



(10) **DE 10 2010 021 197 B4** 2019.05.23

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2010 021 197.4**
(22) Anmeldetag: **21.05.2010**
(43) Offenlegungstag: **24.11.2011**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **23.05.2019**

(51) Int Cl.: **H04B 10/25 (2013.01)**
H04B 10/60 (2013.01)
H04B 10/50 (2013.01)
H04B 10/11 (2013.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,
51147 Köln, DE**

(72) Erfinder:
**Giggenbach, Dirk, Dr., 86932 Pürgen, DE; Mata
Calvo, Ramon, Dr., 81543 München, DE**

(74) Vertreter:
**dompatent von Kreisler Selting Werner
- Partnerschaft von Patentanwälten und
Rechtsanwälten mbB, 50667 Köln, DE**

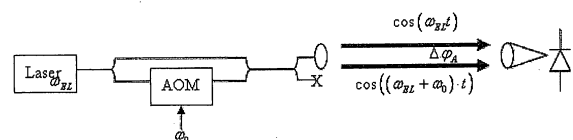
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	44 31 443	A1
DE	10 2008 019 066	A1
US	6 850 712	B1
EP	0 016 608	A1
EP	0 928 080	A1

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur hochgenauen Übertragung von Zeit- oder Frequenznormalen**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur hochgenauen Übertragung von Zeit- oder Frequenznormalen von einem Sender durch die Atmosphäre zu einem Empfänger, mit den Schritten:

- Generieren eines Laserlicht-Trägersignals mit konstanter Trägerfrequenz,
- Generieren eines um das Zeit- oder Frequenznormal frequenzverschobenen Laserlicht-Trägersignals und
- Übertragen des Trägersignals und des frequenzverschobenen Trägersignals, wobei das Zeit- oder Frequenznormal auf der Empfängerseite aus der Frequenzverschiebung zwischen dem frequenzverschobenen Trägersignal und dem Trägersignal gewonnen wird, ohne dass ein empfängerseitiger separater Lokaloszillator zur Signaldemodulation Anwendung findet.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur hochgenauen Übertragung von Zeit- oder Frequenznormalen von einem Sender zu einem Empfänger.

[0002] Stand der Technik ist die Übertragung des Frequenznormalen über Funkträger an die zu synchronisierenden Partner (typ. Satelliten). Auf kurzen terrestrischen Strecken wird die Übertragung durch Laser getestet, dies sind aber noch keine operationellen Verfahren. Dabei wird typischerweise folgendermaßen verfahren: auf eine sehr sauber schwingende Laserwelle wird das Frequenznormal aufmoduliert, z.B. durch kohärente Phasen- oder Amplitudenmodulation. Dieses Signal wird über ein Sendeteleskop in Richtung zum Empfänger abgestrahlt. Dieser sammelt das Lichtsignal wieder mit einem Empfangsteleskop und demoduliert das Frequenzsignal. Dies kann z.B. durch einen klassischen Heterodynempfänger geschehen, dieser überlagert einen sog. Lokalen Oszillator (LO) mit der eintreffenden Welle (EL) und versucht, seine Schwingungsfrequenz und -Phase exakt dem EL anzupassen. Dazu muss der LO in Phase und Frequenz durch entsprechende Mechanismen geregelt werden (sog. OPLL: Optical Phase-Lock Loop). Gelingt der Phase-Lock so ist das Regelsignal der OPLL eine Größe zur Messung des Modulationssignals und damit des zu übertragenden Frequenznormalen. Dieses Verfahren entspricht dem vom Rundfunk bekannten FM, nur ist es im optischen (mit Trägerfrequenzen um 300THz) sehr viel aufwendiger. Es gibt weitere ähnliche Verfahren, einfachere Verfahren benötigen keinen Heterodynempfang und messen z.B. nur die Amplitude des eintreffenden Lasersignals, dies ist aber sehr viel ungenauer, da die Amplitude des Lasers durch die atmosphärische Brechungsindexturbulenz stark gestört wird.

[0003] Probleme bei der Übertragung des Frequenznormalen per Laser bestehen im Phasenrauschen der Laserquelle und der atmosphärischen Brechungsindexturbulenz. Beide Effekte führen dazu, dass das optische Trägersignal nicht perfekt ist sondern in seiner Phase rauscht. Ein darauf aufmoduliertes Frequenznormal wird davon ebenso gestört. Die atmosphärische Brechungsindexturbulenz führt zu einer stochastischen Weglängenänderung im μm -Bereich, womit die Phase des optischen Signals um mehrere Wellenlängen schwanken kann und die Frequenzübertragung entsprechend verschlechtert wird.

[0004] Außerdem erfordert die kohärente Übertragung an beiden Enden hochstabile Laser (für EL und LO) bzw. aufwendige Verfahren zur Stabilisierung der Laserphase. Hierzu werden z.B. sog. Frequenzkämme eingesetzt welche eine hochpräzise Umsetzung zwischen elektrischer und optischer Frequenz erlauben, diese sind aber teuer und noch relativ voluminös.

[0005] Um die Phasenfehler durch die Brechungsindexturbulenz korrigieren zu können wird bei manchen Ansätzen dieser Brechungsindex-Phasenhubfehler in einem gesonderten Aufbau gemessen, dies gelingt z.B. durch ein Zweiwege-Experiment über einen Retroreflektor, allerdings bedingt dies einen erheblichen zusätzlichen Aufwand.

[0006] EP 0 016 608 A1 beschreibt eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Signalübertragung über eine optische Faser. Ein erster monochromatischer Strahl wird als Trägerstrahl verwendet, während ein zweiter monochromatischer Strahl mit einer vorgegebenen Frequenz, die von derjenigen des Trägerstrahls abweicht, als Informationsstrahl verwendet wird.

[0007] Das erfindungsgemäße Verfahren wird definiert durch die Merkmale von Patentanspruch 1.

[0008] Die Aufgabenlösung besteht in einer kohärenten Übertragung des Frequenzsignals, bei der der Lokale Oszillator ebenfalls mit dem eigentlichen Signal übertragen wird. Beim Empfänger wird also kein separater (immer mit einem Phasenfehler behafteter und per OPLL dem Empfangssignal nachzuführender) LO benötigt, sondern die Demodulation geschieht mit der mitgelieferten EL-Welle. Da die beiden zu mischenden Signale durch das gleiche störende Medium transmittieren, werden sie auch exakt gleich gestört (die atmosphärische Dispersion bei einem Frequenzversatz von nur ca. 100MHz ist vernachlässigbar). Ebenso stammen beide von der gleichen Quelle und haben daher auch die gleichen Phasenfehler der Laserquelle EL. All dies führt dazu, dass das demodulierte Signal bei der Differenzfrequenz keine Phasenfehler mehr beinhaltet, da durch die Subtraktion alle Frequenz- und Phasenfehler herausfallen.

[0009] Die Übertragung bzw. Aufmodulation des Frequenznormalensignals kann dabei durch einen Akusto-Optischen Modulator erfolgen. Dieses optische Element wird elektrisch mit einer Sinusschwingung angesteuert und bewirkt einen Frequenzversatz des durchgehenden Lasersignals um exakt die elektrische Schwingung. Damit erhält man also ein Lasersignal welches um exakt die zu übertragende Frequenz (typ. 100MHz) ver-

schoben ist, dieses wird zur Frequenzübertragung parallel zu einem vorher abgespaltenen Teil des ursprünglichen EL-Lasersignals in Richtung zum Empfänger abgesendet.

[0010] Im Folgenden wird anhand der Figur ein Ausführungsbeispiel der Erfindung näher erläutert.

[0011] Am Sender werden das Trägersignal $\cos(\omega_{EL}t)$ und das um das Frequenznormal ω_0 verschobene Trägersignal $\cos((\omega_{EL} + \omega_0) \cdot t)$ generiert:

$$\cos(\omega_{EL}t) + \cos((\omega_{EL} + \omega_0) \cdot t)$$

[0012] Am Empfänger wird das gesamte Signal durch den Fotodetektor quadriert und in elektrischen Strom gewandelt:

$$\begin{aligned} & [\cos(\omega_{EL}t + \Delta\varphi_A) + \cos((\omega_{EL} + \omega_0) \cdot t + \Delta\varphi_A)]^2 = \\ & = 2\cos(\omega_{EL}t + \Delta\varphi_A)\cos(\omega_{EL}t + \omega_0t + \Delta\varphi_A) + \cos^2(\omega_{EL}t + \Delta\varphi_A) + \cos^2(\omega_{EL}t + \omega_0t + \Delta\varphi_A) = \\ & = 2\cos(\omega_{EL}t + \Delta\varphi_A)\cos(\omega_{EL}t + \omega_0t + \Delta\varphi_A) + DC + \underbrace{HF(2\omega_{EL}t \dots)}_{\substack{\text{Terme mit doppelter Trägerfrequenz} \\ \text{werden gedämpft}}} = \\ & = 2 \frac{1}{2} [\cos(\omega_{EL}t + \Delta\varphi_A + \omega_{EL}t + \omega_0t + \Delta\varphi_A) + \cos(\omega_{EL}t + \Delta\varphi_A - [\omega_{EL}t + \omega_0t + \Delta\varphi_A])] + DC = \\ & = \underbrace{\cos(2\omega_{EL}t + \omega_0t + 2\Delta\varphi_A)}_{\text{Wird gedämpft}} + \cos(-\omega_0t) + DC = \cos(\omega_0t) + DC \end{aligned}$$

ω_{EL} : Frequenz Sendelaser (ca. 200 bis 300 THz)

ω_0 : Normfrequenz (10MHz oder 100MHz)

$\Delta\varphi_A$: atmosphärischer Phasenfehler

DC: Signalanteile bei Gleichstrom

HF: Signalanteile die bei doppelter optischer Trägerfrequenz entstehen können elektrisch nicht detektiert werden.

[0013] Erfindungsgemäß kann also eine Frequenzübertragung durch die Atmosphäre erfolgen, ohne dass sich die optischen Weglängenschwankungen durch die atmosphärische Brechungsindexturbulenz auf die übertragene Normfrequenz auswirken. Die Frequenzübertragung ist mit einem spektral relativ unreinen Sendelaser möglich, weil das Phasenrauschen des Sendelasers wegsubtrahiert wird. Ein Empfangslaser (Lokaloszillator) entfällt, wodurch auch kein Optical Phase-Lock Loop (OPLL) beim Empfänger nötig ist. Eine separate Messung und Korrektur des atmosphärischen Phasenfehlers ist nicht nötig.

Patentansprüche

1. Verfahren zur hochgenauen Übertragung von Zeit- oder Frequenznormalen von einem Sender durch die Atmosphäre zu einem Empfänger, mit den Schritten:

- Generieren eines Laserlicht-Trägersignals mit konstanter Trägerfrequenz,
- Generieren eines um das Zeit- oder Frequenznormal frequenzverschobenen Laserlicht-Trägersignals und
- Übertragen des Trägersignals und des frequenzverschobenen Trägersignals, wobei das Zeit- oder Frequenznormal auf der Empfängerseite aus der Frequenzverschiebung zwischen dem frequenzverschobenen Trägersignal und dem Trägersignal gewonnen wird, ohne dass ein empfängerseitiger separater Lokaloszillator zur Signaldemodulation Anwendung findet.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass auf der Senderseite die Leistung aus einer Trägersignalquelle auf zwei Trägersignale aufgeteilt wird, wobei aus einem der beiden Trägersignale das frequenzverschobene Trägersignal erzeugt wird und wobei das Trägersignal und das frequenzverschobene Trägersignal in kombinierter Form übertragen werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Trägersignal und das frequenzverschobene Trägersignal durch Multiplikation, insbesondere in einem Quadraturempfänger, einander überlagert werden, wobei auf der Empfängerseite das Zeit- oder Frequenznormal aus der Schwebung des überlagerten Signals ermittelt wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Frequenzverschiebung des Trägersignals auf der Senderseite durch einen akusto-optischen Modulator erfolgt.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Frequenznormal ein hochgenaues, vorzugsweise von einer Atomuhr generiertes Radiofrequenzsignal ist.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

