(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2013 207 648 A1** 2013.11.21

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2013 207 648.7**
(22) Anmeldetag: **26.04.2013**
(43) Offenlegungstag: **21.11.2013**

(51) Int Cl.: ***G01S 17/36*** (2013.01)
G01S 17/89 (2013.01)
G01S 7/491 (2013.01)

(66) Innere Priorität:
10 2012 208 412.6 21.05.2012

(71) Anmelder:
ifm electronic gmbh, 45128, Essen, DE

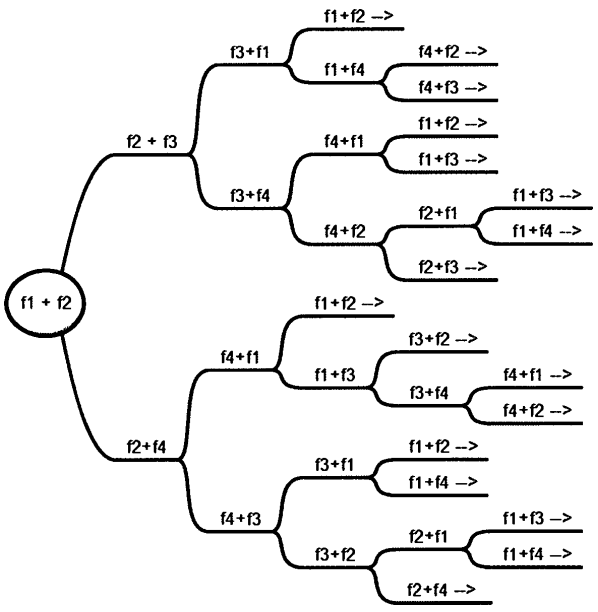
(72) Erfinder:
Wilks, Ralph, Dr., 88074, Meckenbeuren, DE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Lichtlaufzeitkamerasystem**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zum Betreiben eines Lichtlaufzeitkamerasystems, das mit einer Vielzahl von Modulationsfrequenzen betreibbar ist,
a) Festlegung von zwei Modulationsfrequenzen (f_n, f_{n+1}) anhand derer eine Entfernungsbestimmung erfolgen soll,
b) Ermittlung einer Phasenverschiebung eines emittierten und empfangenen Signals (Sp1, Sp2) für jede der beiden ausgewählten Modulationsfrequenzen (f_n, f_{n+1})
c) Ermittlung eines Entfernungswerts ($d_{n,n+1}$) anhand der beiden ermittelten Phasenverschiebungen.
d) Bestimmung einer weiteren Modulationsfrequenz (f_{n+2}) anhand vorgegebener Auswahlregeln unter Berücksichtigung der beiden letzten Modulationsfrequenzen (f_n, f_{n+1})
e) Ermittlung einer weiteren Phasenverschiebung für die weitere Modulationsfrequenz (f_{n+2})
f) Ermittlung eines Entfernungswerts ($d_{n+1,n+2}$) anhand der letzten beiden ermittelten,
g) Durchführung weiterer Entfernungsmessungen anhand der Schritte d) bis g)



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Lichtlaufzeitkamerasystem und ein Verfahren zum Betreiben eines solchen nach Gattung der unabhängigen Ansprüche.

[0002] Mit Lichtlaufzeitkamerasystem sollen nicht nur Systeme umfasst sein, die Entfernungen direkt aus der Lichtlaufzeit ermitteln, sondern insbesondere auch alle Lichtlaufzeit bzw. 3D-TOF-Kamerasysteme, die eine Laufzeitinformation aus der Phasenverschiebung einer emittierten und empfangenen Strahlung gewinnen. Als Lichtlaufzeit bzw. 3D-TOF-Kameras sind insbesondere PMD-Kameras mit Photomischdetektoren (PMD) geeignet, wie sie u. a. in den Anmeldungen EP 1 777 747, US 6 587 186 und auch DE 197 04 496 beschrieben und beispielsweise von der Firma 'ifm electronic GmbH' oder 'PMD-Technologies GmbH' als Frame-Grabber O3D bzw. als CamCube zu beziehen sind. Die PMD-Kamera erlaubt insbesondere eine flexible Anordnung der Lichtquelle und des Detektors, die sowohl in einem Gehäuse als auch separat angeordnet werden können. Selbstverständlich sollen mit dem Begriff Kamera bzw. Kamerasystem auch Kameras bzw. Geräte mit mindestens einem Empfangspixel mit umfasst sein, wie beispielsweise das Entfernungsmessgerät O1D der Anmelderin.

[0003] Für die Bestimmung einer Entfernung bzw. einer entsprechenden Phasenverschiebung des reflektierten Lichts wird, wie in der DE 197 04 496 ausführlich beschrieben, im PMD-Sensor das reflektierte Licht mit dem modulierenden Signal gemischt. Diese Mischung liefert ein in Phase liegendes Signal (0°) und ein um 180° versetztes Signal, aus dem in bekannter Weise eine Entfernung bestimmt werden kann. Zur Verbesserung der Qualität der Entfernungsmessung kann es vorgesehen sein, die Sendemodulation gezielt beispielsweise um 90°, 180° oder 270° zu verschieben und vorzugsweise mittels einer IQ(Inphase, Quadratur)-Demodulation einen Phasenwinkel des reflektierten in Relation zum gesendeten Signal zu bestimmen. Dieses Vorgehen ist insbesondere nützlich zur Gewinnung von redundanten Informationen, um beispielsweise verschiedene parasitäre Effekte wie fixed pattern noise (FPN), Hintergrundlicht oder Asymmetrien des Sensors zu kompensieren.

[0004] Aufgabe der Erfindung ist es, die Phasenmessung und somit die Entfernungsmessung zu verbessern.

[0005] Die Aufgabe wird in vorteilhafter Weise durch das Verfahren und das erfindungsgemäße Lichtlaufzeitkamerasystem nach Gattung der unabhängigen Ansprüche gelöst.

[0006] Vorteilhaft ist ein Verfahren zum Betreiben eines Lichtlaufzeitkamerasystems vorgesehen, das mit einer Vielzahl von Modulationsfrequenzen betreibbar ist, mit den Schritten:

a) Festlegung von zwei Modulationsfrequenzen anhand derer eine Entfernungsbestimmung erfolgen soll,
b) Ermittlung einer Phasenverschiebung eines emittierten und empfangenen Signals für jede der beiden ausgewählten Modulationsfrequenzen,
c) Ermittlung eines Entfernungswerts anhand der beiden ermittelten Phasenverschiebungen,
d) Bestimmung einer weiteren Modulationsfrequenz anhand vorgegebener Auswahlregeln unter Berücksichtigung der beiden letzten Modulationsfrequenzen
e) Ermittlung einer weiteren Phasenverschiebung für die weitere Modulationsfrequenz
f) Ermittlung eines Entfernungswerts anhand der letzten beiden ermittelten Phasenverschiebungen,
g) Durchführung weiterer Entfernungsmessungen anhand der Schritte d) bis g)

[0007] Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die Entfernungsmessungen nicht zwingend nach einem fest vorgegebenen Frequenzmuster erfolgen müssen, sondern die Auswahl der Modulationsfrequenzen im Wesentlichen auch zufällig erfolgen kann. Besonders vorteilhaft ist es, zur Vermeidung ungünstiger Frequenzpaarungen, die Wahl der Modulationsfrequenzen zwar zufällig aber nach bestimmten Auswahlregeln vorzunehmen.

[0008] In einer weiteren Ausgestaltung ist es vorgesehen, eine vorbestimmte Anzahl von Modulationsfrequenzen als begrenzte Auswahlmöglichkeit bereitzustellen, wobei die Bestimmung einer weiteren Modulationsfrequenz gemäß Schritt d) des erfindungsgemäßen Verfahrens innerhalb der bereitgestellten Auswahl von Modulationsfrequenzen erfolgt.

[0009] Durch die begrenzte Auswahlmöglichkeit ist es vorteilhaft möglich, die Zeit zur Auswahl einer geeigneten Modulationsfrequenz zu verkürzen und erlaubt somit schnellere Messzyklen. Zudem reduziert eine begrenzte Auswahlmöglichkeit auch den Kalibrieraufwand.

[0010] Besonders vorteilhaft ist es, wenn die Bestimmung der weiteren Modulationsfrequenz unter Berücksichtigung der Auswahlregeln zufällig erfolgt.

[0011] Bevorzugt ist es nützlich, eine Mehrzahl der Modulationsfrequenzen teilerfremd zu wählen, aufgrund der Erkenntnis, dass teilerfremde Frequenzverhältnisse häufig geeignete Frequenzpaarungen bilden.

[0012] In einer weiteren Ausgestaltung ist es vorteilhaft, einen Entfernungswert nur dann als gültig zu bewerten, wenn zwei der unmittelbar zuvor ermittelten Entfernungswerte innerhalb tolerierter Abweichungsgrenzen liegen. Durch dieses Vorgehen können in einfacher Art und Weise Sprünge in der Entfernungsmessung durch Entfernungsfehlzuordnungen erkannt und ausgeblendet werden.

[0013] Die Abweichungsgrenzen können beispielsweise in Abhängigkeit des zuletzt ermittelten Entfernungswertes bestimmt werden.

[0014] Besonders vorteilhaft ist ein Lichtlaufzeitkamerasystem vorgesehen, mit einem Modulator, der mit einer Beleuchtung und einem Empfänger des Systems verbunden ist, wobei ein Modulationssteuergerät mit dem Modulator verbunden und derart ausgestaltet ist, dass der Modulator mit mindestens drei Modulationsfrequenzen betreibbar ist, und dass eine Auswerteeinheit derart ausgestaltet ist, dass Modulationsfrequenzen für eine Entfernungsmessung anhand vorgegebener Auswahlregeln ausgewählt werden

[0015] Nachfolgend wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen näher erläutert.

[0016] Es zeigen:

[0017] Fig. 1 schematisch das grundlegende Prinzip der Photomischdetektion,

[0018] Fig. 2 eine modulierte Integration der erzeugten Ladungsträger,

[0019] **Fig.** 3 zwei zeitliche Verläufe der Ladungsintegration mit unterschiedlichen Phasenlagen,

[0020] Fig. 4 Relation der Integration in einem IQ-Diagramm,

[0021] Fig. 5 einen Querschnitt eines PMD-Pixels mit einer räumlichen Potenzialverteilung,

[0022] Fig. 6 eine Distanzmessung mit einer Wellenlänge,

[0023] Fig. 7 eine Distanzmessung mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen,

[0024] Fig. 8 einen Verlauf der Phasenverschiebungen mit dem Abstand,

[0025] Fig. 9 eine erfindungsgemäße Distanzbestimmung,

[0026] Fig. 10 schematisch ein Schema einer Auswahlstruktur,

[0027] Fig. 11 ein Beispiel eines möglichen erfindungsgemäßen Ablaufschemas,

[0028] Fig. 12 ein Beispiel mit ungünstigen Frequenzpaarungen,

[0029] Fig. 13 ein Beispiel mit einem rekursiven Schritt

[0030] Fig. 14 ein erfindungsgemäßes Ablaufschema,

[0031] Fig. 15 eine Störung der Modulation mit einem Signal gleicher Frequenz,

[0032] Fig. 16 eine Störung der Modulation mit einem Signal ungleicher Frequenz.

[0033] Bei der nachfolgenden Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen bezeichnen gleiche Bezugszeichen gleiche oder vergleichbare Komponenten.

[0034] Fig. 1 zeigt eine Messsituation für eine optische Entfernungsmessung mit einer Lichtlaufzeitkamera, wie sie beispielsweise aus der DE 197 04 496 bekannt ist.

[0035] Das Lichtlaufzeitkamerasystem **1** umfasst eine Sendeeinheit bzw. ein Beleuchtungsmodul **10** mit einer Beleuchtung **12** und einer dazugehörigen Strahlformungsoptik **15** sowie eine Empfangseinheit bzw. Lichtlaufzeitkamera **20** mit einer Empfangsoptik **25** und einem Lichtlaufzeitsensor **22**. Der Lichtlaufzeitsensor **22** weist mindestens ein Lichtlaufzeitpixel, vorzugsweise ein Pixel-Array, auf und ist insbesondere als PMD-Sensor ausgebildet. Die Empfangsoptik **25** besteht typischerweise zur Verbesserung der Abbildungseigenschaften aus mehreren optischen Elementen. Die Strahlformungsoptik **15** der Sendeeinheit **10** kann beispielsweise als Reflektor oder Linsenoptik ausgebildet sein. In einer sehr einfachen Ausgestaltung kann ggf. auch auf optische Elemente sowohl empfangs- als auch sendeseitig verzichtet werden.

[0036] Das Messprinzip dieser Anordnung basiert im Wesentlichen darauf, dass ausgehend von der Phasenverschiebung des emittierten und empfangenen Lichts die Laufzeit und somit die zurückgelegte Wegstrecke des empfangenen Lichts ermittelt werden kann. Zu diesem Zwecke werden die Lichtquelle **12** und der Lichtlaufzeitsensor **22** über einen Modulator **30** gemeinsam mit einem bestimmten Modulationssignal M_o mit einer Basisphasenlage φ_0 beaufschlagt. Im dargestellten Beispiel ist ferner zwischen dem Modulator **30** und der Lichtquelle **12** ein Phasenschieber **35** vorgesehen, mit dem die Basisphase φ_0 des Modulationssignals M_0 der Lichtquelle **12** um definierte Phasenlagen φ_{var} verschoben werden kann. Für typische Phasenmessungen werden vorzugsweise Phasenlagen von $\varphi_{var} = 0°, 90°, 180°, 270°$ verwendet.

[0037] Entsprechend des eingestellten Modulationssignals sendet die Lichtquelle **12** ein intensitätsmoduliertes Signal S_{p1} mit der ersten Phaselage p1 bzw. $p1 = \varphi_0 + \varphi_{var}$ aus. Dieses Signal S_{p1} bzw. die elektromagnetische Strahlung wird im dargestellten Fall von einem Objekt **40** reflektiert und trifft aufgrund der zurückgelegten Wegstrecke entsprechend phasenverschoben $\Delta\varphi(t_L)$ mit einer zweiten Phasenlage $p2 = \varphi_0 + \varphi_{var} + \Delta\varphi(t_L)$ als Empfangssignal S_{p2} auf den Lichtlaufzeitsensor **22**. Im Lichtlaufzeitsensor **22** wird das Modulationssignal M_o mit dem empfangenen Signal S_{p2} gemischt, wobei aus dem resultierenden Signal die Phasenverschiebung bzw. die Objektentfernung d ermittelt wird.

[0038] Zur Verbesserung der Messgenauigkeit und/oder zur Erweiterung des Eindeutigkeitsbereichs kann es ferner vorgesehen sein, Lichtlaufzeitmessungen mit unterschiedlichen Modulationsfrequenzen durchzuführen. Zu diesem Zweck ist der Modulator **30** mit einem Modulationssteuergerät **38** verbunden, das vorzugsweise innerhalb eines vorgegebenen Frequenzspektrums Modulationsfrequenzen vorgeben kann.

[0039] Der Modulator **30** könnte beispielsweise als Frequenzsynthesizer ausgebildet sein, der über das Modulationssteuergerät **38** für die jeweilige Messaufgabe angesteuert wird.

[0040] Ferner ist die Empfangseinheit **20** mit einer Auswerteeinheit **27** verbunden. Die Auswerteeinheit **27** kann gegebenenfalls auch Bestandteil der Empfangseinheit **20** und insbesondere auch Teil des Lichtlaufzeitsensors **22** sein. Aufgabe der Auswerteeinheit **27** ist es, anhand der empfangenen Signale in Relation zur Modulationsfrequenz Phasenverschiebungen zu ermitteln und/oder auszuwerten. Die Mischung der empfangen Lichtstrahlen mit der Modulationsfrequenz erfolgt vorzugsweise im Lichtlaufzeitsensor **22** bzw. PMD-Sensor. Ferner kann das Modulationssteuergerät **38** auch Bestandteil der Auswerteeinheit **27** sein. Insbesondere kann es auch vorgesehen sein, dass die Auswerteeinheit **27** die Funktion des Modulationssteuergeräts **38** vollständig oder teilweise übernimmt.

[0041] Als Beleuchtungsquelle bzw. Lichtquelle **12** eignen sich vorzugsweise Infrarot-Leuchtdioden. Selbstverständlich sind auch andere Strahlungsquellen in anderen Frequenzbreichen denkbar, insbesondere kommen auch Lichtquellen im sichtbaren Frequenzbereich in Betracht.

[0042] Das Grundprinzip der Phasenmessung ist schematisch in **Fig. 2** dargestellt. Die obere Kurve zeigt den zeitlichen Verlauf des Modulationssignals M_0 mit der die Beleuchtung **12** und der Lichtlaufzeitsensor **22** angesteuert werden. Das vom Objekt **40** reflektierte Licht trifft als Empfangssignal S_{p2} entsprechend seiner Lichtlaufzeit t_L phasenverschoben $\Delta\varphi(t_L)$ auf den Lichtlaufzeitsensor **22**. Der Lichtlaufzeitsensor **22** sammelt die photonisch erzeugten Ladungen q über mehrere Modulationsperioden in der Phasenlage des Modulationssignals M_0 in einem ersten Akkumulationsgate Ga und in einer um 180° verschobenen Phasenlage $M_0 + 180°$ in einem zweiten Akkumulationsgate Gb. Aus dem Verhältnis der im ersten und zweiten Gate Ga, Gb gesammelten Ladungen qa, qb lässt sich die Phasenverschiebung $\Delta\varphi(t_L)$ und somit eine Entfernung d des Objekts bestimmen.

[0043] **Fig. 3a** und **Fig. 3b** zeigen Verläufe der Ladungsdifferenz $\Delta q = q_a - q_b/(q_a + q_b)$ in Abhängigkeit der Phasenverschiebung $\Delta\varphi(t_L)$ des empfangenen Lichtsignals S_{p2} mit unterschiedlichen Phasenlagen. Die **Fig. 3a** zeigt einen Verlauf für eine unverschobene Modulationsphase M_0 mit einer Phasenlage $\varphi_{var} = 0°$

[0044] Bei einem Auftreffen des Signals S_{p2} ohne Phasenverschiebung also $\Delta\varphi(t_L) = 0°$, beispielsweise, wenn das Sendesignal S_{p1} direkt auf den Sensor gelenkt wird, sind die Phasen der Modulation M_0 und vom empfangenen Signal S_{p2} identisch, so dass alle erzeugten Ladungsträger phasensynchron am ersten Gate Ga erfasst werden und somit ein maximales Differenzsignal mit $\Delta q = 1$ anliegt.

[0045] Mit zunehmender Phasenverschiebung nimmt die Ladung am ersten Akkumulationsgate Ga ab und am zweiten Akkumulationsgate Gb zu. Bei einer Phasenverschiebung von $\Delta\varphi(t_L) = 90°$ sind die Ladungsträger qa, qb an beiden Gates Ga, Gb gleich verteilt und die Differenz somit Null und nach 180° Phasenverschiebung ”–1”. Mit weiter zunehmender Phasenverschiebung nimmt die Ladung am ersten Gate Ga wieder zu, so dass im Ergebnis die Ladungsdifferenz wieder ansteigt, um dann bei 360° bzw. 0° wieder ein Maximum zu erreichen.

[0046] Mathematisch handelt es sich hierbei um eine Korrelationsfunktion des empfangenen Signals S_{p2} mit dem modulierenden Signal M_0.

$$q(\tau) = \int_0^{\tau} S_{p2}(t-\tau) M_0(t) dt$$

[0047] Bei einer Modulation mit einem Rechtecksignal ergibt sich wie bereits dargestellt als Korrelationsfunktion eine Dreiecksfunktion. Bei einer Modulation mit beispielsweise einem Sinussignal wäre das Ergebnis eine Kosinusfunktion.

[0048] Wie **Fig. 3a** zeigt, ist eine Messung der Phase mit einer Phasenlage nur bis zu einer Phasenverschiebung $\Delta\varphi(t_L) \leq 180°$ eindeutig.

[0049] Zur maximalen Erfassung der Phasenverschiebung ist beispielsweise das IQ(Inphase-Quadratur)Verfahren bekannt, bei dem zwei Messungen mit um 90° verschobenen Phasenlagen durchgeführt werden, also beispielsweise mit der Phasenlage $\varphi_{var} = 0°$ und $\varphi_{var} = 90°$. Das Ergebnis einer Messung mit der Phasenlage $\varphi_{var} = 90°$ ist in **Fig. 3b** dargestellt.

[0050] Die Beziehung dieser beiden Kurven lässt sich in bekannter Art und Weise beispielsweise für sinusförmige Kurvenverläufe in einem IQ-Diagramm gem. **Fig. 4** darstellen. In erster Näherung ist diese Darstellung ohne weiteres auch für die dargestellten Dreiecksfunktionen anwendbar.

[0051] Der Phasenwinkel lässt sich dann in bekannter Weise über eine arctan- bzw. arctan2-Funktion bestimmen:

$$\varphi = \arctan\frac{\Delta q(90°)}{\Delta q(0°)}$$

[0052] Um beispielsweise Asymmetrie des Sensors zu kompensieren, können zusätzliche um 180° verschobene Phasenmessungen durchgeführt werden, so dass sich im Ergebnis der Phasenwinkel wie folgt bestimmen lässt.

$$\varphi = \arctan\frac{\Delta q(90°) - \Delta q(270°)}{\Delta(0°) - \Delta q(180°)}$$

[0053] **Fig. 5** zeigt einen Querschnitt durch einen Pixel eines Photomischdetektors wie er beispielsweise aus der DE 197 04 496 C2 bekannt ist. Die Modulationsphotogates Garn, G0, Gbm sind im Wesentlichen transparent ausgebildet und in einem lichtsensitiven Bereich eines Lichtlaufzeit bzw. PMD-Pixels angeordnet. Entsprechend der an den Modulationsgates bzw. Modulationsphotogates Gam, G0, Gbm angelegten Spannung werden die photonisch erzeugten Ladungen q entweder zum einen oder zum anderen Akkumulationsgate Ga, Gb gelenkt. Hierbei bezeichnet „Akkumulationsgate” allgemein eine Struktur, in der die Ladungssammlung stattfindet, nicht notwendigerweise ein Gate einer MOS (Metal-Oxide-Semiconductor)-Struktur. Als konkrete Ausführungsform wird bevorzugt eine Diodenstruktur verwendet.

[0054] **Fig.** 5b zeigt einen Potenzialverlauf bei dem die Ladungen q in Richtung des ersten Akkumulationsgates Ga abfließen, und **Fig.** 5c einen komplementären Potenzialverlauf, der die Ladungen q in Richtung des zweiten Akkumulationsgates Gb fließen lässt. Die Potenziale können beispielsweise entsprechend des anliegenden Modulationssignals vorgegeben werden. Je nach Anwendungsfall liegt die Frequenz des Modulationssignals vorzugsweise in einem Bereich von 1 bis 1000 MHz. Bei einer Modulationsfrequenz von beispielswei-

se 1 MHz ergibt sich eine Periodendauer von einer Mikrosekunde, so dass das Modulationspotenzial dementsprechend alle 500 Nanosekunden wechselt.

[0055] In **Fig.** 5a ist ferner eine Auslesevorrichtung **400** dargestellt, die gegebenenfalls bereits Bestandteil eines als CMOS ausgebildeten Lichtlaufzeitsensors **22** bzw. PMD-Sensors sein kann. Die als Kapazitäten ausgebildeten Akkumulationsgates Ga, Gb integrieren die photonisch erzeugten Ladungen über eine Vielzahl von Modulationsperioden. In bekannter Weise kann die dann an den Akkumulationsgates Ga, Gb anliegende Spannung Ua, Ub beispielsweise über die Auslesevorrichtung **400** hochohmig abgegriffen werden. Die Integrationszeiten sind vorzugsweise so zu wählen, dass für die zu erwartende Lichtmenge der Lichtlaufzeitsensor bzw. die Akkumulationsgates und/oder die lichtsensitiven Bereiche nicht in Sättigung geraten.

[0056] Aus der in Fig. 2 dargestellten laufzeitbedingten Phasenverschiebung $\Delta\varphi(t_L)$ lassen sich für Objektabstände $d \leq \lambda/2$ in bekannter Weise ein Abstand bestimmen.

$$d = \Delta\varphi(t_L)\frac{\lambda}{2\pi}\cdot\frac{1}{2}$$

[0057] Für Entfernungen $d > \lambda/2$ besteht in der Regel keine Möglichkeit die Phasenverschiebung absolut zu messen, so dass die ermittelte Phasenverschiebung nicht mehr eindeutig einem Entfernungswert zugeordnet werden kann.

[0058] Fig. 6 zeigt ein Beispiel, bei dem das Objekt **40** einen Abstand d vom Sender **10** von $d = 2\lambda + \frac{R}{2}$ aufweist, wobei selbstverständlich die bis zum Empfänger **20** zurückgelegt Wegstrecke doppelt so groß ist, nämlich $D = 2d = 4\lambda + R$

[0059] Zur Erhöhung des Eindeutigkeitsbereichs ist es, wie in Fig. 7 schematisch dargestellt, vorgesehen, mit mindestens zwei Modulationsfrequenzen respektive Modulationswellenlängen eine Objektabstand d zu bestimmen. Der Einfachheit halber ist in Fig. 7 die Gesamtstrecke D zwischen Sender **10** und Empfänger **20** dargestellt. Innerhalb des Eindeutigkeitsbereichs der beiden Wellenlängen λ_1, λ_2, der typischerweise durch das kleinste gemeinsame Vielfache der Wellenlängen λ_1, λ_2 aufgespannt wird, gilt folgende Distanzgleichung:

$$D = 2d = n_1\lambda_1 + R_1 = n_2\lambda_2 + R_2$$

mit

$$R_i = D\cdot(\mathrm{mod}\,\lambda_i) = \varphi_i(f_i, D)\frac{\lambda_i}{2\pi}$$

wobei für die von der Modulationsfrequenz und dem Objektabstand abhängige relative Phasenverschiebung $\varphi_i(f_i, D)$ gilt:

$$\varphi_i \equiv \frac{D\cdot f_i}{c}\cdot 2\pi(\mathrm{mod}\,2\pi) = \frac{D}{\lambda_i}\cdot 2\pi(\mathrm{mod}\,2\pi)$$

[0060] Die relative Phasenverschiebung $\varphi_i(f_i, D)$ ist somit ein Maß für das in der Entfernungsmessung verbleibende Reststück R_i. Für die Entfernungsbestimmung kann nun mit zwei für unterschiedliche Modulationsfrequenzen f_1, f_2 erfassten Phasenverschiebungen $\varphi_{1/2}(f_{1/2}, D)$ eine Lösung für die oben dargestellte Distanzgleichung gefunden werden.

[0061] Ein möglicher Lösungsweg ist in Fig. 8 schematisch dargestellt. Die Fig. 8 zeigt zwei relative Phasenverschiebung $\varphi_{1/2}(f_{1/2}, D)$ in Abhängigkeit des doppelten Objektabstandes $2d = D$ für zwei unterschiedliche Frequenzen f_1, f_2. Mit durchgezogener Linie ist die Phasenverschiebung φ_1 für $f_1 = 7{,}5$ MHz entsprechend einer Wellenlänge $\lambda_1 = 40$ m und mit gestrichelter Line für $f_2 = 5$ MHz entsprechend einer Wellenlänge $\lambda_2 = 60$ m dargestellt. Der Eindeutigkeitsbereich EB für die beiden Frequenzen ergibt sich in bekannter Weise aus dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen der beiden Wellenlänge λ_1, λ_2, also hier 120 m.

[0062] Für jeden Entfernungswert D innerhalb des gemeinsamen Eindeutigkeitsbereich EB gibt es genau ein Phasendifferenzpaar (φ_1, φ_2). Für den beispielhaften Entfernungswert von 23 m ergibt sich ein Phasendifferenzpaar von ca. (1,2/0,8).

[0063] In einem möglichen Anwendungsfall könnte es beispielsweise vorgesehen sein, eine geeignete Anzahl von Phasendifferenzpaaren mit dem ihnen zugeordneten Entfernungswert d in einer Wertetabelle abzulegen. Bei einer Entfernungsmessung kann dann beispielsweise ermittelt werden, welches tabellierte Phasendifferenzpaar dem ermittelten Phasendifferenzpaar am nächsten kommt. Der zugehörige Entfernungswert kann dann einfach der Wertetabelle entnommen werden.

[0064] Fig. 9 zeigt beispielhaft eine zeitliche Abfolge einer erfindungsgemäßen Entfernungsmessung für unterschiedliche Frequenzpaarungen, bei der die relative Phasenverschiebung $\varphi_i(f_i, D)$ für jede Modulationsfrequenz f_i mit vier Phasenlagen φ_{var} = 0°, 90°, 180°, 270° durchgeführt wird. Selbstverständlich sind auch Entfernungsmessungen mit weniger und ggf. auch mehr Phasenlagen denkbar.

[0065] In einem ersten Phasenmesszyklus PM_1 wird für eine erste Modulationsfrequenz f_1 eine erste Phasenverschiebung φ_1 und für die nachfolgende Phasenmesszyklen $PM_{2/3}$ für eine zweite und dritte Modulationsfrequenz f_2, f_3 eine zweite und dritte Phasenverschiebung φ_2, φ_3 ermittelt. Nach dem dritten Phasenmesszyklus PM_3 beginnen die Phasenmessungen wieder mit der ersten Modulationsfrequenz f_1 und so fort. Bei mehr als drei Modulationsfrequenzen können auch andere Frequenz-Reihenfolgen, insbesondere auch zufällige Reihenfolgen gewählt werden.

[0066] Jeweils zwei aufeinander folgende Phasenmesszyklen $PM_{n,n+1}$ bilden einen Distanzmesszyklus M_n aus dem ein Phasenwertepaar (φ_n, φ_{n+1}) und ein diesem Paar zugeordneter Entfernungswert $d_{n,n+1}$ ermittelt wird.

[0067] Erfindungsgemäß ist es hierbei vorgesehen, dass nur dann ein Entfernungswert d als gültig gewertet wird, wenn in drei aufeinander folgenden Distanzmesszyklen innerhalb tolerierter Grenzen im Wesentlichen derselbe Entfernungswert ermittelt wird.

[0068] Ein mögliches erfindungsgemäßes Vorgehen ist beispielhaft in folgender Tabelle veranschaulicht:

Distanzmesszyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	9
EB	120	200	300	120	200	300	120	200	300
Distanz	d_{12}	d_{23}	d_{31}	d_{12}	d_{23}	d_{31}	d_{12}	d_{23}	d_{31}
D = 23 m	23,4	22,5	23,0	23,7	178	23,1	23,2	24	267
Differenz	23,4	0,9	0,5	0,7	155,3	145,9	0,1	0,8	243
Toleranz 20 m		<	<	<	>	>	<	<	>
Gültiger Wert	(–)	(–)	(+)	(+)	(–)	(–)	(–)	(+)	(–)
Ausgabe			23,0	23,7				24	

[0069] Zur Erfassung von Fehlzuordnungen kann die Toleranzgrenze deutlich oberhalb eines üblichen Signalrauschens gelegt werden und selbstverständlich unterhalb eines minimal möglichen Entfernungssprungs durch Fehlzuordnung. Im dargestellten Beispiel könnte beispielsweise eine Toleranzgrenze Δd_{tol} auf ± 20 m festgelegt werden. Ausgangspunkt für die Anwendung der Toleranzgrenze sind im dargestellten Beispiel die Differenzen der letzten drei Messungen.

[0070] Mit Beginn der Messung liegen im ersten und zweiten Distanzmesszyklus noch keine drei Distanzmessungen vor, so dass die an sich zutreffenden Entfernungswerte nicht ausgegeben werden. Ab dem dritten Messzyklus liegt dann eine ausreichende Anzahl von Entfernungswerten vor.

[0071] Die im dritten und vierten Messzyklus ermittelten Entfernungswerte liegen innerhalb der Toleranzgrenze, sind somit gültig und werden ausgegeben. Für bestimmte Auswerteverfahren könnte es ggf. auch vorgesehen sein, die beiden vorlaufenden Entfernungswerte rekursiv auszuwerten und auszugeben, wenn sie innerhalb der Toleranz liegen, wie dies im dargestellten ersten und zweiten Messzyklus der Fall ist.

[0072] Im fünften Messzyklus erfolgte eine Fehlzuordnung mit einem Distanzsprung auf 178 m, der die Toleranzgrenze überschreitet. Dieser Entfernungswert ist ungültig und wird nicht ausgegeben. Ein gültiger Entfernungswert liegt erst wieder im achten Distanzmesszyklus vor, nachdem die Entfernungswerte in Folge in der achten Messung innerhalb der Toleranzgrenze lagen. Ggf. könnten auch hier die vorlaufenden innerhalb der Toleranz liegenden Entfernungswerte rekursiv als gültig ausgegeben werden. Erfindungsgemäß ist es vorge-

sehen die Toleranzgrenze vornehmlich so festzulegen, dass sicher Fehlzuordnungen erkannt werden. Selbstverständlich kann die Toleranzgrenze je nach Genauigkeitsanforderung der Entfernungsmessungen enger gefasst werden.

[0073] Eine weitere Ausgestaltung betrifft ein Lichtlaufzeitkamerasystem, das mit einer Vielzahl von Modulationsfrequenzen betreibbar ist. Erfindungsgemäß ist es vorgesehen, dass aufeinander folgende Modulationsfrequenzen f_j, f_k anhand vorgegebener Auswahlregeln miteinander kombiniert werden.

[0074] Als mögliche Auswahlregel kann beispielsweise die Größe des aufgespannten Eindeutigkeitsbereichs herangezogen werden. Ist es beispielsweise von Interesse einen Bereich bis zu 20 m zu erfassen, bieten sich vorzugsweise die Wellenlängen 3 m und 7 m an, die einen Bereich von 21 m aufspannen oder ggf. auch 5 m und 7 m mit einem Eindeutigkeitsbereich von 35 m, während eine Kombination von 3 m und 4 m einen zu kleinen Eindeutigkeitsbereich aufspannt. In der folgenden Tabelle sind einige Beispiele aufgeführt:

Frequenz/MHz	100, 42,9	60, 42,9	100, 75	60, 23	75, 68	75, 71
Wellenlänge/m	3; 7	5; 7	3; 4	5; 13	4; 4,4	4; 4,2
Eindeutigkeitsbereich	21	35	12	65	44	84
geeignet	+	+	–	–	+	–

[0075] Grundsätzlich ist zu erkennen, dass nah beieinander liegende Modulationsfrequenzen respektive Wellenlängen einen zunehmend größer werdenden Eindeutigkeitsbereich aufspannen, so dass die Bestimmung der Entfernung im bevorzugten Entfernungsbereich immer ungenauer wird. Ebenso sind Kombinationen ungünstig die trotz großem Frequenzabstand einen zu großen oder zu kleinen Eindeutigkeitsbereich aufspannen. Im dargestellten Fall wurden Frequenzkombinationen als günstig erachtet, deren Eindeutigkeitsbereich zwischen 20 und 50 m liegt.

[0076] Auch ist es denkbar, nur Frequenzkombinationen zuzulassen, die in der Entfernungsbestimmung besonders robust im Hinblick auf verrauschte oder gestörte Signal sind.

[0077] Insbesondere ist es günstig im Hinblick auf die vorgeschlagene Plausibilisierung der Entfernungswerte, eine neue Modulationsfrequenz unter Berücksichtigung der zuvor verwendeten Frequenzkombination auszuwählen. So kann vorteilhaft sichergestellt werden, dass immer einen Satz von drei Modulationsfrequenzen in gewissen Grenzen ähnliche Eigenschaften aufweisen. Beispielsweise könnten die Kombinationen von drei aufeinander folgenden Modulationsfrequenzen im Hinblick auf eine Distanzauflösung des aufgespannten Eindeutigkeitsbereichs in gewissen Grenzen ähnlich sein.

[0078] Grundsätzlich ist es denkbar, die nachfolgende Modulationsfrequenz innerhalb eines vorgegebenen Frequenzbereiches solange zufällig auszuwählen, bis die zufällig ausgewählte Frequenz den Auswahlbedingungen entspricht.

[0079] Bevorzugt wird jedoch vorgeschlagen, im Vorfeld einer Messung ggf. bereits auch werksseitig eine Auswahltabelle bzw. Kennfeld mit geeigneten Modulationsfrequenzen bzw. Modulationsfrequenzpaaren bereitzustellen, aus denen im Laufe einer Messung zurückgegriffen werden kann.

[0080] Idealerweise und in bestimmten Anwendungsfällen können die Modulationsfrequenzen derart ausgewählt werden, dass alle Kombinationen der Modulationsfrequenzen zueinander passen. In der der folgenden Tabelle ist eine mögliche Auswahl gezeigt.

	f1	f2	f3	f4
Frequenz/MHz	5,6	6,4	7,5	9,0
Wellenlänge/m	26,6	23,3	20,0	16,6

[0081] Hieraus ergeben sich folgenden sechs Frequenzkombinationen mit den entsprechenden Eindeutigkeitsbereichen:

Freq.paar	f1 + f2	f1 + f3	f1 + f4	f2 + f3	f2 + f4	f3 + f4
EB/m	186	80	133	140	116	99

[0082] Vorzugsweise werden die Frequenzpaare so gewählt, dass beide Frequenzen teilerfremd sind. Dies ist im dargestellten Beispiel der Fall.

[0083] In Fig. 10 sind alle Verzweigungspfade mit den möglichen Frequenzpaarungen dargestellt, wobei auch eine direkte Umkehrung der vorherigen Frequenzpaarung erlaubt wurde. Die Wahrscheinlichkeit für jede Verzweigung liegt bei 33%, bereits bei der dritten Verzweigung beträgt die Wahrscheinlichkeit für den gewählten Pfad bei nur 4%.

[0084] Aus verschiedenen Gründen kann es ungünstig sein, die direkte Umkehrung der vorherigen Frequenzpaarung zuzulassen. Fig. 11 zeigt ein entsprechendes Verzweigungsdiagramm. Die Wahrscheinlichkeit für eine Auswahl liegt bei 50%. Nach fünf Verzweigungen wird eine Wahrscheinlichkeit von 3% für den gewählten Pfad erreicht.

[0085] Gemäß der obigen Frequenztabelle weist die Kombination der beiden Frequenz f1 und f3 den kleinsten Eindeutigkeitsbereich auf. Je nach Anwendungsfall kann diese Kombination evtl. ungünstig sein.

[0086] Fig. 12 zeigt ein Verzweigungsdiagramm, bei dem die Auswahl f1 + f3 sowie die Umkehrung f3 + f1 unterdrückt wurde. Im Ergebnis ist somit die Wahrscheinlichkeit für bestimmte Frequenzabfolgen ungleich verteilt. Um dies Effekt abzumildern, können beispielsweise mehr als vier Modulationsfrequenzen eingesetzt werden.

[0087] In Fig. 13 ist schematisch eine mögliche Auswahlstruktur mit mehr als vier Modulationsfrequenzen dargestellt. Die Messung beginnt gezielt oder zufällig mit einer ersten und zweiten Modulationsfrequenz f_1, f_2. Die Distanz d wird, wie bereits in Fig. 9 dargestellt, durch Kombination der zu den beiden Modulationsfrequenzpaaren f_1, f_2 ermittelten Phasenverschiebungen φ_1, φ_2 bestimmt. Für die nächste Distanzbestimmung werden in der dargestellten Auswahlstruktur für eine Kombination mit der zweiten Modulationsfrequenz f_2 eine dritte, vierte und siebte Modulationsfrequenz f_3, f_4, f_7 als besonders günstig vorgeschlagen. Innerhalb dieser Auswahlmöglichkeiten kann nun beliebig ausgewählt werden.

[0088] Wurde beispielsweise eine Kombination mit der vierten Modulationsfrequenz f_4 gewählt, ergibt sich hiernach nur eine einzige günstige Kombination mit der fünften Modulationsfrequenz f_5, wobei hiernach wiederum mehrere Kombinationen zur Verfügung stehen.

[0089] Wurde nach ursprünglichen Kombination der ersten und zweiten Modulationsfrequenz f_1, f_2 die dritte Modulationsfrequenz f_3 ausgewählt, ergeben sich hiernach zwei Kombinationsmöglichkeiten, nämlich mit der ersten und vierten Modulationsfrequenz. Wenn hiernach zufälligerweise die erste und dann wiederum die zweite Modulationsfrequenz ausgewählt f_1, f_2 wurde, wird wieder ein bereits verwendetes Modulationsfrequenzpaar erreicht. Da jedoch jeder Auswahlschritt eine zufällige Komponente aufweist, besteht nur eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass die gleiche Frequenzabfolge mehrmals hintereinander durchlaufen wird.

[0090] Die Auswahlstruktur ist selbstverständlich so strukturiert, dass jedem Modulationsfrequenzpaar mindestens eine Auswahlmöglichkeit folgt, und somit alle Verzweigungsschritte in sich geschlossen sind.

[0091] Fig. 14 zeigt schematisch ein mögliches Ablaufschema des erfindungsgemäßen Vorgehens. In einem ersten Schritt a) wird beispielsweise durch ein Initialisierungsprogramm oder ggf. auch werkseitig eine bestimmte Anzahl von Modulationsfrequenzen in einer geeigneten Auswahlstruktur vorgegeben. Die weitere Auswahl der Modulationsfrequenzen erfolgt dann anhand der vorgegebenen Auswahlstruktur.

[0092] In einem zweiten Schritt b) werden zwei Modulationsfrequenzen f_i, f_k innerhalb der Auswahlstruktur entweder zufällig oder auch vorbestimmt ausgewählt, mit denen im nachfolgenden Schritt c) zwei Phasenverschiebungen φ_i, φ_j und hiernach im Schritt d) aus dieser Kombination eine Distanz ermittelt wird. Die ermittelte Distanz kann beispielsweise an eine nachfolgende Auswerteeinheit ausgegeben und/oder beispielsweise auch zwischengespeichert werden.

[0093] Für die nachfolgende Entfernungsbestimmung wird eine nachfolgende Modulationsfrequenz f_k in einem fünften Schritt e) in Abhängigkeit der zuvor verwendeten Modulationsfrequenzen f_i, f_j entsprechend der Auswahlstruktur ausgewählt, insbesondere zufällig ausgewählt.

[0094] In einem sechsten Schritt f) wird mit der neuen Frequenz f_k eine weitere Phasenverschiebung φ_k ermittelt, aus der in Kombination mit der letzten ermittelten Phasenverschiebung φ_j ein weiterer Entfernungswert $d_{j,k}$ im siebten Schritt g) gewonnen wird. Auch diese Entfernung kann beispielsweise an eine nachfolgende Auswerteeinheit übermittelt werden.

[0095] In einem achten Schritt h) wird wieder auf den fünften Schritt e) zurückverwiesen, wobei nun die letzten beiden verwendeten Modulationsfrequenzen f_j, f_k für die Auswahl der nächsten nachfolgenden Modulationsfrequenz zu berücksichtigen sind.

[0096] Die dargestellte Schleife kann nun für die Dauer der Messung mehrfach durchlaufen werden.

[0097] In einer weiteren möglichen Ausführung kann es auch vorgesehen sein, das zuletzt verwendete Modulationsfrequenzpaar abzuspeichern und einer nachfolgenden Messung mit diesem Frequenzpaar zu beginnen.

[0098] Vorteilhaft kann das beschrieben Auswahlverfahren mit der zu Fig. 9 beschriebenen Entfernungswerte-Plausibilisierung kombiniert werden.

[0099] Der Wechsel der Modulationsfrequenz hat insbesondere den Vorteil, das Störungen, die durch weitere Lichtlaufzeitkamerasysteme, die ein moduliertes Licht in den eigenen Erfassungsbereich einstrahlen reduziert oder sogar vermieden werden können.

[0100] Eine derartige Störung ist beispielhaft in Fig. 15 gezeigt. Parallel zu einem ersten Lichtlaufzeitkamerasystem L1 strahlt ein zweites Lichtlaufzeitkamerasystem L2 mit der gleichen Modulationsfrequenz f_1 in den Erfassungsbereich der ersten Lichtlaufzeitkamera. Aufgrund der gleichen Periodizität der beiden gleichen Frequenzen wird auch die Ladungsakkumulation an beiden Akkumulationsgates Ga, Gb im Gleichtakt beeinflusst, so dass auch das Ladungsverhältnis verschoben wird, und somit eine nicht zutreffende Phasenverschiebung und im Ergebnis ein fehlerhafter Entfernungswert ermittelt wird.

[0101] In Fig. 16 ist ein Zusammentreffen zweier Modulationsfrequenzen f_1, f_2 mit unterschiedlicher Frequenz und somit unterschiedlicher Periodizität dargestellt. Die Störung erfolgt somit nicht im Gleichtakt, sondern verteilt sich im Mittel gleichmäßig auf beide Akkumulationsgates Ga, Gb, so dass im Ergebnis nur die Gesamtlichtmenge aber nicht die Ladungsverteilung beeinflusst wird.

[0102] Durch die erfindungsgemäße zufällige strukturierte Auswahl der Modulationsfrequenzen wird mit einer hohen Wahrscheinlichkeit vermieden, dass bei einem Zusammentreffen mehrerer Lichtlaufzeitsysteme in einem gemeinsamen Erfassungsbereich moduliertes Licht mit der gleichen Modulationsfrequenz aufscheint.

Bezugszeichenliste

10	Beleuchtungsmodul
12	Beleuchtung
22	Lichtlaufzeitsensor
27	Auswerteeinheit
30	Modulator
35	Phasenschieber, Beleuchtungsphasenschieber
38	Modulationssteuergerät
$\Delta\varphi(t_L)$	laufzeitbedingte Phasenverschiebung
φ_{var}	Phasenlage
φ_0	Basisphase
φ_1, φ_2	Phasenverschiebung
M_0	Modulationssignal
p1	erste Phase
p2	zweite Phase
Sp1	Sendesignal mit erster Phase
Sp2	Empfangssignal mit zweiter Phase
Ga, Gb	Akkumulationsgates

Ua, Ub	Spannungen am Modulationsgate
F1, f2	Modulationsfrequenzen
PM	Phasenmesszyklus
d	Objektabstand
D	Entfernungswert = 2d
EB	Eindeutigkeitsbereich

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- EP 1777747 [**0002**]
- DE 19704496 [**0002**, **0003**, **0034**]
- DE 19704496 C2 [**0053**]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Lichtlaufzeitkamerasystems, das mit einer Vielzahl von Modulationsfrequenzen betreibbar ist,
a) Festlegung von zwei Modulationsfrequenzen (f_n, f_{n+1}) anhand derer eine Entfernungsbestimmung erfolgen soll,
b) Ermittlung einer Phasenverschiebung (φ_n, φ_{n+1}) eines emittierten und empfangenen Signals (Sp1, Sp2) für jede der beiden ausgewählten Modulationsfrequenzen (f_n, f_{n+1})
c) Ermittlung eines Entfernungswerts ($d_{n,n+1}$) anhand der beiden ermittelten Phasenverschiebungen (φ_n, φ_{n+1}),
d) Bestimmung einer weiteren Modulationsfrequenz (f_{n+2}) anhand vorgegebener Auswahlregeln unter Berücksichtigung der beiden letzten Modulationsfrequenzen (f_n, f_{n+1})
e) Ermittlung einer weiteren Phasenverschiebung (φ_{n+2}) für die weitere Modulationsfrequenz (f_{n+2})
f) Ermittlung eines Entfernungswerts ($d_{n+1,n+2}$) anhand der letzten beiden ermittelten Phasenverschiebungen (φ_{n+1}, φ_{n+2}),
g) Durchführung weiterer Entfernungsmessungen anhand der Schritte d) bis g)

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem eine vorbestimmte Anzahl von Modulationsfrequenzen (fm) zur Auswahl bereitgestellt wird und die Bestimmung einer weiteren Modulationsfrequenz (f_{n+2}) gemäß Schritt d) des Anspruchs 1 innerhalb der bereitgestellten Auswahl von Modulationsfrequenzen (fm) erfolgt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Bestimmung der weiteren Modulationsfrequenz (f_{n+2}) unter Berücksichtigung der Auswahlregeln zufällig erfolgt.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 3, bei dem die Mehrzahl der bereitgestellten Modulationsfrequenzen teilerfremd sind.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, beim dem bei der Bestimmung der weiteren Modulationsfrequenz (fn+2) Modulationsfrequenzen bevorzugt werden, die zu den vorangegangen Modulationsfrequenzen (f_n, f_{n+1}) teilerfremd sind.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein Entfernungswert ($d_{n,n+1}$) nur dann als gültig bewertet wird, wenn zwei der unmittelbar zuvor ermittelten Entfernungswerte ($d_{n-2,n-1}$, $d_{n-1,n}$) innerhalb tolerierter Abweichungsgrenzen liegen.

7. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem die tolerierten Abweichungsgrenzen anhand des zuletzt ermittelten Entfernungswerts ($d_{n,n+1}$) festgelegt werden.

8. Lichtlaufzeitkamerasystem (**1**) mit einem Modulator (**30**), der mit einer Beleuchtung (**10**) und einem Empfänger (**20**) des Lichtlaufzeitkamerasystems (**1**) verbunden ist,
dadurch gekennzeichnet, dass
ein Modulationssteuergerät (**38**) mit dem Modulator (**30**) verbunden ist
und derart ausgestaltet ist, dass der Modulator (**30**) mit mindestens drei Modulationsfrequenzen (f_1, f_2, f_3) betreibbar ist,
und dass eine Auswerteeinheit derart ausgestaltet ist, dass Modulationsfrequenzen für eine Entfernungsmessung anhand vorgegebener Auswahlregeln ausgewählt werden.

9. Lichtlaufzeitkamerasystem nach Anspruch 8, das zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 7 ausgebildet ist.

Es folgen 10 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

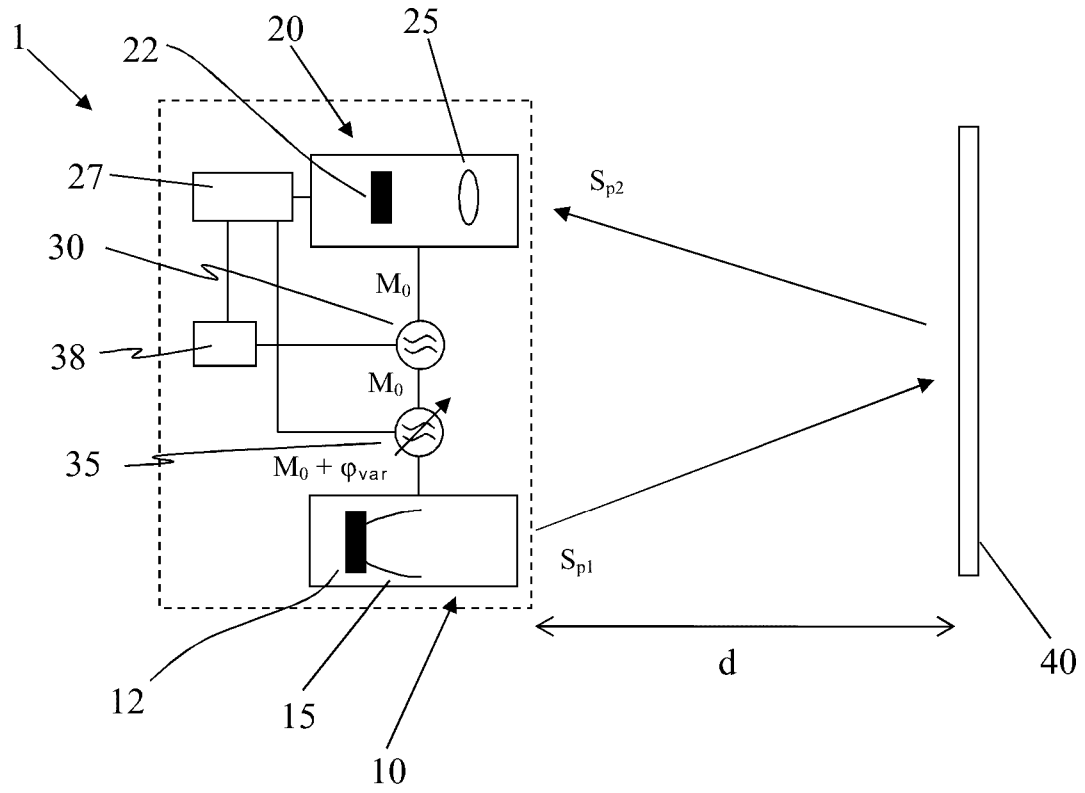


Fig. 1

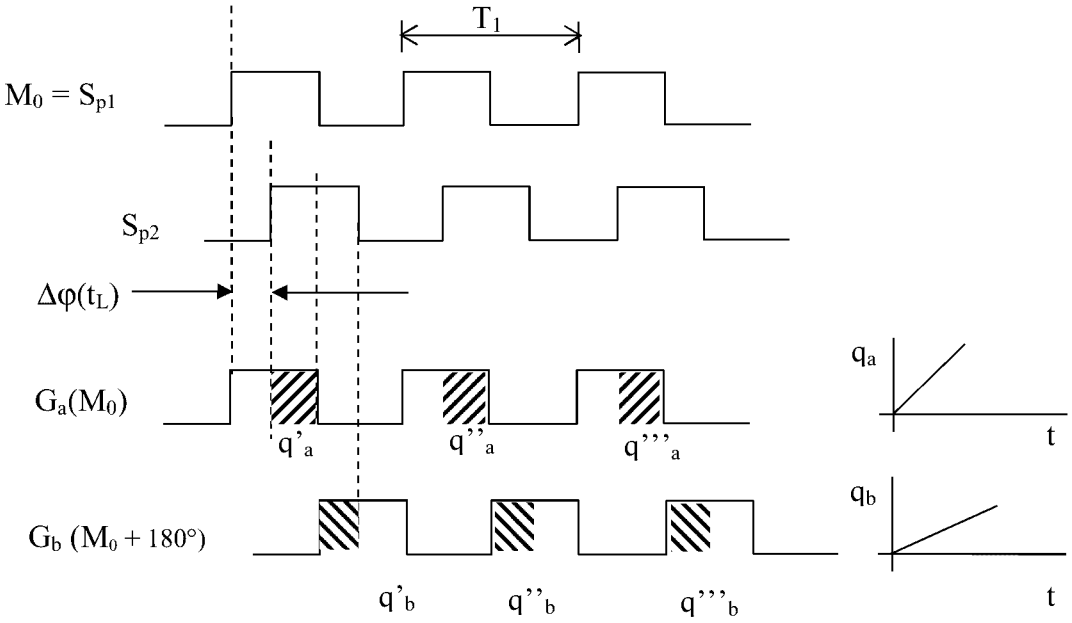


Fig. 2

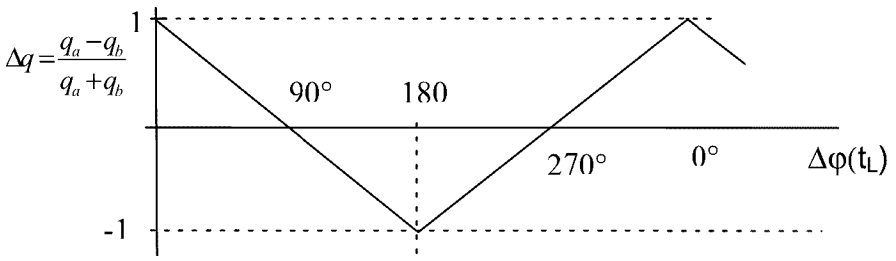


Fig. 3a

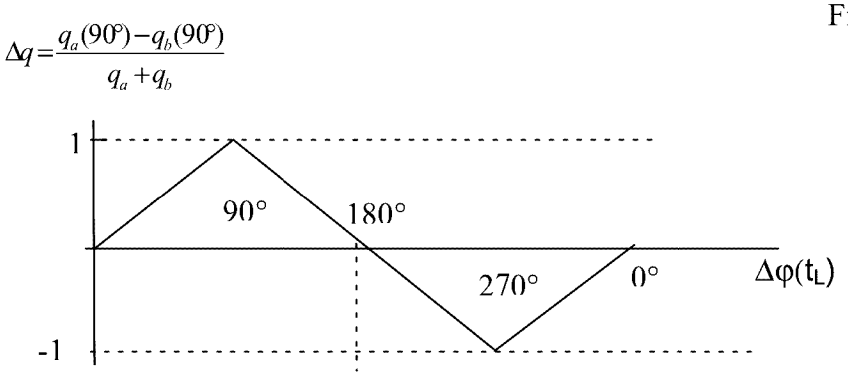


Fig. 3b

Fig. 3

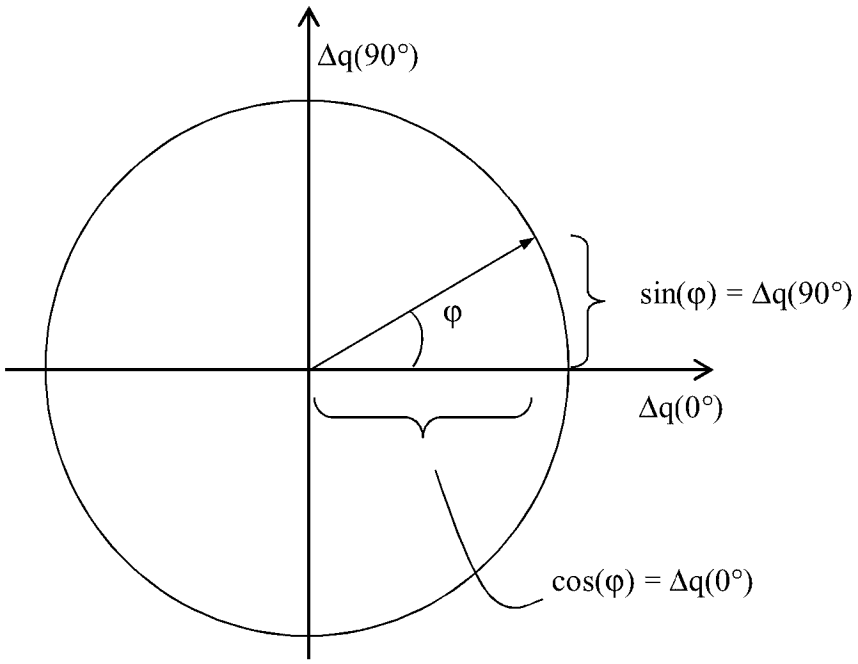


Fig. 4

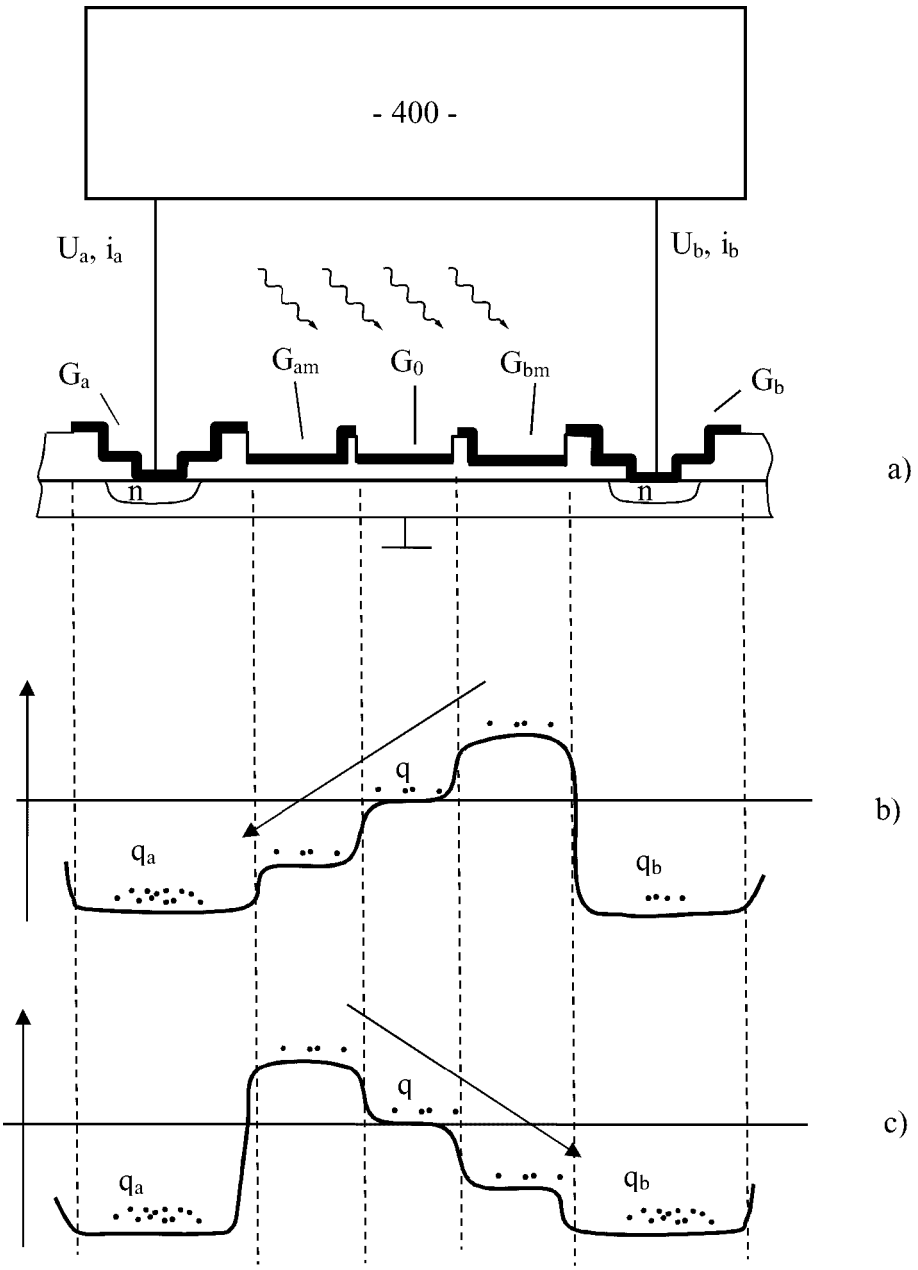


Fig. 5

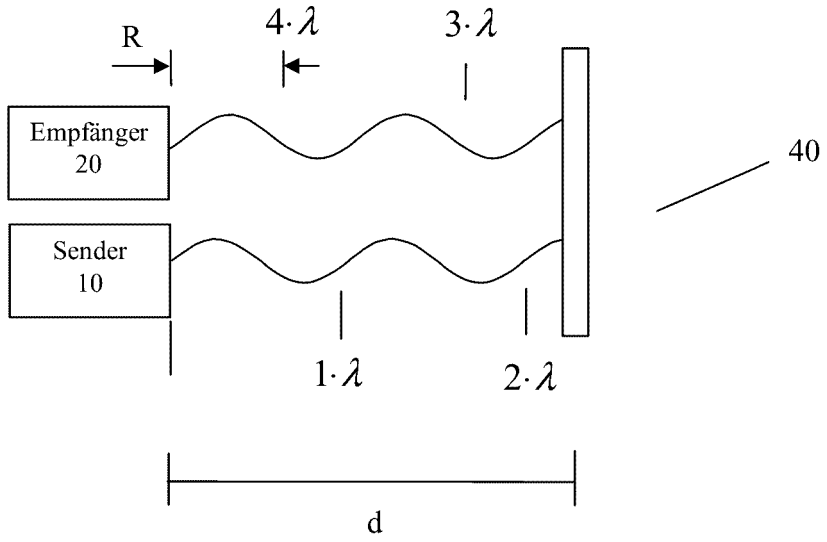

R
4·λ
3·λ
Empfänger
20
40
Sender
10
1·λ
2·λ
d

Fig. 6

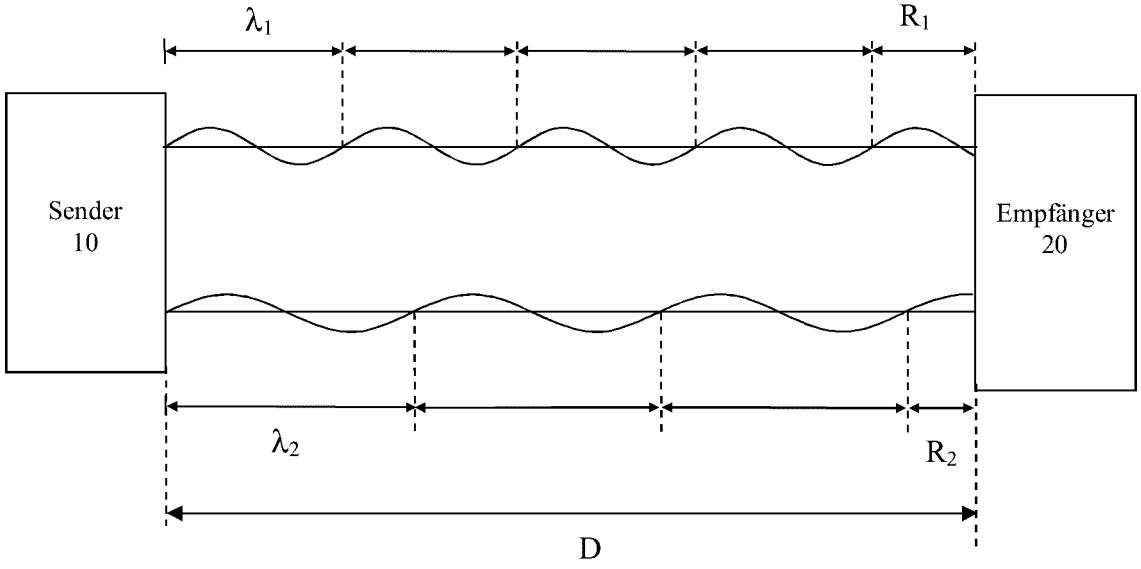

λ1
R1
Sender
10
Empfänger
20
λ2
R2
D

Fig. 7

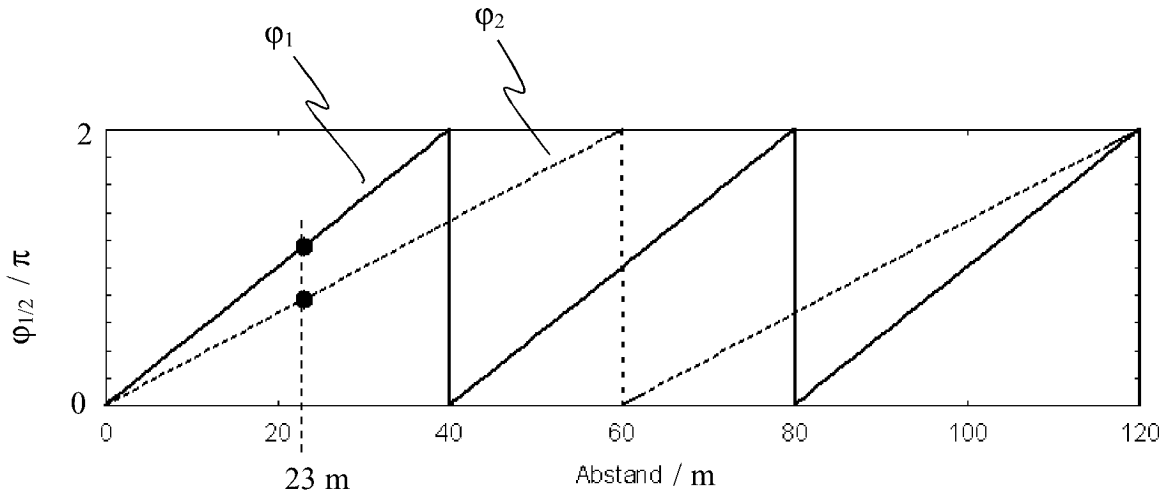


Fig. 8

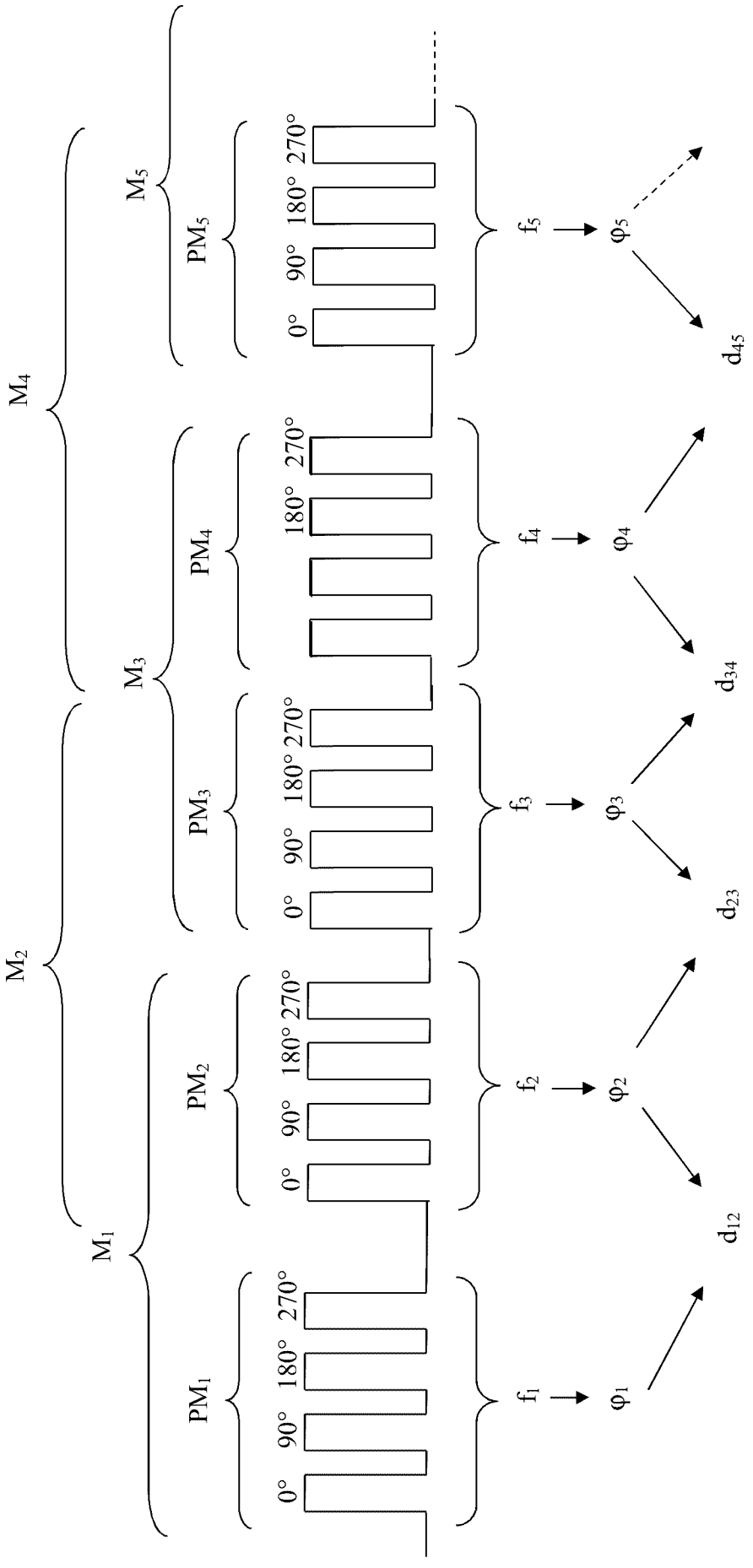

M1
M2
M3
M4
M5
PM1
PM2
PM3
PM4
PM5
0°
90°
180°
270°
f1
f2
f3
f4
f5
φ1
φ2
φ3
φ4
φ5
d12
d23
d34
d45

Fig. 9

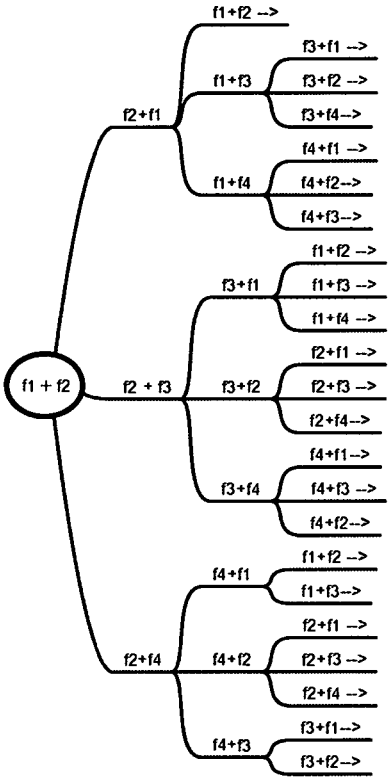

f1 + f2
f2+f1
f1+f2 -->
f1+f3
f3+f1 -->
f3+f2 -->
f1+f4
f3+f4-->
f4+f1 -->
f4+f2-->
f4+f3-->
f2 + f3
f3+f1
f1+f2 -->
f1+f3 -->
f1+f4 -->
f3+f2
f2+f1 -->
f2+f3 -->
f2+f4-->
f3+f4
f4+f1-->
f4+f3 -->
f4+f2-->
f2+f4
f4+f1
f1+f2 -->
f1+f3-->
f4+f2
f2+f1 -->
f2+f3 -->
f2+f4 -->
f4+f3
f3+f1-->
f3+f2-->

Fig. 10

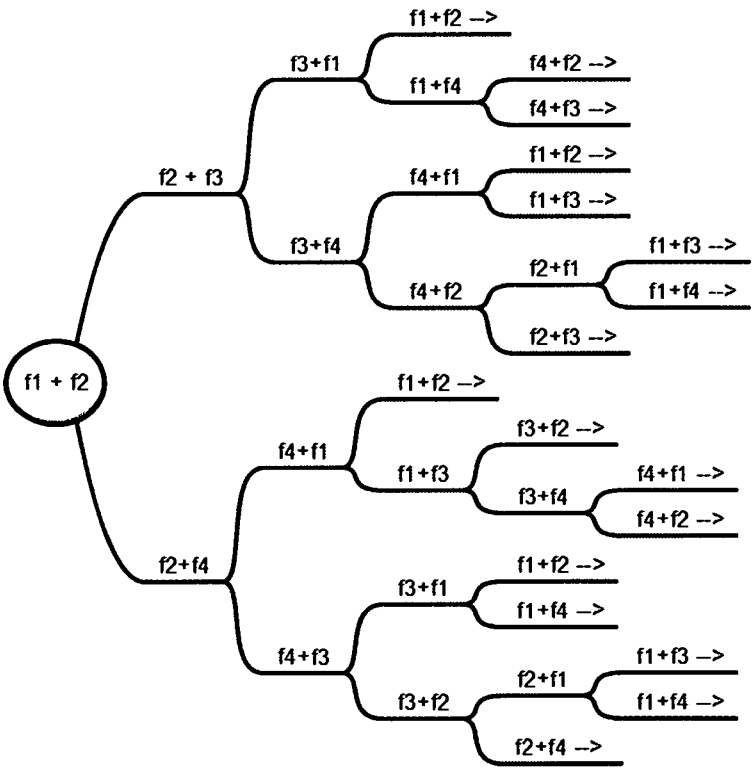

f1 + f2
f2 + f3
f3+f1
f1+f2 -->
f1+f4
f4+f2 -->
f4+f3 -->
f3+f4
f4+f1
f1+f2 -->
f1+f3 -->
f4+f2
f2+f1
f1+f3 -->
f1+f4 -->
f2+f3 -->
f2+f4
f4+f1
f1+f2 -->
f3+f2 -->
f1+f3
f4+f1 -->
f3+f4
f4+f2 -->
f3+f1
f1+f2 -->
f1+f4 -->
f4+f3
f2+f1
f1+f3 -->
f1+f4 -->
f3+f2
f2+f4 -->

Fig. 11

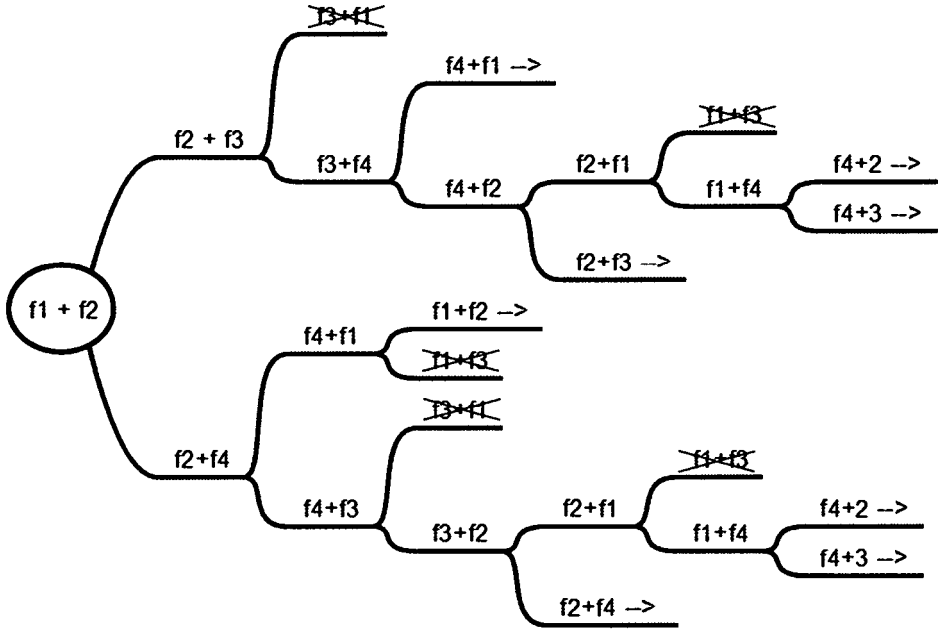

f1 + f2
f2 + f3
f2+f4
f3+f4
f4+f3
f4+f2
f3+f2
f4+f1 -->
f2+f1
f1+f4
f4+2 -->
f4+3 -->
f2+f3 -->
f1+f2 -->
f2+f1
f1+f4
f4+2 -->
f4+3 -->
f2+f4 -->

Fig. 12

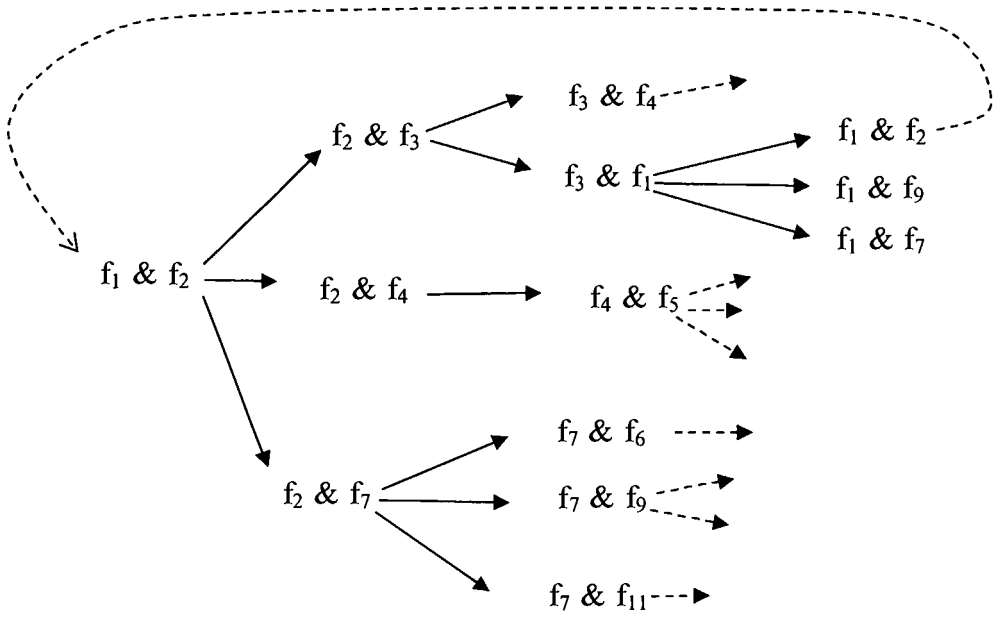

f1 & f2
f2 & f3
f2 & f4
f2 & f7
f3 & f4
f3 & f1
f4 & f5
f7 & f6
f7 & f9
f7 & f11
f1 & f2
f1 & f9
f1 & f7

Fig. 13

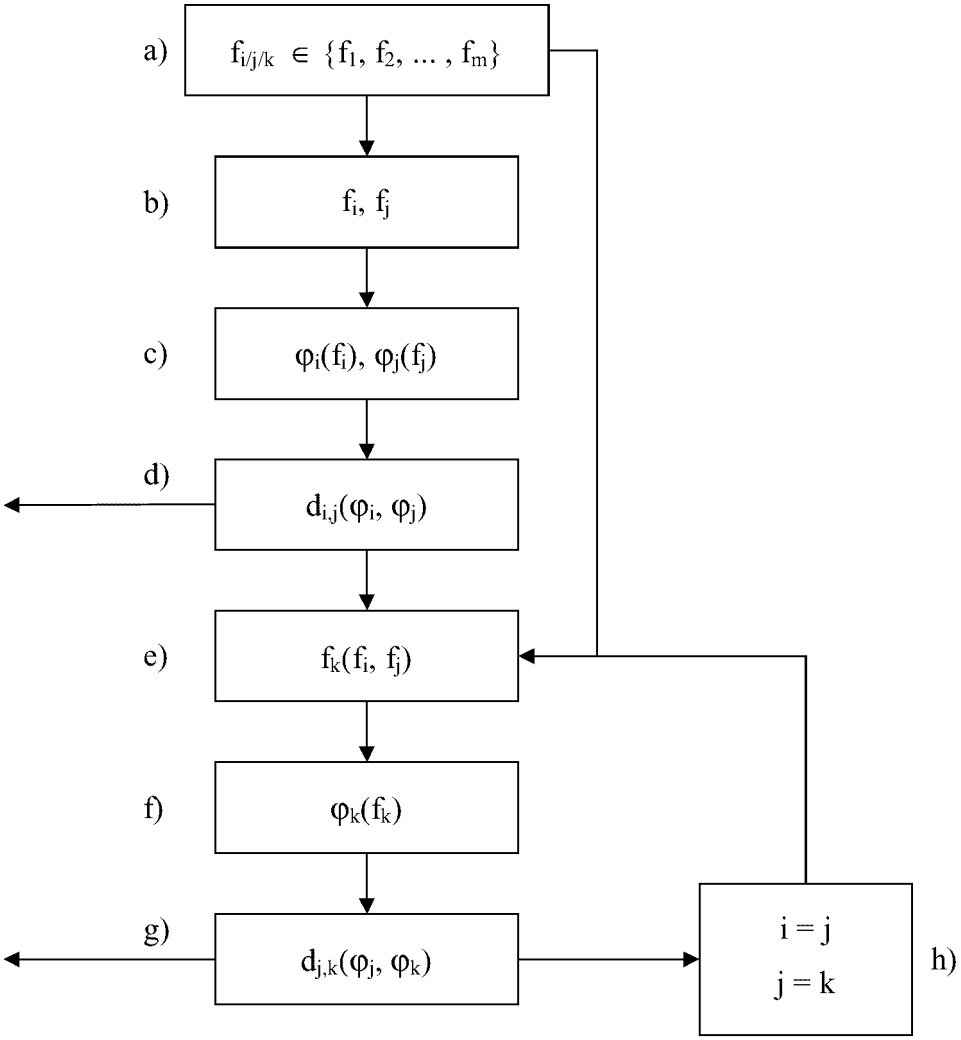

a)
$f_{i/j/k} \in \{f_1, f_2, \ldots, f_m\}$
b)
f_i, f_j
c)
$\varphi_i(f_i), \varphi_j(f_j)$
d)
$d_{i,j}(\varphi_i, \varphi_j)$
e)
$f_k(f_i, f_j)$
f)
$\varphi_k(f_k)$
g)
$d_{j,k}(\varphi_j, \varphi_k)$
i = j
j = k
h)

Fig. 14

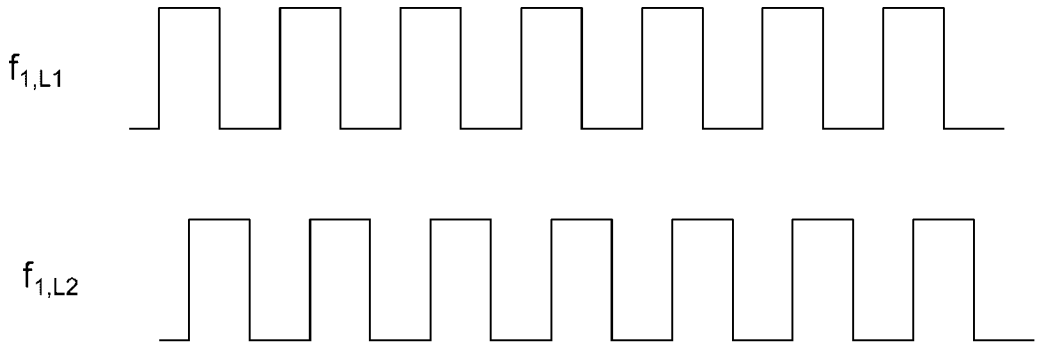


Fig. 15

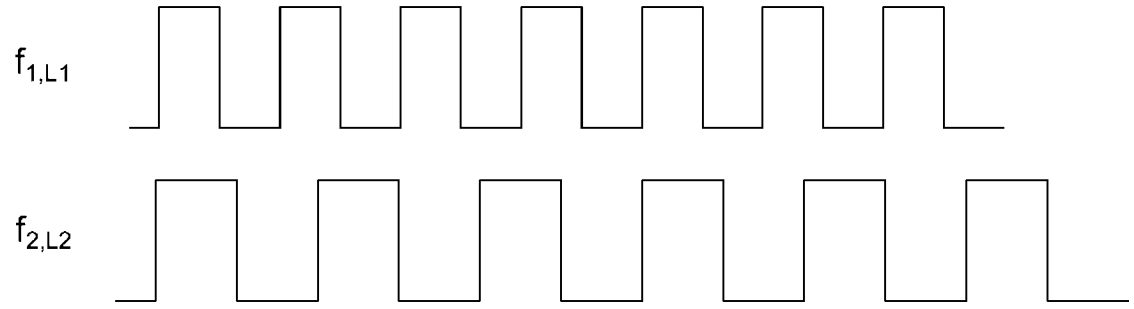


Fig. 16