

(19)



REPUBLIK  
ÖSTERREICH  
Patentamt

(11) Nummer: **AT 406 311 B**

(12)

# PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 978/98  
(22) Anmeldetag: 05.06.1998  
(42) Beginn der Patentdauer: 15.08.1999  
(45) Ausgabetag: 25.04.2000

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>: **G01S 3/42**  
G01S 17/66

(30) Priorität:

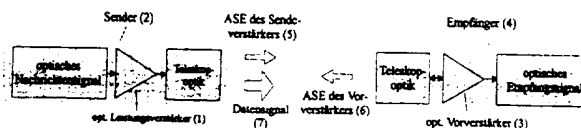
(73) Patentinhaber:  
WINZER PETER DIPL.ING.  
A-1210 WIEN (AT).  
KALMAR ANDRAS DIPL.ING.  
A-2324 RANNERSDORF,  
NIEDERÖSTERREICH (AT).

(56) Entgegenhaltungen:

(72) Erfinder:

(54) AUSRICHTUNG, ACQUISITION UND NACHFÜHRUNG VON TELESKOPEN IN OPTISCHEN KOMMUNIKATIONSVERBINDUNGEN MITTELS DER SPONTANEN EMISSION OPTISCHER VERSTÄRKER

(57) Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der optischen Kommunikation, vorrangig zwischen Satelliten (Optical Intersatellite Links, OISLs), im speziellen auf die Problematik der exakten Ausrichtung der Sende- und Empfangsantennen (Pointing, Acquisition, Tracking, PAT). Zum Zwecke des PAT wird die vom optischen Leistungsverstärker (1) des Senders (2) und/oder die vom optischen Vorverstärker (3) des Empfängers (4) unvermeidbar ausgesandte spontane Emission (ASE) verwendet. Dadurch muß weder separate Energie und Hardware (und damit auch Masse, Komplexität und Kosten) für Beacon- Laser vorgesehen werden, noch muß Leistung vom (am Empfänger ohnehin sehr schwachen) Datensignal zu PAT- Zwecken abgezweigt werden. Die Trennung von Datensignal (7) und ASE (5), (6) kann zum Beispiel über einen wellenlängenabhängigen Strahlteiler (11) oder über die Polarisationseigenschaften der beiden Signale erfolgen.



Figur 1

AT 406 311 B

Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der optischen Kommunikation, vorrangig zwischen Satelliten (Optical Intersatellite Links, OISLs), im speziellen auf die Problematik der exakten Ausrichtung der Sende- und Empfangsantennen (Pointing, Acquisition, Tracking, PAT).

Eines der Hauptprobleme bei optischen Kommunikationsverbindungen (z.B. zwischen Satelliten) ist die exakte Ausrichtung der Sende- und Empfangsteleskope aufeinander [S. Arnon, N. S. Kopeika, Proc. IEEE, 85, 1646-1661, 1997]. Grob erfolgt dies mittels der Bahndaten der Satelliten. Die Bestimmung der Korrekturdaten für eine genaue Ausrichtung (pointing) beziehungsweise eine Nachführung (tracking) wird in bislang veröffentlichten Konzepten entweder mit Hilfe eigener, starker Laserquellen (Beacon- Laser) oder durch Abzweigung eines Teils jener optischen Leistung, die das Datensignal überträgt, bewerkstelligt. Nachteilig ist beim erstgenannten Verfahren, daß zusätzliche Komponenten (und damit zusätzliche Energie, Masse, Komplexität und Kosten) notwendig werden. Weiters ist eine genaue Ausrichtung des Beacon- Teleskops parallel zur optischen Achse des Sende bzw. Empfangsteleskops erforderlich. Beim zweiten Verfahren - das nur auf der Empfangsseite einsetzbar ist - muß, bei sonst gleichbleibenden Systemparametern und gleichbleibender Übertragungsqualität, die Leistung des modulierten Datensignals erhöht werden, wodurch man rasch an technologische Grenzen stößt.

Da - im Gegensatz zu terrestrischen Glasfasernetzen für optische Kommunikation - bei optischen Freiraumverbindungen an die Verwendung von Zwischenverstärkern naturgemäß nicht zu denken ist, muß die optische Sendeleistung allein ausreichen, die Verbindung bei einer geforderten Bitfehlerwahrscheinlichkeit zustande zu bringen. Eine Möglichkeit, die aus diesem Grunde hohe erforderliche Sendeleistung zu erzeugen, ist die *senderseitige* optische Verstärkung des modulierten Lichts von Lasern mit niedrigen Ausgangsleistungen. Die Existenz ausgereifter optischer Wanderwellenverstärker (z.B. bei einer Wellenlänge von 1,55 µm: Erbium-dotierte Faserverstärker, EDFAs) macht diese Methode überaus attraktiv [J. C. Livas et al., Proc. SPIE Vol. 2381, 38-47, 1995]. Weiters ist zur Erhöhung der Empfindlichkeit des Empfängers der Einsatz optischer Vorverstärker *im Empfänger* Stand der Technik [J. C. Livas et al., Proc. SPIE Vol. 2381, 38-47, 1995].

Zum Zwecke des PAT wird bei der gegenständlichen Erfindung - wie in Figur 1 dargestellt - die vom optischen Leistungsverstärker (1) des Senders (2) und/oder die vom optischen Vorverstärker (3) des Empfängers (4) unvermeidbar ausgesandte spontane Emission (5) und/oder (6) verwendet, die zusätzlich zum Datensignal (7) stets vorhanden ist. Dadurch muß weder separate Energie und Hardware (und damit auch Masse, Komplexität und Kosten) für Beacon- Laser vorgesehen werden, noch muß Leistung vom (am Empfänger ohnehin sehr schwachen) Datensignal (7) zu PAT- Zwecken im Empfänger (4) abgezweigt werden. Die Aufwendige Justierung des Beacon- Teleskops parallel zum Sende- bzw. Empfangsteleskop entfällt ebenfalls.

Figur 2 zeigt die spektrale Leistungsdichte (8) des Datensignals (7) sowie die spektrale Leistungsdichte der verstärkten spontanen Emission  $N_{ASE}$  (9) des optischen Leistungsverstärkers (1) am Eingang des Empfängers (4). (Gleichmaßen stellt (9) die spektrale Leistungsdichte der vom optischen Vorverstärker (3) abgestrahlten spontanen Emission (6) dar, welche auch am Ausgang des Senders (2) anzutreffen ist.)

Figur 3 beschreibt eine mögliche Systemrealisierung, die unter anderem eine Teleskopoptik (10), einen wellenlängenabhängigen Strahlteiler (11) und ein PAT- System (12) beinhaltet, welches als Komponenten beispielsweise ein winkelergrößerndes optisches System (13) und einen 4-Quadranten-Detektor (14) beinhalten kann.

Figur 4 zeigt eine modifizierte Version des PAT- Systems (15), welche neben den Komponenten aus Figur 3 noch ein Monomode-Glasfaserbündel (16) und ein Charge- coupled device (CCD) (17) enthält.

Neben dem gewünschten, bezüglich des Eingangs verstärkten Ausgangssignal emittieren optische Wanderwellenverstärker ein Hintergrundlicht („verstärkte spontane Emission“, amplified spontaneous emission, ASE), das zwei für das Verständnis des Erfindungsgegenstandes wichtige Eigenschaften besitzt:

1. Das ASE (5), (6) ist spektral um Größenordnungen breiter als das Datensignal (7), (8). Die spektrale Leistungsdichte  $N_{ASE}$  (9) beträgt pro räumlichem Modus

$$N_{ASE} = hf(G-1)n_{sp} \quad (A)$$

wobei  $hf$  die Energie eines Photons bei der betrachteten Frequenz,  $G$  die (Leistungs-) Verstärkung des optischen Verstärkers und  $n_{sp}$  der (frequenzabhängige) spontane Emissionsfaktor ist. (Bei heutzutage erhältlichen Hochleistungs- EDFAs etwa liegt  $n_{sp}$  zwischen 1 und 3.2.) Aufgrund der Breitbandigkeit des ASE (5), (6), (9) im Vergleich zum Datensignal (7), (8) kann eine

fast vollständige spektrale Trennung von empfangenem Datensignal (7) und ASE (5), (6) mithilfe von wellenlängenabhängigen Strahlteilern (11) vorgenommen werden; dadurch steht die gesamte Leistung des Datensignals für die Datenübertragung zur Verfügung, während die ASE- Leistung (unterlegte Fläche in Figur 2) oder Teile davon zum PAT herangezogen werden können. (Im Prinzip ist auch eine (zumindest teilweise) Trennung des Signals vom ASE über die Polarisations-eigenschaften der beiden optischen Felder denkbar. In der Praxis allerdings wird die Polarisation - jedenfalls in Vollduplexsystemen - zur Erhöhung der Isolation zwischen Sender und Empfänger herangezogen. Signal und ASE des Senders haben daher am Empfänger meist dieselbe Polarisation. Ähnliche Verhältnisse gelten für das ASE des Empfängers am zugeordneten

Sender.)  
2. Das ASE ist - so keine entsprechende räumliche Filterung vorgenommen wird - in allen räumlichen Moden des optischen Systems anzutreffen, sodaß Gleichung (A) im allgemeinen noch mit der Anzahl der vorhandenen Moden multipliziert werden muß. In der Praxis eines OISLs liegt die Anzahl der tatsächlich emittierten Moden sowohl des Sender- ASE (5) als auch des Empfänger- ASE (6) jedoch zwischen 1 und 2, da sowohl die Teleskopoptik des Senders (2) als auch die des Empfängers (4) möglichst beugungsbegrenzt realisiert werden.

Da das ASE dieselben räumlichen Moden wie das Datensignal besetzt, gelten für beide dieselben Ausbreitungsbedingungen (die fehlende zeitliche Kohärenz des ASE spielt hierfür keine Rolle), und es kann in einfacher Weise eine erste Abschätzung der ASE- Leistung des Senders am Empfänger gemacht werden (analoge Überlegungen gelten für die Abschätzung des Empfänger- Vorverstärker- ASE am Sender). Bezeichnet man mit  $D_{TX}$  und  $D_{RX}$  die Teleskopdurchmesser von Sender und Empfänger, mit  $R$  die (gegenüber dem Teleskopdurchmesser große) Kommunikationsdistanz und mit  $\lambda$  die Wellenlänge des Senders, kann man den Bruchteil der vom Sender in das Empfangssystem eingekoppelten ASE- Leistungsdichte mit

$$N_{ASE,RX} = [D_{RX}D_{TX}/(R\lambda)]^2 hf(G-I)n_{sp} \text{ (B)}$$

abschätzen. Für die realistischen Annahmen eines senderseitigen Erbium-dotierten Leistungsverstärkers ( $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ ) mit  $G = 45\text{dB}$  und einer Rauschzahl von  $F=6\text{dB}$ , eines Sende- sowie Empfangsteleskopdurchmessers von 10cm und einer Übertragungsdistanz von beispielsweise 6000km ergibt sich  $N_{ASE,RX}$  zu  $9,3 \cdot 10^{-21} \text{ W/Hz}$ . Nimmt man für das PAT- System eine optische Bandbreite von 20nm an (die gesamte Verstärkungsbandbreite eines EDFAs beträgt etwa 30nm), so erhält man eine Leistung von  $2,4 \cdot 10^{-8} \text{ W}$  ( $= -46\text{dBm}$ ) für PAT- Zwecke, was im Vergleich mit anderen Systemen ausreichend scheint [R. Cockshott, D. Puri, Proc. SPIE Vol. 2381, 206-214, 1995].

Eine mögliche Realisierung des Systems für den Fall der Nutzung des Sender- ASE am Empfänger eines OISLs zeigt Figur 3: Die einfallende optische Welle wird von einer Teleskopoptik (10) fokussiert. Mittels eines allgemein bekannten frequenzabhängigen Strahlteilers (11) (der statt der in Figur 3 angedeuteten Bandpaß-/Bandsperrcharakteristik auch eine Tief-/Hochpaßcharakteristik aufweisen kann [N. Kashima, Passive Optical Components for Optical Fiber Transmission, Artech House, Boston, 1995]) wird der Großteil der ASE- Leistung abgezweigt (siehe schematische Darstellung der Spektren in Figur 3). Über ein winkelvergrößerndes optisches System (13) (z.B. ein Fernrohr), welches der Erhöhung der Winkelauflösung des PAT- Systems (12) dient, wird diese Leistung - gemäß dem Stand der Technik - z.B. auf einen 4-Quadranten-Detektor (14) geleitet (ein CCD- Sensor bzw. diskrete Photodetektoren wären ebenso denkbar). Aus den Ausgangssignalen des 4-Quadranten-Detektors werden die Steuersignale für die Ausrichtung der Teleskopoptik (10) beziehungsweise für deren Nachführung gewonnen ([W. Auer, SPIE Milestone Series Vol. MS 100 (D. Begley ed.), 276-280, 1994] und [D. M. Southwood, Proc. SPIE Vol. 1635, 286-299, 1992]).

Bemerkenswert ist auch, daß das vorgestellte PAT- System mit kleinen Modifikationen auch bei starkem Hintergrundlicht einsetzbar ist. (Die Hintergrundstrahlung der Venus beträgt etwa  $4 \cdot 10^{-25} \text{ W/Hz}$  pro räumlichem Modus, die der Sonne etwa  $3 \cdot 10^{-20} \text{ W/Hz}$  pro räumlichem Modus [W. R. Leeb, Applied Optics 28, 3443-3449, 1989].) Figur 5 zeigt eine mögliche Realisierung des in diesem Falle zu verwendenden Verarbeitungssystems des ASE: Anstelle der direkten Beleuchtung eines 4-Quadranten-Detektors wird ein Monomode-Glasfaserbündel (16) in Kombination mit z.B. einer CCD (17) verwendet. Durch die Kopplung in Monomodefasern wird die vielmögliche Hintergrundstrahlung auf einen Modus begrenzt und liegt dadurch leistungsmäßig unter der in den Empfänger eingekoppelten ASE- Leistung des Senders, die, wie oben erwähnt, ohnehin nur 1 bis 2 räumliche Moden besetzt und daher im Vergleich zur Hintergrundstrahlung bei der Einkopplung nur schwach gedämpft wird.

**Patentansprüche:**

- 5 1. System zur Bestimmung der Ausrichtungsdaten von Empfangsteleskopen in optischen Kommunikationsverbindungen (Pointing, Acquisition, and Tracking, PAT), dadurch gekennzeichnet, daß die spontan emittierte Leistung (5) (amplified spontaneous emission, ASE) des senderseitigen optischen Leistungsverstärkers (1) als Eingangssignal für die Ausrichtung der Teleskopoptik (10) des Empfängers (4) verwendet wird.
- 10 2. System zur Bestimmung der Ausrichtungsdaten von Sendeteleskopen in optischen Kommunikationsverbindungen, dadurch gekennzeichnet, daß die spontan emittierte Leistung des optischen Vorverstärkers (3) im Empfänger (4) als Eingangssignal für die Ausrichtung der Teleskopoptik des Senders (2) verwendet wird.
- 15 3. System zur Bestimmung der Ausrichtungsdaten von kombinierten Sende- und Empfangsteleskopen in optischen Kommunikationsverbindungen, dadurch gekennzeichnet, daß die spontan emittierte Leistung des optischen Vorverstärkers (3) im Empfänger als Eingangssignal für die Ausrichtung der Sendeteleskope des Senders (2) und/oder die spontan emittierte Leistung des senderseitigen optischen Leistungsverstärkers (1) als Eingangssignal für die Ausrichtung der Empfangsteleskope am Empfänger (4) verwendet wird.
- 20 4. System zur Bestimmung der Ausrichtungsdaten von Sende und/oder Empfangsteleskopen nach Ansprüchen 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß zur Unterdrückung von störendem Hintergrundlicht räumliche Filterung mittels optischer Monomode-Glasfasern (16) erfolgt.

25 **Hiezu 3 Blatt Zeichnungen**

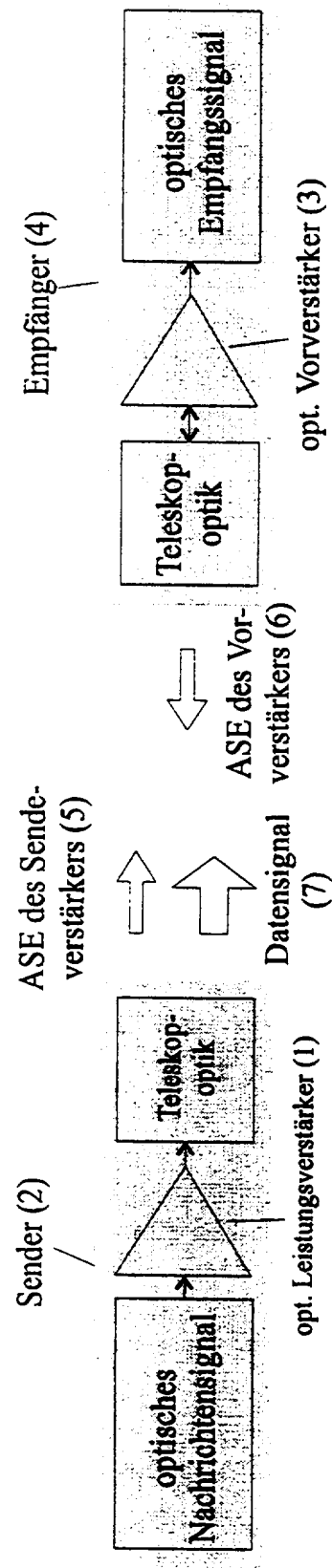
30

35

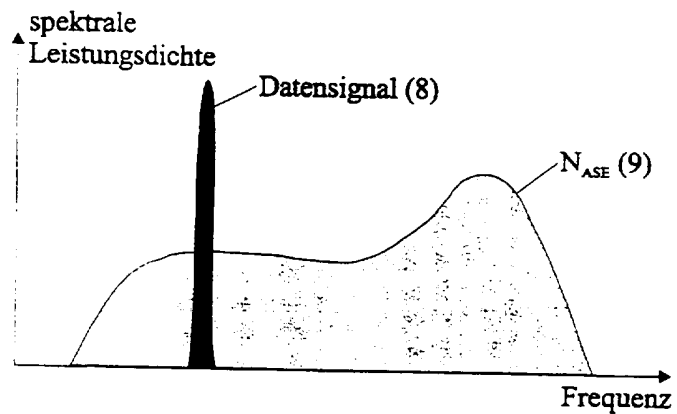
40

45

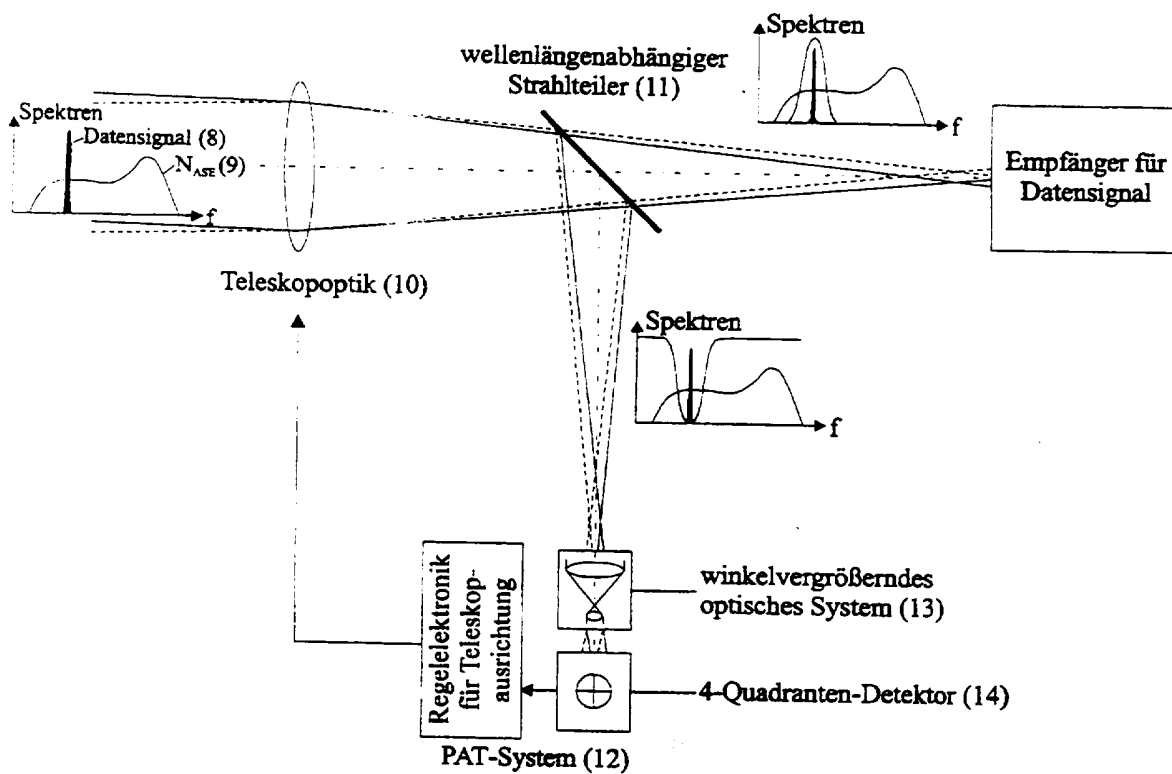
50



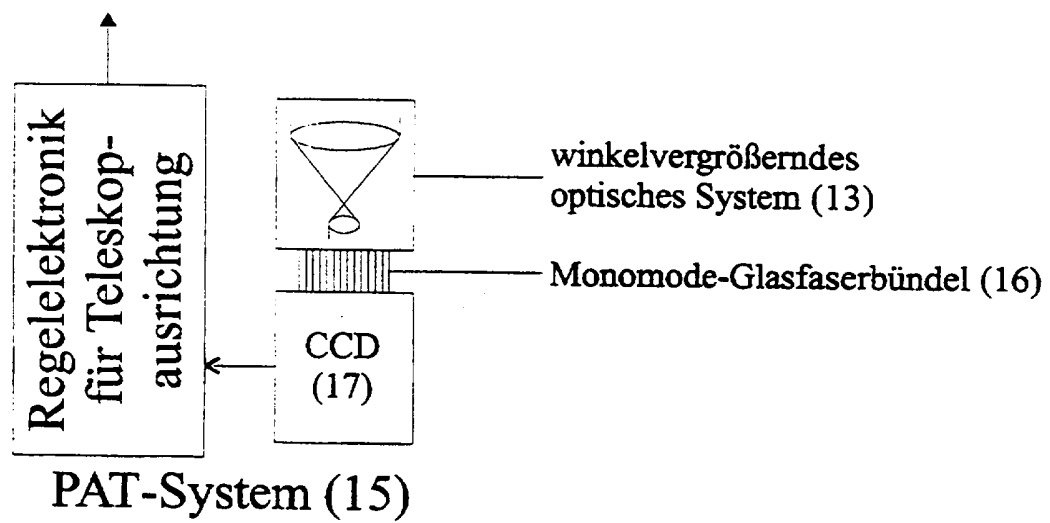
Figur 1



Figur 2



Figur 3



Figur 4