



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 28 012 T2** 2006.12.14

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 157 514 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 28 012.8**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US00/06045**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 913 812.4**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2000/054472**

(86) PCT-Anmeldetag: **08.03.2000**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **14.09.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **28.11.2001**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **17.05.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **14.12.2006**

(51) Int Cl.⁸: **H04L 27/26** (2006.01)
H04L 25/03 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

123348 P	08.03.1999	US
516715	01.03.2000	US

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,
LI, LU, MC, NL, PT, SE**

(73) Patentinhaber:

Bandspeed, Inc., Los Angeles, Calif., US

(72) Erfinder:

**TONISSEN, Michael, Shane, Kensington, VIC 3031,
AU; SKAFIDAS, Efstratios, Coburg, VIC 3057, AU;
LOGOTHETIS, Andrew, Bulleen, VIC 3105, AU**

(74) Vertreter:

**Wächtershäuser, G., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.,
Pat.-Anw., 80333 München**

(54) Bezeichnung: **KALMAN-ENTZERRUNG IN MEHRTRÄGEREMPFÄNGERN**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

VERWANDTE ANMELDUNGEN

[0001] Diese Anmeldung betrifft die vorläufige US-Anmeldung Nr. 60/123,348 mit dem Titel "KALMAN FILTER BASED EQUALIZATION FOR HIGH SPEED DIGITAL COMMUNICATION CHANNELS", eingereicht am 8. März 1999, von SHANE MICHAEL TONISSEN, EFSTRATIOS SKAFIDAS UND ANDREW LOGOTHETIS.

GEBIET DER ERFINDUNG

[0002] Die Erfindung betrifft digitale Kommunikationssysteme, und insbesondere einen Lösungsansatz zum Entfernen einer Verzerrung in digitalen Mehrträger-Kommunikationssystemen wie beispielsweise DMT-(Discrete Multi Tone)- und OFDM-(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)-Systemen.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0003] Eines der Hauptanliegen bei digitalen Kommunikationssystemen besteht darin, eine durch einen Kommunikationskanal eingebrachte Verzerrung zu minimieren, die manchmal als "Kanaleffekte" bezeichnet wird. [Fig. 1](#) ist ein Blockdiagramm **100** eines herkömmlichen digitalen Kommunikationssystems. Daten werden über einen Kommunikationskanal ("Kanal") **106** von einem Sender **102** zu einem Empfänger **104** gesendet. Der Kanal **106** kann ein beliebiger Typ von Kommunikationsmedium zum Übertragen von Daten zwischen einem Sender **102** und einem Empfänger **104** sein. Beispielsweise kann es sich beim Kanal **106** um Netzwerkverbindungen und/oder Drähte und/oder faseroptische Verbindungen und/oder eine drahtlose digitale Kommunikationsverbindung handeln.

[0004] Idealerweise werden Daten zwischen dem Sender **102** und dem Empfänger **104** über den Kanal **106** ohne Verzerrung übertragen. Das heißt, die vom Empfänger **104** aus dem Kanal **106** wiedergewonnenen Daten sind identisch zu den Daten, die durch den Sender **102** im Kanal platziert wurden. Jedoch bringt in der Praxis der Kanal **106** eine Verzerrung ein, welche Daten, die über den Kanal **106** übertragen werden, verfälschen kann. Die durch den Kanal **106** eingebrachte Verzerrung kann bewirken, dass aufeinanderfolgend gesendete Symbole sich gegenseitig stören, was im Übrigen als "Inter-Symbol-Interferenz" (ISI) bekannt ist. Eine ISI kann eine schwerwiegende Verfälschung digitaler Daten verursachen, was zu einer sehr hohen Bitfehlerrate (BER) führt. Das Verfälschen der Daten tritt bei deren Übertragung über den Kommunikationskanal **106** auf. In Mehrträgersystemen muss die ISI entfernt werden, bevor die Umwandlung von Zeitbereichsdaten in Frequenzbereichsdaten, z.B. mittels einer Schnellen Fourier-Transformation (FFT) erfolgt, die bewirkt, dass die ISI über alle Trägerfrequenzbereiche verteilt wird, was eine beträchtliche Verschlechterung des Rauschabstandes hervorruft. Die übliche Lösung für dieses Problem besteht darin, die ISI aus den abgetasteten Daten unter Verwendung einer Zeitbereichsentzerrung (TDEQ) zu entfernen, bevor die abgetasteten Daten von den Zeitbereichsdaten in den Frequenzbereich umgewandelt werden. Dies erlaubt, dass die ursprünglichen Daten aus dem Kommunikationskanal wiedergewonnen werden können.

[0005] [Fig. 2](#) ist ein Blockdiagramm **200**, das eine beispielhafte Realisierung eines Senders **102** und eines Empfängers **104** von [Fig. 1](#) dargestellt. Der Sender **102** beinhaltet typischerweise einen Codierer **202**, einen Digital-Analog-Wandler **204**, ein Sendefilter **206** und einen Leitungstreiber **207**. Der Codierer **202** codiert die ursprünglichen digitalen Daten, um codierte digitale Daten zu erzeugen. Die codierten digitalen Daten werden durch einen Digital-Analog-Wandler **204** in analoge codierte Daten umgewandelt. Ein Sendefilter **206** entfernt unerwünschte Komponenten der ursprünglichen Daten aus den codierten analogen Daten, um gefilterte Daten zu erzeugen. Der Leitungstreiber **207** verstärkt das Signal, um das Signal über den Kanal **106** zu übertragen. Die gefilterten Daten werden über den Kanal **106** an den Empfänger **104** übertragen.

[0006] Der Empfänger **104** beinhaltet einen Differenzverstärker **208**, einen oder mehrere Empfangsfilter **209**, einen Analog-Digital-Wandler **210** und einen Entzerrer **212**. Nachdem die Daten durch den Empfänger **104** vom Kanal **106** empfangen wurden, entfernt das Empfangsfilter **209** unerwünschte Komponenten aus den codierten analogen Daten, die vom Sender **102** über den Kanal **106** empfangen wurden. Der Analog-Digital-Wandler **210** wandelt die vom Sender **102** empfangenen codierten analogen Daten in codierte digitale Daten um. Der Entzerrer **212** verarbeitet die codierten digitalen Daten, um die ISI zu entfernen. Die codierten digitalen Daten werden durch Umwandeln der Daten in den Frequenzbereich mittels einer Schnellen Fourier-Transformation umgewandelt, um die modulierten Töne wiederzugewinnen. Eine Frequenzbereichs-Restentzerrung wird im Frequenzbereich durchgeführt, bevor die Daten zu einem Decodierer **214** übertragen werden, der die ursprünglichen digitalen Daten wiedergewinnt. Der Decodierer **214** kann wie dargestellt vom Emp-

fänger **104** separat sein, oder kann in den Empfänger **104** eingebaut sein.

[0007] Die meisten herkömmlichen Lösungsansätze zum Entfernen der ISI wiesen signifikante Einschränkungen auf, die zu einer beeinträchtigten Leistung führen. Viele der Einschränkungen bei herkömmlichen Lösungsansätzen sind der Beschaffenheit der ISI und der Beschaffenheit weiterer externer Rauschquellen zuzuschreiben. Herkömmliche Lösungsansätze behandeln jedes Problem, d.h. das Entfernen der ISI und die Rauschminderung, als unabhängig. Somit kann das Lösen des einen Problems die Auswirkungen des anderen verschärfen. Beispielsweise befassen sich einige TDEQ-Mechanismen nicht mit Rauschquellen wie beispielsweise thermischem Rauschen und Nebensprechen. Außerdem sind die Eigenschaften (Übertragungsfunktion) eines Kommunikationskanals nicht notwendigerweise statisch und können sich über die Zeit ändern. Demzufolge leiden herkömmliche TDEQ-Mechanismen unter einer Reihe von Nachteilen, die im Wesentlichen beinhalten, dass nicht die gesamte kanalinduzierte ISI entfernt wird oder sie Stabilitätsprobleme aufweisen. Beispielsweise können Rückmeldungs-TDEQ-Mechanismen eine verbesserte Leistung bereitstellen, sind jedoch schwierig auf DMT-(Discrete Multi-Tone)-Übertragungssystemanwendungen anzuwenden, was ihre Verwendung einschränkt. Außerdem können Rückmeldungs-TDEQ-Mechanismen unter Fehlerausbreitungsproblemen leiden, wobei das Auftreten eines einzigen Fehlers zu einer vergrößerten Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Fehlers in den nachfolgenden Datensymbolen führt. Als weiteres Beispiel wird auch eine Sende-Vorcodierung verwendet, um bekannte Kanaleffekte zu kompensieren. Jedoch erfordert eine Sende-Vorcodierung eine genaue Charakterisierung des Kanals und einen kooperierenden Sender. Außerdem kann eine Sende-Vorcodierung nicht in allen Typen von Sendesystemen implementiert werden. Beispielsweise kann ein Sende-Vorcodieren nicht in den aktuellen ADSL-(Asynchronous Digital Subscriber Line)-Normen ANSI T1.413 und ITU992.2 realisiert werden.

[0008] WO 97/40587 offenbart ein Empfängersystem für eine Hochgeschwindigkeitsdatenkommunikation, das eine Hochfrequenzrauschschätz- und -auslöscheinrichtung aufweist.

[0009] WO 98/59450 offenbart einen synchronen kohärenten Orthogonal-Frequenzmultiplexer, der SC-OFDM-Sender und -Empfänger verwendet, die im Frequenzbereich arbeiten.

[0010] Das Dokument "Time-Domain Equalization for Multicarrier Communication" von Van Bladel et al., IEEE Global Telecommunications Conference, Seiten 167–171, XP000773405, offenbart ein Verfahren zum Bestimmen der Impulsantwort eines Zeitbereichs-Entzerrers mit finiter Impulsantwort, welches das Berechnen eines Minimalwertes der Leistung eines Fehlersignals beinhaltet.

[0011] Daher ist, basierend auf der Notwendigkeit, die ISI in digitalen Kommunikationssystemen und die Einschränkungen der Lösungsansätze des Standes der Technik zu verringern, ein Lösungsansatz zum Verringern der ISI in digitalen Kommunikationssystemen und insbesondere in DSL-Kommunikationssystemen, der nicht unter den bei herkömmlichen Lösungsansätzen zum Entfernen der ISI inhärenten Einschränkungen leidet, äußerst erwünscht.

INHALT DER ERFINDUNG

[0012] Gemäß einem Aspekt der Erfindung wird ein computerimplementiertes Verfahren zum Verarbeiten von Daten bereitgestellt, die von einem Kommunikationskanal empfangen wurden. Als Erstes werden die Daten vom Kommunikationskanal empfangen, wobei die gesendeten Daten aus Daten bestehen, die auf eine willkürliche gewählte Anzahl von Trägern moduliert sind. Dann wird eine MMSE-Schätzung (MMSE = Minimum Mean Square Estimate = Schätzung mit kleinstem mittleren Quadrat) der Daten bestimmt, wobei die MMSE-Schätzung eine Schätzung der Daten ist, bevor die Übertragung der Daten auf dem Kommunikationskanal erfolgt ist. Und schließlich wird die MMSE-Schätzung als Teil der Zeitbereichsentzerrung verwendet, um die Entzerrung, die durch den Kommunikationskanal in die Daten eingebracht wird, und auch die externen Rauschquellen zu kompensieren.

[0013] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird ein computerimplementiertes Verfahren zum Entzerren von Daten bereitgestellt, die von einer digitalen Teilnehmerleitung, einem DMT- oder einem OFDM-basierten Kommunikationssystem empfangen wurden, um eine in den Daten enthaltene Verzerrung zu entfernen, die durch das Übertragen der Daten auf einem Kommunikationskanal, z.B. einer digitalen Teilnehmerleitung, eingebracht wurde. Zuerst werden die Daten von der digitalen Teilnehmerleitung empfangen. Dann wird eine MMSE-Schätzung der Daten unter Verwendung eines Kalman-Filters bestimmt. Die MMSE-Schätzung wird als Teil der Zeitbereichsentzerrung verwendet, um die in den Daten enthaltene Verzerrung zu kompensieren, die durch ein Übertragen der Daten auf der digitalen Teilnehmerleitung eingebracht wurden.

[0014] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird ein Empfänger zum Entzerren von analogen Daten bereitgestellt, die von einem Kommunikationskanal empfangen wurden, wobei die analogen Daten eine Verzerrung beinhalten, die durch Übertragen der analogen Daten auf dem Kommunikationskanal eingebracht wurden. Der Empfänger weist ein analoges Eingangsglied (einschließlich Filtern), einen Analog-Digital-Wandler und einen Entzerrer auf. Der Analog-Digital-Wandler ist konfiguriert, um die vom Kommunikationskanal empfangenen analogen Daten in digitale Daten umzuwandeln. Der Entzerrer ist konfiguriert, um eine MMSE-Schätzung der vom Kommunikationskanal empfangenen analogen Daten zu bestimmen und die MMSE-Schätzung der analogen Daten als Teil der Zeitbereichsentzerrung zu verwenden, um eine Verzerrung zu kompensieren, die in die analogen Daten durch Übertragen der analogen Daten auf dem Kommunikationskanal eingebracht wird.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0015] Ausführungsbeispiele der Erfindung sind beispielhaft und nicht einschränkend in den Figuren der anliegenden Zeichnungen dargestellt, wobei in diesen ähnliche Elemente mit gleichen Bezugszeichen bezeichnet sind, und in diesen sind:

[0016] [Fig. 1](#) ein Blockdiagramm eines herkömmlichen digitalen Kommunikationssystems;

[0017] [Fig. 2](#) ein Blockdiagramm, das Beispielimplementierungen des Senders und des Empfängers darstellt, die in [Fig. 1](#) dargestellt sind;

[0018] [Fig. 3](#) ein Blockdiagramm eines Kommunikationssystemsempfängers, der gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung implementiert ist;

[0019] [Fig. 4](#) ein Ablaufdiagramm, das einen Lösungsansatz zum Entfernen einer Verzerrung in einem Kommunikationssystem gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung darstellt;

[0020] [Fig. 5](#) ein Ablaufdiagramm, das einen Lösungsansatz darstellt, mit dem eine optimale Schätzung eines einzelnen Eingangsabstastwertes einer Dateneingangssequenz unter Verwendung eines Kalman-Filters mit einem Zustand größerer Länge gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung bestimmt wird; und

[0021] [Fig. 6](#) ein Blockdiagramm eines Computersystems, in das die Ausführungsbeispiele der Erfindung implementiert werden können.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0022] In der folgenden Beschreibung sind zum Zweck der Erläuterung spezielle Details dargelegt, um für ein grundlegendes Verständnis der Erfindung zu sorgen. Jedoch ist es offensichtlich, dass die Erfindung ohne diese spezifischen Details verwirklicht sein kann. In anderen Fällen sind gut bekannte Strukturen und Vorrichtungen in Blockdiagrammform dargestellt, um ein Auftauchen von unnötigen Unklarheiten bei der Erfindung zu vermeiden.

[0023] Verschiedene Aspekte und Merkmale der Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend detaillierter in den folgenden Abschnitten beschrieben: (1) Funktionsübersicht; (2) Zeitbereichsentzerrung; (3) adaptives Filtern; (4) Frequenzbereichsentzerrung; und (5) Implementierungsmechanismen.

1. FUNKTIONSÜBERSICHT

[0024] Ein computerimplementierter Lösungsansatz zum Verringern einer Verzerrung in digitalen Kommunikationssystemen beinhaltet allgemein ein Entzerren von Kommunikationskanal-Ausgabedaten im Zeitbereich, um eine durch den Kommunikationskanal eingebrachte Verzerrung zum kompensieren. Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung wird eine MMSE-Schätzung der ursprünglichen Daten unter Verwendung eines Kalman-Filters erhalten, um im Wesentlichen jegliche ISI im Zeitbereich zu kompensieren. Die Verwendung eines Kalman-Filters mit einem Zustand größerer Länge sorgt für eine glättende Verzögerung mit relativ geringen zusätzlichen Computerkosten. Eine anschließende Entzerrung kann im Frequenzbereich ebenfalls durchgeführt werden, um eine verbleibende Amplituden- und Phasenverzerrung zu korrigieren.

[0025] [Fig. 3](#) ist ein Blockdiagramm, das einen Beispielpfänger **300** darstellt, der vom Kommunikationskanal **106** empfangene analoge codierte Daten verarbeitet, gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung.

Der Empfänger **300** beinhaltet ein Empfangsfilter **302**, einen Analog-Digital-Wandler **304**, einen Zeitbereichsentzerrer **306**, einen Zeitbereichs-/Frequenzbereichs-Wandler **308** und einen Frequenzbereichsentzerrer **310**. Die Verwendung dieser Bauelemente zur Verarbeitung digitaler codierter Daten, die vom Kommunikationskanal **106** empfangen wurden, wird nachfolgend mit Bezug auf das Ablaufdiagramm **400** von [Fig. 4](#) beschrieben.

[0026] Nach dem Beginn bei Schritt **402** werden bei Schritt **404** analoge codierte Daten vom Kanal **106** empfangen.

[0027] Bei Schritt **406** werden die analogen codierten Daten durch das Empfangsfilter **302** gefiltert, um jegliche unerwünschte Komponenten aus den empfangenen analogen codierten Daten zu entfernen.

[0028] Bei Schritt **408** werden die analogen codierten Daten durch den Analog/Digital-Wandler **304** in digitale codierte Daten umgewandelt.

[0029] In Schritt **410** wird durch den Zeitbereichsentzerrer **306** eine Zeitbereichsentzerrung der digitalen codierten Daten durchgeführt, um im Wesentlichen die gesamte ISI zu entfernen. Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung beinhaltet das Durchführen einer Zeitbereichsentzerrung das Bestimmen eines MMSE (Minimum Mean Square Estimate = Schätzung mit kleinstem mittleren Quadrat) der ursprünglichen Daten unter Verwendung eines Kalman-Filters, um die durch den Kanal **106** eingebrachte ISI zu kompensieren. Jedoch kann, auch wenn Ausführungsbeispiele der Erfindung hier im Kontext einer Bestimmung der MMSE-Schätzung unter Verwendung eines Kalman-Filters offenbart sind, ein beliebiger Mechanismus zu diesem Zweck verwendet werden, und die Erfindung ist nicht auf irgendeinen speziellen Mechanismus eingeschränkt. In allgemeiner Darstellung ist eine MMSE-Schätzung definiert durch:

$$E[(x - \hat{x})^2 | y]$$

min $\hat{x}$

wobei:

E ist der Erwartungswert
 x sind die im Kommunikationskanal übertragenen ursprünglichen Daten
 $\hat{x}$ ist die Ausgabegröße des Entzerrermechanismus
 | ist das bedingte Mittel betreffend y die Ausgabegröße des Kommunikationskanals

[0030] Weitere Details und Beispiele des Kalman-Filters werden nachfolgend detaillierter beschrieben.

[0031] In Schritt **412** werden die vom Zeitbereichsentzerrer **306** empfangenen digitalen codierten Daten durch den Zeitbereichs/Frequenzbereichs-Wandler **308** in den Frequenzbereich gewandelt. Der Zeitbereichs/Frequenzbereichs-Wandler **308** kann beliebige Verfahren zum Umwandeln der Daten durchführen, wie beispielsweise eine Schnelle Fourier-Transformation, und die Erfindung ist nicht auf ein spezielles Umwandlungsverfahren eingeschränkt.

[0032] In Schritt **414** wird eine Frequenzbereichsentzerrung mit den digitalen codierten Daten durch den Frequenzbereichsentzerrer **310** durchgeführt, um jegliche verbleibende Amplituden- und Phasenverzerrung zu korrigieren, wie später noch detaillierter beschrieben wird. Der Prozess ist im Schritt **416** abgeschlossen. Die Daten werden dann typischerweise einem Decoder zugeführt, um die ursprünglichen digitalen Daten wiederzugewinnen.

2. ZEITBEREICHSENTZERRUNG

[0033] Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung wird ein Kalman-Filterverfahren mit einem Zustand größerer Länge, d.h. eine Glättungseinrichtung verwendet, um im Wesentlichen die gesamte ISI aus den empfangenen digitalen codierten Daten im Zeitbereich durch Erzielen einer MMSE-Schätzung der ursprünglichen Daten zu entfernen. Ein Kalman-Filtern ist, obschon es weder jemals angewandt noch für den in [Fig. 3](#) dargestellten Kontext in Betracht gezogen wurde, ein gut bekanntes Verfahren für andere Anwendungen auf dem Gebiet der Mathematik, siehe beispielsweise "Optimal Filtering", von B. D. O. Anderson und J. Moore, Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall, 1979, ISBN 013631227. Bezug nehmend auf [Fig. 2](#) können durch den Sender **102** gesendete Daten durch eine diskrete Zeitsequenz x(k) dargestellt werden, die durch einen Digital/Analog-Wandler **204** und ein Sendefilter **206** verarbeitet wird. Die analoge Darstellung des Signals am Ausgang des Senders **102** ist durch x(t) bezeichnet. Der Kanal **106** ist durch seine Impulsantwort h(t) gekennzeichnet.

Die Ausgabegröße des Kanals **106**, $y(t)$ ist dann

$$y(t) = h(t) \cdot x(t) + n(t) \quad (1)$$

wobei $x(t)$ die Kanaleingangsgröße ist und $n(t)$ für alle Kanalverzerrungen wie beispielsweise additives weißes Gauß'sches Rauschen, Nebensprechen und Echorauschen steht. Am Empfänger **104** wird die Kanaleingangsgröße $y(k)$ abgetastet, um ein zeitdiskretes Empfangssignal $y(k)$ zu erzeugen. Somit besteht gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung das Ziel darin, einen zeitdiskreten Schätzwert $\hat{x}(k)$ des ursprünglichen zeitdiskreten Signals $x(k)$ zu erhalten.

[0034] Es wurde gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung bestimmt, dass die übertragene Datensequenz $x(k)$ durch eine weiße Gauß'sche Folge approximiert werden kann. Dies ist durch die Verwendung der Inversen Schnellen Fourier-Transformation (IFFT) zur Erzeugung der Datenabtastwerte und die Tatsache bedingt, dass die der IFFT zugeführten Symbole von zufälliger Amplitude und Phase sowie voneinander unabhängig sind. Die approximierte Gauß'sche Beschaffenheit der Datensequenz wird aus der Anwendung des zentralen Grenzwertsatzes hergeleitet. Demzufolge ist die weiße Gauß'sche Annahme am besten, wenn die Konstellationsgröße der Quadraturamplitudenmodulation (QAM) groß ist und die Anzahl der Kommunikations-Subkanäle groß ist. Ein beliebiger Kanal kann als ARMA-(Auto Regressive Moving Average)-Modell durch geeignete Wahl der ARMA-Parameter dargestellt werden, um die tatsächliche Kanalimpulsantwort zu liefern. Die Kanalausgabegröße wird durch eine weiße Gauß'sche Eingangssequenz, die einen ARMA-Prozess treibt, für den das Kalman-Filter im Sinn der MMSE-Schätzung die optimale Schätzung der Eingangssequenz liefert, gut approximiert.

[0035] Der identifizierte Kanal wird durch ein ARMA-Modell dargestellt, das gegeben ist durch:

$$\hat{H}(z) = \frac{\hat{b}(z)}{\hat{a}(z)} \quad (2)$$

$$\hat{H}(z) = \frac{\hat{b}_0 + \hat{b}_1 z^{-1} + \hat{b}_2 z^{-2} \dots + \hat{b}_m z^{-m}}{1 + \hat{a}_1 z^{-1} + \hat{a}_2 z^{-2} + \dots + \hat{a}_m z^{-m}} \quad (3)$$

wobei $\hat{a}_0 = 1$ per Definition und $\hat{H}(z)$ die Impulsantwort $\hat{h}(k)$ als Schätzung der abgetasteten Kanalimpulsantwort $h(k)$ aufweist. Der Kanalidentifizierer kann die Entzerrer-Ausgabegröße verwenden, um die Kanalantwort in adaptiver Weise zu schätzen.

[0036] Eine Kalman-Filter-basierte Entzerrung ist gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung wie folgt implementiert. Als Erstes wird ein Zustand $\xi(k)$ so definiert, dass er eine Funktion der Dateneingangsgröße und des Nenners des identifizierten Kanals ist. Dann wird die Kanalausgabegröße so definiert, dass sie eine Funktion des Zwischenzustands $\xi(k)$ und des Zählers des identifizierten Kanals ist. Diese Zustands- und Beobachtungsgleichungen sind gegeben durch:

$$\xi(k-1) = \hat{A}\xi(k) + Gx(k) \quad (4)$$

$$y(k) = \hat{B}\xi(k) + n(k) \quad (5)$$

wobei $\hat{A}$ und $\hat{B}$ aus den identifizierten Kanalparametern $\hat{a}(z)$ und $\hat{b}(z)$ hergeleitet sind

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -\hat{a}_1 & -\hat{a}_2 & -\hat{a}_3 & \cdots & -\hat{a}_m & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & & & \vdots \\ 0 & & \cdots & & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

und sind gegeben durch:

$$\hat{B} = [\hat{b}_0 \hat{b}_1 \dots \hat{b}_m 0 \dots 0] \quad (7)$$

[0037] Es wird angenommen, dass $\hat{a}(z)$ und $\hat{b}(z)$ von der gleichen Ordnung m sind. Falls erforderlich, kann dies dadurch erzielt werden, dass der Vektor $\hat{a}$ oder $\hat{b}$ mit einer geeigneten Anzahl von Nullen aufgefüllt wird. Um eine Verzögerung von " L " Abtastwerten vor dem Entnehmen des Ausgabewertes zu erzielen, weist die erste Zeile von $\hat{A}$ hinter den $\hat{a}_1$ -Elementen " $L + 1$ " Nullen auf. Die verbleibenden Zeilen von $\hat{A}$ bestehen dann aus der " $(L + m) \times (L + m)$ "-Identifikationsmatrix und einer Spalte von Nullen. Daher ist $\hat{A}$ eine " $(L + m + 1) \times (L + m + 1)$ "-Quadratmatrix. In ähnlicher Weise wird die $\hat{B}$ -Matrix mit " L " Nullen erweitert, um eine " $1 \times (L + m + 1)$ "-Matrix zu erzeugen.

[0038] [Fig. 5](#) ist ein Ablaufdiagramm **500**, das einen Lösungsansatz zur Bestimmung einer optimalen Schätzung $\hat{x}(k)$ eines einzelnen Eingangsabtastwertes der Dateneingangssequenz $x(k)$ unter Verwendung eines Kalman-Filters mit einem Zustand größerer Länge gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung darstellt. Der Prozess wird für jeden aufeinanderfolgenden Eingangsabtastwert wiederholt. Nach dem Beginn bei Schritt **502** werden bei Schritt **504** die Anfangszustands- und Kovarianzschätzungen für das Kalman-Filter gesetzt auf:

$$\hat{\xi}(0|0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$P(0|0) = I \quad (9)$$

[0039] Um die Konsistenz zu den Definitionen von $\hat{A}$ und $\hat{B}$ beizubehalten, hat $\hat{\xi}(\cdot|\cdot)$ die Dimension " $(L + m + 1) \times 1$ ", und $P(\cdot|\cdot)$ hat die Dimension " $(L + m + 1) \times (L + m + 1)$ ". Die Initialisierung $P(0|0)$ reflektiert die Annahme, dass die Eingangsdaten weiße Gauß'sche Folge mit Mittelwert Null und Varianz Eins sind. Falls die Eingangsdaten eine weiße Gauß'sche Folge mit Mittelwert Null und Varianz Eins sind, dann wird die Initialisierung demgemäß modifiziert, d.h. $\xi = \xi_{\text{mean}}$ und $P(0|0) = P_0$. In Schritt **506** werden die Zustandsschätzungs- und Kovarianz-Voraussagen wie folgt bestimmt:

$$\hat{\xi}(k|k-1) = \hat{A}\hat{\xi}(k-1|k-1) \quad (10)$$

$$P(k|k-1) = \hat{A}P(k-1|k-1)\hat{A}' + GQG' \quad (11)$$

wobei Q die Kovarianz des Dateneingangswertes $x(k)$ ist, der in diesem Beispiel ein Skalar ist.

[0040] In Schritt **508** wird die Innovationen-Kovarianz basierend auf der Differenz zwischen der tatsächlichen Beobachtung der Daten und den aus der Zustandsvorhersage vorhergesagten Daten bestimmt. Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung wird die Innovationen-Kovarianz wie folgt bestimmt:

$$S(k) = \hat{B}P(k|k-1)\hat{B}' + R \quad (12)$$

[0041] In Schritt **510** wird die Kalman-Verstärkung wie folgt berechnet:

$$K(k) = P(k|k-1)\hat{B}'S(k)^{-1} \quad (13)$$

[0042] In Schritt **512** wird die aktualisierte Zustandsschätzungs- und Kovarianzmatrix wie folgt berechnet:

$$\hat{\xi}(k|k) = \hat{\xi}(k|k-1) + K(k)(y(k) - \hat{B}\hat{\xi}(k|k-1)) \quad (14)$$

$$P(k|k) = P(k|k-1) - K(k)S(k)K(k)' \quad (15)$$

[0043] Zwar ist dies die einfachste Form der Kovarianz-Aktualisierung, diese kann jedoch unter einer numerischen Instabilität leiden. In der Praxis wird eine numerisch stabile Form der Aktualisierung verwendet, d.h. $P(k|k) = [I - K(k)\hat{B}(k)]P(k|k-1)[I - K(k)\hat{B}(k)] + K(k)R(k)K'(k)$. Für weitere Details siehe "Stochastic Models, Estimation, and Control", P. S. Maybeck, Academic Press, Bd. 1, 1979.

[0044] In Schritt **514** wird die Datenschätzung aus der Zwischenzustand-Schätzung wie folgt berechnet.

$$\hat{x}(k-1|k) = \tilde{a}\hat{\xi}(k|k) \quad (16)$$

wobei

$$\tilde{a} = [0 \dots 0 \ 1 \ \hat{a}_1 \dots \hat{a}_m] \quad (17)$$

aus $\hat{a}$ mit "L" führenden Nullen besteht, um zur "Glättung" der Daten die "L"-Abtastverzögerung zu erzielen.

[0045] Der Prozess ist in Schritt **516** abgeschlossen.

[0046] Die Datenschätzung $\hat{x}(k-L|k)$ ist die MMSE-Schätzung der Dateneingangsgröße $x(k-L)$, wenn Empfangsdaten bis zum Zeitpunkt k gegeben sind, und ist die optimale Schätzung der Eingangsdaten. Falls sich die Kanaleigenschaften nicht über die Zeit ändern, dann konvergieren die Filterverstärkung und die Kovarianz zu stationären Zustandswerten. In dieser Situation wird das Kalman-Filter äquivalent zu einem linearen Transversalfilter.

3. ADAPTIVES FILTERN

[0047] In einigen Situationen können sich die Eigenschaften des Kanals über die Zeit ändern. Beispielsweise können Änderungen der Umgebungsbedingungen oder der Kanalkonfiguration eine Änderung der Kanaleigenschaften bewirken. Daher wird gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung ein adaptives Kalman-Filtern verwendet, um Änderungen der Kanaleigenschaften Rechnung zu tragen. Insbesondere werden bei Situationen, bei denen sich die Kanaleigenschaften über die Zeit ändern, die aktualisierten Kanalparameterschätzungen, die durch $\hat{A}(k)$ und $\hat{B}(k)$ bezeichnet sind, anstelle der festgelegten Matrizen $\hat{A}$ und $\hat{B}$ verwendet. Außerdem liefert das Kalman-Filter die optimale Verstärkung $K(k)$, die gewährleistet, dass die Schätzung $\hat{x}(k-L|k)$ optimal ist.

4. FREQUENZBEREICHSENTZERRUNG

[0048] In einigen Situationen kann mit einer Kalman-Filter-Entzerrung nicht bei allen Frequenzen eine genaue Entzerrung bereitgestellt werden. Daher wird gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung eine verbleibende Amplituden- und Phasenverzerrung im Frequenzbereich korrigiert. Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung beinhaltet eine Frequenzbereichsentzerrung als Erstes eine Bestimmung der Frequenzantwort des Kalman-Filters, und dann eine Bestimmung der erforderlichen Frequenzbereichsentzerrung. Ein weiteres Ausführungsbeispiel beinhaltet eine Durchschnittswertbildung einer Sequenz von Trainingsdaten im Frequenzbereich, um die Verstärkungsaufweitung und Phasenrotation herzustellen, die für jede QAM-Konstellation bei jedem Ton benötigt wird, und dann diese Umwandlung auf jede Konstellation der Übertragung der empfangenen und umgewandelten Daten anzuwenden.

a. Bestimmen der Frequenzantwort des Kalman-Filters

[0049] Der erste Schritt bei der Kompensierung der Restverstärkung und -verzerrung im Frequenzbereich besteht darin, die Frequenzantwort des Kalman-Filters im stationären Zustand zu bestimmen. Als Erstes wird der stationäre Zustand der Kalman-Verstärkung K_{ss} berechnet, entweder durch Iteration oder durch Lösen der Riccati-Gleichung. Als Nächstes wird die Übertragungsfunktion des Kalman-Filter-Entzerrers im z-Bereich wie

folgt berechnet:

$$H_{eq}(z) = \tilde{a}[(I - z^{-1})\hat{A} + z^{-1}K_{SS}\hat{B}\hat{A}]^{-1}K_{SS} \quad (18)$$

[0050] Dann wird die Größe und die Phase der Frequenzantwort bei einer beliebigen Frequenz f durch Einsetzen von $z = e^{j2\pi f}$ in Gleichung (18) berechnet. Die sich ergebende komplexwertige Übertragungsfunktion wird als $H_{eq}(f)$ bezeichnet.

b. Bestimmen der Frequenzbereichsentzerrung

[0051] Um die erforderliche Frequenzbereichsentzerrung zu bestimmen, wird die Gesamtübertragungsfunktion von der gesendeten Datensequenz zur Ausgabegröße des Zeitbereichsentzerrers berechnet durch:

$$H_{total}(z) = H(z)H_{eq}(z) \quad (19)$$

[0052] Es sei angemerkt, dass in Situationen, bei der die gesamte ISI während der Zeitbereichsentzerrung entfernt wurde, $H_{total}(f)$ bei allen Frequenzen Eins ist. Die komplexe Ausgabegröße des Zeitbereich/Frequenzbereich-Wandlers **308** ist durch $X_r(f)$ bezeichnet. Die entzerrte Frequenzbereichsausgabegröße ist dann gegeben durch:

$$X_{FDEQ}(f) = \frac{X_r(f)}{H_{total}(f)} \quad (20)$$

wobei $H_{total}(f)$ durch Einsetzen von $z = e^{j2\pi f}$ in Gleichung (19) beim diskreten Satz von Frequenzen erhalten wird, die den Trägerfrequenzbereichen des Mechanismus entsprechen, die in dem Zeitbereich/Frequenzbereichswandler **308** verwendet werden. $X_{FDEQ}(f)$ stellt die wiedergewonnenen QAM-Symbole dar, die dann an den Decoder **214** weitergeleitet werden.

5. IMPLEMENTIERUNGSMECHANISMEN

[0053] Der Lösungsansatz zum Entfernen einer Verzerrung in Kommunikationssystemen ist auf einen beliebigen Typ von Kommunikationssystemen anwendbar und ist insbesondere gut geeignet für digitale Breitbandkommunikationssysteme, einschließlich drahtlosen Systemen, Kabelmodemsystemen, DSL-Anwendungen und insbesondere ADSL-Anwendungen. Außerdem kann der Lösungsansatz als Teil eines Empfängers oder eines Kommunikationssystems implementiert sein, oder als selbstständiger Entzerrungsmechanismus. Die Erfindung kann in Hardware-Schaltungen, in Computer-Software oder einer Kombination aus Hardware-Schaltungen und Computer-Software implementiert sein und ist nicht auf eine spezielle Hardware- oder Software-Implementierung eingeschränkt.

[0054] [Fig. 6](#) ist ein Blockdiagramm, das ein Computersystem **600** darstellt, auf dem ein Ausführungsbeispiel der Erfindung zumindest in einem Teil in Computersoftware implementiert sein kann. Das Computersystem **600** beinhaltet einen Bus **602** oder einen anderen Mechanismus für eine Kommunikationsinformation, und einen Prozessor **604**, der mit einem Bus **602** verbunden ist, um Information zu verarbeiten. Das Computersystem **600** beinhaltet auch einen Hauptspeicher **606**, beispielsweise einen Direktzugriffsspeicher (RAM) oder eine andere dynamische Speichervorrichtung, die mit dem Bus **602** verbunden ist, um Informationen und Anweisungen zu speichern, die durch den Prozessor **604** auszuführen sind. Der Hauptspeicher **606** kann auch zum Speichern temporärer Variablen oder anderer Zwischeninformation während der Ausführung der durch den Prozessor **604** auszuführenden Anweisungen verwendet werden. Das Computersystem **600** beinhaltet weiter einen Nur-Lese-Speicher (ROM) **608** oder eine andere statische Speichervorrichtung, die mit dem Bus **602** verbunden ist, um statische Information und Anweisungen für den Prozessor **604** zu speichern. Eine Speichervorrichtung **610**, wie beispielsweise eine Magnetplatte oder eine optische Platte, ist vorgesehen und mit dem Bus **602** verbunden, um Informationen und Anweisungen zu speichern.

[0055] Das Computersystem **600** kann über einen Bus **602** mit einer Anzeige **612** wie beispielsweise einer Kathodenstrahlröhre (CRT) verbunden sein, um einem Computerbenutzer Informationen anzuzeigen. Eine Eingabevorrichtung **614**, die alphanumerische und weitere Tasten beinhaltet, ist mit dem Bus **602** verbunden, um die Informationen und ausgewählten Befehle an den Prozessor **604** weiterzuleiten. Ein weiterer Typ von Benutzereingabevorrichtung ist eine Cursor-Steuereinrichtung **616**, wie beispielsweise eine Maus, ein Trackball, oder Cursor-Richtungstasten, mit denen Richtungsinformation und ausgewählte Befehle an den Prozessor **604** weitergeleitet werden und die Cursor-Bewegung auf der Anzeige **612** gesteuert wird. Diese Eingabe-

vorrichtung weist typischerweise zwei Freiheitsgrade in zwei Achsen auf, einer ersten Achse (z.B. x) und einer zweiten Achse (z.B. y), die der Vorrichtung erlaubt, Positionen in einer Ebene festzulegen.

[0056] Die Erfindung betrifft die Anwendung des Computersystems **600** zum Entfernen einer Verzerrung in digitalen Kommunikationssystemen. Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung wird für ein Entfernen einer Verzerrung in digitalen Computersystemen durch ein Computersystem **600** gesorgt, und zwar reagierend darauf, dass der Prozessor **604** eine oder mehrere Sequenzen von einer oder mehreren im Hauptspeicher **606** enthaltenen Anweisungen ausführt. Derartige Anweisungen können aus einem weiteren computerlesbaren Medium, wie beispielsweise der Speichervorrichtung **610**, in den Hauptspeicher **606** eingelesen werden. Das Ausführen der im Hauptspeicher **606** enthaltenen Anweisungssequenzen veranlasst den Prozessor **604**, die hier beschriebenen Prozessschritte durchzuführen. Einer oder mehrere Prozessoren in einer Mehrfach-Verarbeitungsanordnung können auch verwendet werden, um die im Hauptspeicher **606** enthaltenen Anweisungssequenzen auszuführen. Bei alternativen Ausführungsbeispielen können fest verdrahtete Schaltkreise anstelle oder in Kombination mit Software-Anweisungen verwendet werden, um die Erfindung zu implementieren. Somit sind die Ausführungsbeispiele der Erfindung nicht auf irgendeine spezielle Kombination aus Hardware-schaltungen und Software eingeschränkt.

[0057] Der Begriff "computerlesbares Medium", wie hier verwendet, bezieht sich auf ein beliebiges Medium, das bei der Bereitstellung von auszuführenden Anweisungen für den Prozessor **604** beteiligt ist. Ein derartiges Medium kann viele Formen annehmen, einschließlich, jedoch nicht eingeschränkt auf nicht-flüchtige Medien, flüchtige Medien und Übertragungsmedien. Nicht-flüchtige Medien beinhalten beispielsweise optische oder magnetische Platten, wie beispielsweise die Speichervorrichtung **610**. Flüchtige Medien beinhalten einen dynamischen Speicher, wie beispielsweise den Hauptspeicher **606**. Übertragungsmedien beinhalten Koaxialkabel, Kupferdraht und Lichtleitfasern, einschließlich der Drähte, die den Bus **602** beinhalten. Die Übertragungsmedien können auch die Form von akustischen Wellen oder Lichtwellen annehmen, beispielsweise solchen, die während einer Funkwellen- und Infrarot-Datenkommunikation erzeugt werden.

[0058] Übliche Formen computerlesbarer Medien beinhalten beispielsweise eine Diskette, eine flexible Platte, eine Festplatte, ein Magnetband oder ein beliebiges anderes magnetisches Medium, eine CD-ROM, ein beliebiges anderes optisches Medium, Lochkarten, Papierband, ein beliebiges anderes physikalisches Medium mit Lochmustern, ein RAM, ein PROM, und ein EPROM, ein FLASH-EPROM oder einen beliebigen anderen Speicherchip oder -kassette, eine Trägerwelle, wie nachfolgend beschrieben, oder ein beliebiges anderes Medium, von dem ein Computer lesen kann.

[0059] Verschiedene Formen computerlesbarer Medien können zum Ausführen von einer oder mehreren Sequenzen einer oder mehrerer durch den Prozessor **604** auszuführenden Anweisungen beteiligt sein. Beispielsweise können sich die Anweisungen zu Beginn auf einer Magnetplatte eines entfernt aufgestellten Computers befinden. Der entfernt aufgestellte Computer kann die Anweisungen in seinen dynamischen Speicher laden und die Anweisungen unter Verwendung eines Modems über eine Telefonleitung senden. Ein am Ort des Computersystems **600** befindliches Modem kann die auf der Telefonleitung befindlichen Daten empfangen und einen Infrarotsender verwenden, um die Daten in ein Infrarotsignal umzuwandeln. Ein mit dem Bus **602** verbundener Infrarotdetektor kann die im Infrarotsignal befindlichen Daten empfangen und die Daten an den Bus **602** weiterleiten. Der Bus **602** leitet die Daten zum Hauptspeicher **606** weiter, von dem der Prozessor **604** die Anweisungen ausliest und ausführt. Die durch den Hauptspeicher **606** empfangenen Anweisungen können optional auf der Speichervorrichtung **606** gespeichert werden, und zwar entweder vor oder nach dem Ausführen durch den Prozessor **604**.

[0060] Das Computersystem **600** beinhaltet auch eine Kommunikationsschnittstelle **618**, die mit dem Bus **602** verbunden ist. Die Kommunikationsschnittstelle **618** liefert eine Zweiweg-Datenkommunikationsverbindung mit einer Netzwerkverbindung **620**, die mit einem lokalen Netz **622** verbunden ist. Beispielsweise kann die Kommunikationsschnittstelle **618** eine ISDN-(Integrated Services Digital Network)-Karte oder ein Modem sein, um eine Datenkommunikationsverbindung mit einem entsprechenden Typ von Telefonleitung bereitzustellen. Als weiteres Beispiel kann die Kommunikationsschnittstelle **618** eine LAN-(Local Area Network = Lokalnetzwerk)-Karte sein, um eine Kommunikationsverbindung mit einem kompatiblen LAN bereitzustellen. Drahtlose Verbindungen können ebenfalls implementiert sein. Bei einer beliebigen derartigen Implementierung sendet und empfängt die Kommunikationsschnittstelle **618** elektrische, elektromagnetische oder optische Signale, die digitale Datenströme tragen, welche verschiedene Informationstypen darstellen.

[0061] Die Netzwerkverbindung **620** liefert typischerweise Datenkommunikationen über eines oder mehrere Netze an weitere Datenvorrichtungen. Beispielsweise kann die Netzwerkverbindung **620** eine Verbindung über

ein lokales Netz **622** zu einem Host-Computer **624** oder eine durch einen ISP (Internet Service Provider = Internet-Dienstanbieter) **626** bereitstellen. Der ISP **626** stellt seinerseits Datenkommunikationsdienste über das weltweite Paketdatenkommunikationsnetz zur Verfügung, das heutzutage allgemein als "Internet" **628** bezeichnet wird. Sowohl das lokale Netz **622** als auch das Internet **628** verwenden elektrische, elektromagnetische oder optische Signale, die digitale Datenströme transportieren. Die über die verschiedenen Netze transportierten Signale und die über die Netzwerkverbindung **620** und die Kommunikationsschnittstelle **618** transportierten Signale, welche die digitalen Daten zum Computersystem **600** hin und von diesem weg transportieren, sind beispielhafte Formen von die Information transportierenden Trägerwellen.

[0062] Das Computersystem **600** kann Nachrichten senden und Daten, einschließlich Programmcode, empfangen, und zwar über das/die Netz(e), die Netzwerkverbindung **620** und die Kommunikationsschnittstelle **618**. Beim Beispiel des Internet könnte ein Server **630** einen angeforderten Code für ein Anwendungsprogramm über das Internet **628**, den ISP **626**, das lokale Netz **622** und die Kommunikationsschnittstelle **618** übertragen. Gemäß der Erfindung sorgt eine einzige derartige heruntergeladene Anwendung für die Entfernung einer Verzerrung in digitalen Kommunikationssystemen, wie hier beschrieben.

[0063] Der empfangene Code kann durch den Prozessor **604** ausgeführt werden, und zwar so wie empfangen, und/oder in der Speichervorrichtung **610** oder einem anderen nicht-flüchtigen Speicher für eine spätere Ausführung gespeichert werden. Auf diese Weise kann das Computersystem **600** einen Anwendungscode in Form einer Trägerwelle erhalten.

[0064] Der hier beschriebene neuartige Lösungsansatz zur Verringerung einer Verzerrung in digitalen Kommunikationssystemen sorgt für mehrere Vorteile gegenüber Lösungsansätzen des Standes der Technik. Ein signifikanter Vorteil besteht darin, dass eine Beseitigung von im Wesentlichen der gesamten ISI im Zeitbereich ermöglicht, dass sich die Datenraten an die theoretische Kapazität des Kommunikationskanals annähern, wie durch das Theorem von Shannon definiert. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass der Lösungsansatz so implementiert werden kann, dass er mit den empfangenen codierten Daten betrieben werden kann, ohne dass irgendwelche Änderungen des Übertragungsmechanismus erforderlich sind. Der Lösungsansatz sorgt auch für eine inhärente Stabilität ohne Fehlerausbreitung. Und schließlich ist der Lösungsansatz auf DSL-Protokolle und insbesondere das ADSL- und das VDSL-Protokoll anwendbar. Somit ist der Lösungsansatz zu ADSL/VDSL-, DMT- und OFDM-Übertragungseinrichtungen kompatibel, ohne dass Änderungen an den ADSL/VDSL-, DMT- und OFDM-Übertragungseinrichtungen erforderlich sind.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Verarbeitung von Daten, die von einer digitalen Teilnehmerleitung empfangen werden, wobei das Verfahren den folgenden computerimplementierten Schritt beinhaltet:

Empfangen (**404**) der Daten von der digitalen Teilnehmerleitung, wobei die Daten auf eine beliebige Anzahl von Trägern moduliert sind und eine durch die digitale Teilnehmerleitung eingebrachte Verzerrung beinhalten; wobei das Verfahren **dadurch gekennzeichnet** ist, dass es die folgenden Schritte beinhaltet:

Bestimmen einer MMSE-Schätzung (MMSE = Minimum Mean Square Estimate = Schätzung mit kleinstem mittleren Quadrat) der Daten, wobei die MMSE-Schätzung eine Schätzung der Daten ist, bevor die Übertragung der Daten auf der digitalen Teilnehmerleitung erfolgt ist; und

Verwenden (**410**) der MMSE-Schätzung als Teil einer Zeitbereichsentzerrung, um die durch die digitale Teilnehmerleitung in die Daten eingebrachte Verzerrung zu kompensieren.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Bestimmen einer MMSE-Schätzung der Daten ein Verarbeiten der Daten unter Verwendung eines Kalman-Filters beinhaltet.

3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem das Verarbeiten der Daten unter Verwendung eines Kalman-Filters ein Verarbeiten der Daten unter Verwendung eines Kalman-Filters mit einem Zustand größerer Länge beinhaltet.

4. Verfahren nach Anspruch 1, das, nach der Verwendung der MMSE-Schätzung zum Kompensieren der durch die digitale Teilnehmerleitung eingebrachten Verzerrung, weiter beinhaltet:

Transformieren der Daten von dem Zeitbereich in einen Frequenzbereich, um Frequenzbereichsdaten zu erzeugen, und

Entfernen von verbleibender Amplituden- und Phasenverzerrung aus den Frequenzbereichsdaten im Frequenzbereich.

5. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die digitale Teilnehmerleitung Teil eines Mehrträger-Kommunikationssystems ist.
6. Verfahren nach Anspruch 1, das weiter beinhaltet:
Bestimmen der MMSE-Schätzung der Daten unter Verwendung eines Kalman-Filters, und zwar durch:
Bestimmen einer Anfangszustands- und einer Kovarianz-Schätzung für den Kalman-Filter,
Bestimmen einer Zustandsschätzung und von Kovarianz-Vorhersagen,
Bestimmen einer Innovationen-Kovarianz,
Bestimmen einer Kalman-Verstärkung für den Kalman-Filter,
Bestimmen einer aktualisierten Zustandsschätzung und Kovarianzmatrix, und
Bestimmen einer Datenschätzung basierend auf der aktualisierten Zustandsschätzung.
7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem der Kalman-Filter ein Kalman-Filter mit einem Zustand größerer Länge ist.
8. Verfahren nach Anspruch 6, das, nach der Verwendung der MMSE-Schätzung zum Kompensieren der Verzerrung in den Daten, weiter beinhaltet: Transformieren der Daten von dem Zeitbereich in einen Frequenzbereich, um Frequenzbereichsdaten zu erzeugen, und Entfernen von verbleibender Amplituden- und Phasenverzerrung aus den Frequenzbereichsdaten im Frequenzbereich.
9. Verfahren nach Anspruch 8, bei dem das Entfernen der verbleibenden Amplituden- und Phasenverzerrung aus den Frequenzbereichsdaten in dem Frequenzbereich beinhaltet, dass eine Durchschnittswertbildung einer Sequenz von Trainingsdaten im Frequenzbereich durchgeführt wird, um eine Verstärkungsdilatation und eine Phasendrehung festzulegen, die für jede QAM-Konstellation bei jedem Ton benötigt werden, und dann die Transformation auf jede Konstellation in der empfangenen und transformierten Datenübertragung angewendet wird.
10. Verfahren nach Anspruch 8, bei dem das Entfernen der verbleibenden Amplituden- und Phasenverzerrung aus den Frequenzbereichsdaten im Frequenzbereich beinhaltet:
Bestimmen einer Frequenzantwort des Kalman-Filters, und Bestimmen einer Übertragungsfunktion von den Daten, bevor die Übertragung der Daten auf der digitalen Teilnehmerleitung erfolgt ist, zu den von der digitalen Teilnehmerleitung empfangenen Daten.
11. Empfänger zum Entzerren von analogen Daten, die von einem Kommunikationskanal empfangen werden, wobei die analogen Daten eine Verzerrung beinhalten, die durch die Übertragung der Daten auf dem Kommunikationskanal eingebracht wird, wobei der Empfänger beinhaltet:
einen oder mehrere Empfangsfilter;
einen oder mehrere Verstärker;
einen Analog-Digital-Wandler, der so konfiguriert ist, dass er die vom Kommunikationskanal empfangenen analogen Daten in digitale Daten umwandelt; und
einen Entzerrer, der mit einem Kalman-Filter so konfiguriert ist, dass eine MMSE-Schätzung (MMSE = Minimum Mean Square Estimate = Schätzung mit kleinstem mittleren Quadrat) der vom Kommunikationskanal empfangenen Daten bestimmt wird und die MMSE-Schätzung als Teil einer Zeitbereichsentzerrung verwendet wird, um die Verzerrung zu entfernen, die durch die Übertragung der analogen Daten auf dem Kommunikationskanal eingebracht wird.
12. Empfänger nach Anspruch 11, bei dem der Kalman-Filter ein Kalman-Filter mit einem Zustand größerer Länge ist.
13. Empfänger nach Anspruch 11, bei dem der Kommunikationskanal eine digitale Teilnehmerleitung ist und der Analog-Digital-Wandler so konfiguriert ist, dass er die analogen Daten von der digitalen Teilnehmerleitung empfängt und in digitale Daten umwandelt.
14. Computerlesbares Medium zum Verarbeiten von Daten, die von einer digitalen Teilnehmerleitung empfangen werden, wobei das computerlesbare Medium eine oder mehrere Sequenzen aus einer oder mehreren Anweisungen trägt, die, wenn sie durch einen oder mehrere Prozessoren ausgeführt werden, bewirken, dass der eine oder die mehreren Prozessoren die folgenden Schritte ausführt/ausführen:
Empfangen der Daten von der digitalen Teilnehmerleitung, wobei die übertragenen Daten auf eine beliebige Anzahl von Trägern moduliert sind und eine durch die digitale Teilnehmerleitung eingebrachte Verzerrung beinhalten;

Bestimmen einer MMSE-Schätzung (MMSE = Minimum Mean Square Estimate = Schätzung mit kleinstem mittleren Quadrat) der Daten, wobei die MMSE-Schätzung eine Schätzung der Daten ist, bevor die Übertragung der Daten auf der digitalen Teilnehmerleitung erfolgt ist; und
Verwenden der MMSE-Schätzung als Teil einer Zeitbereichsentzerrung, um die durch die digitale Teilnehmerleitung in die Daten eingebrachte Verzerrung zu kompensieren.

15. Computerlesbares Medium nach Anspruch 14, bei dem das Bestimmen einer MMSE-Schätzung der Daten ein Verarbeiten der Daten unter Verwendung eines Kalman-Filters beinhaltet.

16. Computerlesbares Medium nach Anspruch 15, bei dem das Verarbeiten der Daten unter Verwendung eines Kalman-Filters ein Verarbeiten der Daten unter Verwendung eines Kalman-Filters mit einem Zustand größerer Länge beinhaltet.

17. Computerlesbares Medium nach Anspruch 15, das weiter Anweisungen beinhaltet, die, wenn sie durch den einen oder die mehreren Prozessoren ausgeführt werden, bewirken, dass der eine oder die mehreren Prozessoren, nach der Verwendung der MMSE-Schätzung zum Kompensieren der durch die digitale Teilnehmerleitung eingebrachten Verzerrung, die Daten von dem Zeitbereich in einen Frequenzbereich transformiert/transformieren, um Frequenzbereichsdaten zu erzeugen, und verbleibende Amplituden- und Phasenverzerrung aus den Frequenzbereichsdaten im Frequenzbereich entfernt/entfernen.

18. Computerlesbares Medium nach Anspruch 14, das weiter eine oder mehrere Anweisungen beinhaltet, die, wenn sie durch den einen oder die mehreren Prozessoren ausgeführt werden, bewirken, dass der eine oder die mehreren Prozessoren die folgenden Schritte ausführt/ausführen:
Bestimmen der MMSE-Schätzung der Daten unter Verwendung eines Kalman-Filters, und zwar durch:
Bestimmen einer Anfangszustands- und einer Kovarianz-Schätzung für den Kalman-Filter,
Bestimmen einer Zustandsschätzung und von Kovarianz-Vorhersagen,
Bestimmen einer Innovationen-Kovarianz,
Bestimmen einer Kalman-Verstärkung für den Kalman-Filter,
Bestimmen einer aktualisierten Zustandsschätzung und Kovarianzmatrix, und
Bestimmen einer Datenschätzung basierend auf der aktualisierten Zustandsschätzung.

19. Computerlesbares Medium nach Anspruch 18, bei dem der Kalman-Filter ein Kalman-Filter mit einem Zustand größerer Länge ist.

20. Computerlesbares Medium nach Anspruch 18, das weiter eine oder mehrere zusätzliche Anweisungen beinhaltet, die, wenn sie durch den einen oder die mehreren Prozessoren ausgeführt werden, bewirken, dass der eine oder die mehreren Prozessoren die folgenden Schritte ausführt/ausführen:
nach der Verwendung der MMSE-Schätzung zum Kompensieren der Verzerrung in den Daten, Transformieren der Daten von dem Zeitbereich in einen Frequenzbereich, um Frequenzbereichsdaten zu erzeugen, und Entfernen von verbleibender Amplituden- und Phasenverzerrung aus den Frequenzbereichsdaten im Frequenzbereich.

21. Computerlesbares Medium nach Anspruch 20, das weiter eine oder mehrere zusätzliche Anweisungen beinhaltet, die, wenn sie durch den einen oder die mehreren Prozessoren ausgeführt werden, bewirken, dass der eine oder die mehreren Prozessoren den Schritt ausführt/ausführen, verbleibende Amplituden- und Phasenverzerrung aus den Frequenzbereichsdaten im Frequenzbereich zu entfernen, indem eine Durchschnittswertbildung einer Sequenz von Trainingsdaten im Frequenzbereich erfolgt, um eine Verstärkungsdilatation und eine Phasendrehung festzulegen, die für jede QAM-Konstellation bei jedem Ton benötigt werden, und dann die Transformation auf jede Konstellation in der empfangenen und transformierten Datenübertragung angewendet wird.

22. Computerlesbares Medium nach Anspruch 20, das weiter eine oder mehrere zusätzliche Anweisungen beinhaltet, die, wenn sie durch den einen oder die mehreren Prozessoren ausgeführt werden, bewirken, dass der eine oder die mehreren Prozessoren den Schritt ausführt/ausführen, verbleibende Amplituden- und Phasenverzerrung aus den Frequenzbereichsdaten im Frequenzbereich zu entfernen, indem eine Frequenzantwort des Kalman-Filters bestimmt wird, und eine Übertragungsfunktion von den Daten, bevor die Übertragung der Daten auf der digitalen Teilnehmerleitung erfolgt ist, zu den von der digitalen Teilnehmerleitung empfangenen Daten bestimmt wird.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

FIG. 1 (STAND DER TECHNIK)

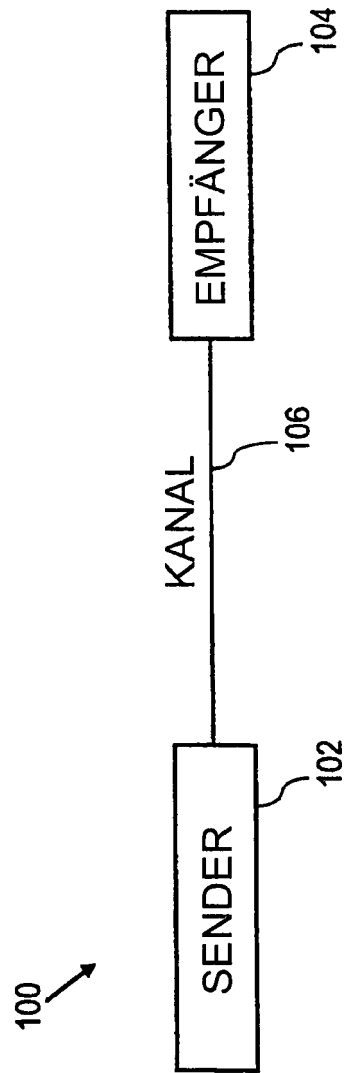


FIG. 2 (STAND DER TECHNIK)

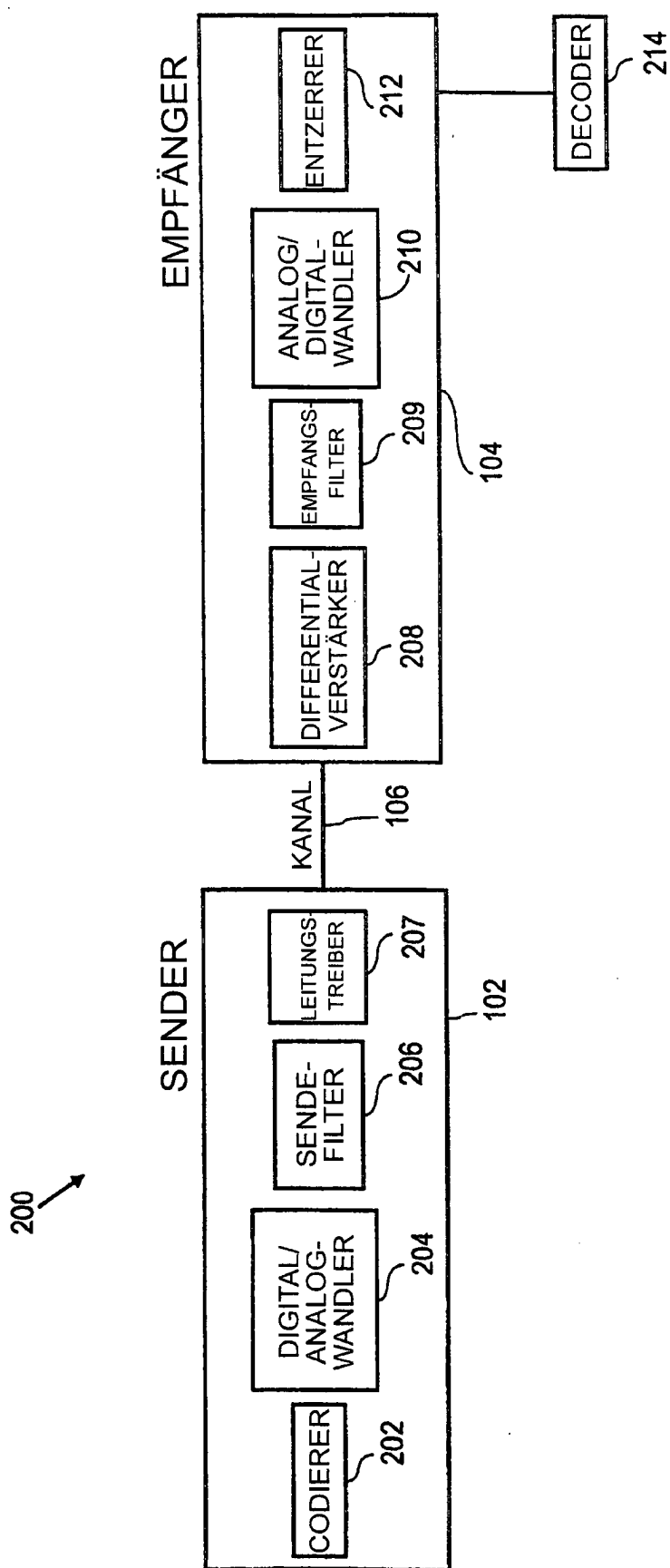


FIG. 3

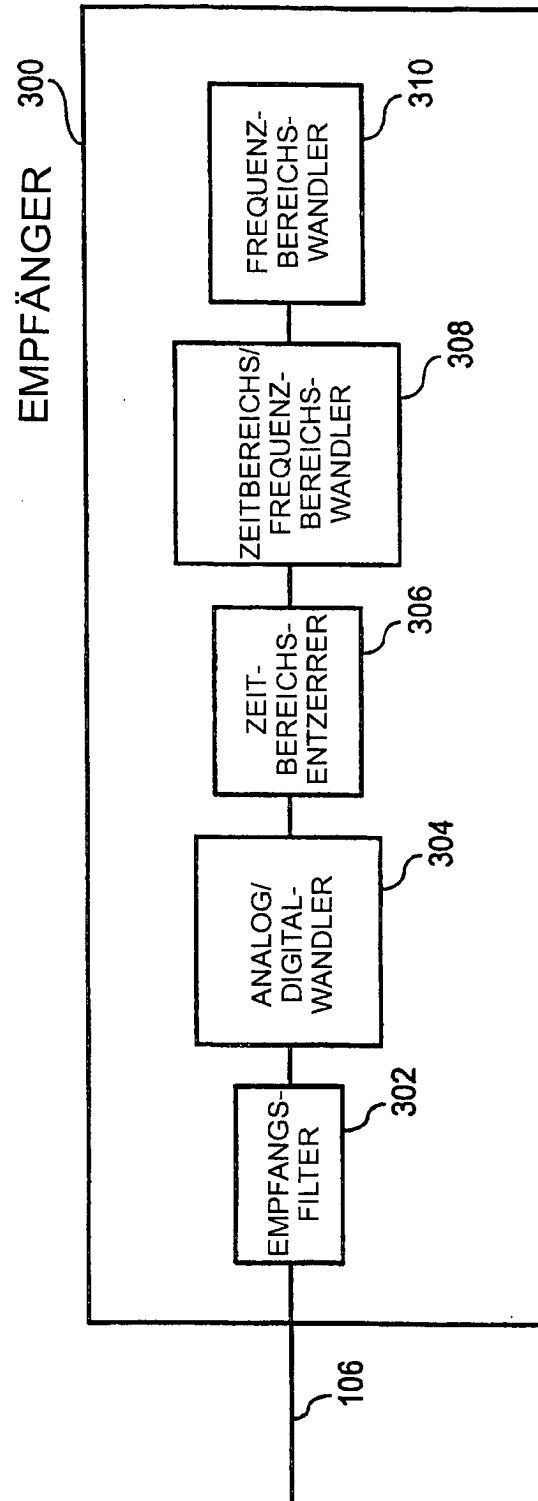
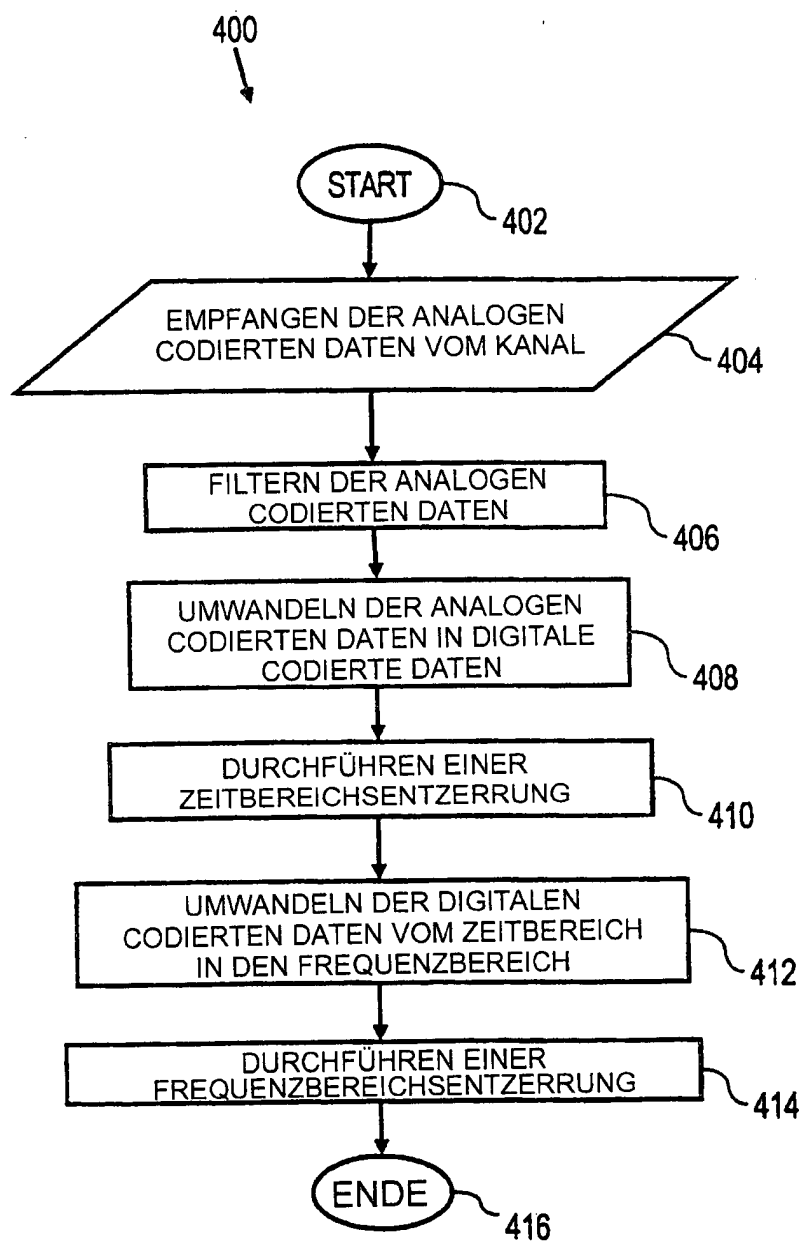


FIG. 4



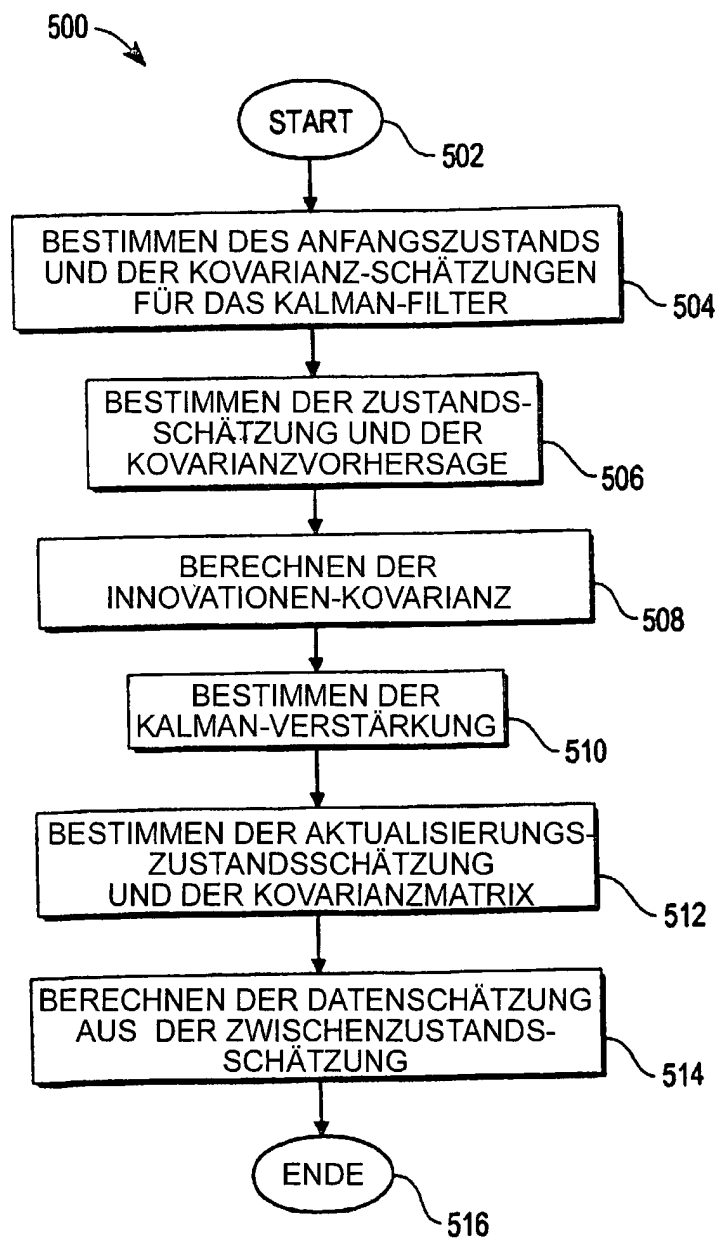
*Fig. 5*

FIG. 6

