



(12) Ausschließungspatent

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1 Patentgesetz

(19) DD (11) 239 482 A5

4(51) G 06 K 9/36
H 04 N 5/262
G 01 R 23/16

AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21)	AP G 06 K / 264 511 6	(22)	25.06.84	(44)	24.09.86
(31)	8317406	(32)	27.06.83	(33)	GB
	8317407		27.06.83		GB
	596817		04.04.84		US

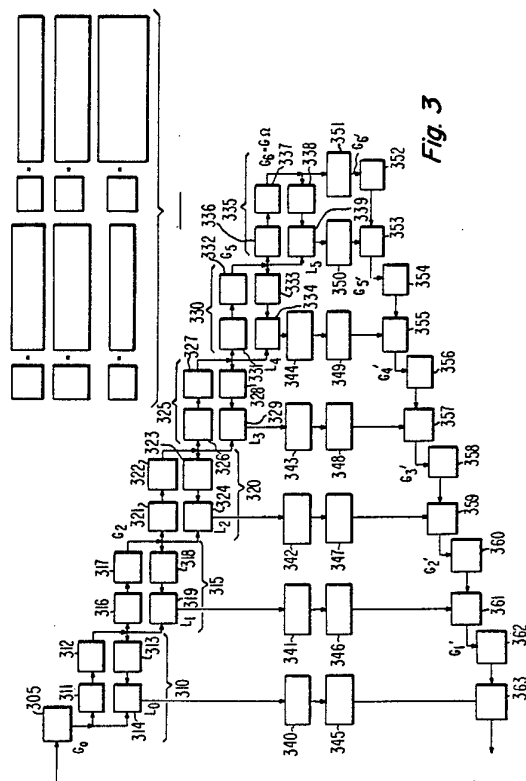
(71) siehe (73)

(72) Carlson, Curtis R.; Arbeiter, James H.; Bessler, Roger F.; Adelson, Edward H.; Anderson, Charles H.; Limberg, Allen L., US

(73) RCA CORP, New York, N. Y. 10020, 30 Rockefeller Plaza, US

(54) Signalverarbeitungseinrichtung

(57) Unter dem Ziel einer Realzeiteralisierung des Burt-Pyramiden-Algorithmus ist es Aufgabe der Erfindung eine Realzeit-Spektralanalyse elektrischer Signale und Bildtransformationstechniken sowie Einrichtung zur Realzeit-Signalverarbeitung nach einer hierarchischen Pyramide zu schaffen. Es wird eine Pipeline-Struktur (Fig. 3) für einen oder beide folgender Vorgänge verwendet: (a) Zur mit verzögerter Realzeit erfolgender Analysierung des Frequenzspektrums einer Informationskomponente (mit einer oder mehreren Dimensionen) eines gegebenen zeitlichen Signals (G_0), dessen höchste interessierende Frequenz nicht größer als f_0 ist und (b) zur in verzögerter Realzeit erfolgender Synthetisierung eines solchen zeitlichen Signals (G_0) aus seinem Frequenzanalysespektrum ($L_0 \dots G\Omega$). Eine solche Pipeline-Struktur eignet sich besonders für die Bildverarbeitung der zweidimensionalen Raumfrequenzen von Fernsehbildern, die durch ein zeitliches Videosignal definiert werden. Fig. 3



Patentansprüche:

1. Signalverarbeitungseinrichtung zur Analysierung des Frequenzspektrums einer Informationskomponente (G_0) eines gegebenen zeitlichen Signals in ($N + 1$) getrennte Frequenzbänder, wobei diese Komponente einer Information mit einer gegebenen Anzahl von Dimensionen entspricht und N eine ganze Zahl größer als Eins ist und die höchste interessierende Frequenz in dem Frequenzspektrum nicht größer als eine Frequenz f_0 ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Analysierung des Frequenzspektrums in verzögerter Realzeit die Einrichtung eine Pipeline-Struktur (Figuren 1, 1 a, 1 b) mit einem Satz von N reihenfolgemäßig angeordneten Übertragungseinrichtungen ($100-1 \dots 100 N$) für das abgetastete Signal enthält, daß jede der Übertragungseinrichtungen (Fig. 1 a) einen ersten und einen zweiten Eingangsanschluß sowie einen ersten und zweiten Ausgangsanschluß hat, daß dem ersten Eingangsanschluß der ersten Übertragungseinrichtung des Satzes das gegebene zeitliche Signal (G_0) zugeführt wird, daß der erste Eingangsanschluß je einer der zweiten bis N -ten Übertragungseinrichtung des Satzes mit dem ersten Ausgangsanschluß der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes gekoppelt ist zur Weiterleitung eines Signals (G_1, G_2 etc.) von je einer der Übertragungseinrichtungen zur unmittelbar nachfolgenden Übertragungseinrichtung des Satzes, daß dem zweiten Eingangsanschluß jeder der Übertragungseinrichtungen des Satzes ein separater Abtastfrequenztakt (CL 1, CL 2, etc.) zugeführt wird, um am ersten und zweiten Ausgang dieser Übertragungseinrichtung Signale abzuleiten, die mit einer Rate abgetastet sind, die gleich der Abtastfrequenz des ihr zugeführten Taktes ist, daß jede der Übertragungseinrichtungen des Satzes für die Informationskomponente eine Tiefpaß-Übertragungsfunktion zwischen ihrem ersten Eingangsanschluß und ihrem ersten Ausgangsanschluß aufweist und daß die Tiefpaßfunktion dieser Übertragungseinrichtung des Satzes mit einer nominellen Grenzfrequenz gewählt ist, die eine direkte Funktion der Abtastfrequenz des dem zweiten Eingangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung des Satzes zugeführten Taktes ist, daß der dem zweiten Eingangsanschluß der ersten Übertragungseinrichtung des Satzes zugeführte Takt eine Abtastfrequenz hat, die (a) zweimal so groß wie f_0 ist und (b) für die Übertragungskomponente eine nominelle Grenzfrequenz der Tiefpaß-Übertragungsfunktion der ersten Übertragungseinrichtung des Satzes ergibt, die kleiner als f_0 ist, daß der dem zweiten Eingangsanschluß jeder der zweiten bis N -ten Übertragungseinrichtung des Satzes zugeführte Takt eine Abtastfrequenz hat, die (a) kleiner als die dem zweiten Eingangsanschluß der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes ist, (b) mindestens gleich zweimal der Maximalfrequenz der Informationskomponente des dem ersten Eingangsanschluß zugeführten Signals ist und (c) eine nominelle Grenzfrequenz für ihre Tiefpaßübertragungsfunktion ergibt, die kleiner als diejenige der ihr unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes ist, und daß die Informationskomponente des am zweiten Ausgangsanschluß jeder der Übertragungseinrichtungen des Satzes abgeleiteten Signals der Differenz zwischen der Informationskomponente des ihrem ersten Eingangsanschluß zugeführten Signals und einer direkten Funktion der an ihrem ersten Ausgangsanschluß abgeleiteten Informationskomponente des Signals ist, derart, daß die N jeweiligen Signale an den zweiten Ausgangsanschlüssen der N -Übertragungseinrichtungen zusammen mit dem Signal am ersten Ausgangsanschluß der N -ten Übertragungseinrichtung ($N + 1$) getrennte Frequenzbänder einnehmen.
2. Einrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß der dem zweiten Eingangsanschluß jeder der zweiten bis N -ten Übertragungseinrichtung des Satzes zugeführte Takt eine Abtastfrequenz relativ zur Abtastfrequenz des dem zweiten Eingangsanschluß der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes zugeführten Taktes hat, daß jede Dimension der ihrem ersten Eingang zugeführten Informationskomponente des Signals mit der halben Rate abgetastet wird wie diejenige, mit welcher die entsprechende Dimension der Informationskomponente des dem ersten Anschluß der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes abgetastet wird.
3. Einrichtung nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß der dem zweiten Eingangsanschluß jeder der zweiten bis N -ten Übertragungseinrichtung des Satzes zugeführte Takt eine Abtastfrequenz relativ zur Abtastfrequenz des dem zweiten Eingangsanschluß der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes zugeführten Taktes hat, daß sich eine nominelle Grenzfrequenz ihrer Tiefpaßfunktion für jede Dimension der Informationskomponente des ihrem ersten Eingangsanschluß zugeführten Signals ergibt, die im wesentlichen halb so groß wie die nominelle Grenzfrequenz ist, die sich für die entsprechende Dimension dieser Informationskomponente durch die Tiefpaß-Übertragungsfunktion der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes ergibt, und daß die Informationskomponente des am zweiten Ausgangsanschluß jeder der Übertragungseinrichtung des Satzes abgeleiteten Signals in jeder ihrer Dimensionen einer anderen Oktave des Frequenzspektrums der Informationskomponente des gegebenen zeitlichen Signals in dieser Dimension entspricht.
4. Einrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß das gegebene zeitliche Signal ein Analogsignal ist, welches eine Informationskomponente entsprechend einer eindimensionalen Information aufweist.

5. Einrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß das gegebene zeitliche Signal ein Videosignal ist, welches eine zweidimensionale Bildinformation definiert.
6. Einrichtung nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Videosignal aufeinanderfolgenden Vollbildern abgetasteter Fernsehbilder entspricht.
7. Einrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß jede der Übertragungseinrichtungen (100a-K, 100b-K in den Fig. 1a und 1b) des Satzes aufweist:

eine mit dem ersten und zweiten Eingangsanschluß und einem ersten Ausgangsanschluß der einen Übertragungseinrichtung zur Bildung einer Tiefpaß-Übertragungsfunktion dieser Übertragungseinrichtung gekoppelte erste Anordnung (102, 104), die ein Faltungsfilter (102) mit m-Abgriffen enthält, wobei m eine gegebene ganze Zahl größer als Eins ist, zur Faltung der Informationskomponente des dem ersten Eingangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung zugeführten Signals mit einer vorbestimmten Kernfunktion bei einer Abtastfrequenz, die derjenigen des dem zweiten Eingangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung zugeführten Signals entspricht, wobei die Kernfunktion und die Abtastfrequenz des Faltungsfilters dieser Übertragungseinrichtungen die Form bzw. Grenzfrequenz der Tiefpaßübertragungsfunktion dieser Übertragungseinrichtung in jeder Dimension der Informationskomponente bestimmen,

und eine zur Ableitung des Differenzsignals am zweiten Ausgangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung mit der ersten Anordnung und dem zweiten Eingangsanschluß sowie dem zweiten Ausgangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung gekoppelte zweite Anordnung (109, 110), die eine Abtastwertsubtrahiereinrichtung (110) und eine Verzögerungseinrichtung (106, 108, 109 Fig. 1a; 109 Figuren 1b und 1c) aufweisende dritte Anordnung enthält, um die Abtastwertsubtrahiereinrichtung über die Verzögerungseinrichtung mit der ersten Anordnung zu koppeln, daß die Abtastwertsubtrahiereinrichtung in zeitlicher Ausrichtung mit der Abtastfrequenz der gefalteten Abtastwerte dieser Übertragungseinrichtung jeden der aufeinanderfolgenden jeweiligen Abtastwertpegel der gefalteten Abtastwerte dieser Übertragungseinrichtung von jedem der entsprechenden aufeinanderfolgend auftretenden jeweiligen Pegel der Informationskomponente des am ersten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung zugeführten Signals vor dessen Faltung mit der vorbestimmten Kernfunktion des Faltungsfilters dieser Übertragungseinrichtung, wobei das Ausgangssignal der Abtastwertsubtrahiereinrichtung jeden der aufeinanderfolgend auftretenden jeweiligen Differenzabtastpegel mit der Abtastfrequenz der gefalteten Abtastwerte dieser Übertragungseinrichtung enthält und die jeweiligen Differenzabtastpegel die Informationskomponente des am zweiten Ausgangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung entstehenden Signals bilden.
8. Einrichtung nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß die vorbestimmte Kernfunktion mindestens einer der Übertragungseinrichtungen des Satzes eine Tiefpaßübertragungsfunktionsform für diese Übertragungseinrichtung mit einem allmählichen Abfall definiert, der sich über die nominelle Filtergrenzfrequenz hinaus erstreckt.
9. Einrichtung nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß die jeweiligen Kernfunktionen mindestens zweier der Übertragungseinrichtungen des Satzes einander im wesentlichen gleich sind.
10. Einrichtung nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Informationskomponente mindestens zwei Dimensionen aufweist und daß das Faltungsfilter mindestens einer der Übertragungseinrichtungen ein in zumindest den beiden Dimensionen nicht trennbares Filter ist.
11. Einrichtung nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Informationskomponente mindestens zwei Dimensionen aufweist und daß das Faltungsfilter mindestens einer der Übertragungseinrichtungen ein in den beiden Dimensionen trennbares Filter ist.
12. Einrichtung nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß die erste Anordnung (102, 104) mindestens einer der Übertragungseinrichtungen des Satzes von einem gegebenen Typ ist und dieser Typ das Faltungsfilter (102) und eine Dezimierschaltung (104) aufweist, welche in Reihe zwischen den Ausgang des Faltungsfilters und den ersten Ausgangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung des Satzes geschaltet ist, daß das Faltungsfilter des gegebenen Typs der ersten Anordnung an seinem Ausgang eine spezielle Abtastwertdichte in jeder Dimension der Informationskomponente ergibt, die der Abtastfrequenz des dem zweiten Takteingang dieser Übertragungseinrichtung zugeführten Taktes ist, und daß die Dezimierschaltung des gegebenen Typs der ersten Anordnung in jeder Dimension der Informationskomponente nur gewisse, jedoch nicht alle gefalteten Abtastwerte, die am Ausgang des Faltungsfilters des gegebenen Typs der ersten Anordnung erscheinen, zum ersten Ausgangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung weiterleitet, und daß die dezimierte Abtastwertdichte der gefalteten Abtastwerte in jeder der Dimensionen der Informationskomponente am ersten Ausgangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung reduziert ist hinsichtlich der speziellen Abtastwertdichte der entsprechenden Dimension der Informationskomponente am Ausgang des Faltungsfilters dieser Übertragungseinrichtung.
13. Einrichtung nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Dezimierschaltung des gegebenen Typs der ersten Anordnung in jeder der Dimensionen der Informationskomponente jeden zweiten der am Ausgang des Faltungsfilters des gegebenen Typs der ersten Anordnung auftretenden Abtastwert an den ersten Ausgangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung weiterleitet, wobei die dezimierte Abtastwertdichte in jeder der Dimensionen der Informationskomponente auf die Hälfte der speziellen Abtastwertdichte der entsprechenden Dimension der Informationskomponente reduziert wird.
14. Einrichtung nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, daß innerhalb mindestens einer der Übertragungseinrichtungen (206b-K, Fig. 1b) die dritte Anordnung eine vierte Anordnung enthält, die zwischen den Ausgang des Faltungsfilters und die Abtastwertsubtrahiereinrichtung geschaltet ist, um die gefaltete Informationskomponente vom Faltungsfilter direkt der Abtastwertsubtrahiereinrichtung (110) zuzuführen.
15. Einrichtung nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, daß die dritte Anordnung (106, 108, 109 Fig. 1a) weiterhin eine vierte Anordnung (106, 108) enthält, die zwischen die Dezimierschaltung und die Abtastwertsubtrahiereinrichtung geschaltet ist zur Expandierung der dezimierten Abtastwertdichte der am ersten Ausgangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung auftretenden gefalteten Abtastwerte in jeder Dimension dieser Informationskomponente zurück zu der speziellen Abtastwertdichte der gefalteten Abtastwerte in dieser Dimension, die an der Abtastwertsubtrahiereinrichtung auftreten, daß die vierte Anordnung eine Abtastwertexpandierschaltung (106) zum Einfügen zusätzlicher Abtastwerte, die in ihrem

Auftreten jedem gefalteten Abtastwert am Ausgang des Faltungsfilters, der in der dezimierten Abtastwertdichte fehlt, entsprechen, wobei jeder der eingefügten zusätzlichen Abtastwerte einen Nullwertpegel hat, und weiterhin eine Interpolationseinrichtung (108) enthält, welche einen Interpolationswert-Abtastpegel für den Nullwertpegel jedes der eingefügten zusätzlichen Abtastwerte einsetzt.

16. Einrichtung nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Dezimierschaltung des gegebenen Typs der ersten Anordnung in jeder der Dimensionen der Informationskomponente jeden zweiten am Ausgang des Faltungsfilters des gegebenen Typs der ersten Anordnung auftretenden Abtastwert an den ersten Ausgangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung weiterleitet und daß die Expandierschaltung einen zusätzlichen Abtastwert zwischen jedes Paar aufeinanderfolgender gefalteter Abtastwerte der dezimierten Abtastwertdichte in jeder Dimension der Informationskomponente einfügt und daß die Interpolationsschaltung ein Interpolationsfilter mit n -Abgriffen (wobei n eine ganze Zahl größer als Eins ist) und mit einer Tiefpaß-Übertragungsfunktion aufweist.
17. Einrichtung nach Anspruch 14 oder 15, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Informationskomponente des Signals am ersten Eingangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung ihrer Abtastwertsabtrahiereinrichtung über ihre Verzögerungseinrichtung zugeführt wird und daß die Verzögerungseinrichtung dieser Übertragungseinrichtung eine Zeitverzögerung ergibt, die im wesentlichen gleich der gesamten Verzögerungszeit ist, die durch das Faltungsfiler, die Dezimierschaltung und die vierte Anordnung dieser Übertragungseinrichtung bedingt sind.
18. Einrichtung nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, daß jede der ersten bis $(N-1)$ -ten Übertragungseinrichtungen des Satzes eine erste Anordnung des gegebenen Typs (100 a-K oder 100 b-K) enthält.
19. Einrichtung nach Anspruch 18, **dadurch gekennzeichnet**, daß die N -te Übertragungseinrichtung (Fig. 1 c) des Satzes auch eine erste Anordnung des gegebenen Typs enthält.
20. Einrichtung nach Anspruch 18, **dadurch gekennzeichnet**, daß die N -te Übertragungseinrichtung (Fig. 1 c) des Satzes eine erste Anordnung eines alternativen Typs enthält, bei welcher das Ausgangssignal des Faltungsfilters direkt dem ersten Ausgangsanschluß der N -ten Übertragungseinrichtung zugeführt wird.
21. Einrichtung nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Informationskomponente des Signals (G_{N-1}) am ersten Eingang der N -ten Übertragungsschaltung des Schalters ihrer Abtastwertsabtrahierschaltung über ihre Verzögerungseinrichtung (109) zugeführt wird und daß die Verzögerungseinrichtung der N -ten Übertragungseinrichtung des Satzes eine Zeitverzögerung ergibt, die im wesentlichen gleich der durch ihr Faltungsfiler bedingten Verzögerung ist.
22. Einrichtung (Fig. 1) zur Durchführung einer Realzeit-Spektralanalyse, **gekennzeichnet durch** eine Kaskadenschaltung von Tiefpaßabtastfiltern (102, 104 in Fig. 1 a, 1 b innerhalb von 100-1, 100-2 etc.), die mit zunehmend niedrigeren Abtastraten (CL 1, CL 2, etc.) betrieben werden, wobei ein Eingangssignal (G_0) dieser Kaskade das spektralzuanalyisierende Signal ist und das Ausgangssignal (G_N) der Kaskade ein restliches Tiefpaßspektrum darstellt, eine Anordnung (106, 108 in Fig. 1 a) zum Verschachteln der Abtastwerte einer dezimierten Form des Ausgangssignals jedes der Tiefpaßabtastfilter (102, 104) mit Nullen und zur Tiefpaßfilterung des Ergebnisses zu einem entsprechenden Interpolationsergebnis, eine Einrichtung (109) zur Verzögerung der Abtastwerte des Eingangssignals jedes Tiefpaßfilters in dieser Kaskadenschaltung um einen Betrag, der gleich der Summe der Verzögerungen im Ausgangssignal dieses Filters und bei der Tiefpaßfilterung des mit Nullen verschachtelten Ausgangssignals ist, und durch eine Einrichtung (110) zur Differenzbildung der verzögerten Abtastwerte des Eingangssignals jedes Tiefpaßfilters in der Kaskadenschaltung mit dem aus dessen Ausgangssignal abgeleiteten Interpolationsergebnis zur Bildung jeweils eines Signals (L_{K-1}) der Spektralanalyse des Eingangssignals der Kaskadenschaltung.
23. Einrichtung (Fig. 1) zur Durchführung einer Realzeit-Spektralanalyse eines elektrischen Signals (G_0), welches mit einer Rate R regelmäßig abgetastet wird, **gekennzeichnet durch** eine Mehrzahl von n Analysatorstufen (100-1, 100-2 etc.), die aufeinanderfolgend mit Grundzahlen von 0 bis n numeriert sind und von denen jede (Fig. 4) ein erstes Ausgangssignal ($G_{(K+1)}$) aufgrund der niedrigerfrequenten Komponenten ihres Eingangssignals (G_K) und ein separates zweites Ausgangssignal (L_K) aufgrund der höherfrequenten Komponenten ihres Eingangssignals (G_K) liefert, wobei der mit 0 numerierten Analysatorstufe (100-1) das elektrische Signal für die Spektralanalyse als Eingangssignal zugeführt wird und jeder der anderen Analysatorstufen als Eingangssignal das erste Ausgangssignal der Analysatorstufe mit der nächst niedrigeren Grundzahl zugeführt wird, daß die zweiten Ausgangssignale aller Stufen und das erste Ausgangssignal der mit n numerierten Analysatorstufe das Ergebnis der Spektralanalyse bilden, wobei jede der Mehrzahl der Analysatorstufen (beispielsweise Fig. 4) enthält ein erstes m -stufiges Schieberegister (470) (wobei m eine ganze Zahl größer als Eins ist), deren Eingang das Eingangssignal (G_K) der Analysatorstufe zugeführt wird und das mit einer Taktrate von $R/2^k$ getaktet wird (wobei k die Grundzahl der Analysatorstufe ist), eine Einrichtung (471) zur Gewichtung des Eingangssignals (G_K) der Analysatorstufe und des in jeder Stufe des ersten m -stufigen Registers verzögerten Eingangssignals mit einem Satz von Koeffizienten und zur Summierung der gewichteten Signale zur Erzeugung eines linearphasigen tiefpaßgefilterten Ausgangssignals (G_{K+1}), welches das erste Ausgangssignal der Analysatorstufe darstellt, aufgrund von deren Eingangssignal, eine Multiplexschaltung (472), welche so betrieben wird, daß sie abwechselnd mit der Rate $R/2^{(k-1)}$ das erste Ausgangssignal der Analysatorstufe und einen Nullwert auswählt, ein weiteres m -stufiges Schieberegister (473), dessen Eingang das vom Multiplexer ausgewählte Signal zugeführt wird und das mit der Taktrate $R/2^{(k-1)}$ getaktet wird, eine Einrichtung (474) zur Gewichtung des ausgewählten Signals dieser Analysatorstufe und des Signals, das in jeder Stufe des weiteren m -stufigen Registers verzögert worden ist, mit einem Satz von Gewichtskoeffizienten und zur Summierung der gewichteten Signale zur Bildung eines neu abgetasteten ersten Ausgangssignals dieser Analysatorstufe und eine Einrichtung (475) zur subtraktiven Kombinierung des neu abgetasteten ersten Ausgangssignals dieser Analysatorstufe mit deren verzögertem Eingangssignal zur Erzeugung des zweiten Ausgangssignals (L_K) dieser Analysatorstufe.

24. Einrichtung nach Anspruch 23, **dadurch gekennzeichnet**, daß m für jede Analysatorstufe gleich ist und daß jede Analysatorstufe Gewichtungsfaktorsätze gleicher Werte benutzt.
25. Einrichtung nach Anspruch 23, **dadurch gekennzeichnet**, daß das verzögerte Eingangssignal jeder Analysatorstufe aus der m-ten Stufe ihres ersten m-stufigen Schieberegisters abgeleitet und zusätzlich verzögert ist (durch Element 476).
26. Digitalfilter (Fig. 1) zur Lieferung mindestens eines Ausgangssignals, **gekennzeichnet durch** eine Mehrzahl von mit Abgriffen versehenen getakteten Verzögerungsleitungen (beispielsweise 470 in Fig. 4 in jeder der Einrichtungen 100-1, 100-2 etc.), welche der Reihe nach numeriert sind und mit steigender Numerierungsfolge mit zunehmend niedrigeren Raten ($R/1$, $R/2$ etc.) getaktet werden, eine Einrichtung zur Zuführung eines zu filternden Eingangssignals (G_0) zum Eingang der ersten dieser Verzögerungsleitungen, eine Einrichtung zur Zuführung der jeweiligen Filterausgangssignale, welche von den Abtastwerten abgeleitet werden, die von jeder Verzögerungsleitung mit Ausnahme derjenigen mit der höchsten Reihenfolgennummer abgenommen werden, als Eingangssignal zu der Verzögerungsleitung mit der nächst höheren Reihenfolgennummer, wobei mindestens ein Teil (G_N) des jeweiligen Filterausgangssignals, welches von den Abtastwerten abgeleitet ist, die von der Verzögerungsleitung mit der höchsten Reihenfolgennummer abgenommen sind, zur Erzeugung des Gesamtausgangssignals benutzt wird.
27. Digitalfilter nach Anspruch 26, **dadurch gekennzeichnet**, daß die gewichteten Abtastwerte von den Abgriffen jeder Verzögerungsleitung zur Bildung von entsprechenden Filterausgangssignalen (G_1 , G_2 etc.) mit Tiefpaßcharakter kombiniert werden.
28. Digitalfilter nach Anspruch 27, **dadurch gekennzeichnet**, daß dasjenige Filterausgangssignal (G_N), welches durch Gewichtung und Kombination der von der Verzögerungsleitung mit der höchsten Reihenfolgennummer abgenommenen Abtastwerte erhalten wird, als Ausgangssignal des digitalen Filters benutzt wird.
29. Digitalfilter nach Anspruch 27, **gekennzeichnet durch** eine weitere mit Abgriffen versehene getaktete Verzögerungsleitung (473), die mit derselben Rate wie die ausgewählte (470) aus der Mehrzahl der mit Abgriffen versehenen Verzögerungsleitungen getaktet wird, durch eine Einrichtung (472) zur selektiven Zuführung des Ausgangssignals der ausgewählten Verzögerungsleitung sowie von Nullen zum Eingang der weiteren Verzögerungsleitung, eine Einrichtung (474) zum Gewichten von Abtastwerten von den Abgriffen der weiteren Verzögerungsleitung und zur Kombination der Abtastwerte zur Bildung eines Tiefpaßfilterausgangssignals und eine Einrichtung (475) zur Differenzkombination des so erhaltenen Tiefpaßfilterausgangssignals mit dem Ausgangssignal der aus der Mehrzahl ausgewählten Verzögerungsleitungen zur Erzeugung eines Ausgangssignals (L_K) des Digitalfilters.
30. Digitalfilter (Fig. 5) nach Anspruch 27, **dadurch gekennzeichnet**, daß die gewichteten Abtastwerte, die von den Abgriffen einer aus der Mehrzahl der mit Abgriffen versehenen Verzögerungsleitungen (570-0, 570-1) ausgewählten Verzögerungsleitung (570-1) mit der Reihenfolgennummer (1), die um 1 höher als die Reihenfolgennummer (0) der vorangehenden Verzögerungsleitung ist, abgenommen sind, (a) bei jedem zweiten der Taktzyklen der vorangehenden Verzögerungsleitung unterschiedlich gewichtet werden, und (b) bei jedem dieser Taktzyklen zu einem Tiefpaßfilterausgangssignal kombiniert werden, und daß das so erhaltene Tiefpaßfilterausgangssignal mit dem Ausgangssignal der vorangehenden Verzögerungsleitung (570-0) in Differenzform kombiniert wird (in 575-0) zur Bildung eines Ausgangssignals (L_0) des Digitalfilters.
31. Digitalfilter nach Anspruch 26, **gekennzeichnet durch** eine weitere, mit Abgriffen versehene getaktete Verzögerungsleitung (473), die mit derselben Rate wie die aus der Mehrzahl der mit Abgriffen versehenen Verzögerungsleitungen ausgewählte Verzögerungsleitung (470) getaktet wird, eine Einrichtung (472) zur selektiven Zuführung des Ausgangssignals der ausgewählten Verzögerungsleitung und von Nullen zum Eingang der weiteren Verzögerungsleitung, eine Einrichtung (474) zur Gewichtung von Abtastwerten von den Abgriffen der weiteren Verzögerungsleitung und Kombination der Abtastwerte zu einem Ausgangssignal und eine Einrichtung (475) zur Kombination der so erhaltenen Ausgangswerte mit dem verzögerten Eingangssignal (G_K) der vorangehenden Verzögerungsleitung zur Bildung eines Ausgangssignals (L_K) des Digitalfilters.
32. Digitalfilter nach Anspruch 31, **dadurch gekennzeichnet**, daß das verzögerte Eingangssignal der vorangehenden Verzögerungsleitung durch Einfügung der Verzögerung (476) an einem ihrer Abgriffe erhalten wird.
33. Digitalfilter nach Anspruch 32, **dadurch gekennzeichnet**, daß die gewichteten Abtastwerte von den Abgriffen einer aus der Mehrzahl von mit Abgriffen versehenen Verzögerungsleitungen ausgewählten Verzögerungsleitung, welche eine Reihenfolgennummer um 1 höher als eine vorangehende Verzögerungsleitung hat, bei jedem zweiten der Taktzyklen der vorangehenden Verzögerungsleitung unterschiedlich gewichtet und bei jedem zweiten Taktzyklus kombiniert werden, und daß dieses Kombinationsergebnis mit dem verzögerten Eingangssignal der vorangehenden Verzögerungsleitung zur Bildung eines Ausgangssignals des Digitalfilters kombiniert wird.
34. Digitalfilter nach Anspruch 33, **dadurch gekennzeichnet**, daß das verzögerte Eingangssignal der vorangehenden Verzögerungsleitung durch Einfügen der Verzögerung an einem ihrer Abgriffe erhalten wird.

35. Signalverarbeitungseinrichtung (Fig. 3) zur Synthetisierung eines einzigen zeitlichen Signals (G_0) aus einem nach einer Reihenfolge angeordneten Satz von N getrennten Zeitsignalen ($L_0 \dots G_N$), wobei N eine ganze Zahl > 1 ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Synthetisierung des einzigen zeitlichen Signals auf verzögerter Realzeitbasis
- (1) das einzige zeitliche Signal durch einen bestimmten Strom von Informationskomponenten-Abtastwerten gebildet wird, welche das Frequenzspektrum der Information definiert, die eine gegebene Anzahl von Dimensionen mit einer speziellen Abtastwertdichte in jeder dieser Dimensionen hat,
 - (2) das erste (L_0) des reihenfolgemäßig angeordneten Satzes von N getrennten Signalen durch einen Strom von Informationskomponenten-Abtastwerten gebildet wird, welche einen oberen Teil des Frequenzspektrums der Information definieren mit einer Abtastdichte, die im wesentlichen dieselbe wie die spezielle Abtastwertdichte in jeder der Dimensionen ist,
 - (3) jedes der zweiten bis ($N-1$)-ten der N getrennten Signale ($L_1 \dots L_N$) des reihenfolgemäßig angeordneten Satzes durch einen Strom von Informationskomponenten-Abtastwerten gebildet wird, welche einen individuellen Teil des Frequenzspektrums der Information in jeder ihrer Dimensionen definiert, der unterhalb desjenigen der entsprechenden Dimension des Spektrums dieses Teils liegt, welches durch das unmittelbar vorangehende getrennte der Signale des Satzes definiert wird und oberhalb der entsprechenden Dimension des Spektrums dieses Teils liegt, welches von dem unmittelbar nachfolgenden getrennten Signal dieses Satzes definiert ist,
 - (4) der Strom von Informationskomponenten-Abtastwerten, der jedem der zweiten bis ($N-1$)-ten der N getrennten Signale ($L_1 \dots L_N$) des reihenfolgemäßig angeordneten Satzes entspricht, eine Abtastwertdichte für jede seiner eigenen Informationsdimensionen hat, die kleiner als die Abtastwertdichte der entsprechenden Informationsdimension des Stroms von Informationskomponenten-Abtastwerten, die seinem unmittelbar vorangehenden separaten Signal dieses Satzes entspricht,
 - (5) die jeweiligen Ströme der Informationskomponenten-Abtastwerte mit vorbestimmter zeitlicher Verschiebungsbeziehung zueinander auftreten,
- und daß die Einrichtung (Fig. 3) eine Gruppe von ($N-1$) Kombinationsschaltungen (363-353) für abgetastete Signale enthalten, von denen jede (z. B. 363, 362) einzeln jeweils einem (beispielsweise L_0) der ersten bis ($N-1$)-ten reihenfolgemäßigen Signale ($L_0 \dots L_N$) des Satzes separater Signale zur Kombination desjenigen reihenfolgemäßigen Signals (beispielsweise L_0) des Satzes separater Signale, welches der Kombinationsschaltung zugeordnet ist, mit der kumulativen Gesamtheit (beispielsweise G_1) all derjenigen separaten Signale (beispielsweise $L_1, L_2 \dots G_N$), die dem reihenfolgemäßig einen separaten Signal des Satzes folgen,
- und daß jede der Kombinationsschaltungen (beispielsweise 362, 361), welche dem ersten (L_0) und dem ($N-2$)-ten (L_4) reihenfolgemäßigen Signal des Satzes getrennter Signale zugeordnet sind, eine Addierschaltung (beispielsweise 363), eine erste Anordnung (beispielsweise 340) zur Weiterleitung ihres zugehörigen reihenfolgemäßig separaten Signals als erstes Eingangssignal zur Addierschaltung, und eine zweite Anordnung (beispielsweise 362) zur Weiterleitung des Ausgangssignals der Addierschaltung (beispielsweise 361) der Kombinationsschaltung (beispielsweise 361), welche demjenigen separaten Signal (beispielsweise G_1) zugeordnet ist, das seinem reihenfolgemäßig separaten Signal unmittelbar folgt, als zweites Eingangssignal zu ihrer Addierschaltung mit derselben Abtastwertdichte, wie sie ihr reihenfolgemäßig separates Signal hat, enthält,
- daß die Kombinationsschaltung (353, 352), die dem ($N-1$)-ten separaten Signal (L_N) des Satzes zugeordnet ist, eine Addierschaltung (353), die erste Anordnung (350) zur Zuführung des ($N-1$)-ten separaten Signals als erstes Eingangssignal zu ihrer Addierschaltung, und eine dritte Anordnung (352) zur Zuführung des N -ten separaten Signals (G_N) als zweites Eingangssignal zu ihrer Addierschaltung (353) mit derselben Abtastwertdichte wie sie das ($N-1$)-te separate Signal hat, enthält, und
- daß die jeweils erste Anordnung (340, 341 etc.), die jeweils zweite Anordnung (362, 360 etc.) und die dritte Anordnung der ($N-1$) Kombinierschaltungen der Gruppe jeweils vorbestimmte Beträge zeitlicher Verzögerung bei der Weiterleitung der zeitlich verschobenen separaten Signale des Satzes einfügen, derart, daß für jede der jeweiligen ($N-1$) Kombinationsschaltungen entsprechende Informationsabtastwerte der jeweiligen Ströme von Informationskomponenten-Abtastwerten am ersten Eingang und am zweiten Eingang ihrer Addierschaltung im wesentlichen zeitlich koinzident zueinander auftreten, so daß das synthetisierte einzige zeitliche Signal am Ausgang der Addierschaltung der dem ersten separaten Signal des Satzes zugeordneten Kombinationsschaltung auftritt.
36. Einrichtung (Fig. 6) nach Anspruch 35, **dadurch gekennzeichnet**, daß die zweite Anordnung (beispielsweise 362 in Fig. 3) der jeweiligen Kombinationsschaltung, die individuell jedem der ersten bis ($N-2$)-ten reihenfolgemäßigen Signal (beispielsweise $L_{(K-1)}$) des Satzes getrennter Signale zugeordnet ist, eine Abtastwertexpandierschaltung (692, 693, 694), die aufgrund des Stromes niedriger Abtastwertdichte der Informationskomponenten-Abtastwerte (G_K), welche zum Ausgang der Addierschaltung weitergeleitet werden, zusätzliche Abtastwerte in den weitergeleiteten Strom einfügt, um die Abtastwertdichte am zweiten Eingang der Addierschaltung (695) dieser Kombinationsschaltung auf die Abtastwertdichte des reihenfolgemäßig separaten Signals ($L_{(K-1)}$) zu erhöhen, welches dieser Kombinationsschaltung zugeordnet ist, wobei jeder der eingefügten zusätzlichen Abtastwerte einen Nullwertpegel hat, und eine Interpolationseinrichtung (693, 694) enthält, welche einen Interpolationswert-Abtastwertpegel für den Nullwertpegel jedes der eingefügten zusätzlichen Abtastwerte ersetzt.
37. Einrichtung (Fig. 6) nach Anspruch 36, **dadurch gekennzeichnet**, daß das N -te separate Signal (G_N) des Satzes eine niedrigere Abtastwertdichte als das ($N-1$)-te separate Signal (L_N) des Satzes hat und daß die dritte Anordnung (352) einen Abtastwertexpander und einen Interpolator (692, 693, 694) gleich denjenigen der zweiten Anordnung zur Weiterleitung des N -ten separaten Signals zum zweiten Eingang der Addierschaltung der dritten Anordnung enthält.
38. Einrichtung nach Anspruch 37, **dadurch gekennzeichnet**, daß das N -te separate Signal (G_N) des Satzes im wesentlichen die gleiche Abtastwertdichte wie das ($N-1$)-te separate Signal (L_N) des Satzes hat und daß die dritte Anordnung das N -te separate Signal direkt zum zweiten Eingang der Addierschaltung der dritten Anordnung weiterleitet.
39. Einrichtung nach Anspruch 36, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Strom der Informationskomponenten-Abtastwerte entsprechend jeden von mindestens dem zweiten (L_1) bis ($N-1$)-ten (L_N) des reihenfolgemäßig angeordneten Satzes von N separaten Signalen eine Abtastwertdichte für jede seiner eigenen Informationsdimensionen hat, die halb so groß wie die Abtastwertdichte der entsprechenden Informationsdimension des Stromes von Informationskomponenten-Abtastwerten entsprechend seinem unmittelbar vorangehenden separaten Signal des Satzes ist.

und daß in jeder der Kombinationsschaltungen (Fig. 6) der Expander (692) der zweiten Anordnung einen zusätzlichen Abtastwert zwischen jedes Paar aufeinanderfolgender Abtastwerte der niedrigeren Abtastwertdichte in jeder Dimension des Stromes der Informationskomponenten-Abtastwerte in das weiterzuleitende Ausgangssignal (G_K) der Addierschaltung einsetzt, und daß der Expander durch ein Interpolationsfilter (693) mit n -Abgriffen (n ist eine ganze Zahl > 1) mit einer Tiefpaß-Übertragungsfunktion gebildet wird.

40) Einrichtung nach Anspruch 35, **dadurch gekennzeichnet**, daß die dritte Anordnung und jede der jeweiligen zweiten Anordnungen der Gruppe von $N-1$ Kombinationsschaltungen für das abgetastete Signal ihren eigenen vorbestimmten Betrag zeitlicher Verzögerung bei der Weiterleitung ihres Stroms von Informationskomponenten-Abtastwerten als zweites Eingangssignal zu ihrer Addierschaltung einfügt, und daß jede der ersten Anordnungen der Gruppe von $N-1$ Kombinationsschaltungen für abgetastete Signale eine Verzögerungseinrichtung (340, 341 etc.) enthält, welche einen speziellen Betrag zeitlicher Verzögerung bei der Weiterleitung ihres reihenfolgemäßigen separaten Signals als erstes Eingangssignal an ihre Addierschaltung einfügt, der abhängt sowohl (1) von der jeweiligen Zeitverschiebung zwischen ihrem reihenfolgemäßigen separaten Signal und jedem derjenigen separaten Signale des Satzes, der seinem reihenfolgemäßigen separaten Signal folgt, als auch (2) vom Gesamtbetrag der Zeitverzögerung, welche von der dritten Anordnung und sämtlichen zweiten Anordnungen derjenigen Kombinationsschaltung bedingt sind, die den separaten Signalen des Satzes zugeordnet sind, die ihrem reihenfolgemäßigen separaten Signal folgen, und daß der spezielle Betrag der Verzögerung so bemessen ist, daß entsprechende Informationsabtastwerte der jeweiligen Ströme von Informationskomponenten-Abtastwerten am ersten Eingang und am zweiten Eingang ihrer Addierschaltung im wesentlichen in zeitlicher Koinzidenz miteinander auftreten.

Hierzu 9 Seiten Zeichnungen

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung bezieht sich auf eine Signalverarbeitungseinrichtung zur Signalanalyse und/oder -synthese. Im einzelnen verwendet die erfindungsgemäße Signalverarbeitungseinrichtung eine Pipeline-Struktur, um in verzögerter Realzeit das Frequenzspektrum einer Informationskomponente (die ein oder mehrere Dimensionen hat) eines gegebenen zeitlichen Signals zu analysieren, dessen höchste interessierende Frequenz nicht größer als f_0 ist, und/oder in verzögerter Realzeit ein solches zeitliches Signal aus seinem analysierten Frequenzspektrum zu synthetisieren. Die Erfindung eignet sich insbesondere, ohne jedoch hierauf beschränkt zu sein, für die in verzögerter Realzeit erfolgende Bildverarbeitung der zweidimensionalen Raumfrequenzen von Fernsehbildern, die durch ein zeitliches Videosignal definiert sind.

Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

Es ist viel Arbeit in die Entwicklung eines Modells für das menschliche Sehen gesteckt worden. Man hat herausgefunden, daß das optische Wahrnehmungssystem des Menschen eine primitive Zerlegung leuchtender Bilder in Raumfrequenzen vornimmt, indem die Raumfrequenzinformation in einer Anzahl kontinuierlicher, sich überlappender Raumfrequenzbänder unterteilt wird. Jedes Band ist grob gerechnet eine Oktave breit, und die Mittenfrequenz jedes Bandes unterscheidet sich von derjenigen des Nachbarbandes in etwa um den Faktor 2. Forschungsergebnisse lassen darauf schließen, daß es etwa sieben Bänder oder Kanäle gibt, die den von 0,5 bis 60 Perioden/Grad Raumfrequenz des menschlichen optischen Wahrnehmungssystems überdecken. Die Bedeutung dieser Erkenntnis liegt darin, daß eine Raumfrequenzinformation, die um mehr als den Faktor 2 von der anderen Raumfrequenzinformation entfernt liegt, vom optischen Wahrnehmungssystem des Menschen unabhängig verarbeitet wird.

Es hat sich ferner gezeigt, daß die im optischen Wahrnehmungssystem des Menschen vorgenommene Raumfrequenzverarbeitung räumlich lokalisiert ist. Die Signale innerhalb jedes Raumfrequenzkanals werden daher über kleine Unterbereiche des Bildes verarbeitet. Diese Unterbereiche überlappen sich gegenseitig und sind grob gesehen zwei Perioden — bei einer speziellen Frequenz — breit.

Benutzt man als Testmuster ein sinusförmiges Gitter, dann zeigt sich, daß die Schwellwert-Kontrast/Empfindlichkeitsfunktion für das Sinus-Gittermuster schnell abfällt, wenn die Raumfrequenz des Sinus-Gitterbildes vergrößert wird. Das bedeutet, daß man bei hohen Raumfrequenzen einen hohen Kontrast sehen muß ($\approx 20\%$ bei 30 Perioden/Grad), daß jedoch bei niedrigen Raumfrequenzen nur ein relativ geringer Kontrast gesehen werden muß ($\approx 0,2\%$ bei 3 Perioden/Grad).

Es hat sich herausgestellt, daß die Fähigkeit des menschlichen optischen Wahrnehmungssystems, eine Änderung im Kontrast eines Sinus-Gitterbildes wahrzunehmen, die oberhalb der Schwelle liegt, auch bei niedrigeren Raumfrequenzen besser ist als bei höheren Raumfrequenzen. Um eine Kontraständerung in 75% aller Fälle richtig zu unterscheiden, benötigt ein normaler Mensch bei einem Sinus-Gitter von 3 Perioden/Grad eine Kontraständerung von 12%, bei einem Gitter von 30 Perioden/Grad dagegen eine Kontraständerung von 30%.

Dr. Peter J. Burt, der die obengenannten Eigenschaften des menschlichen optischen Wahrnehmungssystems kennt, hat einen Algorithmus entwickelt (nachfolgend als „Burt-Pyramide“ bezeichnet), den er mit Hilfe eines Computers, ohne Realzeit, verwirklicht hat, um die zweidimensionalen Raumfrequenzen in einem Bild in eine Mehrzahl getrennter Raumfrequenzbänder zu analysieren. Jedes Raumfrequenzband, mit Ausnahme des niedrigsten, ist vorzugsweise eine Oktave breit. Wenn also die höchste interessierende Raumfrequenz des Bildes nicht größer als f_0 ist, dann überdeckt das höchste Frequenzband die Oktave von $f_0/2$ bis f_0 (mit einer Mittenfrequenz von $3f_0/4$), das nächsthöhere Frequenzband überdeckt die Oktave von $f_0/4$ bis $f_0/2$ (mit einer Mittenfrequenz von $3f_0/8$) usw.

Es sei an dieser Stelle auf einige Aufsätze hingewiesen, deren Autor oder Mitautor Dr. Burt ist und in denen verschiedene Aspekte der Burt-Pyramide im einzelnen beschrieben sind:

„Segmentation and Estimation of Image Region Properties Through Cooperative Hierarchical Computation“, von Peter J. Burt u. a., **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, Band SMC-11, Nr. 12, 802–809, Dezember 1981.

„The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code“ von Peter J. Burt u. a., **IEEE Transactions on Communications**, Band COM-31, Nr. 4, 532–540, April 1983.

„Fast Algorithms for Estimating Local Image Properties“, von Peter J. Burt, **Computer Vision, Graphics, and Image Processing** 21, 368–382 (1983).

„Tree and Pyramid Structures for Coding Hexagonally Sampled Binary Images“ von Peter J. Burt, **Computer Graphics and Image Processing** 14, 271–280 (1980).

„Pyramid-based Extraction of Local Image Features with Applications to Motion and Texture Analysis“ von Peter J. Burt, **SPIE**, Band 360, 114–124.

„Fast Filter Transforms for Image Processing“ von Peter J. Burt, **Computer Graphics and Image Processing** 16, 20–51 (1981).

„A Multiresolution Spline with Applications to Image Mosaics“ von Peter J. Burt u. a., Image Processing Laboratory, Electrical, Computer, and Systems Engineering Department, Rensselaer Polytechnic Institute, Juni 1983.

„The Pyramid as a Structure for Efficient Computation“ von Peter J. Burt, Image Processing Laboratory, Electrical and Systems Engineering Department, Rensselaer Polytechnic Institute, Juli 1982.

Der Burt-Pyramiden-Algorithmus verwendet spezielle Abtasttechniken zum Analysieren eines eine relativ hohe Auflösung aufweisenden Originalbildes in eine Hierarchie von N (wobei N eine ganze Zahl > 1 ist = plural integer) getrennter Komponentenbilder (von denen jedes ein Laplacesches Bild, das eine andere Oktave der Raumfrequenzen des Originalbildes umfaßt) plus ein restliches Gaußsches Bild (welches aus sämtlichen Raumfrequenzen des Originalbildes unterhalb des Laplaceschen Komponentenbildes der untersten Oktave besteht) ist. Der hier benutzte Ausdruck „Pyramide“ bezieht sich auf die sukzessive Reduzierung der Raumfrequenzbandbreite und Abtastdichte jeder der Hierarchie der Komponentenbilder beim Fortschreiten von dem Komponentenbild der höchsten Oktave zu demjenigen der niedrigsten Oktave.

Ein erster Vorteil des Burt-Pyramiden-Algorithmus besteht in der Möglichkeit, das ursprüngliche hoch aufgelöste Bild aus Komponentenbildern und dem Restbild zu synthetisieren, ohne daß durch Aliasing-Effekte Störraumfrequenzen eingeführt würden. Ein zweiter Vorteil des Burt-Pyramiden-Algorithmus besteht darin, daß die Raumfrequenzbandbreite einer Oktave jeder der Hierarchie der Komponentenbilder zu den Eigenschaften des menschlichen optischen Wahrnehmungssystem paßt, wie bereits oben erläutert wurde. Dadurch wird es möglich, die Raumfrequenzen einzelner der Hierarchie der Komponentenbilder auf verschiedene unabhängige Weise selektiv zu verarbeiten oder zu verändern (also ohne daß die Signalverarbeitung irgend eines Komponentenbildes irgendein anderes Komponentenbild nennenswert beeinflussen würde), um irgendeinen anderen gewünschten Effekt in dem synthetisierten Bild, das aus den verarbeiteten Komponentenbildern gebildet wird, hervorzuheben oder zu erzeugen. Ein Beispiel für einen solchen gewünschten Effekt ist die Mehrfach-Auflösungs-Verzahnungstechnik, die im einzelnen im obengenannten Aufsatz „A Multiresolution Spline with Applications to Image Mosaics“ beschrieben ist.

Bisher ist der Burt-Pyramiden-Algorithmus mit Hilfe eines digitalen Allzweck-Computers verwirklicht worden, jedoch nicht in Realzeit. Die Größe jedes Bildelementabtastwertes eines Originalbildes wird durch eine Mehrbitzahl (beispielsweise 8 Bit) dargestellt, die an einem individuellen Adressenplatz eines Computerspeichers gespeichert wird. Beispielsweise benötigt ein relativ hochaufgelöstes zweidimensionales Originalbild aus 2^9 (512) Bildelementabtastwerten in jeder seiner beiden Dimensionen einen großen Speicher von 2^{18} (262144) Adressenspeicherplätzen zur Speicherung jeder der Mehrbitzahlen, welche die Pegel der jeweiligen Bildelementabtastwerte darstellen, aus denen das Originalbild besteht. Das im Speicher gespeicherte Originalbild kann von einem digitalen Computer nach dem Burt-Pyramiden-Algorithmus verarbeitet werden. Dabei werden Mehrfachschritte ausgeführt wie Falten von Bildelementabtastwerten mit einer vorbestimmten Kern- oder Rumpfgewichtsfunktion, Abtastwertdezimierung, Abtastwertexpansion durch Interpolation und Abtastwertsubtraktion. Die Größe der Kernfunktion (in jeder oder in mehreren Richtungen) ist relativ klein (in der Anzahl der Bildelemente ausgedrückt) im Vergleich zur Größe in jeder Dimension des gesamten Bildes. Der Unterbereich oder das Fenster der Bildelemente (die hinsichtlich Größe gleich der Kernfunktion sind und ihrerseits symmetrisch um jedes Bildelement liegen) wird mit der Kerngewichtsfunktion multipliziert und in einem Faltungsrechnenvorgang summiert.

Die Kerngewichtsfunktion wird so gewählt, daß sie wie ein Tiefpaßfilter für die mehrdimensionalen Raumfrequenzen des gefalteten Bildes wirkt. Die nominelle Grenzfrequenz (in der Filtertechnik auch als Eckfrequenz bezeichnet) der Tiefpaßfilter-Kennlinie, die sich in jeder Dimension aus der Kernfunktion ergibt, wird bei praktisch der Hälfte der höchsten interessierenden Frequenz in dieser Dimension des gefalteten Signals gewählt. Jedoch braucht diese Tiefpaßfilter-Kennlinie keinen steilen Abfall bei einer gegebenen Grenzfrequenz zu haben, sondern der Abfall kann relativ allmählich vor sich gehen, wobei dann die nominelle Grenzfrequenz als diejenige Frequenz definiert ist, bei welcher eine vorbestimmte Dämpfung (beispielsweise 3 dB) auftritt. Filter mit einem weniger steilen Abfall können benutzt werden, weil die Burt-Pyramide von Haus aus das Auftreten störender Frequenzen infolge von Aliasing-Effekten kompensiert, die bei einer graduell abfallenden Tiefpaßfilter-Kennlinie auftreten. Das Faltungsbild wird dezimiert durch effektives Unterdrücken jedes zweiten gefalteten Bildelementes in jeder der nacheinander betrachteten Dimensionen des Bildes, wobei die Anzahl der Bildelemente im gefalteten Bild in jeder seiner Dimensionen um die Hälfte reduziert wird. Da ein Bild üblicherweise zweidimensional ist, besteht das gefaltet dezimierte Bild aus nur einem Viertel der Anzahl der Bildelemente, welche das Bild vor einer solchen Dezimierung enthält. Die verringerte Anzahl der Bildelementabtastwerte dieses gefaltet dezimierten Bildes (welches als Gaußsches Bild bezeichnet wird) wird in einem zweiten Speicher gespeichert.

Beginnend mit den gespeicherten Bildelement-Abtastwerten des Originalbildes wird der erwähnte Faltungsdezimierungsvorgang iterativ N mal durchgeführt (wobei N eine ganze Zahl > 1 ist), so daß man $(N + 1)$ Bilder erhält, die aus dem hochaufgelösten Originalbild und einer hierarchischen Pyramide von N zusätzlichen Gaußschen Bildern mit reduzierter Auflösung bestehen, wobei die Anzahl der Bildelementabtastwerte (Abtastwertdichte) in jeder Dimension jedes zusätzlichen Bildes nur halb so groß wie die Anzahl der Bildelemente in jeder Dimension des unmittelbar vorangehenden Bildes ist. Wenn das hochaufgelöste gespeicherte Originalbild mit G_0 bezeichnet wird, dann kann die Hierarchie von N gespeicherten zusätzlichen Bildern mit G_1 bis G_N bezeichnet werden, wobei die zunehmend reduzierte Anzahl von Bildelementabtastwerten jedes dieser N zusätzlichen Bilder in einem getrennten von N Speichern abgespeichert wird. Beim Zählen des gespeicherten Originalbildes kommt man also auf eine Gesamtzahl von $N + 1$ Speichern.

Gemäß einer nicht in Realzeit erfolgenden Realisierung des Burt-Pyramiden-Algorithmus besteht die nächste Berechnungsprozedur in der Erzeugung zusätzlicher Interpolationsabstastwerte zwischen jedem Paar gespeicherter Bildelemente G_1 in jeder Dimension des Bildes, so daß die reduzierte Abstastwertdichte des gespeicherten Bildes G_1 wieder zur Abstastdichte des ursprünglichen gespeicherten Bildes G_0 expandiert wird. Der Digitalwert jedes der Bildelementabstastwerte des expandierten Bildes G_1 wird dann von dem gespeicherten Digitalwert des entsprechenden Bildelementabstastwertes des Originalbildes G_0 subtrahiert zu einem Differenzbild (das als Laplacesches Bild bezeichnet wird). Dieses Laplacesche Bild (L_0), das dieselbe Abstastwertdichte wie das Originalbild G_0 hat, besteht aus denjenigen Raumfrequenzen, die im ursprünglichen Bild innerhalb der Oktave $f_0/2$ bis f_0 plus häufig einer kleinen Fehlerkompensationskomponente für niedrigere Raumfrequenzen liegen, die einem Informationsverlust entspricht, welcher durch den Dezimierungsschritt bedingt ist, der bei der Ableitung des Bildes G_1 reduzierter Abstastdichte vorgenommen worden ist und bei der Einführung der Interpolations-Abstastwerte, die bei der Expandierung der Abstastwertdichte wieder zu derjenigen des Originalbildes G_0 auftritt. Dieses Laplacesche Bild L_0 ersetzt dann das ursprüngliche Bild G_0 im Speicher in den ersten der $N + 1$ Pyramidenspeicher.

Durch Iteration dieses Verfahrens wird in gleicher Weise wiederum eine Hierarchie abgeleitet, die aus $N-1$ zusätzlichen Laplaceschen Bildern L_1 bis L_{N-1} besteht, und in einen entsprechenden zusätzlichen $N-1$ Speicher eingeschrieben, in welchen die Gaußschen Bilder G_1 bis G_{N-1} gespeichert sind (wobei im Speicher die Gaußschen Bilder G_1 bis G_{N-1} ersetzt werden). Das Gaußsche Bild G_N (mit der am stärksten reduzierten Abstastwertdichte) wird nicht in seinem entsprechenden Speicher durch ein Laplacesches Bild ersetzt, sondern bleibt in diesem gespeichert als Gaußscher Rest, der aus den niedrigsten Raumfrequenzen des Originalbildes besteht (also aus denjenigen unterhalb der Oktave L_{N-1}).

Der Burt-Pyramiden-Algorithmus erlaubt eine Speicherung des Originalbildes ohne Aliasing-Effekte durch ein iteratives Rechenverfahren aus mehreren Schritten der Expandierung des gespeicherten Restbildes G_N auf die Abstastwertdichte des Bildes L_{N-1} und anschließendes Addieren dieses Bildes zum gespeicherten Laplaceschen Bild L_{N-1} für die Ableitung eines Summenbildes. Dieses Summenbild wird in ähnlicher Weise expandiert und zum Laplaceschen Bild L_{N-2} addiert usw., bis das ursprüngliche hochaufgelöste Bild synthetisiert ist durch Summation aller Laplaceschen Bilder und des Restbildes. Nach der Analyse eines oder mehrerer Originalbilder in N Laplacesche Bilder und einen Gaußschen Rest kann man irgendeinen speziellen gewünschten Bildverarbeitungs- oder -veränderungsschritt vornehmen (wie etwa eine Bildverzerrung), ehe ein komplettes hochauflösendes Bild daraus synthetisiert wird.

Ziel der Erfindung

Die nicht in Realzeit erfolgende Realisierung des Burt-Pyramiden-Algorithmus durch Computerverarbeitung ist wirkungsvoll bei der Verarbeitung fester Bildinformation. Sie ist jedoch nicht anwendbar zur Analyse fortlaufend auftretender Bilder, die sich zeitlich ständig ändern (also aufeinanderfolgender Videobilder beim Fernsehen). Zum Analysieren aufeinanderfolgend auftretender, sich zeitlich verändernder Bilder ist eine Realzeitrealisierung des Burt-Pyramiden-Algorithmus erforderlich, wie ihn die Erfindung ergibt.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Im einzelnen richtet sich die Erfindung auf eine Signalverarbeitungseinrichtung mit einer Pipeline-Struktur, die in verzögerter Realzeit das Frequenzspektrum einer Informationskomponente eines vorgegebenen zeitlichen Signals analysiert, bei welchem die höchste interessierende Frequenz dieses Frequenzspektrums nicht größer als f_0 ist. Weiterhin entspricht diese Informationskomponente des gegebenen zeitlichen Signals einer Information mit einer gegebenen Anzahl von Dimensionen. Die Einrichtung enthält einen Satz von N nach einer Reihenfolge angeordneten Übertragungseinrichtungen für abgetastete Signale (wobei N eine ganze Zahl > 1 ist). Jede der Übertragungseinrichtungen hat einen ersten und einen zweiten Eingangsanschluß sowie einen ersten und einen zweiten Ausgangsanschluß. Dem ersten Eingangsanschluß der ersten Übertragungseinrichtung des Satzes wird ein gegebenes zeitliches Eingangssignal zugeführt. Der erste Eingangsanschluß jeder der zweiten bis N -ten Übertragungseinrichtungen des Satzes ist mit dem ersten Ausgangsanschluß der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung dieses Satzes gekoppelt, so daß jede der zweiten bis N -ten Übertragungseinrichtungen ein Signal zur unmittelbar folgenden Übertragungseinrichtung des Satzes weiterleitet. Dem zweiten Eingangsanschluß jeder der Übertragungseinrichtungen des Satzes wird ein getrenntes Abstast-Taktsignal zugeführt. Bei dieser Anordnung liefert jede der Übertragungseinrichtungen des Satzes an ihrem ersten und zweiten Ausgangsanschluß Signale mit einer Rate, die gleich der Abstastfrequenz des zugeführten Taktsignals ist.

Weiterhin weist jede der Übertragungseinrichtungen des Satzes eine Tiefpaß-Übertragungsfunktion zwischen ihrem ersten Eingangsanschluß und ihrem ersten Ausgangsanschluß für die Informationskomponente des ihrem ersten Eingangsanschluß zugeführten Signals auf. Die Tiefpaß-Übertragungsfunktion jeder Übertragungseinrichtung des Satzes hat eine nominelle Grenzfrequenz, die eine direkte Funktion der Abstastfrequenz des am zweiten Eingang dieser Übertragungseinrichtung des Satzes zugeführten Taktsignals ist. Das dem zweiten Eingangsanschluß der ersten Übertragungseinrichtung des Satzes zugeführte Taktsignal hat weiterhin eine Abstastfrequenz, die (a) doppelt so groß wie f_0 ist und (b) für diese Informationskomponente eine nominelle Grenzfrequenz dieser Tiefpaß-Übertragungsfunktion der ersten Übertragungseinrichtung des Satzes ergibt, welche kleiner als f_0 ist. Schließlich hat der dem zweiten Eingangsanschluß jeder der zweiten bis N -ten Übertragungseinrichtungen des Satzes zugeführte Takt eine Abstastfrequenz, die (a) kleiner als die Taktfrequenz ist, die dem zweiten Eingangsanschluß der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes zugeführt wird, (b) mindestens gleich dem doppelten der Maximalfrequenz der am ersten Eingangsanschluß zugeführten Informationskomponente ist und (c) eine nominelle Grenzfrequenz für ihre Tiefpaß-Übertragungsfunktion ergibt, die unter derjenigen der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes liegt.

Das am zweiten Ausgangsanschluß jeder der Übertragungseinrichtungen des Satzes gelieferte Signal entspricht der Differenz zwischen der an ihrem ersten Eingangsanschluß zugeführten Informationskomponente und einer direkten Funktion der an ihrem ersten Ausgangsanschluß gelieferten Informationskomponente.

Die Informationskomponente des gegebenen zeitlichen Signals, welches durch die erfindungsgemäße Signalverarbeitungseinrichtung verarbeitet wird, kann beispielsweise, ohne jedoch hierauf beschränkt zu sein, den zweidimensionalen Raumfrequenzkomponenten jedes der aufeinanderfolgenden Vollbilder eines Fernsehbildes entsprechen.

Generell ist die Erfindung nützlich beim Analysieren des Frequenzspektrums eines Signals, das von einer Quelle räumlicher oder nicht räumlicher Frequenzen in einer oder mehreren Dimensionen abgeleitet wird, unabhängig von der speziellen Art dieser Quelle. So eignet sich beispielsweise die Erfindung zum Analysieren von ein-, zwei-, drei- oder mehrdimensionalen komplexen Signalen, die von Tonquellen, Radarquellen, seismographischen Quellen, Roboterquellen etc. stammen, außer den zweidimensionalen sichtbaren Bildquellen, wie etwa Fernsehbilder. Weiterhin betrifft die Erfindung eine Signalverarbeitungseinrichtung, die eine Pipeline-Struktur benutzt und aus einem Satz analysierter Signale in verzögerter Realzeit ein solches komplexes Signal synthetisiert.

Ausführungsbeispiele

In den beiliegenden Zeichnungen zeigen:

- Fig. 1 ein Funktionsblockschaltbild zur Veranschaulichung der Erfindung in ihrer allgemeinsten Form;
- Fig. 1 a: eine digitale Ausführungsform einer ersten Art einer beliebigen des Satzes der Übertragungseinrichtungen für das abgetastete Signal gemäß Fig. 1;
- Fig. 1 b: eine digitale Ausführungsform einer zweiten Art einer beliebigen des Satzes der Signalübertragungseinrichtungen für das abgetastete Signal gemäß Fig. 1;
- Fig. 1 c: eine alternative digitale Ausführungsform der letzten Signalübertragungseinrichtung des Satzes von Übertragungseinrichtungen für das abgetastete Signal entweder der ersten oder der zweiten Art;
- Fig. 2: ein Veranschaulichungsbeispiel einer Kerngewichtsfunktion, die zur Realisierung der Erfindung benutzbar ist;
- Fig. 3: ein Blockschaltbild eines eindimensionalen Systems des Spektrumanalysators, der Spektrumveränderungsschaltung und des Signalsynthetisierers gemäß Gesichtspunkten der Erfindung, wobei eine Legende bestimmte der dargestellten Blöcke bezeichnet;
- Fig. 4: ein Blockschaltbild einer der Analysierstufen, die bei den iterativen Berechnungen der einen Gesichtspunkt der Erfindung realisierenden Spektralanalyse nach Fig. 3 verwendet werden;
- Fig. 5: ein Blockschaltbild einer Abwandlung, die sich bei einem nachfolgenden Paar der Analysierstufen gemäß Fig. 4 bei einer anderen Ausführungsform der Erfindung vornehmen läßt;
- Fig. 6: ein Blockschaltbild einer der Synthetisierstufen, die bei dem iterativen Verfahren der Signalanalyse gemäß Fig. 3 aus den Spektralkomponenten verwendet wird;
- Fig. 7, 8, 9 und 10: Blockdiagramme repräsentativer Spektrumsabwandlungsschaltungen gemäß Fig. 3 zur Verwendung bei der Erfindung;
- Fig. 11: ein Blockschaltbild einer Abwandlung des in Fig. 3 dargestellten Systems, welche verwendet wird, wenn die Spektrumsabtastrwerte für die Verarbeitung zeitlich ausgerichtet werden, gemäß einem Gesichtspunkt der Erfindung;
- Fig. 12: ein Blockschaltbild eines zweidimensionalen Raumfrequenzspektrumsanalysators unter Verwendung einer Pipeline-Struktur zur Durchführung der Spektralanalyse mit verzögerter Realzeit und
- Fig. 13: ein Blockschaltbild einer Schaltung zur Synthetisierung von Signalen, welche das Abtasthalbbild beschreiben, das von dem Spektrumanalysator nach Fig. 12 analysiert worden ist, aus dessen Ausgangsspektr.

Wie Fig. 1 zeigt, hat jede Signalübertragungsschaltung eines Satzes von N reihenfolgemäßig angeordneter Übertragungseinrichtungen 100-1 bis 100- N einschließlich für abgetastete Signale zwei Eingangsanschlüsse und zwei Ausgangsanschlüsse (N ist hier eine ganze Zahl > 1). Einem ersten von zwei Eingangsanschlüssen der ersten Übertragungseinrichtung 100-1 des Satzes wird als Eingangssignal ein gegebenes zeitliches Signal G_0 , welches eine Information definiert, zugeführt. Das zeitliche Signal G_0 kann ein kontinuierliches analoges Signal (wie etwa ein Tonsignal oder ein Videosignal) sein, oder alternativ kann das zeitliche Signal G_0 ein abgetastetes Analogsignal sein; weiterhin kann im letztgenannten Fall jeder Abtastwert direkt durch einen Amplitudenpegel oder indirekt durch eine Digitalzahl dargestellt werden (indem man etwa jeden Abtastamplitudenpegel durch einen Analog/Digital-Konverter laufen läßt, der in Fig. 1 jedoch nicht dargestellt ist, ehe das zeitliche Signal G_0 dem ersten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-1 zugeführt wird). Das Frequenzspektrum von G_0 liegt in einem Bereich, der zwischen 0 (also Gleichstrom) und der Frequenz f_0 verläuft (also einem Bereich, der alle interessierenden Frequenzen enthält, die einer Information mit einer gegebenen Anzahl von Dimensionen entsprechen). Speziell kann G_0 ein vorgefiltertes Signal sein, das keine Frequenzen enthält, die größer als f_0 sind. In diesem Fall erfüllt die Taktfrequenz $2f_0$ der Übertragungseinrichtung 100-1 das Nyquist-Kriterium für alle Frequenzkomponenten von f_0 . Bei der Alternative kann G_0 jedoch einige Frequenzkomponenten enthalten, die höher als f_0 sind und nicht interessieren. In diesem letztgenannten Fall wird das Nyquist-Kriterium nicht erfüllt, und es treten Aliasing-Effekte auf. Aus praktischen Gesichtspunkten können solche Aliasing-Effekte (wenn sie nicht zu groß sind) häufig toleriert werden, obgleich sie unerwünscht sind. Gemäß Fig. 1 ist der erste Eingangsanschluß von je einer der anderen Übertragungseinrichtungen 100-1 ... 100- N des Satzes mit dem ersten von zwei Ausgangsanschlüssen der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes gekoppelt. Speziell ist der erste Ausgangsanschluß der Signalübertragungseinrichtung 100-1 mit dem ersten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-2 gekoppelt; der erste Ausgangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-2 ist mit dem ersten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-3 gekoppelt (welche nicht gezeichnet ist) ... und der erste Ausgangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100- $(N-1)$, die ebenfalls nicht gezeichnet ist, ist mit dem ersten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100- N gekoppelt. Auf diese Weise verwendet die in Fig. 1 veranschaulichte Signalverarbeitungsschaltung eine Pipeline-Struktur bei der Kopplung jeder der einzelnen Übertragungseinrichtungen des Satzes mit einer anderen.

Dem zweiten der beiden Eingangsanschlüsse je einer des Satzes der Übertragungseinrichtungen 100-1 ... 100- N wird ein separater Abtastfrequenztakt zugeführt. Speziell wird der Übertragungseinrichtung 100-1 ein Abtastfrequenztakt CL_1 an einem zweiten Eingang zugeführt, der Übertragungseinrichtung 100-2 wird ein Abtastfrequenztakt CL_2 an einem zweiten Eingang zugeführt ... und der Übertragungseinrichtung 100- N wird ein Abtastfrequenztakt CL_N an ihrem zweiten Eingang zugeführt. Die relativen Werte der Takte CL_1, \dots, CL_N mit Bezug aufeinander sind in der in Fig. 1 angedeuteten Weise eingeschränkt. Die Bedeutung dieser Einschränkungen wird im einzelnen noch erläutert werden.

Ferner liefert die Übertragungseinrichtung 100-1 an ihrem zweiten Ausgangsanschluß ein zweites Ausgangssignal L_0 . In ähnlicher Weise liefern die anderen Übertragungseinrichtungen 100-2 ... 100- N des Satzes an ihren jeweiligen zweiten Ausgangsanschlüssen entsprechende zweite Ausgangssignale L_1, \dots, L_{N-1} .

Jede einzelne der Übertragungseinrichtungen 100-1 ... 100-N des Satzes kann, unabhängig von ihrem speziellen inneren Aufbau, als schwarzer Kasten betrachtet werden, der eine Tiefpaß-Übertragungsfunktion zwischen seinem ersten Eingangsanschluß und seinem ersten Ausgangsanschluß für das Frequenzspektrum der Informationskomponente des seinem ersten Eingangsanschluß zugeführten Eingangssignals aufweist. Diese Tiefpaß-Übertragungsfunktion jeder einzelnen Übertragungseinrichtung 100-1, 100-2 ... 100-N des Satzes hat ferner einen Abfall mit einer nominellen Grenzfrequenz, welche eine direkte Funktion der Abtastfrequenz des am zweiten Eingangsanschluß zugeführten Taktes ist. Wie bereits festgestellt wurde, kann der Abfall im Falle der Burt-Pyramide allmählich anstatt steil verlaufen.

Im einzelnen wird dem ersten Eingang der Übertragungseinrichtung 100-1 das bereits erwähnte Eingangssignal G_0 zugeführt. Die höchste interessierende Frequenz im Frequenzspektrum von G_0 ist nicht größer als f_0 . Ferner ist der dem zweiten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-1 zugeführte Abtastfrequenztakt CL_1 gleich $2f_0$ (er hat also eine Frequenz, welche das Nyquist-Kriterium für alle interessierenden Frequenzen innerhalb des Frequenzspektrums von G_0 erfüllt). In diesem Fall verläuft die Tiefpaß-Übertragungsfunktion zwischen dem ersten Eingangsanschluß und dem ersten Ausgangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-1 derart, daß nur solche Frequenzen innerhalb des Frequenzspektrums von G_0 , die nicht größer als f_1 sind (wobei f_1 kleiner als f_0 ist) zum ersten Ausgangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-1 durchgelassen werden. Auf diese Weise wird am ersten Ausgangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-1 ein Ausgangssignal G_1 geliefert, dessen Frequenzspektrum (welches durch die speziellen Eigenschaften der Tiefpaß-Übertragungsfunktion bestimmt wird) hauptsächlich aus dem unteren Teil des Frequenzspektrums von G_0 besteht. Dieses Signal G_1 wird dann als Eingangssignal dem ersten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-2 zugeführt.

Wie Fig. 1 zeigt, ist der Abtastfrequenztakt CL_2 (welcher dem zweiten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-2 zugeführt wird, niedriger als $2f_0$ (der Abtastfrequenz des Taktes CL_1), jedoch mindestens gleich $2f_1$ (der doppelten Maximalfrequenz f_1 im Frequenzspektrum von G_1). Daher liegt die Abtastfrequenz des Taktes CL_2 noch genügend hoch, um das Nyquist-Kriterium für das Frequenzspektrum von G_1 zu erfüllen, welches dem ersten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-2 zugeführt wird, jedoch es ist nicht genügend hoch, um das Nyquist-Kriterium für die höchste mögliche interessierende Frequenz f_0 im Frequenzspektrum von G_0 zu erfüllen, welches dem ersten Eingangsanschluß der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung 100-1 zugeführt ist. Diese Art von Beziehung (in welcher die Abtastfrequenz des dem zweiten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung des Satzes zugeführten Taktes niedriger wird, wenn die Reihenfolgeposition dieser Übertragungseinrichtung des Satzes höher wird) gilt generell. Speziell hat der dem zweiten Eingangsanschluß jeder der Übertragungseinrichtungen 100-2 ... 100-N des Satzes zugeführte Takt eine Abtastfrequenz, die (a) niedriger als der dem zweiten Eingangsanschluß der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes zugeführte Takt ist, (b) mindestens gleich der doppelten Maximalfrequenz der Informationskomponente des ihrem ersten Eingangsanschluß zugeführten Signals ist und (c) die nominelle Grenzfrequenz für die Tiefpaßfilterfunktion auf einen Wert herunterbringt, der unter demjenigen ihrer unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes ist. Damit ist die maximale Frequenz f_2 des Signals G_1 , die am zweiten Ausgangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-2 auftritt, kleiner als f_1 ... und schließlich ist die Maximalfrequenz f_N im Frequenzspektrum des Signals G_N (das am ersten Ausgangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-N auftritt) niedriger als die Frequenz f_{N-1} des Frequenzspektrums des Signals G_{N-1} (das am ersten Ausgangsanschluß der nicht dargestellten Übertragungseinrichtung des Satzes auftritt, die der Übertragungseinrichtung 100-N unmittelbar vorangeht und das dem ersten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-N zugeführt wird). Sieht man wiederum jede einzelne der Übertragungseinrichtungen 100-1 ... 100-N als schwarzen Kasten an, dann entspricht jedes der einzelnen Ausgangssignale L_0 ... L_{N-1} , die jeweils am zweiten Ausgangsanschluß jeder einzelnen der Übertragungseinrichtungen 100-1 bis 100-N des Satzes geliefert werden, der Differenz zwischen der Informationskomponente des dem ersten Eingangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung zugeführten Signals und einer direkten Funktion der Informationskomponente des am ersten Ausgangsanschluß dieser Übertragungseinrichtung gelieferten Signals. Damit ist L_0 gleich der Differenz $G_0 - g(G_1)$ oder entspricht dieser zumindest, wie in Fig. 1 angedeutet ist, wobei $g(G_1)$ entweder G_1 selbst oder eine in bestimmter Weise spezifizierte direkte Funktion von G_1 ist. In gleicher Weise ist L_1 gleich (oder entspricht mindestens) $G_1 - g(G_2)$; ... L_{N-1} ist gleich (oder entspricht mindestens) $G_{N-1} - g(G_N)$.

Die in Fig. 1 gezeigte Signalverarbeitungsschaltung analysiert das ursprüngliche Signal G_0 in eine Mehrzahl von parallelen Ausgangssignalen, die aus den Laplaceschen Ausgangssignalen L_0, L_1, \dots, L_{N-1} (welche jeweils am zweiten Ausgangsanschluß jeder der entsprechenden Pipeline-Struktur-Übertragungseinrichtungen 100-1 ... 100-N des Satzes entstehen) plus einem Rest-Gauß-Ausgangssignal G_N (das am ersten Ausgangsanschluß der letzten Übertragungseinrichtung 100-N des Satzes entsteht) besteht.

Generell sind die einzigen Beschränkungen für die relativen Werte der jeweiligen Abtasttaktfrequenzen f_0, \dots, f_{N-1} die in Fig. 1 angedeuteten. Jedoch ist es gewöhnlich vorteilhaft, Werte der Abtasttaktfrequenzen, die dem zweiten Eingangsanschluß jeder der jeweiligen Übertragungseinrichtungen 100-1 ... 100-N zugeführt werden, zu spezifizieren, so daß die jeweiligen Verhältnisse $CL_2/CL_1, CL_3/CL_2, \dots, CL_N/CL_{N-1}$ gleich $1/2$ sind (oder sie können auch eine ganzzahlige Potenz von $1/2$ sein entsprechend der Anzahl von Dimensionen der Informationskomponente des zu analysierenden Signals). Dies führt zu einer Aufteilung des analysierten Ausgangs des Frequenzspektrums des Originalsignals G_0 in getrennte parallele Frequenzbänder der Laplaceschen Komponentensignale L_0, \dots, L_{N-1} , die (unter Vernachlässigung jeglicher Abtastfehler infolge von Verlusten der Signalinformation durch Reduzierung der Abtastdichte oder infolge der Zufügung vorübergehender Aliasing-Frequenzkomponenten) jeweils eine Bandbreite von einer Oktave für jede Dimension der Informationskomponente haben und nur diejenigen Frequenzen enthalten, die im Frequenzspektrum des Originalsignals G_0 liegen und in diese spezielle Oktave hineinfallen. Diese Frequenzen des Frequenzspektrums des Originalsignals G_0 , die unter das Laplace-Komponentensignal L_{N-1} der tiefsten Oktave fallen, sind dann im Rest-Gauß-Signal G_N des analysierten Ausgangs enthalten.

Allgemein ist N eine ganze Zahl mit irgendeinem gegebenen Wert von 2 oder mehr. Es gibt jedoch Informationsarten, bei denen ein relativ kleiner gegebener Wert von N ausreichen kann, um alle interessierenden Frequenzen in jeder Dimension des Frequenzspektrums des Originalsignals G_0 mit genügend hoher Auflösung zu analysieren. Beispielsweise findet man im Falle sichtbarer Bilder häufig einen Wert von 7 für N ausreichend, so daß in diesem Falle die Frequenzen in jeder Dimension des Restsignals G_N kleiner als $1/128$ stel ($1/2^7$) der höchsten interessierenden Frequenz f_0 des Frequenzspektrums G_0 des Originalsignals sind.

Fig. 1a zeigt in allgemeiner Form eine digitale Ausführung einer ersten Art der Übertragungseinrichtungen 100-1 ... 100-N des

Pipeline-Satzes für abgetastete Signale gemäß Fig. 1. In Fig. 1 a ist diese erste Ausführungsart jeder einzelnen der Übertragungseinrichtungen 100-1... 100(N - 1) des Satzes mit 100a-K und die erste Ausführungsart der unmittelbar darauffolgenden Übertragungseinrichtung des Satzes mit 100a-(K - 1) bezeichnet.

Die Übertragungseinrichtung 100a-K besteht aus einem digitalen Faltungsfilter 102 mit m-Abgriffen (wobei m eine ganze Zahl ≥ 3 , vorzugsweise ungerade ist), ferner eine Dezimierschaltung 104, einer Expandierschaltung 106, einem digitalen Interpolationsfilter 108 mit n-Abgriffen (wobei n eine ganze Zahl ≥ 3 , vorzugsweise ungerade) ist, einer Verzögerungsschaltung 109 und einer Subtrahierschaltung 110. Der Abtastfrequenztakt CL_K (der gemäß Fig. 1 dem zweiten Eingangsanschluß jeder Übertragungseinrichtung des Satzes 100a-K zugeführt wird) wird jedem der Elemente 102, 104, 106, 108, 109 und 110 als Steuersignal zugeführt.

Das dem ersten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100a-K zugeführte Signal G_{K-1} wird dem Faltungsfilter 102 und über eine Verzögerungsschaltung 109 einem Eingang der Subtrahierschaltung 110 zugeführt. Die in Fig. 1 a angegebenen Abtastwertdichten sind diejenigen pro Dimension des Informationssignals. Speziell hat das Signal G_{K-1} eine Abtastwertdichte in jeder Dimension des Informationssignals, die in der Zeitebene als Abtastrate des Taktes CL_K der Übertragungseinrichtung 100a-K aufgetragen ist. Auf diese Weise wird jeder der durch G_{K-1} gebildeten Abtastwerte vom Filter 102 verarbeitet. Der Sinn des Faltungsfilters 102 besteht in der Reduzierung der Maximalfrequenz seines Ausgangssignals G_K bezüglich der Maximalfrequenz seines Eingangssignals G_{K-1} (wie oben im Zusammenhang mit Fig. 1 bereits erläutert wurde). Die Abtastwertdichte am Ausgang des Filters 102 ist jedoch noch die Abtastrate CL_K , wie in Fig. 1 angegeben ist.

Das Ausgangssignal des Filters 102 wird der Dezimierschaltung 104 als Eingangssignal zugeführt. Die Dezimierschaltung läßt nur bestimmte (nicht alle) der ihrem Eingang vom Filter 102 zugeführten aufeinanderfolgenden Abtastwerte in jeder Dimension zu ihrem Ausgang gelangen. Auf diese Weise wird die Abtastwertdichte in jeder Dimension am Ausgang der Dezimierschaltung 104 bezüglich der Abtastwertdichte in dieser Dimension am Eingang zur Dezimierschaltung 104 verringert. Wie Fig. 1 a zeigt, ist die Abtastdichte CL_{K+1} in jeder Dimension am Ausgang der Dezimierschaltung 104 so, daß sie in der Zeitebene mit einer reduzierten Rate aufgetragen werden kann, die durch den reduzierten Abtastfrequenztakt CL_{K+1} bestimmt ist, welcher am zweiten Eingangsanschluß der unmittelbar folgenden Übertragungseinrichtung 100a-(K + 1) zugeführt worden ist. Weiterhin treten die Abtastwerte reduzierter Abtastwertdichte in jeder Dimension des Signals G_K am Ausgang der Dezimierschaltung 104 bei Auftragung in der Zeitebene in Phase mit dem Auftreten des Abtastfrequenztaktes CL_{K+1} auf, der dem zweiten Eingangsanschluß der unmittelbar folgenden Übertragungseinrichtung 100a-(K + 1) zugeführt wird. In Fig. 1 a wird das Ausgangssignal G_K von der Dezimierschaltung 104 (also das Signal am ersten Ausgangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100a-K) dem ersten Eingangsanschluß der unmittelbar folgenden Übertragungseinrichtung 100a-(K + 1) zugeführt. Damit ist die isochrone Beziehung zwischen den Abtastwerten reduzierter Abtastwertdichte von G_K am ersten Eingangsanschluß mit dem Takt CL_{K+1} reduzierter Abtastfrequenz am zweiten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100a-(K + 1) ähnlich der isochronen Beziehung zwischen der höheren Abtastwertdichte der Abtastwerte von G_{K-1} am ersten Eingangsanschluß und dem höheren Abtastfrequenztakt CL_K am zweiten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100a-K (wie oben erläutert). Eine bevorzugte Ausführungsform der Dezimierschaltung 104 ist, jedoch ohne darauf beschränkt zu sein, eine solche, die in jeder Dimension der Signalinformation die Abtastwertdichte an ihrem Eingang in dieser Dimension um die Hälfte reduziert. In diesem Falle leitet die Dezimierschaltung 104 in jeder Dimension jeden zweiten Abtastwert an ihrem Eingang zu ihrem Ausgang weiter. Für eine eindimensionale Signalinformation ist daher die Abtastwertdichte CL_{K+1} gleich $(1/2)^1$ oder halb so groß wie die Abtastwertdichte CL_K . Für eine zweidimensionale Signalinformation ist die Abtastwertdichte CL_{K+1} in jeder der beiden Dimensionen ein halb, so daß sich eine zweidimensionale Abtastwertdichte von $(1/2)^2$ oder $1/4$ ergibt.

Obgleich das Basisband-Frequenzspektrum von G_K am Eingang der Dezimierschaltung 104 und an ihrem Ausgang das gleiche ist, ergibt das Signal G_K verringerter Abtastwertdichte am Ausgang der Dezimierschaltung 104 einen Verlust einer gewissen Menge der Phaseninformation, die im Signal G_K höherer Abtastwertdichte, das dem Eingang der Dezimierschaltung 104 zugeführt wird, vorhanden ist.

Das Ausgangssignal von der Dezimierschaltung 104 wird außer dem ersten Eingangsanschluß der unmittelbar folgenden Übertragungseinrichtung auch einem Eingang der Expandierschaltung 106 zugeführt. Diese setzt als zusätzlichen Abtastwert eine Null (eine den Pegel 0 darstellende Digitalzahl) an jede Abtastposition des Taktes CL_K , wo ein Abtastwert vom Ausgang der Dezimierschaltung 104 fehlt. Auf diese Weise wird die Abtastdichte am Ausgang der Expandierschaltung 106 wieder auf die Abtastdichte am Eingang zur Dezimierschaltung 104 gebracht. In dem bevorzugten Fall, in welchem die Abtastdichte in jeder Dimension um $1/2$ reduziert wurde, fügt die Expandierschaltung 106 in jeder Dimension eine 0 zwischen jedes Paar benachbarter Abtastwerte in dieser Dimension am Ausgang der Dezimierschaltung 104.

Während die Expandierschaltung 106 die Abtastdichte an ihrem Ausgang gegenüber ihrem Eingang vergrößert, verändert sie in keiner Weise die Information des Signals G_K an ihrem Ausgang hinsichtlich ihrem Eingang. Jedoch hat das Einsetzen von Nullen die Wirkung einer Hinzufügung von Bildern oder wiederholt die Information des Basisbandsignals G_K , die als Oberwellen der Seitenbandfrequenzspektren CL auftreten.

Das Signal G_K am Ausgang der Expandierschaltung 106 gelangt dann durch das Interpolationsfilter, welches ein Tiefpaßfilter ist und das Basisbandsignal G_K durchläßt, jedoch die Oberwellen der Seitenbandfrequenzspektren CL unterdrückt. Daher ersetzt das Filter 108 jeden der nullwertigen Nullabtastwerte durch Interpolationswert-Abtastwerte, von denen jeder einen Wert hat, der durch die jeweiligen Werte der ihn umgebenden informationsenthaltenden Abtastwerte bestimmt wird. Die Wirkung dieser Interpolationswert-Abtastwerte besteht darin, die Hüllkurve der informationsenthaltenden Abtastwerte mit höherer Auflösung zu definieren. Auf diese Weise werden die hochfrequenten Komponenten des Signals G_K am Ausgang der Expandierschaltung 106, die oberhalb des Basisbandes liegen, durch das Interpolationsfilter 108 im wesentlichen entfernt. Jedoch fügt das Interpolationsfilter 108 keinerlei Information zum interpolierten Signal G_K an seinem Ausgang hinzu, die nicht bereits im Signal verringerter Abtastdichte G_K am Ausgang der Dezimierschaltung 104 vorhanden wäre, und kann dies auch nicht. Mit anderen Worten dient die Expandierschaltung 106 der Expandierung der verringerten Abtastdichte in jeder Dimension des Signals G_K wieder zur Abtastdichte in jeder Dimension des Signals G_K am Ausgang des Faltungsfilters 102.

Die Subtrahierschaltung 110 subtrahiert das am Ausgang des Interpolationsfilters 108 erscheinende Signal G_K vom Signal G_{K-1} , das dem ersten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100a-K zugeführt worden ist und als Eingangssignal dem Faltungsfilter 102 und über die Verzögerungsschaltung 109 der Subtrahierschaltung 110 zugeführt worden ist. Die

Verzögerungsschaltung 109 ergibt eine Verzögerung, die gleich der Gesamtverzögerung ist, welche durch das Faltungsfilter 102, die Dezimierschaltung 104, die Expandierschaltung 106 und das Interpolationsfilter 108 bedingt ist. Da beide der Subtrahierschaltung 110 als Eingänge zugeführte Signale in jeder ihrer Dimension dieselbe Abtastdichte CL_K haben und gleich verzögert werden, subtrahiert somit die Subtrahierschaltung 110 den durch die Digitalzahl jedes Abtastwertes des ihr zugeführten Eingangssignals G_K dargestellten Pegel von dem Pegel, der dargestellt wird durch die Digitalzahl des entsprechenden Abtastwertes ihres Eingangssignals G_{K-1} . Daher stellt das Ausgangssignal der Subtrahierschaltung 110 das Laplacesche Signal L_{K-1} dar, welches am zweiten Ausgangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100a-K abgeleitet wird.

Nur diejenigen Signalkomponenten von G_{K-1} , die nicht auch in der Subtrahierschaltung 110 zugeführten Signal G_K vorhanden sind, sind am Ausgang der Subtrahierschaltung 110 im Laplaceschen Signal L_{K-1} enthalten. Eine erste solche Komponente besteht aus dem hochfrequenten Teil des Frequenzspektrums des Signals G_{K-1} , das oberhalb des Durchlaßbandes des Faltungsfilters 102 liegt. Wenn beispielsweise die Übertragungseinrichtung 100a-K der Übertragungseinrichtung 100-1 aus Fig. 1 entspricht, dann enthält also die erste Komponente von L_{K-1} (L_0), diejenigen Frequenzen des Frequenzspektrums von G_{K-1} (G_0), die innerhalb des Durchlaßbandes von f_1 bis f_0 liegen. Außer dieser Komponente enthält das Laplacesche Ausgangssignal L_{K-1} von der Subtrahierschaltung 110 auch eine zweite Fehlerkompensationskomponente aus Frequenzen innerhalb des Durchlaßbandes des Faltungsfilters 102, die im wesentlichen der Phaseninformation entsprechen, die im Signal G_K höherer Abtastdichte am Ausgang des Faltungsfilters 102 enthalten ist und bei dem (oben erläuterten) Dezimierungsprozeß verlorengegangen war. Somit war die verlorene Phaseninformation im (dezimierten) Signal G_K verringerter Abtastdichte, das zum ersten Eingangsanschluß der unmittelbar folgenden Übertragungseinrichtung 100a-(K + 1) weitergeleitet wird, im wesentlichen im Laplaceschen Signal L_{K-1} beibehalten, welches am zweiten Ausgangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100a-K entsteht.

Jede der Übertragungseinrichtungen 100-1... 100-N kann den Aufbau der Übertragungseinrichtung 100a-K gemäß Fig. 1a haben. In diesem Falle hat das Restsignal G_N am Analysatorausgang, welches am ersten Ausgangsanschluß der letzten Übertragungseinrichtung 100-N des Satzes geliefert wird, eine Abtastdichte in jeder seiner Dimensionen, die kleiner (vorzugsweise die Hälfte) als die Abtastdichte in jeder Dimension des Signals G_{N-1} ist, welches ihrem ersten Eingang zugeführt wird. Da jedoch definitionsgemäß keine Übertragungseinrichtung des Satzes der Übertragungseinrichtung 100-N mehr folgt, ist es für die meisten Anwendungen unwichtig (jedoch mit Ausnahme von Anwendungsfällen bei komprimierter Datenübertragung), daß die Abtastdichte des Restsignals G_N kleiner als die Abtastdichte des Signals G_{N-1} ist, welches dem ersten Eingangsanschluß der Übertragungseinrichtung 100-N zugeführt ist. Daher kann in diesem Falle die letzte Übertragungseinrichtung 100-N des Satzes anstelle des gesamten Aufbaus der Übertragungseinrichtungen 100a-K alternativ gemäß Fig. 1c aufgebaut sein (obwohl jede der anderen Übertragungseinrichtungen (100-1... 100 (N-1) des Satzes der ersten Art noch in der Weise wie die Übertragungseinrichtung 100a-K aufgebaut ist). In Fig. 1c wird das Ausgangssignal G_N des Faltungsfilters 102 (welches dieselbe Abtastdichte in jeder seiner Dimensionen hat wie das dem Eingang des Faltungsfilters 102 zugeführte Signal G_{N-1}) nicht durch eine Dezimierschaltung hindurchgeleitet, sondern es wird direkt als Restausgangssignal G_N von der letzten Übertragungseinrichtung 100a-N des Satzes der ersten Art weitergeleitet. Da in diesem Falle keine Dezimierung erfolgt ist, braucht auch keine Expansion und Interpolation vorgenommen zu werden. Daher wird das Signal G_N am Ausgang des Faltungsfilters 102 direkt als Eingangssignal G_N der Subtrahierschaltung 110 zugeführt. Mit anderen Worten unterscheidet sich der Aufbau der Übertragungseinrichtung 100a-N nach Fig. 1c von demjenigen der Übertragungseinrichtung 100a-K nach Fig. 1a durch Weglassen der Dezimierschaltung 104, der Expandierschaltung 106 und des Interpolationsfilters 108. In diesem Falle sorgt die Verzögerungsschaltung 109 für eine Verzögerung, die nur gleich derjenigen infolge des Faltungsfilters 102 ist.

Die in Fig. 1a gezeigte erste Art (oder alternativ die nach den Fig. 1a und 1c) stellt eine Realzeit-Realisierung des Burt-Pyramiden-Algorithmus dar. In ihrer nützlichsten Form hat natürlich jede der Laplaceschen Komponenten am Analysatorausgangssignal, das nach dem Burt-Pyramiden-Algorithmus abgeleitet worden ist, eine Bandbreite von einer Oktave in jeder seiner Richtungen. Diese nützlichste Form des Burt-Pyramiden-Algorithmus wird bei der Realzeit-Realisierung gemäß Fig. 1a dadurch erreicht, daß man den Abtastfrequenztakt CL_{K+1} in jeder Dimension halb so groß wie den Abtastfrequenztakt CL_K in dieser Dimension macht.

Es sei nun ein anderer Typ einer Hierarchie-Pyramide beschrieben, die eine Alternative zur Burt-Pyramide darstellt. Diese alternative Pyramide wird als Filter-Subtrahier-Dezimier-Pyramide (FSD-Pyramide) bezeichnet. Zwar besitzt diese FSD-Pyramide bestimmte gewünschte Eigenschaften der Burt-Pyramide nicht, doch besitzt sie bestimmte andere erwünschte Eigenschaften, welche die Burt-Pyramide ihrerseits nicht hat. Eine erwünschte Eigenschaft der Burt-Pyramide (welches die FSD-Pyramide nicht hat) sie beispielsweise ihre inhärente Kompensation zufälliger Aliasing-Frequenzen bei der Synthese des rekonstruierten Originalsignals, die in jeder der jeweiligen Laplaceschen Komponenten und Restkomponenten in den analysierten Ausgangssignalen auftreten. Bei bestimmten Anwendungen erfordert dagegen die FSD-Pyramide einen geringeren apparativen Aufwand und läßt sich daher billiger als die Burt-Pyramide realisieren.

Die erfindungsgemäße Signalübertragungseinrichtung mit der Pipeline-Struktur ist auch nützlich für die Realzeit-Realisierung der FSD-Pyramide. Die FSD-Pyramide umfaßt eine zweite Art oder Spezies des strukturellen Aufbaus für die einzelnen Abtastsignal-Übertragungseinrichtungen 100-a...100-N des Satzes, welche in Fig. 1 gezeigt sind, unter Verwendung von Übertragungseinrichtungen oder -stufen wie die Stufen 100b-K gemäß Fig. 1b (anstelle der bei der Burt-Pyramide verwendeten oben beschriebenen Übertragungseinrichtungen 100a-K).

Die Übertragungseinrichtung 100b-K gemäß Fig. 1b zeigt eine digitale Ausführung der oben erwähnten zweiten Art, bei welcher jede einzelne Übertragungseinrichtung 100-1... 100 (N-1) des Satzes nach Fig. 1 die in Fig. 1b gezeigte Übertragungseinrichtung wie 100b-K und 100b-(K + 1) verwendet. Weiterhin stellt die Übertragungseinrichtung 100b-(K + 1) nach Fig. 1b diejenige der Übertragungseinrichtungen 100-1... 100-N des Satzes dar, welche unmittelbar auf die Übertragungseinrichtung 100b-K folgt. Wie in Fig. 1b gezeigt ist, weist die Übertragungseinrichtung 100b-K ein digitales Faltungsfilter 102 mit nur einem Abgriff, eine Dezimierschaltung 104, eine Verzögerungsschaltung 109 und eine Subtrahierschaltung 110 auf. Der strukturelle Aufbau der Übertragungseinrichtung 100b-K der zweiten Art gemäß Fig. 1b ist ähnlich demjenigen der Übertragungseinrichtung 100a-K (Fig. 1a) der ersten Art, außer daß das Signal G_{K-1} (mit einer Abtastdichte CL_K) dem Filter 102 als ein Eingangssignal über die Verzögerungsschaltung 109 und der Subtrahierschaltung 110 als Eingangssignal zugeführt wird und daß das Ausgangssignal G_K (ebenfalls mit der Abtastdichte CL_K) durch die Dezimierschaltung 104 geschickt wird, um jede Dimension der Abtastdichte des

Signals G_K auf CL_{K+1} zu reduzieren, ehe das Signal G_K reduzierter Abtastdichte dem ersten Eingangsanschluß der unmittelbar folgenden Übertragungseinrichtung 100b-(K + 1) zugeführt wird.

Die Übertragungseinrichtung 100b-K der zweiten Art unterscheidet sich von der Übertragungseinrichtung 100a-K der ersten Art dadurch, daß dem G_K -Eingang der Subtrahierschaltung 110 das Signal G_K der Abtastdichte CL_L (in jeder Dimension), welches vom Ausgang des Filters 102 auf den Eingang der Dezimierschaltung 104 gegeben wird, unmittelbar zugeführt wird. Genauer ausgedrückt unterscheidet sich dies von der Übertragungseinrichtung 100a-K der ersten Art, welche das Signal G_K verringerter Abtastdichte CL_{K+1} (in jeder Dimension) am Ausgang der Dezimierschaltung 104 verwendet. Die erste Art benötigt also die Expandierschaltung 106 und das Interpolationsfilter 108 zur Wiederherstellung des Signals G_K auf seine Abtastdichte CL_K (in jeder Dimension) ehe es dem G_K -Eingang der Subtrahierschaltung 110 zugeführt wird. Da das Eingangssignal G_K der Subtrahierschaltung 110 der Übertragungseinrichtung 100b-K der zweiten Art nicht von einer Quelle dezimierter Abtastdichte abgeleitet wird, wird keine Expandierschaltung 106 und kein Interpolationsfilter 108 in der Übertragungseinrichtung 100b-K benötigt. Somit liefert gemäß Fig. 1 die Verzögerungsschaltung 109 eine Verzögerung, die nur gleich der durch das Faltungsfilter 102 bedingten Verzögerung ist. Weiterhin besteht das Ausgangssignal L_{K-1} der Subtrahierschaltung 110 aus nur denjenigen relativ hochfrequenten Komponenten des Frequenzspektrums des Signals G_{K-1} , die nicht auch im Signal G_K am Ausgang des Faltungsfilters 102 vorhanden sind.

Gemäß der zweiten Art kann die letzte Übertragungseinrichtung 100-N des Satzes auch den strukturellen Aufbau der Übertragungseinrichtung 100b-K haben oder alternativ den strukturellen Aufbau gemäß Fig. 1c.

Die jeweiligen Ausführungen der ersten und zweiten Art gemäß den Figuren 1a und 1b sind digitale Ausführungen. Bei solchen digitalen Ausführungsformen wird ein Analog/Digital-Konverter anfangs benutzt, um ein analoges Signal in Digitalpegel-Abtastwerte umzuwandeln, wobei der Pegel jedes Abtastwertes normalerweise durch eine Mehrbit-Binärrzahl dargestellt wird. Es ist jedoch nicht wesentlich, daß die erste oder zweite Art oder Spezies der erfindungsgemäßen Anordnung in digitaler Form realisiert wird. Abtastsignal-Übertragungseinrichtungen mit ladungsgekoppelten Elementen (CCD-Schaltungen) sind im Stande der Technik bekannt. Beispielsweise können CCD-Transversalfilter, etwa Split-Gate-Filter, als Faltungsfilter oder Interpolationsfilter entworfen werden. CCD-Signale bestehen aus einer Serie diskreter Abtastwerte, jedoch hat jeder Abtastwert einen analogen Amplitudenpegel. Somit läßt sich die Erfindung entweder in digitaler oder in analoger Form ausführen. Die Filtercharakteristika eines Filters mit Abgriffen hängt von Faktoren ab, wie der Anzahl der Abgriffe, der effektiven Zeitverzögerung zwischen den Abgriffen und den spezifizierten Amplitudenpegeln und der Polarität der jeweiligen Gewichtsfaktoren, die den einzelnen Abgriffen zugeordnet sind. Zu Veranschaulichungszwecken sei angenommen, daß das Faltungsfilter 102 ein eindimensionales Filter mit fünf Abgriffen ist. Fig. 2 zeigt ein Beispiel für die spezifizierten Größenpegel der Gewichtsfaktoren, die alle dieselbe Polarität haben (in Fig. 2 positiv) und jeweils den fünf einzelnen Abgriffen zugeordnet sind. Sie zeigt auch die defekte Zeitverzögerung zwischen jedem Paar benachbarter Abgriffe. Genauer gesagt ist, wie Fig. 2 andeutet, die effektive Zeitverzögerung zwischen jedem Paar benachbarter Abgriffe $1/CL_K$, also der Abtastperiode, welche durch den Abtastfrequenztakt CL_K definiert ist, welcher dem Faltungsfilter 102 jeder einzelnen der Übertragungseinrichtungen 100-1 ... 100-N der ersten oder zweiten Spezies (wie in den Fig. 1a, 1b und 1c gezeigt) individuell zugeführt wird. Somit ist der Absolutwert der Zeitverzögerung CL_K des Faltungsfilters 102 jeder Übertragungseinrichtung 100-1 ... 100-N größer als diejenige der unmittelbar vorangehenden Übertragungseinrichtung des Satzes.

Gemäß Fig. 2 haben die zu den fünf Abgriffen gehörigen Gewichtsfaktoren alle positive Polarität und spezifizierte Größenpegel (spezielle Werte), welche um den dritten Abgriff symmetrisch verteilt sind. Genauer gesagt, haben die im Ausführungsbeispiel nach Fig. 2 dem dritten Abgriff zugeordneten Gewichtsfaktoren spezifizierte Werte von 6, die jeweiligen Gewichtsfaktoren des zweiten und vierten Abgriffs haben denselben spezifizierten niedrigeren Wert 4, und die Gewichtsfaktoren jeweils am ersten und fünften Abgriff haben denselben noch niedrigeren spezifizierten Wert 1. Die Hüllkurve 202 der Gewichtsfaktoren 200 definiert die Kern- oder Rumpffunktion (und damit die Form der Filterkennlinie in der Frequenzebene) des Faltungsfilters 102 jeder der Übertragungseinrichtungen 100-1 ... 100-N des Satzes. Weil alle Abtastwerte 200 erstens dieselbe Polarität (gemäß Fig. 2 positiv) haben, zweitens symmetrisch um den Mittelabgriff (dritter Abgriff) liegen und drittens der Abtastwert um so kleiner wird, je weiter er vom Mittelabtastwert wegliegt, hat das Faltungsfilter 102 eine Tiefpaßfilterkennlinie in jeder der jeweiligen Übertragungseinrichtungen 100-1 ... 100-N des Satzes. Während in Fig. 2 alle Gewichtsfaktoren die gleiche (positive) Polarität haben, muß dies bei einem Tiefpaßfilter nicht so sein. Einige der Gewichtsfaktoren können die entgegengesetzte (negative) Polarität haben, solange die algebraische Summe der Gewichtsfaktoren verschieden von Null ist. Die Kernfunktionsform (beispielsweise etwa die Einhüllende 202 nach Fig. 2) kann für alle Faltungsfilter 102 der jeweiligen Übertragungseinrichtungen des Satzes die gleiche sein, so daß die relativen Tiefpaßfrequenzcharakteristika (die Form der Filterkennlinien in der Frequenzebene) für alle Filter 102 gleich ist (obwohl dies nicht notwendig ist). Der Absolutwert der nominellen Tiefpaßgrenzfrequenz des Filters hat jedoch eine Bemessung für jede einzelne der Übertragungseinrichtungen, die von der Abtastfrequenzperiode $1/CL_K$ für dieses Filter abhängt. Durch geeignete Wahl der Pegel oder Größe der Gewichtsfaktoren 200 (welche nicht die speziellen Werte 1, 4 und 6 gemäß Fig. 2 haben), kann man eine nominelle Tiefpaßgrenzfrequenz für das Signal G_K am Ausgang des Faltungsfilters 102 erreichen (welches in jeder Dimension eine Abtastdichte CL_K hat), die im wesentlichen die Hälfte der Maximalfrequenz (oder im Falle von G_0 die höchstmögliche interessierende Frequenz f_0) des Eingangssignals G_{K-1} für das Faltungsfilter ist. In diesem Falle reduziert die Dezimierschaltung 104 in jeder Dimension die eindimensionale Abtastdichte des Signals G_K auf $CL_K/2$ durch Unterdrückung jedes zweiten Abtastwertes in dieser Dimension. Jedoch bleibt das Signal G_K (welches durch die Abtasthüllkurve 202 bestimmt ist) am Ausgang der Dezimierschaltung 104 im wesentlichen dasselbe wie an ihrem Eingang (obwohl ein gewisser Verlust an Phaseninformation wegen der niedrigeren Abtastdichte am Ausgang der Dezimierschaltung 104 auftritt).

Es seien nun bestimmte bevorzugte Ausführungen der Realzeit-Realisierung der Burt-Pyramide beschrieben, welche die erste Spezies (Fig. 1a) der Art nach Fig. 1 bilden.

Hierbei wird auf Fig. 3 Bezug genommen, welche ein Systemblockschaltbild eines Spektralanalysators, einer Spektrumsänderungsschaltung und einer Signalsynthetisierschaltung zeigt, die ein elektrisches Signal verarbeiten, welches eine eindimensionale Information darstellt (wie beispielsweise etwa irgendein sich zeitlich verändernde Information enthaltender Signaltyp).

Gemäß Fig. 3 wird das elektrische Originalsignal, dessen Spektrum analysiert werden soll, in analoger Form einem A/D-Konverter 305 zur Digitalisierung zugeführt. Das aufgrund der Abtastung erhaltene digitale Ausgangssignal des

A/D-Konverters 305 ist mit G_0 bezeichnet. Das höherfrequente Ausgangssignal aufgrund von G_0 , ein Hochpaßspektrum L_0 , wird in einer Analysatorstufe 310 nullter Ordnung extrahiert, wobei G_1 übrig bleibt, ein tiefpaßgefiltertes Ausgangssignal aufgrund von G_0 . Der höherfrequente Anteil von G_1 , ein Bandpaßspektrum L_1 , wird in einer Analysatorstufe 315 erster Ordnung extrahiert, so daß G_2 verbleibt, ein tiefpaßgefiltertes Ausgangssignal aufgrund von G_1 . Der höherfrequente Anteil von G_2 , ein Bandpaßspektrum L_2 unterhalb des Bandpaßspektrums L_1 wird in einer Analysatorstufe 320 zweiter Ordnung extrahiert, wobei G_3 übrig bleibt, ein tiefpaßgefiltertes Ausgangssignal aufgrund von G_2 . Der höherfrequente Anteil von G_3 , ein Bandpaßspektrum L_3 unterhalb der Bandpaßspektren L_1 und L_2 wird in einer Analysatorstufe 325 dritter Ordnung extrahiert, wobei G_4 übrig bleibt, ein tiefpaßgefiltertes Ausgangssignal aufgrund von G_3 . Der höherfrequente Anteil von G_4 , ein Bandpaßspektrum L_4 unterhalb des Bandpaßspektrums L_3 , wird in einer Analysatorstufe 330 vierter Ordnung extrahiert, wobei G_5 übrig bleibt, ein tiefpaßgefiltertes Ausgangssignal aufgrund von G_4 . Der höherfrequente Anteil von G_5 , ein Bandpaßspektrum unterhalb der anderen Bandpaßspektren wird in einer Analysatorstufe 335 fünfter Ordnung extrahiert, wobei G_6 übrig bleibt, ein tiefpaßgefiltertes Restausgangssignal aufgrund von G_5 . Das Ausgangssignal G_6 ist praktisch ein sechsmal tiefpaßgefiltertes Ausgangssignal aufgrund des Originalsignals G_0 .

Die Analysatorstufen 310, 315, 320, 325, 330 und 335 enthalten Eingangstiefpaßfilterstufen 311, 316, 321, 326, 331 bzw. 336 mit zunehmend schmalere Durchlaßbandbreiten. Die tiefpaßgefilterten Ausgangssignale dieser Filter 311 bis 336 sind genügend schmal als ihre Eingangssignale, so daß sie mit reduzierter Rate neu abgetastet werden können, ehe sie zur nächsten Analysatorstufe weitergegeben werden. Die Reduzierung der Abtastwerte erfolgt durch Selektion auf einer regelmäßigen Basis (etwa durch Dezimierung) in Dezimierungsschaltungen 312, 317, 322, 327, 332, 337, welche auf die Filter 311, 316, 321, 326, 331 bzw. 336 folgen. Bei der oktavenweisen Spektralanalyse, die besonders zweckmäßig ist, wird durch den Dezimierungsprozeß jeder zweite Abtastwert unterdrückt.

Die höherfrequenten Anteile des jeder Analysatorstufe zugeführten Eingangssignals werden extrahiert, indem vom Eingangssignal die niedrigfrequenten Anteile weggenommen werden. Der dezimierte niedrigerfrequente Anteil des Eingangssignals führt auf die Probleme, unerwünschterweise in einer Abtastmatrix geringerer Auflösung als das Eingangssignal vorzuliegen und unerwünschterweise gegenüber dem Eingangssignal verzögert zu sein. Das erste dieser Probleme wird in Expansionsschaltungen 313, 318, 323, 328, 333, 338 gelöst durch Einsetzen von Nullen an die fehlenden Abtastpunkte in der Abtastmatrix des Tiefpaßfilter-Ausgangssignals und anschließende Eliminierung der gleichzeitig eingeführten zufälligen Oberwellenspektren durch Tiefpaßfilterung. Das zweite Problem wird gelöst durch Verzögerung der Eingangssignale der Analysatorstufen, ehe von ihnen die expandierten Tiefpaßfilter-Ausgangssignale subtrahiert werden, welche von den Expansionsschaltungen 313, 318, 323, 333, 338 geliefert werden.

Der Verzögerungs- und Subtraktionsvorgang erfolgt in Schaltungen 314, 319, 324, 329, 334, 339, die jeweils in den Analysatorstufen 310, 315, 320, 325, 330, 335 enthalten sind. (In bestimmten Fällen können Bauteile vorteilhafterweise von den Eingangstiefpaßfiltern und der Verzögerungs- und Subtraktionsschaltung jeder Analysatorstufe gemeinsam benutzt werden, wie noch beschrieben werden wird.)

Die soeben beschriebene Spektralanalyse hat eine Pipeline-Natur, und es erfolgt eine zunehmend längere Zeitverschiebung der Abtastwerte L_1 , L_2 , L_3 , L_4 und L_5 gegenüber den Abtastwerten L_0 . Der hier benutzte Ausdruck „Zeitverschiebung“ bezieht sich auf differentielle Zeitverzögerungen vorbestimmter bekannter Beträge, die zwischen den entsprechenden Abtastwerten der informationsmäßig zusammenhängenden parallelen Signale auftreten, etwa zwischen entsprechenden Abtastwerten der analysierten Ausgangssignale L_0 , L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , L_5 und G_6 des in Fig. 3 gezeigten Spektralanalysators. Die noch zu beschreibende Signalsynthese aus den Spektrumsverfahren erfordert eine entgegengesetzte Zeitverschiebung entsprechender Sätze von Abtastwerten. Dies kann mit Hilfe von Verzögerungsleitungen 340, 341, 342, 343 und 344 (typischerweise in Form von Schieberegistern oder anderen Arten von Speichern, welche die äquivalente Funktion ausführen, also ein serienweise einzuschreibender und auszulesender Speicher) für die Abtastwerte L_0 , L_1 , L_2 , L_3 und L_4 erfolgen, ehe diese in den Schaltungen 345, 346, 347, 348 bzw. 349 verändert werden, wie dies Fig. 3 zeigt. Alternativ können die Spektren verändert und der zum veränderten Spektrum gehörige Abtastwert zunehmend verzögert werden. Ob die Verzögerung kann in verschiedener Weise aufgeteilt und vor sowie nach der Veränderung erfolgen, um beispielsweise Spektrumsveränderungen zeitlich parallel durchzuführen. Verständlicherweise können innerhalb der Veränderungsschaltungen 345, 346, 347, 348 und 349 selbst unterschiedliche Verzögerungen als Teile der insgesamt unterschiedlichen Verzögerungserfordernisse in manchen Beispielen verwendet werden.

Die Spektren L_5 und G_6 werden in Veränderungsschaltungen 350 und 351 verändert. Bei einigen Signalverarbeitungsanwendungen mögen die Veränderungsschaltungen 345 bis 351 nicht benötigt werden und durch jeweils unmittelbare Verbindungen ersetzt werden. Die soweit beschriebenen Spektralanalyseverfahren können durch Verwendung zusätzlicher Analysatorstufen erweitert oder bei Benutzung von weniger Analysatorstufen beschnitten werden. In solchen Fällen ist das restliche Tiefpaßspektrum G_0 am Ende der Spektralanalyse nicht G_6 .

Bei der Signalsynthese durch Rekombination der Spektralanalysekomponenten, möglicherweise in veränderter Form, muß die Dezimierung der Abtastmatrix von Analysatorstufe zu Analysatorstufe rückgängig gemacht werden, damit die Spektralabtastwerte mit Hilfe der Addierer 353, 355, 357, 359, 361, 363 summiert werden können. Dies erfolgt zusätzlich zur Korrektur der Zeitverschiebung in den Verzögerungsschaltungen 340 bis 344. Die Dezimierung wird rückgängig gemacht mit Hilfe von Expansionsschaltungen 352, 354, 356, 358, 360 und 362, welche im wesentlichen gleich den Expansionsschaltungen 338, 333, 328, 323, 318 bzw. 313 sind. Durch Multiplexbetrieb kann eine einzige Schaltung eine doppelte Aufgabe erfüllen. Das restliche Tiefpaßspektrum G_0 wird zeitlich gegenüber dem benachbarten Bandpaßspektrum L_{0-1} verschoben, so daß seine Expandierung seinen Abtastwert zeitlich mit demjenigen des Signals L_{0-1} ausrichtet. G_0 ist in Fig. 3 G_6 , welches in der Expansionsschaltung 52 verändert (neu G_6') und expandiert und dann in der Addierschaltung 353 zum geänderten Signal L_{0-1} (L_5 in Fig. 3) hinzuaddiert ist, so daß ein synthetisiertes neues Signal G_{0-1} (L_5 in Fig. 3) hinzuaddiert ist, so daß ein synthetisiertes neues Signal G_{0-1} (neu G_5') entsteht. Das Ausgangssignal der Addierschaltung 353 wird in die Expansionsschaltung 354 expandiert und in der Additionsschaltung 355 zum verzögerten und geänderten Signal L_4 hinzuaddiert, so daß das neue Signal G_4 , synthetisiert wird. Das Ausgangssignal der Addierschaltung 355 wird in der Expansionsschaltung 354 expandiert und in der Addierschaltung 357 zum verzögerten veränderten Signal L_3 hinzuaddiert, so daß das neue Signal G_3 , synthetisiert wird. Das Ausgangssignal der Addierschaltung 357 wird in der Expansionsschaltung 358 expandiert und in der Addierschaltung 359 zum verzögerten und veränderten Signal L_2 zum synthetisierten neuen Signal G_2 , hinzuaddiert. Das Ausgangssignal der Addierschaltung 359 wird in der Expansionsschaltung 60

expandiert und in der Additionsschaltung 361 zum verzögerten und veränderten Signal L_2 zum synthetisierten neuen Signal G_1 , hinzuaddiert. Schließlich wird das Ausgangssignal der Addierschaltung 361 in der Expansionsschaltung 362 expandiert und in der Addierschaltung 363 zum synthetisierten neuen Signal G_0' addiert. Die neuen Signale G_0' , G_1' , G_2' , G_3' , G_4' , G_5' und G_6' sind in der Signalsynthesierungsschaltung gemäß Fig. 3 durch Striche gekennzeichnet. Das neue Signal G_0 , kann gewünschtenfalls mit Hilfe eines (nicht dargestellten) Digital/Analog-Konverters in analoge Form umgewandelt werden.

Die Expandierungen in den Schaltungen 352, 354, 356, 358, 360, 362 ergeben bei jedem Schritt des Syntheseverfahrens eine Unterdrückung oberhalb des Bandes. Wenn die Bandpaßspektren nicht breiter als eine Oktave sind, dann ergibt dies eine Unterdrückung sämtlicher Harmonischer, die von den Veränderungsschaltungen 345 bis 351 erzeugt worden sind, welche andernfalls die Signalsynthese durch Einführung zufälliger „alias“-Frequenzen (Fremdfrequenzen) beeinträchtigen würden. Fig. 4 zeigt den Aufbau der Spektralanalysatorstufe für eine eindimensionale Information genauer, etwa die für die oktavenweise Spektralanalyse verwendeten Stufen 310, 315, 320, 325, 330 oder 335. Die Stufe ist die Spektralanalysatorstufe K-ter Ordnung, wobei K Null oder eine positive ganze Zahl ist. Im Fall einer Spektralanalysatorstufe nullter Ordnung hat die Taktfrequenz für diese Stufe eine Rate R für die Abtastung des Originalingangssignals G_0 , dessen Spektrum zu analysieren ist. Ist K eine positive ganze Zahl, dann verringert sich die Taktfrequenz um 2^K .

Das Eingangssignal G_K wird der Spektralanalysatorstufe nach Fig. 4 als Eingangssignal eines Schieberegisters 470 mit M Stufen zugeführt, das mit einer Taktfrequenz von $R/2^K$ getaktet wird. Die $(M + 1)$ Abtastwerte mit zunehmend längerer Verzögerung, die am Eingang und den Ausgängen des Schieberegisters 470 vorhanden sind, bilden jede seiner Ausgangsfunktionen als Mehrabgriffs-Verzögerungsleitung eines Tiefpaß-Verzögerungsleitungsfilters. Die Abtastwerte werden in der Schaltung 471 gewichtet und summiert, um Abtastwerte eines lineraphasigen Tiefpaßfilter-Ausgangsmaterials $G_{(K+1)}$ zu werden. Mit Ausnahme der Eingangsstufe dezimiert in allen Analysatorstufen, in denen K größer als 0 ist, die halbierte Taktrate (verglichen mit der Taktrate der vorangehenden Stufen), die im anfänglichen Schieberegister 70 und den Addierern der Gewichtungs- und Summierungsschaltung 471 verwendet wird, das Signal $G_{(K+1)}$ gegenüber dem Signal G_K . Das Ausgangssignal $G_{(K+1)}$ wird als ein Eingangssignal einem Multiplexer 472 zugeführt, der mit einer Umschaltrate von $R/2^K$ abwechselnd sein Eingangssignal G_{K+1} bzw. ein Nullsignal auswählt und ein Signal $G_{(K+1)}^*$ erzeugt.

Das Signal $G_{(K+1)}^*$ hat ein Basisbandfrequenzspektrum, welches doppelt so groß wie das Spektrum von $G_{(K+1)}$ ist und mit einem harmonischen Doppelseitenbandspektrum mit unterdrücktem Träger mit einer Spitzenamplitude $G_{(K+1)}$ vermischt ist. Nebenbei sei bemerkt, daß die nachfolgende Spektralanalysatorstufe als Eingangssignal ein zeitlich geeignet liegendes Signal $G_{(K+1)}^*$ anstatt des Signals $G_{(K+1)}$ erhalten kann. Das Signal $G_{(K+1)}^*$ wird als Eingangssignal einem anderen Schieberegister 473 mit mehreren Stufen zugeführt (die Stufenzahl kann gleich oder verschieden von M sein), welches mit einer Rate von $R/2^K$ getaktet wird. Die vom Eingangssignal und den Ausgangssignalen von jeder Stufe des Schieberegisters 473 gebildeten $(M + 1)$ Abtastwerte werden einer anderen Gewichtungs- und Summierschaltung 474 zugeführt, die gleich der Schaltung 471 ist. Die Schaltung 474 unterdrückt ein erstes harmonisches Spektrum von $G_{(K+1)}^*$ und liefert das Signal $G_{(K+1)}$ in expandierter Form als Abtastmatrix mit ebensovielen Abtastwerten wie die Abtastmatrix von G_K .

In einer Addierschaltung 475 wird diese expandierte Form von G_{K+1} subtrahiert von G_K , nachdem G_K im Schieberegister 470 und einer Verzögerungsschaltung 476 verzögert worden ist. Die Verzögerung des Signals G_K um M-Zyklen im Schieberegister 470 kompensiert die M/2-Zyklusverzögerung des mittleren Abtastwertes für die Gewichtungs- und Summierschaltung 471 hinsichtlich des Eingangssignals G_K für die Spektralanalysatorstufe nach Fig. 4 und hinsichtlich der gleichen M/2-Periodenverzögerung zwischen $G_{(K+1)}^*$ und dem mittleren Abtastwert für die Gewichtungs- und Summierschaltung 474. Die Verzögerungsschaltung 476 bringt eine Verzögerung zur Kompensation von Verzögerungen, die bei der Addition in den Gewichtungs- und Summierschaltungen 471 und 474 auftreten, und die Verzögerungsschaltung 476 kann einfach durch eine Verlängerung des Schieberegisters 470 um die erforderliche Anzahl weiterer Stufen realisiert werden. Das Ausgangssignal L_K von der Addierschaltung 475 ist eine der gesuchten Spektralanalysekomponenten, deren untere Frequenzgrenze durch die Tiefpaßfilterung in der K-ten Spektralanalysatorstufe gemäß Fig. 4 bestimmt wird und dessen obere Frequenzgrenze durch die Tiefpaßfilterung in der vorangehenden Spektralanalysatorstufe, falls eine solche vorhanden ist, bestimmt ist.

In Fig. 5 ist eine Möglichkeit zur Verringerung der Anzahl der Schieberegisterstufen, die im erfindungsgemäßen Spektrumanalysator verwendet werden, dargestellt. Die Proben zur Definition von $G_{(K+1)}^*$, die gewichtet und summiert werden, um die Tiefpaßfilterung zu bewirken, die der Interpolation von $G_{(K+1)}$ zugeordnet ist, werden von der mit Abgriffen versehenen Verzögerungsleitungsanordnung gewonnen, die zur Unterstützung der anfänglichen Tiefpaßfilterung von $G_{(K+1)}$ in der folgenden Spektralanalysatorstufe dient, und nicht durch Verwendung des Schieberegisters 473.

Fig. 5 zeigt anhand eines Beispiels, wie dies etwa zwischen der Analysatorstufe nullter Ordnung, die zur Erzeugung von L_0 verwendet wird, und der nachfolgenden Analysatorstufe durchgeführt wird. Die Elemente 570-0, 571-0, 575-0 und 576-0 sind diejenigen Elemente in der Spektralanalysatorstufe nullter Ordnung, welche den Elementen 470, 471, 475 und 476 der Spektralanalysatorstufe K-ter Ordnung nach Fig. 4 entsprechen. Die Elemente 570-1 und 571-1 der Spektralanalysatorstufe erster Ordnung sind analog den Elementen 570-0 und 571-0 der Spektralanalysatorstufe nullter Ordnung, außer daß sie mit der halben Rate getaktet werden. Die vier vom Eingang und den ersten drei Ausgängen des Schieberegisters 570-1 entnommenen Abtastwerte werden parallel mit einer Taktrate $R/2$ zugeführt. Zwischen sie werden Nullen eingeschaltet, und die Ergebnisse werden in zwei Phasenbeziehungen durch ein siebenstufiges Filtergewichtsmuster ABCDCBA gewichtet, um ein paar aufeinanderfolgender Abtastwerte zu erzeugen, die in der Subtrahierschaltung 575-0 mit der Taktrate R vom verzögerten Signal G_0 subtrahiert werden.

Der frühere Abtastwert jedes Paares aufeinanderfolgender Abtastwerte, die vom verzögerten Signal G_0 subtrahiert werden sollen, wird durch Multiplizieren des Eingangssignals des Schieberegisters 570-1 und seiner ersten drei Ausgangssignale mit Hilfe der Filtergewichte A, C, C und A in den Gewichtsschaltungen 580, 581, 582 und 583 und anschließendes Summieren der gewichteten Abtastwerte in der Summierschaltung 587 erhalten. Die dazwischengefügten Nullen würden bei dieser Positionierung von G_1 gegenüber dem Filtergewichtsmuster an die mit B, D, B zu gewichtenden Stellen fallen. Der spätere Abtastwert jedes Paares aufeinanderfolgender Abtastwerte, die vom verzögerten Signal G_0 zu subtrahieren sind, wird erhalten durch Multiplikation des Eingangssignals des Schieberegisters 570-1 und seiner ersten beiden Eingangssignale mit den Filtergewichten B, D und B in den Gewichtsschaltungen 584, 585 und 586 und anschließendes Summieren der gewichteten Abtastwerte in der Summierschaltung 588. Die dazwischengefügten Nullen würden an Stellen fallen, die für diese Positionierung von G gegenüber dem Filtergewichtsmuster mit A, C, C, A zu gewichten sind. Ein mit der Taktrate R betriebener Multiplexer 589 wählt abwechselnd zwischen Abtastwerten an den Ausgängen der Summierschaltungen 587 und 588 aus und liefert einen

Die Kompander 1110, 1111, 1112, 1113, 1114, 1115 und 1116 arbeiten mit den Spektren $L_0, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$ und G_6 , nachdem diese unter Verwendung von Verzögerungsschaltungen 110, 1101, 1102, 1103, 1104 und 1106 zur zeitlichen Ausrichtung ihrer jeweiligen Abtastwerte differentiell verzögert worden sind. Die Verzögerungsschaltungen 1120, 1121, 1122, 1123, 1124 und 1125 verschieben dann die komprimierten Signale $L'_0, L'_1, L'_2, L'_3, L'_4, L'_5$ und G'_6 in geeigneter Weise für den Signalsynthesevorgang unter Verwendung der Elemente 352 bis 363 gemäß Fig. 3.

Die Verzögerungen in den Verzögerungsschaltungen 1106 und 1125 betragen im wesentlichen $M/2$ -Zyklen der $R/2^K$ -Taktrate, wobei K fünf oder 16 M -Zyklen der Basistaktrate R ist, und diese Verzögerung tritt auf bei der Zusammenstellung der Abtastwerte für die Gewichtung- und Summierungsschaltung 474 der letzten Spektralanalysatorstufe 335. Diese Verzögerung von 16 M -Zyklen wird um die Verzögerungszeit D_1 verlängert, um die Additionszeiten in den Expansionsschaltungen 338 und 352 auszugleichen, und sie wird durch eine Verzögerungszeit D_2 weiter verlängert, um die zusätzlichen Zeiten in der Verzögerungs- und Subtrahierschaltung 334 und in der Addierschaltung 353 auszugleichen. Es sei angenommen, daß alle Additionsvorgänge mit der Basistaktrate R ausgeführt werden und D_1 und D_2 lassen sich durch Zahlen dieser Taktzyklen ausdrücken.

Die Verzögerung in der Verzögerungsschaltung 1104 ist länger als $16M + D_1 + D_2$ Zyklen der Taktrate R , und zwar um die Differenz zwischen der Zeit, die zwar zur Entwicklung von L_5 aus G_3 benötigt wird, und der Zeit, die zur Entwicklung von L_4 aus G_5 benötigt wird. Die zur Entwicklung von L_5 aus G_5 benötigte Zeit beträgt M Zyklen von $R/2^5$ -Taktraten, um zweimal Abtastwerte zur Gewichtung und Summation zu sammeln, oder 32 M -Zyklen der Basistaktrate plus $2D_1$ für zwei Sätze von Abtastwertsummationen plus D_2 für die Abtastsubtraktion. Die für die Entwicklung von L_4 aus G_5 benötigte Zeit $M/2$ Zyklen von $R/2^4$ -Taktraten zum Sammeln von Abtastwerten zur Gewichtung und Summation oder 8 M -Zyklen der Basistaktrate plus D_1 zur Abtastwertsummation plus D_2 zur Abtastwertsubtraktion. Man braucht $24M + D_1$ Zyklen der Basistaktrate zusätzliche Verzögerung, um die Abtastwerte L_4 zeitlich mit den Abtastwerten L_5 auszurichten. Somit hat die Verzögerungsschaltung 104 eine Gesamtverzögerung von $40M + 2D_1 + D_2$ Zyklen der Basistaktrate R . Ähnliche Berechnungen ergeben, daß die Zyklen der Basistaktrate R , um welche die Abtastwerte in den Verzögerungsschaltungen 103, 102, 101 und 100 verzögert werden, $52M + 3D_1 + D_2$, $58M + 4D_1 + D_2$, $61M + 5D_1 + D_2$ bzw. $(62\frac{1}{2})M + 6D_1 + D_2$ betragen.

Die von der Abtastschaltung 1124 zusätzlich zu der Verzögerung durch die Verzögerungsschaltung 1125 benötigte Verzögerung ist diejenige Zeit, die für die Expansion in der Schaltung 354 und die für die Addition in der Addierschaltung 55 benötigte Verzögerung D_2 gebraucht wird. Die erstgenannte Verzögerung beträgt $M/2$ Zyklen der Taktrate $R/2^4$ zum Sammeln von Abtastwerten für die Gewichtung und Summierung, 8 M -Zyklen der Basistaktrate R plus der für die Summierung beim Gewichtungs- und Summierungsprozeß benötigten Verzögerung D_1 . Die Gesamtverzögerung in der Verzögerungsschaltung 1124 beträgt dann $24M + D_1 + D_2$. Durch ähnliche Berechnungen ergeben sich die Gesamtverzögerungen in den Verzögerungsschaltungen 1123, 1122, 1121 und 1120 in Zyklen der Basistaktrate R ausgedrückt zu $28M + 3D_1 + 3D_2$, $30M + 4D_1 + 4D_2$, $31M + 5D_1 + 5D_2$ bzw. $(31\frac{1}{2})M + 6D_1 + 6D_2$.

Ähnliche Berechnungen lassen sich zur Bestimmung der Gesamtverzögerungen in den Verzögerungsschaltungen 340 bis 344 der Fig. 3 verwenden unter der Annahme, daß die Änderungsschaltungen 345 bis 351 alle dieselben Verzögerungen haben. Die Verzögerungsschaltungen 340, 341, 342, 343, 344 und 345 haben jeweils Verzögerungen, in Zyklen der Basistaktrate R ausgedrückt, von $77M + 12D_1 + 7D_2$, $76M + 10D_1 + 6D_2$, $72M + 8D_1 + 5D_2$, $64M + 6D_1 + 4D_2$ und $48M + 4D_1 + 3D_2$.

Die im Spektralanalysator angewandte digitale Filterung ist eine Art oder Spezies hierarchischer Filterung von allgemeinem Interesse, indem eine Tiefpaß- oder Bandpaßfilterung, die sich über viele viele Abtastwerte erstreckt, mit einer relativ kleinen Anzahl von zu irgendeiner Zeit gewichteten und summierten Abtastwerten durchgeführt wird.

Obgleich die Erfindung auch brauchbar ist für die Verwendung des Spektrums einer eindimensionalen Signalinformation, wurde die Burt-Pyramide entwickelt zur Analysierung primär der Raumfrequenzen zweidimensionaler Bildinformationen. Die Erfindung erlaubt eine Realzeit-Spektralanalyse der Raumfrequenzen einer sich verändernden Bildinformation, wie sie in aufeinanderfolgenden Videobildern bei einer Fernsehdarstellung auftritt.

Wie in der Fernsehtechnik bekannt ist, treten aufeinanderfolgende Videovollbilder (im NTSC-Format) nacheinander mit einer Vollbildrate von 30 Vollbildern pro Sekunde auf. Jedes Vollbild besteht aus einem Raster von 525 ineinanderverschalteten Horizontalablenkzeilen. Die aufeinanderfolgenden ungeradzahigen Horizontalablenkzeilen eines Vollbildes werden während einer ersten Halbbildperiode nacheinander gesendet. Die aufeinanderfolgenden geradzahigen Ablenkzeilen eines Vollbildes werden nacheinander während einer zweiten Halbbildperiode übertragen, welche auf die erste Halbbildperiode folgt. Darauf folgt die erste Halbbildperiode des nächstfolgenden Vollbildes. Die Dauer jeder Halbbildperiode beträgt $1/60$ -stel Sekunde. Jedoch muß man eine Speicherung für mindestens die Anzahl der Bildelemente in einer Halbbildzeit vorsehen, um das volle Raumfrequenzspektrum des Bildes in verzögerter Realzeit definieren zu können.

Eine als fortschreitende Abtastung bekannte Technik kennt man in der Fernsehtechnik, um aus einem NTSC-Videosignal Vollbilder mit den gesamten 525 aufeinanderfolgenden Zeilen mit einer Rate von 60 Vollbildern pro Sekunde abzuleiten. Bei dieser Technik wird jedes aufeinanderfolgende NTSC-Halbbild für eine Halbbildperiode von $1/60$ -stel Sekunde verzögert. Auf diese Weise sind die aufeinanderfolgenden Ablenkzeilen eines gleichzeitig auftretenden ungeradzahigen Halbbildes mit den aufeinanderfolgenden Ablenkzeilen eines unmittelbar vorangehenden geradzahigen Halbbildes verschachtelt, welches um eine Halbbildperiode verzögert worden ist, so daß man ein ganzes Vollbild von Bildelementen während des gleichzeitig auftretenden ungeradzahigen Halbbildes jedes der aufeinanderfolgenden Vollbilder erhält. In ähnlicher Weise sind die aufeinanderfolgenden Ablenkzeilen eines gleichzeitig auftretenden geradzahigen Halbbildes mit den aufeinanderfolgend auftretenden Ablenkzeilen eines unmittelbar vorangehenden ungeradzahigen Halbbildes verschachtelt, welches um eine Halbbildperiode verzögert worden ist, um ein volles Vollbild von Bildelementen während dieser gleichzeitig auftretenden geradzahigen Halbbildperiode jedes der aufeinanderfolgenden Vollbilder zu ergeben.

Die oben beschriebene fortschreitende Abtasttechnik ist besonders nützlich für die Erzeugung hochaufgelöster Bildwiedergaben, wie sie als High Definition Television (HDTV) bekannt ist, was derzeit in der Fernsehtechnik entwickelt wird. Die Erfindung eignet sich auch für HDTV, um bessere Bildwiedergaben zu liefern.

Fig. 12 zeigt einen Spektralanalysator gemäß der Erfindung zur Verarbeitung von Signalen, die eine zweidimensionale Information darstellen, wie etwa die Raumfrequenz-Bildinformation, die in aufeinanderfolgenden, fortschreitend abgetasteten Fernsehvollbildern enthalten ist. Alternativ kann eine solche zweidimensionale Information auch von einer ohne Zeilensprung arbeitenden Fernsehkamera erhalten werden oder von einer mit Zeilensprung arbeitenden Kamera mit nachgeschaltetem Speicher.

Anhand von Fig. 12 sei aus Gründen der Einfachheit der Beschreibung die monochrome Verarbeitung der Leuchtdichtesignale erläutert, jedoch kann die zu beschreibende Technik auch individuell auf die Primärfarben von Farbfernsehsignalen oder auf die aus diesen durch algebraische Matrixierung abgeleiteten Signale angewandt werden. Ein Originalvideosignal wird in Rasterabtastrformat einem Analog/Digital-Konverter 1205 zur Abtastung (falls unabgetastet) oder zur Neuabtastung (falls breits abgetastet) und zur endgültigen Digitalisierung zugeführt. Die digitalisierten Videoabtwerte sind als Signal mit G_0 bezeichnet und enthalten das vollständige zweidimensionale Raumfrequenzspektrum des ursprünglichen Signals und dessen aufgrund der Abtastvorgänge zugehörigen Oberwellenspektren. Diese Oberwellenspektren sind symmetrisch um die jeweilige Abtastfrequenz und deren Oberwellen. Die Oberwellenspektren werden in der nachfolgend erläuterten Weise spezifische behandelt. Die allgemeine Tatsache ihres Vorhandenseins wird erwähnt, weil die Oberwellenspektren beim Entwurf der zweidimensionalen Tiefpaß-Raumfrequenzfilter berücksichtigt werden müssen, die der Spektralanalysator gemäß Fig. 12 verwendet. Der Grund liegt darin, daß diese Oberwellenspektren Anlaß zu Fremdfrequenzen bei der Spektralanalyse und bei der darauf aufbauenden Signalsynthese geben.

In der Spektralanalysatorstufe 1210 erster Ordnung wird aus G_0 ein Hochpaßspektrum L_0 abgetrennt. Dieses Hochpaßverhalten wird im wesentlichen bewirkt durch Tiefpaßfiltern von G_0 und Verzögerung von G_0 gegenüber seiner zeitlichen Lage, mit der es aus dem A/D-Konverter 1205 kommt, um dasselbe Maß, um welches die tieferfrequenten Anteile von G_0 im Tiefpaßfilter-Ausgangssignal verzögert sind, und durch Subtraktion des tiefpaßgefilterten Ausgangssignals von dem verzögerten Signal G_0 . Mit der Annahme, daß die Spektralanalyse oktavenweise erfolgt, wird die Grenzfrequenz des zweidimensionalen Tiefpaß-Raumfrequenzfilters 1211 gleich der obersten Frequenz des nächsten zu analysierenden Bandpaßspektrums L_1 von Oktavbreite gewählt, also bei vier Drittel seiner Mittenfrequenz. In der Dezimierschaltung 1212 werden abwechselnde Reihen und Spalten von Abtwerten eliminiert, um das tiefpaßgefilterte Signal G_0 mit der Raumfrequenzrate $R/2$ abzutasten, und dieses Signal mit reduzierter Abtastrate wird als Tiefpaßausgangssignal der Stufe 1210 für die weitere Spektralanalyse geliefert. Das tiefpaßgefilterte Signal G_0 mit reduzierter Abtastrate wird dann nach den Methoden interpoliert, die von R. W. Schafer und L. R. Rabiner in ihrem Aufsatz „A Digital Signal Processing Approach to Interpolation“ auf den Seiten 692 bis 702 der Zeitschrift PROCEEDINGS OF THE IEEE, Band 61, Nr. 6, vom Juni 1973 beschrieben sind. In der Expansionsschaltung 1213 werden die in der Dezimierschaltung 1212 eliminierten Abtwerte durch Nullen ersetzt, um ein Eingangssignal für ein weiteres zweidimensionales Tiefpaß-Raumfrequenzfilter 1214 zu bilden. Dieses Filter kann dieselben Abtastgewichtskoeffizienten benutzen wie das anfängliche Tiefpaßfilter, aber es hat in jedem Falle im wesentlichen dieselbe Grenzfrequenz wie dieses. Das resultierende Signal hat eine Abtastmatrix gleicher Ausdehnung wie diejenige des Signals G_0 , welches in der Verzögerungsschaltung 1215 verzögert ist, und des wird vom verzögerten Signal G_0 in der Subtrahierschaltung 1216 subtrahiert, um ein Hochpaß-Ausgangssignal L_0 zu ergeben. L_0 ist nicht nur der Hochpaßteil von G_0 , sondern es enthält auch niedrigfrequente Phasenfehlerkorrekturterme, wie oben erwähnt, die bei der Rücksynthese des Videosignals aus der Spektralanalyse benutzt werden, um die durch die Neuabtastung G_0 bei niedriger Abtastrate in der Dezimierschaltung 1212 eingeführten Fehler zu kompensieren. Diese Trennung des Signals in einen Tiefpaßteil, der mit der halben Rate neu abgetastet wird, und in einen Hochpaßteil, wird in jeder Spektralanalysatorstufe wiederholt. Jede aufeinanderfolgende Spektralanalysatorstufe erhält als Eingangssignal das neu abgetastete Tiefpaß-Ausgangssignal der vorangehenden Spektralanalysatorstufe, wobei die Abtastrate in jeder aufeinanderfolgenden Spektralanalysatorstufe gegenüber derjenigen der vorangehenden Stufe halbiert wird. Das Hochpaß-Ausgangssignal jeder Spektralanalysatorstufe 1220, 1230, 1240, 1250, 1260 nach der anfänglichen Stufe 1210 hat eine obere Grenze, welche durch die Tiefpaßcharakteristik der vorangehenden Stufe bestimmt ist, und daher sind diese „Hochpaß“-Ausgangssignale tatsächlich Bandpaßspektren absinkender Raumfrequenz mit gleichem Q. Die Dezimierung der Ausgangssignale der anfänglichen Tiefpaßfilter in jeder Stufe, die mit einem Faktor von 2 erfolgt, und die Grenzfrequenz der Tiefpaßfilter in jeder Stufe, die zwei Drittel der Mittenfrequenz der von ihr bewirkten Spektralanalyse beträgt, sind Faktoren, welche diese Spektren mit gleichem Q sinkende Oktaven der zweidimensionalen Raumfrequenz sein läßt.

Das dezimierte Tiefpaß-Ausgangssignal G_1 der Spektralanalysatorstufe 1210 wird von ihrer Dezimierschaltung 1212 als Eingangssignal der nächstfolgenden Spektralanalysatorstufe 1220 zugeführt. Die Spektralanalysatorstufe 1220 hat Elemente 1221, 1222, 1223, 1224 und 1226 analog den Elementen 1211, 1212, 1213, 1214, 1215 und 1216 der Spektralanalysatorstufe 1210; die Unterschiede der Arbeitsweise rühren daher, daß die Abtastfrequenz in der Stufe 1220 in beiden Dimensionen bezüglich der Stufe 1210 halbiert sind. Die Tiefpaßfilter 1221 und 1224 haben Gewichtskoeffizienten gleich denjenigen der Tiefpaßfilter 1211 bzw. 1214; jeoch wird durch die Halbierung der Abtastrate in der Stufe 1220 im Vergleich zur Stufe 1210 die Grenzfrequenz der Filter 1221 und 1224 im Vergleich zu den Filtern 1211 und 1214 halbiert. Die Verzögerung vor der Subtraktion in der Verzögerungsschaltung 1225 ist zweimal so lang wie in der Verzögerungsschaltung 1215; nimmt man an, daß diese Verzögerungen durch Taktung in einem Schieberegister oder dergleichen bewirkt werden, dann sind die Verzögerungsstrukturen die gleichen, wobei das Verzögerungsverhältnis 2:1 durch das Verhältnis 1:2 der jeweiligen Verzögerungstaktraten in den Verzögerungsschaltungen 1225 und 1215 gegeben ist. Das Hochpaß-Ausgangssignal L_1 der Spektralanalysatorstufe 1220 ist ein Bandpaßspektrum von Raumfrequenzen unmittelbar unterhalb des Spektrums L_0 . Das dezimierte Tiefpaß-Ausgangssignal G_2 der Spektralanalysatorstufe 1220 wird von seiner Dezimierschaltung 1222 als Eingangssignal der Spektralanalysatorstufe 1230 zugeführt. Das Bandpaßspektrum L_2 eine Oktave unterhalb L_1 ist das Hochpaß-Ausgangssignal der Spektralanalysatorstufe 1230 aufgrund ihres Eingangssignal G_2 . Die Spektralanalysatorstufe 1230 enthält Elemente 1231, 1232, 1233, 1234, 1235 bzw. 1236 entsprechend den Elementen 1221, 1222, 1223, 1224, 1225 und 1226 der Spektralanalysatorstufe 1220 mit Ausnahme der halbierten Abtastraten. Das dezimierte Tiefpaß-Ausgangssignal G_3 der Spektralanalysatorstufe 1230 wird von ihrer Dezimierschaltung 1232 als Eingangssignal der nachfolgenden Spektralanalysatorstufe 1240 zugeführt. Das Bandpaßspektrum L_3 eine Oktave unterhalb von L_2 ist das Hochpaß-Ausgangssignal der Spektralanalysatorstufe 1240 aufgrund ihres Eingangssignal G_3 . Die Spektralanalysatorstufe 1240 enthält Elemente 1241, 1242, 1243, 1244, 1245 bzw. 1246 entsprechend den Elementen 1231, 1232, 1233, 1234, 1235 und 1236 der Spektralanalysatorstufe 1230, mit Ausnahme der halbierten Abtastraten. Das dezimierte Tiefpaß-Ausgangssignal G_4 der Spektralanalysatorstufe 1240 wird von ihrer Dezimierschaltung 1242 als Eingangssignal der nächstfolgenden Spektralanalysatorstufe 1250 zugeführt. Das Bandpaßspektrum L_4 eine Oktave unterhalb von L_3 ist das Hochpaß-Ausgangssignal der Spektralanalysatorstufe 1250 aufgrund ihres Eingangssignals G_4 . Die Spektralanalysatorstufe 1250 enthält Elemente 1251, 1252, 1253, 1254, 1255 bzw. 1256 entsprechend den Elementen 1241, 1242, 1243, 1244, 1245 und 1246 der Spektralanalysatorstufe 1240, mit Ausnahme der halbierten Abtastraten.

Das dezimierte Tiefpaß-Ausgangssignal G_5 der Spektralanalysatorstufe 1250 wird von ihrer Dezimierschaltung 1252 als Eingangssignal der nachfolgenden Spektralanalysatorstufe 1260 zugeführt. Das Bandpaßspektrum L_5 eine Oktave unterhalb von L_4 ist das Hochpaß-Ausgangssignal der Spektralanalysatorstufe 1260 aufgrund ihres Eingangssignals G_5 . Die Spektralanalysatorstufe 1260 enthält Elemente 1261, 1262, 1263, 1264, 1265 und 1266 entsprechend den Elementen 1251, 1252, 1253, 1254, 1255 und 1256 der Spektralanalysatorstufe 1250 mit Ausnahme der halbierten Abtastraten.

Das dezimierte Tiefpaß-Ausgangssignal G_0 , welches von der Dezimierschaltung der letzten Spektralanalysatorstufe geliefert wird, hierbei ist G_0 G_6 , das von der Dezimierschaltung 1262 der Spektralanalysatorstufe 1260 geliefert wird, ist ein restliches Spektral-Tiefpaß-Ausgangssignal. Es dient als Grundlage für die Neusynthese der Signale durch Summierung interpolierter Spektralbandpaßsignale der späteren Spektralanalysatorstufen und des „Schlußstein“-Hochpaß-Spektralausgangssignals der anfänglichen Spektralanalysatorstufe. L_0, L_1, L_2, L_3, L_4 und L_5 sind zeitlich verschoben und werden mit zunehmenden Verzögerungsbeträgen geliefert. Das restliche Tiefpaßspektrum G_0 (hier G_6) folgt zeitlich dem letzten Bandpaßspektrum $L_0 - 1$ (hier L_5) mit entgegengesetzter Zeitverschiebung.

Wie hier beschrieben wird, erfordern die Verfahren der Signalsynthese aus Spektralkomponenten auch, daß die Spektralkomponenten L_0, L_1, L_2, L_3, L_4 und L_5 gegenseitig diese entgegengesetzte Zeitverschiebung haben. Vor der Beschreibung der Durchführung der Spektralanalyse und Synthese der daraus gewonnen Signale sei der Aufbau der Spektralanalysatorstufen genauer erläutert. Zunächst seien die anfänglichen zweidimensionalen Tiefpaßfilter beschrieben.

Wie in der Filtertechnik bekannt ist, können zweidimensionale Filter nicht trennbarer Natur oder alternativ trennbarer Natur sein. Trennbare Filterung in der ersten und zweiten Dimension läßt sich durchführen, indem zunächst in einer ersten Richtung gefiltert wird, wobei ein erstes eindimensionales Filter benutzt wird, und dann in einer zweiten Richtung gefiltert wird, die rechtwinklig zur ersten Richtung verläuft, indem ein zweites eindimensionales Filter benutzt wird. Da die jeweiligen Tiefpaßfilter-Kennlinien zweier getrennt hintereinandergeschalteter eindimensionaler Filter, die ein trennbares zweidimensionales Tiefpaßfilter bilden, völlig unabhängig voneinander sind, kann also die Kern- oder Rumpffunktion und Struktur jedes dieser Tiefpaßfilter ähnlich derjenigen sein, wie sie im Zusammenhang mit den Figuren 2a und 2b und den Figuren 3 bis 11 beschrieben worden ist. Im Falle von Fernsehbildern, die aus dem Raster horizontaler Ablenkzeilen gebildet sind, sind die beiden rechtwinkligen Richtungen eines trennbaren Filters vorzugsweise die horizontale und vertikale Richtung. Verwendet man eine trennbare zweidimensionale Tiefpaßfilterung bei der Realisierung der Erfindung, dann lassen sich gewisse Vorteile bei der Durchführung der horizontalen Tiefpaßfilterung vor der vertikalen Tiefpaßfilterung erreichen, während man andere Vorteile erhält, wenn man die vertikale Tiefpaßfilterung vor der horizontalen Tiefpaßfilterung vornimmt. Nimmt man beispielsweise die horizontale Filterung und Dezimierung zuerst vor, dann reduziert sich die Anzahl der Bildelement-Abtastwerte pro horizontaler Ablenkzeile, welche durch die vertikale Kernfunktion während der nachfolgenden Vertikalfilterung zu verarbeiten ist, um die Hälfte. Nimmt man jedoch erst die vertikale Filterung vor, dann kann man dieselbe Verzögerungsstruktur benutzen, die erforderlich ist, um die relativ lange, für die Vertikalfilterung benötigte Verzögerung zu ergeben und auch um die jeweiligen Kompensationsverzögerungen (1215, 1225, 1235, 1245, 1255 und 1265) für die Weiterbildung der jeweiligen Signale G_0 bis G_5 zum positiven Anschluß jeder entsprechenden Subtrahierschaltung 1216, 1226, 1236, 1246, 1256 und 1266 der Stufen 1210, 1220, 1230, 1240, 1250 und 1260 des in Fig. 12 gezeigten Spektralanalysators zu ergeben.

Die Gesamtfilteransprache (Verteilung der Eingangsproben in einer Positionsmatrix) trennbarer zweidimensionaler Raumfrequenzfilter kann quadratisch oder rechteckig im Querschnitt parallel zur Raumfrequenzebene sein. Jedoch können Filteransprachen nicht trennbarer Filter andere Querschnitte haben. Kreisförmige und elliptische Querschnitte sind von besonderem Interesse für die Filterung rasterabgetasteter Fernsehsignale, da Filteransprachen mit solchen Querschnitten zur Reduzierung übermäßiger diagonalen Auflösung in den Fernsehsignalen benutzt werden können. Die Gleichmäßigkeit der Bildauflösung in allen Richtungen ist wichtig beispielsweise in Fernsehsystemen, wo das Bild zwischen Kamera und Wiedergabevorrichtung verdreht wird.

Nachstehend ist eine Matrix von Filtergewichten mit einem Muster angegeben, das eine Quadrantensymmetrie und ein lineares Phasenverhalten aufweist, Filtercharakteristika, die besonders geeignet zur Verwendung als die 2-D-Tiefpaßfilter 1211, 1221, 1231, 1241, 1251 bzw. 1261 und die 2-D-Tiefpaßfilter 1214, 1224, 1234, 1244, 1254 und 1264 nach Fig. 12 eignen.

A	B	C	B	A
D	E	F	E	D
G	H	J	H	G
D	E	F	E	D
A	B	C	B	A

Eine Kernfunktionsmatrix mit diesem Muster von Gewichtsfaktoren verarbeitet ihrerseits jeden von aufeinanderfolgenden Bildabtastwerten, wobei jeder Bildabtastwert bei der Verarbeitung in seiner Position einem zentral gelegenen Gewichtsfaktor J der Matrix entspricht. In einem Tiefpaßfilter hat der Gewichtsfaktor J den relativ höchsten Größenwert, und jeder der anderen Gewichtsfaktoren hat einen Größenwert, der zunehmend kleiner wird, je weiter er von der Mittelposition weg liegt. Daher haben die Gewichtsfaktoren A in den Ecken den niedrigsten Größenwert.

Im Falle eines nicht trennbaren zweidimensionalen Filters sind die spezifischen gewählten Werte der Pegelgrößen von A, B, C, D, E, F, G, H und J völlig unabhängig voneinander. Im Falle eines zweidimensionalen trennbaren Filters ergeben sich die Pegelgrößen der Gewichtsfaktoren jedoch aus dem Kreuzprodukt der jeweiligen Werte der horizontalen und vertikalen eindimensionalen Kerngewichtsfaktoren, und die jeweiligen Werte A, B, D, E, F, G, H und J sind nicht völlig unabhängig voneinander.

Eine Anordnung zur Synthetisierung eines elektrischen Signals aus Komponentenspektren, wie sie generell in Fig. 13 gezeigt ist, ist von Bedeutung für die Erfindung. Die Spektralkomponenten $G_6', L_5', L_4', L_3', L_2', L_1'$ und L_0' sind Ausgangssignale ihrer nicht mit Strich versehenen Gegenstücke, die vom Spektralanalysator nach Fig. 12 geliefert werden. Die Spektralkomponenten $L_0, L_1, L_2, L_3, L_4, G_5$ und L_5 werden zeitlich zunehmend später von dem Spektralanalysator nach Fig. 12 geliefert und müssen differentiell verzögert werden, um $G_0', L_5', L_4', L_3', L_2', L_1'$ und L_0' zunehmend später für die Signalsyntheschaltung nach Fig. 13 zu liefern.

Fig. 13 zeigte eine Signalsyntheschaltung mit einer Mehrzahl aufeinanderfolgenden Signalsynthesestufen 1360, 1365, 1370, 1375, 1380, 1385. Bei der Verwendung zur Interpolation expandiert jede Stufe die Abtastwertmatrix einer Spektralkomponente, so daß sie die gleiche Ausdehnung wie die in der Raumfrequenz nächsthöhere Spektralkomponente hat, so daß sie zu

dieser Spektralkomponente addiert werden kann. Die Expansion der Abtastwertmatrix erfolgt durch Verschachtelung der Abtastpunkte in der Matrix mit Nullen und Tiefpaßbildung des Ergebnisses zur Entfernung von Oberwellenstrukturen. Die Tiefpaßbildung hat vorzugsweise dieselbe Filtercharakteristik wie die Tiefpaßfilterung beim entsprechenden Interpolationsvorgang im Spektralanalysator nach Fig. 12.

Die Tiefpaßfilterung bei der Interpolation in der Signalsyntheschaltung unterdrückt Oberwellen der durch nichtlineare Verarbeitung veränderten Signale G_0 oder L_k , die in den Veränderungsschaltungen auftreten können (wie sie im Zusammenhang mit Fig. 3 beschrieben sind), welche zwischen den Spektralanalysator nach Fig. 12 und die Syntheschaltung nach Fig. 13 eingefügt sind. Solche nichtlinearen Vorgänge verursachen sichtbare Aliasing-Fehler im synthetisierten Bildgemisch, wenn nicht die Tiefpaßfilterung durch die Interpolationsprozesse erfolgt, welche bei der Signalsynthese vorgenommen werden.

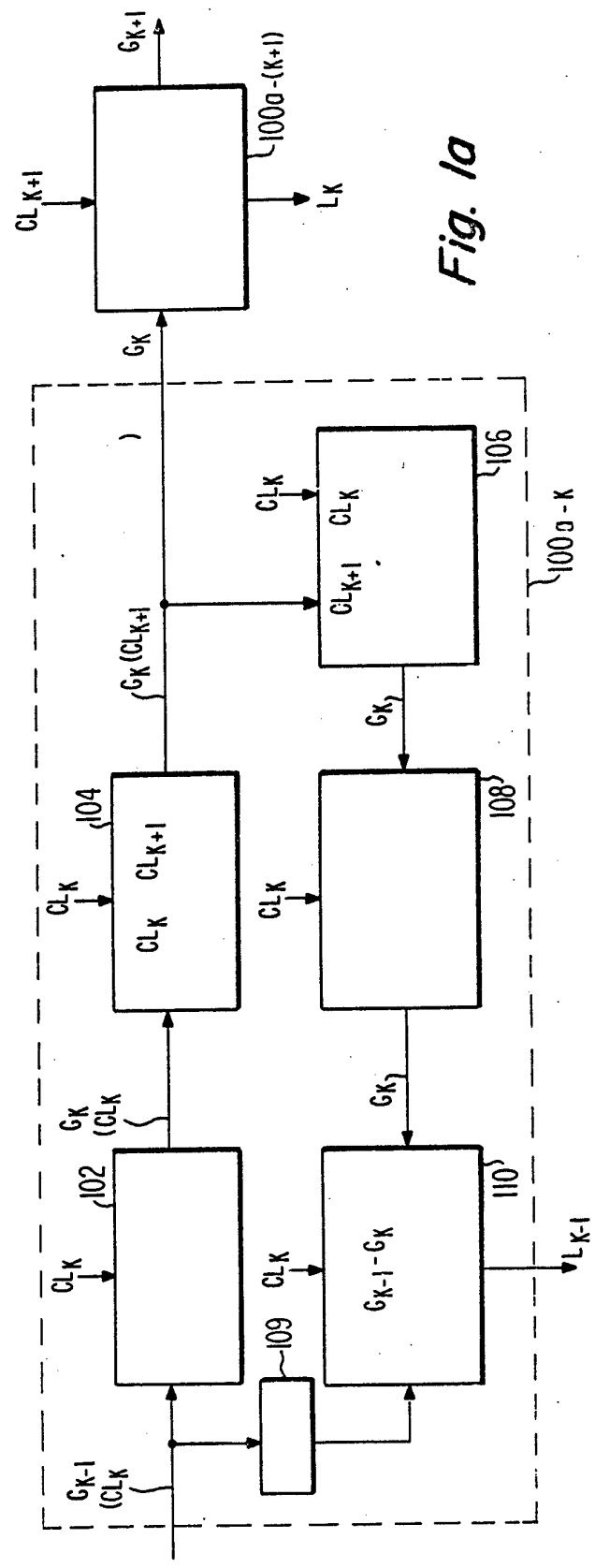
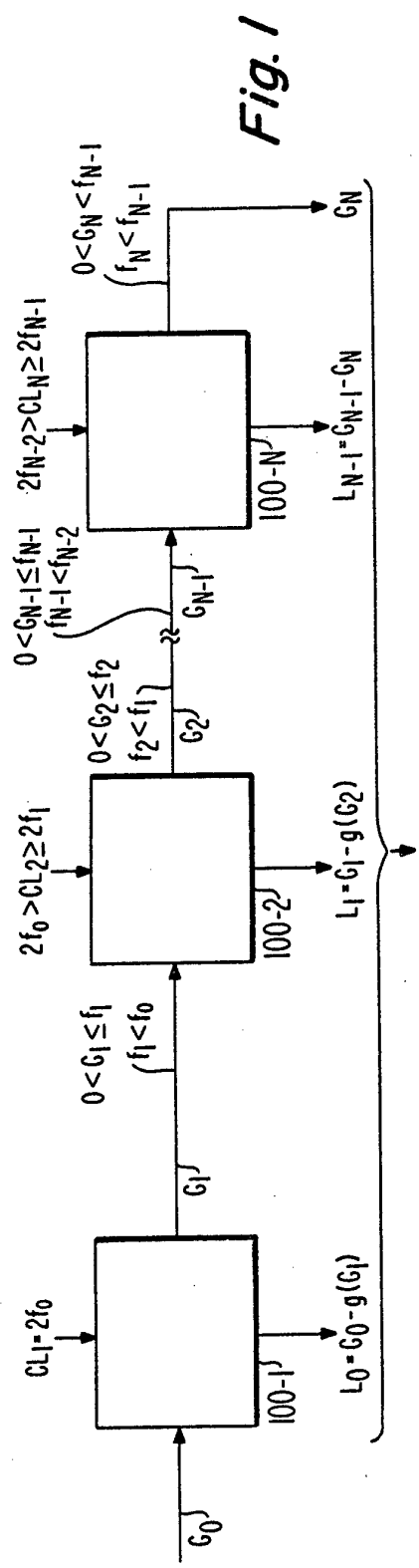
Bei der Syntheschaltung nach Fig. 13 werden zwischen die Abtastwerte des Tiefpaßspektrums G_6' in der Expansionsschaltung 1361 Nullen eingefügt, und dann werden sie durch das zweidimensionale Tiefpaß-Raumfrequenzfilter 1362 geschickt, das ähnlich dem Filter 1265 beim Spektrumsanalysator nach Fig. 12 ist. Die Abtastwerte des Ausgangssignals des Filters 1362 werden in einer Addierschaltung 1363 zu Abtastwerten von L_5' zu einem Signal G_5' addiert, welches ähnlich oder identisch mit dem hypothetischen zeitlich verzögerten Abbild von G_5 ist. Dann werden die Abtastwerte G_5' in der Expansionsschaltung 1366 mit Nullen verschachtelt. Dieses Signal wird durch das Tiefpaßfilter 1367 geschickt, welches ähnlich dem Tiefpaßfilter 1254 nach Fig. 12 ist, und in einer Addierschaltung 1368 zu L_4' addiert, wobei G_4' entsteht, welches gleich oder identisch mit einem zeitlich verzögerten Abbild von G_4 ist. Die Abtastwerte von G_4' werden in der Expansionsschaltung 1371 mit Nullen verschachtelt und das Ergebnis wird in einem Filter 1372, welches ähnlich dem Filter 1244 in Fig. 12 ist, tiefpaßgefiltert. Das Ausgangssignal des Filters 1372 wird in einer Addierschaltung 1373 zu L_3' addiert und das entstehende Signal G_3' ist ähnlich oder identisch mit einem verzögerten Abbild von G_3 . Die Abtastwerte von G_3' werden in der Expansionsschaltung 1376 mit Nullen verschachtelt, und das Ergebnis wird in einem Filter 1377, welches ähnlich dem Filter 1234 in Fig. 12 ist, tiefpaßgefiltert. Das Ausgangssignal des Filters 1377 wird in einer Addierschaltung 1378 zu L_2' addiert, wobei G_2' entsteht, welches ähnlich oder identisch einem verzögerten Abbild von G_2 ist. In einer Expansionsschaltung 1381 werden Nullen zwischen die Abtastwerte G_2 eingefügt, und das Ergebnis wird in einem Filter 1382 tiefpaßgefiltert. Das Ausgangssignal des Filters 1382 wird in einer Addierschaltung 1383 zu L_1' addiert, wobei G_1' entsteht, welches ähnlich oder gleich G_1 mit Verzögerung ist. Die Abtastwerte von G_1' werden zur Interpolation einer Expansionsschaltung 1386 und einem Tiefpaßfilter 1387, welches ähnlich dem Filter 1214 nach Fig. 12 ist, zugeführt. Das Ausgangssignal des Filters 1387 wird in einer Addierschaltung 1388 mit L_0' zu G_0' addiert, dem synthetisierten Signal, welche dasselbe Bild, möglicherweise mit Änderungen, wiedergibt, welches durch G_0 beschrieben wird.

Während die zweidimensionale Realisierung der Erfindung sich besonders für die Bildverarbeitung des Raumfrequenzspektrums von Bildern in Realzeit eignet, so versteht es sich, daß die zweidimensionale Information, auf welche sich die Erfindung bezieht, nicht auf das Raumfrequenzspektrum zweidimensionaler Bilder beschränkt ist. Beispielsweise kann eine der beiden Dimensionen der Raumfrequenzinformation und die andere der beiden Dimensionen einer Zeitfrequenzinformation entsprechen.

Weiterhin eignet sich die Erfindung zur Analyse des Realzeit-Frequenzspektrums von Informationen, die durch mehr als zwei Dimensionen definiert sind. Im Falle einer dreidimensionalen Information können beispielsweise alle drei Dimensionen Rauminformationen entsprechen, oder alternativ können zwei der Dimensionen Raumfrequenzen entsprechen, während die dritte Dimension einer Zeitinformation entspricht. Von Interesse ist in diesem Zusammenhang eine Bildverarbeitungseinrichtung, die auf das Auftreten von Bewegung in einem wiedergegebenen Fernsehbild reagiert. In diesem Fall bleibt das Raumfrequenzspektrum des wiedergegebenen Bildes, das den stationären Gegenständen entspricht, von Videovollbild zu Vollbild der Videoinformation dasselbe, während der Teil des Raumfrequenzspektrums des Wiedergabebildes, der bewegten Objekten entspricht, sich von Vollbild zu Vollbild der Bildinformation verändert. Ein Spektralanalysator gemäß der Erfindung kann auch bei solchen Bildverarbeitungseinrichtungen verwendet werden, die 3-D-Tiefpaßfilter benutzen. Zwei der drei Dimensionen dieser Tiefpaßfilter sind räumlich und entsprechen zwei Raumdimensionen der zwei Tiefpaßfilter in jeder Stufe des zweidimensionalen Spektralanalysators nach Fig. 12. Die dritte Dimension ist zeitlich und entspricht den Feinstrukturcharakteristika des dreidimensionalen Spektrums aufgrund von Änderungen, die durch die Bewegung von Objekten in den Werten der Amplitudenpegel der entsprechenden Bildelemente des Wiedergabebildes von Vollbild zu Vollbild verursacht werden.

Bei der vorstehenden Beschreibung von Ausführungsformen der Erfindung ist angenommen worden, daß das zeitliche Signal G_0 ein Basisbandsignal mit einem Frequenzspektrum ist, welches Information einer oder mehrerer Dimensionen definiert. Bekanntermaßen wird solche Basisbandinformation häufig in Frequenzmultiplexformat übertragen, wobei die Basisbandinformation durch die Seitenbänder einer Trägerfrequenz dargestellt wird, welche mit einer Basisbandinformationskomponente moduliert ist. Durch Verwendung geeigneter Modulatoren und Demulatoren bezüglich der Übertragungseinrichtungen 100-1 ... 100-N aus Fig. 1 können G_0 und/oder irgendeines der Signale $G_1 \dots G_N$ und/oder irgendeines der Signale $L_0 \dots L_{N-1}$ Frequenzmultiplexsignale sein.

Der Ausdruck „Schieberegister“ ist in den Ansprüchen für Einrichtungen verwendet, welche die äquivalente Funktion ausführen, also beispielsweise ein seriell einzuspeichernder und auszulesender Speicher.



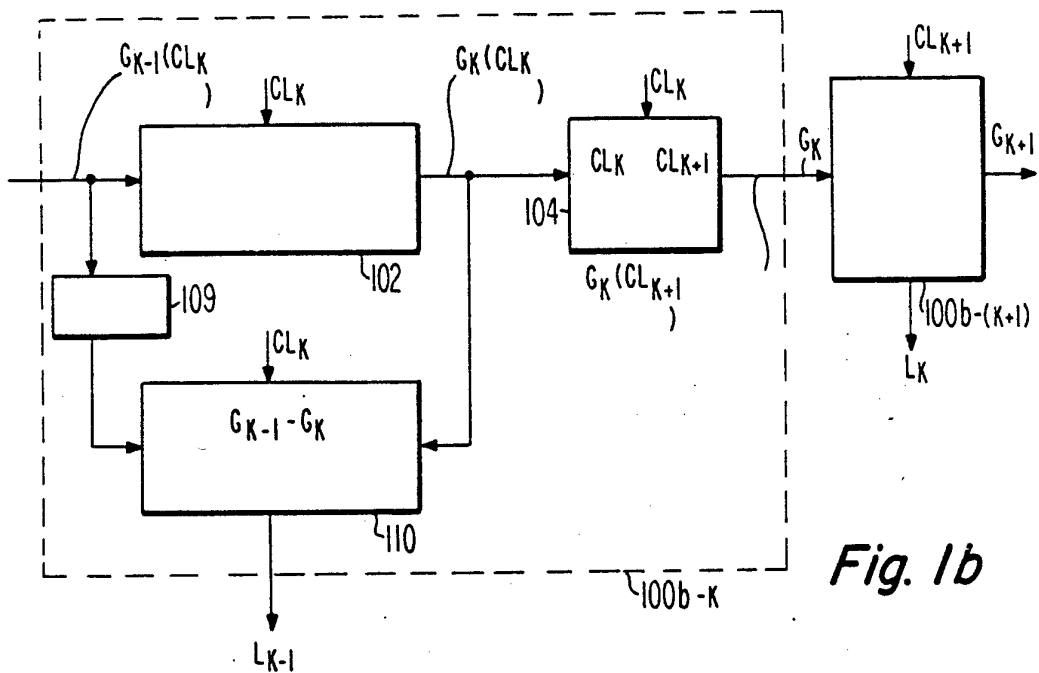


Fig. 1b

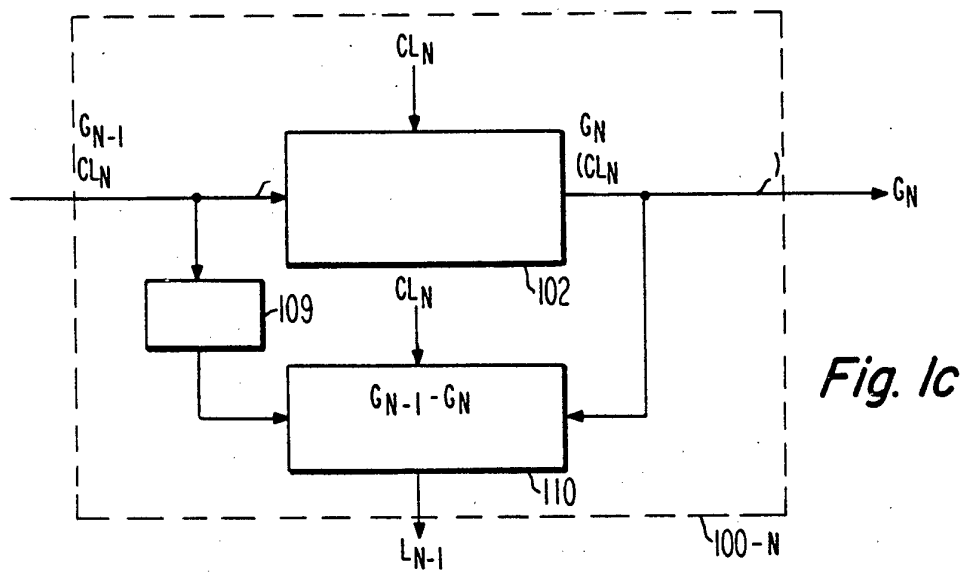


Fig. 1c

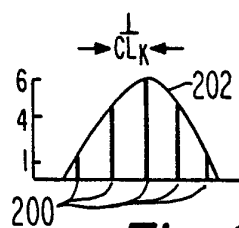


Fig. 2

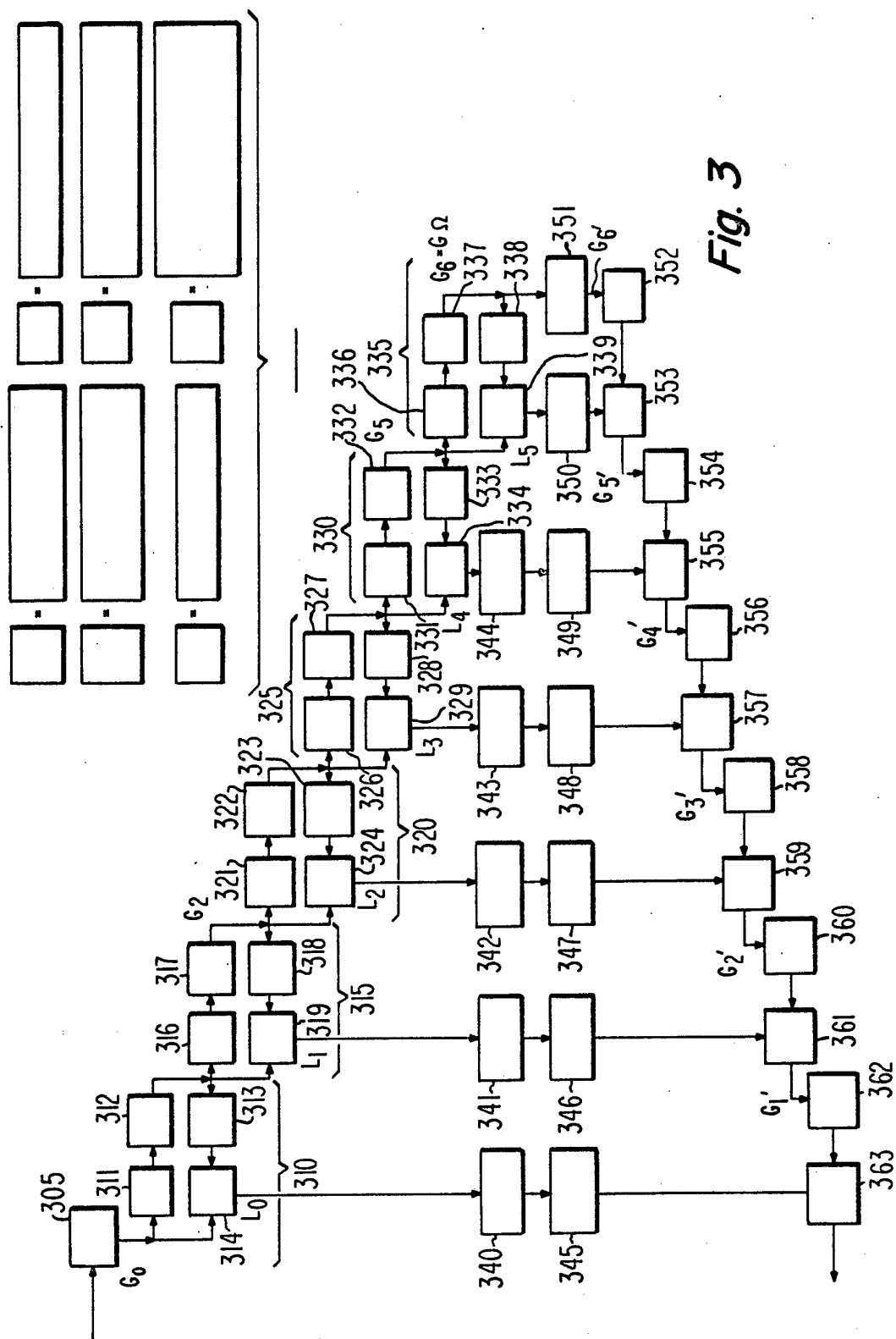
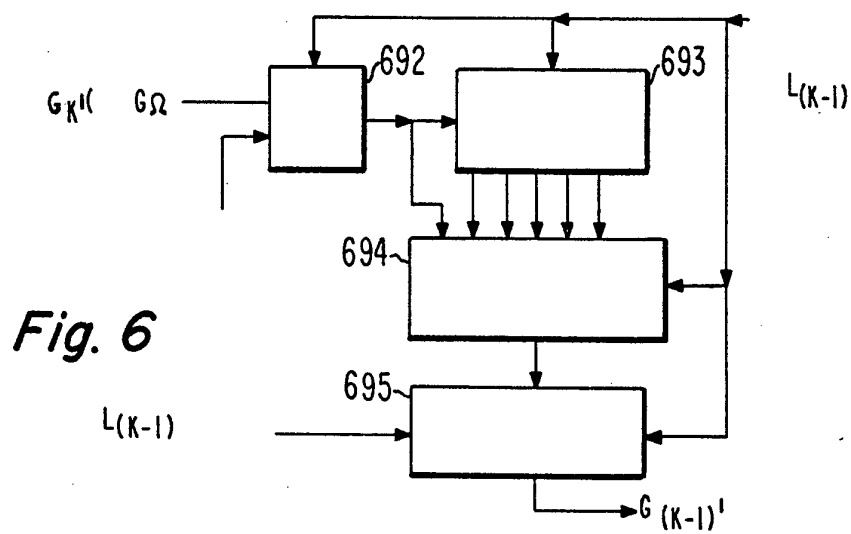
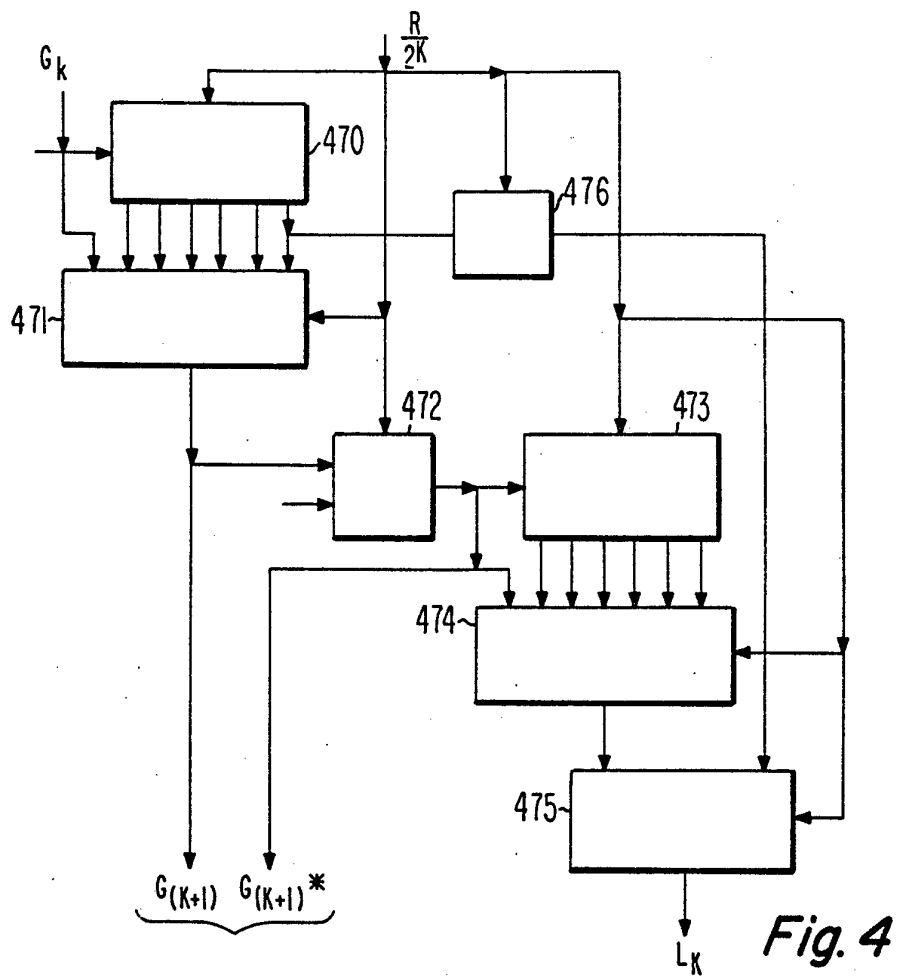


Fig. 3



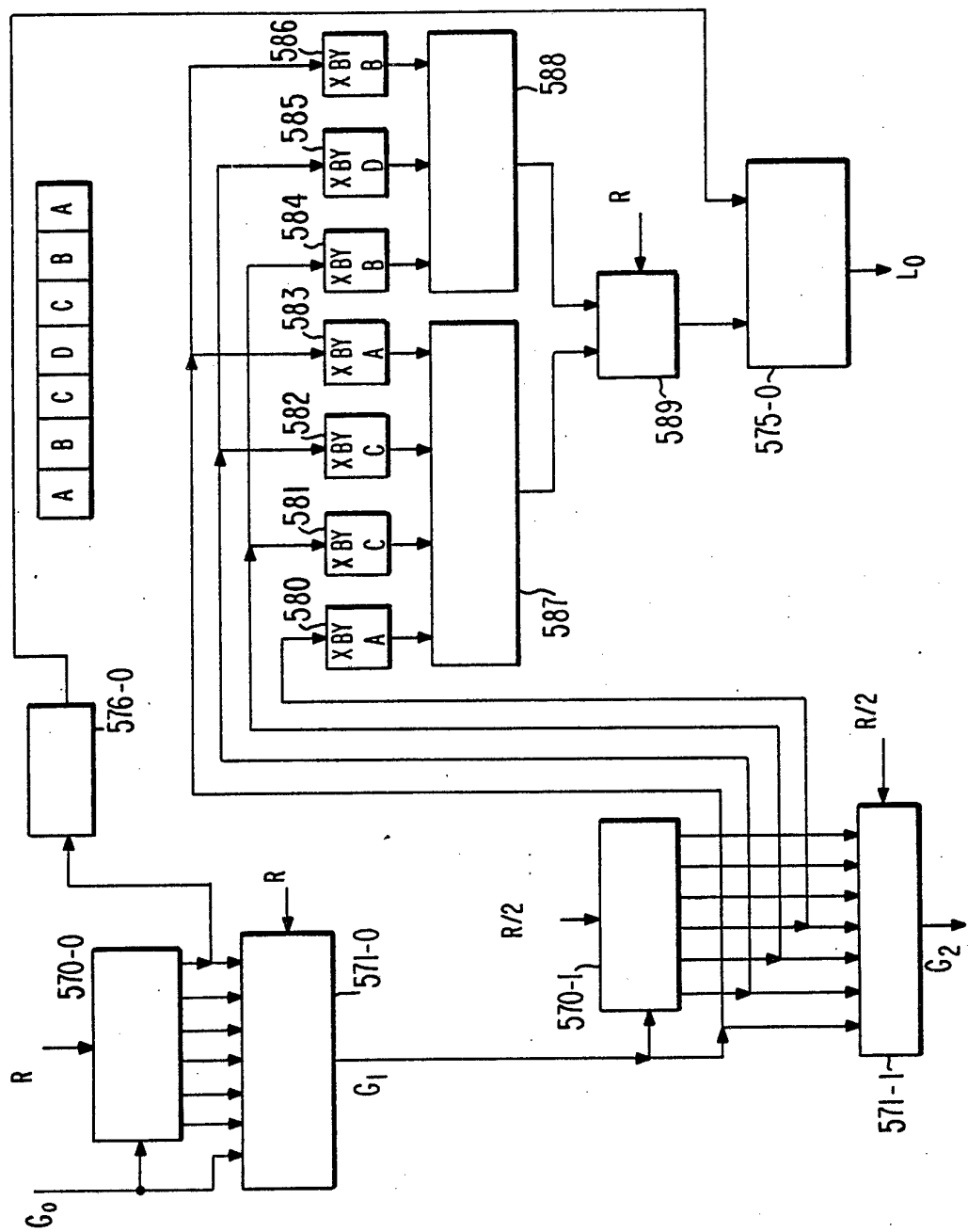


Fig. 5

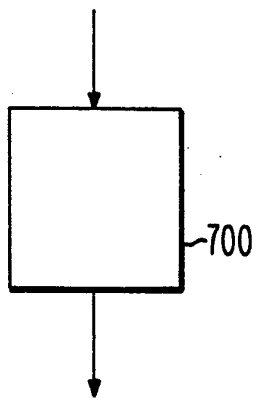


Fig. 7

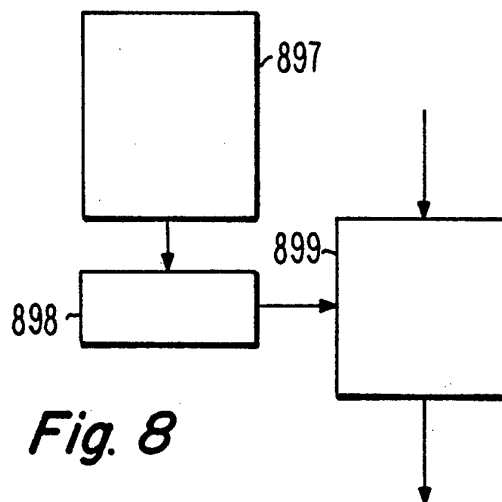


Fig. 8

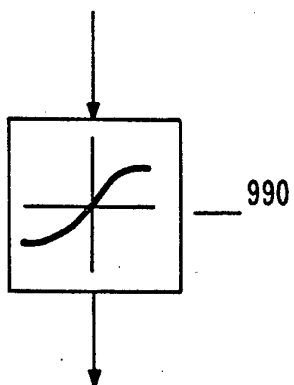


Fig. 9

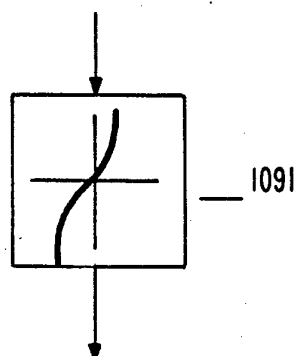


Fig. 10

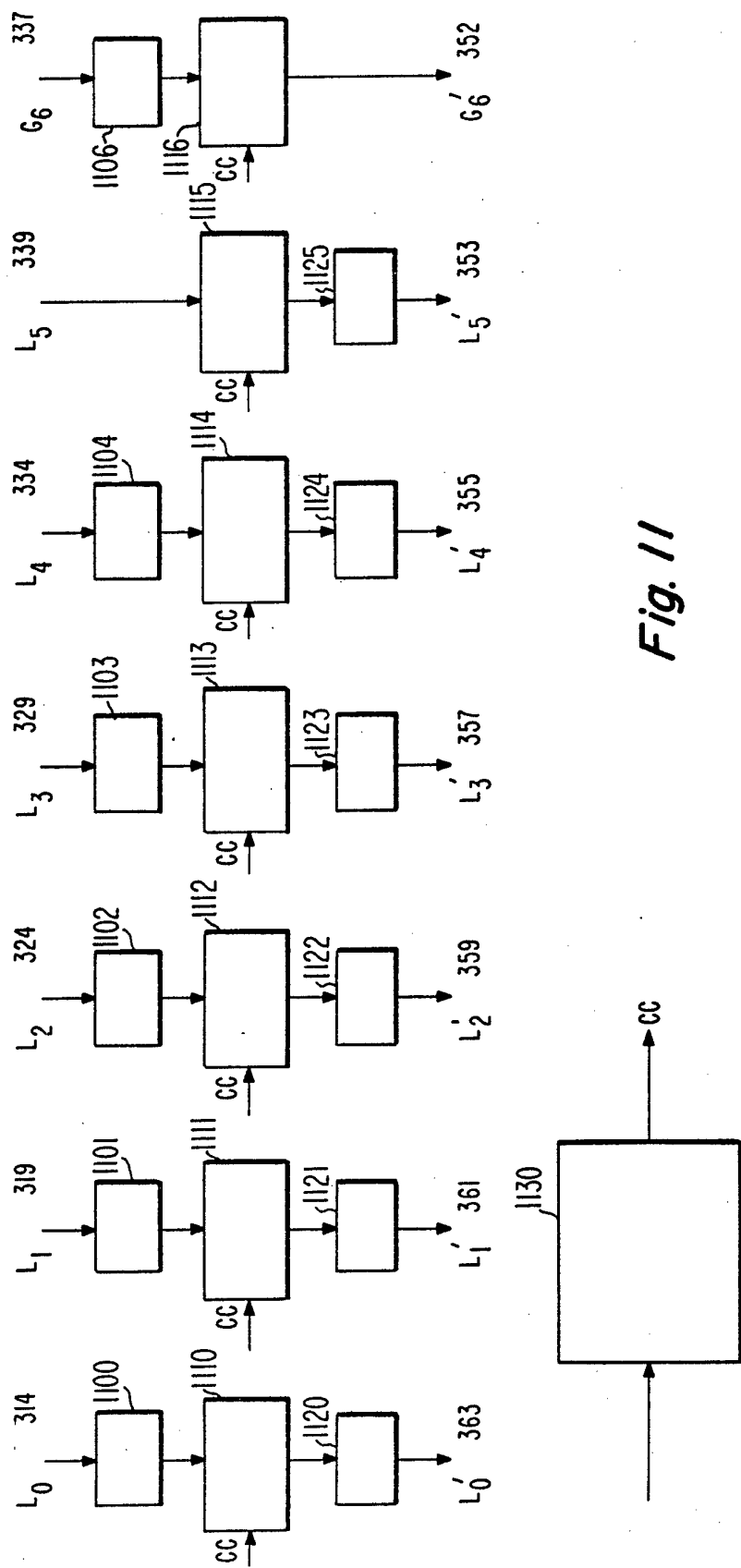


Fig. 11

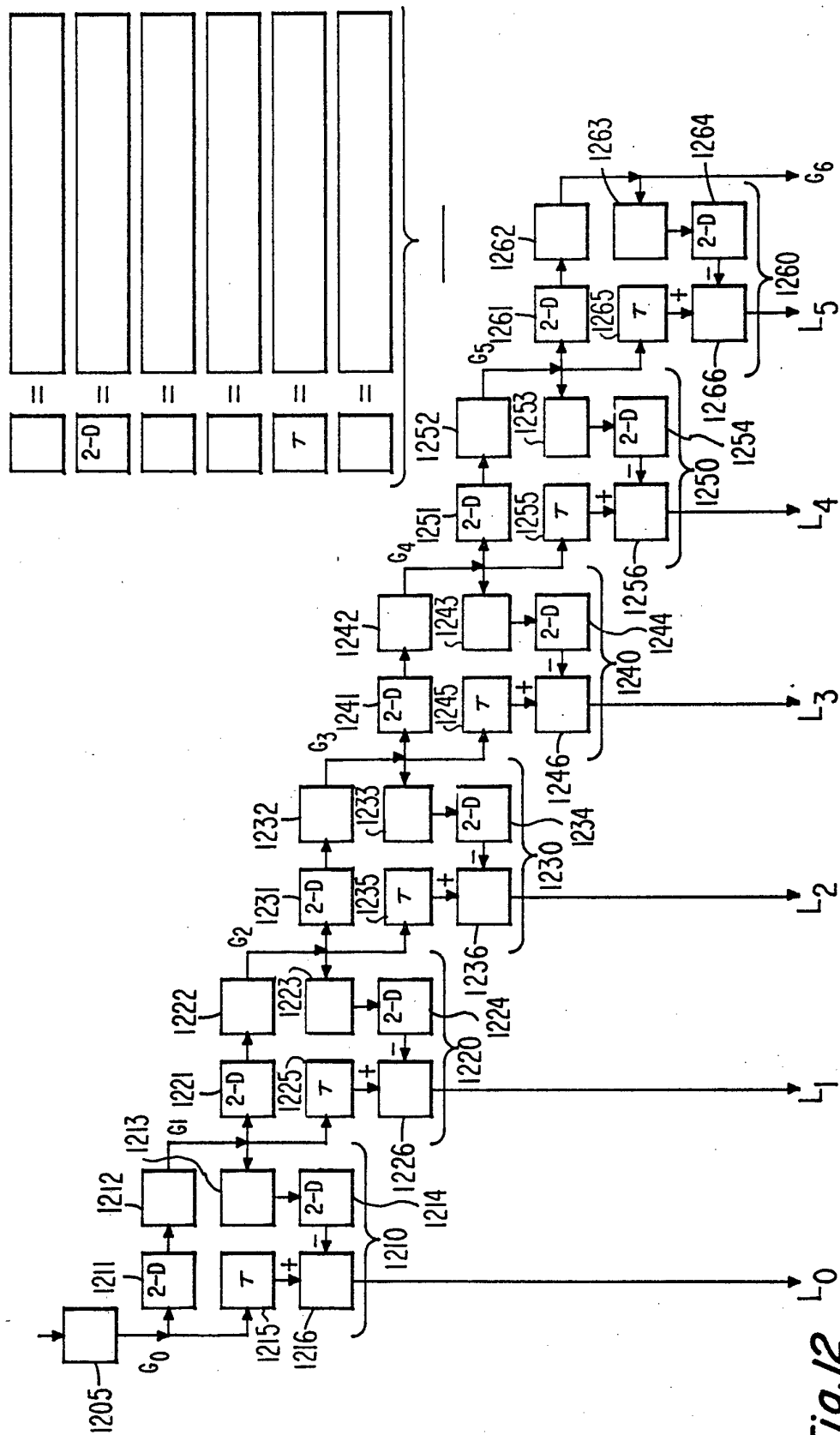


Fig. 12

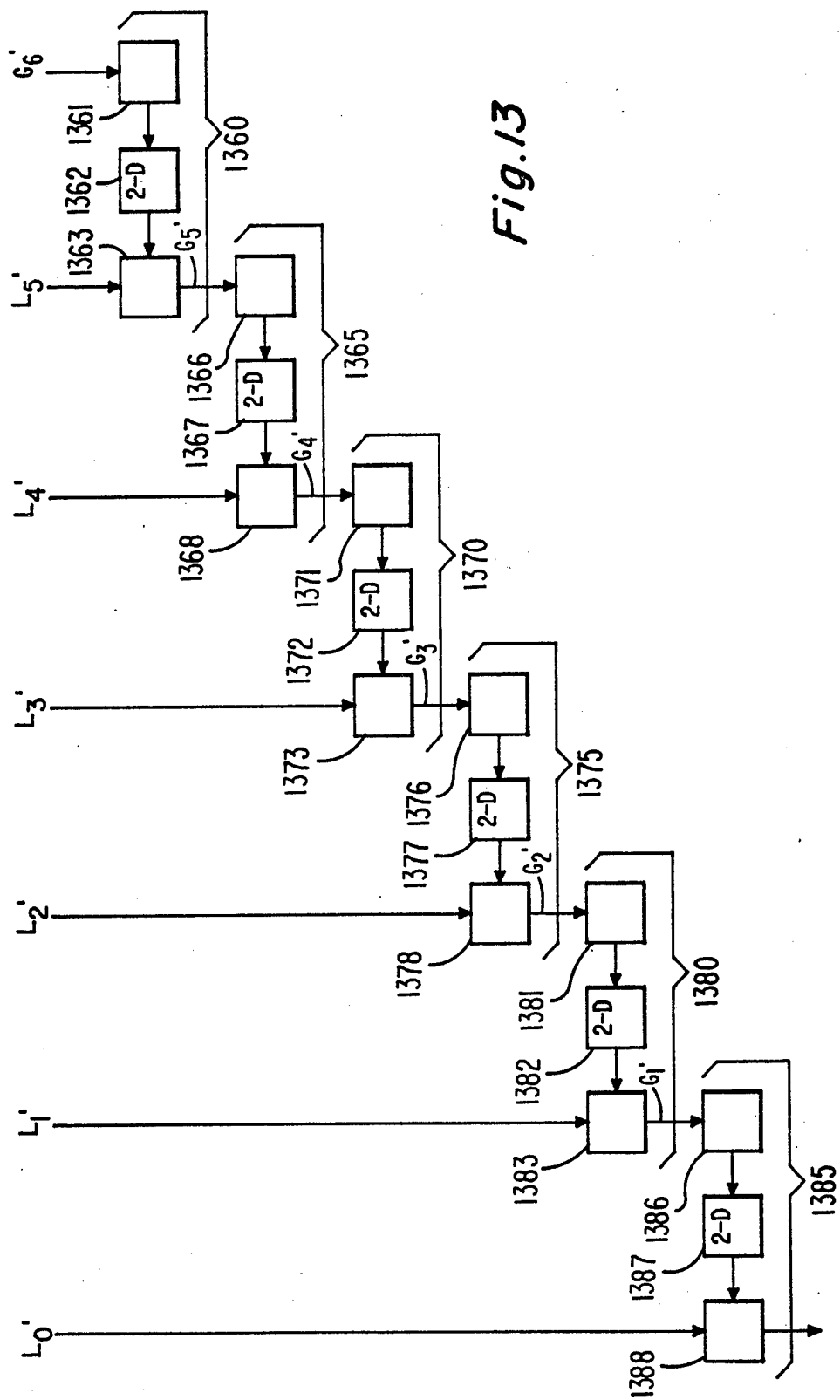


Fig.13