

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
8. April 2004 (08.04.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/029825 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation⁷: **G06F 17/00**, G01D 3/02, G01R 23/167, B61K 9/08, H03H 21/00
- (74) Gemeinsamer Vertreter: **ZINKEN-SOMMER, Rainer**; Deutsche Bahn AG, Patentabteilung, Völckerstrasse 5, 80939 München (DE).
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2003/009161
- (22) Internationales Anmeldedatum: 19. August 2003 (19.08.2003)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität: 102 44 357.2 24. September 2002 (24.09.2002) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **DB NETZ AG** [DE/DE]; Theodor-Heuss-Allee 7, 60468 Frankfurt am Main (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **WOLTER, Klaus-Ulrich** [DE/DE]; Sophie-Scholl-Strasse 8, 84416 Taufkirchen (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (regional): ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Veröffentlicht:
— mit internationalem Recherchenbericht

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: RECONSTRUCTION OF ORIGINAL SIGNALS FROM RELATIVE MEASUREMENTS

(54) Bezeichnung: REKONSTRUKTION VON ORIGINALSIGNALEN AUS RELATIVMESSUNGEN



(57) Abstract: The invention relates to a method for reconstruction of original signals from relative measurements. According to the invention, the amplitude distortion in a measuring system is exactly compensated by a compensation filter, whereby the compensation filter is unequivocally determined by the measuring system. The described system function of the measuring system may be inverted with minimal dephasing, whereby all zero points lying outside the unity circle are mirrored about the unity circle and thus arrive within the unity circle. Examples of advantageous application are the reconstruction of measurements from a Wandersehen method and for the reconstruction of track bed measurements in rail traffic.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Rekonstruktion von Originalsignalen aus Relativmessungen. Die Erfindung beschreibt ein verfahren, bei dem die Amplitudenverzerrung eines Messsystems exakt durch ein Kompensationsfilter kompensiert wird, wobei das Kompensationsfilter eindeutig durch das Messsystem bestimmt ist. Die beschreibende Systemfunktion des Messsystems wird minimalphasig und damit invertierbar, indem alle ihre Nullstellen, die ausserhalb des Einheitskreises liegen am Einheitskreis gespiegelt werden und somit in das Innere des Einheitskreises gelangen. Vorteilshafte Anwendungsbeispiele sind die Rekonstruktion von Messungen aus einem Wandersehenverfahren sowie zur Rekonstruktion von Gleislagemessungen des Schienenverkehrs.

WO 2004/029825 A1



Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Rekonstruktion von Originalsignalen aus Relativmessungen

Beschreibung

5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Rekonstruktion von Originalsignalen aus Relativmessungen.

Bedingt durch das dynamische Verhalten und durch den konstruktiven Aufbau eines Messsystems ist im Allgemeinen das ausgegebene Messsignal nicht identisch mit der zu messenden Größe. Bei vielen Anwendungen ist jedoch dieser durch das Messsystem systematisch bedingte Fehler nicht tolerierbar.

Dieser Fehler kann bei der Kenntnis des dynamischen Verhaltens und/oder des konstruktiven Aufbaus des Messsystems kompensiert werden, so dass das vom Messsystem ausgegebene Messsignal exakt der zu messenden Größe entspricht. Allerdings ist dies nur bei einer bestimmten Klasse von Messsystemen möglich.

In der Patentschrift DE 44 29 517 wird ein Verfahren zur Berechnung einer inversen Übertragungsfunktion bzw. zur Korrektur von Messsignalen beschrieben. Hierbei wird ein von einem Messsystem aufgenommenes Messsignal korrigiert durch Addition eines hochfrequenten Anteils des Messsignals, der durch eine approximative Entfaltung ermittelt wird, zu einer Lösung einer Differentialgleichung des tieffrequenten Anteils des Messsignals, wobei deren Integrationskonstanten durch die messtechnischen oder durch den wahren Signalverlauf gegebenen Randbedingungen bestimmt sind. Dieses Verfahren ist jedoch mathematisch aufwendig und stellt nicht für alle Aufgabenstellungen einen zielführenden Lösungsansatz dar. Desweiteren handelt es sich um ein Näherungsverfahren, bei dem das originale Messsignal nur näherungsweise/approximativ rekonstruiert wird.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zur Rekonstruktion von Originalsignalen aus Relativmessungen anzugeben, bei dem die geschilderten Nachteile des Standes der Technik gelöst werden.

Diese Aufgabe wird in Verbindung mit dem Oberbegriff des Hauptanspruches erfindungsgemäß durch die in Anspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst.

Vorteil der Erfindung gegenüber dem Stand der Technik ist, dass

- die Verzerrung der Amplitude des Messsignals exakt (mathematisch nachweisbar) kompensiert wird, es handelt sich somit nicht um ein Näherungsverfahren,
 - das Kompensationsfilter einfach zu realisieren ist.
- 5
- nur einfache Numerik (wenige Multiplikationen und Additionen) verwendet wird und daher das Verfahren auch für Echtzeitanwendungen geeignet ist.
 - das Kompensationsfilter eindeutig zu bestimmen ist, es ist somit kein Optimierungsverfahren notwendig.

10 Ansprüche 2 bis 6 geben vorteilhafte Anwendungsbeispiele des erfindungsgemäßen Verfahrens an.

Nach Anspruch 2 wird das Verfahren aus Anspruch 1 zur Rekonstruktion von Signalen nach einem Wandersehenmessverfahren verwendet.

15 Nach Anspruch 3 wird bei dem Wandersehenmessverfahren eine symmetrische Sehnenteilung verwendet. Hierdurch ergibt sich eine symmetrische Impulsantwort. Die symmetrische Impulsantwort hat einen linearen Phasengang und damit eine konstante Gruppenlaufzeit zur Folge. Aus der Kenntnis des Phasenganges bzw. der Gruppenlaufzeit wird vorteilhaft zusätzlich die Phasenverzerrung des Messsystems exakt kompensiert.

20 Nach Anspruch 4 wird das Verfahren aus Anspruch 1 und/oder 2 zur Rekonstruktion von Gleislagesignalen verwendet.

Die Erfindung wird nachstehend anhand zweier Ausführungsbeispiele und den Figuren 1 bis 13 näher erläutert. Die Figuren zeigen in

- 25 - **Fig. 1** ein priziipielles Schaltbild mit einem originalen Signal $g(x)$, das von einem Messsystem mit einer Impulsantwort $h(x)$ erfasst und als Messsignal $m(x)$ ausgegeben wird,
- **Fig. 2** wie Fig. 1, jedoch in einem ortsdiskreten System,
- **Fig. 3** eine Impulsantwort $h_d(z)$ des Messsystems des Ausführungsbeispiels im ortsdiskreten System,
- 30 - **Fig. 4** eine Übertragungsfunktion $H_d(z)$ des Messsystems des Ausführungsbeispiels im ortsdiskreten System,
- **Fig. 5** wie Fig. 2, jedoch ergänzt um ein Kompensationsfilter mit der inversen Impulsantwort $h_c[n]$, so dass sich ein rekonstruiertes originales Signal $g^*[n]$ ergibt,

- **Fig. 6** Pole und Nullstellen der Übertragungsfunktion $H_d(z)$ des Messsystems des Ausführungsbeispiels in der komplexen Ebene,
- **Fig. 7** Pole und Nullstellen der minimalphasigen Übertragungsfunktion $H_{dmin}(z)$ des Ausführungsbeispiels in der komplexen Ebene,
- 5 - **Fig. 8** Pole und Nullstellen der Allpass-Übertragungsfunktion $H_{ap}(z)$ des Ausführungsbeispiels in der komplexen Ebene,
- **Fig. 9** eine minimalphasige Übertragungsfunktion $H_{dmin}(z)$ des Ausführungsbeispiels nach Gleichung (2.20) im ortsdiskreten System,
- **Fig. 10** eine Allpass-Übertragungsfunktion $H_{ap}(z)$ des Ausführungsbeispiels nach Gleichung (2.20) im ortsdiskreten System,
- 10 - **Fig. 11** Pole und Nullstellen der inversen Übertragungsfunktionen $H_c(z)$ des Kompensationsfilters des Ausführungsbeispiels in der komplexen Ebene,
- **Fig. 12** eine inverse Übertragungsfunktionen $H_c(z)$ des Kompensationsfilters des Ausführungsbeispiels im ortsdiskreten System,
- 15 - **Fig. 13** eine kanonische Realisierung einer Übertragungsfunktion mittels digitaler Filter nach Gleichung (2.29).

In dem ersten Ausführungsbeispiel wird ein Gleismesstriebzug (GMTZ) der Deutschen Bahn AG betrachtet, der das Messverfahren des Wandersehnenmessverfahrens verwendet. Es wird beschrieben, wie eine Verzerrung der Amplitude des Messsignals des GMTZ exakt kompensiert wird.

Das Messsystem des GMTZ gibt hierbei nicht die exakten physikalischen Gleislagen bzw. die Gleislageabweichungen wieder. Diese Verzerrung beruht auf einem durch das Messverfahren bedingten systematischen Fehler. Für die Gleislageinstandhaltung und insbesondere zur Beurteilung der Gleislageabweichungen anhand formtreuer Gleislagesignale ist es zwingend erforderlich diesen systematischen Fehler exakt zu kompensieren.

Das Messsystem des GMTZ kann als lineares zeitinvariantes System (LTI-System) beschrieben werden. Die Gleislage $g(x)$ ist hierbei die Eingangsgröße für das LTI-System. Das LTI-System wird vollständig durch die Impulsantwort $h(x)$ bzw. Übertragungsfunktion $H(j\omega)$ beschrieben. Hierbei ist $H(j\omega)$ die Fouriertransformierte der Impulsantwort $h(x)$. $m(x)$ ist das vom Messsystem gelieferte Signal, siehe Fig. 1:

$$m(x) = g(x) * h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) \cdot h(x-\tau) d\tau \quad (2.1)$$

$$M(j\omega) = G(j\omega) \cdot H(j\omega) \quad (2.2)$$

Beim Messsystem GMTZ sind die Impulsantworten $h(x)$ und die Übertragungsfunktionen $H(j\omega)$ eindeutig aufgrund der Geometrie des Wandersehmessverfahrens gegeben. Es ist zu berücksichtigen, dass für die Messung der Längshöhen- und Richtungsabweichungen jeweils unterschiedliche Impulsantworten und Übertragungsfunktionen existieren. Des Weiteren ist auch die Messrichtung – Fahrtrichtung des GMTZ zu berücksichtigen. Somit ergeben sich für die Messung der Längshöhen- und der Richtungsabweichungen insgesamt vier unterschiedliche Impulsantworten bzw. Übertragungsfunktionen.

Die Impulsantworten $h(x)$ und die Übertragungsfunktionen $H(j\omega)$ des GMTZ sind durch folgende Gleichungen vollständig beschrieben:

$$h(x) = \delta(x) - \frac{a}{a+b} \delta(x-b) - \frac{b}{a+b} \delta(x+a) \quad (2.3)$$

$$H(j\omega) = 1 - \frac{a}{a+b} \cdot e^{-j\omega b} - \frac{b}{a+b} \cdot e^{+j\omega a} \quad (2.4)$$

Die Parameter a und b bezeichnen die Sehnenteilungen.

GMTZ Impulsantwort im ortsdiskreten Fall

Für die Berechnung der inversen Übertragungsfunktion wird von der z-Transformation Gebrauch gemacht, so dass bereits an dieser Stelle die kontinuierlichen Übertragungsfunktionen als ortsdiskrete Funktionen dargestellt werden.

Für den Übergang von der kontinuierlichen zur diskreten Funktion müssen folgende Parameter ersetzt werden:

$$\begin{aligned} x &\rightarrow n \cdot \Delta x \\ n &: \text{Abtastwert} \\ \Delta x &: \text{Abtastrate} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Zu beachten ist hierbei, dass auch die Sehnenteilungen diskretisiert werden müssen:

$$\frac{a}{\Delta x} = d_1; \frac{b}{\Delta x} = d_2$$

$$d_1; d_2 \in \mathbb{Z} \quad (2.6)$$

Die diskreten Sehnenteilungen a_d und b_d können direkt berechnet werden:

$$a_d = \frac{a}{\Delta x} \quad (2.7)$$

$$b_d = \frac{b}{\Delta x}$$

$$a_d; b_d \in \mathbb{Z} \quad (2.8)$$

- 5 Die ortsdiskrete Impulsantwort des Messsystems lautet:

$$h_d[n] = \delta[n] - \frac{a}{a+b} \delta[n-b] - \frac{b}{a+b} \delta[n+a] \quad (2.9)$$

(die Diskretisierung wird zusätzlich durch eckige Klammern kenntlich gemacht). In Gleichung (2.9) bezeichnen die Parameter a und b die diskreten Sehnenteilungen.

- 10 Das Messsignal $m[n]$ ergibt sich aus der ortsdiskreten Faltung der Gleislage $g[n]$ mit der Impulsantwort $h_d[n]$, siehe Fig. 2:

$$m[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g[k] \cdot h_d[n-k] \quad (2.10)$$

- Die diskrete Impulsantwort $h_d[n]$ kann durch die diskrete Fouriertransformation (DFT) auch im Frequenzbereich dargestellt werden. In Fig. 3 ist die Impulsantwort und in Fig. 4 die Übertragungsfunktion dargestellt.

Die Sehnenteilungen betragen in diesem Beispiel 2,6 m und 6 m, die Abtastrate wurde auf 0,2 m festgelegt:

$$\Delta x = 0,2m$$

$$a = \frac{2,6m}{\Delta x} = 13 \quad (2.11)$$

$$b = \frac{6m}{\Delta x} = 30$$

Kompensation des Übertragungsverhaltens

- 20 Die zu lösende Aufgabe besteht darin, ein Kompensationsfilter $h_c[n]$ – zusätzliches LTI-System– zu entwerfen, welches das Übertragungsverhalten des GMTZ kompensiert.

In Fig. 5 ist das Gesamtsystem inklusive Kompensationsfilter dargestellt mit den Bezeichnungen:

$$g^*[n] \approx g[n] \quad (2.12)$$

$$m[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g[k] \cdot h_d[n-k] \quad (2.13)$$

$$5 \quad g^*[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} m[k] \cdot h_c[n-k] \quad (2.14)$$

Berechnung des Kompensationsfilters $h_c[n]$

Für die Berechnung des Kompensationsfilters $h_c[n]$ wird die Impulsantwort $h_d[n]$ mittels der komplexen z-Transformation transformiert. Der Vorteil dieser Herangehensweise liegt darin, dass wesentliche Eigenschaften von LTI-Systemen in der komplexen z-Ebene in einfacher Weise darstellbar sind.

$$h_d[n] \xrightarrow{z} H_d(z) \quad (2.15)$$

Unter Berücksichtigung der Eigenschaften der z-Transformation und der Verwendung bekannter z-Transformationspaare kann $H_d(z)$ direkt aus $h_d[n]$ bestimmt werden:

$$h_d[n] = \delta[n] - \frac{a}{a+b} \delta[n-b] - \frac{b}{a+b} \delta[n+a] \quad (2.16)$$

$$H_d(z) = 1 - \frac{a}{a+b} z^{-b} - \frac{b}{a+b} z^a \quad (2.17)$$

Durch algebraische Umformung kann Gleichung (2.17) auch in der Form

$$H_d(z) = \frac{(a+b) - a \cdot z^{-b} - b \cdot z^a}{a+b} = \frac{Z(z)}{N(z)} \quad (2.18)$$

20 dargestellt werden.

Allgemein gilt:

- Die Nullstellen von $H_d(z)$ sind die Nullstellen von $Z(z)$
- Die Polstellen von $H_d(z)$ sind die Nullstellen von $N(z)$
- 25 - Damit das LTI-System $H_d(z)$ kausal und stabil ist müssen alle Pole von $H_d(z)$ im Inneren des Einheitskreises in der komplexen z-Ebene liegen
- Soll das System auch invertierbar sein, so müssen auch die Nullstellen von $H_d(z)$ im Inneren des Einheitskreises in der komplexen z-Ebene liegen

- Liegen alle Pol- und Nullstellen von $H_d(z)$ im Inneren des Einheitskreises in der komplexen z -Ebene nennt man $H_d(z)$ minimalphasig.

Die zu $H_d(z)$ inverse Systemfunktionen $H_c(z)$ minimalphasiger Systeme kann wie folgt angegeben werden:

$$H_c(z) = H_d^{-1}(z) = \frac{1}{H_d(z)} = \frac{N(z)}{Z(z)} \quad (2.19)$$

In Fig. 6 sind die Pole und Nullstellen von $H_d(z)$ entsprechend der Gleichung (2.18) in der komplexen z -Ebene eingezeichnet. Da Nullstellen von $H_d(z)$ außerhalb des Einheitskreises liegen ist dieses System nicht minimalphasig.

- 10 Da $H_d(z)$ nicht minimalphasig ist kann $H_c(z)$ auch nicht entsprechend der Gleichung (2.19) berechnet werden.

Zur Berechnung von $H_c(z)$ muss $H_d(z)$ in zwei Systemfunktionen aufgeteilt werden.

$$H_d(z) = H_{d\min}(z) \cdot H_{ap}(z) \quad (2.20)$$

- 15 Eigenschaften von $H_{d\min}(z)$ und $H_{ap}(z)$:

- $H_{d\min}(z)$

- Alle Pole und Nullstellen von $H_{d\min}(z)$ liegen im Inneren des Einheitskreises
- $H_{d\min}(z)$ und $H_d(z)$ haben die gleiche Amplitudenverzerrung, den gleichen Amplitudengang jedoch unterschiedlichen Phasengang
- $H_{d\min}(z)$ ist minimalphasig

20

- $H_{ap}(z)$

- $H_{ap}(z)$ ist ein Allpasssystem
- Amplitudengang konstant eins, jedoch Phasengang, Phasenverzerrung

25

Berechnung von $H_{dmin}(z)$ und $H_{ap}(z)$:

$$H_d(z) = \frac{(a+b) - a \cdot z^{-b} - b \cdot z^a}{a+b} = \frac{-a - b \cdot z^{(a+b)} + (a+b) \cdot z^b}{(a+b) \cdot z^b} = \frac{Z(z)}{N(z)} \quad (2.21)$$

- Berechnen der Nullstellen von $H_d(z)$:

$$Z(z) = 0 \Rightarrow -a - b \cdot z^{(a+b)} + (a+b) \cdot z^b = 0 \quad (2.22)$$

- 5 - Berechnen der Polstellen von $H_d(z)$:

$$N(z) = 0 \Rightarrow (a+b) \cdot z^b = 0 \quad (2.23)$$

- $Z(z)$ von $H_d(z)$ umformen:

$$Z(z) = -b \cdot (z^{(a+b)} - \frac{a+b}{b} \cdot z^b + \frac{a}{b}) = -b[(z - N_1)(z - N_2)(z - N_3) \dots (z - N_{(a+b)})] \quad (2.24)$$

- 10 - Alle Nullstellen N_x von $Z(z)$ die außerhalb des Einheitskreises liegen werden am Einheitskreis gespiegelt. Spiegelung der entsprechenden Nullstellen an ihre konjugiert reziproke Position innerhalb des Einheitskreises.

$$|N_x| > 1 \Rightarrow z \rightarrow \frac{1}{z^*} \quad (2.25)$$

- 15 - Aus den Nullstellen innerhalb des Einheitskreises und den gespiegelten Nullstellen ergibt sich das Zählerpolynom $Z'(z)$ für $H_{dmin}(z)$.
Alle Pole und Nullstellen von $H_{dmin}(z)$ liegen im Inneren des Einheitskreises. $H_{dmin}(z)$ ist minimalphasig.

$$H_{dmin}(z) = \frac{Z'(z)}{N(z)} \quad (2.26)$$

- 20 - $H_{ap}(z)$ besteht aus allen Nullstellen von $H_d(z)$ die außerhalb des Einheitskreises liegen zusammen mit den Polen die die gespiegelten konjugiert reziproken Nullstellen von $H_{dmin}(z)$ wieder aufheben.

In Fig. 7 und Fig. 8 sind die Pole und Nullstellen von $H_{dmin}(z)$ und $H_{ap}(z)$ eingezeichnet.

Fig. 9 und Fig. 10 stellen die Übertragungsfunktionen von $H_{dmin}(j\omega)$ und $H_{ap}(j\omega)$ dar.

Berechnung von $H_c(z)$:

Da $H_{d\min}(z)$ minimalphasig ist kann $H_c(z)$ entsprechend der Gleichung (2.19) berechnet werden

$$H_c(z) = H_{d\min}^{-1}(z) = \frac{1}{H_{d\min}(z)} = \frac{N(z)}{Z'(z)} \quad (2.27)$$

- 5 In Fig. 11 und Fig. 12 sind die Pole und die Nullstellen sowie die Übertragungsfunktionen von $H_c(j\omega)$ dargestellt.

Übertragungsverhalten $H_{ges}(z)$ des gesamten Systems:

Das Übertragungsverhalten des gesamten Systems $H_{ges}(z)$ lautet:

$$H_{ges}(z) = H_d(z) \cdot H_c(z) = H_d(z) \cdot \frac{1}{H_{d\min}(z)} = H_d(z) \cdot \frac{H_{ap}(z)}{H_d(z)} = H_{ap}(z) \quad (2.28)$$

- 10 Der Amplitudengang von $H_d(z)$ wird exakt kompensiert. Der Phasengang des gesamten Systems ist gleich dem Phasengang von $H_{ap}(z)$.

Bestimmung der Filterkoeffizienten a, b aus $H_c(z)$

- Zur Realisierung der Übertragungsfunktion mittels digitaler Filter bietet sich die Realisierung mit einer kanonischen Grundstruktur an. Der Vorteil besteht darin,
15 dass die Filterkoeffizienten a und b direkt aus der Systemfunktion abgelesen werden können. Gegebenenfalls ist ein linearer Faktor zu berücksichtigen.

Allgemeine Form, siehe Fig. 13:

$$H(z) = \frac{b_1 + b_2 \cdot z^{-1} + b_3 \cdot z^{-2} + b_4 \cdot z^{-3} + \dots + b_{n+1} \cdot z^{-n}}{a_1 + a_2 \cdot z^{-1} + a_3 \cdot z^{-2} + a_4 \cdot z^{-3} + \dots + a_{m+1} \cdot z^{-m}} \quad (2.29)$$

- 20 Das Übertragungsverhalten des Kompensationsfilter $H_c(z)$ kann entsprechend der Gleichung (2.29) dargestellt werden. Somit können auch für $H_c(z)$ die Filterkoeffizienten a und b direkt abgelesen werden.

- 25 Im zweiten Ausführungsbeispiel wird der mechanische Aufbau eines Messsystems nach dem Wandersehnenverfahren betrachtet. Dieses Messsystem weist eine freie Sehnenlänge und eine freie Sehmenteilung auf. Durch eine geeignete Wahl der Sehnenlänge und der Sehmenteilung wird die Impulsantwort $h(x)$ bzw. Übertragungsfunktion $H(j\omega)$ bzw. Systemfunktion $H(z)$ des Messsystems so

optimiert, dass sich ein minimales Kompensationsfilter $H_c(z)$ ergibt. Bei diesem Kompensationsfilter weisen alle Nullstellen von $H(z)$ einen großen Abstand vom Einheitskreis auf oder befinden sich bereits ohne Spiegelung innerhalb des Einheitskreises nahe am Mittelpunkt des Einheitskreises.

- 5 Hierdurch wird erreicht, dass sich das Kompensationsverfahren wesentlich vereinfacht bzw. eine optimale Rekonstruktion erhalten wird.

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

	$m(x)$	Messsignal
	$h(x)$	Impulsantwort des Messsystems
	$g(x)$	originales Signal
5	$g^*(x)$	rekonstruiertes Signal
	$m[n]$	Messsignal im diskreten System
	$h[n]$	Impulsantwort des Messsystems im diskreten System
	$g[n]$	originales Signal im diskreten System
	$g^*[n]$	rekonstruiertes Signal im diskreten System
10	$M(j\omega)$	Fouriertransformierte von $m(x)$
	$H(j\omega)$	Fouriertransformierte von $h(x)$, Übertragungsfunktion
	$G(j\omega)$	Fouriertransformierte von $g(x)$
	$M(z)$	z-Transformierte von $m(x)$
	$H(z)$	z-Transformierte von $h(x)$, Systemfunktion
15	$G(z)$	z-Transformierte von $g(x)$
	x	Ort
	j	imaginäre Einheit
	ω	Kreisfrequenz
	$\delta(x)$	Dirac-Funktion
20	a, b	Parameter der Sehnenteilung bzw. Filterkoeffizienten
	n	Abtastwert
	Δx	Abtastrate
	z	Ort der komplexen z-Ebene, komplexe Zahl
	z^*	konjugiert komplexe von z
25	d	Index des ortsdiskreten Systems
	$Z(z)$	Zählerpolynom
	$N(z)$	Nennerpolynom
	$H_c(z)$	Systemfunktion des Kompensationsfilters

$H_{\min}(z)$ minimalphasige Systemfunktion zu $H_d(z)$

$H_{\text{ap}}(z)$ Allpass-Systemfunktion

N_x Nullstelle

$H_{\text{ges}}(z)$ Systemfunktion des gesamten Systems

Patentansprüche

1. Verfahren zur Rekonstruktion von Originalsignalen aus Relativmessungen, bei dem ein Messsignal $m(x)$ mit seiner Fouriertransformierten $M(j\omega)$ durch ein Messsystem mit einer bekannten und eindeutigen Impulsantwort $h(x)$ bzw. Übertragungsfunktion $H(j\omega)$ bzw. Systemfunktion $H(z)$ aus einem originalen Signal $g(x)$ mit seiner Fouriertransformierten $G(j\omega)$ ermittelt wird mit dem Zusammenhang $M(j\omega) = G(j\omega) \cdot H(j\omega)$, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 - die Impulsantwort mit der komplexen z -Transformation transformiert wird $h(x) \rightarrow H(z)$,
 - 10 - $H(z)$ in zwei Systemfunktionen aufgeteilt wird $H(z) = H_{\min}(z) \cdot H_{\text{ap}}(z)$, wobei $H_{\min}(z)$ ein minimalphasiges System und $H_{\text{ap}}(z)$ ein Allpasssystem beschreibt,
 - ein Kompensationsfilter $H_c(z) = 1 / H_{\min}(z)$ verwendet wird, durch das die Amplitudenverzerrung bzw. der Amplitudengang des Messsystems exakt kompensiert wird,
 - 15 wobei $H_{\min}(z)$ berechnet wird indem
 - Nullstellen von $H(z)$, die außerhalb des Einheitskreises liegen am Einheitskreis gespiegelt werden und somit in das Innere des Einheitskreises gelangen, indem die entsprechende Nullstelle mit $z \rightarrow 1/z^*$ an ihre konjugiert reziproke Position innerhalb des Einheitskreises gespiegelt wird,
 - 20 wobei z^* konjugiert komplex zu z ist,
 - trotz dieser Spiegelung der Amplitudengang von $H(z)$ gleich dem Amplitudengang von $H_{\min}(z)$ gelassen wird,
 - die neue Systemfunktion $H_{\min}(z)$ dadurch minimalphasig wird und somit $H_c(z)$ berechnet wird.
 - 25
2. Verfahren zur Rekonstruktion von Originalsignalen aus Relativmessungen nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verfahren zur Rekonstruktion von Signalen nach einem Wandersehenmessverfahren verwendet wird.
- 30
3. Verfahren zur Rekonstruktion von Originalsignalen aus Relativmessungen nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine symmetrische Sehenteilung verwendet wird.

4. Verfahren zur Rekonstruktion von Originalsignalen aus Relativmessungen nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verfahren zur Rekonstruktion von Gleislagesignalen verwendet wird.

Fig. 1

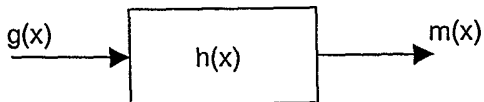


Fig. 2

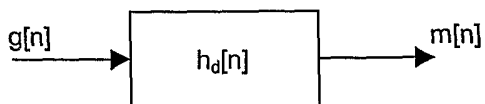


Fig. 3

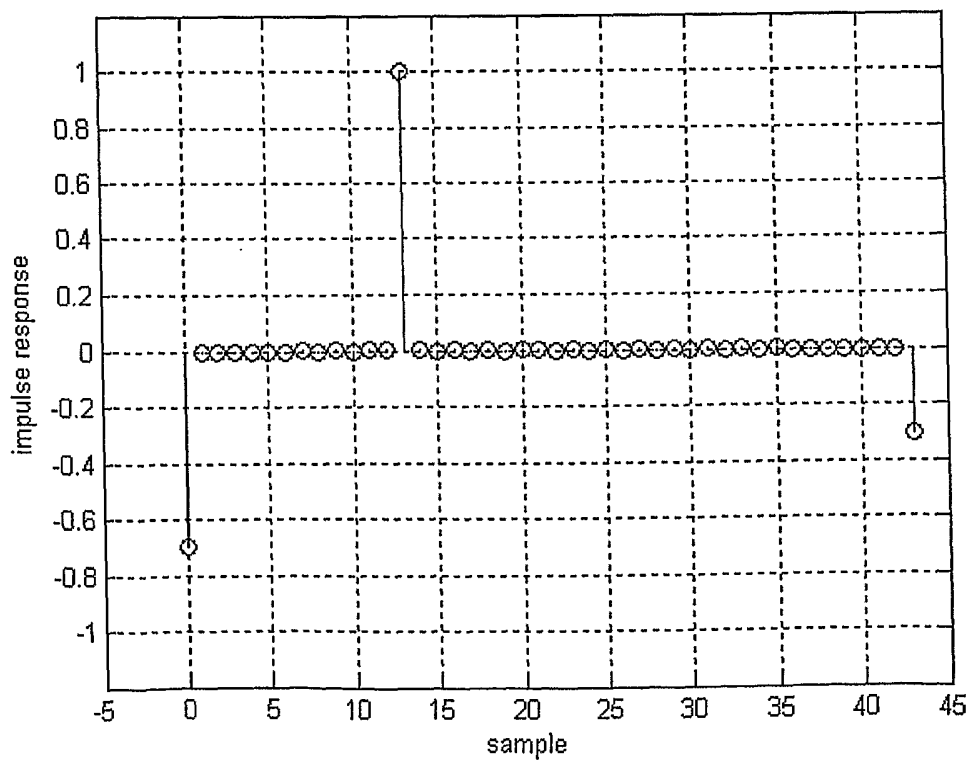


Fig. 4

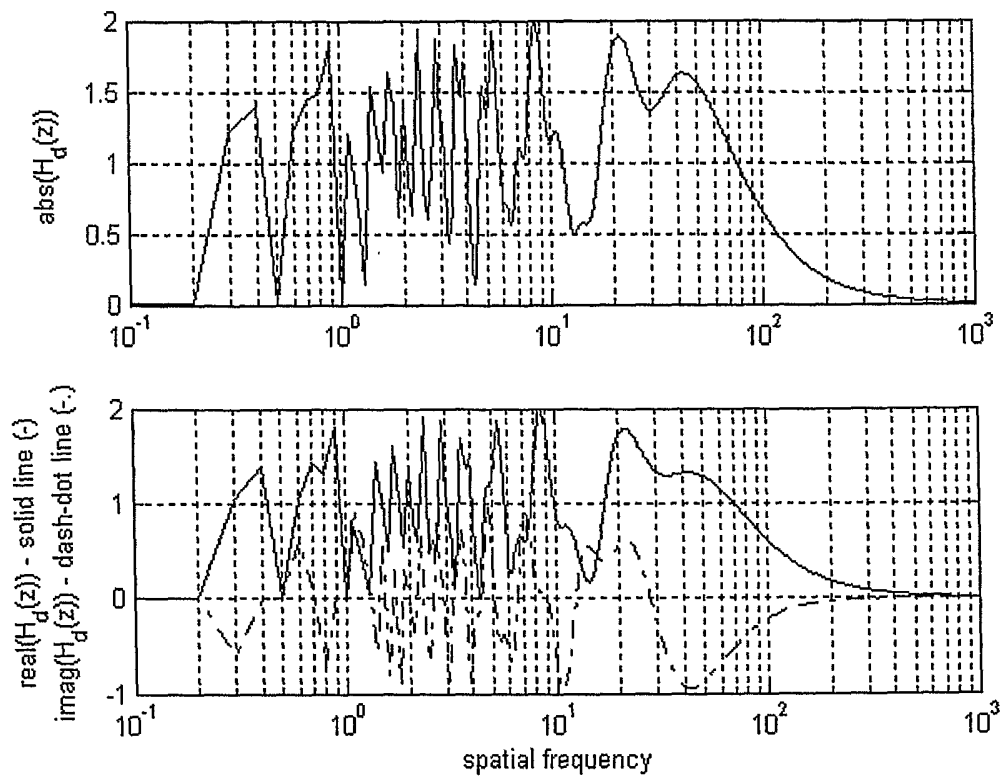


Fig. 5

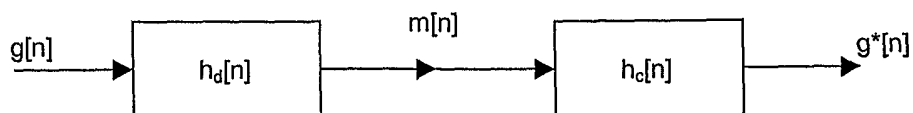


Fig. 6

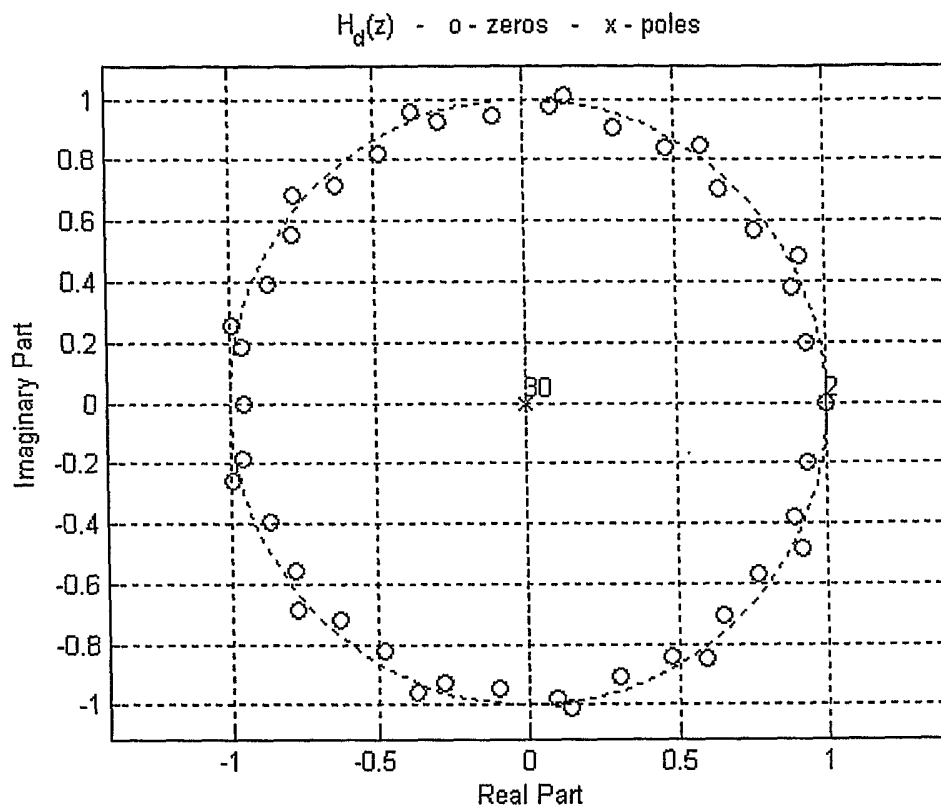


Fig. 7

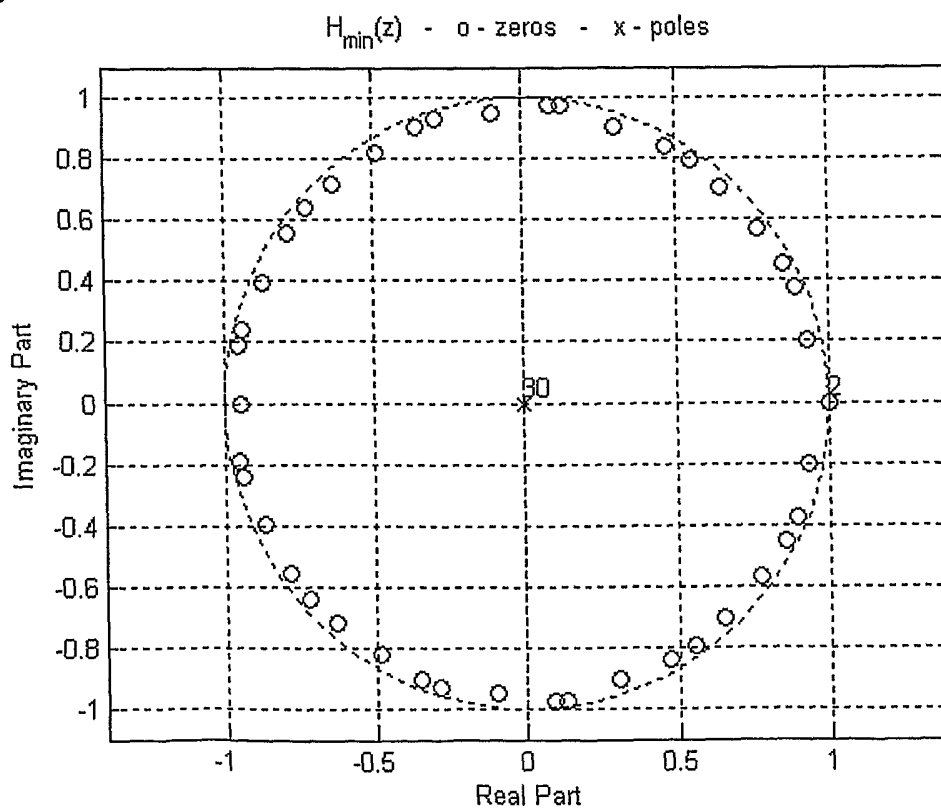


Fig. 8

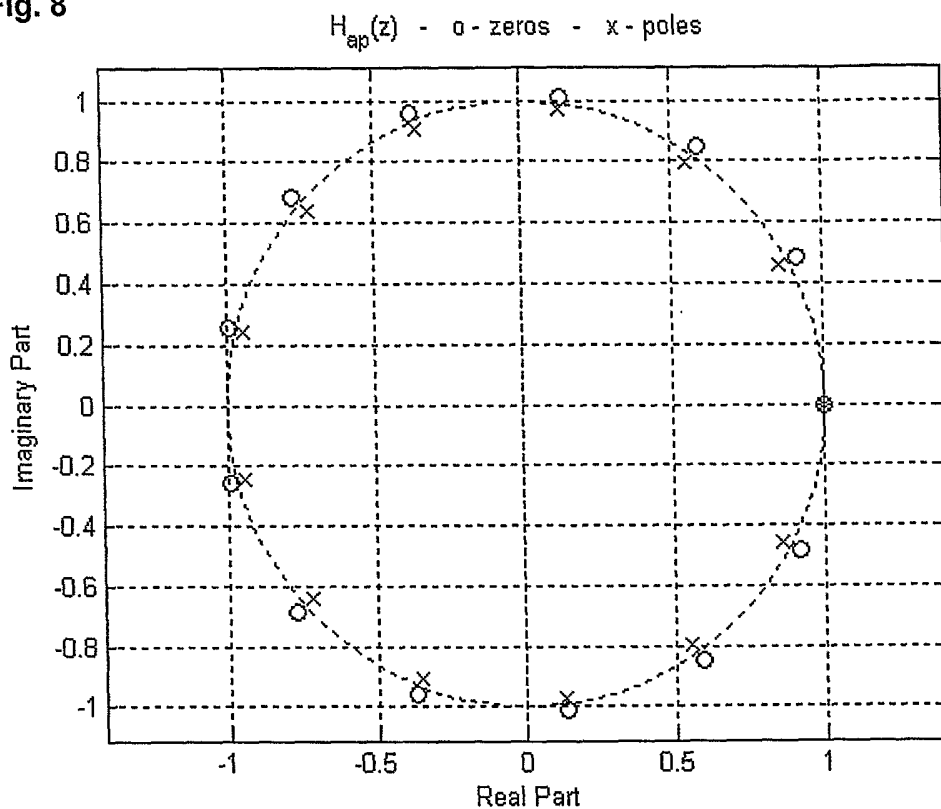


Fig. 9

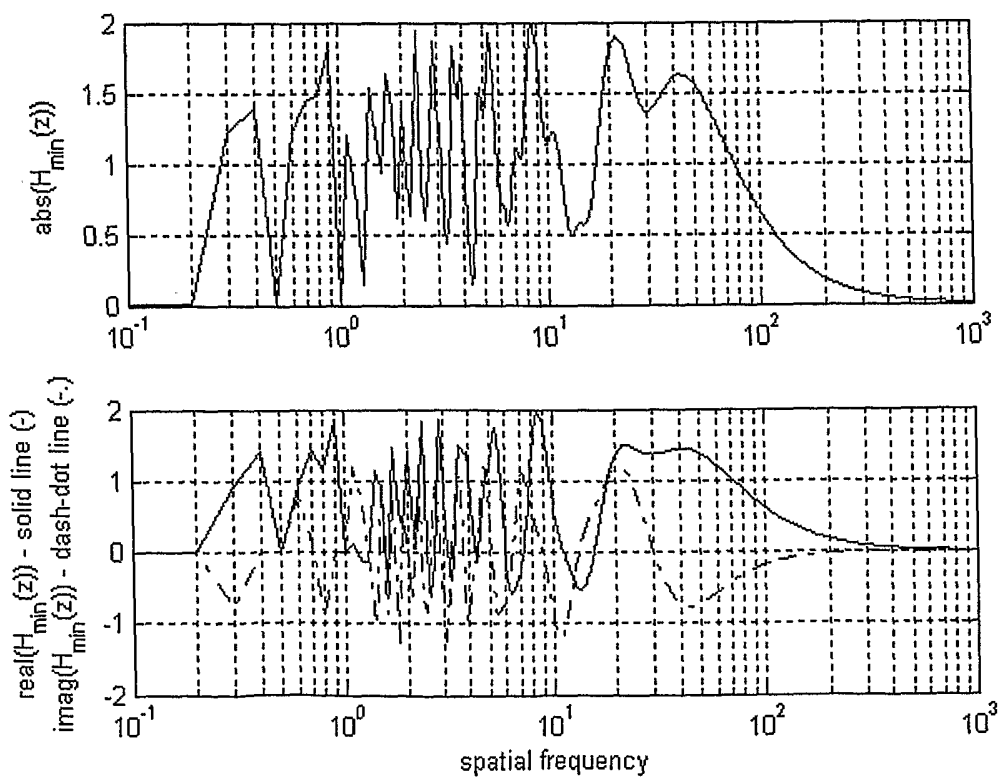


Fig. 10

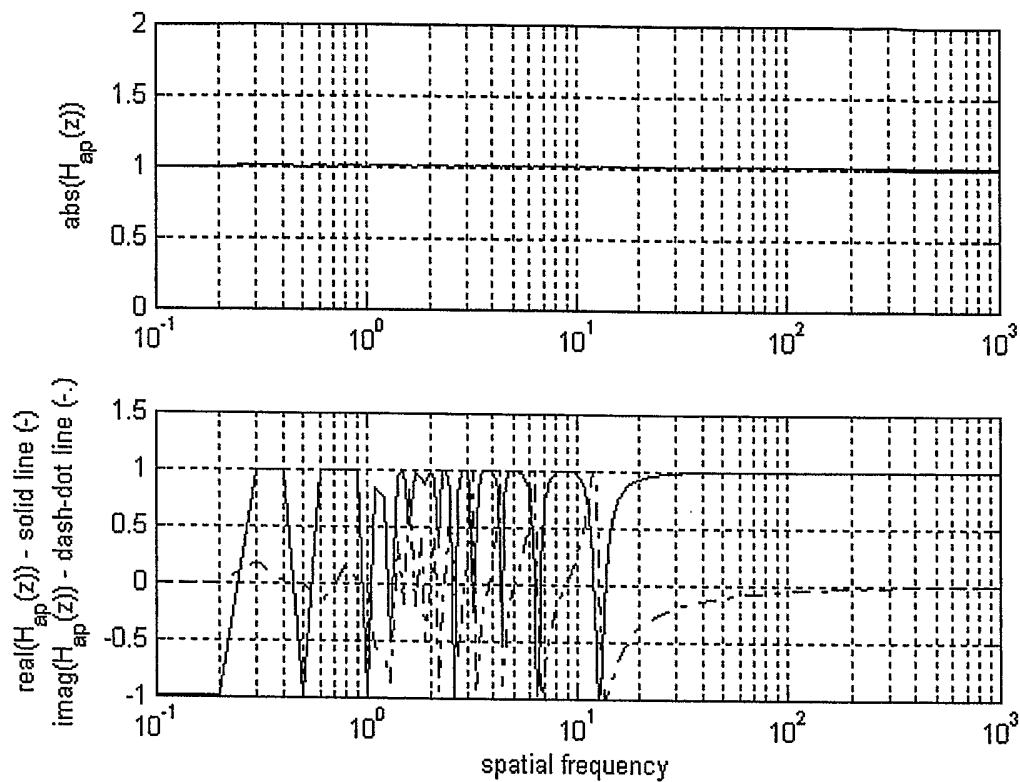


Fig. 11

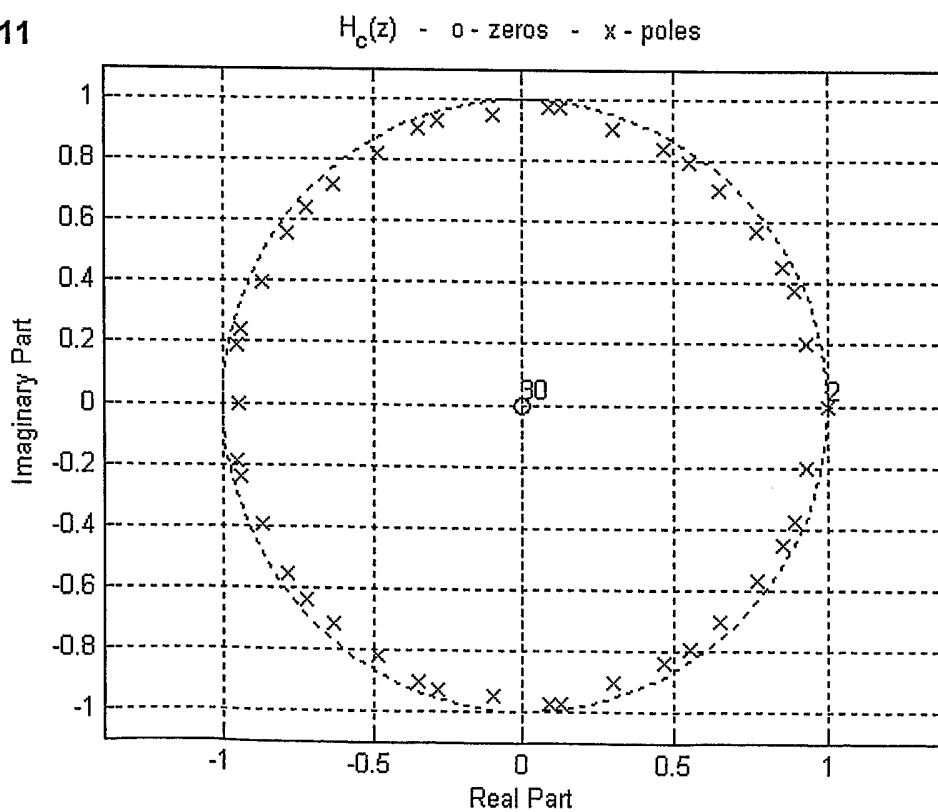


Fig. 12

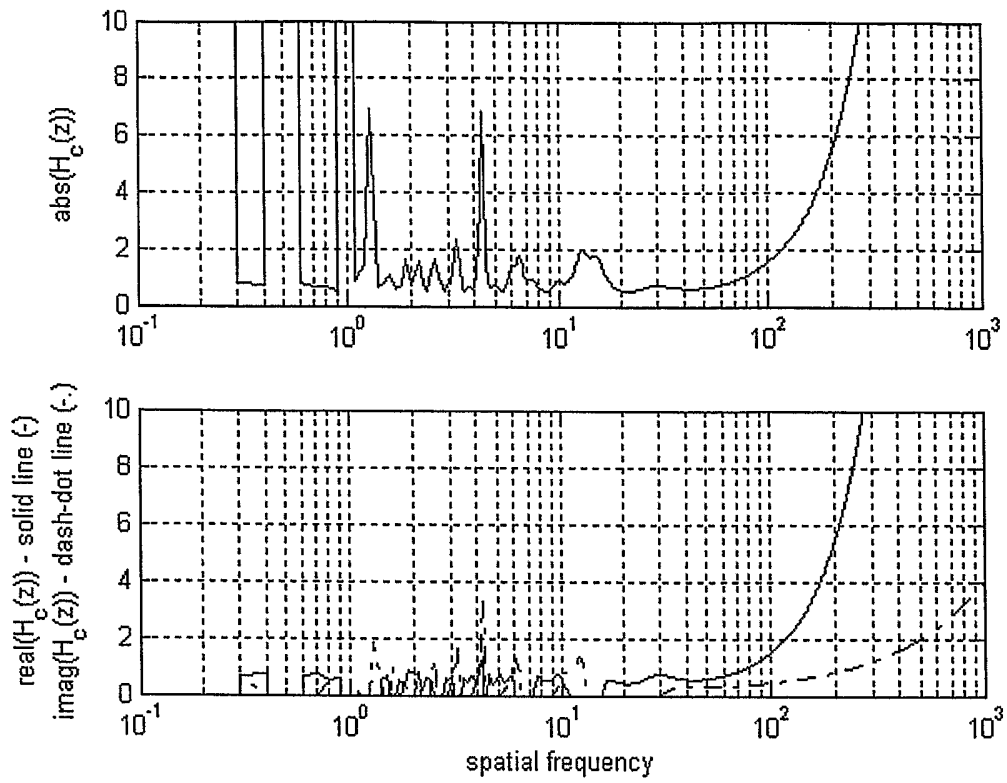
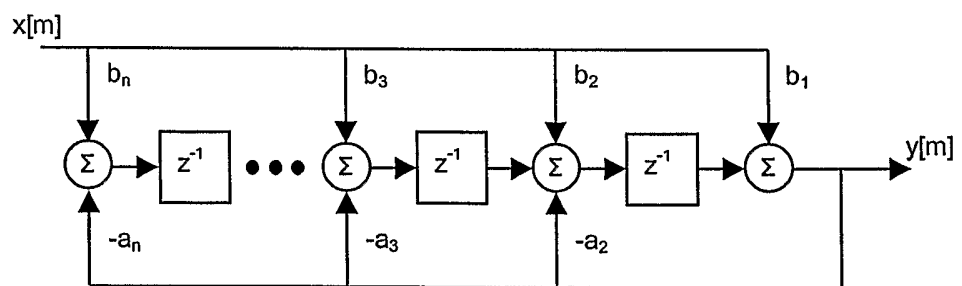


Fig. 13



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP 03/09161

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 IPC 7 G06F17/00 G01D3/02 G01R23/167 B61K9/08 H03H21/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED
 Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
 IPC 7 G06F G01D G01R B61K E01B H03H

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)
 EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	OPPENHEIM A V; SCHAFFER R W: "Zeitdiskrete Signalverarbeitung" 1999, R. OLDENBOURG VERLAG, MÜNCHEN XP002262235	1
Y	* Abschnitt 5.6.1 bis Beispiel 5.12 * * Abschnitt 5.6.1, Bild 5.22 *	2-4
Y	DE 44 29 517 A (MAN TECHNOLOGIE GMBH) 22 February 1996 (1996-02-22) cited in the application * Seite 2, Zeile 1 - Zeile 21 * * Seite 4, Zeile 54 - Zeile 58 * * Seite 5, Zeile 28 - Zeile 29 * -/--	2-4

Further documents are listed in the continuation of box C. Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 21 November 2003	Date of mailing of the international search report 10/12/2003
---	--

Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Domingo Vecchioni, M
--	--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 03/09161

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>ESVELD C: "DAS MESSEN UND KORRIGIEREN DER GLEISGEOMETRIE" ETR EISENBAHNTECHNISCHE RUNDSCHAU, HESTRA-VERLAG. DARMSTADT, DE, vol. 29, no. 5, 1980, pages 351-354, 356, 35, XP002061334 * Abschnitt 3.2 * -----</p>	2-4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP 03/09161

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date	
DE 4429517	A	22-02-1996	DE 4429517 A1	22-02-1996
			AT 187827 T	15-01-2000
			DE 59507421 D1	20-01-2000
			EP 0697672 A2	21-02-1996

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationale Patentzeichen

PCT/EP 03/09161

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

IPK 7 G06F17/00 G01D3/02 G01R23/167 B61K9/08 H03H21/00

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 7 G06F G01D G01R B61K E01B H03H

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	OPPENHEIM A V; SCHAFFER R W: "Zeitdiskrete Signalverarbeitung" 1999, R. OLDENBOURG VERLAG, MÜNCHEN XP002262235	1
Y	* Abschnitt 5.6.1 bis Beispiel 5.12 * * Abschnitt 5.6.1, Bild 5.22 *	2-4
Y	DE 44 29 517 A (MAN TECHNOLOGIE GMBH) 22. Februar 1996 (1996-02-22) in der Anmeldung erwähnt * Seite 2, Zeile 1 - Zeile 21 * * Seite 4, Zeile 54 - Zeile 58 * * Seite 5, Zeile 28 - Zeile 29 * ----- -/--	2-4



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

21. November 2003

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

10/12/2003

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Domingo Vecchioni, M

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Patentzeichen

PCT/EP 03/09161

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie°	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	ESVELD C: "DAS MESSEN UND KORRIGIEREN DER GLEISGEOMETRIE" ETR EISENBAHNTECHNISCHE RUNDSCHAU, HESTRA-VERLAG. DARMSTADT, DE, Bd. 29, Nr. 5, 1980, Seiten 351-354, 356, 35, XP002061334 * Abschnitt 3.2 * -----	2-4

INTERNATIONALER RESEARCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

International Patentzeichen

PCT/EP 03/09161

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 4429517 A	22-02-1996	DE 4429517 A1	22-02-1996
		AT 187827 T	15-01-2000
		DE 59507421 D1	20-01-2000
		EP 0697672 A2	21-02-1996
