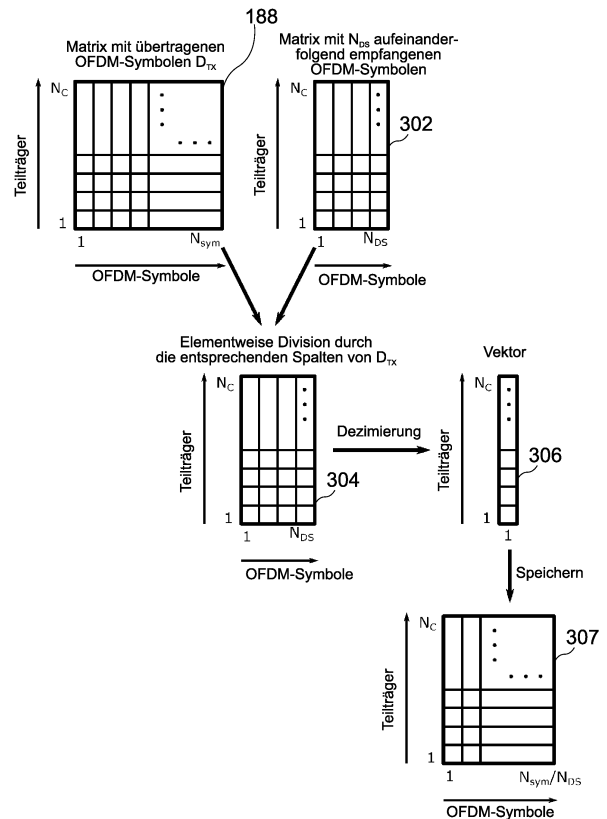
(21) Aktenzeichen: **10 2018 119 278.9**
 (22) Anmeldetag: **08.08.2018**
 (43) Offenlegungstag: **13.02.2020**
 (45) Veröffentlichungstag der Patenterteilung: **02.04.2020**

(51) Int Cl.: **G01S 7/292 (2006.01)**
G01S 13/26 (2006.01)
G01S 7/295 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber: Infineon Technologies AG, 85579 Neubiberg, DE	(72) Erfinder: Lang, Oliver, Linz, AT; Onic, Alexander, Dr., Linz, AT; Schmid, Christian, Linz, AT
(74) Vertreter: 2SPL Patentanwälte PartG mbB Schuler Schacht Platzer Lehmann, 81373 München, DE	(56) Ermittelter Stand der Technik: DE 10 2009 019 905 A1

(54) Bezeichnung: **VERFAHREN UND VORRICHTUNGEN FÜR DIE VERARBEITUNG EINES OFDM-RADARSIGNALS**



(57) Zusammenfassung: Ausführungsbeispiele der vorliegenden Offenbarung beziehen sich auf ein neuartiges Konzept zur Verarbeitung eines OFDM-Radarsignals. Eine Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten, die einer Anzahl von N_{DS} aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen entsprechen, wird empfangen (202), wobei jedes OFDM-Symbol eine Mehrzahl von N_c Teilträgern umfasst, moduliert mit einem jeweiligen Modulationssymbol. Jeder von der Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten wird durch sein jeweiliges Modulationssymbol dividiert (204), um eine Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen zu erzeugen. Die Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen wird dezimiert (206), um zumindest ein dezimiertes OFDM-Symbol zu erzeugen. Eine diskrete Fourier-Transformation vom ersten Typ (z. B. IFFT) von dem zumindest einen dezimierten OFDM-Symbol wird durchgeführt (208), um zumindest einen ersten transformierten Vektor (308) zu erzeugen.

Beschreibung

Gebiet

[0001] Ausführungsbeispiele der vorliegenden Offenbarung beziehen sich im Allgemeinen auf Radarsysteme, und genauer auf OFDM-Radarsysteme (OFDM= orthogonal frequency-division multiplexing; orthogonales Frequenzmultiplexverfahren).

Hintergrund

[0002] Heutzutage nimmt die Bedeutung von Radarsensoren für Automobilanwendungen stark zu. Neben den immer beliebter werdenden fortschrittlichen Fahrerassistenzsystemen (ADAS; advanced driver assistant systems) hat das autonome Fahren (AD; autonomous driving) in Wissenschaft und Industrie viel Aufmerksamkeit erregt. Für ADAS und AD spielen Radarsensoren eine große Rolle, indem sie die Umgebung eines Fahrzeugs scannen. Auch die Car-to-Car- (Fahrzeug-zu-Fahrzeug-) Kommunikation hat als mögliches Sicherheitsmerkmal für AD-Fahrzeuge an Interesse gewonnen. Eine Radar-Wellenform, die eine gleichzeitige Erfassung und Kommunikation erlaubt, ist die OFDM-Wellenform, die daher ein vielversprechender Kandidat für zukünftige Automobilradarsysteme ist. Das Grundprinzip eines OFDM-Signals und der Zusammenhang zwischen den Frequenz- und Zeitbereichen ist bekannt und kann wie folgt zusammengefasst werden.

[0003] Im Frequenzbereich wird eine Mehrzahl von N_c benachbarten Tönen oder Teilträgern jeweils unabhängig mit komplexen Daten moduliert, die auch als Modulationssymbole bezeichnet werden. Eine Transformation einer inversen Fast-Fourier-Transformation (**IFFT**; Inverse Fast Fourier Transform) wird an den Frequenzbereichs-Teilträgern durchgeführt, um ein OFDM-Symbol im Zeitbereich zu produzieren. Dann werden im Zeitbereich Schutzintervalle (guard intervals) zwischen jedem der OFDM-Symbole eingefügt, um Intersymbolinterferenz an einem Empfänger zu verhindern, die durch eine Mehrwegeverzögerungsausbreitung im Funkkanal verursacht werden. Mehrere OFDM-Symbole können verknüpft werden, um das endgültige OFDM-Burst-Signal zu erzeugen. An dem Empfänger wird eine **FFT** an den empfangenen OFDM-Symbolen durchgeführt, um die ursprünglichen Modulationssymbole wiederherzustellen.

[0004] Die DE 10 2009 019 905 A1 beschreibt ein Konzept zur digitalen Verarbeitung von OFDM-Signalen, die von einer Sendeeinrichtung mit Modulationssymbolen als Informationsträger gesendet, an einem oder mehreren Objekten zumindest teilweise reflektiert und von einer Empfangseinrichtung empfangen werden. Dabei werden die Modulationssymbole ohne vorangehende Kanalverzerrung aus den empfangenen OFDM-Signalen extrahiert, einige oder alle extrahierten Modulationssymbole werden durch eine komplexe Division auf das jeweilige gesendete Modulationssymbol normiert, und eine Radarauswertung zur Entfernungsbestimmung und/oder Geschwindigkeitsbestimmung der Objekte erfolgt auf Basis der normierten Modulationssymbole.

[0005] In ihrer Standardimplementierung bringt die OFDM-Wellenform jedoch anspruchsvolle Hardwareanforderungen mit sich, insbesondere im Hinblick auf den für das Speichern der empfangenen OFDM-Symbole erforderlichen Speicher. Darüber hinaus hat man bei Radaranwendungen keine vollständige Kontrolle über die Größe der Entfernung-Geschwindigkeits-Matrix/Karte (RVM; range-velocity map).

[0006] Somit besteht ein Wunsch, den erforderlichen Speicher, die Rechenanforderungen zu reduzieren und mehr Kontrolle über die Größe der RVM für OFDM-Radarsysteme bereitzustellen.

Zusammenfassung

[0007] Diesem Wunsch werden Verfahren und Vorrichtungen gemäß den unabhängigen Ansprüchen gerecht. Weitere potenziell vorteilhafte Ausführungsbeispiele sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche und/oder der folgenden Beschreibung.

[0008] Gemäß einem ersten Aspekt der vorliegenden Offenbarung ist ein Verfahren zum Verarbeiten eines OFDM-Radarsignals bereitgestellt. Das Verfahren umfasst ein Empfangen einer Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten, die einer Anzahl von N_{DS} ($N_{DS} \geq 1$) aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen entsprechen. Jedes OFDM-Symbol umfasst eine Mehrzahl von N_c Teilträgern, moduliert mit einem jeweiligen Modulationssymbol. Jeder von der Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten wird durch Division durch sein jeweiliges Modulationssymbol verarbeitet, um eine Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen zu erzeugen. Die Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen wird dezimiert, um zumindest ein dezimiertes OFDM-Symbol zu

erzeugen. Eine diskrete Fourier-Transformation vom ersten Typ von dem zumindest einen dezimierten OFDM-Symbol wird durchgeführt, um zumindest einen ersten transformierten Vektor zu erzeugen.

[0009] Das Dezimieren der (verarbeiteten) OFDM-Symbole vor der weiteren Verarbeitung derselben kann die Speicheranforderungen reduzieren. Dies ist insbesondere für Automobilanwendungen interessant.

[0010] Sofern nicht ausdrücklich angegeben, umfasst der allgemeine Ausdruck „diskrete Fourier-Transformation“ Fourier-Transformationen in beide Richtungen, d. h. vom Zeitbereich zum Frequenzbereich, auch als diskrete Fourier-Transformation (**DFT**; discrete Fourier transform) bezeichnet, und umgekehrt vom Frequenzbereich zum Zeitbereich, auch als inverse diskrete Fourier-Transformation (**IDFT**; inverse discrete Fourier transform) bezeichnet. Somit kann sich eine diskrete Fourier-Transformation vom ersten Typ entweder auf eine **DFT** oder auf eine **IDFT** beziehen, während sich eine diskrete Fourier-Transformation vom zweiten Typ dann auf die jeweils andere Richtung bezieht.

[0011] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst ein Dezimieren der Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen ein Reduzieren der Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbole auf eine Anzahl niedriger als N_{DS} . Diese Reduktion kann auf verschiedene Weise implementiert sein. Eine mögliche Implementierung umfasst ein Mitteln der N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbole. Im Vergleich zum einfachen Verwerfen von einem oder mehreren verarbeiteten OFDM-Symbolen, was ebenfalls eine umsetzbare Option wäre, kann ein Mitteln der N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbole zu einem verbesserten Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR; Signal-to-Noise Ratio) führen.

[0012] Bei einigen Ausführungsbeispielen kann das Verfahren ferner ein Extrahieren von Reichweiten- oder Entfernungsinformationen aus dem zumindest einen ersten transformierten Vektor umfassen, wobei die Reichweiteninformationen anzeigend sind für eine Entfernung von Objekten, von denen das OFDM-Radarsignal reflektiert wurde. In dem Fall, dass die diskrete Fourier-Transformation vom ersten Typ eine **IDFT** ist, z. B. eine inverse Fast-Fourier-Transformation (**IFFT**), umfasst der zumindest eine erste transformierte Vektor Reichweiten- oder Entfernungsinformationen, die als Teil der **RVM** verwendet werden können. Die **IDFT** oder **IFFT** kann ähnlich einem Mischen des empfangenen Signals mit einem Sendesignal betrachtet werden, wie es typischerweise bei frequenzmodulierten Dauerstrich- (FMCW; frequency modulated continuous wave) Radarsystemen erfolgt.

[0013] Bei einigen Ausführungsbeispielen kann das Verfahren ferner ein Reduzieren einer Anzahl von N_c Elementen von dem zumindest einen ersten transformierten Vektor auf $N_R < N_c$ umfassen, um zumindest einen verkürzten transformierten Vektor (d. h. einen Vektor, der eine reduzierte Größe aufweist), umfassend N_R Elemente, zu erzeugen. Auf diese Weise können Reichweiten- oder Entfernungsinformationen von keinem oder geringerem Interesse komprimiert oder verworfen werden, was wiederum zu weiter reduzierten Speicheranforderungen führen kann. Somit umfasst ein Reduzieren der Anzahl von N_c Elementen bei einigen Ausführungsbeispielen ein Verwerfen oder Kombinieren von vorbestimmten Elementen von dem zumindest einen ersten transformierten Vektor.

[0014] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst das Verfahren ferner ein Wiederholen der Schritte des Verfahrens gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bis eine Anzahl von $N_{sym} = n \times N_{DS}$ aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen empfangen wurde. Mit anderen Worten, wenn ein Burst von OFDM-Symbolen N_{sym} aufeinanderfolgende OFDM-Symbole umfasst, wird das Verfahren iterativ durchgeführt, bis alle N_{sym} OFDM-Symbole verarbeitet wurden. Wenn jede Iteration N_{DS} aufeinanderfolgende OFDM-Symbole verarbeitet, werden n Iterationen benötigt, um den gesamten Burst der N_{sym} OFDM-Symbole zu verarbeiten.

[0015] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst das Verfahren ferner ein Durchführen einer diskreten Fourier-Transformation vom zweiten Typ an Zeilen einer Matrix $D_{Div,Dec}$, um eine Mehrzahl von zweiten transformierten Vektoren zu erzeugen. Die Matrix $D_{Div,Dec}$ kann n Spalten von n aufeinanderfolgenden ersten transformierten Vektoren umfassen. Wenn sich zum Beispiel die diskrete Fourier-Transformation vom ersten Typ auf eine IDFT oder IFFT bezieht, bezieht sich die diskrete Fourier-Transformation vom zweiten Typ auf eine DFT oder FFT. Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst die Matrix $D_{Div,Dec}$ $N_R < N_c$ Zeilen und $n = N_{sym} / N_{DS}$ Spalten, wobei N_R einer reduzierten Anzahl von Elementen von jedem der n aufeinanderfolgenden ersten transformierten Vektoren entspricht. Mit dieser Operation können Doppler- oder Geschwindigkeitsinformationen der RVM erzeugt werden. Somit umfasst das Verfahren bei einigen Ausführungsbeispielen ferner ein Extrahieren von Geschwindigkeitsinformationen aus den zweiten transformierten Vektoren, wobei die Geschwindigkeitsinformation anzeigend ist für eine Geschwindigkeit von Objekten, von denen das OFDM-Radarsignal reflektiert wurde.

[0016] Der Fachmann, der aus der vorliegenden Offenbarung einen Vorteil zieht, wird erkennen, dass die Grundsätze des vorgeschlagenen Konzepts sowohl für Eingrößen- (SISO; Single-Input Single-Output) als auch für Mehrgrößen- (MIMO; Multiple-Input Multiple-Output) OFDM-Radarsysteme verwendet werden können. Im letzteren Fall kann eine erste Teilmenge der N_c Teilträger einer ersten Sendeantenne zugeordnet sein und eine zweite Teilmenge der N_c Teilträger kann einer zweiten Sendeantenne zugeordnet sein. Die erste und die zweite Teilmenge können disjunkte Teilträger-Teilmengen sein. Ein Empfangen der Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten kann ein Empfangen von $N_c \times N_{DS}$ Abtastwerten an jeder von einer Mehrzahl von Empfangsantennen umfassen. Im MIMO-Fall kann das Verfahren ferner ein Erzeugen von zumindest einem dezimierten OFDM-Symbol für jedes Sende-Empfangs-Antennenpaar und ein Durchführen, für jedes Sende-Empfangs-Antennenpaar, einer diskreten Fourier-Transformation (z. B. einer IDFT oder IFFT) vom ersten Typ von dem jeweiligen dezimierten OFDM-Symbol, um einen jeweiligen ersten transformierten Vektor zu erzeugen, umfassen.

[0017] Der Fachmann, der aus der vorliegenden Offenbarung einen Vorteil zieht, wird erkennen, dass die Reihenfolge der Dezimierung und der diskreten Fourier-Transformation vom ersten Typ ausgetauscht werden kann, ohne von den Grundsätzen der vorliegenden Offenbarung abzuweichen. Somit wird, gemäß einem weiteren Aspekt der vorliegenden Offenbarung, ein Verfahren zum Verarbeiten eines OFDM-Radarsignals bereitgestellt. Das Verfahren umfasst ein Empfangen einer Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten, die einer Anzahl von N_{DS} aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen entsprechen, wobei jedes OFDM-Symbol eine Mehrzahl von N_c Teilträgern umfasst, moduliert mit einem jeweiligen Modulationssymbol. Das Verfahren umfasst ferner ein Verarbeiten von jedem von der Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten durch Division durch sein jeweiliges Modulationssymbol, um eine Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen zu erzeugen, ein Durchführen einer diskreten Fourier-Transformation vom ersten Typ von der Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen, um eine Anzahl von N_{DS} jeweiligen transformierten Vektoren zu erzeugen, und ein Dezimieren der Anzahl von N_{DS} transformierten Vektoren, um zumindest einen dezimierten transformierten Vektor zu erzeugen.

[0018] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst ein Dezimieren der Anzahl von N_{DS} transformierten Vektoren ein Mitteln der N_{DS} transformierten Vektoren, was zu guten SNR-Ergebnissen führen kann.

[0019] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst das Verfahren ferner ein Reduzieren einer Anzahl von N_c Elementen von dem zumindest einen ersten transformierten Vektor auf $N_R < N_c$, um zumindest einen verkürzten transformierten Vektor, umfassend N_R Elemente, zu erzeugen. Dies kann die Speicheranforderungen weiter reduzieren.

[0020] Bei einigen Ausführungsbeispielen umfasst das Verfahren ferner ein Durchführen einer diskreten Fourier-Transformation (z. B. einer DFT oder FFT) vom zweiten Typ von dem zumindest einen verkürzten transformierten Vektor. Auf diese Weise können Geschwindigkeitsinformationen erzeugt werden.

[0021] Gemäß einem anderen Aspekt der vorliegenden Offenbarung ist ein Computerprogramm mit einem Programmcode zum Durchführen des Verfahrens gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wenn das Computerprogramm auf einer programmierbaren Hardwarevorrichtung ausgeführt wird, bereitgestellt.

[0022] Gemäß noch einem anderen Aspekt der vorliegenden Offenbarung ist eine Vorrichtung zum Verarbeiten eines OFDM-Radarsignals bereitgestellt. Die Vorrichtung umfasst einen Empfänger, der ausgebildet ist, um eine Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten, die einer Anzahl von N_{DS} aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen entsprechen, zu empfangen, wobei jedes OFDM-Symbol eine Mehrzahl von N_c Teilträgern umfasst, moduliert mit einem jeweiligen Modulationssymbol. Die Vorrichtung umfasst auch einen Prozessor, der ausgebildet ist, um jeden von der Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten durch Division durch sein jeweiliges Modulationssymbol zu verarbeiten, um eine Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen zu erzeugen, die Anzahl der N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbole zu dezimieren, um zumindest ein dezimiertes OFDM-Symbol zu erzeugen, und eine diskrete Fourier-Transformation vom ersten Typ von dem zumindest einen dezimierten OFDM-Symbol durchzuführen, um zumindest einen ersten transformierten Vektor zu erzeugen.

[0023] Bei einigen Ausführungsbeispielen ist der Prozessor ferner ausgebildet, um eine Anzahl von N_c Elementen des zumindest einen ersten transformierten Vektors auf $N_R < N_c$ zu reduzieren, um zumindest einen verkürzten transformierten Vektor, umfassend N_R Elemente, zu erzeugen und um eine diskrete Fourier-Transformation vom zweiten Typ von dem zumindest einen verkürzten transformierten Vektor durchzuführen, um zumindest einen zweiten transformierten Vektor zu erzeugen.

[0024] Gemäß noch einem anderen Aspekt der vorliegenden Offenbarung ist eine Vorrichtung zum Verarbeiten eines OFDM-Radarsignals bereitgestellt. Die Vorrichtung umfasst einen Empfänger, der ausgebildet ist, um eine Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten, die einer Anzahl von N_{DS} aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen entsprechen, zu empfangen, wobei jedes OFDM-Symbol eine Mehrzahl von N_c Teilträgern umfasst, moduliert mit einem jeweiligen Modulationssymbol. Die Vorrichtung umfasst einen Prozessor, der ausgebildet ist, um jeden von der Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten durch Division durch sein jeweiliges Modulationssymbol zu verarbeiten, um eine Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen zu erzeugen, eine diskrete Fourier-Transformation vom ersten Typ von der Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen durchzuführen, um eine Anzahl von N_{DS} jeweiligen transformierten Vektoren zu erzeugen, und die Anzahl von N_{DS} transformierten Vektoren zu dezimieren, um zumindest einen dezimierten transformierten Vektor zu erzeugen. Hier werden die Reihenfolge der Dezimierung und der diskreten Fourier-Transformation vom ersten Typ im Hinblick auf das vorangehende Beispiel ausgetauscht, ohne von den Prinzipien der vorliegenden Offenbarung abzuweichen.

[0025] Gemäß noch einem anderen Aspekt der vorliegenden Offenbarung ist ein OFDM-Radar-Sendeempfänger bereitgestellt, der die Vorrichtung gemäß irgendeinem der vorstehend genannten Ausführungsbeispiele umfasst.

[0026] Bei einigen Ausführungsbeispielen kann die Reihenfolge der Schritte der Dezimierung und der elementweisen Division umgekehrt werden. In diesem Fall kann die Anzahl von N_{DS} empfangenen OFDM-Symbolen zuerst dezimiert werden, um zumindest ein dezimiertes OFDM-Symbol zu erzeugen. Jeder Abtastwert des zumindest einen dezimierten OFDM-Symbols kann dann durch Division durch ein jeweiliges dezimiertes Modulationssymbol verarbeitet werden, um zumindest ein verarbeitetes OFDM-Symbol zu erzeugen. Beispielsweise kann eine diskrete Fourier-Transformation vom ersten Typ von dem zumindest einen verarbeiteten OFDM-Symbol dann durchgeführt werden, um zumindest einen ersten transformierten Vektor zu erzeugen.

[0027] In dieser Offenbarung wird ein OFDM-Empfängersignalverarbeitungsschema vorgeschlagen, das den erforderlichen Speicher reduzieren kann, die Rechenanforderungen reduziert und eine vollständige Kontrolle über die Größe der RVM geben kann.

Figurenliste

[0028] Nachfolgend werden einige Beispiele von Vorrichtungen und/oder Verfahren ausschließlich beispielhaft und Bezug nehmend auf die beiliegenden Figuren beschrieben, in denen:

Fig. 1A ein Blockdiagramm eines OFDM-Radar-Sendeempfängers zeigt;

Fig. 1B ein herkömmliches Empfängersignalverarbeitungsschema in einem herkömmlichen OFDM-Empfänger darstellt;

Fig. 2 ein Flussdiagramm eines Verfahrens für das Verarbeiten eines OFDM-Radarsignals gemäß einem grundlegenden Ausführungsbeispiel zeigt;

Fig. 3A ein erstes Ausführungsbeispiel des vorgeschlagenen OFDM-Signalverarbeitungsschemas darstellt;

Fig. 3B ein zweites Ausführungsbeispiel des vorgeschlagenen OFDM-Signalverarbeitungsschemas darstellt;

Fig. 3C ein drittes Ausführungsbeispiel des vorgeschlagenen OFDM-Signalverarbeitungsschemas darstellt;

Fig. 4 beispielhafte rauschfreie Werte von $m_1, \dots, m_{N_{DS}}$ in kartesischen Koordinaten darstellt, den gemittelten rauschfreien Wert sowie die entsprechende Rauschverteilung;

Fig. 5 das SNR des Hauptobjekts in Gegenwart von 30 anderen Objekten im Sichtfeld zeigt. $N_{DS} = 2$ für Simulation 1 und $N_{DS} = 4$ für Simulation 2;

Fig. 6 ein Ausführungsbeispiel des vorgeschlagenen OFDM-Signalverarbeitungsschemas für MIMO-Verarbeitung darstellt;

Fig. 7 ein Flussdiagramm eines Verfahrens für das Verarbeiten eines OFDM-Radarsignals gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel zeigt; und

Fig. 8 ein weiteres Ausführungsbeispiel des vorgeschlagenen OFDM-Signalverarbeitungsschemas gemäß dem Verfahren von **Fig. 7** darstellt.

Detaillierte Beschreibung

[0029] Verschiedene Beispiele werden nun ausführlicher Bezug nehmend auf die beiliegenden Zeichnungen beschrieben, in denen einige Beispiele dargestellt sind. In den Figuren können die Dicken von Linien, Schichten und/oder Regionen der Klarheit halber übertrieben sein.

[0030] Dementsprechend, während sich weitere Beispiele für verschiedene Modifikationen und alternative Formen eignen, sind einige bestimmte Beispiele derselben in den Figuren gezeigt und werden nachfolgend ausführlich beschrieben. Allerdings beschränkt diese detaillierte Beschreibung weitere Beispiele nicht auf die beschriebenen bestimmten Formen. Weitere Beispiele können alle Modifikationen, Entsprechungen und Alternativen abdecken, die in den Schutzbereich der Offenbarung fallen. Gleiche Bezugszeichen beziehen sich in der gesamten Beschreibung der Figuren auf gleiche oder ähnliche Elemente, die bei einem Vergleich miteinander identisch oder in modifizierter Form implementiert sein können, während sie die gleiche oder eine ähnliche Funktionalität bereitstellen.

[0031] Es versteht sich, dass, wenn ein Element als mit einem anderen Element „verbunden“ oder „gekoppelt“ bezeichnet wird, die Elemente direkt oder über ein oder mehrere Zwischenelemente verbunden oder gekoppelt sein können. Wenn zwei Elemente A und B unter Verwendung eines „oder“ kombiniert werden, ist dies so zu verstehen, dass alle möglichen Kombinationen offenbart sind, d. h. nur A, nur B sowie A und B. Eine alternative Formulierung für die gleichen Kombinationen ist „zumindest eines von A und B“. Das Gleiche gilt für Kombinationen von mehr als zwei Elementen.

[0032] Die Terminologie, die hierin zu dem Zweck der Beschreibung bestimmter Beispiele verwendet wird, soll nicht begrenzend für weitere Beispiele sein. Wenn eine Singularform, z. B. „ein, eine“ und „der, die, das“ verwendet wird, und die Verwendung nur eines einzelnen Elements weder explizit noch implizit als verpflichtend definiert ist, können weitere Beispiele auch Pluralelemente verwenden, um die gleiche Funktionalität zu implementieren. Ebenso können, wenn eine Funktionalität nachfolgend als unter Verwendung mehrerer Elemente implementiert beschrieben ist, weitere Beispiele die gleiche Funktionalität unter Verwendung eines einzelnen Elements oder einer einzelnen Verarbeitungsentität implementieren. Es versteht sich ferner, dass die Ausdrücke „umfasst“, „umfassend“, „weist auf“ und/oder „aufweisend“ bei Verwendung die Anwesenheit der angegebenen Merkmale, Ganzzahlen, Schritte, Operationen, Prozesse, Handlungen, Elemente und/oder Komponenten spezifizieren, aber nicht die Anwesenheit oder Hinzufügung eines/einer oder mehrerer anderer Merkmale, Ganzzahlen, Schritte, Operationen, Prozesse, Handlungen, Elemente, Komponenten und/oder irgendeiner Gruppe derselben ausschließen.

[0033] Die hierin verwendete Terminologie zum Zweck der Beschreibung der Mindestlänge einer **DFT** und/oder **FFT** ist „FFT-Operation der Länge N“. Eine Vergrößerung der Länge N mittels Auffüllens mit Nullen (Zero-Padding), d. h. eines Anhängens von Nullen an den Eingabevektor, soll umfasst sein.

[0034] Sofern nicht anderweitig definiert, werden alle Begriffe (umfassend technische und wissenschaftliche Begriffe) hier in ihrer üblichen Bedeutung des Gebiets verwendet, zu dem die Beispiele gehören.

[0035] **Fig. 1A** zeigt ein Blockdiagramm eines beispielhaften OFDM-Radar-Sendeempfängers, umfassend einen OFDM-Sender **100** und einen OFDM-Empfänger **150**, dessen Arbeitsprinzip im Folgenden beschrieben wird.

[0036] Im Frequenzbereich wird eine Anzahl von N_c benachbarten Teilträgern **102-1** bis **102- N_c** je unabhängig mit komplexen Daten- oder Modulationssymbolen moduliert, wie beispielsweise binären Phasenumtastungs- (BPSK; binary phase shift keying) oder Quadraturphasenumtastungs- (QPSK; quadrature phase shift keying) Symbolen. Bei **104** wird eine **IFFT** an den Frequenzbereichs-Teilträgern durchgeführt, um ein komplexwertiges OFDM-Symbol **106** im Zeitbereich zu produzieren. Dann werden im Zeitbereich Schutzintervalle, auch zyklisches Präfix (CP; cyclic prefix) genannt, zwischen jedem von den OFDM-Symbolen bei 108 eingefügt, um Intersymbolinterferenz an dem Empfänger **150** zu verhindern, die durch eine Mehrwegeverzögerungsausbreitung im Funkkanal verursacht wird. Die OFDM-Symbole mit CP werden dann durch Quadratur-Mischen in den Radiofrequenz- (RF; radio frequency) Bereich umgewandelt. Zu diesem Zweck werden Real- (Inphasen-, I) und Quadratur- (Q) Komponenten der digitalen komplexwertigen OFDM-Symbole über entsprechende Digital-Analog-Wandler (DACs; digital-to-analog converters) **112** von digital zu analog umgewandelt. Die von digital zu analog umgewandelten Quadraturkomponenten werden dann mit jeweiligen Tiefpassfiltern **114** gefiltert, bevor sie über 90°-phasenverschobene Oszillatorsignale, die aus einem bei einer Trägerfrequenz f_c betriebenen Lokaloszillator **116** kommen, in den Radiofrequenz- (RF) Bereich aufwärtskonvertiert werden.

Das resultierende RF-Signal **118** wird Bandpass- (BP) gefiltert unter Verwendung eines Bandpassfilters **120**, verstärkt über einen Leistungsverstärker (PA; power amplifier) **122** und abgestrahlt über eine oder mehrere Antennen **124**. Mehrere aufeinanderfolgende OFDM-Symbole können verknüpft werden, um das endgültige OFDM-Burst-Signal zu erzeugen.

[0037] An dem OFDM-Empfänger **150** empfangen eine oder mehrere Empfangsantennen **174** das OFDM-Burst-Signal, das dann verstärkt wird von einem rauscharmen Verstärker (LNA; low noise amplifier) **172** und bei **170** bandpassgefiltert wird. Das resultierende Empfangssignal wird über einen Quadratur-Mischer, umfassend einen Oszillator **166**, der bei einer Trägerfrequenz f_c betrieben wird, in Basisband abwärtskonvertiert. Nach dem Mischen werden die jeweiligen Quadraturkomponenten mit entsprechenden Tiefpassfiltern bei **164** tiefpassgefiltert. Die resultierenden Signale werden über entsprechende Analog-Digital-Wandler (ADCs; analog-to-digital converters) **162** von analog zu digital umgewandelt, um ein komplexwertiges digitales Basisband-signal zu erhalten, dessen CP bei **158** entfernt wird. Der resultierende Rahmen (Frame) von N_c komplexwertigen Abtastwerten wird dann über eine FFT in den Frequenzbereich umgewandelt, um das OFDM-Symbol, umfassend eine Anzahl von N_c modulierten Teilträger-Abtastwerten **152-1** bis **152- N_c** wiederherzustellen

[0038] Ein grundlegendes OFDM-Radarempfängersignalverarbeitungsschema, das in dieser Offenbarung für den Erhalt der RVM betrachtet wird, ist in **Fig. 1B** visualisiert.

[0039] Ein Rahmen **182** von N_c von analog zu digital umgewandelten Empfangsabtastwerten **156** wird über eine diskrete Fourier-Transformation, z. B. eine Fast-Fourier-Transformation (FFT), transformiert, um ein OFDM-Symbol **184**, umfassend eine Anzahl von N_c empfangenen Datensymbolen **152-1** bis **152- N_c** , wiederherzustellen. N_c bezeichnet die Anzahl der OFDM-Teilträger. Üblicherweise werden N_{sym} aufeinanderfolgend empfangene OFDM-Symbole in einer Matrix D_{Rx} **186** der Größe $N_c \times N_{sym}$ gespeichert. Die Matrix D_{Rx} **186** repräsentiert somit einen Burst von N_{sym} aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen, wobei jedes OFDM-Symbol N_c empfangene Datensymbole **152-1** bis **152- N_c** umfasst. Eine elementweise Division dieser Matrix D_{Rx} **186** durch eine $N_c \times N_{sym}$ Matrix D_{Tx} **188**, umfassend die übertragenen OFDM-Symbole, wobei jedes übertragene OFDM-Symbol N_c übertragene Datensymbole umfasst, führt zu einer $N_c \times N_{sym}$ Matrix D_{Div} **190**, die N_{sym} normierten oder verarbeiteten OFDM-Symbolen entspricht. Die $N_c \times N_{sym}$ Einträge der D_{Div} können als komplexwertige Kanalkoeffizienten der $N_c \times N_{sym}$ jeweiligen Funkkanäle betrachtet werden. Inverse FFT-(IFFT) und FFT-Operationen, die an den Spalten und Zeilen der D_{Div} angewendet werden, ergeben eine Entfernungs-Geschwindigkeits-Matrix (RVM) der Größe $N_c \times N_{sym}$.

[0040] Das OFDM-Radarempfängersignalverarbeitungsschema von **Fig. 1B** kann wie folgt zusammengefasst werden: eine Mehrzahl von $N_c \times N_{sym}$ Empfangsabtastwerten, die einer Mehrzahl von N_{sym} aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen entsprechen, wird empfangen. Jedes empfangene OFDM-Symbol umfasst eine Mehrzahl von N_c Teilträgern, moduliert mit einem jeweiligen Modulationssymbol. Die N_{sym} aufeinanderfolgend empfangenen OFDM-Symbole können in einer Matrix D_{Rx} der Größe $N_c \times N_{sym}$ gespeichert werden. Jeder von der Mehrzahl von $N_c \times N_{sym}$ Empfangsabtastwerten wird dividiert durch sein jeweiliges Modulationssymbol, umfasst in der $N_c \times N_{sym}$ Matrix D_{Tx} , um eine Mehrzahl von N_{sym} verarbeiteten oder normierten OFDM-Symbolen, gespeichert in der $N_c \times N_{sym}$ Matrix D_{Div} , zu erzeugen. Dann können IFFT- und/oder FFT-Operationen an den Spalten und Zeilen von D_{Div} angewendet werden, um eine Entfernungs-Geschwindigkeits-Matrix (RVM) der Größe $N_c \times N_{sym}$ zu ergeben. Entfernungs-Geschwindigkeits-Matrizen werden in der Literatur manchmal als Entfernungs-Doppler-Matrizen bezeichnet.

[0041] Die OFDM-Wellenform weist vier Haupt-Systemparameter auf: die Trägerfrequenz f_c , die Signalbandbreite B , die Anzahl der Teilträger N_c , die Anzahl der aufeinanderfolgend übertragenen OFDM-Symbole N_{sym} innerhalb eines Bursts. Diese Parameter bestimmen vier Schlüssel-Performance-Messgrößen des Radarsystems, die sind: die maximale eindeutige Entfernung R_{max} , die Entfernungsauflösung ΔR , die maximale eindeutige relative Geschwindigkeit v_{max} , die Geschwindigkeitsauflösung Δv . Die Verbindung zwischen diesen Schlüssel-Performance-Messgrößen und den vier Haupt-Systemparametern ist gegeben durch

$$R_{max} = \frac{c_0 N_c}{2B} \quad v_{max} = \pm \frac{c_0}{4f_c (T_{cp} + T_0)} \quad (1)$$

$$\Delta R = \frac{c_0}{2B} \quad \Delta v = \frac{c_0}{2f_c N_{sym} (T_{cp} + T_0)}, \quad (2)$$

wobei $T_0 = N_c/B$ die Dauer von einem OFDM-Symbol ist und wobei T_{cp} die Länge des zyklischen Präfixes ist. Zusätzlich können weitere einschränkende Faktoren bestehen. Beispielsweise beeinflusst die Länge des zyklischen Präfixes auch die maximale Erfassungsdistanz, oder die Teilträgerbeabstandung $\Delta f = B/N_c$ begrenzt die maximale zulässige relative Geschwindigkeit eines Objekts, um eine annähernd Zwischenträger-Interferenz- (ICI; inter-carrier interference) freie Operation zu gewährleisten. N_c und N_{sym} bestimmen den zum Speichern der empfangenen Daten erforderlichen Speicher sowie die Rechenlast für die Entfernungs- und Doppler-Verarbeitung. Beispielsweise erfordert in einem herkömmlichen Eingrößen- (SISO) OFDM-System die Entfernungsverarbeitung N_{sym} IFFT-Operationen der Länge N_c , während die Doppler-Verarbeitung N_c FFT-Operationen der Länge N_{sym} erfordert. Der Speicher für die Speicherung aller empfangenen OFDM-Symbole mit einer beispielhaften Wortlänge von 16 Bit summiert sich zu $2N_c N_{sym} 16/(8 \cdot 10^6)$ Mbyte. Im weiteren Verlauf dieser Offenbarung wird angenommen, dass der Speicher für die Speicherung der empfangenen OFDM-Symbole für die Speicherung der RVM wiederverwendet wird. Die Offenbarung ist jedoch nicht darauf beschränkt.

[0042] Es soll nun erneut auf die vorstehend genannten Haupt-Systemparameter Bezug genommen werden. Die Trägerfrequenz f_c ist üblicherweise festgelegt oder begrenzt darauf, innerhalb eines bestimmten Frequenzbandes zu sein. Die verbleibenden drei Systemparameter können angepasst werden, um adäquate Werte für die vier Performance-Messgrößen zu erhalten. Da es jedoch mehr Performance-Messgrößen als anpassbare Systemparameter gibt, kann nicht jede Performance-Messgröße unabhängig gewählt werden. Im 77 GHz-Band beispielsweise führen adäquate Werte für die Systemparameter zu unnötig großen Werten von R_{max} und/oder v_{max} . Beispielsweise sind für $f_c = 77$ GHz, $T_{cp} = 0.51$ μ s, $B = 1$ GHz, $N_c = 2048$ und $N_{sym} = 4096$ die erreichten Performance-Messgrößen gemäß Gl. (1)-(2): $R_{max} = 307$ m; $\Delta R = 0.15$ m; $v_{max} = \pm 380$ m/s; $\Delta v = 0.19$ m/s. Darüber hinaus ist die Gesamtzeit für die Übertragung des kompletten OFDM-Bursts bei diesem Beispiel $T_d = N_{sym}(T_{cp} + T_0) = 10.5$ ms und die Verarbeitungsverstärkung ist $G_p = 10 \log_{10}(N_{sym}N_c) = 69$ dB. Zunächst wird auf den großen Wert von R_{max} hingewiesen, der noch größer ist, als es für einen typischen Automobil-Langstreckenradar (LRR; long range radar) erforderlich ist. Ferner wird darauf hingewiesen, dass bei diesem Beispiel die maximale Entfernung gemäß den Einschränkungen des zyklischen Präfixes nur 76.5 m ist. Darüber hinaus kann auch v_{max} als viel zu groß für Automobilanwendungen betrachtet werden. Die großen Zahlen von N_c und N_{sym} , die zwar erforderlich sind, um eine bestimmte Entfernungs- und Geschwindigkeitsauflösung zu erreichen, bringen eine große Rechenlast mit sich im Hinblick auf die erforderlichen IFFT/FFT-Operationen für die Entfernungs- und Doppler-Verarbeitung. Schließlich muss der Speicher für die Speicherung der empfangenen OFDM-Symbole für das oben beschriebene Beispiel eine Größe von 33.5 Mbyte aufweisen. Ein so großer Speicher ist in einem Automobil-Radarchip mit Größen- und Kostenbeschränkungen kaum umsetzbar.

[0043] Es gibt mehrere mögliche Verfahren, um einige der genannten Nachteile zu überwinden. Eine Möglichkeit, v_{max} zu verringern, wäre beispielsweise, T_{cp} zu erhöhen. Die Rechenlast und die Speicheranforderungen würden dabei jedoch unberührt bleiben. Eine andere Möglichkeit, v_{max} zu verringern, wäre, nicht jedes einzelne OFDM-Symbol, sondern nur jedes zweite oder dritte zu übertragen, was sowohl die Verarbeitungsverstärkung als auch das SNR verringern würde. Sowohl R_{max} als auch v_{max} können durch Verwerfen der entsprechenden Zeilen und Spalten in der Entfernungs-Geschwindigkeits-Matrix (RVM) reduziert werden. Der große Nachteil dabei ist, dass der zum Speichern der empfangenen OFDM-Symbole erforderliche Speicher unverändert bleibt.

[0044] In dieser Offenbarung wird ein OFDM-Radarempfängersignalverarbeitungskonzept vorgeschlagen, das unnötig große Werte von R_{max} und/oder v_{max} vermeiden kann. Ein solcher OFDM-Radarempfänger kann eine oder mehrere der folgenden vorteilhaften Eigenschaften aufweisen:

- er kann den zum Speichern der empfangenen OFDM-Symbole erforderlichen Speicher (d. h. den Speicher für die Speicherung der RVM) reduzieren,
- er kann Zellen in der RVM verwerfen, die für Automobilanwendungen unnötig sind,
- er kann es den Rechenaufwand für die Ableitung der RVM reduzieren,
- die Geschwindigkeitsauflösung Δv und/oder die Entfernungsauflösung ΔR werden nicht negativ beeinflusst.

[0045] Das vorgeschlagene Konzept wird primär für ein SISO-OFDM-Radarsystem beschrieben. Das Konzept kann auf MIMO-Systeme erweitert werden, wie im Hinblick auf **Fig. 6** beschrieben wird.

[0046] Der Grund für die unnötig großen Werte von v_{max} liegt in der kurzen Zeit $T_{cp} + T_0$, die zum Senden und Empfangen eines OFDM-Symbols benötigt wird. In dem vorstehend genannten Beispiel beträgt diese Zeit nur 2.56 μ s. Daher wird alle 2.56 μ s eine neue Messung durchgeführt. Ein Vergleich dieses Wertes mit einer typischen Chirp-Wiederholzeit in einem frequenzmodulierten Dauerstrich- (FMCW) Radar von 30 bis 60

μ s erklärt die großen Unterschiede in v_{\max} zwischen diesen Radarsystemen. Im betrachteten beispielhaften OFDM-Radarsystem ist $T_{\text{cp}} + T_0$ jedoch zu kurz. Dieses Problem kann durch eine zusätzliche Dezimierung überwunden werden.

[0047] Fig. 2 zeigt ein Flussdiagramm eines grundlegenden Ausführungsbeispiels eines Verfahrens **200** für das Verarbeiten eines OFDM-Radarsignals gemäß der vorliegenden Offenbarung. Der Fachmann, der aus der vorliegenden Offenbarung einen Vorteil zieht, wird erkennen, dass das Verfahren **200** durch eine entsprechend ausgebildete Hardwarevorrichtung durchgeführt werden kann, beispielsweise eine OFDM-Radar-IC, umfassend einen programmierbaren digitalen Signalprozessor, und/oder eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC; application specific integrated circuitry) oder dergleichen.

[0048] Das Verfahren **200** umfasst ein Empfangen **202** einer Mehrzahl von $N_c \times N_{\text{DS}}$ Empfangsabtastwerten, die N_{DS} ($1 \leq N_{\text{DS}} < N_{\text{sym}}$) aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen entsprechen. Wie vorstehend beschrieben wurde, umfasst jedes OFDM-Symbol eine Mehrzahl von N_c Teilträgern, moduliert mit einem jeweiligen Modulationssymbol. Das Verfahren **200** umfasst ferner ein Verarbeiten **204** von jedem der $N_c \times N_{\text{DS}}$ Empfangsabtastwerte durch Division durch sein jeweiliges Modulationssymbol (bekannt aus der $N_c \times N_{\text{sym}}$ Matrix D_{Tx} **188**), um N_{DS} verarbeitete oder normierte OFDM-Symbole zu erzeugen. Das Verfahren **200** umfasst ferner ein Dezimieren **206** der N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbole, um zumindest ein dezimiertes OFDM-Symbol zu erzeugen. Die N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbole können in einer oder zwei Dimensionen (Letzteres, wenn $N_{\text{DS}} \geq 2$) dezimiert werden. Es stehen mehrere mögliche Dezimierungs-Verfahren zur Verfügung, wie beispielsweise ein Verwerfen oder Mitteln bestimmter Elemente der verarbeiteten OFDM-Symbolvektoren, während auch fortgeschrittenere Dezimierungs-Verfahren möglich sind. Das Verfahren **200** umfasst ferner ein Durchführen **208** einer diskreten Fourier-Transformation vom ersten Typ, z. B. einer IFFT oder FFT, von dem zumindest einen dezimierten OFDM-Symbol, um zumindest einen ersten transformierten Vektor zu erzeugen.

[0049] Fig. 3A stellt ein beispielhaftes Ausführungsbeispiel zum Reduzieren von v_{\max} dar.

[0050] Wie im herkömmlichen Fall kann ein Rahmen von N_c von analog zu digital umgewandelten Empfangsabtastwerten **156** über eine FFT **154** transformiert werden, um ein OFDM-Symbol **152-1**, ..., **152- N_c** wiederherzustellen. N_c bezeichnet die Anzahl der OFDM-Teilträger. $N_{\text{DS}} < N_{\text{sym}}$ aufeinanderfolgend empfangene OFDM-Symbole der Länge N_c können in einer Matrix **302** von der Größe $N_c \times N_{\text{DS}}$ gespeichert werden. Geeignete Werte für N_{DS} können 2, 4, 8, ... sein. Die Matrix **302** repräsentiert somit nur $N_{\text{DS}} < N_{\text{sym}}$ aufeinanderfolgende OFDM-Symbole, wobei jedes OFDM-Symbol N_c modulierte Teilträger umfasst. Eine elementweise Division dieser Matrix **302** durch die entsprechenden Einträge der Matrix D_{Tx} **188**, umfassend die übertragenen OFDM-Symbole, führt zu einer $N_c \times N_{\text{DS}}$ Matrix **304**, die N_{DS} normierten oder verarbeiteten OFDM-Symbolen entspricht. Die Matrix **304** kann dann entlang der horizontalen Achse, d. h. der OFDM-Symbolachse, dezimiert werden. Dies kann durch Mittelung der N_{DS} Spaltenvektoren, die N_{DS} normierten oder verarbeiteten OFDM-Symbolen entsprechen, erfolgen, um einen Vektor **306** der Länge N_c zu erzeugen, wobei der Vektor **306** einem dezimierten oder gemittelten OFDM-Symbol entspricht. Diese Prozedur kann wiederholt werden, bis alle N_{sym} übertragenen OFDM-Symbole empfangen und verarbeitet sind. Die resultierende Matrix **307** ist um einen Faktor von N_{DS} kleiner als die endgültige Matrix **190** in Fig. 1B. Die Durchführung von FFT- und IFFT-Operationen an den Zeilen und Spalten dieser kleineren Matrix **307** ergibt eine RVM, die einen reduzierten Wert von v_{\max} aufweist. Die endgültige maximale eindeutige relative Geschwindigkeit eines Objekts nach dieser Prozedur ist $\pm v_{\max}/N_{\text{DS}}$.

[0051] Fig. 3B stellt ein Ausführungsbeispiel zum Reduzieren von R_{\max} dar.

[0052] Die ADC-Abtastwerte **156** werden über eine FFT **154** transformiert, um das empfangene OFDM-Symbol **152-1**, ..., **152- N_c** der Länge N_c zu erhalten. Nach elementweiser Division durch die entsprechende Spalte der Matrix D_{Tx} **188** kann der resultierende normierte OFDM-Symbolvektor **304** von der Länge N_c über eine IFFT transformiert werden, um einen Entfernungsvektor **308**, umfassend Reichweiteninformationen, zu erhalten. Der Entfernungsvektor **308** kann noch immer unnötig große Entfernungs-Bins, entsprechend Distanzen, die für eine bestimmte Radaranwendung nicht von oder von geringerer Relevanz sind, umfassen. Entfernungs-Bins von geringerer Relevanz können beispielsweise sehr große Distanzen umfassen, z. B. über hundert Meter für einige Anwendungen. Somit kann die Anzahl der N_c Elemente des Entfernungsvektors **308** von N_c auf $N_R < N_c$ reduziert werden, um einen verkürzten Entfernungsvektor **310** zu erzeugen, der nur N_R Elemente umfasst, die für die Radaranwendung relevant sind. Beispielsweise kann das Reduzieren der Anzahl von N_c Elementen durch ein vollständiges Verwerfen oder durch ein Kombinieren (z. B. Mitteln) vorbestimmter Elemente des Entfernungsvektors **308** erfolgen, die nicht oder weniger relevant sind. Der verkürzte Entfernungsvektor **310** kann dann in einer Matrix **312** gespeichert werden. Diese Prozedur wird wiederholt, bis alle von N_{sym} übertragenen

OFDM-Symbole empfangen und verarbeitet sind. Die resultierende Matrix **312** ist kleiner als die endgültige Matrix **190** in **Fig. 1B**. Die Durchführung von FFT-Operationen an den Zeilen dieser kleineren Matrix **312** ergibt eine RVM, die einen reduzierten Wert von \mathbf{R}_{\max} aufweist. Die endgültige maximale eindeutige relative Entfernung eines Objekts nach dieser Prozedur ist $\Delta R \cdot N_R$.

[0053] **Fig. 3C** stellt ein Ausführungsbeispiel zum Reduzieren von sowohl \mathbf{v}_{\max} als auch \mathbf{R}_{\max} dar, was eine Kombination der Ausführungsbeispiele der **Fig. 3A, B** ist.

[0054] Eine Mehrzahl von N_{DS} ($1 < N_{DS} < N_{sym}$) aufeinanderfolgend empfangenen OFDM-Symbolen wird in der Matrix **302** der Größe $N_c \times N_{DS}$ gespeichert. Eine elementweise Division dieser Matrix **302** durch die entsprechenden Einträge der Matrix D_{Tx} **188**, umfassend die übertragenen OFDM-Symbole, führt zu einer $N_c \times N_{DS}$ Matrix **304**, die N_{DS} normierten oder verarbeiteten OFDM-Symbolen entspricht. Die Matrix **304** kann dann entlang der horizontalen Achse, d. h. der OFDM-Symbolachse, dezimiert werden. Dies kann durch ein Mitteln der N_{DS} Spaltenvektoren, die N_{DS} normierten oder verarbeiteten OFDM-Symbolen entsprechen, erfolgen, um einen $N_c \times 1$ Vektor **306** zu erzeugen, der einem dezimierten OFDM-Symbol entspricht. Eine IFFT des dezimierten OFDM-Symbols **306** kann durchgeführt werden, um einen Entfernungsvektor **308** zu erzeugen, der N_c Elemente oder Entfernungs-Bins umfasst, anzeigend für eine Distanz von Objekten, von denen das OFDM-Radarsignal reflektiert wurde. Wie vorangehend erwähnt wurde, kann der Entfernungsvektor **308** noch unnötig große Entfernungs-Bins umfassen, die Distanzen entsprechen, die für eine bestimmte Radaranwendung nicht oder weniger relevant sind. Somit kann die Anzahl der N_c Elemente des Entfernungsvektors **308** von N_c auf $N_R < N_c$ reduziert werden, um einen Vektor **310** mit verkürztem Bereich zu erzeugen, der nur N_R Elemente umfasst, die für die Radaranwendung relevant sind. Beispielsweise kann das Reduzieren der Anzahl von N_c Elementen durch ein vollständiges Verwerfen oder durch ein Kombinieren (z. B. Mitteln) vorbestimmter Elemente des Entfernungsvektors **308** erfolgen, die nicht oder weniger relevant sind. Der verkürzte Entfernungsvektor kann dann in einer Matrix $D_{Div,Dec}$ **312** gespeichert werden. Die vorstehend genannten Schritte können wiederholt werden, bis der gesamte Burst von $N_{sym} = n \cdot N_{DS}$ aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen empfangen wurde. Auf diese Weise kann die Matrix $D_{Div,Dec}$ **312** von der Größe $N_R \times (N_{sym}/N_{DS})$ mit $n = N_{sym}/N_{DS}$ verkürzten transformierten Spaltenvektoren **310**, jeweils der Länge N_R , gefüllt werden. Die Größe der Matrix $D_{Div,Dec}$ **312** ist signifikant kleiner als die Matrix D_{Div} in **Fig. 1B**.

[0055] Um Geschwindigkeitsinformationen zu erhalten, können FFTs über die Zeilen der Matrix $D_{Div,Dec}$ **312** durchgeführt werden, um eine Mehrzahl von N_R Geschwindigkeitsvektoren zu erzeugen. Es wird darauf hingewiesen, dass die FFT-Operationen für eine Doppler-Verarbeitung in **Fig. 3** nicht gezeigt sind. Geschwindigkeitsinformationen können dann aus den N_R Geschwindigkeitsvektoren extrahiert werden, wobei die Geschwindigkeitsinformationen anzeigend sind für eine Geschwindigkeit von Objekten, von denen das OFDM-Radarsignal reflektiert wurde. Die Durchführung von FFT-Operationen an den Zeilen von $D_{Div,Dec}$ **312** ergibt die RVM, die einen reduzierten Wert von \mathbf{R}_{\max} und \mathbf{v}_{\max} aufweist. Die endgültige maximale eindeutige Entfernung eines Objekts nach dieser Prozedur ist $\Delta R \cdot N_R$. Die maximale eindeutige relative Geschwindigkeit wird um einen Faktor von N_{DS} reduziert. Die Auflösung der Entfernungs- und Geschwindigkeitsachsen ΔR und Δv sowie T_d bleibt unverändert. Weitere Änderungen werden im Folgenden analysiert.

[0056] Rechenkomplexität: Die Anzahl der für die Entfernungsverarbeitung erforderlichen IFFT-Operationen kann um einen Faktor von N_{DS} reduziert werden. Die IFFT-Länge N_c kann unverändert bleiben. Die Anzahl der FFT-Operationen für die Doppler-Verarbeitung kann von N_c auf N_R reduziert werden. Auch die entsprechende FFT-Länge kann um einen Faktor von N_{DS} reduziert werden.

[0057] Speicher: Die endgültige RVM kann eine Größe von $N_R \times N_{sym}/N_{DS}$ aufweisen. Mit einer Wortlänge von 16 Bit werden $2N_R N_{sym} 16 / (N_{DS} 8 \cdot 10^6)$ Mbyte zum Speichern benötigt. Man könnte auch den für das Speichern der N_{DS} aufeinanderfolgend empfangenen OFDM-Symbole erforderlichen Speicher berücksichtigen. Da jedoch bei einer tatsächlichen Implementierung die Größe dieses Speichers von dem verwendeten Dezimierungs-Verfahren abhängen kann und da N_{DS} für gewöhnlich möglicherweise nicht größer als 10 sein kann, kann dieser Speicher vernachlässigt werden.

[0058] Signal-Rausch-Verhältnis (SNR): Die Auswirkungen auf das SNR hängen von dem verwendeten Dezimierungs-Verfahren ab. Im nächsten Abschnitt wird eine SNR-Analyse für den Beispielfall, wenn einfaches Mitteln zur Dezimierung verwendet wird, vorgestellt. Dies erfolgt für $N_{DS} = 2$ und $N_{DS} = 4$.

[0059] Es soll nun erneut auf das vorstehend erörterte Beispiel Bezug genommen werden. Die Performance-Messgrößen und Implementierungsdetails des vorgeschlagenen Konzepts werden mit denen eines Standardempfängers in Tab. I für $N_R = 512$ und für $N_{DS} = 4$ verglichen.

Tab. I

Parameter	StandardVerfahren	Vorgeschlagenes Verfahren
R_{\max} [m]	307	76.8
ΔR [m]	0.15	0.15
v_{\max} [m/s]	± 380	± 95.2
Δv [m/s]	0.19	0.19
# IFFT-Oper. zur Entfernungs-Verarb.	4096	1024
IFFT-Länge zur Entfernungs-Verarb.	2048	2048
# IFFT-Oper. zur Doppler-Verarb.	2048	512
IFFT-Länge zur Doppler-Verarb.	4096	1024
Speicher für RVM @ 16 bit [Mbyte]	33.5	2.13

[0060] Es sollte auf die signifikante Reduzierung des erforderlichen Speichers und der Rechenlast hingewiesen werden. Als eine weitere Konsequenz können auch die Chipgröße einer entsprechenden OFDM-Radar-IC und der Leistungsverbrauch durch das vorgeschlagene Verfahren signifikant reduziert werden.

[0061] Die Matrix **302**, die N_{DS} aufeinanderfolgend empfangene OFDM-Symbole umfasst, wird elementweise dividiert durch die entsprechenden Spalten der Matrix **188**, umfassend die übertragenen OFDM-Symbole. Die resultierende Matrix **304** von der Größe $N_c \times N_{DS}$ wird als M bezeichnet. Das Dezimieren dieser Matrix entlang der horizontalen Achse ergibt einen Vektor der Länge N_c , der als \mathbf{v}_{Dec} bezeichnet wird. Die Spalten von M umfassen mehrere komplexe Oszillationen, deren Frequenzen proportional zu den Distanzen der Objekte sind. Der Fokus liegt nun auf einer beliebigen Zeile von M , deren Elemente bezeichnet sind als $m_1, \dots, m_{N_{DS}} \in \mathbb{C}$. Für ein einzelnes Objekt bei $\pm v_{\max}$ wird die Phasendifferenz zwischen m_i und m_{i+1} durch $\pm\pi$ ($1 \leq i < N_{DS}$) begrenzt. Da das vorgeschlagene Konzept \mathbf{v}_{\max} um einen Faktor von N_{DS} reduzieren kann, wird die Phasendifferenz zwischen m_i und m_{i+1} durch $\pm\pi/N_{DS}$ für ein einzelnes Objekt begrenzt. Mögliche Werte von $m_1, \dots, m_{N_{DS}}$ sind in **Fig. 4** für $N_{DS} = 2$ und für $N_{DS} = 4$ visualisiert.

[0062] In **Fig. 4** bezeichnet A die Größe von m_i im rauschfreien Fall. Für dieses Szenario mit einem sich sehr schnell bewegenden Objekt verringert ein Mitteln die Signalleistung von A^2 auf $1/2A^2$ für den Fall von $N_{DS} = 2$ und auf $A^2(1 + \sqrt{2})/(2^5/2)$ für den Fall von $N_{DS} = 4$. Jedoch verringert sich auch die Rauschleistung durch die Rauschvarianz σ^2 aufgrund des Mittelns. Tatsächlich reduziert sich die Rauschvarianz auf $1/2 \sigma^2$ für $N_{DS} = 2$ und auf $1/4 \sigma^2$ für $N_{DS} = 4$. Insgesamt bleibt das SNR für den betrachteten Fall eines einzelnen sich schnell bewegenden Objekts unverändert für $N_{DS} = 2$ und man beobachtet eine Verstärkung im SNR von 2.32 dB für $N_{DS} = 4$. Ein Wiederholen der Berechnungen für ein Objekt mit relativer Geschwindigkeit Null lässt eine SNR-Verstärkung durch das Mitteln von 3.01 dB für $N_{DS} = 2$ und von 6.02 dB für $N_{DS} = 4$ erkennen. Andererseits weist das vorgeschlagene OFDM-Radarsignalverarbeitungsschema eine verringerte FFT-Länge des Doppler-Verarbeitungs-Blocks auf. Dadurch verringert sich die Verarbeitungsverstärkung der FFT. Da die FFT-Länge um einen Faktor von N_{DS} verringert wird, wird das SNR um 3.01 dB für $N_{DS} = 2$ und um 6.02 dB für $N_{DS} = 4$ reduziert. Ein Vergleich der Verstärkung im SNR durch Mitteln und des Verlusts im SNR aufgrund einer reduzierten Verarbeitungsverstärkung der Doppler-FFT zeigt, dass das SNR für Objekte mit relativer Geschwindigkeit Null unverändert bleibt. Für Objekte mit $\pm v_{\max}$ relativer Geschwindigkeit beobachtet man einen Nettoverlust im SNR von 3.01 dB für $N_{DS} = 2$ und von 3.7 dB für $N_{DS} = 4$. Diese theoretische SNR-Analyse wurde für ein Einzelobjekt-Szenario durchgeführt.

[0063] Simulationen wurden durchgeführt, um das SNR-Verhalten des vorgeschlagenen OFDM-Empfängersignalverarbeitungsschemas für Szenarien mit vielen Objekten im Sichtfeld zu analysieren. Um die Simulationszeit angemessen zu halten, wurden die Parameter des OFDM-Systems wie folgt gewählt: Trägerfrequenz $f_c = 77$ GHz, Bandbreite $B = 500$ MHz, Anzahl der Teilträger $N_c = 512$, Anzahl der aufeinanderfolgend übertragenen OFDM-Symbole $N_{sym} = 512$, Länge des zyklischen Präfixes $T_{cp} = 0.51 \mu s$, Sendeleistung $P_{Tx} = 12$ dBm, Rauschzahl $NF = 5$ dB, Antennenverstärkungen $G_{Tx} = G_{Rx} = 4$ dB. Mit diesen Einstellungen sind die Performance-Messgrößen: $R_{\max} = 153$ m; $\Delta R = 0.3$ m; $v_{\max} = \pm 635$ m/s; $\Delta v = 2.48$ m/s. Zusätzlich ist die maximale Entfernung gemäß den Einschränkungen des zyklischen Präfixes 76.5 m und die maximale relative Geschwindigkeit für eine annähernd ICI-freie Operation ist 190 m/s.

[0064] In den Simulationen gibt es ein Hauptobjekt, das zum Bewerten des SNR verwendet wird. Dieses Hauptobjekt ist in einer Distanz von 10 m positioniert und seine relative Geschwindigkeit v_{rel} wird von $-v_{\text{max}}/N_{\text{DS}}$ bis $v_{\text{max}}/N_{\text{DS}}$ variiert. Der Radarquerschnitt (RCS; radar cross section) dieses Hauptobjekts ist 1 m^2 . Darüber hinaus gibt es 30 andere Objekte im Sichtfeld, deren Parameter für jeden Simulationslauf beliebig erzeugt wurden. Die Entfernungen wurden beliebig zwischen 2 und 75 m gewählt, die relativen Geschwindigkeiten wurden beliebig zwischen $\pm v_{\text{max}}/N_{\text{DS}}$ gewählt und die RCSs wurden beliebig zwischen 0 und 2 m^2 gewählt. Das Grundrauschen wurde durch Mitteln über die RVM bei Entfernungen größer als 80 m bewertet. Aus diesem Grund wird die Anzahl der Entfernungs-Bins N_{R} konstant gehalten bei N_{C} . Die Signalleistung wird durch die maximale quadrierte Magnitude des dem Hauptobjekt entsprechenden Signalhügels approximiert.

[0065] In der ersten Simulation führt $N_{\text{DS}} = 2$ zu einer Reduzierung der maximalen relativen Geschwindigkeit von ± 63.5 auf $\pm 317.5 \text{ m/s}$. Das SNR des Hauptobjekts für ein Standard-OFDM-System und das vorgeschlagene OFDM-Empfängersignalverarbeitungsschema werden in **Fig. 5** verglichen. Man sieht, dass der Verlust im SNR durch den Dezimierungsschritt 3 dB für Objekte mit sehr hoher relativer Geschwindigkeit ist. Für Objekte mit geringer relativer Geschwindigkeit ist der Verlust im SNR vernachlässigbar. Somit bleibt der für ein einzelnes Objekt abgeleitete SNR-Verlust in Multiobjekt-Szenarien annähernd unverändert. In der zweiten Simulation wird N_{DS} auf 4 erhöht. Die resultierenden SNR-Kurven sind auch in **Fig. 5** gezeigt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Gesamt-SNR-Werte im Vergleich mit der ersten Simulation gestiegen sind. Der Grund dafür ist, dass es in der ersten Simulation Objekte gibt, die schneller sind als die Grenze für eine annähernd ICI-freie Operation, was das Grundrauschen effektiv erhöht. Außerdem gilt der analytisch in Sec. III für $N_{\text{DS}} = 4$ abgeleitete Verlust im SNR auch im Multiobjekt-Fall.

[0066] Fortgeschrittenere Verfahren zur Dezimierung können den Verlust im SNR verringern. Beispielsweise könnte man die RVM in drei Blöcke trennen für große negative, kleine und große positive Werte der relativen Geschwindigkeit. Der mittlere Teil wird wie in dieser Arbeit vorgeschlagen berechnet. Der erste und dritte Block werden bewertet, indem die Vektoren in **Fig. 4** vor dem Mitteln entsprechend derotiert werden.

[0067] Das vorgeschlagene Konzept kann zu einer signifikanten Reduzierung der Speichergröße und Rechenlast führen. Dadurch kann eine signifikante Reduzierung des Leistungsverbrauchs und der Chipfläche eines OFDM-Radarchips erreicht werden. Ferner kann ein kleiner Bruchteil dieser Vorteile reinvestiert werden, um das SNR an einer anderen Stelle des Chips zu erhöhen. Beispielsweise kann durch eine Erhöhung der ADC-Auflösung um 1 Bit eine SNR-Verstärkung von 6 dB erreicht werden. Diese SNR-Verstärkung in Kombination mit dem SNR-Verlust des vorgeschlagenen Verfahrens würde in einer Nettoverstärkung im SNR von annähernd 3 bis 6 dB resultieren. Für das vorstehend erörterte Beispiel erscheint der maximale Verlust im SNR von $\approx 3.7 \text{ dB}$ für Objekte bei $v_{\text{rel}} = \pm 95 \text{ m/s}$. Dieser Wert der relativen Geschwindigkeit ist sogar für Automobilradarsysteme noch recht hoch. Man könnte die Auswirkung des SNR-Verlustes auf die Performance des Systems minimieren, indem man das OFDM-Radarsystem so entwirft, dass der Verlust im SNR für erwartete Werte der relativen Geschwindigkeit beherrschbar ist. Bei diesem speziellen Beispiel kann $N_{\text{DS}} = 2$ gewählt werden. Dies zu tun würde den Verlust im SNR für Objekte mit $v_{\text{rel}} = \pm 95 \text{ m/s}$ auf nur ungefähr 0.2 dB minimieren. Ein Nachteil wäre, dass der zum Speichern der empfangenen OFDM-Symbole erforderliche Speicher von 2.13 auf 4.26 Mbyte steigt.

[0068] Wie vorstehend bereits erwähnt wurde, kann das vorgeschlagene Konzept auch für MIMO-OFDM-Radarsysteme verwendet werden. Bei einem MIMO-Radar sind mehrere Sende- und Empfangsantennen in einem Radarsensor integriert, was eine Schätzung der Ankunftsrichtung (DOA; direction of arrival) von auftretenden Signalen erlaubt. Die Anzahl der Sende-(Tx) Antennen kann als N_{TX} bezeichnet werden und die Anzahl der Empfangs-(Rx) Antennen kann als N_{RX} bezeichnet werden.

[0069] Für die DOA-Schätzung sollten die Tx Signale an den Empfängern trennbar sein. Dies kann beispielsweise durch eine Übertragung orthogonaler Signale erreicht werden. Bei einem OFDM-Radar ist ein Ansatz zur Erzeugung orthogonaler Signale, jeder Tx-Antenne eine einmalige Teilmenge von Teilträgern zuzuordnen. Eine mögliche Zuweisung der Teilträger zu den Tx-Antennen ist eine einheitliche Zuweisung, wobei die erste Tx-Antenne (Tx1) Teilträger mit den Indizes $1+k \cdot N_{\text{TX}}$ verwendet, Tx2 die Teilträger mit den Indizes $2+k \cdot N_{\text{TX}}$ verwendet und so weiter ($k=0,1,2,\dots$). Eine solche einheitliche Zuweisung ist in **Fig. 6** angezeigt. Der Fachmann auf dem Gebiet, der einen Vorteil aus der vorliegenden Offenbarung zieht, wird jedoch erkennen, dass für das allgemeine MIMO-Konzept mehrere Variationen möglich sind, zum Beispiel eine uneinheitliche Zuweisung von Teilträgern.

[0070] Wie in **Fig. 6** gezeigt, sind die übertragenen OFDM-Symbole in einer Matrix angeordnet, alle Tx-Antennen abdeckend. Auf der Empfängerseite müssen N_{RX} Datenströme der N_{RX} Empfangsantennen verarbei-

tet werden. Für jeden Datenstrom können N_{DS} aufeinanderfolgend empfangene OFDM-Symbole in einer jeweiligen Matrix **602** der Größe $N_c \times N_{DS}$ gespeichert werden. Jede dieser Matrizen **602-1** bis **602- N_{RX}** kann durch elementweise Division durch die entsprechenden Spalten von D_{TX} **188** verarbeitet werden, um normierte Matrizen **604-1** bis **604- N_{RX}** zu erhalten. Jede einzelne dieser Matrizen **604-1** bis **604- N_{RX}** kann entlang der horizontalen Achse dezimiert werden, was N_{RX} Vektoren **606-1** bis **606- N_{RX}** der Länge N_c ergibt. Dann können diese Vektoren **606-1** bis **606- N_{RX}** in $N_{TX} \cdot N_{RX}$ Vektoren der Länge N_c/N_{TX} getrennt werden, wobei jeder einzelne einer Übertragung von einer der Tx-Antennen zu einer der Rx-Antennen entspricht. Die Anwendung von inversen Fast-Fourier-Transformationen (IFFT) auf diese Vektoren kann die Reichweiteninformationen wiederherstellen. Die maximale eindeutige Entfernung, der von diesen Vektoren abgedeckt wird, kann für Automobilanwendungen zu groß sein. Somit können diese Vektoren auf eine Länge $N_R < N_c/N_{TX}$ dezimiert werden, bevor sie in $N_{TX} \cdot N_{RX}$ Matrizen gespeichert werden. Die endgültige Größe dieser Matrizen ist $N_R \times N_{sym}/N_{DS}$. Die Anwendung von FFT-Operationen auf jede Zeile kann $N_{TX} \cdot N_{RX}$ RVMS der Größe $N_R \times N_{sym}/N_{DS}$ ergeben.

[0071] Somit kann bei einigen auf einen MIMO-OFDM-Radar bezogenen Ausführungsbeispielen eine erste Teilmenge der N_c Teilträger einer ersten Sendeantenne zugeordnet sein und eine zweite Teilmenge der N_c Teilträger kann einer zweiten Sendeantenne zugeordnet sein. Der Schritt **202** des Empfangens der Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten kann ein Empfangen von $N_c \times N_{DS}$ Abtastwerten bei jeder von einer Mehrzahl von Empfangsantennen umfassen. Bei Schritt **204** kann das Verfahren **200** ein Erzeugen von zumindest einem dezimierten OFDM-Symbol für jedes Sende-Empfangs-Antennenpaar umfassen. Schritt **208** kann ein Durchführen, für jedes Sende-Empfangs-Antennenpaar, einer diskreten Fourier-Transformation (z. B. IFFT) vom ersten Typ von dem jeweiligen dezimierten OFDM-Symbol umfassen, um einen jeweiligen ersten transformierten Vektor zu erzeugen.

[0072] Mögliche Variationen des vorgeschlagenen Verfahrens zur Reduzierung der Speicheranforderungen und der Rechenkomplexität umfassen:

- Die Dezimierung entlang der N_{DS} Symbole kann nach dem Trennschritt ausgeführt werden.
- Der Dezimierungsschritt zur Reduzierung der maximalen eindeutigen Entfernung kann durch eine Filter- und Dezimierungsprozedur vor der IFFT zur Entfernungsverarbeitung ersetzt werden.

[0073] Fig. 7 und Fig. 8 stellen eine mögliche Variation des Verfahrens der Fig. 2 und Fig. 3 dar.

[0074] Ähnlich wie das Verfahren **200** umfasst das dargestellte beispielhafte Verfahren **700** zum Verarbeiten eines OFDM-Radarsignals ein Empfangen **702** einer Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten, entsprechend N_{DS} ($1 \leq N_{DS} < N_{sym}$) aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen, wobei jedes OFDM-Symbol eine Mehrzahl von N_c Teilträgern umfasst, moduliert mit einem entsprechenden Modulationssymbol. Bei Schritt **704** wird jeder von der Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten durch sein jeweiliges Modulationssymbol dividiert, um N_{DS} verarbeitete OFDM-Symbole zu erzeugen. Im Unterschied zu dem Verfahren **200** von Fig. 2, wird durch das Verfahren **700** dann zuerst eine diskrete Fourier-Transformation (z. B. IFFT) der N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbole durchgeführt **706**, um N_{DS} jeweilige transformierte Vektoren zu erzeugen. Danach werden die N_{DS} transformierten Vektoren dezimiert, um zumindest einen dezimierten transformierten Vektor zu erzeugen. Die Dezimierung kann durch Verwerfen oder Kombinieren spezifischer Elemente des zumindest einen dezimierten transformierten Vektors erfolgen. Das heißt, in Verfahren **700** wurden die Schritte der Durchführung der diskreten Fourier-Transformation vom ersten Typ und Dezimierung im Hinblick auf Verfahren **200** umgekehrt. Wieder wird der Fachmann, der aus der vorliegenden Offenbarung einen Vorteil zieht, erkennen, dass das Verfahren **700** durch eine entsprechend ausgebildete Hardwarevorrichtung ausgeführt werden kann, beispielsweise eine OFDM-Radar-IC, umfassend einen programmierbaren digitalen Signalprozessor, und/oder eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC; application specific integrated circuitry) oder dergleichen.

[0075] Wie in Fig. 8 gezeigt, kann ein Rahmen von N_c von analog zu digital umgewandelten Empfangsabtastwerten über eine FFT transformiert werden, um ein OFDM-Symbol wiederherzustellen. N_c bezeichnet die Anzahl der OFDM-Teilträger. Es werden jedoch nur $N_{DS} < N_{sym}$ aufeinanderfolgend empfangenen OFDM-Symbole in der Matrix **302** der Größe $N_c \times N_{DS}$ gespeichert. Die Matrix **302** repräsentiert somit nur N_{DS} aufeinanderfolgende OFDM-Symbole, wobei jedes OFDM-Symbol N_c modulierte Teilträger umfasst. Eine elementweise Division dieser Matrix **302** durch die entsprechenden Einträge der Matrix D_{TX} **188**, umfassend die übertragenen OFDM-Symbole, führt zu einer $N_c \times N_{DS}$ Matrix **304**, die N_{DS} normierten oder verarbeiteten OFDM-Symbolen entspricht. IFFT-Operationen werden an den Spalten der Matrix **304** durchgeführt, um eine Matrix **706**, umfassend N_{DS} Entfernungsvektoren, zu erhalten, jeweils umfassend N_c Elemente oder Entfernungs-Bins, die anzeigend für eine Distanz von Objekten sind, von denen das OFDM-Radarsignal reflektiert wurde. Die Matrix **706** kann dann entlang der horizontalen Achse, d. h. der OFDM-Symbolachse, dezimiert werden.

Dies kann durch Mitteln der \mathbf{N}_{DS} Spaltenvektoren erfolgen, die den \mathbf{N}_{DS} Entfernungsvektoren entsprechen, um einen $N_C \times 1$ Entfernungsvektor **310** zu erzeugen, der ferner durch Verwerfen oder Kombinieren von Entfernungs-Bins von keinem oder weniger Interesse auf eine Länge \mathbf{N}_R reduziert werden kann. Die vorstehend genannten Schritte können wiederholt werden, bis der gesamte Burst von $N_{sym} = n \cdot N_{DS}$ aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen empfangen wurde. Auf diese Weise kann eine Matrix **312** der Größe $N_R \times (N_{sym}/N_{DS})$ mit $n = N_{sym}/N_{DS}$ Entfernungsvektoren **310**, je der Länge \mathbf{N}_R , gefüllt werden. Um Geschwindigkeitsinformationen zu erhalten, können FFTs über die Zeilen der Matrix **312** durchgeführt werden, um eine Mehrzahl von \mathbf{N}_R Geschwindigkeitsvektoren zu erzeugen. Es wird darauf hingewiesen, dass die FFT-Operationen für eine Doppler-Verarbeitung in **Fig. 8** nicht gezeigt sind.

[0076] Einige Beispiele für die Reduzierung unnötig großer Werte von \mathbf{v}_{max} und/oder \mathbf{R}_{max} wurden vorstehend beschrieben. Es gibt zahlreiche Variationen dieser Konzepte, von denen einige im Folgenden aufgeführt sind.

[0077] Konzept zur Reduzierung von \mathbf{v}_{max} :

- \mathbf{N}_{DS} kann theoretisch variiert werden zwischen 1 und \mathbf{N}_{sym} .
- Die Dezimierung kann auch vor der elementweisen Division durchgeführt werden. Dies kann erfolgen, wenn die Dezimierung auch für die entsprechenden übertragenen Symbole erfolgt, oder wenn zumindest \mathbf{N}_{DS} äquivalente OFDM-Symbole aufeinanderfolgend übertragen werden.
- Die Dezimierungsoperation kann eine Summierung, gewichtete Summierung, Mittelwertbildung oder Resampling umfassen.
- Wenn mehr als \mathbf{N}_{DS} aufeinanderfolgend empfangene OFDM-Symbole vor oder nach der elementweisen Division gespeichert werden, kann der Ausgang des Dezimierungsschritts eine Matrix sein.
- Das Speichern des dezimierten Vektors kann nach der IFFT-Operation zur Entfernungsverarbeitung erfolgen.

[0078] Konzept zur Reduzierung von \mathbf{R}_{max} :

- \mathbf{N}_R kann theoretisch variiert werden zwischen 1 und \mathbf{N}_C .
- Das Verwerfen von großen Entfernungs-Bins kann durch eine Dezimierungsoperation oder Resampling vor der **IFFT** für die Entfernungsverarbeitung ersetzt werden. Dies zu tun kann den Vorteil haben, dass die Länge der **IFFT** reduziert werden kann. Dann kann die Dezimierung vor der elementweisen Division durchgeführt werden. Dies kann erfolgen, wenn die Dezimierung auch für das entsprechende übertragene Symbol erfolgt.
- Die IFFT-Operation für die Entfernungsverarbeitung und das Verwerfen von großen Entfernungs-Bins kann durch eine Chirp-Z-Transformation oder durch mehrere parallele gleitende DFTs ersetzt werden.

[0079] Konzept zur Reduzierung von \mathbf{v}_{max} und \mathbf{R}_{max} :

- Abhängig von der konkreten Realisierung der Dezimierungsoperation können die IFFT-Operation zur Entfernungsverarbeitung und der Dezimierungsschritt ausgetauscht werden. Dann kann der Dezimierungsschritt nach dem Verwerfen von großen Entfernungs-Bins ausgeführt werden.

[0080] In dieser Offenbarung wurde ein neuartiges OFDM-Empfängersignalverarbeitungsschema vorgeschlagen. Das Konzept kann viele vorteilhafte Eigenschaften bieten, wie beispielsweise einen reduzierten erforderlichen Speicher, eine Reduzierung des Rechenaufwands sowie eine Reduzierung unnötig großer Werte der maximalen eindeutigen Entfernung und der relativen Geschwindigkeit. Als eine weitere Konsequenz können auch die Chipgröße und der Leistungsverbrauch eines OFDM-Radarchips reduziert werden.

[0081] Die Aspekte und Merkmale, die zusammen mit einem oder mehreren der vorstehend detaillierten Beispiele und Figuren erwähnt und beschrieben wurden, können auch mit einem oder mehreren der anderen Beispiele kombiniert werden, um ein gleiches Merkmal des anderen Beispiels zu ersetzen oder um das Merkmal in das andere Beispiel zusätzlich einzuführen.

[0082] Obwohl spezifische Ausführungsbeispiele hierin dargestellt und beschrieben wurden, werden Fachleute auf dem Gebiet erkennen, dass eine Vielzahl von alternativen und/oder äquivalenten Implementierungen für die spezifischen gezeigten und beschriebenen Ausführungsbeispiele ausgetauscht werden kann, ohne von dem Schutzbereich der vorliegenden Erfindung abzuweichen. Diese Anmeldung soll jegliche Anpassungen

oder Variationen der spezifischen Ausführungsbeispiele, die hierin erörtert wurden, abdecken. Daher ist es die Absicht, dass diese Erfindung nur durch die Ansprüche und deren Entsprechungen eingeschränkt ist.

[0083] Ein als „Mittel für...“ bezeichneter Funktionsblock, der eine bestimmte Funktion durchführt, kann sich auf eine Schaltung beziehen, die zum Durchführen einer bestimmten Funktion ausgebildet ist. Somit kann ein „Mittel für etwas“ als ein „Mittel ausgebildet für oder geeignet für etwas“ implementiert sein, z. B. eine Vorrichtung oder eine Schaltung, die ausgebildet ist für oder geeignet ist für die jeweilige Aufgabe.

[0084] Funktionen verschiedener in den Figuren gezeigter Elemente, umfassend jegliche als „Mittel“, „Mittel zum Bereitstellen eines Sensorsignals“, „Mittel zum Erzeugen eines Sendesignals“, etc. bezeichneten Funktionsblöcke, können in Form von dedizierter Hardware, z. B. „eines Signalanbieters“, „einer Signalverarbeitungseinheit“, „eines Prozessors“, „einer Steuerung“ etc. sowie als Hardware fähig zum Ausführen von Software in Verbindung mit zugehöriger Software implementiert sein. Bei Bereitstellung durch einen Prozessor können die Funktionen durch einen einzelnen dedizierten Prozessor, durch einen einzelnen gemeinschaftlich verwendeten Prozessor oder durch eine Mehrzahl von individuellen Prozessoren bereitgestellt sein, von denen einige oder von denen alle gemeinschaftlich verwendet werden können. Allerdings ist der Begriff „Prozessor“ oder „Steuerung“ bei Weitem nicht auf ausschließlich zur Ausführung von Software fähige Hardware begrenzt, sondern kann Digitalsignalprozessor- (DSP; digital signal processor) Hardware, Netzprozessor, anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC), feldprogrammierbares Gate-Array (FPGA; field programmable gate array), Nurlesespeicher (ROM; read only memory) zum Speichern von Software, Direktzugriffsspeicher (RAM; random access memory) und nichtflüchtige Speicher umfassen. Sonstige Hardware, herkömmliche und/oder kundenspezifische, kann auch umfasst sein.

[0085] Ein Blockdiagramm kann zum Beispiel ein detailliertes Schaltungsdiagramm darstellen, das die Grundsätze der Offenbarung implementiert. Auf ähnliche Weise können ein Flussdiagramm, ein Ablaufdiagramm, ein Zustandsübergangdiagramm, ein Pseudocode und dergleichen verschiedene Prozesse, Operationen oder Schritte repräsentieren, die zum Beispiel im Wesentlichen in computerlesbarem Medium repräsentiert und so durch einen Computer oder Prozessor ausgeführt werden können, ungeachtet dessen, ob ein solcher Computer oder Prozessor explizit gezeigt ist oder nicht. In der Beschreibung oder in den Patentansprüchen offenbarte Verfahren können durch eine Vorrichtung implementiert werden, die ein Mittel zum Ausführen eines jeden der jeweiligen Schritte dieser Verfahren aufweist.

[0086] Es versteht sich, dass die Offenbarung mehrerer Handlungen, Prozesse, Operationen, Schritte oder Funktionen, die in der Beschreibung oder in den Ansprüchen offenbart sind, nicht als in der bestimmten Reihenfolge befindlich ausgelegt werden sollen, außer anderes ist explizit oder implizit, beispielsweise aus technischen Gründen, angegeben. Daher werden diese durch die Offenbarung von mehreren Schritten oder Funktionen nicht auf eine bestimmte Reihenfolge begrenzt, es sei denn, dass diese Schritte oder Funktionen aus technischen Gründen nicht austauschbar sind. Ferner kann bei einigen Beispielen eine einzelne Handlung, Funktion, Prozess, Operation oder Schritt jeweils mehrere Teilhandlungen, -funktionen, -prozesse, -operationen oder -schritte umfassen und/oder in dieselben aufgebrochen sein. Solche Teilschritte können umfasst sein und Teil der Offenbarung dieses Einzelschritts sein, sofern sie nicht explizit ausgeschlossen sind.

[0087] Ferner sind die folgenden Ansprüche hiermit in die detaillierte Beschreibung aufgenommen, wo jeder Anspruch als getrenntes Beispiel für sich stehen kann. Während jeder Anspruch als getrenntes Beispiel für sich stehen kann, ist zu beachten, dass - obwohl ein abhängiger Anspruch sich in den Ansprüchen auf eine bestimmte Kombination mit einem oder mehreren anderen Ansprüchen beziehen kann - andere Beispiele auch eine Kombination des abhängigen Anspruchs mit dem Gegenstand jedes anderen abhängigen oder unabhängigen Anspruchs umfassen können. Solche Kombinationen werden hierin explizit vorgeschlagen, sofern nicht angegeben ist, dass eine bestimmte Kombination nicht beabsichtigt ist. Ferner sollen auch Merkmale eines Anspruchs für jeden anderen unabhängigen Anspruch umfasst sein, selbst wenn dieser Anspruch nicht direkt abhängig von dem unabhängigen Anspruch gemacht ist.

Patentansprüche

1. Ein Verfahren (200) zum Verarbeiten eines OFDM-Radarsignals, das Verfahren umfassend:
Empfangen (202) einer Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten, die einer Anzahl von N_{DS} aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen entsprechen, wobei jedes OFDM-Symbol eine Mehrzahl von N_c Teilträgern umfasst, moduliert mit einem jeweiligen Modulationssymbol;
Verarbeiten (204) von jedem der Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten durch Division durch sein jeweiliges Modulationssymbol, um eine Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen zu erzeugen;

- Dezimieren (206) der Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen, um zumindest ein dezimiertes OFDM-Symbol zu erzeugen; und
Durchführen (208) einer diskreten Fourier-Transformation vom ersten Typ von dem zumindest einen dezimierten OFDM-Symbol, um zumindest einen ersten transformierten Vektor (308) zu erzeugen.
2. Das Verfahren (200) gemäß Anspruch 1, wobei das Dezimieren (206) der Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen ein Reduzieren der Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbole auf eine Anzahl niedriger als N_{DS} umfasst.
 3. Das Verfahren (200) gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei das Dezimieren (206) der Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen ein Mitteln der N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbole umfasst.
 4. Das Verfahren (200) gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, ferner umfassend:
Extrahieren von Reichweiteninformationen aus dem zumindest einen ersten transformierten Vektor (308), wobei die Reichweiteninformationen anzeigend sind für eine Distanz von Objekten, von denen das OFDM-Radarsignal reflektiert wurde.
 5. Das Verfahren (200) gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, ferner umfassend:
Reduzieren einer Anzahl von N_c Elementen von dem zumindest einen ersten transformierten Vektor (308) auf $N_R < N_c$, um zumindest einen verkürzten transformierten Vektor (310), umfassend N_R -Elemente, zu erzeugen.
 6. Das Verfahren (200) gemäß Anspruch 5, wobei das Reduzieren der Anzahl von N_c Elementen ein Verwerfen oder Kombinieren von vorbestimmten Elementen von dem zumindest einen ersten transformierten Vektor (308) umfasst.
 7. Das Verfahren (200) gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, ferner umfassend ein Wiederholen der Schritte (202; 204; 206; 208) des Verfahrens (200) gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bis eine Anzahl von $N_{sym} = n \cdot N_{DS}$ aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen empfangen wurde.
 8. Das Verfahren (200) gemäß Anspruch 7, ferner umfassend Durchführen einer diskreten Fourier-Transformation vom zweiten Typ über Zeilen einer Matrix (312) $D_{Div,Dec}$, wobei die Matrix $D_{Div,Dec}$ n Spalten von n aufeinanderfolgenden ersten transformierten Vektoren umfasst, um eine Anzahl von zweiten transformierten Vektoren zu erzeugen.
 9. Das Verfahren (200) gemäß Anspruch 8, wobei die Matrix $D_{Div,Dec}$ $N_R < N_c$ Zeilen und $n = N_{sym}/N_{DS}$ Spalten umfasst, wobei N_R einer reduzierten Anzahl von Elementen von jedem von den n aufeinanderfolgenden ersten transformierten Vektoren (310) entspricht.
 10. Das Verfahren (200) gemäß einem der Ansprüche 7 bis 9, ferner umfassend:
Extrahieren von Geschwindigkeitsinformationen aus den zweiten transformierten Vektoren, wobei die Geschwindigkeitsinformationen anzeigend sind für eine Geschwindigkeit von Objekten, von denen das OFDM-Radarsignal reflektiert wurde.
 11. Das Verfahren (200) gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wobei eine erste Teilmenge der N_c Teilträger einer ersten Sendeantenne zugeordnet ist und eine zweite Teilmenge der N_c Teilträger einer zweiten Sendeantenne zugeordnet ist, und wobei ein Empfangen der Anzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten ein Empfangen von $N_c \times N_{DS}$ Abtastwerten an jeder von einer Mehrzahl von Empfangsantennen umfasst, wobei das Verfahren (200) Folgendes umfasst
Erzeugen von zumindest einem dezimierten OFDM-Symbol für jedes Sende-Empfangs-Antennenpaar; und
Durchführen, für jedes Sende-Empfangs-Antennenpaar, einer diskreten Fourier-Transformation von dem jeweiligen dezimierten OFDM-Symbol, um einen jeweiligen ersten transformierten Vektor zu erzeugen.
 12. Ein Verfahren (700) zum Verarbeiten eines OFDM-Radarsignals, das Verfahren umfassend:
Empfangen (702) einer Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten, die einer Anzahl von N_{DS} aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen entsprechen, wobei jedes OFDM-Symbol eine Mehrzahl von N_c Teilträgern umfasst, moduliert mit einem jeweiligen Modulationssymbol;
Verarbeiten (704) von jedem von der Mehrzahl von $N_c \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten durch Division durch sein jeweiliges Modulationssymbol, um eine Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen zu erzeugen;
Durchführen (706) einer diskreten Fourier-Transformation vom ersten Typ von der Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen, um eine Anzahl von N_{DS} jeweiligen transformierten Vektoren zu erzeugen; und

Dezimieren (708) der Anzahl von N_{DS} transformierten Vektoren, um zumindest einen dezimierten transformierten Vektor zu erzeugen.

13. Das Verfahren (700) gemäß Anspruch 12, wobei das Dezimieren (708) der Anzahl von N_{DS} transformierten Vektoren, ein Mitteln der N_{DS} transformierten Vektoren umfasst.

14. Das Verfahren (700) gemäß Anspruch 12 oder 13, ferner umfassend: ein Reduzieren einer Anzahl von N_C Elementen von dem zumindest einen ersten transformierten Vektor auf $N_R < N_C$, um zumindest einen verkürzten transformierten Vektor, umfassend N_R Elemente, zu erzeugen.

15. Das Verfahren (700) gemäß Anspruch 14, ferner umfassend Durchführen einer diskreten Fourier-Transformation vom zweiten Typ von dem zumindest einen verkürzten transformierten Vektor.

16. Ein Computerprogramm mit einem Programmcode zum Durchführen des Verfahrens (200; 700) gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, wenn das Computerprogramm auf einer programmierbaren Hardwarevorrichtung ausgeführt wird.

17. Eine Vorrichtung zum Verarbeiten eines OFDM-Radarsignals, die Vorrichtung umfassend: einen Empfänger (150), der ausgebildet ist, um eine Mehrzahl von $N_C \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten zu empfangen, die einer Anzahl von N_{DS} aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen entsprechen, wobei jedes OFDM-Symbol eine Mehrzahl von N_C Teilträgern umfasst, moduliert mit einem jeweiligen Modulationssymbol; und einen Prozessor, der ausgebildet ist zum Verarbeiten (204) von jedem von der Mehrzahl von $N_C \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten durch Division durch sein jeweiliges Modulationssymbol, um eine Anzahl von N_{DS} aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen zu erzeugen; Dezimieren (206) der Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen, um zumindest ein dezimiertes OFDM-Symbol zu erzeugen; und Durchführen (208) einer diskreten Fourier-Transformation vom ersten Typ von dem zumindest einen dezimierten OFDM-Symbol, um zumindest einen ersten transformierten Vektor zu erzeugen.

18. Die Vorrichtung gemäß Anspruch 17, wobei der Prozessor ferner ausgebildet ist zum Reduzieren einer Anzahl von N_C Elementen von dem zumindest einen ersten transformierten Vektor auf $N_R < N_C$, um zumindest einen verkürzten transformierten Vektor (310), umfassend N_R Elemente, zu erzeugen; und Durchführen einer diskreten Fourier-Transformation vom zweiten Typ von dem zumindest einen verkürzten transformierten Vektor, um zumindest einen zweiten transformierten Vektor zu erzeugen.

19. Eine Vorrichtung zum Verarbeiten eines OFDM-Radarsignals, die Vorrichtung umfassend: einen Empfänger (150), der ausgebildet ist, um eine Mehrzahl von $N_C \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten zu empfangen, die einer Anzahl von N_{DS} aufeinanderfolgenden OFDM-Symbolen entsprechen, wobei jedes OFDM-Symbol eine Mehrzahl von N_C Teilträgern umfasst, moduliert mit einem jeweiligen Modulationssymbol; und einen Prozessor, der ausgebildet ist zum Verarbeiten (704) von jedem von der Mehrzahl von $N_C \times N_{DS}$ Empfangsabtastwerten durch Division durch sein jeweiliges Modulationssymbol, um eine Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen zu erzeugen; Durchführen (706) einer diskreten Fourier-Transformation vom ersten Typ von der Anzahl von N_{DS} verarbeiteten OFDM-Symbolen, um eine Anzahl von N_{DS} jeweiligen transformierten Vektoren zu erzeugen; Dezimieren (708) der Anzahl von N_{DS} transformierten Vektoren, um zumindest einen dezimierten transformierten Vektor zu erzeugen.

20. Ein OFDM-Radar-Sendeempfänger (100), umfassend die Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 17 bis 19.

Es folgen 10 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

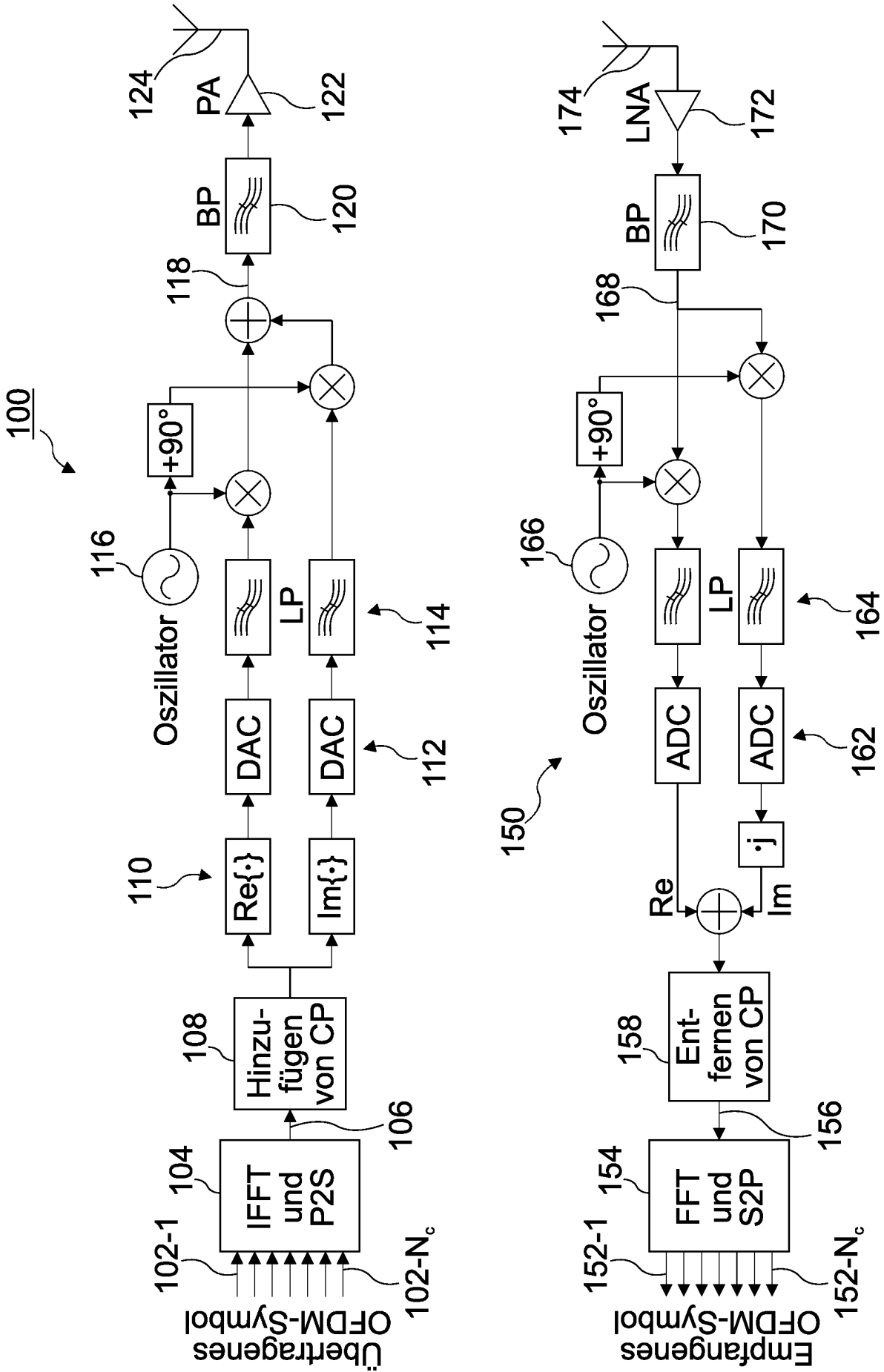


FIG. 1A

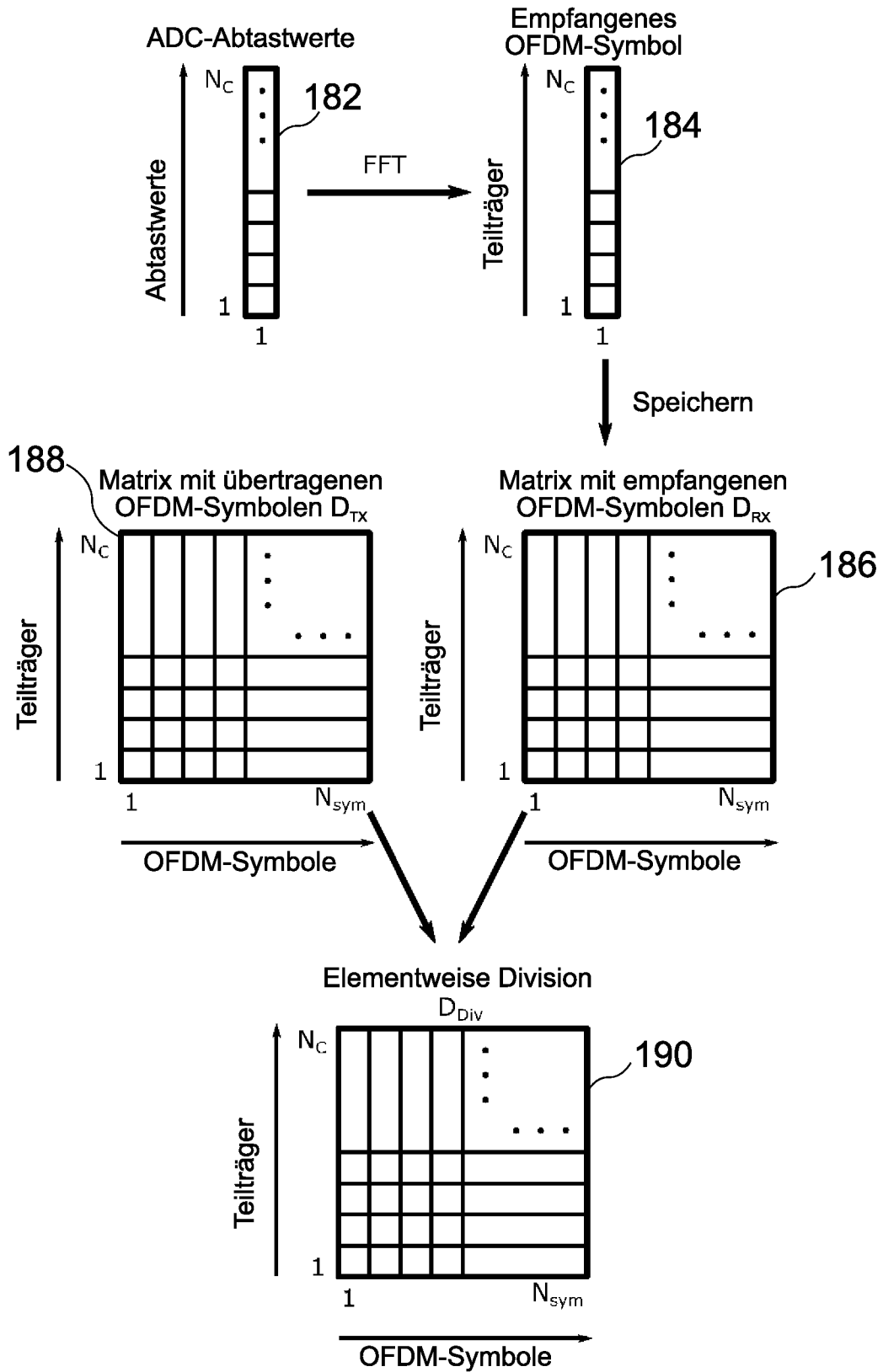


FIG. 1B

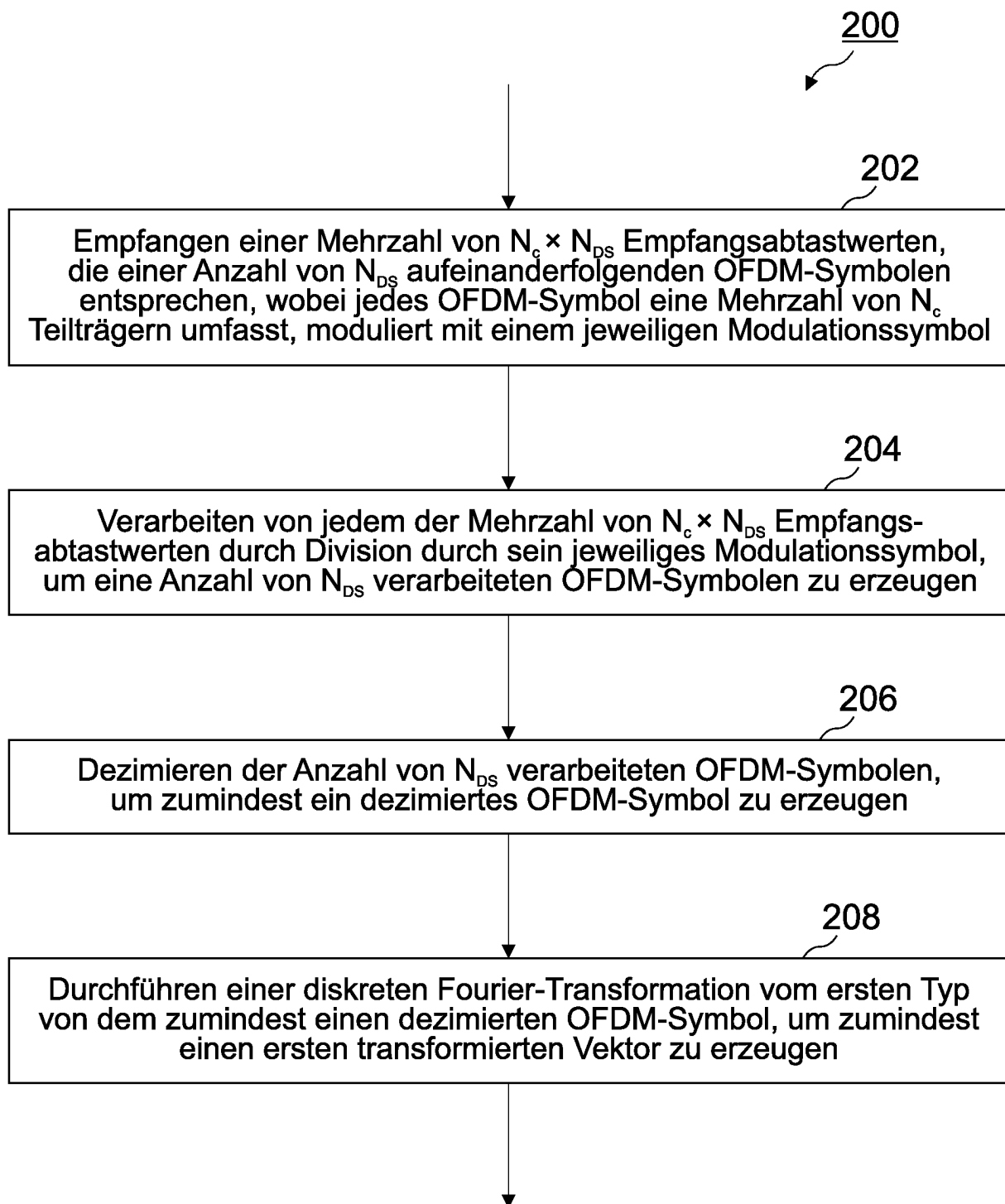


FIG. 2

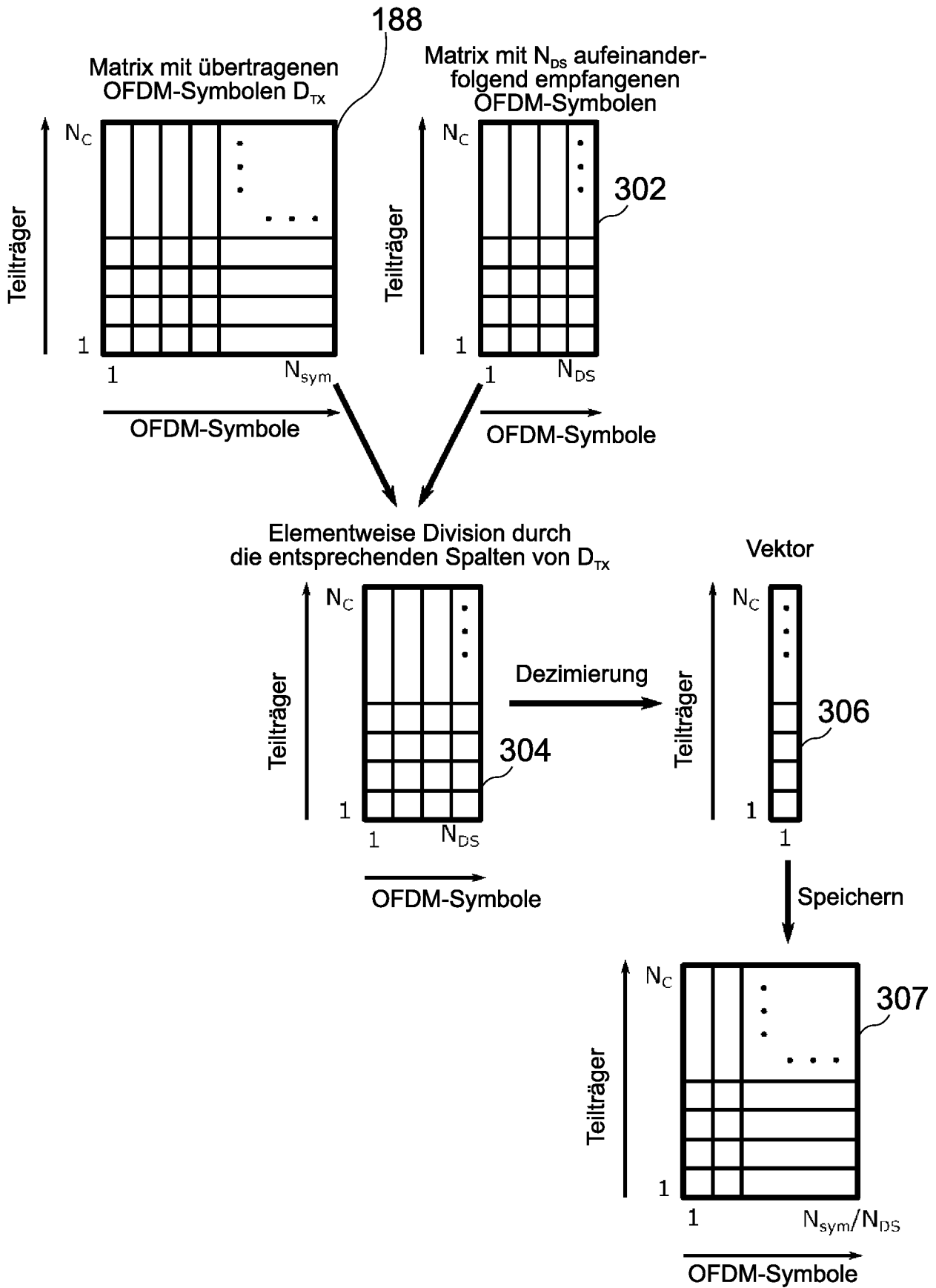


FIG. 3A

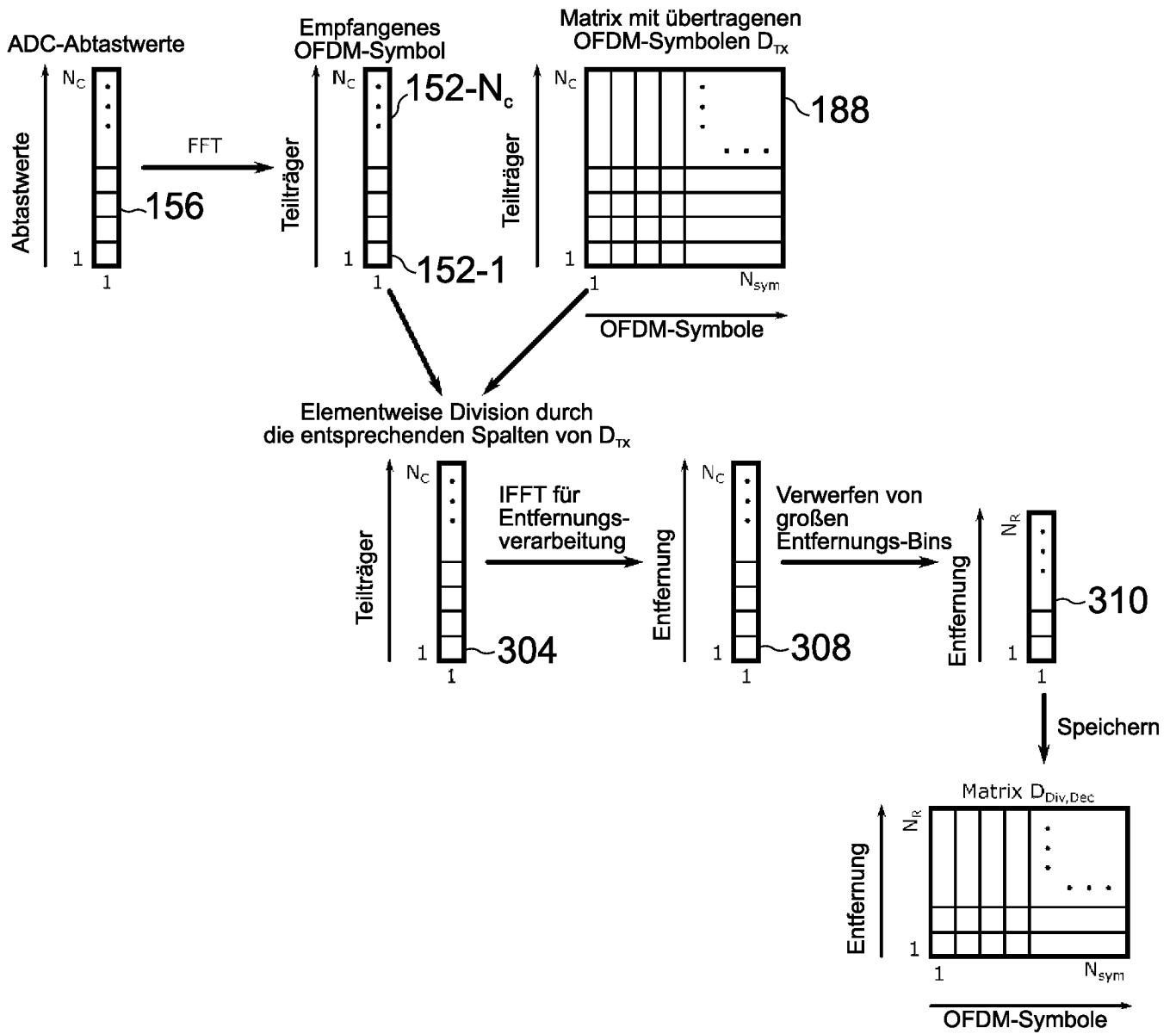


FIG. 3B

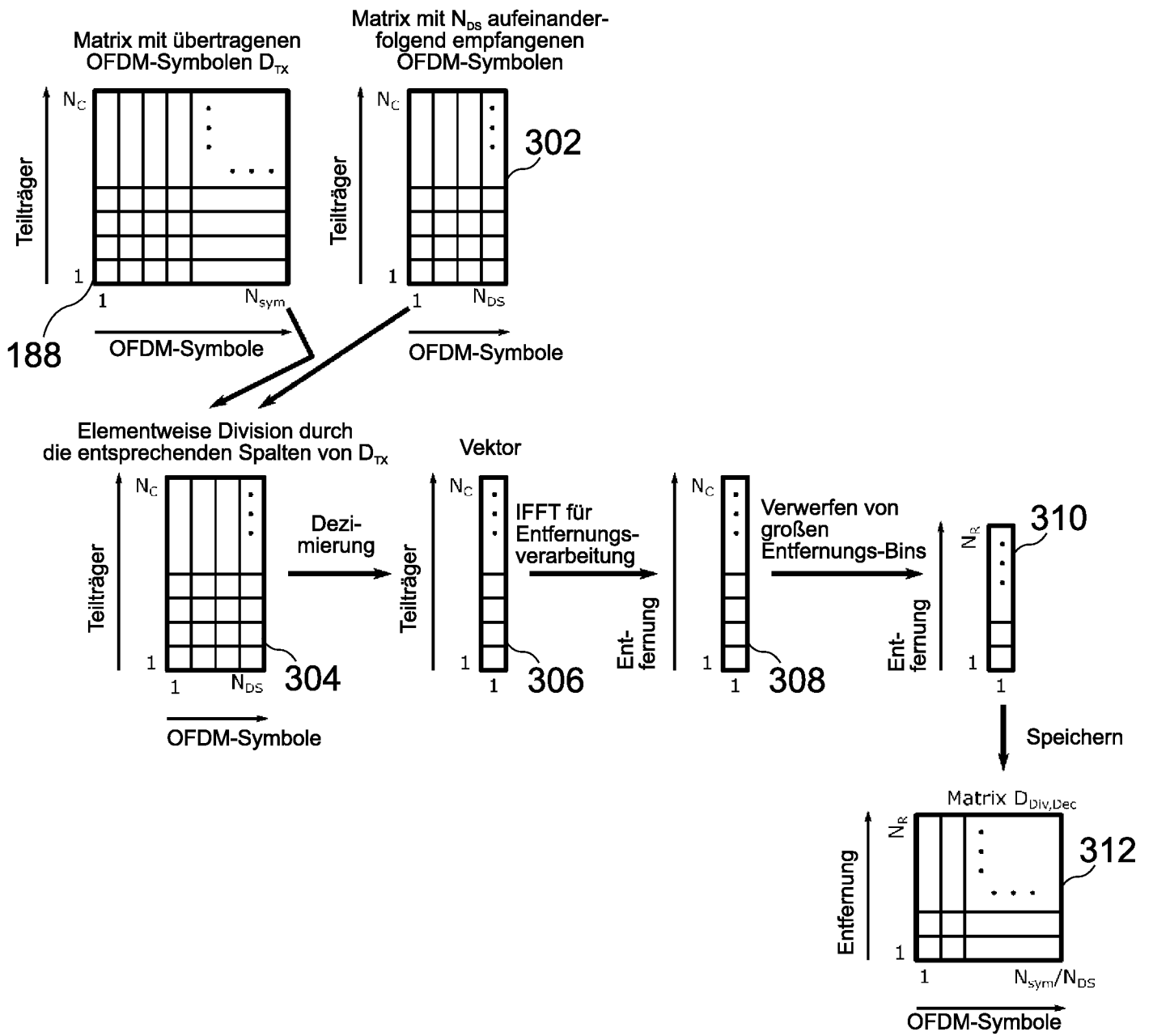


FIG. 3C

---• Mittelwert
 —• Rauschfreie Messungen

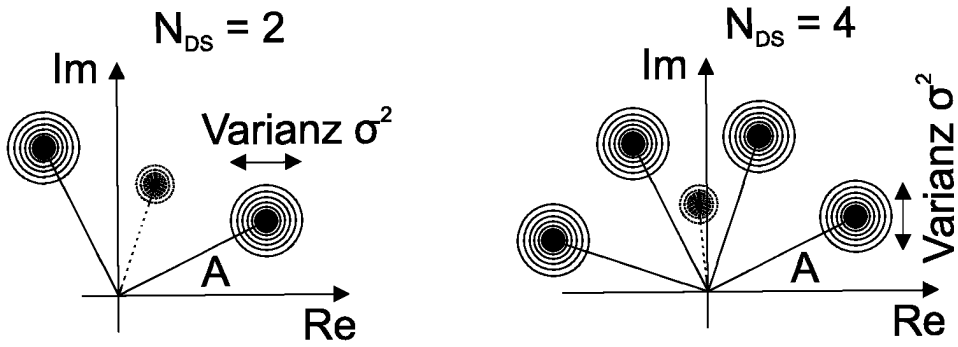


FIG. 4

+

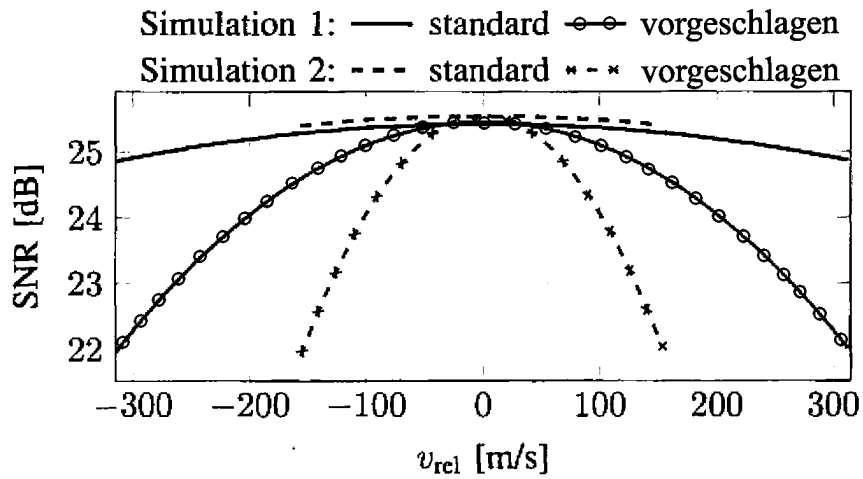


FIG. 5

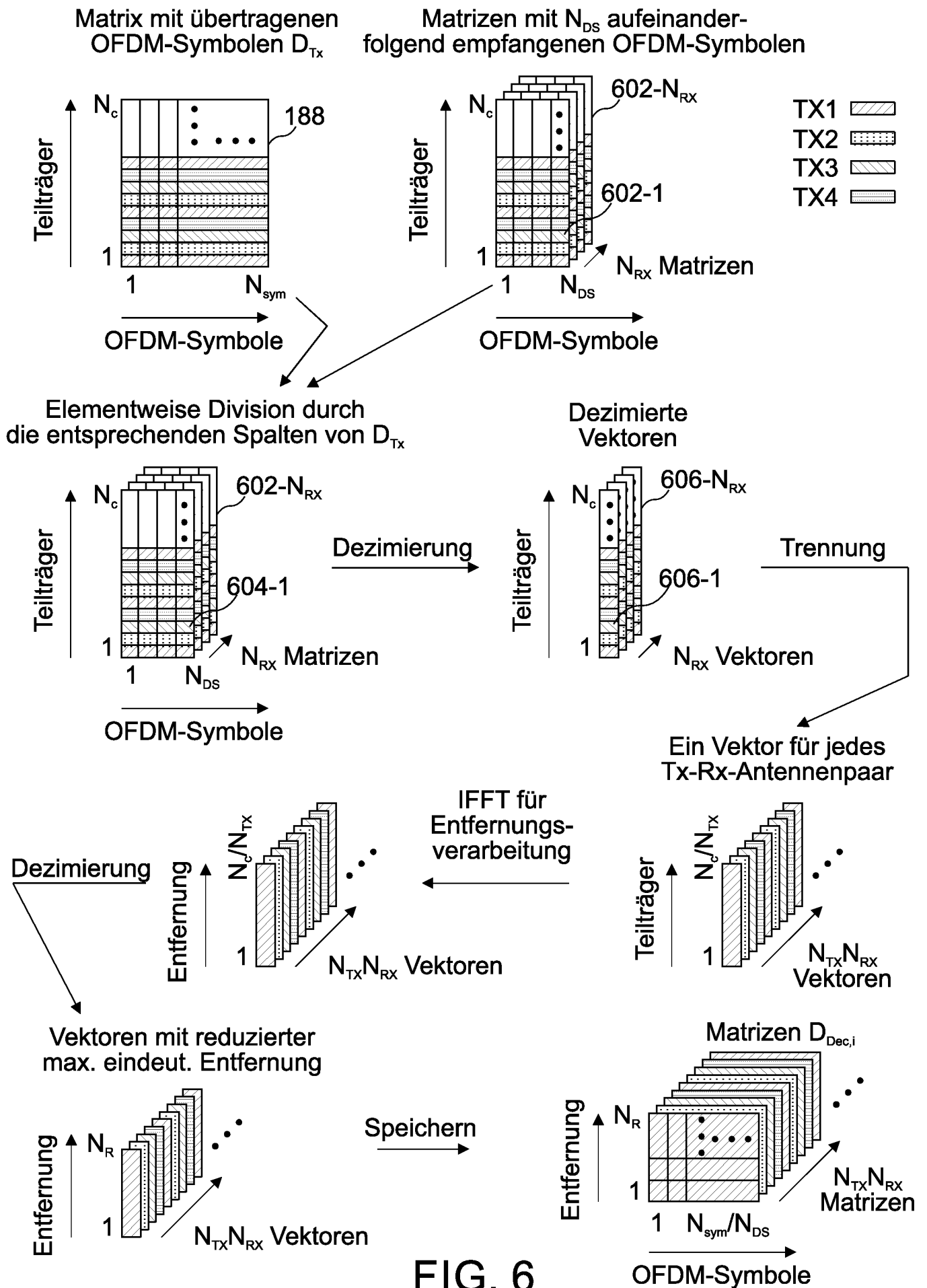


FIG. 6

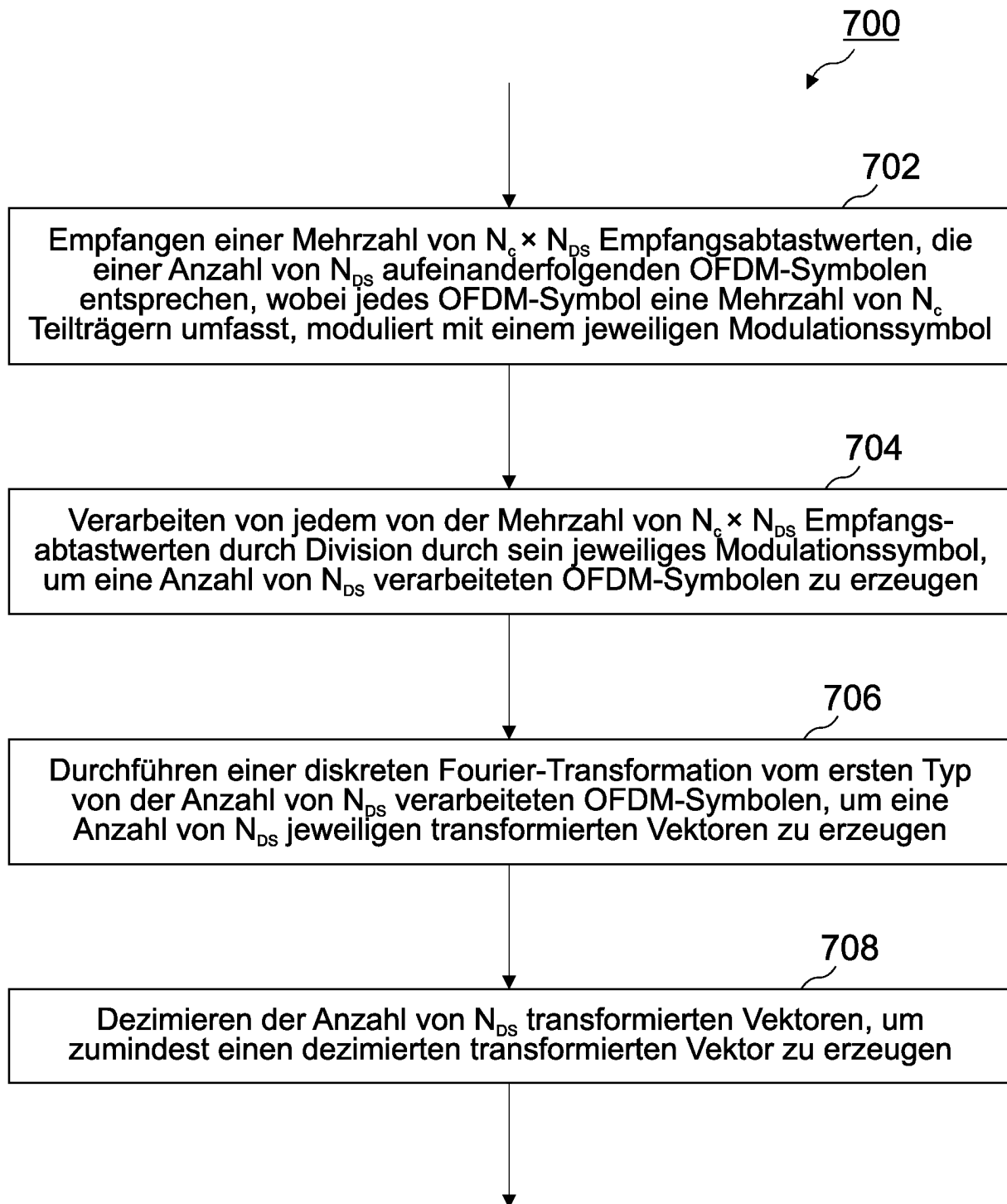


FIG. 7

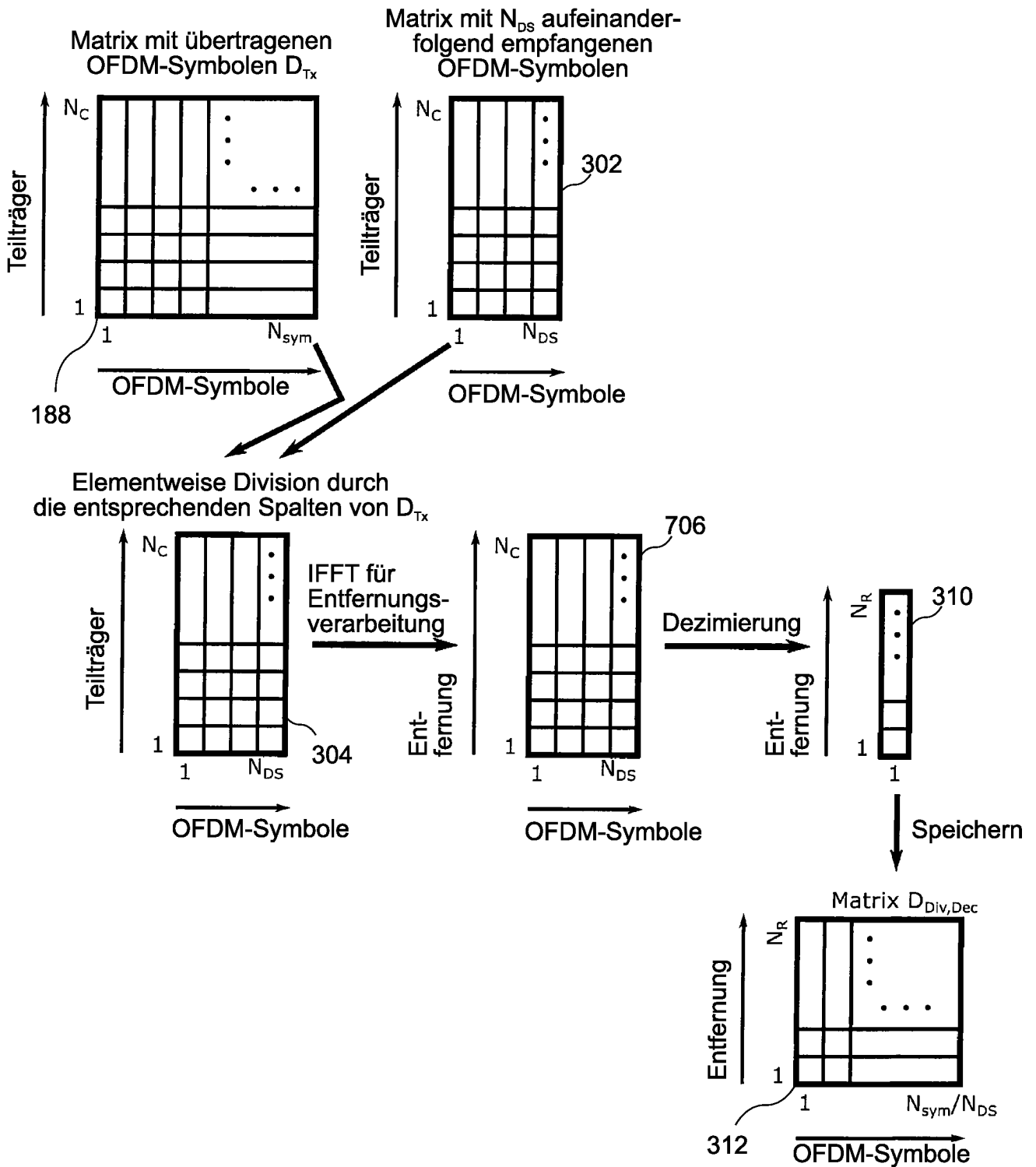


FIG. 8