

(19)



(11)

**EP 1 964 344 B1**

(12)

**EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:  
**03.10.2018 Patentblatt 2018/40**

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

(21) Anmeldenummer: **06818742.6**

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/EP2006/011198**

(22) Anmeldetag: **22.11.2006**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 2007/079818 (19.07.2007 Gazette 2007/29)**

(54) **VERFAHREN UND ENTZERRER ZUR DETEKTION VON ÜBER EINEN ZEITVERÄNDERLICHEN ÜBERTRAGUNGSKANAL ÜBERTRAGENEN DATENSYMBOL-SEQUENZEN AUS EINEM DIESE ENTHALTENDEN EMPFANGSSIGNAL**

METHOD AND EQUALISER FOR DETECTING DATA SYMBOL SEQUENCES FROM A RECEIVED SIGNAL CONTAINING SAID SEQUENCES, TRANSMITTED VIA A TIME-VARIABLE TRANSMISSION CHANNEL

PROCÉDÉ ET ÉGALISEUR DESTINÉS À LA DÉTECTION DE SÉQUENCES DE SYMBOLES DE DONNÉES TRANSMISES SUR UN CANAL DE TRANSMISSION VARIABLE DANS LE TEMPS, À PARTIR D'UN SIGNAL DE RÉCEPTION CONTENANT CES SÉQUENCES

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI SK TR**

(74) Vertreter: **Körfer, Thomas Mitscherlich PartmbB Patent- und Rechtsanwälte Sonnenstrasse 33 80331 München (DE)**

(30) Priorität: **23.12.2005 DE 102005061992 17.02.2006 DE 102006007407 31.03.2006 DE 102006015040 27.06.2006 DE 102006029464**

(56) Entgegenhaltungen:  
**DE-A1- 10 228 159 US-A1- 5 432 821**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**03.09.2008 Patentblatt 2008/36**

- **ISABELLA DE BROECK: "Interleaved Frequency-Division Multiple-Access" DISSERTATION, [Online] 9. Januar 2004 (2004-01-09), Seiten 1-100, XP002424443 Darmstadt Gefunden im Internet: URL:[http://elib.tu-darmstadt.de/diss/00052\\_5/](http://elib.tu-darmstadt.de/diss/00052_5/) [gefunden am 2007-03-13]**

(73) Patentinhaber: **Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG 81671 München (DE)**

- **I. DE BROECK, M. KULLMANN, U. SORGER: "Reduced State Joint Channel Estimation and Equalization" SECOND INTERNATIONAL WORKSHOP ON MULTI-CARRIER SPREAD SPECTRUM, September 1999 (1999-09), XP009080631 Oberpfaffenhofen**

(72) Erfinder: **DEPERT, Thorben 80634 München (DE)**

**EP 1 964 344 B1**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren und einen Entzerrer zur Detektion von über einen zeitveränderlichen Übertragungskanal übertragenen Datensymbol-Sequenzen aus einem diese enthaltenden Empfangssignal.

**[0002]** Empfangssignale sind in einem realen Übertragungskanal in mehrfacher Hinsicht gestört. Neben der Überlagerung von Störsignalen - vor allem Rauschen - wird das Übertragungssignal insbesondere durch Interferenzen gestört. Diese Interferenzen können in einem Mobilfunknetz durch Intersymbol-Interferenzen, durch die Überlagerung von unterschiedlichen Sendesignalen, die von mehreren sendenden Mobilfunkgeräten aus benachbarten Zellen im gleichen Frequenzband (Gleichkanalstörer) oder aus unterschiedlichen Frequenzbändern (Nebenkanalstörer) resultieren, oder durch die Überlagerung von identischen Sendesignalen, die von einem einzigen Nutzer über unterschiedliche Sender abgestrahlt werden - sendeseitige Diversität bei Space-Time-Codierung oder Verzögerungen generierende Diversität - entstehen.

**[0003]** Das gestörte Empfangssignal, das nach der Demodulation als verzerrte und additiv und/oder multiplikativ gestörte Datensymbol-Sequenz vorliegt, muss in einem Entzerrer in mehrere den einzelnen gesendeten Datensymbol-Sequenzen entsprechende Datenströme übergeführt werden.

**[0004]** Der Stand der Technik umfasst eine Vielzahl von Detektions- bzw. Entzerrungsverfahren, aus denen in Abhängigkeit des vorliegenden Übertragungssignals und der vorherrschenden Stör- und Verzerrungsquellen das jeweils optimale Detektions- bzw. Entzerrungsverfahren auszuwählen ist.

**[0005]** Eine wichtige Gruppe von Detektions- bzw. Entzerrungsverfahren stellen die Maximum-Likelihood-Verfahren dar, bei denen die gestörte empfangene Datensymbol-Sequenz mit allen möglichen ungestörten Datensymbol-Sequenzen aus einem bei der Modulation verwendeten Datensymbolalphabet verglichen wird und diejenige ungestörte Datensymbol-Sequenz als Schätzung für die gesendete Datensymbol-Sequenz ausgewählt wird, die eine minimale euklidische Distanz zur gestörten empfangenen Datensymbol-Sequenz aufweist. Die Anzahl der Vergleiche zwischen dem gestörten empfangenen Datensymbol und allen möglichen Referenz-Datensymbolen, die der Mächtigkeit des Datensymbolalphabets des verwendeten Modulationsverfahren entspricht, kann bei höherwertigen Modulationsverfahren - beispielsweise schon bei 8-PSK, erst recht bei 64-QAM, 128-QAM - sehr umfangreich sein.

**[0006]** Diese Komplexität in der Schätzung wird zusätzlich dadurch verschärft, dass aufgrund der Faltung der gesendeten Datensymbol-Sequenz mit der Impulsantwort des Übertragungskanals einer bestimmten Impulslänge Anteile eines Datensymbols der gesendeten Datensymbol-Sequenz sich zeitlich vorausgehenden Datensymbolen der gesendeten Datensymbol-Sequenz überlagern. Diese zeitlichen Verkopplungen zwischen den einzelnen Datensymbolen einer Datensymbol-Sequenz, die einen Zustandsautomaten darstellen, können in ihrer zeitlichen Abfolge mittels eines Zustandsdiagramms modelliert werden. Ein weit verbreitetes Zustandsdiagramm, das Trellis-Diagramm, stellt für die Impulslänge der Impulsantwort des Übertragungskanals und für das Datensymbol-Alphabet des verwendeten Modulationsverfahrens alle möglichen Zustände und Zustandsübergänge dar.

**[0007]** Mit Hilfe des Trellis-Diagramms kann die Schätzung des im jeweiligen Zeitpunkt gesendeten Datensymbols aus der euklidischen Distanz zwischen dem gestörten im jeweiligen Zeitpunkt empfangenen Datensymbol und allen zu den im jeweiligen Zeitpunkt möglichen Zuständen korrespondierenden Referenz-Datensymbolen ermittelt werden. Eine Schätzung des im jeweiligen Zeitpunkt gesendeten Datensymbols ist aufgrund der Vielzahl von Zuständen und der noch viel zahlreicheren Kombinationsmöglichkeiten aufeinander folgenden Zustände bei den heute zum Einsatz kommenden höherwertigen Modulationsverfahren in Echtzeit nicht möglich. Ein praktikabler Lösungsweg stellt der Viterbi-Algorithmus dar, der eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten im Trellis-Diagramm dadurch reduziert, dass nur derjenige Übergang zwischen einem Zustand im letzten Zeitpunkt und allen möglichen Nachfolgezustände im aktuellen Zeitpunkt ausgewählt wird, der die minimale euklidische Distanz zwischen dem gestörten im aktuellen Zeitpunkt empfangenen Datensymbol und den zu allen im aktuellen Zeitpunkt möglichen Vorgängerzuständen gehörigen Referenz-Datensymbolen aufweist. Auf diese Weise reduziert sich die Schätzproblematik auf die Identifizierung von der Anzahl von Zuständen entsprechenden Anzahl so genannter "Überlebenspfade" im Trellis-Diagramm.

**[0008]** Aufgrund der Zeitveränderlichkeit des Übertragungskanals ist bei der Minimierung der euklidischen Distanz in jedem Zustandsübergang nicht nur das zum im aktuellen Zeitpunkt auszuwählenden Zustand gehörige Datensymbol, sondern auch die Impulsantwort des Übertragungskanals im aktuellen Zeitpunkt zu schätzen. Da die Schätzung der Impulsantwort des Übertragungskanals im aktuellen Zeitpunkt von dem im aktuellen Zeitpunkt gesendeten Datensymbol und damit vom im aktuellen Zeitpunkt geschätzten Datensymbol abhängt, ist für jeden Zustand im aktuellen Zeitpunkt eine Schätzung der Impulsantwort des Übertragungskanals erforderlich. Bei einem Symbolalphabet des verwendeten Modulationsverfahrens der Mächtigkeit  $M$  und insgesamt  $N_S$  Zuständen je Zeitpunkt sind folglich insgesamt  $M \cdot N_S$  Schätzungen der Kanalimpulsantwort durchzuführen.

**[0009]** Diese Vielzahl von Schätzungen der Impulsantwort des Übertragungskanals wird bei Verfahren des Standes der Technik dadurch reduziert, dass die Anzahl der Zustände durch "Verkürzung der Impulslänge des Übertragungskanals" verkleinert wird.

**[0010]** Für den allgemeinsten Fall von unterschiedlichen Sendesignale, welche von unterschiedlichen Sendern abge-

strahlt, jeweils über unterschiedliche Übertragungskanäle übertragen und zu einem Empfangssignal überlagert werden, ergibt sich das Übertragungssystem gemäß Fig. 1. In mehreren Sendern  $1_1, \dots, 1_u, \dots, 1_U$ , die jeweils eine Sender-Gewichtsfunktion  $g_{T1}(t), \dots, g_{Tu}(t), \dots, g_{TU}(t)$  aufweisen, wird jeweils eine Datensymbol-Sequenz

$$\sum_k d^{(1)}(k)\delta(t - kT), \dots, \sum_k d^{(u)}(k)\delta(t - kT), \dots, \sum_k d^{(U)}(k)\delta(t - kT)$$

abgestrahlt. Die mit der jeweiligen

Sender-Gewichtsfunktion jeweils gewichtete Datensymbol-Sequenz wird über einen jeweiligen Übertragungskanal  $2_1, \dots, 2_u, \dots, 2_U$  mit der jeweiligen zeitvarianten Gewichtsfunktion  $g_{CH1}(\tau, t), \dots, g_{CHu}(\tau, t), \dots, g_{CHU}(\tau, t)$ , einem Empfänger 3, der i.a. als Matched-Filter mit der Gewichtsfunktion  $g_R(t)$  realisiert ist, einer Abtasteinheit 4, einem Vorfilter 5 und einem gemischten Kanal-Daten-Schätzer 6 zugeführt. Dieses Vorfilter 5 ist als Impulsverkürzungsfiler optional kombiniert mit einem Whitening-Filter realisiert.

**[0011]** Die Realisierung eines derartigen Impulsverkürzungsfilters in Kombination mit einem Daten-Kanal-Schätzer, in dem ein Joint-Delayed-Decision-Feedback-Estimation-Algorithmus (JDDFSE) - eine Abwandlung des Viterbi-Algorithmus mit dem Gedächtnis mehrerer parallel gesendeter Datensymbol-Sequenzen je Zustand des Trellis-Diagramms - implementiert ist und Stand der Technik für die kombinierte Daten-Kanal-Schätzung bei Überlagerung mehrerer Sendersymbol-Sequenzen in einer Empfangssymbol-Sequenzen darstellt, ist in Detert, T.: "Fractional Spaced Channel Estimation and Shortening for Joint Delayed Decision Feedback Sequence Estimation" beschrieben. Die Detektion und Entzerrung mehrerer gleichzeitig eintreffender Empfangs-Symbolsequenzen kann anstelle des JDDFSE-Algorithmus auch alternativ mit einem Joint-Maximum-Likelihood-Sequence-Estimator (JMLSE) oder einem Joint-Reduces-State-Sequence-Estimator (JRSSE) durchgeführt werden.

**[0012]** Nachteilig an allen diesen Realisierungen ist der vergleichsweise hohe Rechenaufwand in der Berechnung des Filteralgorithmus des Vorfilters.

**[0013]** Hinzukommt, dass in der praktischen Anwendung des Maximum-Likelihood-Verfahrens zur Schätzung der gesendeten Datensymbol-Sequenzen aus Rechenzeitgründen ein so genanntes Blockfading angenommen wird, bei dem eine Schätzung der jeweiligen Kanalimpulsantwort nur einmal je Zeitschlitz oder je zu übertragenden Datensymbol-Burst durchgeführt wird und die Impulsantwort des jeweiligen Übertragungskanals über die Länge des Zeitschlitzes bzw. des Datensymbol-Bursts als konstant betrachtet wird. Wird bei dieser Näherung für die Impulsantwort des jeweiligen Übertragungskanals im ungünstigsten Fall die Faltung der empfangenen und mit dem Matched-Filter vorgefilterten Datensymbol-Sequenz  $r(k)$  mit der Impulsantwort  $g_{IS}(k)$  am Ende des Datensymbol-Bursts - Symbol "o" in Fig. 2 - durchgeführt, so hat sich der jeweilige Kanal geändert und es kommt gemäß Fig. 2 zu Vorschwingern, während diese im weniger ungünstigen Fall der Faltung der empfangenen und mit dem Matched-Filter vorgefilterten Datensymbol-Sequenz  $r(k)$  mit der Impulsantwort  $g_{IS}(k)$  in der Mitte des Datensymbol-Bursts - Symbol "x" in Fig. 2 - nicht auftreten. Der Grund ist, dass  $g_{IS}(k)$  aus einer Schätzung des jeweiligen Kanals mittels einer Trainings-Sequenz erfolgt. Je weiter man sich von der Trainings-Sequenz entfernt, desto weniger verkürzt  $g_{IS}(k)$  den sich ändernden jeweiligen Kanal. Folglich entsteht im ungünstigen Fall trotz eines guten Signal-Rauschabstands bei Verwendung eines Matched-Filters ein unerwünschter Fehlerboden in der empfangenen Datensymbol-Sequenz.

**[0014]** Eine kombinierte Kanalschätzung und Entzerrung basierend auf einer rekursiven Berechnung der Pfadmetrik unter Verwendung von a-priori und a-posteriori Schätzfehlern wird auf den Seiten 60-83 in Isabella de Broeck: "Interleaved Frequency-Division Multiple Access" Darmstädter Dissertation, 09. Januar 2004, beschrieben.

**[0015]** Aufgabe der Erfindung ist es also, ein Verfahren und einen entsprechenden Entzerrer zur Detektion von mehreren gesendeten und über jeweils einen zeitveränderlichen Übertragungskanal übertragener Datensymbol-Sequenzen aus der gestörten empfangenen Datensymbol-Sequenz, zu entwickeln, das mit einem geringen Rechenaufwand verbunden ist und gleichzeitig bei gegebenem Signal-Rauschabstand keine zusätzlichen Störungen in der empfangenen Datensymbol-Sequenz erzeugt.

**[0016]** Die Aufgabe wird durch ein Verfahren zur Detektion von mehreren gesendeten und über jeweils einen zeitveränderlichen Übertragungskanal übertragenen Datensymbol-Sequenzen aus dem Empfangssignal mit den Merkmalen des Anspruchs 1 und einen entsprechenden Entzerrer mit den Merkmalen des Anspruchs 16 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in den abhängigen Ansprüchen aufgeführt.

**[0017]** Beim erfindungsgemäßen Verfahren wird sowohl die Metrik zur Auswahl der Zustände in den einzelnen "Überlebenspfaden" im aktuellen Zeitpunkt - als Schätzungen für das im aktuellen Zeitpunkt über den jeweiligen Übertragungskanal übertragene Datensymbol - als auch die Schätzungen für die jeweilige Kanalimpulsantwort im aktuellen Zeitpunkt iterativ berechnet.

**[0018]** Da hierbei die jeweils zu den einzelnen Zuständen gehörigen Metriken im aktuellen Zeitpunkt als auch die Schätzungen die einzelnen Kanalimpulsantworten für jeden Zustand im aktuellen Zeitpunkt von der Schätzung der einzelnen Kanalimpulsantworten in vorherigen Zeitpunkten abhängt, sind bei insgesamt  $N_S$  Zuständen im vorherigen Zeitpunkt jeweils nur  $N_S$  Schätzungen der jeweiligen Kanalimpulsantworten im Gegensatz zu den insgesamt  $M \cdot N_S$  Schätzungen der jeweiligen Kanalimpulsantworten im Fall des Viterbi-Algorithmus erforderlich.

**[0019]** Wie beim Viterbi-Algorithmus werden im aktuellen Zeitpunkt diejenigen Zustände im Trellis-Diagramm ausgewählt, die eine minimale Pfadmetrik aufweisen. In einer ersten Ausführungsform der Erfindung werden nur diejenigen Zustände bei der Auswahl mittels Minimierung der Metrik berücksichtigt, die aus einem gemeinsamen Zustand im vorhergehenden Zeitpunkt hervorgehen, während in einer zweiten Ausführungsform der Erfindung, alle Zustände im aktuellen Zeitpunkt, die aus allen Zuständen im vorhergehenden Zeitpunkt hervorgehen, bei der Auswahl der Zustände mittels Minimierung der Metrik herangezogen werden.

**[0020]** Das erfindungsgemäße Verfahren kann nicht nur, wie soeben dargestellt, das Trellis-Diagramm zuerst "in der Breite" nach einer optimalen Schätzung für die jeweilig gesendete Datensymbol-Sequenz ("breadth-first"-Verfahren), sondern auch in einer weiteren Ausführungsform der Erfindung das Trellis-Diagramm zuerst "in der Tiefe" nach einer optimalen Schätzung für die jeweilig gesendete Datensymbol-Sequenz ("depth-first"-Verfahren) in Anlehnung an den Stack-Algorithmus durchsuchen.

**[0021]** Bei der iterativen Berechnung der Pfadmetrik eines Zustands im aktuellen Zeitpunkt wird zur Pfadmetrik des Vorläuferzustands im vorhergehenden Zeitpunkt die zugehörige Zweigmetrik dazuaddiert, die sich aus dem Produkt eines ersten und zweiten a-priori-Schätzfehlers ergibt. Der erste bzw. zweite a-priori-Schätzfehler wiederum ergibt sich aus der Differenz zwischen der bis zum aktuellen Zeitpunkt jeweilig empfangenen Datensymbol-Sequenz und der Schätzung der mit einer zu einem ersten bzw. zweiten Zeitpunkt geschätzten Impulsantwort des jeweiligen Übertragungskanals gewichteten Schätzung der bis zum aktuellen Zeitpunkt jeweilig gesendeten Datensymbol-Sequenz. Der erste und zweite Zeitpunkt ist jeweils ein unterschiedlicher Zeitpunkt vor dem aktuellen Zeitpunkt.

**[0022]** Anstelle des Produktes eines ersten und zweiten a-priori-Schätzfehlers kann auch das Produkt aus einem a-priori-Schätzfehler und einem a-posteriori-Schätzfehler zum Einsatz kommen. Hierbei ergibt sich der a-priori-Schätzfehler aus der Differenz zwischen der bis zum aktuellen Zeitpunkt jeweilig empfangenen Datensymbol-Sequenz und der Schätzung der mit einer zum vorherigen Zeitpunkt geschätzten Impulsantwort des jeweiligen Übertragungskanals gewichteten Schätzung der bis zum aktuellen Zeitpunkt jeweilig gesendeten Datensymbol-Sequenz und der a-posteriori-Schätzfehler aus der Differenz zwischen der bis zum aktuellen Zeitpunkt jeweilig empfangenen Datensymbol-Sequenz und der Schätzung der mit einer zum aktuellen Zeitpunkt geschätzten Impulsantwort des jeweiligen Übertragungskanals gewichteten Schätzung der bis zum aktuellen Zeitpunkt jeweilig gesendeten Datensymbol-Sequenz.

**[0023]** In weiteren Ausführungsformen der Erfindung können die Produkte aus dem ersten und zweiten a-priori-Schätzfehler bzw. die Produkte aus dem a-priori-Schätzfehler und dem a-posteriori-Schätzfehler einer Betragsbildungsfunktion, einer Realteilbildungsfunktion oder einer sonstigen Funktion zur Vereinfachung der Berechnungen der aus komplexen Zahlen bestehenden Größen unterworfen werden.

**[0024]** Durch Einführung eines Gewichtungsfaktors können bei der rekursiven Berechnung der Pfadmetriken früher gesendete Datensymbole schwächer als später gesendete Datensymbole gewichtet werden.

**[0025]** Da aufgrund der Faltungsoperation bei der Ermittlung der Schätzung der jeweilig empfangenen Datensymbol-Sequenz in zukünftigen Zeitpunkten Schätzwerte für jeweilig gesendete Datensymbole und Kanalimpulsantworten im aktuellen bzw. in vorhergehenden Zeitpunkten eingehen, die im aktuellen Zeitpunkt bereits ermittelt sind, können diese in einer weiteren Ausführungsformen der Erfindung in einem Erweiterungsterm berücksichtigt werden, der mit der iterativ berechneten Pfadmetrik eine erweiterte Pfadmetrik bildet. Da zukünftig jeweilig empfangene und gesendete Datensymbole zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht bekannt sind, wird die erweiterte Metrik zum aktuellen Zeitpunkt als Erwartungswert der Differenzen zwischen den in zukünftigen Zeitpunkten jeweilig empfangenen Datensymbolen und den mit der im aktuellen Zeitpunkt geschätzten Impulsantwort des jeweiligen Übertragungskanals gewichteten jeweiligen Datensymbolen der in zukünftigen Zeitpunkten jeweilig gesendeten Datensymbol-Sequenzen ermittelt, wobei die Anzahl der zukünftigen Zeitpunkte der um den Faktor 1 reduzierten Impulslänge der jeweiligen Kanalimpulsantwort entspricht.

**[0026]** Auf diese Weise wird die volle Energie des zum aktuellen Zeitpunkt jeweilig gesendeten Datensymbols bei der Schätzung der jeweilig empfangenen Datensymbol-Sequenz zum aktuellen Zeitpunkt berücksichtigt und damit der Schätzfehler bei der Entzerrung einer jeweilig empfangenen Datensymbol-Sequenz, die auf einem jeweiligen Übertragungskanal mit einer Kanalimpulsantwort mit einer Impulslänge größer als 1 übertragen wird, minimiert.

**[0027]** Die iterative Schätzung der Kanalimpulsantwort des jeweiligen Übertragungskanals kann über ein adaptives rekursives Kanalschätzverfahren, beispielsweise über den rekursiven Least-Squares-Algorithmus, erfolgen. Alternativ können aber auch andere adaptive rekursive Kanalschätzverfahren zum Einsatz kommen.

**[0028]** Die Schätzung der Kanalimpulsantwort des jeweiligen Übertragungskanals muss nicht zu jedem Zeitpunkt erfolgen. Bei einer sich langsam verändernden Kanalimpulsantwort des jeweiligen Übertragungskanals ist durchaus eine Schätzung in einem größeren Zeitraster möglich. Ändert sich die Kanalimpulsantwort des jeweiligen Übertragungskanals nur unwesentlich, so ist eine Kanalschätzung einzig zu Beginn der Übertragung ausreichend.

**[0029]** Die einzelnen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens und des erfindungsgemäßen Entzerrers zur Detektion von über einen zeitveränderlichen Übertragungskanal übertragenen Datensymbol-Sequenzen aus einem Empfangssignal werden im folgenden anhand der Zeichnung im Detail erläutert. Die Figuren der Zeichnung zeigen:

Fig. 1 ein Blockdiagramm des Übertragungssystems nach dem Stand der Technik,

Fig. 2 ein Zeitdiagramm der Impulsantwort bei einem Übertragungssystem mit einem Vorfilter nach dem Stand der Technik,

Fig. 3 ein Trellis-Diagramm zur Schätzung der Datensymbol-Sequenz nach dem erfindungsgemäßen Verfahren,

Fig. 4 eine Übersichtsdarstellung von relevanten Termen zur Pfadmetrik-Berechnung in verschiedenen Zeitpunkten,

Fig. 5 ein Blockdiagramm des erfindungsgemäßen Übertragungssystems,

Fig. 6 ein Flussdiagramm der erfindungsgemäßen Verfahrens und

Fig. 7 eine Darstellung der Bitfehlerwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Sendeleistung zweier Sender bei einem Verfahren nach dem Stand der Technik und dem erfindungsgemäßen Verfahren.

**[0030]** Bevor anhand der Fig. 6 das erfindungsgemäße Verfahren zur Detektion von mehreren gesendeten und über jeweils einen zeitveränderlichen Übertragungskanal übertragenen Datensymbol-Sequenzen aus einem Empfangssignal im Detail vorgestellt wird, werden im Folgenden die für das Verständnis des erfindungsgemäßen Verfahrens erforderlichen mathematischen Grundlagen beschrieben: Ausgangspunkt des erfindungsgemäßen Verfahrens ist ein zeitinvariantes bzw. zeitvariantes Signalmodell der Übertragungskanäle gemäß Gleichung (1):

$$\underline{r}^{(k)} = \underline{D}^{(k)} \cdot \underline{h}^{(k)} + \underline{n}^{(k)} \quad (1)$$

**[0031]** Die Übertragungskanäle werden zur Schätzung der Impulsantworten der Übertragungskanäle in einer ersten Phase mit einer gesendeten Datensymbol-Trainingssequenz  $\underline{d}$  der Länge  $L_t$  angeregt. Zur Schätzung der Impulsantwort des jeweiligen Übertragungskanals in den ersten  $L_t$  Zeitpunkten kann ein adaptiver Kanalschätzalgorithmus ohne Berücksichtigung der Kanalstatistik (beispielsweise ein Least-Squares-Algorithmus), mit Berücksichtigung der unbekanntes Kanalstatistik (beispielsweise ein MMSE-Kanalschätzverfahren), mit Berücksichtigung der bekannten Kanalstatistik (beispielsweise ein Maximum-Likelihood-Schätzverfahren bzw. deren Derivate) oder eine blinde bzw. semiblinde Erstkanalschätzung eingesetzt sein.

**[0032]** Eine Schätzung der gesendeten Datensymbole kann folglich nicht in den ersten  $L_t$  empfangenen Datensymbolen  $r(k)$ ,  $0 \leq k \leq L_t - 1$ , sondern frühestens zum Zeitpunkt  $L_t$  erfolgen. Der Vektor  $\underline{r}^{(k)}$  der empfangenen Datensymbole zur Schätzung des jeweilig gesendeten Datensymbols zu einem beliebigen Zeitpunkt  $k$  beginnt folglich gemäß Gleichung (2) erst ab dem Zeitpunkt  $L_t$ .

$$\underline{r}^{(k)} = [r(L_t), r(L_t + 1), \dots, r(k)]^T \quad (2)$$

**[0033]** Analog beginnt auch der Rauschvektor  $\underline{n}^{(k)}$  gemäß Gleichung (3) erst ab dem Zeitpunkt  $L_t$ .

$$\underline{n}^{(k)} = [n(L_t), n(L_t + 1), \dots, n(k)]^T \quad (3)$$

**[0034]** Der Vektor  $\underline{h}^{(k)}$  enthält gemäß Gleichung (4) die Impulsantworten der einzelnen Übertragungskanäle:

$$\underline{h}^{(k)} = [\underline{h}_1^{(k)T}, \dots, \underline{h}_u^{(k)T}, \dots, \underline{h}_U^{(k)T}]^T \quad (4)$$

**[0035]** Hierbei ergibt sich die Impulsantwort  $\underline{h}_u^{(k)T}$  des u-ten Übertragungskanals gemäß Gleichung (5).

$$\underline{h}_u^{(k)T} = (h_u(0), h_u(1), \dots, h_u(L_{hu} - 1))^T \quad (5)$$

**[0036]** Die Toeplitz-Matrix  $\underline{D}_u^{(k)}$  der vom u-ten Sender gesendeten Datensymbole ergibt sich folglich gemäß Gleichung (6):

$$\underline{D}_u^{(k)} = \begin{pmatrix} d_u(L_t) & d_u(L_t - 1) & \cdots & d_u(L_t - (L_h - 1)) \\ d_u(L_t + 1) & d_u(L_t) & \cdots & d_u(L_t - (L_h - 2)) \\ d_u(L_t + 2) & d_u(L_t + 1) & \cdots & d_u(L_t - (L_h - 3)) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_u(k) & d_u(k - 1) & \cdots & d_u(k - (L_h - 1)) \end{pmatrix} \quad (6)$$

[0037] Die Toeplitz-Matrix  $D^{(k)}$  in Gleichung (1) setzt sich folglich gemäß Gleichung (7) aus den einzelnen für jeden Sender gemäß Gleichung (6) definierten Toeplitz-Matrizen zusammen.

$$\underline{D}^{(k)} = \left( \underline{D}_1^{(k)} \quad \cdots \quad \underline{D}_u^{(k)} \quad \cdots \quad \underline{D}_U^{(k)} \right) \quad (7)$$

[0038] Zur Schätzung der zum Zeitpunkt  $k$  jeweils gesendeten Datensymbole aus einer empfangenen Datensymbol-Sequenz  $\underline{r}$  nach insgesamt  $\tilde{N}$  Zeitpunkten gemäß Gleichung (8), wobei  $\tilde{N}$  ein um die Impulslänge  $L_h$  der jeweiligen Kanalimpulsantwort verlängerter beliebiger Zeitpunkt  $N$  ist, wird bei Anwendung des Maximum-Likelihood-Ansatzes die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(\underline{D}^{(k)}|\underline{r})$  maximiert.

$$\underline{r} = [r(0), r(1), \dots, r(\tilde{N} - 1)]^T \quad \text{mit} \quad \tilde{N} = N + L_h - 1 \quad (8)$$

[0039] Die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(\underline{D}^{(k)}|\underline{r})$  aus der empfangenen Datensymbol-Sequenz  $\underline{r}$  kann gemäß Gleichung (9) durch die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(\underline{D}^{(k)}|\underline{r}^{(k)})$  aus der empfangenen Datensymbol-Sequenz  $\underline{r}^{(k)}$  bis zum Zeitpunkt  $k$  angenähert werden.

$$P(\underline{D}^{(k)}|\underline{r}) \approx P(\underline{D}^{(k)}|\underline{r}^{(k)}) \quad (9)$$

[0040] Eine Identität zwischen den beiden bedingten Wahrscheinlichkeiten in Gleichung (9) liegt i.a. nicht vor, da aufgrund der Faltung der beispielsweise vom  $u$ -ten Sender gesendeten Datensymbol-Sequenz  $\underline{d}_u^{(k)} = [d_u(k), d_u(k-1), d_u(k-2), \dots, d_u(k-(L_h-1))]^T$  mit der Impulsantwort  $h_u$  des beispielsweise  $u$ -ten Übertragungskanals auch Signaleanteile der jeweilig

gesendeten Datensymbol-Sequenz  $\underline{d}_u^{(k)}$  in empfangenen Datensymbol-Sequenzen  $\{r(i)\}_{i=k+1}^{k+L_h-1}$  nach dem Zeitpunkt  $k$  enthalten sein können.

[0041] Nach Anwendung der Bayes-Regel und Logarithmierung der bedingten Wahrscheinlichkeiten in Gleichung (9) ergibt sich Gleichung (10):

$$\ln P(\underline{D}^{(k)}|\underline{r}) \approx \ln \left( \frac{P(\underline{r}^{(k)}|\underline{D}^{(k)}) \cdot P(\underline{D}^{(k)})}{P(\underline{r}^{(k)})} \right) = \ln \left( \frac{f_{R^{(k)}|\underline{D}^{(k)}}(\underline{r}^{(k)}|\underline{D}^{(k)}) \cdot P(\underline{D}^{(k)})}{f_{R^{(k)}}(\underline{r}^{(k)})} \right) \quad (10)$$

[0042] Da alle Datensymbol-Sequenzen  $\underline{D}^{(k)}$  als gleich wahrscheinlich angenommen werden, gilt Gleichung (11).

$$P(\underline{D}^{(k)}) = \text{const.} \quad (11)$$

[0043] Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f_{R^{(k)}|\underline{D}^{(k)}}(\underline{r}^{(k)})$  einer bis zum Zeitpunkt  $k$  empfangenen Datensymbol-Sequenz  $\underline{r}^{(k)}$  weist für alle möglichen bis zu beliebigen Zeitpunkten  $k$  empfangenen Datensymbol-Sequenzen  $\underline{R}^{(k)}$  einen identischen

Verlauf auf und beeinflusst deshalb die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(\underline{D}^{(k)}|\underline{r})$  nicht.

**[0044]** Für ein Gauß-verteiltetes Rauschen ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f_{\underline{R}^{(k)}|\underline{D}^{(k)}}(\underline{r}^{(k)}|\underline{D}^{(k)})$  gemäß Gleichung (12), wobei  $\tilde{L}(\underline{D}^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)})$  die Log-Likelihood-Funktion,  $C_n$  die Kovarianzmatrix des Rauschsignals  $n$ ,  $I_n$  die Einheitsmatrix und  $\bar{N}$  die Dimension der empfangenen Datensymbol-Sequenz  $\underline{r}^{(k)}$  gemäß Gleichung (13) ist:

$$f_{\underline{R}^{(k)}|\underline{D}^{(k)}}(\underline{r}^{(k)}|\underline{D}^{(k)}) = \frac{1}{\pi^{\bar{N}} \cdot \det(C_n)} \cdot e^{-\tilde{L}(\underline{D}^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)})} \quad \text{mit } C_n = \sigma_n^2 \cdot I_n \quad (12)$$

$$\bar{N} = k - L_i + 1 \quad (13)$$

**[0045]** Unter Berücksichtigung der mathematischen Beziehungen in den Gleichungen (11) bis (13) kann die mathematische Beziehung für die logarithmierte bedingte Wahrscheinlichkeit  $\ln P(\underline{D}^{(k)}|\underline{r})$  ausgehend von Gleichung (10) nach Gleichung (14) überführt werden.

$$\begin{aligned} \ln(P(\underline{D}^{(k)}|\underline{r})) &\approx \ln f_{\underline{R}^{(k)}|\underline{D}^{(k)}}(\underline{r}^{(k)}|\underline{D}^{(k)}) \\ &= -\tilde{L}(\underline{D}^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)}) - (k - L_i + 1) \ln \pi - \ln \sigma_n^2 \end{aligned} \quad (14)$$

**[0046]** Die Log-Likelihood-Funktion  $\tilde{L}(\underline{D}^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)})$  ergibt sich in Anlehnung an Kammeyer, K.D.: "Nachrichtenübertragung", Teubner-Verlag, 1996, Seite 554-555, gemäß Gleichung (15):

$$\tilde{L}(\underline{D}^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)}) = \frac{1}{\sigma_n^2} (\underline{r}^{(k)} - \underline{D}^{(k)} \cdot \underline{h}^{(k)})^H \cdot (\underline{r}^{(k)} - \underline{D}^{(k)} \cdot \underline{h}^{(k)}) \quad (15)$$

**[0047]** Da die beiden letzten Terme in Gleichung (14) lediglich Parameter enthalten, sind sie für die Maximierung der bedingten Wahrscheinlichkeit  $P(\underline{D}^{(k)}|\underline{r})$  nicht wesentlich und können vernachlässigt werden. Die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(\underline{D}^{(k)}|\underline{r})$  wird folglich maximiert, wenn die Log-Likelihood-Funktion  $\tilde{L}(\underline{D}^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)})$  minimiert wird.

**[0048]** Die mathematische Beziehung für die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(\underline{D}^{(k)}|\underline{r})$  in Gleichung (15) kann ausgehend von Träger, J.: "Kombinierte Kanalschätzung und Dekodierung für Mobilfunkkanäle", ISBN 3-8265-4336-X, Shaker-Verlag, Aachen, 1998, entsprechend Gleichung (16) umgeformt werden.

$$\begin{aligned} &\tilde{L}(\underline{D}^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)}) \\ &= \left[ \underline{h}^{(k)} - (\underline{D}^{(k)H} \underline{D}^{(k)})^{-1} \underline{D}^{(k)H} \underline{r}^{(k)} \right]^H \\ &\quad \left( \underline{D}^{(k)H} \underline{C}_n^{-1} \underline{D}^{(k)} \right) \left[ \underline{h}^{(k)} - (\underline{D}^{(k)H} \underline{D}^{(k)})^{-1} \underline{D}^{(k)H} \underline{r}^{(k)} \right] \\ &\quad - \underline{r}^{(k)H} \underline{C}_n^{-1} \underline{D}^{(k)} (\underline{D}^{(k)H} \underline{C}_n^{-1} \underline{D}^{(k)})^{-1} \underline{D}^{(k)H} \underline{C}_n^{-1} \underline{r}^{(k)} + \underline{r}^{(k)H} \underline{C}_n^{-1} \underline{r}^{(k)} \end{aligned} \quad (16)$$

**[0049]** Hierbei kommt eine Schätzung der Kanalimpulsantwort  $\underline{h}^{(k)}$  nach dem RLS-Algorithmus - Reduced-Least-Squares-Algorithmus - gemäß Gleichung (16) zum Einsatz.

$$\hat{\underline{h}}^{(k)} = (\underline{D}^{(k)H} \underline{D}^{(k)})^{-1} \cdot \underline{D}^{(k)H} \cdot \underline{r}^{(k)} \quad (17)$$

**[0050]** Wie unschwer zu erkennen ist, wird die quadratische Form des ersten Terms

5  $\left[ \underline{h}^{(k)} - \left( \underline{D}^{(k)H} \underline{D}^{(k)} \right)^{-1} \underline{D}^{(k)H} \underline{r}^{(k)} \right]^H \left( \underline{D}^{(k)H} \underline{C}_n^{-1} \underline{D}^{(k)} \right) \left[ \underline{h}^{(k)} - \left( \underline{D}^{(k)H} \underline{D}^{(k)} \right)^{-1} \underline{D}^{(k)H} \underline{r}^{(k)} \right]$  der Log-Likelihood-Funktion  $\tilde{L}(\underline{D}^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)})$  durch den dabei verwendeten RLS-Algorithmus minimiert.

10 **[0051]** Da des Weiteren der dritte Term  $\underline{r}^{(k)H} \underline{C}_n^{-1} \underline{r}^{(k)}$  der Log-Likelihood-Funktion  $\tilde{L}(\underline{D}^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)})$  weder eine Abhängigkeit von der Kanalimpulsantwort  $\underline{h}^{(k)}$  noch von der Toeplitz-Matrix  $\underline{D}^{(k)}$  aufweist, kann einzig die quadratische

10 Form des zweiten Terms  $\underline{r}^{(k)H} \underline{C}_n^{-1} \underline{D}^{(k)} \left( \underline{D}^{(k)H} \underline{C}_n^{-1} \underline{D}^{(k)} \right)^{-1} \underline{D}^{(k)H} \underline{C}_n^{-1} \underline{r}^{(k)}$  der Log-Likelihood-Funktion  $\tilde{L}(\underline{D}^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)})$  zur Schätzung des im Zeitpunkt  $k$  gesendeten Datensymbols herangezogen werden. Hierzu wird die Pfadmetrik  $M^{(k)}$  gemäß Gleichung (18) maximiert.

15 
$$M^{(k)} = \underline{r}^{(k)H} \cdot \underline{D}^{(k)} \cdot \left( \underline{D}^{(k)H} \underline{D}^{(k)} \right)^{-1} \cdot \underline{D}^{(k)H} \cdot \underline{r}^{(k)} \quad (18)$$

20 **[0052]** In Anlehnung an den Viterbi-Algorithmus muss die Pfadmetrik  $M^{(k)}$  gemäß Gleichung (18) zur Schätzung der in jedem Zeitpunkt  $k$  jeweils gesendeten Datensymbole für jeden Zustand in jedem Zeitpunkt  $k$  berechnet werden. Da die Berechnung jeder einzelnen Pfadmetrik  $M^{(k)}$  zu komplex ist, wird im folgenden für das erfindungsgemäße Verfahren zur Detektion von mehreren gesendeten und über jeweils einen zeitveränderlichen Übertragungskanal übertragenen Datensymbol-Sequenzen aus einem Empfangssignal eine iterative Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  zur Maximum-Likelihood-Schätzung

25 der im Zeitpunkt  $k$  jeweils gesendeten Datensymbole und ein iterativer Maximum-Likelihood-Schätzwert  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  für die einzelnen Kanalimpulsantworten im Zeitpunkt  $k$  hergeleitet.

25 **[0053]** Die Iteration erfolgt in beiden Fällen über jeden einzelnen Zeitpunkt  $k$  von Datensymbol zu Datensymbol. Generell ist in jedem Zeitpunkt  $k$  die Toeplitz-Matrix  $\underline{D}^{(k)}$  zuerst iterativ zu schätzen und auf der Basis der iterativ geschätzten Toeplitz-Matrix  $\underline{D}^{(k)}$  die Kanalimpulsantworten  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  iterativ zu schätzen, die wiederum zur iterativen Schätzung der Toeplitz-Matrix  $\underline{D}^{(k+1)}$  im nächsten Zeitpunkt  $k+1$  herangezogen wird. Alternativ kann die Iteration der Schätzwerte  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  der Kanalimpulsantworten auch über mehrere Datensymbole erfolgen.

30 **[0054]** Zur Entwicklung einer jeweils unabhängigen Iteration für die Schätzwerte  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  der Kanalimpulsantworten  $\underline{h}_1^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}$  und für die Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  bei Berücksichtigung der zuletzt iterativ ermittelten Schätzwerte der jeweils anderen Schätzgröße werden in einem Zwischenschritt für die Berechnung der Schätzwerte  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  der Kanalimpulsantworten  $\underline{h}_1^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}$  gemäß Gleichung (17) die beiden Hilfsgrößen  $\underline{v}^{(k)}$

35 gemäß Gleichung (19) und  $\underline{D}^{(k)}$  gemäß Gleichung (20) eingeführt.

40 
$$\underline{v}^{(k)} = \underline{D}^{(k)H} \cdot \underline{r}^{(k)} \quad (19)$$

40 
$$\underline{D}^{(k)} = \underline{D}^{(k)H} \cdot \underline{D}^{(k)} \quad (20)$$

45 **[0055]** Die Schätzwerte  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  der Kanalimpulsantworten  $\underline{h}_1^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}$  können somit unter Berücksichtigung der Hilfsgrößen  $\underline{v}^{(k)}$  und  $\underline{D}^{(k)}$  entsprechend Gleichung (21) ermittelt werden.

50 
$$\hat{\underline{h}}^{(k)} = \underline{D}^{(k)-1} \underline{v}^{(k)} \quad (21)$$

50 **[0056]** Die beiden Hilfsgrößen - Vektor  $\underline{v}^{(k)}$  und Matrix  $\underline{D}^{(k)}$  - lassen sich jeweils iterativ gemäß Gleichung (22) und (23) berechnen:

55 
$$\underline{v}^{(k)} = \underline{v}^{(k-1)} + \underline{d}^{(k)*} \cdot r(k) \quad (22)$$

$$\mathcal{D}^{(k)} = \mathcal{D}^{(k-1)} + \underline{d}^{(k)*} \cdot \underline{d}^{(k)T} \quad (23)$$

[0057] Die Datensymbol-Sequenz  $\underline{d}^{(k)}$  ergibt sich gemäß Gleichung (24) aus den von den einzelnen Sendern  $1_1, \dots, 1_U, \dots, 1_U$  jeweils abgestrahlten Datensymbol-Sequenzen  $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_u^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ .

$$\underline{d}^{(k)} = (d_1(k) d_1(k-1) \dots d_1(k - (L_{h_1} - 1)) \dots d_u(k) d_u(k-1) \dots d_u(k - (L_{h_u} - 1)) \dots \dots d_U(k) d_U(k-1) \dots d_U(k - (L_{h_U} - 1))) \quad (24)$$

[0058] Da die Datensymbol-Sequenz  $\underline{d}^{(k)}$  abhängig vom Zeitpunkt  $k$  und von der Impulslänge  $L_{h_1}, \dots, L_{h_u}, \dots, L_{h_U}$  der jeweiligen Kanalimpulsantwort  $\underline{h}_1^{(k)}, \dots, \underline{h}_u^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}$  u.U. Datensymbole mit negativem Index aufweisen, sind diese geeignet zu initialisieren (z.B.  $d_1(k), \dots, d_u(k), \dots, d_U(k) = 0 \forall k < 0$ ).

[0059] Unter Anwendung des Matrix-Inversionslemma in Anlehnung an Kammeyer, K.D.: "Nachrichtenübertragung", Teubner-Verlag, 1996, Seite 729 - 730, ergibt sich die inverse Matrix  $\mathcal{D}^{(k)-1}$  der Matrix  $\mathcal{D}^{(k)}$  entsprechend Gleichung (25) unter Verwendung der Kalman-Verstärkung  $g^{(k)}$  gemäß Gleichung (26) :

$$\mathcal{D}^{(k)-1} = \mathcal{D}^{(k-1)-1} - g^{(k)} \cdot \underline{d}^{(k)T} \cdot \mathcal{D}^{(k-1)-1} \quad (25)$$

$$g^{(k)} = \mathcal{D}^{(k-1)-1} \cdot \underline{d}^{(k)*} \cdot (1 + \underline{d}^{(k)T} \cdot \mathcal{D}^{(k-1)-1} \cdot \underline{d}^{(k)*})^{-1} \quad (26)$$

[0060] Gleichung (25) kann nach Gleichung (27) und Gleichung (26) kann unter Berücksichtigung von Gleichung (27) nach Gleichung (28) mathematisch umgeformt werden.

$$\mathcal{D}^{(k-1)-1} \cdot \underline{d}^{(k)*} = g^{(k)} \cdot (1 + \underline{d}^{(k)T} \cdot \mathcal{D}^{(k-1)-1} \cdot \underline{d}^{(k)*}) \quad (27)$$

$$\mathcal{D}^{(k)-1} \cdot \underline{d}^{(k)*} = g^{(k)} \cdot (1 + \underline{d}^{(k)T} \cdot \mathcal{D}^{(k-1)-1} \cdot \underline{d}^{(k)*}) - g^{(k)} \cdot \underline{d}^{(k)T} \cdot \mathcal{D}^{(k-1)-1} \cdot \underline{d}^{(k)*} \quad (28)$$

[0061] Aus Gleichung (28) ergibt sich schließlich die mathematische Beziehung der Kalman-Verstärkung  $g^{(k)}$  gemäß Gleichung (29):

$$g^{(k)} = \mathcal{D}^{(k)-1} \cdot \underline{d}^{(k)*} \quad (29)$$

[0062] Die iterative Berechnung der Schätzwerte  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_u^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  der Kanalimpulsantworten  $h_1^{(k)}, \dots, h_u^{(k)}, \dots, h_U^{(k)}$  ergibt sich ausgehend von Gleichung (21) unter Berücksichtigung von Gleichung (22), (25) und (29) entsprechend Gleichung (30):

$$\hat{\underline{h}}^{(k)} = \hat{\underline{h}}^{(k-1)} + g^{(k)} \cdot (r(k) - \hat{\underline{d}}^{(k)T} \cdot \hat{\underline{h}}^{(k-1)}) \quad (30)$$

[0063] Unter Einführung des a-priori-Schätzfehlers  $e^{(k|k-1)}$  zwischen dem empfangenen Datensymbol  $r(k)$  und den Schätzungen  $\hat{d}_1^{(k)T} \cdot \hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{d}_u^{(k)T} \cdot \hat{h}_u^{(k-1)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)T} \cdot \hat{h}_U^{(k-1)}$  der empfangenen Datensymbol-Sequenzen  $\underline{d}_1^{(k)T} \cdot \underline{h}_1^{(k-1)}, \dots, \underline{d}_u^{(k)T} \cdot \underline{h}_u^{(k-1)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k-1)}$ , die sich aus den Gewichtungen der Schätzungen  $\hat{d}_1^{(k)}, \dots, \hat{d}_u^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}$  der bis zum Zeitpunkt  $k$  gesendeten Datensymbol-Sequenzen  $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_u^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$  mit den zum vorherigen Zeitpunkt  $k-1$  geschätzten Kanalimpulsantworten  $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_u^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$  ergibt, kann die iterative Berechnungsformel für den Schätzwert  $\hat{\underline{h}}^{(k)}$  der Kanalimpulsantwort  $\underline{h}^{(k)}$  gemäß Gleichung (30) ausgehend von Gleichung (31) nach Gleichung (32) umgeformt werden.

$$e^{(k|k-1)} = r(k) - \underline{\hat{d}}^{(k)T} \cdot \underline{\hat{h}}^{(k-1)} \quad (31)$$

$$\underline{\hat{h}}^{(k)} = \underline{\hat{h}}^{(k-1)} + \underline{g}^{(k)} \cdot e^{(k|k-1)} \quad (32)$$

**[0064]** Die iterative Berechnung der Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  zur Maximum-Likelihood-Schätzung der im Zeitpunkt  $k$  gesendeten Datensymbole  $d_1(k), \dots, d_u(k), \dots, d_U(k)$  ergibt sich ausgehend von Gleichung (18) unter Berücksichtigung der mathematischen Beziehung für die Hilfsgröße  $v^{(k)}$  in Gleichung (17) und der mathematischen Beziehung für den Schätzwert  $\underline{\hat{h}}^{(k)}$  der Kanalimpulsantwort in Gleichung (19) entsprechend Gleichung (33) :

$$\tilde{M}^{(k)} = \underline{v}^{(k)H} \underline{\hat{h}}^{(k)} \quad (33)$$

**[0065]** Gleichung (33) lässt sich unter Berücksichtigung der iterativen Berechnungsformel für die Hilfsgröße  $v^{(k)}$  in Gleichung (22) und für den Schätzwert  $\underline{\hat{h}}^{(k)}$  der Kanalimpulsantwort in Gleichung (32) nach Gleichung (33') mathematisch umformen:

$$\tilde{M}^{(k)} = \left( \underline{v}^{(k-1)H} + r(k) \cdot \underline{\hat{d}}^{(k)T} \right) \left( \underline{\hat{h}}^{(k-1)} + \underline{g}^{(k)} e^{(k|k-1)} \right) \quad (33')$$

**[0066]** Gleichung (33') kann unter Berücksichtigung der mathematischen Beziehung für den Kalman-Verstärkungsfaktor  $g^{(k)}$  in Gleichung (26) und der iterativen Berechnungsformel für die Hilfsgröße  $v^{(k)}$  in Gleichung (22) nach Gleichung (33'') umgeformt werden.

$$\tilde{M}^{(k)} = \underline{v}^{(k-1)H} \underline{\hat{h}}^{(k-1)} + r(k) \cdot \underline{\hat{d}}^{(k)T} \underline{\hat{h}}^{(k-1)} + \underline{v}^{(k)H} \mathcal{D}^{(k)-1} \underline{\hat{d}}^{(k)*} e^{(k|k-1)} \quad (33'')$$

**[0067]** Der erste Term in Gleichung (33'') entspricht der Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k-1)}$  zum vorherigen Zeitpunkt  $k-1$ . Der Term

$$\underline{v}^{(k)H} \mathcal{D}^{(k)-1}$$

in Gleichung (33'') kann gemäß Gleichung (32) durch den Schätzwert  $\underline{\hat{h}}^{(k)}$  der Kanalimpulsantwort ersetzt werden. Schließlich wird die rechte Seite der Gleichung (33'') um das Betragsquadrat der empfangenen Datensymbol-Sequenz  $|r(k)|^2$  und um den betragsgleichen negativen Term  $-r(k) \cdot r(k)$  erweitert. Somit entsteht die in Gleichung (33''') dargestellte iterative Berechnungsformel für die Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$ .

$$\tilde{M}^{(k)} = \tilde{M}^{(k-1)} - r(k) \cdot (r(k) - \underline{\hat{d}}^{(k)T} \cdot \underline{\hat{h}}^{(k-1)}) + \underline{\hat{h}}^{(k)} \cdot \underline{\hat{d}}^{(k)*} \cdot e^{(k|k-1)} + |r(k)|^2 \quad (33''')$$

**[0068]** Unter Berücksichtigung des a-priori-Schätzfehlers  $e^{(k|k-1)}$  gemäß Gleichung (31) kann Gleichung (33''') nach Gleichung (33''') überführt werden.

$$\tilde{M}^{(k)} = \tilde{M}^{(k-1)} - (r(k) - \underline{\hat{h}}^{(k)} \cdot \underline{\hat{d}}^{(k)*}) \cdot e^{(k|k-1)} + |r(k)|^2 \quad (33''''')$$

**[0069]** Führt man den a-posteriori-Schätzfehlers  $e^{(k|k)}$  zwischen dem empfangenen Datensymbol  $r(k)$  und den Schätzungen  $\underline{\hat{d}}_1^{(k)T} \cdot \underline{\hat{h}}_1^{(k-1)}, \dots, \underline{\hat{d}}_u^{(k)T} \cdot \underline{\hat{h}}_u^{(k-1)}, \dots, \underline{\hat{d}}_U^{(k)T} \cdot \underline{\hat{h}}_U^{(k-1)}$  der empfangenen Datensymbol-Sequenzen  $\underline{\hat{d}}_1^{(k)T} \cdot \underline{\hat{h}}_1^{(k-1)}, \dots, \underline{\hat{d}}_u^{(k)T} \cdot \underline{\hat{h}}_u^{(k-1)}, \dots, \underline{\hat{d}}_U^{(k)T} \cdot \underline{\hat{h}}_U^{(k-1)}$  ein, die sich aus den Gewichtungen der bis zum Zeitpunkt  $k$  gesendeten Datensymbol-Sequenzen  $\underline{\hat{d}}_1^{(k)T}, \dots, \underline{\hat{d}}_u^{(k)T}, \dots, \underline{\hat{d}}_U^{(k)T}$  mit den zum Zeitpunkt  $k$  geschätzten Kanalimpulsantworten  $\underline{\hat{h}}_1^{(k)}, \dots, \underline{\hat{h}}_u^{(k)}, \dots, \underline{\hat{h}}_U^{(k)}$  gemäß Gleichung (34) ein, so lässt sich die iterative Berechnungsformel für die Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  zur Maximum-Likelihood-Schätzung der im Zeitpunkt  $k$  gesendeten Datensymbole  $d_1(k), \dots, d_u(k), \dots, d_U(k)$  nach Gleichung (33''''') mathematisch darstellen.

$$e^{(k|k)} = r(k) - \underline{\hat{d}}^{(k)T} \cdot \underline{\hat{h}}^{(k)} \quad (34)$$

$$\tilde{M}^{(k)} = \tilde{M}^{(k-1)} - e^{(k|k)*} \cdot e^{(k|k-1)} + |r(k)|^2 \quad (33''''''')$$

[0070] Da der Term  $|r(k)|^2$  in der iterativen Berechnungsformel für die Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  in Gleichung (33''''') keine Schätzgröße ist und damit zur Entscheidungsfindung im Trellis-Diagramm nicht signifikant ist, kann er vernachlässigt werden, so dass aus Gleichung (33''''') in Gleichung (35) überführt werden kann.

$$\tilde{M}^{(k)} = \tilde{M}^{(k-1)} - e^{(k|k)*} \cdot e^{(k|k-1)} \quad (35)$$

[0071] Die inverse Matrix  $\mathcal{D}^{(k)-1}$  der Matrix  $\mathcal{D}^{(k)}$  wird als Prädiktionsfehler-Korrelationsmatrix  $K^{(k)}$  bezeichnet. Unter Einführung der Prädiktionsfehler-Korrelationsmatrix  $K^{(k)}$  lässt sich Gleichung (25) in Gleichung (36) und Gleichung (26) in Gleichung (37) überführen.

$$K^{(k)} = K^{(k-1)} - g^{(k)} \cdot \underline{\hat{d}}^{(k)T} \cdot K^{(k-1)} \quad (36)$$

$$g^{(k)} = K^{(k-1)} \cdot \underline{\hat{d}}^{(k)*} \cdot (1 + \underline{\hat{d}}^{(k)T} \cdot K^{(k-1)} \cdot \underline{\hat{d}}^{(k)*})^{-1} \quad (37)$$

[0072] Aufgrund der Zeitvarianz des Übertragungskanals haben früher gesendete Datensymbole eine geringere Bedeutung auf das Entzerrungsergebnis des aktuell empfangenen Datensymbols  $r(k)$  als aktuell gesendete Datensymbole. Durch Einführung eines Vergessensfaktors  $\mu$  mit einem Wertebereich  $0 < \mu \leq 1$  wird dieser Umstand berücksichtigt. Die Iterationsformeln für die beiden Hilfsgrößen - Vektor  $\underline{v}^{(k)}$  und Matrix  $\mathcal{D}^{(k)}$  - in den Gleichungen (22) und (23) lassen sich unter Berücksichtigung des Vergessensfaktors  $\mu$  in die entsprechenden Gleichungen (38) und (39) überführen.

$$\underline{v}^{(k)} = \mu \cdot \underline{v}^{(k-1)} + \underline{\hat{d}}^{(k)*} \cdot r(k) \quad (38)$$

$$\mathcal{D}^{(k)} = \mu \cdot \mathcal{D}^{(k-1)} + \underline{\hat{d}}^{(k)*} \cdot \underline{\hat{d}}^{(k)T} \quad (39)$$

[0073] Die Gleichung (35) zur iterativen Berechnung der Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  geht bei Berücksichtigung des Vergessensfaktors  $\mu$  in die Gleichung (40) über.

$$\tilde{M}^{(k)} = \mu \cdot \tilde{M}^{(k-1)} - e^{(k|k)*} \cdot e^{(k|k-1)} \quad (40)$$

[0074] Analog geht die Gleichung (36) zur iterativen Berechnung der Prädiktionsfehler-Korrelationsmatrix  $K^{(k)}$  bei Berücksichtigung des Vergessensfaktors  $\mu$  in die Gleichung (41) über.

$$K^{(k)} = \frac{1}{\mu} \cdot \left[ K^{(k-1)} - g^{(k)} \cdot \underline{\hat{d}}^{(k)T} \cdot K^{(k-1)} \right] \quad (41)$$

[0075] Schließlich geht auch die Gleichung (37) zur iterativen Berechnung der Kalman-Verstärkung  $g^{(k)}$  bei Berücksichtigung des Vergessensfaktors  $\mu$  in die Gleichung (42) über.

$$g^{(k)} = K^{(k-1)} \cdot \underline{\hat{d}}^{(k)*} \cdot (\mu + \underline{\hat{d}}^{(k)T} \cdot K^{(k-1)} \cdot \underline{\hat{d}}^{(k)*})^{-1} \quad (42)$$

[0076] Ändert sich die Kanalimpulsantwort  $\underline{h}_1^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}$  vom vorherigen Zeitpunkt  $k-1$  zum aktuellen Zeitpunkt

$k$  nur geringfügig, so ist der a-priori-Schätzfehler  $e^{(k|k-1)}$  und der a-posteriori-Schätzfehler  $e^{(k|k)}$  näherungsweise identisch. Der Term  $e^{*(k|k)} \cdot e^{(k|k-1)}$  ist folglich reellwertig positiv und die Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  in Gleichung (40) ist entsprechend reellwertig negativ, da die maximale Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  aus allen reellwertigen negativen Pfadmetriken  $\tilde{M}^{(k)}$  der minimalen Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  aus allen reellwertigen positiven Pfadmetriken  $\tilde{M}^{(k)}$  entspricht, vorausgesetzt der Betrag  $|\tilde{M}^{(k)}|$  der zueinander korrespondierenden positiven und negativen Pfadmetriken  $\tilde{M}^{(k)}$  ist gleich groß. Somit kann eine Maximierung der Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  gemäß Gleichung (40) in eine Minimierung der Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  gemäß Gleichung (43) unter Verwendung einer Betragsbildungsfunktion oder Gleichung (44) unter Verwendung einer Realteilbildungsfunktion überführt werden.

$$\tilde{M}^{(k)} = \left| \mu \cdot \tilde{M}^{(k-1)} - e^{(k|k)*} \cdot e^{(k|k-1)} \right| \quad (43)$$

$$\tilde{M}^{(k)} = \text{Re} \left\{ \mu \cdot \tilde{M}^{(k-1)} - e^{(k|k)*} \cdot e^{(k|k-1)} \right\} \quad (44)$$

**[0077]** Eine zu Gleichung (43) bzw. (44) äquivalente Berechnungsformel für eine zu minimierende Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  ergibt sich durch Betragsbildung des Terms  $e^{*(k|k)} \cdot e^{(k|k-1)}$  und anschließender Addition zu der im vorhergehenden Zeitpunkt  $k-1$  berechneten Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k-1)}$  gemäß Gleichung (45) oder durch Realteilbildung des Terms  $e^{*(k|k)} \cdot e^{(k|k-1)}$  und anschließender Addition zu der im vorhergehenden Zeitpunkt  $k-1$  berechneten Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k-1)}$  gemäß Gleichung (46).

$$\tilde{M}^{(k)} = \mu \cdot \tilde{M}^{(k-1)} + \left| e^{(k|k)*} \cdot e^{(k|k-1)} \right| \quad (45)$$

$$\tilde{M}^{(k)} = \mu \cdot \tilde{M}^{(k-1)} + \text{Re} \left\{ e^{(k|k)*} \cdot e^{(k|k-1)} \right\} \quad (46)$$

**[0078]** Für die Berechnung der Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  kann anstelle des Produkts aus dem a-priori-Schätzfehler  $e^{(k|k-1)}$  zum vorherigen Zeitpunkt  $k-1$  und dem a-posteriori-Schätzfehler  $e^{(k|k)}$  zum aktuellen Zeitpunkt  $k$  alternativ ein Produkt aus einem a-priori-Schätzfehler bzw. a-posteriori-Schätzfehler  $e^{(k|k-n)}$  zum Zeitpunkt  $n$  gemäß Gleichung (47) und aus einem a-priori-Schätzfehler bzw. a-posteriori-Schätzfehler  $e^{(k|k-m)}$  zum Zeitpunkt  $m$  in den Ausführungsformen der Gleichungen (48), (49), (50) und (51) verwendet werden, wobei die Zeitpunkte  $n$  und  $m$  ganzzahlige, positive Werte  $-0 \leq m, n, n, m \in \mathbb{N}_0$  sind. Die Zeitpunkte  $n$  und  $m$  sind in Abhängigkeit der Zeitveränderlichkeit des Übertragungskanals zu wählen. Bei hoher Zeitveränderlichkeit sind relativ kleine Werte für die Zeitpunkte  $n$  und  $m$  geeignet.

$$e(k | k - n) = r(k) - \underline{\hat{d}}^{(k)T} \underline{\hat{h}}^{(k-n)} \quad (47)$$

$$\tilde{M}^{(k)} = \left| \mu \cdot \tilde{M}^{(k-1)} - e^{(k|k-n)*} \cdot e^{(k|k-m)} \right| \quad (48)$$

$$\tilde{M}^{(k)} = \text{Re} \left\{ \mu \cdot \tilde{M}^{(k-1)} - e^{(k|k-n)*} \cdot e^{(k|k-m)} \right\} \quad (49)$$

$$\tilde{M}^{(k)} = \mu \cdot \tilde{M}^{(k-1)} + \left| e^{(k|k-n)*} \cdot e^{(k|k-m)} \right| \quad (50)$$

$$\tilde{M}^{(k)} = \mu \cdot \tilde{M}^{(k-1)} + \text{Re} \left\{ e^{(k|k-n)*} \cdot e^{(k|k-m)} \right\} \quad (51)$$

**[0079]** Die Produkte aus den a-priori- und a-posteriori-Schätzfehler in den Gleichungen (43) bis (46) und (48) bis (51) zur Berechnung der Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  stellen die Zweigmetriken zwischen den jeweiligen Zuständen zum vorherigen Zeitpunkt  $k-1$  und zum aktuellen Zeitpunkt  $k$  dar.

**[0080]** Aus den Berechnungsformeln des a-priori- und des a-posteriori-Schätzfehlers in den Gleichungen (31), (34) und (47) sowie der iterativen Berechnungsformel für die Schätzwerte  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  der Kanalimpulsantworten  $\underline{h}_1^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}$  in Gleichung (32) ist ersichtlich, dass zur Berechnung der Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  für die einzelne Zustände  $S_i$ ,  $i = 1, \dots, N_s$  im Zeitpunkt  $k$  die Schätzwerte  $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$  zum vorherigen Zeitpunkt  $k-1$  bzw.

$\hat{h}_1^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-n)}$  zum Zeitpunkt  $k-n$  erforderlich sind.

**[0081]** Während bei einem Viterbi-Algorithmus bei einer Mächtigkeit  $M$  des Symbolalphabets des verwendeten Modulationsverfahren und insgesamt  $N_S$  Zuständen jeweils insgesamt  $M \cdot N_S$  potentielle neue Zustände im aktuellen Zeitpunkt analysiert werden und je potentiell neuen Zustand insgesamt  $U$  Schätzungen der Kanalimpulsantworten  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  im aktuellen Zeitpunkt erforderlich ist und somit insgesamt  $U \cdot M \cdot N_S$  Kanalschätzungen durchgeführt werden, müssen beim erfindungsgemäßen Verfahren zur Analyse der insgesamt  $M \cdot N_S$  potentiellen neuen Zustände im aktuellen Zeitpunkt lediglich die  $U$  Kanalimpulsantworten zu den insgesamt  $N_S$  Vorläuferzuständen im vorhergehenden Zeitpunkt  $k-1$  bzw. in einem noch früheren Zeitpunkt  $k-2, k-3$  usw. geschätzt werden.

**[0082]** Aufgrund der Faltung der Datensymbol-Sequenz  $\underline{d}^{(k)} = [\underline{d}_1^{(k)T}, \dots, \underline{d}_U^{(k)T}, \dots, \underline{d}_U^{(k)T}]^T$  mit dem Vektor  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  der Impulsantworten der Übertragungskanäle im zeitinvarianten bzw. zeitvarianten Signalmodell des Übertragungskanals gemäß Gleichung (1) enthält die Log-Likelihood-Funktion  $\tilde{L}(D^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)})$  gemäß Gleichung (16) und die Pfadmetrik  $M^{(k)}$  gemäß Gleichung (18) in zukünftigen Zeitpunkten  $k$  in den einzelnen Termen  $d_1(i) \cdot h_1(j), \dots, d_U(i) \cdot h_U(j), \dots, d_U(i) \cdot h_U(j)$  auch Datensymbole  $d_1(i), \dots, d_U(i), \dots, d_U(i)$  von aktuellen bzw. vergangenen Zeitpunkten  $i \leq k$ , wie aus der rechte Hälfte der Fig. 4 ersichtlich ist. Damit die Energie dieser Signalanteile bei der iterativen Berechnung der Pfadmetrik  $M^{(k)}$  und der Schätzwerte  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  der Kanalimpulsantworten nicht verloren geht und zu einer ungenügenden Schätzung der bis zum Zeitpunkt  $k$  gesendeten Datensymbol-Sequenzen  $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$  und der Kanalimpulsantworten  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  führt, wird im folgenden eine erweiterte Pfadmetrik  $\bar{M}^{(k)}$  entwickelt, die die in zukünftigen Zeitpunkten  $i > k$  in die empfangenen Datensymbole  $\underline{r}^{(i)}$  eingehenden Signalanteile dieser bis zum Zeitpunkt  $k$  gesendeten Datensymbol-Sequenzen  $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$  berücksichtigt.

**[0083]** Hierzu wird wieder das zeitinvariante Signalmodell des Übertragungskanals gemäß Gleichung (1) betrachtet. Bei einer Impulslänge  $L_{h1}, \dots, L_{hU}, \dots, L_{hU}$  der Kanalimpulsantworten können in insgesamt  $L_{h1}-1, \dots, L_{hU}-1, \dots, L_{hU}-1$  zukünftigen Zeitpunkten Signalanteile von bis zum Zeitpunkt  $k$  gesendeten Datensymbol-Sequenzen  $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$  im empfangenen Datensymbol  $r(k)$  enthalten sein. Der Vektor  $\underline{r}^{(k)}$  der empfangenen Datensymbole aus Gleichung (2) erweitert sich gemäß Gleichung (49) zu einem Vektor  $\underline{r}^{(k+L_h-1)}$ .

$$\underline{r}^{(k+L_h-1)} = \left[ \underline{r}^{(k)T}, \underline{r}^{-(k)T} \right]^T \quad \text{mit} \quad \underline{r}^{-(k)T} = [r((k+1), \dots, r(k+L_h-1))]^T \quad (52)$$

**[0084]** Die Toeplitz-Matrix  $\underline{D}_U^{(k)}$  der vom  $u$ -ten Sender gesendeten Datensymbole aus Gleichung (6) erweitert sich entsprechend zu einer Toeplitz-Matrix  $\underline{D}_U^{(k+L_h-1)}$  gemäß Gleichung (53):

$$\underline{D}_U^{(k+L_{hu}-1)} = \begin{pmatrix} & & \underline{D}_U^{(k)} & & \\ & d_U(k+1) & d_U(k) & \dots & d_U(k-(L_{hu}-1)) \\ & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ d_U(k+L_{hu}-1) & d_U(k+L_{hu}-2) & \dots & & d_U(k) \end{pmatrix} \quad (53)$$

**[0085]** Die Toeplitzmatrix  $\underline{D}^{(k+L_h-1)}$  gemäß Gleichung (54) setzt sich aus den zu den einzelnen Sendern  $1_1, \dots, 1_U, \dots, 1_U$  gehörigen Toeplitzmatrizen  $\underline{D}_1^{(k+L_{h1}-1)}, \dots, \underline{D}_U^{(k+L_{hu}-1)}, \dots, \underline{D}_U^{(k+L_{hU}-1)}$  entsprechend Gleichung (53) zusammen.

$$\underline{D}^{(k+L_h-1)} = \left( \underline{D}_1^{(k+L_{h1}-1)} \quad \dots \quad \underline{D}_U^{(k+L_{hu}-1)} \quad \dots \quad \underline{D}_U^{(k+L_{hU}-1)} \right) \quad (54)$$

**[0086]** Die Log-Likelihood-Funktion  $L(D^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)})$  aus Gleichung (15) erweitert sich dementsprechend zu einer erweiterten Log-Likelihood-Funktion  $\bar{L}(\underline{D}^{(k+L_h-1)}, \hat{\underline{h}}^{(k)}, \underline{r}^{(k+L_h-1)})$  gemäß Gleichung (55):

$$\bar{L}(\underline{D}^{(k+L_h-1)}, \hat{\underline{h}}^{(k)}, \underline{r}^{(k+L_h-1)}) = E \left\{ \left( \underline{r}^{(k+L_h-1)} - \underline{D}^{(k+L_h-1)} \cdot \hat{\underline{h}}^{(k)} \right)^H \cdot \bar{C}_n^{-1} \cdot \left( \underline{r}^{(k+L_h-1)} - \underline{D}^{(k+L_h-1)} \cdot \hat{\underline{h}}^{(k)} \right) \right\} \quad (55)$$

**[0087]** Die fehlende Kenntnis über die in zukünftigen Zeitpunkten empfangenen Datensymbole  $\{r(i)\}_{i=k+1}^{k+L_h-1}$  und

5 über die in zukünftigen Zeitpunkten gesendeten Datensymbole  $\{d_1(i), \dots, d_u(i), \dots, d_U(i)\}_{i=k+1}^{k+L_h-1}$  mit  $L_h = \max(L_{h1} \dots L_{hu} \dots L_{hU})$  findet in Gleichung (55) gegenüber der mathematischen Darstellung der Log-Likelihood-Funktion  $\bar{L}(\underline{D}^{(k)}, \underline{h}^{(k)}, \underline{r}^{(k)})$  in Gleichung (15) durch Einführung der Erwartungswertfunktion  $E\{\cdot\}$  Berücksichtigung. Zusätzlich wird in Gleichung (55) die Impulsantwort  $\underline{h}_1^{(k)}, \dots, \underline{h}_u^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}$  des Übertragungskanals in Gleichung (15) durch ihren Schätzwert  $\hat{\underline{h}}_1^{(k)}, \dots, \hat{\underline{h}}_u^{(k)}, \dots, \hat{\underline{h}}_U^{(k)}$  ersetzt. Bei der Ermittlung der Kovarianzmatrix  $\bar{C}_n$  ist zu berücksichtigen, dass sich diese nicht nur aus der Rauschleistung  $\sigma_n^2$  des Rauschsignals gemäß Gleichung (12), sondern auch aus der Signalleistung der Signalanteile  $d_1(i) \cdot h_1(j-i), \dots, d_u(i) \cdot h_u(j-i), \dots, d_U(i) \cdot h_U(j-i)$  der zukünftig gesendeten Datensymbole  $d_1(i), \dots, d_u(i), \dots, d_U(i)$  mit  $k+1 \leq i \leq k+L_h-1$  und  $L_h = \max(L_{h1}, \dots, L_{hu}, \dots, L_{hU})$  zusammensetzt, die im empfangenen Datensymbol  $r(j)$  mit  $i \leq j \leq k+L_h-1$  enthalten sind - Datensymbole mit "?"-Symbol in Fig. 4 - und trotz ihrer Unbekanntheit zum Zeitpunkt  $k$  die Schätzung der bis zum Zeitpunkt  $k$  gesendeten Datensymbol-Sequenzen  $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_u^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$  mit Hilfe der erweiterten Pfadmetrik  $\bar{M}^{(k)}$  verfälschen. Die Signalleistung eines derartigen Signalanteils  $d_1(i) \cdot h_1(j-i), \dots, d_u(i) \cdot h_u(j-i), \dots, d_U(i) \cdot h_U(j-i)$  ergibt sich unter der Voraussetzung, dass die mittlere Signalleistung der gesendeten Datensymbole  $d_1(i), \dots, d_u(i), \dots, d_U(i)$  zu 1 angenommen wird, aus dem Betragsquadrat des entsprechenden Taps  $|\hat{h}_1(j-i), \dots, \hat{h}_u(j-i), \dots, \hat{h}_U(j-i)|^2$  der Schätzwerte  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_u^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  der Kanalimpulsantworten  $\underline{h}_1^{(k)}, \dots, \underline{h}_u^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}$ . Somit lässt sich die Kovarianzmatrix  $\bar{C}_n$  gemäß Gleichung (56) darstellen.

$$25 \quad \bar{C}_n = \text{diag}(\sigma^2(i)) \quad \text{mit} \quad \sigma^2(i) = \begin{cases} \sigma_n^2 & L_i \leq i \leq k \\ \sigma_n^2 + \sum_{u=1}^U \sum_{l=0}^{\min(i-(k+1), L_{hu}-1)} |\hat{h}_u(l)|^2 & k+1 < i \leq L_h - 1 \end{cases} \quad (56)$$

**[0088]** Die Minimierung der erweiterten Log-Likelihood-Funktion  $\bar{L}(\underline{D}^{(k+L_h-1)}, \hat{\underline{h}}^{(k)}, \underline{r}^{(k+L_h-1)})$  gemäß Gleichung (55) führt auf die erweiterte Pfadmetrik  $\bar{M}^{(k)}$  entsprechend Gleichung (57):

$$35 \quad \bar{M}^{(k)} = \frac{\tilde{M}^{(k)}}{\sigma^2} + \sum_{i=1}^{L_h-1} \left\{ \frac{\left| r(k+1) - \sum_{u=1}^U \sum_{n=0}^{L_{hu}-1-i} d_u(k-n) \cdot \hat{h}_u(i+n) \right|^2 + \sum_{u=1}^U \sum_{n=0}^{\min(L_{hu}, i-1)} |\hat{h}_u(n)|^2}{\sigma_n^2 + \sum_{u=1}^U \sum_{n=0}^{\min(L_{hu}, i-1)} |\hat{h}_u(n)|^2} \right\} \quad (57)$$

Die erweiterte Metrik  $\bar{M}^{(k)}$  ergibt sich also aus der Addition der nach einer der Gleichungen (43) bis (46) bzw. (48) bis (51) iterativ berechneten Metrik  $\tilde{M}^{(k)}$ , gewichtet mit der inversen Rauschleistung  $\sigma^2$ , und einem Erweiterungsterm  $\delta(k)$ , der dem Klammerausdruck der Gleichung (57) entspricht und die in den zukünftig empfangenen Datensymbolen

50  $\{r(i)\}_{i=k+1}^{k+L_h-1}$  enthaltenen Signalanteile aus der bis zum aktuellen Zeitpunkt  $k$  gesendeten Datensymbol-Sequenzen  $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_u^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$  berücksichtigt, und lässt sich verkürzt gemäß Gleichung (58) darstellen.

$$\bar{M}^{(k)} = \frac{\tilde{M}^{(k)}}{\sigma^2} + \delta(k) \quad (58)$$

**[0089]** Eine Gewichtung des Erweiterungsterm  $\delta(k)$  zur iterativ berechneten Metrik  $\tilde{M}^{(k)}$  kann durch Einführung eines Gewichtungsfaktors  $w$ , der additiver Metrik  $\tilde{M}^{(k)}$  positiv und bei subtraktiver Metrik  $\tilde{M}^{(k)}$  negativ ist, gemäß Gleichung (59) erzielt werden.

$$\hat{M}^{(k)} = \frac{\tilde{M}^{(k)}}{\sigma^2} + w \cdot \delta(k) \quad (59)$$

5 **[0090]** In Fig. 5 ist das Übertragungssystem für die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Detektion von über einen zeitveränderlichen Übertragungskanal empfangenen Datensymbol-Sequenzen aus einem diese enthaltenden Empfangssignal dargestellt, das gegenüber dem Übertragungssystem nach dem Stand der Technik in Fig. 1 kein Vorfilter 5 enthält und anstelle eines gemeinsamen Kanal-Daten-Schätzer 6 einen erfindungsgemäßen iterativen Schätzer 6' mit vollkommen entkoppelter Schätzung des Kanals und der gesendeten Datensymbol-Sequenz aufweist.

10 **[0091]** Das im erfindungsgemäßen iterativen Schätzer 6' implementierte erfindungsgemäße Verfahren zur Detektion von über einen zeitveränderlichen Übertragungskanal empfangenen Datensymbol-Sequenzen aus einem diese enthaltenden Empfangssignal ergibt sich aus dem Flussdiagramm der Fig. 6.

15 **[0092]** Im ersten Verfahrensschritt S10 wird die Kanalimpulsantworten  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  der Übertragungskanäle in einer Erstkanalschätzung ermittelt. Hierzu werden die Übertragungskanäle entweder einzeln für sich oder gemeinsam im Rahmen einer zum Stand der Technik gehörigen Joint-Kanalschätzung bevorzugt mit einer bekannten Trainingsdatensymbol-Sequenz der Länge  $L_t$  beaufschlagt und aus dem empfangenen Datensymbol  $r(k)$  unter Anwendung eines adaptiven Kanalschätzalgorithmus jeweils ein Erstkanalschätzwert  $\hat{h}_1^{(0)}, \dots, \hat{h}_U^{(0)}$  der Kanalimpulsantworten  $\hat{h}_1^{(0)}, \dots, \hat{h}_U^{(0)}$  zum Zeitpunkt 0 oder weiter zurückliegende Erstkanalschätzwerte  $\hat{h}_1^{(-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(-1)}$ ,  $\hat{h}_1^{(-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(-2)}$  der Übertragungskanäle berechnet. Hierbei können Schätzalgorithmen ohne Berücksichtigung einer rauschbedingten Kanalstatistik wie beispielsweise Least-Squares-Algorithmen, Schätzalgorithmen mit Berücksichtigung einer rauschbedingten unbekanntes Kanalstatistik wie beispielsweise Maximum-Likelihood-Verfahren oder Schätzalgorithmen mit Berücksichtigung einer rauschbedingten unbekanntes Kanalstatistik wie beispielsweise der MMSE-Algorithmus Verwendung finden. Auch eine blinde oder semi-blinde Erstkanalschätzung ohne Verwendung einer Trainingsdatensymbol-Sequenz, die einzig aus der empfangenen Nutzdatensymbol-Sequenz die Kanäle schätzt, eignet sich für die Erstkanalschätzung.

25 **[0093]** Im nächsten Verfahrensschritt S20 werden die im erfindungsgemäßen Verfahren verwendeten skalaren und vektoriellen Variablen sowie Matrizen-Variablen initialisiert:

Da abhängig vom Zeitpunkt  $k$  und von der Impulslänge  $L_{h1}, \dots, L_{hU}$  der Kanalimpulsantworten  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  bestimmte Datensymbole  $\hat{d}_1(i), \dots, \hat{d}_U(i)$  der geschätzten Datensymbol-Sequenzen  $\hat{d}_1^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}$  in negativen Zeitpunkten  $i$  liegen können, müssen diese vorab sinnvollerweise mit dem Wert 0 vorbelegt werden.

30 **[0094]** Die Elemente der Prädiktionsfehler-Korrelationsmatrix  $K^{(k)}$ , die die inverse Autokorrelationsmatrix der geschätzten Datensymbole  $\hat{d}_1^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}$  darstellt, kann entweder mit konstanten Werten, beispielsweise mit dem groben

35 Schätzwert  $\gamma$  für den Signal-Rauschabstand  $\frac{E_b}{N_0}$  im jeweiligen Übertragungskanal, gewichtet mit der inversen Impulslänge  $L_{h1}^{-1}, \dots, L_{hU}^{-1}$  der jeweiligen Kanalimpulsantwort  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ , belegt werden oder aus den in der Erstkanalschätzung ermittelten Autokorrelationskoeffizienten der Trainingsdatensymbol-Sequenz oder der im Fall einer blinden Erstkanalschätzung benutzten Nutzdatensymbol-Sequenz berechnet werden.

40 **[0095]** Daraufhin beginnt die Iterationsschleife des erfindungsgemäßen Verfahrens mit Verfahrensschritt S30. In Verfahrensschritt S30 wird der a-priori-Schätzfehler  $e^{(k|k-1)}$  unter Verwendung einer zum Zeitpunkt  $k-1$  geschätzten Kanalimpulsantwort  $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$  gemäß Gleichung (31) und der a-posteriori-Schätzfehler  $e^{(k|k)}$  unter Verwendung einer zum Zeitpunkt  $k$  geschätzten Kanalimpulsantwort  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  gemäß Gleichung (31) berechnet. Alternativ kann auch jeder andere a-priori-Schätzfehler  $e^{(k|k-n)}$  unter Verwendung einer zu einem früheren Zeitpunkt  $k-n$  geschätzten Kanalimpulsantwort  $\hat{h}_1^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-n)}$  gemäß Gleichung (47) berechnet werden.

45 **[0096]** Im Fall einer erstmaligen Durchführung des Verfahrensschritts S30 wird hierzu das im Zeitpunkt 0 empfangene Datensymbol  $r(0)$ , der in Verfahrensschritt S20 vorbelegte Vektor der geschätzten Datensymbol-Sequenz  $\hat{d}^{(0)}$  und der in der Erstkanalschätzung gemäß Verfahrensschritt S10 ermittelte Schätzwerte  $\hat{h}_1^{(0)}, \dots, \hat{h}_U^{(0)}$ ,  $\hat{h}_1^{(-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(-1)}$ ,  $\hat{h}_1^{(-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(-2)}$  usw. der Kanalimpulsantworten zu den Zeitpunkten 0, -1, -2 usw. verwendet.

50 **[0097]** Im Fall einer bereits mehrmals durchlaufenen Iteration werden hierzu das im Zeitpunkt  $k$  empfangene Datensymbol  $r(k)$ , die in Verfahrensschritt S60 in den einzelnen Zeitpunkten  $k-1, k-2, k-3$  usw. jeweils geschätzten Datensymbole  $\hat{d}_1(k-1), \dots, \hat{d}_U(k-1)$ ,  $\hat{d}_1(k-2), \dots, \hat{d}_U(k-2)$ ,  $\hat{d}_1(k-3), \dots, \hat{d}_U(k-3)$  usw. der bis zum Zeitpunkt  $k-1$  gesendeten Datensymbol-Sequenz  $\hat{d}_1^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}$ , für den Zeitpunkt  $k$  jeweils jedes im Datensymbolalphabet des verwendeten Modulationsverfahrens enthaltene Datensymbol  $d(k)$  und die in Verfahrensschritt S70 zum Zeitpunkt  $k-1$  bzw. zu früheren Zeitpunkten  $k-2, k-3$  usw. ermittelten Schätzwerte  $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$ ,  $\hat{h}_1^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-2)}$ ,  $\hat{h}_1^{(k-3)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-3)}$  usw. der Kanalimpulsantworten  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  verwendet.

55 **[0098]** Im darauf folgenden Verfahrensschritt S40 wird die Metrik  $M^{(0)}$  zum Zeitpunkt 0 im Fall eines erstmaligen

Durchlaufens der Iteration und die Metrik  $\tilde{M}^{(k)}$  zum Zeitpunkt  $k$  im Fall eines schon mehrmaligen Durchlaufens der Iteration aus der initialisierten Metrik  $\tilde{M}^{(1)}$  im Fall eines erstmaligen Durchlaufens der Iteration und aus der im vorherigen Zeitpunkt  $k-1$  iterativen ermittelten Metrik  $\tilde{M}^{(k-1)}$  zuzüglich der jeweils für jedes mögliche Datensymbol  $d(k)$  des Datensymbolalphabets zum Zeitpunkt  $k$  ermittelten Zweigmetrik berechnet, die sich aus dem Produkt  $e^{(k|k-1)} \cdot e^{(k|k)}$  des in

5 Verfahrensschritt 30 berechneten a-priori-Schätzfehlers  $e^{(k|k-1)}$  und a-posteriori-Schätzfehlers  $e^{(k|k)}$  ermitteln lässt.  
**[0099]** Hierbei kann die iterative Berechnungsformel für die Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  der Gleichung (35), die iterative Berechnungsformel für die Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  der Gleichung (40) unter Verwendung des Vergessensfaktors  $\mu$  für zeitlich weiter zurückliegende Zweigmetriken, die iterative Berechnungsformel für die Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  gemäß Gleichung (43) mit abschließender Betragsbildung der berechneten Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$ , die iterative Berechnungsformel für die Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  gemäß Gleichung (44) mit abschließender Realteilbildung der berechneten Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$ , die iterative Berechnungsformel für die Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  gemäß Gleichung (45) mit einer Betragsbildung der im jeweiligen Iterationsschritt für jedes Datensymbol  $d(k)$  des Datensymbolalphabets ermittelten Zweigmetrik und die iterative Berechnungsformel für die Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  gemäß Gleichung (46) mit einer Realteilbildung der im jeweiligen Iterationsschritt für jedes Datensymbol  $d(k)$  des Datensymbolalphabets ermittelten Zweigmetrik verwendet werden.

15 **[0100]** Alternativ kann die Pfadmetrik  $d(k)$  jeweils nach einer der iterativen Berechnungsformeln gemäß der Gleichungen (48) bis (51) berechnet werden, in denen die jeweiligen Zweigmetriken aus a-priori-Schätzfehlern  $e^{(k|k-n)}$  und  $e^{(k|k-m)}$  zu früheren Zeitpunkten  $k-n$  und  $k-m$  berechnet werden.

**[0101]** Im nächsten Verfahrensschritt S50 wird gemäß Gleichung (57) und (58) der Erweiterungsterm  $\tilde{\alpha}(k)$  und darauf aufbauend die erweiterte Metrik  $\bar{M}^{(k)}$  berechnet. Unter Verwendung eines Gewichtungsfaktors  $w$  gemäß Gleichung (59) kann eine unterschiedliche Gewichtung zwischen der iterativ ermittelten Metrik  $\tilde{M}^{(k)}$  und dem Erweiterungsterm  $\tilde{\alpha}(k)$  bei der Berechnung der erweiterten Metrik  $\bar{M}^{(k)}$  verwirklicht werden.

20 **[0102]** Im darauf folgenden Verfahrensschritt S60 werden aus der für jedes Datensymbol  $d(k)$  des im verwendeten Modulationsverfahren benutzten Datensymbolalphabets im Zeitpunkt  $k$  jeweils berechneten erweiterten Metrik  $\bar{M}^{(k)}$  mittels eines Depth-first- oder eines Breadth-first-Verfahrens die jeweils minimalen erweiterten Metriken  $\bar{M}^{(k)}$  ermittelt und damit das Datensymbol  $\hat{d}_1(k), \dots, \hat{d}_U(k)$  zum Zeitpunkt  $k$  in den einzelnen "Überlebenspfaden" geschätzt.

25 **[0103]** Bei Verwendung eines Breadth-first-Verfahrens kann hierbei ausgehend vom im vorherigen Zeitpunkt  $k-1$  für den jeweiligen "Überlebenspfad" ausgewählten Zustand  $S_j$  in Anlehnung an den Viterbi-Algorithmus derjenige im Zeitpunkt  $k$  nachfolgende Zustand  $S_j$  und damit das diesen Zustand  $S_j$  charakterisierende geschätzte Datensymbol  $\hat{d}_1(k), \dots, \hat{d}_U(k)$  zum Zeitpunkt  $k$  ausgewählt werden, das die kleinste Zweigmetrik aufweist. Auf diese Weise wird von jedem einzelnen im Zeitpunkt  $k-1$  ausgewählten Zustand  $S_j$  wieder jeweils ein einziger Zustand  $S_j$  im Zeitpunkt  $k$  ausgewählt und in den jeweiligen "Überlebenspfad" zum Zeitpunkt  $k$  fortgesetzt. Alternativ können aber auch - wie in Fig. 3 dargestellt ist - Zustände  $S_j$  ausgewählt werden, die jeweils die kleinsten Pfadmetriken aufweisen. Auf diese Weise können von einem im Zeitpunkt  $k-1$  ausgewählten Zustand  $S_j$  entweder mehrere Zustände  $S_i$ , ein einziger Zustand  $S_j$  oder kein Zustand  $S_j$  im Zeitpunkt  $k$  ausgewählt werden. Bei beiden Varianten kann sich die Anzahl der ausgewählten Zustände  $S_j$  im Zeitpunkt  $k$  gegenüber den im Zeitpunkt  $k-1$  ausgewählten Zuständen  $S_j$  reduzieren, wenn sich mehrere im Zeitpunkt  $k-1$  in jeweils einem unterschiedlichen Zustand  $S_j$  befindliche "Überlebenspfade" in einem einzigen Zustand  $S_j$  zum Zeitpunkt  $k$  vereinigen.

35 **[0104]** Im Falle eines Depth-first-Verfahrens wird das Trellis-Diagramm zuerst "in der Tiefe" analysiert, indem ein "Überlebenspfad" über so viele Zeitpunkte  $k$  iterativ verfolgt wird, bis die jeweilige Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  oder  $\bar{M}^{(k)}$  einen vorgegebenen Schwellenwert überschreitet. Bei Überschreitung der Schwellenwerts durch die jeweilige Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  oder  $\bar{M}^{(k)}$  wird auf dem "Überlebenspfad" so viele Zeitpunkte  $k$  zurückgeschritten, bis ein Verzweigungspfad gefunden ist, dessen Zweigmetrik zu einer Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  oder  $\bar{M}^{(k)}$  führt, die unterhalb des vorgegebenen Schwellenwert liegt. Dieser Verzweigungspfad wird wiederum solange weiterverfolgt, bis die jeweilige Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  oder  $\bar{M}^{(k)}$  wieder den vorgegebenen Schwellenwert überschreitet und durch Zurückschreiten im ausgewählten "Überlebenspfad" wiederum ein weiterer Verzweigungspfad gefunden ist, der zu einer gegenüber dem vorgegebenen Schwellenwert kleineren Pfadmetrik  $\tilde{M}^{(k)}$  oder  $\bar{M}^{(k)}$  führt. Diese Vorgehensweise wird solange verfolgt, bis das Trellis-Diagramm bis zu einem vorgegebenen Zeitpunkt  $k$  mit einem gefundenen "Überlebenspfad" durchlaufen ist.

45 **[0105]** Im nächsten Verfahrensschritt S70 wird die Kalman-Verstärkung  $g^{(k)}$  gemäß Gleichung (37) bzw. gemäß Gleichung (42) bei Verwendung des Vergessensfaktors  $\mu$  zur geringeren Gewichtung früher gesendeter Datensymbole  $d_1(k), \dots, d_U(k)$  gegenüber aktueller gesendeten Datensymbolen  $d_1(k), \dots, d_U(k)$  berechnet. Hierzu wird die für den jeweiligen "Überlebenspfad" ermittelten Schätzungen  $\hat{d}_1(k), \dots, \hat{d}_U(k)$  der bis zum Zeitpunkt  $k$  gesendeten Datensymbol-Seguenzen  $\underline{d}_1(k), \dots, \underline{d}_U(k)$  mit dem im vorherigen Verfahrensschritt S60 für den jeweiligen "Überlebenspfad" geschätzten Datensymbolen  $\hat{d}_1(k), \dots, \hat{d}_U(k)$  zum Zeitpunkt  $k$  und die Prädiktionsfehler-Korrelationsmatrix  $K^{(k-1)}$  zum vorherigen Zeitpunkt  $k-1$  verwendet. Diese Prädiktionsfehler-Korrelationsmatrix  $K^{(k-1)}$  weist beim erstmaligen Durchlauf der Iteration die in Verfahrensschritt S20 initialisierten Werte und bei schon mehrmaligen Durchlauf der Iteration die in der letzten Iteration in Verfahrensschritt S70 iterativ ermittelten Werte der Korrelationsmatrix  $K^{(k-1)}$  zum

Zeitpunkt  $k-1$  auf.

**[0106]** Mit der auf diese Weise ermittelten Kalman-Verstärkung  $g^{(k)}$  zum Zeitpunkt  $k$  und der Prädiktionsfehler-Korrelationsmatrix  $K^{(k-1)}$  zum Zeitpunkt  $k-1$  wird ebenfalls in Verfahrensschritt S70 die Prädiktionsfehler-Korrelationsmatrix  $K^{(k)}$  zum Zeitpunkt  $k$  iterativ berechnet.

**[0107]** Schließlich wird in Verfahrensschritt S70 mit der soeben ermittelten Kalman-Verstärkung  $g^{(k)}$  und des in Verfahrensschritt S30 berechneten a-priori-Schätzfehlers  $e^{(k|k-1)}$  auf der Basis der Schätzwerte  $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$  der Kanalimpulsantworten  $\hat{h}^{(k)}$  zum Zeitpunkt  $k-1$  der Schätzwert  $\hat{h}^{(k)}$  der Kanalimpulsantworten  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  zum Zeitpunkt  $k$  iterativ berechnet. Die Schätzwerte  $\hat{h}^{(k-1)}$  der Kanalimpulsantworten  $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$  zum Zeitpunkt  $k-1$  ergibt sich bei erstmaligen Durchlauf der Iteration aus den in der Erstkanalschätzung in Verfahrensschritt S10 ermittelten Schätzwerten  $\hat{h}_1^{(-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(-1)}$  der Kanalimpulsantworten  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  zum Zeitpunkt  $-1$  und bei bereits mehrmaligen Durchlauf der Iteration aus den in der letzten Iteration in Verfahrensschritt S70 iterativ ermittelten Schätzwerten  $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$  der Kanalimpulsantworten  $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$  zum Zeitpunkt  $k-1$ .

**[0108]** In Verfahrensschritt S80 wird ermittelt, ob die Schätzungen der Datensymbol-Sequenzen  $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$  abgeschlossen ist. Dies ist der Fall, wenn nach einer bestimmten Anzahl von Iterationen sich alle vorhandenen "Überlebenspfade" endgültig in einem Zustand  $S_i$  des Trellis-Diagramms zu einem bestimmten Zeitpunkt  $k$  zu einem einzigen "Überlebenspfad" vereinigt haben und das erfindungsgemäße Verfahren abgeschlossen ist.

**[0109]** Falls dieses Ereignis noch nicht eingetreten ist, so wird in Verfahrensschritten S90 der nächste Zeitpunkt  $k+1$  abgewartet und die nächste Iteration mit Verfahrensschritt S30 begonnen.

**[0110]** In Kurve 1 der Fig. 7 ist die Bitfehlerrate - BER (Bit error rate) - als Funktion der mittleren Leistung des ersten und zweiten Senders ( $U=2$ ) eines JDDFSE (Joint-Delayed-Decision-Feedback-Sequence-Estimation)-Verfahrens mit symbolweise arbeitenden Vorfilter, das ein Verfahren zur gleichzeitigen Schätzung mehrerer zeitveränderlicher Übertragungskanäle und der über jeweils einen der Übertragungskanäle gesendeten Datensymbol-Sequenzen  $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$  nach dem Stand der Technik darstellt, und in Kurve 2 der Fig. 7 die Bitfehlerrate BER als Funktion der mittleren Leistung des ersten und zweiten Senders eines erfindungsgemäßen Verfahren zur Detektion von mehreren gesendeten und über jeweils einen zeitveränderlichen Übertragungskanal übertragenen Datensymbol-Sequenzen aus einem Empfangssignal ohne Vorfilter dargestellt.

**[0111]** Hierbei liegt in beiden Fällen ein uncodiertes 8-PSKmoduliertes Übertragungssignal nach dem GSM/EDGE-

$$\frac{E_b}{N_0}$$

Standard, das von zwei Sendern abgestrahlt wird ( $U=2$ ), ein Signal-Rausch-Abstand  $\frac{E_b}{N_0}$  von 30 dB, eine städtische Umgebung - TU (typical urban) - und eine Geschwindigkeit des Empfängers von 0 km/h vor. Beim JDDFSE-Verfahren sind 64 Zustände, beim erfindungsgemäßen Verfahren 24 Zustände vorgesehen.

**[0112]** Deutlich zu erkennen ist die niedrigere Bitfehlerrate des erfindungsgemäßen Verfahrens gegenüber dem Verfahren nach dem Stand der Technik (JDDFSE) insbesondere bei niedrigeren Sendeleistungen der beiden Sender 1 und 2.

**[0113]** Die Erfindung ist nicht auf die dargestellte Ausführungsformen beschränkt. Insbesondere sind alternativ zum RLS-Algorithmus als adaptives Kanalschätzverfahren andere rekursive Kanalschätzverfahren wie Kalman-Algorithmen oder affine Projektions-Algorithmen, wie beispielsweise der NLMS(Normalized-Least-Mean-Square)-Algorithmus, von der Erfindung abgedeckt.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Detektion von mehreren gesendeten und über jeweils einen zeitveränderlichen Übertragungskanal übertragenen Datensymbol-Sequenzen  $(\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)})$  aus einer empfangenen Datensymbol-Sequenz  $(\underline{r}^{(k)})$ , bei dem für jeden Zeitpunkt  $(k)$  im Wechsel die Impulsantwort  $(\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)})$  des jeweiligen Übertragungskanals, das jeweils aktuell gesendete Datensymbol  $(d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k))$  geschätzt wird und die Anzahl der für die Schätzung des aktuell gesendeten Datensymbols  $(d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k))$  zu berücksichtigender Kombinationen von Datensymbol-Sequenzen  $(\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)})$  gegenüber der maximal möglichen Anzahl von Kombinationen von Datensymbol-Sequenzen  $(\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)})$  reduziert ist und für jeden im aktuellen Zeitpunkt  $(k)$  ausgewählten Zustand  $(S_i)$  im Zustandsdiagramm jeweils nur eine Kanalschätzungshypothese  $(\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)})$  des jeweiligen Übertragungskanals benutzt wird, die sich aus einer Kanalschätzungshypothese  $(\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_1^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_1^{(k-3)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-3)}, \dots)$  des jeweiligen Übertragungskanals in einem der vorhergehenden Zeitpunkte  $(k-1, k-2, k-3, \dots)$  ergibt, wobei die Kanalschätzungshypothese  $(\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)})$  im aktuellen Zeitpunkt  $(k)$  über ein adaptives Kanalschätzungsverfahren aus der Kanalschätzungshypothese  $(\hat{h}_1^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-n)})$  in einem um  $n$  Zeitpunkte zum aktuellen Zeitpunkt  $(k)$

früheren Zeitpunkt ( $k-n$ ) ermittelt wird,

**dadurch gekennzeichnet,**

**dass** zur Schätzung der bis zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) jeweils gesendeten Datensymbol-Sequenz ( $d_1^{(k)}, \dots, d_u^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) ein Pfad sukzessive aus aufeinander folgenden Zuständen ( $S_i$ ) ausgewählt wird, solange die Pfadmetrik ( $\tilde{M}^{(k)}, \bar{M}^{(k)}$ ) des zuletzt ausgewählten Zustands ( $S_i$ ) kleiner als ein Schwellwert ist, und andernfalls der Pfad iterativ in einem der zuvor ausgewählten Zustände ( $S_i$ ) mit einem alternativen Zustand ( $S_j$ ) bzw. dessen nachfolgenden Zuständen ( $S_j$ ) fortgeführt wird, falls deren Pfadmetriken ( $\tilde{M}^{(k)}, \bar{M}^{(k)}$ ) kleiner als der Schwellwert sind, **dass** die Pfadmetrik ( $\tilde{M}^{(k)}$ ) eines Zustands ( $S_i$ ) im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) aus der Pfadmetrik ( $\tilde{M}^{(k-1)}$ ) des jeweils vorausgehenden Zustands ( $S_j$ ) zuzüglich einer Zweigmetrik zwischen dem jeweils vorausgehenden Zustand ( $S_j$ ) im vorhergehenden Zeitpunkt  $k-1$  und dem Zustand ( $S_i$ ) im aktuellen Zeitpunkt  $k$  iterativ berechnet wird, und **dass** die Zweigmetrik sich aus dem Produkt eines ersten a-priori-Schätzfehlers  $e^{(k|k-n)}$  und eines zweiten a-priori-Schätzfehlers  $e^{(k|k-m)}$  ergibt, wobei die Zeitpunkte  $n$  und  $m$  in Abhängigkeit der Zeitveränderlichkeit des Übertragungskanal gewählt werden.

2. Verfahren zur Detektion nach Anspruch 1,

**dadurch gekennzeichnet,**

**dass** zur Schätzung des im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) jeweils gesendeten Datensymbols ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) diejenigen Zustände ( $S_i$ ) im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) ausgewählt werden, deren Pfadmetriken ( $\tilde{M}^{(k)}, \bar{M}^{(k)}$ ) minimal sind.

3. Verfahren zur Detektion nach Anspruch 2,

**dadurch gekennzeichnet,**

**dass** diejenigen Zustände ( $S_i$ ) im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) ausgewählt werden, die von allen Zuständen ( $S_j$ ) im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) eine minimale Pfadmetrik ( $\tilde{M}^{(k)}, \bar{M}^{(k)}$ ) aufweisen.

4. Verfahren zur Detektion nach Anspruch 2,

**dadurch gekennzeichnet,**

**dass** diejenigen Zustände ( $S_i$ ) im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) ausgewählt werden, die von all denjenigen Zuständen ( $S_j$ ), die jeweils einen gemeinsamen Vorgängerzustand ( $S_j$ ) im vorherigen Zeitpunkt ( $k-1$ ) aufweisen, im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) eine minimale Pfadmetrik ( $\tilde{M}^{(k)}, \bar{M}^{(k)}$ ) aufweisen.

5. Verfahren zur Detektion nach Anspruch 1,

**dadurch gekennzeichnet,**

**dass** die Zweigmetrik zwischen dem jeweils vorausgehenden Zustand ( $S_j$ ) im vorhergehenden Zeitpunkt ( $k-1$ ) und dem Zustand ( $S_i$ ) im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) eine Funktion eines Produkts ( $e^{(k|k-n)} \cdot e^{(k|k-m)}$ ) aus einem ersten a-priori-Schätzfehler ( $e^{(k|k-n)}$ ) und zweiten a-priori-Schätzfehler ( $e^{(k|k-m)}$ ) jeweils zwischen der bis zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) empfangenen Datensymbol-Sequenz ( $\underline{r}^{(k)}$ ) und der Schätzung ( $\hat{d}_1^{(k)T} \cdot \hat{h}_1^{(k)} + \dots + \hat{d}_u^{(k)T} \cdot \hat{h}_u^{(k)} + \dots + \hat{d}_U^{(k)T} \cdot \hat{h}_U^{(k)}$ ) der bis zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) empfangenen Datensymbol-Sequenz ( $\underline{r}^{(k)}$ ) berücksichtigt wird.

6. Verfahren zur Detektion nach Anspruch 5,

**dadurch gekennzeichnet,**

**dass** die Funktion eine Betragsbildungsfunktion ist.

7. Verfahren zur Detektion nach Anspruch 5,

**dadurch gekennzeichnet,**

**dass** die Funktion eine Realteilbildungsfunktion ist.

8. Verfahren zur Detektion nach einem der Ansprüche 5 bis 7,

**dadurch gekennzeichnet,**

**dass** die Schätzung ( $\hat{d}_1^{(k)T} \cdot \hat{h}_1^{(k-n)} + \dots + \hat{d}_u^{(k)T} \cdot \hat{h}_u^{(k-n)} + \dots + \hat{d}_U^{(k)T} \cdot \hat{h}_U^{(k-n)}, \hat{d}_1^{(k)T} \cdot \hat{h}_1^{(k-m)} + \dots + \hat{d}_u^{(k)T} \cdot \hat{h}_u^{(k-m)} + \dots + \hat{d}_U^{(k)T} \cdot \hat{h}_U^{(k-m)}$ ) der bis zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) empfangenen Datensymbol-Sequenz ( $\underline{r}^{(k)}$ ) des ersten a-priori-Schätzfehlers ( $e^{(k|k-n)}$ ) und des zweiten a-priori-Schätzfehlers ( $e^{(k|k-m)}$ ) aus der mit einer zu einem ersten bzw. zweiten Zeitpunkt ( $k-n$ ;  $k-m$ ) geschätzten Impulsantwort ( $\hat{h}_1^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_u^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-n)}; \hat{h}_1^{(k-m)}, \dots, \hat{h}_u^{(k-m)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-m)}$ ) des jeweiligen Übertragungskanal gewichteten Schätzung ( $\hat{d}_1^{(k)}, \dots, \hat{d}_u^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}$ ) der bis zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) gesendeten Datensymbol-Sequenz ( $d_1^{(k)}, \dots, d_u^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) ermittelt wird.

9. Verfahren zur Detektion nach Anspruch 8,

**dadurch gekennzeichnet,**

**dass** der erste Zeitpunkt ( $k - n$ ) des ersten a-priori-Schätzfehlers ( $e^{(k|k-n)}$ ) ein zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) um  $n$  Zeitpunkte vorausgehender Zeitpunkt ( $k - n$ ) und der zweite Zeitpunkt ( $k - m$ ) des zweiten a-priori-Schätzfehlers ( $e^{(k|k-m)}$ ) ein zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) um  $m$  Zeitpunkte vorausgehender Zeitpunkt ( $k - m$ ) ist.

10. Verfahren zur Detektion nach einem der Ansprüche 1, 5 bis 9, **dadurch gekennzeichnet,**

**dass** bei der iterativ berechneten Pfadmetrik ( $\tilde{M}^{(k)}$ ) früher gesendete Datensymbole ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) schwächer als später gesendete Datensymbole ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) gewichtet werden.

11. Verfahren zur Detektion nach einem der Ansprüche 1, 5 bis 9, **dadurch gekennzeichnet,**

**dass** die iterativ berechnete Pfadmetrik ( $\tilde{M}^{(k)}$ ) um einen Erweiterungsterm ( $\tilde{\alpha}(k)$ ) zu einer Erweiterungsmetrik ( $\overline{\tilde{M}}^{(k)}$ ) erweitert ist, wobei der Erweiterungsterm ( $\tilde{\alpha}(k)$ ) sich aus der Differenz zwischen den in zukünftigen Zeitpunkten ( $k+1, k+2, k+3, \dots$ ) empfangenen Datensymbolen ( $r(k+1), r(k+2), r(k+3), \dots$ ) und den mit der zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) geschätzten Impulsantwort ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) des jeweiligen Übertragungskanals gewichteten Schätzungen ( $\hat{d}_1^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}$ ) der bis zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) jeweils gesendeten Datensymbol-Sequenz ( $d_1^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) ergibt.

12. Verfahren zur Detektion nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet,**

**dass** die Kanalschätzungshypothese ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) iterativ über ein adaptives rekursives Kanalschätzungsverfahren aus einer im vorhergehenden Zeitpunkt ( $k-1$ ) geschätzten Kanalschätzungshypothese ( $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$ ) ermittelt wird.

13. Verfahren zur Detektion nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet,**

**dass** das adaptive rekursive Kanalschätzungsverfahren der rekursive Least-Squares-Algorithmus ist.

14. Verfahren zur Detektion nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet,**

**dass** zur iterativen Berechnung der Kanalschätzungshypothese ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) für jeden im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) ausgewählten Zustand ( $S_i$ ) ein a-priori-Schätzfehler ( $e^{(k|k-1)}$ ) zwischen der bis zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) empfangenen Datensymbol-Sequenz ( $r^{(k)}$ ) und der mit der zum vorhergehenden Zeitpunkt ( $k-1$ ) für den jeweils vorausgehenden Zustand ( $S_i$ ) geschätzten Impulsantwort ( $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$ ) des Übertragungskanals gewichteten Schätzung ( $\hat{d}_1^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}$ ) bis zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) gesendeten Datensymbol-Sequenz ( $d_1^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) ermittelt wird.

15. Verfahren zur Detektion nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet,**

**dass** die Kanalschätzungshypothese ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) über ein adaptives Kanalschätzungsverfahren aus der am Beginn (0) der Übertragung geschätzten Kanalschätzungshypothese ( $\hat{h}_1^{(0)}, \dots, \hat{h}_U^{(0)}, \dots, \hat{h}_U^{(0)}$ ) ermittelt wird.

16. Entzerrer zur Detektion von mehreren gesendeten und über jeweils einen zeitveränderlichen Übertragungskanal übertragenen Datensymbol-Sequenzen ( $d_1^{(k)}, \dots, d_2^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) aus einer empfangenen Datensymbol-Sequenz ( $r^{(k)}$ ),

der für jeden Zeitpunkt ( $k$ ) im Wechsel die Impulsantwort ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) des jeweiligen Übertragungskanals und das aktuell gesendete Datensymbol ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) schätzt, wobei die Anzahl der für die Schätzung des aktuell gesendeten Datensymbols ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) zu berücksichtigender Kombinationen von Datensymbol-Sequenzen ( $d_1^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) gegenüber der maximal möglichen Anzahl von Kombinationen von Datensymbol-Sequenzen ( $d_1^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) reduziert ist und der Entzerrer für jeden im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) ausgewählten Zustand ( $S_i$ ) im Zustandsdiagramm jeweils nur eine Kanalschätzungshypothese ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) des jeweiligen Übertragungskanals benutzt, die sich aus einer Kanalschätzungshypothese ( $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$ ,

$\hat{h}_1^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-2)}$ ,  
 $\hat{h}_1^{(k-3)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-3)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-3)}$ , ...) in einem der vorhergehenden Zeitpunkte ( $k-1, k-2, k-3, \dots$ ) ergibt,

wobei ein adaptiver Kanalschätzer die Kanalschätzungshypothese ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) aus der Kanalschätzungshypothese ( $\hat{h}_1^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-n)}$ ) in einem um  $n$  Zeitpunkte zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) früheren Zeitpunkt ( $k-n$ ) ermittelt,

**dadurch gekennzeichnet,**

**dass** zur Schätzung der bis zum aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) jeweils gesendeten Datensymbol-Sequenz ( $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ ) ein Pfad sukzessive aus aufeinander folgenden Zuständen ( $S_i$ ) ausgewählt wird, solange die Pfadmetrik ( $\tilde{M}^{(k)}, \bar{M}^{(k)}$ ) des zuletzt ausgewählten Zustands ( $S_i$ ) kleiner als ein Schwellwert ist, und andernfalls der Pfad iterativ in einem der zuvor ausgewählten Zustände ( $S_i$ ) mit einem alternativen Zustand ( $S_j$ ) bzw. dessen nachfolgenden Zuständen ( $S_j$ ) fortgeführt wird, falls deren Pfadmetriken ( $\tilde{M}^{(k)}, \bar{M}^{(k)}$ ) kleiner als der Schwellwert sind, **dass** die Pfadmetrik ( $\tilde{M}^{(k)}$ ) eines Zustands ( $S_i$ ) im aktuellen Zeitpunkt ( $k$ ) aus der Pfadmetrik ( $\tilde{M}^{(k-1)}$ ) des jeweils vorausgehenden Zustands ( $S_j$ ) zuzüglich einer Zweigmetrik zwischen dem jeweils vorausgehenden Zustand ( $S_j$ ) im vorhergehenden Zeitpunkt  $k - 1$  und dem Zustand ( $S_i$ ) im aktuellen Zeitpunkt  $k$  iterativ berechnet wird, und **dass** die Zweigmetrik sich aus dem Produkt eines ersten a-priori-Schätzfehlers  $e^{(k|k-n)}$  und eines zweiten a-priori-Schätzfehlers  $e^{(k|k-m)}$  ergibt, wobei die Zeitpunkte  $n$  und  $m$  in Abhängigkeit der Zeitveränderlichkeit des Übertragungskanal gewählt sind.

17. Digitales Speichermedium mit elektronisch auslesbaren Steuersignalen, die so mit einem programmierbaren Computer oder digitalen Signalprozessor zusammenwirken können, dass das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15 ausgeführt wird.
18. Computerprogramm-Produkt mit auf einem maschinenlesbaren Träger gespeicherten Programmcode-Mitteln, um alle Schritte gemäß einem der Ansprüche 1 bis 15 durchführen zu können, wenn das Programm auf einem Computer oder einem digitalen Signalprozessor ausgeführt wird.
19. Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln, um alle Schritte gemäß einem der Ansprüche 1 bis 15 durchführen zu können, wenn das Programm auf einem Computer oder einem digitalen Signalprozessor ausgeführt wird.

**Claims**

1. Method for detection of a plurality of transmitted data symbol sequences ( $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ ) transmitted via in each case a time-variable transmission channel, from a received data symbol sequence ( $\underline{r}^{(k)}$ ), wherein for each point in time ( $k$ ) the pulse response ( $\underline{h}_1^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}$ ) of the respective transmission channel and the data symbol ( $\underline{d}_1(k), \dots, \underline{d}_2(k), \dots, \underline{d}_U(k)$ ) currently transmitted in each case are estimated in alternation and the number of combinations of data symbol sequences ( $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ ) to be considered for the estimation of the data symbol ( $\underline{d}_1(k), \dots, \underline{d}_2(k), \dots, \underline{d}_U(k)$ ) currently transmitted is reduced in relation to the maximum possible number of combinations of data symbol sequences ( $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ ) and for each state ( $S_i$ ) selected from the state diagram in the current point in time ( $k$ ) in each case use is only made of one channel estimation hypothesis ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) of the respective transmission channel which is obtained from a channel estimation hypothesis ( $(\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \hat{h}_1^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-2)}, \hat{h}_1^{(k-3)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-3)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-3)}, \dots)$ ) of the respective transmission channel in one of the preceding points in time ( $k-1, k-2, k-3, \dots$ ), wherein the channel estimation hypothesis ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) in the current point in time ( $k$ ) is determined using an adaptive channel estimation method from the channel estimation hypothesis ( $\hat{h}^{(k-n)}$ ) in a point in time ( $k-n$ ) which is  $n$  points in time earlier than the current point in time ( $k$ ), **characterised in that** for estimation of the data symbol sequence ( $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ ) transmitted in each case up to the current point in time ( $k$ ), a path of successive states ( $S_i$ ) is selected as long as the path metric ( $\tilde{M}, \bar{M}^{(k)}$ ) of the last selected state ( $S_i$ ) is less than a threshold value, and otherwise the path is continued iteratively in one of the previously selected states ( $S_j$ ) with an alternative state ( $S_j$ ) or its following states ( $S_j$ ) if the path metrics ( $\tilde{M}, \bar{M}^{(k)}$ ) thereof are less than the threshold value, **in that** the path metric ( $\tilde{M}$ ) of a state ( $S_i$ ) in the current point in time ( $k$ ) is calculated iteratively from the path metric ( $\tilde{M}$ ) of the preceding state ( $S_j$ ) in each case plus a branch metric between the preceding state ( $S_j$ ) in each case in the preceding point in time ( $k-1$ ) and the state ( $S_i$ ) in the current point in time ( $k$ ), and **in that** the branch metric is obtained from the product of a first *a priori* estimating error  $e^{(k|k-n)}$  and a second *a priori* estimating error  $e^{(k|k-m)}$ , the points in time  $n$  and  $m$  being selected dependent on the time-variability of the transmission

channel.

2. Method for detection according to claim 1,  
**characterised in that**

for estimation of the data symbol ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) transmitted in the current point in time ( $k$ ) in each case, the states ( $S_j$ ) in the current point in time ( $k$ ) are selected the path metrics ( $\tilde{M}, \bar{M}^{(k)}$ ) of which are minimal.

3. Method for detection according to claim 2,  
**characterised in that**

the states ( $S_j$ ) in the current point in time ( $k$ ) are selected which of all the states ( $S_j$ ) in the current point in time ( $k$ ) have a minimal path metric ( $\tilde{M}, \bar{M}^{(k)}$ ).

4. Method for detection according to claim 2,  
**characterised in that**

the states ( $S_j$ ) in the current point in time ( $k$ ) are selected which of all the states ( $S_j$ ) which in each case have a common predecessor state ( $S_j$ ) in the previous point in time ( $k-1$ ), in the current point in time ( $k$ ) have a minimal path metric ( $\tilde{M}, \bar{M}^{(k)}$ ).

5. Method for detection according to claim 1,  
**characterised in that**

the branch metric between the preceding state ( $S_j$ ) in each case in the preceding point in time ( $k-1$ ) and the state ( $S_j$ ) in the current point in time ( $k$ ) takes into consideration a function of a product ( $e^{(k|k-n)} \cdot e^{(k|k-m)}$ ) of a first *a priori* estimating error ( $e^{(k|k-n)}$ ) and a second *a priori* estimating error ( $e^{(k|k-m)}$ ) in each case between the data symbol sequence ( $r^{(k)}$ ) received up to the current point in time ( $k$ ) and the estimation ( $\hat{d}_1^{(k)T} \cdot \underline{h}_1^{(k)} + \dots + \hat{d}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k)} + \dots + \hat{d}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k)}$ ) of the data symbol sequence ( $r^{(k)}$ ) received up to the current point in time ( $k$ ).

6. Method for detection according to claim 5,  
**characterised in that**

the function is a magnitude forming function.

7. Method for detection according to claim 5,  
**characterised in that**

the function is a real part forming function.

8. Method for detection according to one of claims 5 to 7,  
**characterised in that**

the estimation ( $\hat{d}_1^{(k)T} \cdot \underline{h}_1^{(k-n)} + \dots + \hat{d}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k-n)} + \dots + \hat{d}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k-n)}$ ;  $\hat{d}_1^{(k)T} \cdot \underline{h}_1^{(k-m)} + \dots + \hat{d}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k-m)} + \dots + \hat{d}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k-m)}$ ) of the data symbol sequence ( $r^{(k)}$ ) received up to the current point in time ( $k$ ) of the first *a priori* estimating error ( $e^{(k|k-n)}$ ) and the second *a priori* estimating error ( $e^{(k|k-m)}$ ) is determined from the estimation ( $\hat{d}_1^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}$ ) of the data symbol sequence ( $d_1^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) transmitted up to the current point in time ( $k$ ) weighted with an estimated pulse response ( $\hat{h}_1^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-n)}$ ;  $\hat{h}_1^{(k-m)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-m)}$ ) of the respective transmission channel at a first or second point in time ( $k-n$ ;  $k-m$ ).

9. Method for detection according to claim 8,  
**characterised in that**

the first point in time ( $k-n$ ) of the first *a priori* estimating error ( $e^{(k|k-n)}$ ) is a point in time ( $k-n$ ) which precedes the current point in time ( $k$ ) by  $n$  points in time and the second point in time ( $k-m$ ) of the second *a priori* estimating error ( $e^{(k|k-m)}$ ) is a point in time ( $k-m$ ) which precedes the current point in time ( $k$ ) by  $m$  points in time.

10. Method for detection according to one of claims 1, and 5 to 9,  
**characterised in that**

with the iteratively calculated path metric ( $\tilde{M}$ ), data symbols ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) which are transmitted earlier receive a lesser weighting than data symbols ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) which are transmitted later.

11. Method for detection according to one of claims 1, and 5 to 9,  
**characterised in that**

the iteratively calculated path metric ( $\tilde{M}$ ) is expanded by an expansion term ( $\delta(k)$ ) to form an expansion metric ( $\overline{\overline{M}}^{(k)}$ ), wherein the expansion term ( $\delta(k)$ ) is obtained from the difference between the data symbols ( $r(k+1), r(k+2), r(k+3), \dots$ ) received in future points in time ( $k+1, k+2, k+3, \dots$ ) and the estimations ( $\hat{d}_1^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}$ ) of the data symbol sequence ( $d_1^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) transmitted in each case up to the current point in time ( $k$ ) weighted with the estimated pulse response ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) of the respective transmission channel at the current point in time ( $k$ ).

12. Method for detection according to one of claims 1 to 11,

**characterised in that**

the channel estimation hypothesis ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) for the current point in time ( $k$ ) is determined iteratively using an adaptive recursive channel estimation method from a channel estimation hypothesis ( $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$ ) estimated in the preceding point in time ( $k-1$ ).

13. Method for detection according to claim 12,

**characterised in that**

the adaptive recursive channel estimation method is the recursive least squares algorithm.

14. Method for detection according to claim 13,

**characterised in that**

for the iterative calculation of the channel estimation hypothesis ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) for each state ( $S_i$ ) selected in the current point in time ( $k$ ), an *a priori* estimating error ( $e^{(k|k-1)}$ ) is determined between the data symbol sequence ( $r^{(k)}$ ) received up to the current point in time ( $k$ ) and the estimation ( $\hat{d}_1^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}$ ) of the data symbol sequence ( $d_1^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) transmitted up to the current point in time ( $k$ ) weighted with the pulse response ( $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$ ) of the transmission channel estimated at the preceding point in time ( $k-1$ ) for the preceding state ( $S_i$ ) in each case.

15. Method for detection according to one of claims 1 to 11,

**characterised in that**

the channel estimation hypothesis ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) in the current point in time ( $k$ ) is determined using an adaptive channel estimation method from the channel estimation hypothesis ( $\hat{h}_1^{(0)}, \dots, \hat{h}_U^{(0)}, \dots, \hat{h}_U^{(0)}$ ) estimated at the beginning (0) of the transmission.

16. Equalizer for detection of a plurality of transmitted data symbol sequences ( $d_1^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) transmitted via in each case a time-variable transmission channel, from a received data symbol sequence ( $r^{(k)}$ ), which equalizer for each point in time ( $k$ ) estimates the pulse response ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) of the respective transmission channel and the data symbol ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) currently transmitted in alternation,

wherein the number of combinations of data symbol sequences ( $d_1^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) to be considered for the estimation of the data symbol ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) currently transmitted is reduced in relation to the maximum possible number of combinations of data symbol sequences ( $d_1^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) and for each state ( $S_i$ ) selected from the state diagram in the current point in time ( $k$ ) in each case the equalizer only makes use of one channel estimation hypothesis ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) of the respective transmission channel which is obtained from a channel estimation hypothesis ( $(\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}), \hat{h}_1^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-2)}, \hat{h}_1^{(k-3)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-3)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-3)}, \dots$ ) in one of the preceding points in time ( $(k-1, k-2, k-3, \dots)$ ),

wherein an adaptive channel estimator determines the channel estimation hypothesis ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) in the current point in time ( $k$ ) from the channel estimation hypothesis ( $\hat{h}_1^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-n)}$ ) in a point in time ( $k-n$ ) which is  $n$  points in time earlier than the current point in time ( $k$ ),

**characterised in that**

for estimation of the data symbol sequence ( $d_1^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}, \dots, d_U^{(k)}$ ) transmitted in each case up to the current point in time ( $k$ ), a path of successive states ( $S_i$ ) is selected as long as the path metric ( $\tilde{M}, \overline{\overline{M}}^{(k)}$ ) of the last selected state ( $S_i$ ) is less than a threshold value, and otherwise the path is continued iteratively in one of the previously selected states ( $S_i$ ) with an alternative state ( $S_j$ ) or its following states ( $S_j$ ) if the path metrics ( $\tilde{M}, \overline{\overline{M}}^{(k)}$ ) thereof are less than the threshold value,

**in that** the path metric ( $\tilde{M}$ ) of a state ( $S_i$ ) in the current point in time ( $k$ ) is calculated iteratively from the path metric ( $\tilde{M}$ ) of the preceding state ( $S_j$ ) in each case plus a branch metric between the preceding state ( $S_j$ ) in each case in

the preceding point in time  $(k-1)$  and the state  $(S_i)$  in the current point in time  $(k)$ , and

in that the branch metric is obtained from the product of a first *a priori* estimating error  $e^{(k|k-n)}$  and a second *a priori* estimating error  $e^{(k|k-m)}$ , the points in time  $n$  and  $m$  being selected dependent on the time-variability of the transmission channel.

- 5
17. Digital data storage medium with electronically readable control signals which are able to interact with a programmable computer or digital signal processor so that the method according to one of claims 1 to 15 is implemented.
- 10
18. Computer programme product with programme code means stored on a machine-readable data storage medium in order to be able to implement all the steps according to one of claims 1 to 15 when the programme is implemented on a computer or a digital signal processor.
- 15
19. Computer programme with programme code means in order to be able to implement all the steps according to one of claims 1 to 15 when the programme is implemented on a computer or a digital signal processor.

### Revendications

- 20
1. Procédé de détection de plusieurs séquences de symboles de données  $(\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)})$  envoyées et transmises par respectivement un canal de transmission variable dans le temps, à partir d'une séquence de symboles de données  $(\underline{r}^{(k)})$  reçue, selon lequel, à chaque instant  $(k)$  la réponse d'impulsion  $(\underline{h}_1^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)}, \dots, \underline{h}_U^{(k)})$  du canal de transmission respectif et le symbole de données  $(d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k))$  respectivement couramment envoyé sont estimés alternativement et le nombre de combinaisons de séquences de symboles de données  $(\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)})$
- 25
- à prendre en compte pour l'estimation du symbole de données  $(d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k))$  couramment envoyé est réduit par rapport au nombre maximal de combinaisons possibles de séquences de symboles de données  $(\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)})$  et pour chaque état  $(S_i)$  sélectionné à l'instant courant  $(k)$  dans le diagramme d'état, respectivement une seule hypothèse d'estimation de canal  $(\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)})$  du canal de transmission respectif est utilisée, ladite hypothèse étant obtenue à partir d'une hypothèse d'estimation de canal  $(\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \hat{h}_1^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-2)}, \hat{h}_1^{(k-3)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-3)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-3)}, \dots)$  du canal de transmission respectif à l'un des instants passés  $(k-1, k-2, k-3, \dots)$ ,
- 30
- dans lequel l'hypothèse d'estimation de canal  $(\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)})$  à l'instant courant  $(k)$  est déterminée par l'intermédiaire d'un procédé d'estimation de canal adaptatif à partir de l'hypothèse d'estimation de canal  $(\hat{h}^{(k-n)})$  à un instant  $(k-n)$  antérieur de  $n$  instants par rapport à l'instant courant  $(k)$ ,
- 35
- caractérisé en ce que,**
- pour l'estimation de la séquence de symboles de données  $(\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)})$  respectivement envoyée jusqu'à l'instant courant  $(k)$ , une voie composée d'états  $(S_i)$  successifs est sélectionnée, tant que la métrique de voie  $(\tilde{M}, \bar{M}^{(k)})$  de l'état  $(S_i)$  sélectionné en dernier est inférieure à une valeur seuil, et dans le cas contraire la voie est poursuivie de manière itérative dans un des états  $(S_i)$  précédemment sélectionnés avec un état  $(S_i)$  alternatif ou ses états  $(S_i)$  suivants, au cas où leurs métriques de voie  $(\tilde{M}, \bar{M}^{(k)})$  seraient inférieures à la valeur seuil,
- 40
- en ce que** la métrique de voie  $(\tilde{M})$  d'un état  $(S_i)$  à l'instant courant  $(k)$  est calculée de manière itérative à partir de la métrique de voie  $(\tilde{M})$  de l'état  $(S_i)$  respectivement précédent majorée d'une métrique de branche entre l'état  $(S_i)$  respectivement précédent à l'instant passé  $k-1$  et l'état  $(S_i)$  à l'instant courant  $k$ , et
- 45
- en ce que** la métrique de branche est obtenue à partir du produit d'une première erreur d'estimation a priori  $e^{(k|k-n)}$  et d'une deuxième erreur d'estimation a priori  $e^{(k|k-m)}$ , dans lequel les instants  $n$  et  $m$  sont sélectionnés en fonction de la variabilité dans le temps du canal de transmission.
- 50
2. Procédé de détection selon la revendication 1,
- caractérisé en ce que,**
- pour l'estimation du symbole de données  $(d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k))$  respectivement envoyé à l'instant courant  $(k)$ , les états  $(S_i)$  dont les métriques de voie  $(\tilde{M}, \bar{M}^{(k)})$  sont minimales sont sélectionnés à l'instant courant  $(k)$ .
- 55
3. Procédé de détection selon la revendication 2,
- caractérisé,**

en ce que les états ( $S_j$ ) qui parmi tous les états ( $S_j$ ) présentent à l'instant courant ( $k$ ) une métrique de voie ( $\tilde{M}, \overline{M}^{(k)}$ ) minimale sont sélectionnés à l'instant courant ( $k$ ).

4. Procédé de détection selon la revendication 2,

**caractérisé en ce que**

les états ( $S_j$ ) qui présentent à l'instant courant ( $k$ ), parmi tous les états ( $S_j$ ) présentant respectivement un état antérieur commun ( $S_j$ ) à l'instant antérieur ( $k-1$ ), une métrique de voie ( $\tilde{M}, \overline{M}^{(k)}$ ) minimale, sont sélectionnés à l'instant courant ( $k$ ).

5. Procédé de détection selon la revendication 1,

**caractérisé en ce que**

la métrique de branche est prise en compte entre l'état respectivement précédent ( $S_j$ ) à l'instant passé ( $k-1$ ) et l'état ( $S_j$ ) à l'instant courant ( $k$ ) en fonction d'un produit ( $e^{(k|k-n)} \cdot e^{(k|k-m)}$ ) d'une première erreur d'estimation a priori ( $e^{(k|k-n)}$ ) et d'une deuxième erreur d'estimation a priori ( $e^{(k|k-m)}$ ) respectivement entre la séquence de symboles de données ( $\underline{r}^{(k)}$ ) reçue jusqu'à l'instant courant ( $k$ ) et l'estimation ( $\hat{\underline{d}}_1^{(k)T} \cdot \underline{h}_1^{(k)} + \dots + \hat{\underline{d}}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k)} + \dots + \hat{\underline{d}}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k)}$ ) de la séquence de symboles de données ( $\underline{r}^{(k)}$ ) reçue jusqu'à l'instant courant ( $k$ ).

6. Procédé de détection selon la revendication 5,

**caractérisé en ce que**

la fonction est une fonction de formation de montant.

7. Procédé de détection selon la revendication 5,

**caractérisé en ce que,**

la fonction est une fonction de formation de composante réelle.

8. Procédé de détection selon l'une des revendications 5 à 7,

**caractérisé en ce que**

l'estimation ( $\hat{\underline{d}}_1^{(k)T} \cdot \underline{h}_1^{(k-n)} + \dots + \hat{\underline{d}}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k-n)} + \dots + \hat{\underline{d}}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k-n)}$ ,  $\hat{\underline{d}}_1^{(k)T} \cdot \underline{h}_1^{(k-m)} + \dots + \hat{\underline{d}}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k-m)} + \dots + \hat{\underline{d}}_U^{(k)T} \cdot \underline{h}_U^{(k-m)}$ ) de la séquence de symboles de données ( $\underline{r}^{(k)}$ ), reçue jusqu'à l'instant courant ( $k$ ), de la première erreur d'estimation a priori ( $e^{(k|k-n)}$ ) et de la deuxième erreur d'estimation a priori ( $e^{(k|k-m)}$ ) est déterminée à partir de l'estimation ( $\hat{\underline{d}}_1^{(k)}, \dots, \hat{\underline{d}}_U^{(k)}, \dots, \hat{\underline{d}}_U^{(k)}$ ), pondérée au moyen d'une réponse d'impulsion ( $\hat{\underline{h}}_1^{(k-n)}, \dots, \hat{\underline{h}}_U^{(k-n)}, \dots, \hat{\underline{h}}_U^{(k-n)}$ ;  $\hat{\underline{h}}_1^{(k-m)}, \dots, \hat{\underline{h}}_U^{(k-m)}, \dots, \hat{\underline{h}}_U^{(k-m)}$ ) du canal de transmission respectif estimée à un premier ou à un deuxième instant ( $k-n$ ;  $k-m$ ), de la séquence de symboles de données ( $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ ) envoyée jusqu'à l'instant courant ( $k$ ).

9. Procédé de détection selon la revendication 8,

**caractérisé en ce que**

le premier instant ( $k-n$ ) de la première erreur d'estimation a priori ( $e^{(k|k-n)}$ ) est un instant ( $k-n$ ) précédent de  $n$  instants par rapport à l'instant courant ( $k$ ) et le deuxième instant ( $k-m$ ) de la deuxième erreur d'estimation a priori ( $e^{(k|k-m)}$ ) est un instant ( $k-m$ ) précédent de  $m$  instants par rapport à l'instant courant ( $k$ ).

10. Procédé de détection selon l'une des revendications 1, 5 à 9,

**caractérisé en ce que,**

pour la métrique de voie ( $\tilde{M}$ ) calculée de manière itérative, des symboles de données ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) envoyés antérieurement sont pondérés de manière plus faible que des symboles de données ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) envoyés ultérieurement.

11. Procédé de détection selon l'une des revendications 1, 5 à 9,

**caractérisé en ce que**

la métrique de voie ( $\tilde{M}$ ) calculée de manière itérative est étendue d'un terme d'extension ( $\delta(k)$ ) de manière à obtenir une métrique étendue ( $\overline{M}^{(k)}$ ), dans lequel le terme d'extension ( $\delta(k)$ ) est obtenu à partir de la différence entre les symboles de données ( $r(k+1), r(k+2), r(k+3), \dots$ ) reçus aux instants futurs ( $k+1, k+2, k+3, \dots$ ) et les estimations ( $\hat{\underline{d}}_1^{(k)}, \dots, \hat{\underline{d}}_U^{(k)}, \dots, \hat{\underline{d}}_U^{(k)}$ ), pondérées au moyen de la réponse d'impulsion ( $\hat{\underline{h}}_1^{(k)}, \dots, \hat{\underline{h}}_U^{(k)}, \dots, \hat{\underline{h}}_U^{(k)}$ ) du canal de transmission respectif estimée à l'instant courant ( $k$ ), de la séquence de symboles de données ( $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ ) respectivement envoyée jusqu'à l'instant courant ( $k$ ).

12. Procédé de détection selon l'une des revendications 1 à 11,

**caractérisé en ce que**

l'hypothèse d'estimation de canal ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) est déterminée à l'instant courant ( $k$ ) de manière itérative par l'intermédiaire d'un procédé d'estimation de canal récursif adaptif à partir d'une hypothèse d'estimation de canal ( $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$ ) estimée à l'instant passé ( $k-1$ ).

5

13. Procédé de détection selon la revendication 12,

**caractérisé en ce que**

le procédé d'estimation de canal récursif adaptif est l'algorithme des moindres carrés récursifs.

10

14. Procédé de détection selon la revendication 13,

**caractérisé en ce que,**

pour le calcul itératif de l'hypothèse d'estimation de canal ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) pour chaque état ( $S_i$ ) sélectionné à l'instant courant ( $k$ ), une erreur d'estimation a priori ( $e^{(k|k-1)}$ ) entre la séquence de symboles de données ( $\underline{r}^{(k)}$ ) reçue jusqu'à l'instant courant ( $k$ ) et l'estimation ( $\hat{d}_1^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}, \dots, \hat{d}_U^{(k)}$ ), pondérée au moyen de la réponse d'impulsion ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) du canal de transmission estimée à l'instant passé ( $k-1$ ) pour l'état ( $S_i$ ) respectivement précédent, de la séquence de symboles de données ( $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ ) envoyée jusqu'à l'instant courant ( $k$ ), est déterminée.

15

15. Procédé de détection selon l'une des revendications 1 à 11,

**caractérisé en ce que**

l'hypothèse d'estimation de canal ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) est déterminée à l'instant courant ( $k$ ) par l'intermédiaire d'un procédé d'estimation de canal adaptif à partir de l'hypothèse d'estimation de canal ( $\hat{h}_1^{(0)}, \dots, \hat{h}_U^{(0)}, \dots, \hat{h}_U^{(0)}$ ) estimée au début (0) de la transmission.

20

16. Egaliseur pour la détection de plusieurs séquences de symboles de données ( $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ ) envoyées et transmises par respectivement un canal de transmission variable dans le temps, à partir d'une séquence de symboles de données ( $\underline{r}^{(k)}$ ) reçue, lequel égaliseur, à chaque instant ( $k$ ), estime alternativement la réponse d'impulsion ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) du canal de transmission respectif et le symbole de données ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) couramment envoyé,

25

30

dans lequel le nombre de combinaisons de séquences de symboles de données ( $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ ) à prendre en compte pour l'estimation du symbole de données ( $d_1(k), \dots, d_2(k), \dots, d_U(k)$ ) couramment envoyé est réduit par rapport au nombre maximal de combinaisons possibles de séquences de symboles de données ( $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ ), et l'égaliseur utilise pour chaque état ( $S_i$ ) sélectionné à l'instant courant ( $k$ ) dans le diagramme d'état respectivement une seule hypothèse d'estimation de canal ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) du canal de transmission respectif, ladite hypothèse est obtenue à partir d'une hypothèse d'estimation de canal ( $\hat{h}_1^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-1)}$ ,  $\hat{h}_1^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-2)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-2)}$ ,  $\hat{h}_1^{(k-3)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-3)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-3)}$ , ...) à l'un des instants passés ( $k-1$ ,  $k-2$ ,  $k-3$ , ...),

35

dans lequel un estimateur de canal adaptatif détermine l'hypothèse d'estimation de canal ( $\hat{h}_1^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}, \dots, \hat{h}_U^{(k)}$ ) à l'instant courant ( $k$ ) à partir de l'hypothèse d'estimation de canal ( $\hat{h}_1^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-n)}, \dots, \hat{h}_U^{(k-n)}$ ) à un instant ( $k-n$ ) antérieur de  $n$  instants par rapport à l'instant courant ( $k$ ),

40

**caractérisé en ce que,**

pour l'estimation de la séquence de symboles de données ( $\underline{d}_1^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}, \dots, \underline{d}_U^{(k)}$ ) respectivement envoyée jusqu'à l'instant courant ( $k$ ), une voie composée d'états ( $S_i$ ) successifs est sélectionnée, tant que la métrique de voie ( $\tilde{M}$ ,  $\overline{M}^{(k)}$ ) de l'état ( $S_i$ ) sélectionné en dernier est inférieure à une valeur seuil, et dans le cas contraire la voie est poursuivie de manière itérative dans un des états ( $S_i$ ) précédemment sélectionnés avec un état ( $S_j$ ) alternatif ou ses états ( $S_j$ ) suivants, au cas où leurs métriques de voie ( $\tilde{M}$ ,  $\overline{M}^{(k)}$ ) seraient inférieures à la valeur seuil,

45

**en ce que** la métrique de voie ( $\tilde{M}$ ) d'un état ( $S_i$ ) à l'instant courant ( $k$ ) est calculée de manière itérative à partir de la métrique de voie ( $\tilde{M}$ ) de l'état ( $S_j$ ) respectivement précédent majorée d'une métrique de branche entre l'état ( $S_j$ ) respectivement précédent à l'instant passé  $k-1$  et l'état ( $S_i$ ) à l'instant courant  $k$ , et

50

**en ce que** la métrique de branche est obtenue à partir du produit d'une première erreur d'estimation a priori  $e^{(k|k-n)}$  et d'une deuxième erreur d'estimation a priori  $e^{(k|k-m)}$ , dans lequel les instants  $n$  et  $m$  sont sélectionnés en fonction de la variabilité dans le temps du canal de transmission.

55

17. Support d'enregistrement numérique comprenant des signaux de commande pouvant être lus par voie électronique, qui peuvent coopérer avec un ordinateur programmable ou un processeur de signal numérique, de sorte que le

## EP 1 964 344 B1

procédé selon l'une des revendications 1 à 15 est exécuté.

5 **18.** Produit-programme informatique comprenant des moyens de code de programme mis en mémoire sur un support lisible par machine, afin de pouvoir mettre en oeuvre toutes les étapes selon l'une des revendications 1 à 15, lorsque le programme est exécuté sur un ordinateur ou un processeur de signal numérique.

10 **19.** Programme informatique comprenant des moyens de code de programme, afin de pouvoir mettre en oeuvre toutes les étapes selon l'une des revendications 1 à 15, lorsque le programme est exécuté sur un ordinateur ou un processeur de signal numérique.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

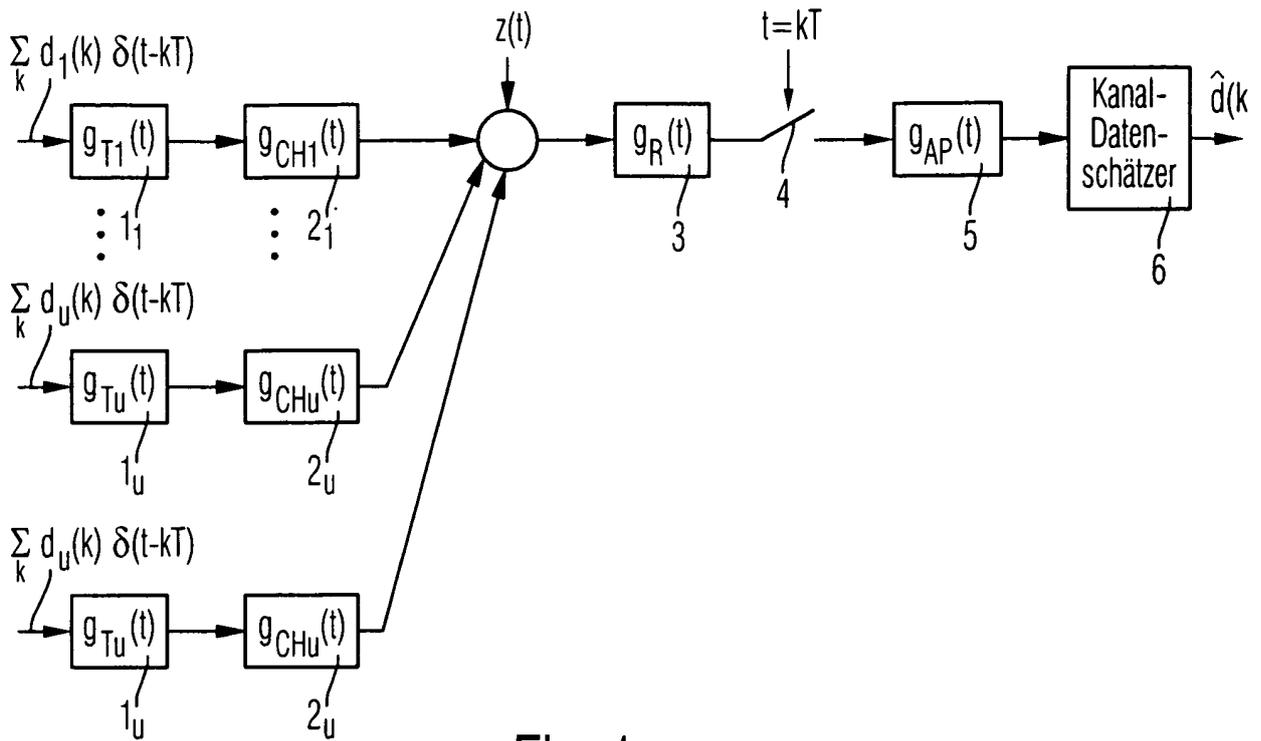


Fig. 1  
(Stand der Technik)

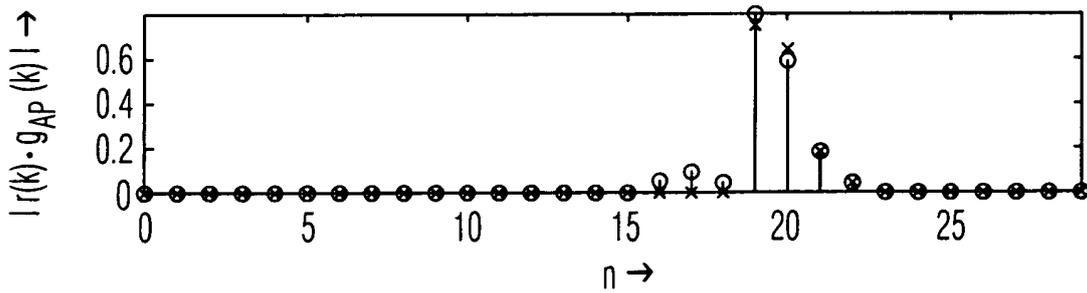


Fig. 2  
(Stand der Technik)

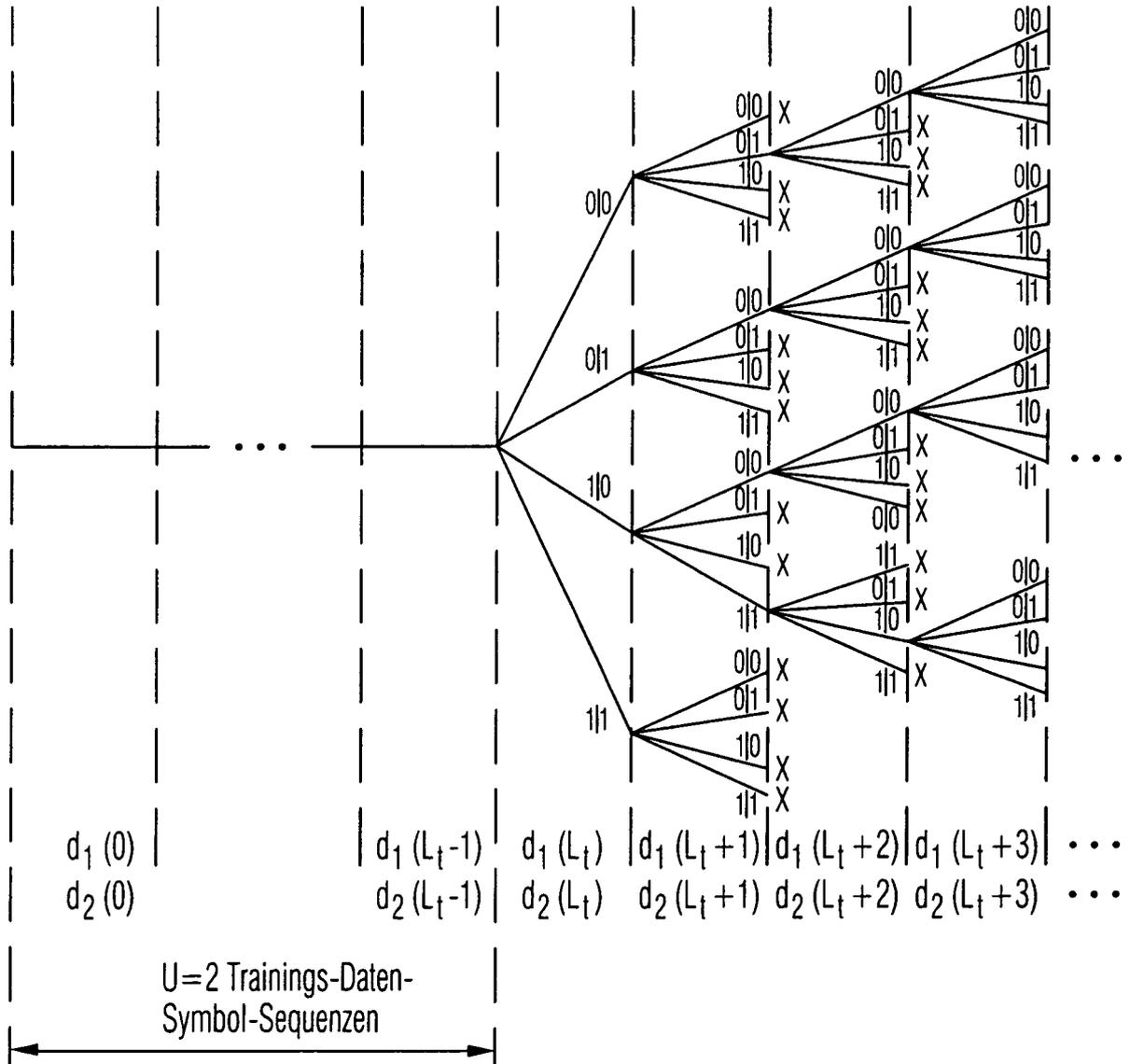


Fig. 3

$$\begin{array}{c}
 \left[ \begin{array}{cccccc} r(L_1) & \dots & r(k-2) & r(k-1) & r(k) & r(k+1) & r(k+2) \end{array} \right] \\
 \\
 \left[ \begin{array}{cccccc} d_1(L_1) \cdot \hat{h}_1(0) & d_1(k-2) \cdot \hat{h}_1(0) & d_1(k-1) \cdot \hat{h}_1(0) & d_1(k) \cdot \hat{h}_1(0) & ? \cdot \hat{h}_1(0) & ? \cdot \hat{h}_1(0) \\ + & + & + & + & + & + \\ d_1(L_1-1) \cdot \hat{h}_1(1) & \dots & d_1(k-3) \cdot \hat{h}_1(1) & d_1(k-2) \cdot \hat{h}_1(1) & d_1(k-1) \cdot \hat{h}_1(1) & d_1(k) \cdot \hat{h}_1(1) & ? \cdot \hat{h}_1(1) \\ + & + & + & + & + & + \\ d_1(L_1-2) \cdot \hat{h}_1(2) & d_1(k-4) \cdot \hat{h}_1(2) & d_1(k-3) \cdot \hat{h}_1(2) & d_1(k-2) \cdot \hat{h}_1(2) & d_1(k-1) \cdot \hat{h}_1(2) & d_1(k) \cdot \hat{h}_1(2) \\ + & + & + & + & + & + \\ d_2(L_1) \cdot \hat{h}_2(0) & d_2(k-1) \cdot \hat{h}_2(0) & d_2(k-1) \cdot \hat{h}_2(0) & d_2(k) \cdot \hat{h}_2(0) & ? \cdot \hat{h}_2(0) & ? \cdot \hat{h}_2(0) \\ + & + & + & + & + & + \\ d_2(L_1-1) \cdot \hat{h}_2(1) & d_2(k-2) \cdot \hat{h}_2(1) & d_2(k-2) \cdot \hat{h}_2(1) & d_2(k-1) \cdot \hat{h}_2(1) & d_2(k) \cdot \hat{h}_2(1) & ? \cdot \hat{h}_2(1) \end{array} \right] \\
 \\
 \Rightarrow \tilde{M}^{(k)} \qquad \qquad \qquad \Rightarrow \delta(k)
 \end{array}$$

Fig. 4

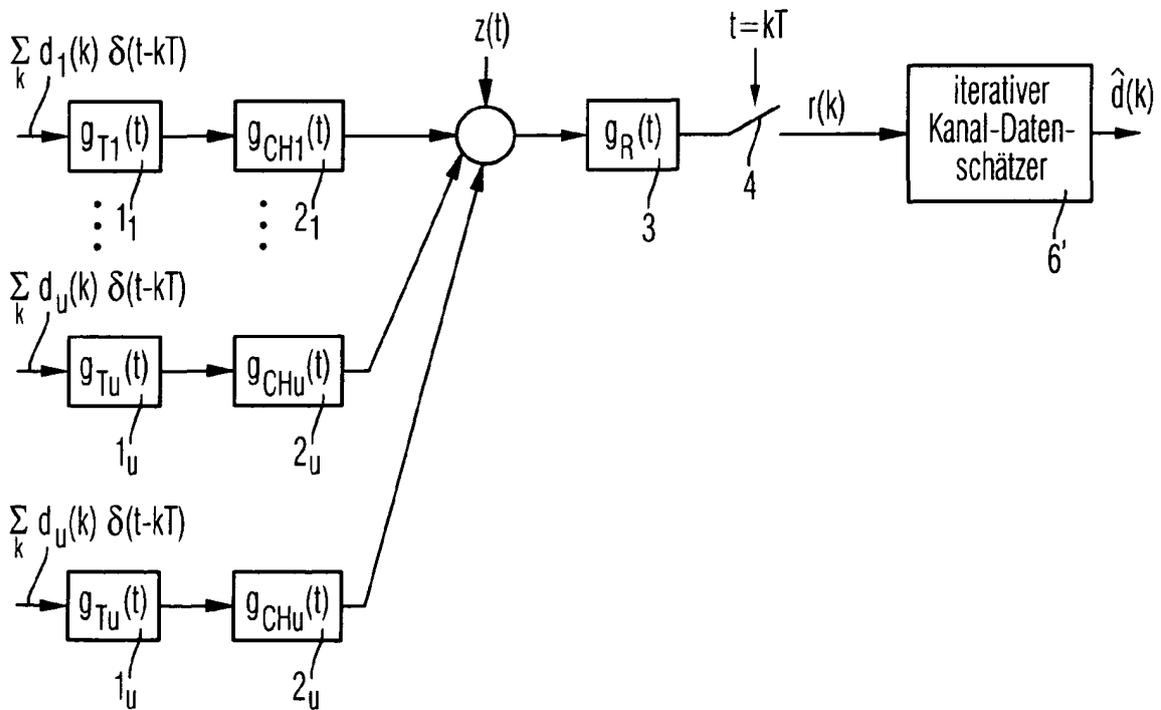


Fig. 5

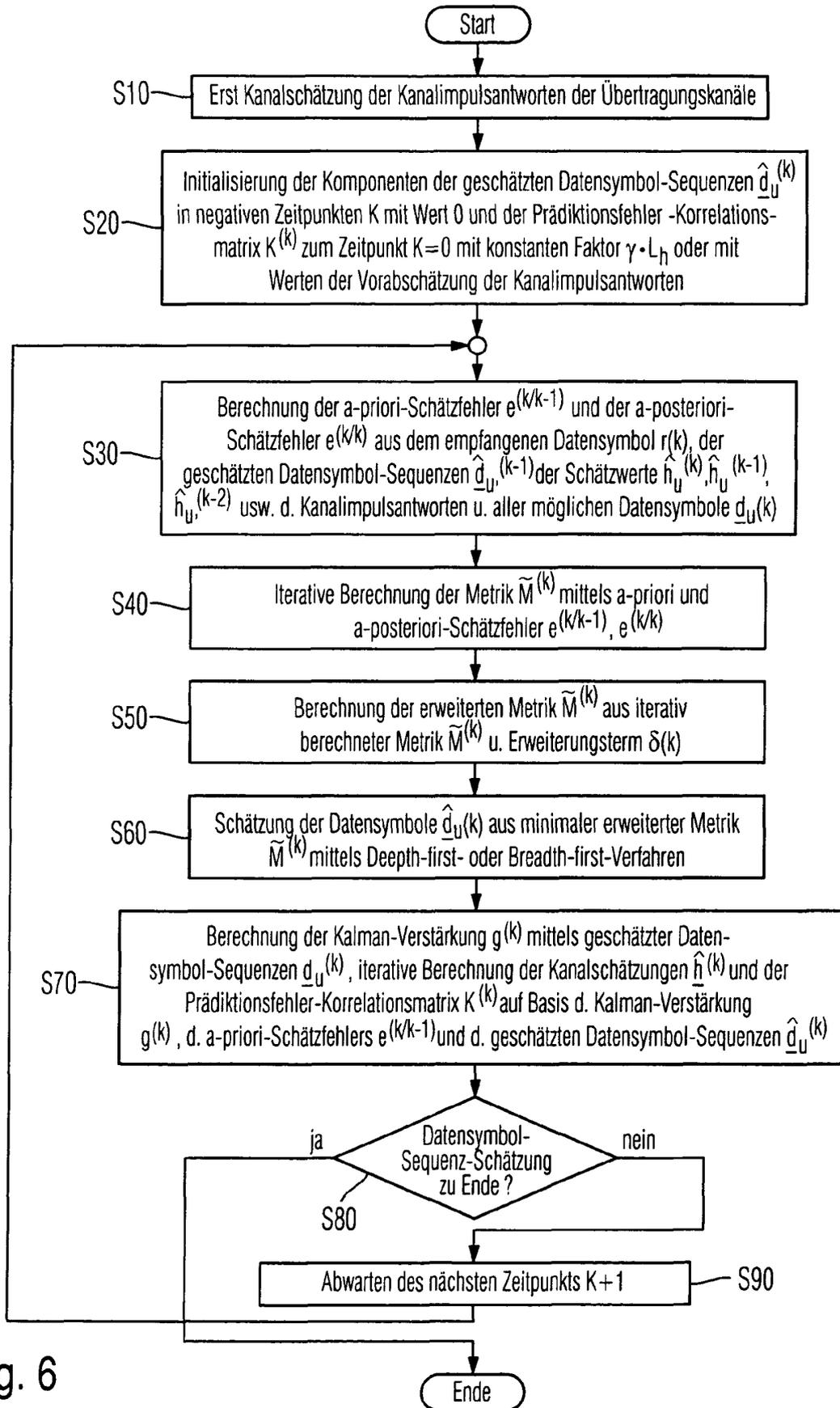


Fig. 6

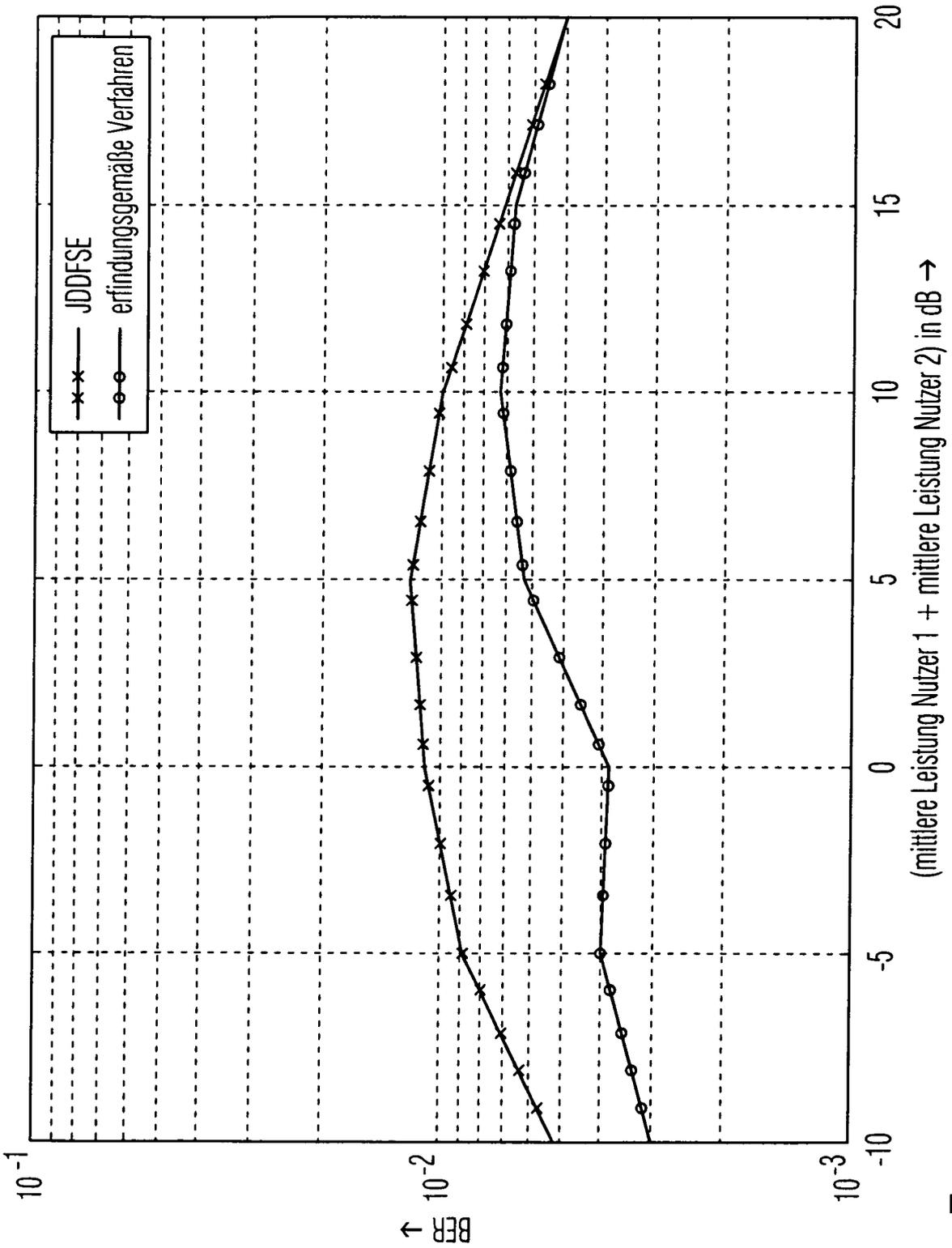


Fig. 7

**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur**

- **ISABELLA DE BROECK.** Interleaved Frequency-Division Multiple Access. *Darmstädter Dissertation*, 09. Januar 2004, 60-83 **[0014]**
- **KAMMEYER, K.D.** Nachrichtenübertragung. Teubner-Verlag, 1996, 554-555 **[0046]**
- **TRÄGER, J.** Kombinierte Kanalschätzung und Dekodierung für Mobilfunkkanäle. Shaker-Verlag, 1998 **[0048]**
- **KAMMEYER, K.D.** Nachrichtenübertragung. Teubner-Verlag, 1996, 729-730 **[0059]**