



(10) **DE 103 58 698 B4** 2015.10.22

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **103 58 698.9**
(22) Anmeldetag: **15.12.2003**
(43) Offenlegungstag: **04.08.2005**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **22.10.2015**

(51) Int Cl.: **H04B 10/296 (2013.01)**
H04J 14/02 (2006.01)

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:
Xieon Networks S.à.r.l., Luxemburg, LU

(74) Vertreter:
**BOEHMERT & BOEHMERT Anwaltspartnerschaft
mbB - Patentanwälte Rechtsanwälte, 28209
Bremen, DE**

(72) Erfinder:
Rapp, Lutz, Dr., 82041 Deisenhofen, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

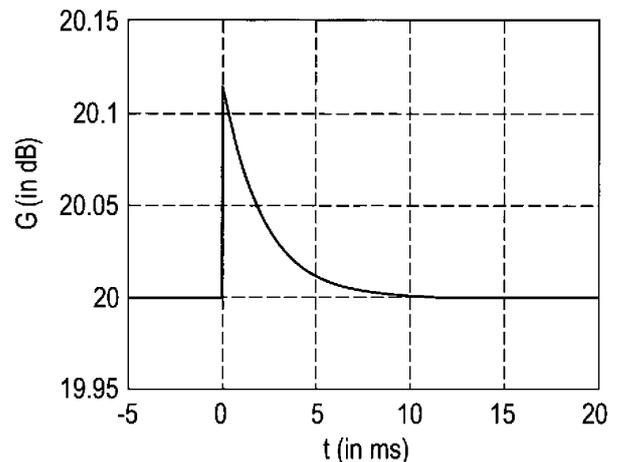
US	6 341 034	B1
US	6 366 393	B1
US	6 407 854	B1
US	6 414 788	B1
US	2001 / 0 043 389	A1
US	2003 / 0 053 200	A1

MANN, H.; SCHIFFELGEN, H.; FRORIEP, R.:
Einführung in die Regelungstechnik. München:
Hanser-Verlag, 1997, S. 117 - 119

NAKAJI, H. u.a.: Superior high-speed
automatic gain controlled erbium-doped fiber
amplifiers. In: **Optical Fiber Technology. January**
2003, Vol. 9, No.1, S. 25 - 35

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Regelung der Pumpleistung eines optischen Verstärkers**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Anpassung einer Pumpleistung eines optischen Faser-Verstärkers, der eine dotierte Faser umfasst, mit dem ein optisches Wellenlängen-Multiplex-Signal mit mehreren Kanälen unterschiedlicher Wellenlänge verstärkt wird und bei dem eine Änderung von Eingangsleistung oder Ausgangsleistung detektiert wird, wobei nach der Änderung der Eingangsleistung die Summeneingangsleistung und die Summenausgangsleistung innerhalb eines Zeitintervalls, in dem der Gewinn des Verstärkers quasikonstant bleibt, gemessen wird und hieraus – ausgehend von der Summeneingangsleistung und der Summenausgangsleistung bei einem zuvor herrschenden Zustand des Gewinns – ein neuer Wert der Pumpleistung berechnet und eingestellt wird, so dass der Gewinnverlauf des Verstärkers möglichst konstant bleibt, dadurch gekennzeichnet, dass sich die genannten Summeneingangs- und Summenausgangsleistungen auf die Leistung am Anfang bzw. am Ende der dotierten Faser des Faser-Verstärkers beziehen.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung der Pumpleistung eines optischen Verstärkers nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

[0002] Die Wellenlängenmultiplextechnik (WDM-Technik) bietet die Möglichkeit, an unterschiedlichen Orten befindliche Sender und Empfänger direkt über optische Pfade eines Netzwerks zu verbinden, ohne dass an Knotenstellen eine elektro-optische Wandlung erforderlich ist. In Zukunft wird es auch möglich sein, optische Pfade mit Hilfe optischer Schaltmatrizen beliebig auf- und abzubauen. Dies ermöglicht im Vergleich zum jetzigen Stand der Technik deutliche Kostenersparnisse ohne Abstriche bei der Flexibilität der Verbindungen machen zu müssen.

[0003] Durch das Ab- und Zuschalten von übertragenen Signalen in Kanälen eines Multiplex-Übertragungssystems treten allerdings starke Leistungsschwankungen auf den einzelnen Teilstrecken auf. Um Bitfehler am Ende der Strecke zu vermeiden, darf sich der Verstärkergewinn für die weiterhin übertragenen oder hinzugeschalteten Kanäle nicht ändern. **Fig. 1** zeigt den mittleren Gewinn G aller Kanäle über der Zeit t für eine einzelne Verstärkerstufe und für zwei verschiedene Fälle, wobei angenommen wurde, dass zum Zeitpunkt Null die Eingangsleistung durch Abschalten von Kanälen um 19 dB abnimmt.

[0004] Hält man die Pumpleistung konstant (siehe die durchgezogene Kurve), so steigt der Gewinn G von 20 dB vor dem Abschaltvorgang auf einen konstanten Wert von 30 dB nach dem Abschaltvorgang an. Eine weitere hier gestrichelte Kurve zeigt zur Illustration den zeitlichen Verlauf des Gewinnes bei Verwendung eines einfachen Integralreglers, der dafür sorgt, dass der mittlere Gewinn nach einem Einschwingvorgang mit einer Dauer von über 20 ms wieder 20 dB beträgt. Die gezeigten Über- und Unterschwinger können durch komplexere Regelungen deutlich reduziert werden, lassen sich aber nicht vollständig eliminieren. In einer Kaskade von Verstärkern kann es somit zu einer Akkumulation von Leistungsschwankungen und damit zu Bitfehlern oder gar zu einer Zerstörung der Empfangsdioden kommen.

[0005] Über- und Unterschwinger lassen sich nahezu vollständig eliminieren, wenn diejenige Pumpleistung, die nach Änderung des Eingangssignals zum Aufrechterhalten des Gewinns unter stabilen Bedingungen erforderlich ist, bereits zum Zeitpunkt der Laständerung am Eingang bekannt ist. Die eigentliche Schwierigkeit besteht darin, diese Pumpleistung mit möglichst hoher Genauigkeit vorzuberechnen.

[0006] Eine einfachste Lösung hierfür sieht vor, einen linearen Ansatz für die erforderliche Pumpleistung als Funktion der Signaleingangsleistung am optischen Verstärker zu wählen. Dieser Aspekt wird in US 6414788 B1 und US 6341034 B1 beschrieben. Dabei kommen zwei konstante Parameter zum Einsatz. Bei diesem Vorgehen werden jedoch folgende wesentliche Einflussgrößen nicht berücksichtigt:

- Die benötigte Pumpleistung hängt nicht nur von der Eingangsleistung, sondern auch von dem Gewinn der jeweiligen Verstärkerstufe ab. Da die Stufe eines Verstärkers je nach Einsatz und Kanalbelegung deutlich unterschiedliche Gewinnwerte aufweisen kann, ergeben sich deutliche Abweichungen, die eine Ermittlung der korrekten einzustellenden Pumpleistung beeinträchtigen.
- Es wird nicht berücksichtigt, dass die benötigte Pumpleistung von der Wellenlänge der bei einer Abschaltung überlebenden Kanäle abhängt. Dies gilt ebenso für sogenannte "Gain Ripple".
- "Fitting Parameter" zur Bestimmung von einzustellenden Pumpleistungswerten werden zu Betriebsbeginn bestimmt, so dass Alterungseffekte mit zunehmender Betriebsdauer zu ansteigenden Abweichungen führen.
- Nichtlineare Effekte in einer Verstärkungsfaser eines Faserverstärkers, wie z. B. "Excited State Absorption" in einer mit Erbium dotierten Faser eines EDFAs (erbium doped fiber amplifier), bleiben unberücksichtigt und führen damit zu zusätzlichen Abweichungen.

[0007] Zur Berücksichtigung der spektralen Abhängigkeit wird in US 6341034 B1 der Einbau eines spektralen Filters vor einem Eingangsmonitor am optischen Verstärker vorgeschlagen. Damit kann die Wellenlängenabhängigkeit des Verfahrens verbessert, wenn auch nicht vollständig eliminiert werden. Aufgrund der hohen Komponentenkosten ist ein Einsatz dieses Verfahrens jedoch unwahrscheinlich.

[0008] In US 6 366 393 B1 wird wie in den zuvor genannten Dokumenten eine Kontrolleinheit für den Gewinn eines optischen Verstärkers vorgestellt, die einen linearen Ansatz für die erforderliche Pumpleistung als Funktion der Signaleingangsleistung am optischen Verstärker wählt. Der in diesem Ansatz implizierte Fehler wird mittels einer Korrekturschleife, die sich hinter dem Verstärker befindet und einen Mikroprozessor enthält, berichtigt.

[0009] In US 2003/0053200 A1 wird die Pumpleistung des optischen Verstärkers mittels einer feed forward Kontrollschleife eingestellt. Dabei wird ein kleiner Teil des WDM-Signals durch einen Filter geleitet, dessen Filter-Transfer-Funktion an die Eigenschaften des Verstärkers angepasst ist. Die Signaleingangsleistung wird durch das Filter selektiv in Abhängigkeit von der Wellenlänge gewichtet. Der Einfluss der Wellenlängen mit überdurchschnittlichen Auswirkungen auf die Zerfallsrate der angeregten Energieniveaus des Verstärkers wird dabei verstärkt und umgekehrt. Das Signal trifft hinter dem Filter auf einen Photodetektor, der mit einer Kontrolleinheit der Pumpleistung des Verstärkers verbunden ist.

[0010] In US 2001/0043389 A1 wird der Verstärker-Gewinn mittels einer Vorwärts- und Rückwärts- Schleife kontrolliert. Die Vorwärts-Schleife (feed forward loop) steuert den Verstärker mittels einer schnellen Photodiode, welche die Eingangsleistung misst. Die Rückwärts-Schleife regelt den Verstärker Gewinn langsam in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung des Verstärkers. Beide Schleifen sind zur Kontrolle der Pumplasereinheit miteinander verbunden. Der Gewinn des Verstärkers wird im Wesentlichen durch die Rückwärtsschleife eingestellt, während die Vorwärtsschleife die Kompensation von Offsets im Gewinnverlauf des optischen Verstärkers umfasst.

[0011] In US 6 407 854 B1 wird eine feed-forward-Steuerung eines optischen Verstärkers in einem WDM-System gezeigt. Die Pumpleistung des Verstärkers wird mittels einer Kontrolleinheit eingestellt, welche die Eingangsleistung des Verstärkers misst und den Strom der Pumplaserdioden linear abhängig vom Messpegel steuert. Dabei kann das elektrische Signal der Pumplaserdioden durch Multiplikation mit einem Faktor oder durch Addition eines Offsets verändert werden, um einen über den gesamten Wellenlängenbereich konstanten Gewinnverlauf des Verstärkers zu gewährleisten. Mit diesem Verfahren werden Einschwingvorgänge von weniger als 200 μ s erreicht.

[0012] In "Superior high-speed automatic gain controlled erbium-doped fiber amplifiers", Nakaji H., Nakai Y., Shigematsu M. und Nishimura M., Optical Fiber Technology 9 (2003), pp. 25–35 wird eine Methode zur Unterdrückung von zeitlichen Gewinnschwankungen in einem überlebenden Kanal eines WDM-Signals bei der Ein- oder Abschaltung weiterer Kanäle des WDM-Signals beschrieben. Zur Verstärkung des WDM-Signals kommt ein EDFA zum Einsatz, der mit einer Pumpquelle bei 980 nm oder mit einer Pumpquelle bei 1480 nm arbeitet. Bei Verwendung eines Pumplasers im Wellenlängenbereich von 1480 nm und einer optimalen Einstellung der Regelparameter für einen speziellen Anwendungsfall können Überschwinger beim Abschalten von Kanälen nahezu vollständig vermieden werden. Hingegen kommt es bei Verwendung eines Pumplasers im Wellenlängenbereich von 980 nm nach einer Abschaltung von Kanälen zu einem geringen Überschwinger. Wird nun die Pumpleistung nicht wie oben angenommen zum Zeitpunkt des Schaltvorgangs sondern bereits etwas früher auf einen neuen Wert reduziert bzw. angepasst, z. B. mittels eines dem Verstärker vorgeschalteten Verzögerungsgliedes, lässt sich der Überschwinger bei Verwendung der Pumpquelle bei 980 nm fast vollständig eliminieren. Dieses Verfahren basiert darauf, dass die Abnahme der Ausgangsleistung (Wirkung) später als die Abnahme der Eingangsleistung (Ursache) detektiert wird, so dass der Gewinnregelung für einen Zeitraum entsprechend der Verzögerung ein starker Anstieg des Gewinns vorgetäuscht wird, worauf diese mit einer Reduktion der Pumpleistung reagiert. Experimentelle Gewinnmessungen können aus dieser Literaturstelle nachgewiesen werden. Allerdings entsteht immer noch ein Unterschwinger sehr kurzer Zeitdauer.

[0013] Dieses Verfahren, das im folgenden als "Feedback-Methode" bezeichnet wird, ist sehr gut geeignet für Laborexperimente, kann jedoch kaum für kommerzielle Systeme eingesetzt werden, da die optimale Zeitverzögerung von der Anzahl der überlebenden Kanäle abhängig ist, keine Vorschrift zur Vorherbestimmung dieser optimalen Verzögerung bekannt ist und die Regelparameter nur für ein spezielles Ereignis optimiert sind. In der Praxis müssen beliebige Ereignisse, d. h. z. B. der Drop (Abzweigen/Wegschalten/Abschalten) einer unterschiedlichen Anzahl von Kanälen, berücksichtigt werden. Dafür sollte die Zeitverzögerung immer neu berechnet und eingestellt werden, was aber in Echtzeit unmöglich bzw. unrealisierbar wäre. Daher erfährt der wellenlängenabhängige Gewinnverlauf unvermeidlich Abweichungen bei einem oder mehreren überlebenden Kanälen, die die breitbandige Verstärkung, zusätzlich zu den bekannten zeitlichen Schwankungen des kanalbezogenen Gewinns, beeinträchtigen. Aus diesen Gründen eignet sich diese Methode für aktuelle optische Schaltnetze nicht.

[0014] In dem Patent US 6,414,788 B1 wird ein optisches Verstärkersystem beschrieben, das ebenfalls zur Verstärkung von Multiplexsignalen in optischen Netzen mit geschalteten Kanälen verwendet wird. Dieses Verstärkersystem verwendet eine Kombination von Feed-back und Feed-forward Regelung. Eine Berücksichtigung der unterschiedlichen spektralen Verstärkung im Rahmen einer Feed-Forward-Steuerung erfolgt hierbei nicht.

[0015] Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren anzugeben, das eine optimale Regelung der Pumpleistung eines optischen Verstärkers zur Verstärkung eines optischen Multiplex-Signals mit mehreren Kanälen gewährleistet, damit bei Änderung der Eingangs- oder Ausgangsleistung am optischen Verstärker der wellenlängenabhängige Gewinnverlauf für zu verstärkende Signale aktiver Kanäle aufrechterhalten wird.

[0016] Eine Lösung der Aufgabe erfolgt durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1.

[0017] Ausgehend von einem stabilen Zustand, der z. B. mittels einer Regelung eingestellt wurde, insbesondere der entsprechenden Pumpleistung eines optischen Verstärkers, mit dem ein optisches Wellenlängen-Multiplex-Signal mit mehreren Kanälen verstärkt wird und bei dem eine Änderung der Eingangsleistung oder Ausgangsleistung des Wellenlängen-Multiplex-Signals detektiert wird, wird erfindungsgemäß nach der Änderung der Eingangsleistung ein neuer Wert der gemessenen Pumpleistung derart berechnet und eingestellt, dass sich der Gewinnverlauf des Verstärkers nur minimal ändert.

[0018] Die neu einzustellende Pumpleistung kann kurz nach Ab- oder Einschaltung von aktiven Kanälen errechnet und noch rechtzeitig eingestellt werden, da der Gewinn eines EDFAs als Funktion der Wellenlänge in einem kurzen Zeitintervall quasikonstant bleibt.

[0019] Ein wesentlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens ist darin zu sehen, dass viele wesentliche Einflussgrößen, wie der aktuelle Gewinnwert, die Wellenlängenabhängigkeit aktiver Kanäle, Alterungseffekte und nicht-lineare Effekte der Verstärkung, bei der Berechnung der neuen einzustellenden Pumpleistung berücksichtigt werden, so dass eine hoch genaue Ermittlung der optimalen Pumpleistung rasch erfolgt und damit störende Transienten, d. h. Amplitude und Dauer von Überschwüngen, effektiv unterdrückt werden.

[0020] In vorteilhafter Weise können neue Pumpleistungen z. B. kontinuierlich errechnet und eingestellt werden, sowie auch im Voraus berechnet und eingestellt werden. In solchen Fällen können weiterhin Interpolationswerte aus den vorberechneten Pumpleistungen ermittelt werden.

[0021] Durch Messung der Ausgangsleistung, kurz nachdem der Sprung detektiert wurde, kann die Wellenlängenabhängigkeit vollständig berücksichtigt werden. Alterungseffekte werden kompensiert, da eine Vorausberechnung der Pumpleistung relativ zu dem zuvor vorliegenden stabilen Zustand der Verstärkung erfolgt. Ebenso geht der momentane Verstärkerertrag in die Berechnung ein und nichtlineare Effekte in der verstärkenden Faser, wie z. B. bei "Excited State Absorption", werden berücksichtigt. Auch "Gain Ripple" führen zu keiner Veränderung des Gewinns der einzelnen Kanäle. Von besonderer Bedeutung ist, dass dieses Verfahren, neben den bereits im Stand der Technik verwendeten, keine zusätzlichen Messeinrichtungen oder Komponenten benötigt und damit auch aus Kostensicht sehr interessant ist.

[0022] In der folgenden Beschreibung wird das erfindungsgemäße Verfahren hauptsächlich für eine Verstärkerstufe illustriert, die eine mit Erbium dotierte Faser enthält. Das Verfahren kann jedoch auch für mehrere kaskadierte Verstärkerstufen mit eventuell unterschiedlichen Verstärkungsfasern und/oder Pumpquellen verwendet werden. Ein Ausführungsbeispiel für den Einsatz mehrerer Pumpquellen in einer Verstärkerstufe wird sogar ausdrücklich beschrieben.

[0023] Von Vorteil bei der vorliegenden Erfindung ist ein Modell, das aus einem zuvor vorliegenden stabilen Zustand des optischen Verstärkers die Ermittlung bzw. die Errechnung einer neu erforderlichen Pumpleistung ermöglicht. Dazu werden ebenfalls weitere begrenzte Aspekte betrachtet und deren Einflüsse auf das Modell analysiert.

[0024] Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0025] Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird im folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert.

[0026] Dabei zeigen:

[0027] Fig. 2: den zeitlichen Gewinnverlauf bei Abschaltung von aktiven Kanälen,

[0028] Fig. 3: das Gewinnspektrum eines EDFAs bei 80 aktiven Kanälen,

[0029] Fig. 4: den zeitlichen Gewinnverlauf eines überlebenden Kanals,

[0030] Fig. 5: zeitliche Gewinnabweichungen für die Kanäle innerhalb 10 ms nach Abschaltzeit,

[0031] Fig. 6: zeitliche Gewinnabweichungen für die Kanäle innerhalb 25 μ s nach Abschaltzeit,

[0032] Fig. 7: die soll- und modellbezogene einzustellende Pumpleistung als Funktion der Eingangleistung,

[0033] Fig. 8: Abweichungen zwischen soll- und modellbezogenen einzustellenden Pumpleistungswerten,

[0034] Fig. 9: ein dynamisches Regelkonzept,

[0035] Fig. 10: zeitliche Gewinnverläufe des überlebenden Kanals bei unterschiedlichen Abschaltauern der anderen Kanäle

- (a) Abschaltdauer: 1 μ s
- (b) Abschaltdauer: 10 μ s
- (c) Abschaltdauer: 100 μ s
- (d) Abschaltdauer: 1 ms
- (e) Abschaltdauer: 10 ns bis 1 ms

[0036] Fig. 11: die Amplitude des Überschingers bei unterschiedlichen Abschaltauern von Kanälen,

[0037] Fig. 12: die geregelte Leistungsverteilung eines dreistufigen Faserverstärkers.

[0038] In Fig. 2 ist ein zeitlicher Gewinnverlauf G bei Abschaltung von aktiven Kanälen in einem einstufigen Erbium dotierten Faserverstärker dargestellt, wobei die bei der reduzierten Eingangleistung zur Aufrechterhaltung des Gewinns erforderliche Pumpleistung zum Zeitpunkt der Laständerung eingestellt wird. Ein Unterschwinger ist dabei komplett unterdrückt.

[0039] Im folgenden wird unter weiterer Bezugnahme auf die Funktionseinheiten der Fig. 2 näher erläutert, wie, ausgehend von einem bekannten Betriebszustand, die nach dem Schaltvorgang zur Aufrechterhaltung des Gewinns erforderliche Pumpleistung $P_{\text{pump}}^{\text{nach}}$ berechnet werden kann. Sämtliche Leistungsangaben beziehen sich dabei im folgenden auf den Anfang bzw. das Ende der mit Erbium dotierten Faser. Die mit Hilfe von Photodioden gemessenen Leistungen beziehen sich jedoch in der Regel auf den Eingang der mit Erbium dotierten Faser. In diesem Fall ist noch eine Korrektur der Leistungsangaben um die eingangs- und ausgangsseitigen Dämpfungsverluste der vor- und nachgeschalteten Komponenten erforderlich.

[0040] Im Rahmen der Produktion sei der EDFA vermessen und zwei Kalibrationsparameter G_{norm} und P_0 bestimmt worden. Ausgehend von der Pumpleistung $P_{\text{pump}}^{\text{vor}}$ vor dem Schaltvorgang wird eine effektive Pumpleistung $P_{\text{eff}}^{\text{vor}}$:

$$P_{\text{eff}}^{\text{vor}} = P_0 \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{P_{\text{pump}}^{\text{vor}}}{P_0} \right\} \quad (1)$$

berechnet. Mit der Summensignalleistung $P_{\text{signal}}^{\text{vor}}$ vor dem Schaltvorgang ergibt sich der Wert der effektiven Pumpleistung für die Signalleistung $P_{\text{signal}}^{\text{nach}}$ nach dem Schaltvorgang zu

$$P_{\text{eff}}^{\text{nach}} = P_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{\bar{\lambda}_{\text{signal}}}{\lambda_{\text{pump}}} \cdot \frac{1}{G_{\text{norm}}} \cdot \left\{ P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}} + P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}} \right\} \quad (2)$$

wobei die dabei auftretenden Formelzeichen die folgende Bedeutung haben:

- $P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}}$ die sich nach dem Schaltvorgang bei gleichbleibendem Gewinn (d. h. stabilem Zustand) ergebende Summenausgangsleistung,
- $P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}}$ die Summeneingangsleistung nach dem Schaltvorgang,
- $P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}}$ die Summenausgangsleistung vor dem Schaltvorgang,
- $P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}$ die Summeneingangsleistung vor dem Schaltvorgang.

[0041] Die beiden Wellenlängen $\bar{\lambda}_{\text{signal}}$ und λ_{pump} stehen für die mittlere Signalwellenlänge nach dem Schaltvorgang bzw. die Pumpwellenlänge. In der Regel wird die genaue Kanalbelegung nach dem Schaltvorgang

erst mit deutlicher Verzögerung bekannt sein und steht damit für die Regelung nicht zur Verfügung. In diesem Fall kann für die mittlere Signalwellenlänge die mittlere Wellenlänge der Signale bei voller Belegung des Verstärkungsbandes angesetzt werden. Die nach dem Schaltvorgang einzustellende Pumpleistung $P_{\text{pump}}^{\text{nach}}$ ergibt sich damit zu

$$P_{\text{pump}}^{\text{nach}} = P_0 \cdot \left[\exp\left\{ \frac{P_{\text{eff}}^{\text{nach}}}{P_0} \right\} - 1 \right]. \quad (3)$$

[0042] Alle oben verwendeten Größen sind im linearen Maßstab zu verwenden.

[0043] Zur Berechnung der Pumpleistung $p_{\text{pump}}^{\text{nach}}$ nach dem Schaltvorgang müssen die Summenleistungen eingangs- und ausgangsseitig sowohl vor als auch nach dem Schaltvorgang bekannt sein. Aufgrund der geforderten Regelzeiten müssen sowohl die Messeinrichtungen am Eingang der Verstärkerstufe als auch diejenige am Ausgang kurze Messzeiten aufweisen. Die Forderung nach kurzen Messzeiten kann allerdings auf den Zeitpunkt nach dem Schaltvorgang eingeschränkt werden, da angenommen wird, dass der Schaltvorgang ausgehend von einem stabilen Zustand erfolgt.

[0044] Einzelne Verstärkerstufen weisen typischerweise einen Gewinn von 20 dB oder mehr auf. Dies bedeutet, dass die Ausgangsleistungen um ca. zwei Größenordnungen größer sind als die Eingangsleistungen. Beim Abschalten von Kanälen ist daher der zweite Term in der geschweiften Klammer von Gleichung (2) vernachlässigbar und die Gleichung kann zu

$$P_{\text{eff}}^{\text{nach}} \approx P_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{\bar{\lambda}_{\text{signal}}}{\lambda_{\text{pump}}} \cdot \frac{1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}} + P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}\} \quad (4)$$

vereinfacht werden.

[0045] Ein wesentliches Problem stellt aber noch die Berechnung der sich nach dem Schaltvorgang bei gleichbleibendem Gewinnverlauf ergebenden Ausgangsleistung dar. Wenn sich der mittlere Gewinn nicht ändert, kann Gleichung (2) in

$$P_{\text{eff}}^{\text{nach}} = P_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{\bar{\lambda}_{\text{signal}}}{\lambda_{\text{pump}}} \cdot \frac{G_{\text{sig}} - 1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}\} \quad (5)$$

mit
$$G_{\text{sig}} = \frac{P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}}}{P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}}$$

umgeformt werden. In der Regel ist jedoch der Gewinn einer Verstärkerstufe eines EDFAs, insbesondere wenn sie kein Glättungsfilter enthält, für die einzelnen Kanäle unterschiedlich.

[0046] Bei Verwendung mehrerer Pumpquellen im optischen Verstärker ist das prinzipielle Vorgehen identisch zu dem Vorgehen bei nur einer Pumpquelle. Zunächst werden die im Referenzzustand vorliegenden Pumpleistungen separat entsprechend der Gleichung (1) in effektive Pumpleistungen umgerechnet, wobei unter Umständen für die einzelnen Pumpquellen unterschiedliche Parameter P_0 verwendet werden müssen. Die effektiven Pumpleistungen $P_{\text{eff},i}^{\text{vor}}$ werden dann anschließend mit dem Quotienten aus der mittleren Signalwellenlänge $\bar{\lambda}_{\text{signal}}$ und der jeweiligen Pumpwellenlänge λ_{pump}^i gewichtet. Die Summe dieser Größen ergibt eine Hilfsgröße $x_{\text{eff}}^{\text{vor}}$:

$$x_{\text{eff}}^{\text{vor}} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_{\text{pump}}^i}{\bar{\lambda}_{\text{signal}}} \cdot P_{\text{eff},i}^{\text{vor}},$$

wobei N die Anzahl der Pumpquellen bezeichnet. Die nach dem Schaltvorgang einzustellende Hilfsgröße $x_{\text{eff}}^{\text{nach}}$ ergibt sich entsprechend zu:

$$X_{\text{eff}}^{\text{nach}} = X_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{1}{G_{\text{norm}}} \cdot \left\{ P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}} + P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}} \right\}.$$

[0047] Für die Aufrechterhaltung des Gewinns ist es ohne Belang, wie stark die einzelnen Pumpquellen zu diesem Sollwert beitragen. Dennoch kann es Präferenzen geben, die z. B. aus der Forderung nach einer möglichst optimalen Rauschzahl resultieren und von der gewählten Pumpkonfiguration abhängen. Sind die Beiträge der einzelnen Pumpquellen festgelegt, werden diese mit dem Quotienten aus der mittleren Signallängewe $\bar{\lambda}_{\text{signal}}$ und der entsprechenden Pumpwellenlänge λ_{pump}^i multipliziert. Damit liegen nun wieder die jeweiligen effektiven Pumpleistungen vor, die nach Gleichung (3) in die tatsächlichen Pumpleistungen $P_{\text{pump}}^{\text{nach}}(i)$ umgerechnet werden.

[0048] Das zuvor beschriebene Vorgehen beruht auf der quasi immer erfüllten Annahme, dass die an einer Stelle der Verstärkerfaser eingekoppelten Pumpleistungen jeweils Wellenlängen aus unterschiedlichen Absorptionsbändern aufweisen.

[0049] Die **Fig. 3** zeigt ein Beispiel für den Verlauf des Gewinns G als Funktion der Wellenlänge für 80 Kanäle eines WDM-Signals. Exemplarisch wird nun der Fall betrachtet, dass alle Kanäle bis auf den markierten überlebenden Kanal UK abgeschaltet werden. Das eigentliche Ziel der Regelung ist es nicht, den mittleren Gewinn, wie er aus einer Gesamtleistungsmessung am Eingang und am Ausgang der Stufe resultiert, konstant zu halten. Vielmehr muss dafür gesorgt werden, dass sich der Gewinnverlauf über der Wellenlänge nicht ändert, denn nur dann bleibt die Leistung, die auf die jeweiligen Empfänger fällt, über der Zeit unverändert. In dem obigen Beispiel bedingt dies eine Änderung des mittleren Gewinns.

[0050] Hilfreich bei der Bestimmung eines neuen Sollgewinns sind die dynamischen Eigenschaften einer Erbium-dotierten Faser. Selbst bei einer sprunghaften Änderung der Eingangsleistung ändert sich die mittlere Besetzungsinversion und damit das Gewinnprofil nur langsam. Die **Fig. 4** zeigt einen zeitlichen Gewinnausschnitt der bereits in der **Fig. 1** gezeigten durchgezogene Kurve für eine konstant bleibende Pumpleistung bei einem Sprung der Eingangsleistung von 19 dB und z. B. für den überlebenden Kanal UK, der sich für große Zeitspannen asymptotisch einem Grenzwert von 30 dB nähert. Innerhalb der ersten 10 μs nach dem Schaltvorgang ändert sich der Gewinn des betrachteten Kanals jedoch nur geringfügig. Daher kann diese Zeitspanne benutzt werden, um die gewünschte Ausgangsleistung nach dem Schaltvorgang und den entsprechenden mittleren Gewinn bei veränderter spektraler Leistungsverteilung zu bestimmen.

[0051] Für das oben vorgestellte Ausführungsbeispiel, bei dem von 80 Kanälen bis auf einen Kanal bei 1531.9 nm alle weiteren Kanäle abgeschaltet werden, ist das dynamische Verhalten des Faserverstärkers EDFAs in den weiteren **Fig. 5** und **Fig. 6** dargestellt. Gezeigt werden zeitliche kanalindividuelle Gewinnänderungen $DG(t)$ bei verschiedenen Wellenlängen (im Bereich von 0 dB dargestellte Kurven) sowie die Änderung des mittleren Gewinns (dargestellte Kurve mit einem Sprung bei ca. 2 dB) in Bezug auf den Zustand vor dem Schaltvorgang an $t = 0$ ms. Die gestrichelt dargestellte horizontale Linie bei ca. 2 dB gibt die Gewinnänderung nach Erreichen des eingeschwungenen Zustands an. **Fig. 6** ist eine Zeitlupe der **Fig. 5** im Bereich von einigen Mikrosekunden vor und nach dem Schaltvorgang von Kanälen.

[0052] Nun zeigt die folgende **Fig. 7** eine durch durchgezogene Kurven KA, KB, KC, KD dargestellte erforderliche, d. h. Soll-Pumpleistung P_{PUMP} als Funktion der Eingangsleistung P_{IN} des Faserverstärkers, die zur Aufrechterhaltung verschiedener mittlerer Gewinnwerte 5, 10, 15, 20 dB nach einem Schaltvorgang gemäß **Fig. 4** bis **Fig. 6** eingestellt sein sollte. Zur Verifikation des oben beschriebenen Verfahrens wurde, jeweils ausgehend von dem Datenpunkt mit maximaler Eingangsleistung, die Pumpleistung nach obigem Verfahren gemäß den Gleichungen (1) bis (6) bestimmt und das jeweilige Ergebnis durch Punkte in der **Fig. 7** dargestellt. Dabei fällt die sehr gute Übereinstimmung der per Simulation ermittelten Pumpleistungen mit den vorausgerechneten Werten auf.

[0053] Zur Verdeutlichung zeigt die **Fig. 8** gemäß den Kurven KA, KB, KC, KD und den eingetragenen Punkten aus **Fig. 7** den relativen Fehler DEV zwischen der erfindungsgemäßen Vorausberechnung der Pumpleistung und der erforderlichen Soll-Pumpleistung. Dabei beträgt der relative Fehler maximal ca. 5%.

[0054] Bisher wurde davon ausgegangen, dass die Eingangsleistung beim Abschalten von Kanälen sofort von einem Startwert auf einen Endwert abfällt. In dem folgenden Abschnitt wird nun das Vorgehen mit auftretenden Effekten auf dem restlichen Überschwinger des Gewinns für den Fall beschrieben, dass die Eingangsleistung während einer Abschaltzeit T_{fall} (siehe **Fig. 10a** bis **Fig. 10e** mit **Fig. 11**) linear von ihrem Startwert auf den

Endwert abfällt. Unter diesen Annahmen stellt die **Fig. 9** ein dynamisches Regelkonzept zur Durchführung des Verfahrens dar.

[0055] Zunächst wird überprüft, ob die Eingangsleistung schon seit einer vorgegebenen Zeitspanne konstant war (Schritt **1**). Ist dies der Fall, wird der Verstärker mit dem herkömmlichen Regelkonzept mit Rückkopplung betrieben (Schritt **11**) (siehe dazu z. B. Mann, Schifflgen, Fropiep, "Einführung in die Regelungstechnik", Hanser-Verlag, München, 7. Auflage, 1997). Wird dabei ein stabiler Zustand erreicht (Schritt **12**), wird dieser als neuer Referenzzustand definiert (Schritt **13**). Ist hingegen die Eingangsleistung nicht konstant, d. h. wird eine Änderung der Eingangsleistung während der vorgegebenen Zeitspanne detektiert (Schritt **1**), wird auf den erfindungsgemäßen Feed-forward-Betrieb umgeschaltet (Schritt **21**). Die einzustellenden Pumpleistungen werden dabei nach jedem Zeitintervall basierend auf dem letzten Referenzzustand und den aktuellen Werten für die Eingangsleistung sowie die Ausgangsleistung berechnet (Schritt **22**) und eingestellt (Schritt **23**). Anschließend wird nochmals wiederum geprüft, ob die Eingangsleistung schon seit einer vorgegebenen Zeitspanne konstant war (Schritt **1**).

[0056] Wie schon zuvor wird nun der Fall untersucht, dass ausgehend von 80 Kanälen alle Kanäle bis auf einen bei 1531.9 nm abgeschaltet werden. Zeitliche Gewinnverläufe des überlebenden Kanals bei unterschiedlichen Abschaltzeiten bzw. -dauern von 1 μ s, 10 μ s, 100 μ s und 1 ms sind in den **Fig. 10a**, **Fig. 10b**, **Fig. 10c** und **Fig. 10d** mittels einer durchgezogenen Kurve dargestellt sowie für Abschaltzeiten zwischen 10 ns und 1 ms in der **Fig. 10e** einander überlagert, wobei der Zeitpunkt und der Wert der maximalen Gewinnänderung G_{max} mit einem Punkt dargestellt wird. Zum besseren Verständnis zeigt die gestrichelt dargestellte Kurve den zeitlichen Verlauf der abfallenden Eingangsleistung im linearen Maßstab. Wie die vorhergehenden Untersuchungen gezeigt haben, ergibt sich bei einer sprunghaften Änderung der Eingangsleistung und einer exakten Vorausberechnung der im stabilen Zustand benötigten Pumpleistung ein geringfügiger Überschwinger. Prinzipiell bestünde die Möglichkeit, dass sich diese Fehler bei einer wiederholten Anwendung der vorausschauenden Einstellung der Pumpleistung unter Verwendung der aktuell gemessenen Ausgangsleistung akkumulieren und es zu einer Divergenz des Verfahrens kommt. Dies ist jedoch nicht der Fall.

[0057] In **Fig. 10e** sind die sich für verschiedene Abschaltzeiten im Bereich von 10 ns bis 1 ms ergebenden Gewinnverläufe des "überlebenden" Kanals einander überlagert dargestellt, wobei wiederum die Punkte die jeweilige maximale Gewinnänderung G_{max} markieren. Bemerkenswerterweise hängt der Einschwingvorgang für große Zeitspannen nur geringfügig von der Abschaltzeit ab.

[0058] Ergänzend zu der **Fig. 10e** zeigt die **Fig. 11** den auftretenden Überschwinger DEV_{max} als Funktion der Abschaltzeit T_{fall} an. Bei Abschaltzeiten unterhalb 1 μ s ergibt sich ein konstanter Wert, während bei größeren Abschaltzeiten die Stärke des Überschwingers mit größer werdender Abschaltzeit immer mehr abnimmt.

[0059] Ferner zeigt die **Fig. 12** die geregelte Leistungsverteilung OPT_POW eines drei-stufigen Faserverstärkers, bestehend aus den Verstärkerstufen S1, S2 und S3, dessen Gewinn mit Hilfe eines den ersten Verstärkerstufen S1, S2 zwischengeschalteten variablen Dämpfungsgliedes att variiert werden kann. Zwischen die beiden letzten Stufen S2, S3 kann ein weiteres optisches Modul DCF eingefügt werden, das z. B. das Hinzuschalten und Auskoppeln von wellenlängenbezogenen Kanälen oder aber eine Kompensation der Streckendämpfung ermöglicht.

[0060] Dabei wird die Leistungsverteilung OPT_POW entlang des gesamten Faserverstärkers für verschiedene Betriebszustände dargestellt. Die Leistungskurve $POW1$ zeigt die vor dem Schaltvorgang herrschende Leistungsverteilung im Faserverstärker, die einen stabilen Zustand erreicht hat und für die eine vorliegende Kanalbelegung eine optimale Rauschzahl bietet. Um Über- und Unterschwinger zu vermeiden bzw. so gering wie möglich zu halten, werden die einzelnen Verstärkerstufen direkt nach dem Schaltvorgang mit Hilfe der Feed-forward-Regelung auf konstantem Gewinn gehalten, so dass sich direkt nach dem Schaltvorgang ein zweiter dargestellter Leistungsverlauf $POW2$ ergibt. Da dieser jedoch im Hinblick auf die Rauschzahl nicht optimal ist, sorgt eine langsame Regelung, nachdem das Eingangssignal stabil ist, dafür, dass der Leistungsverlauf langsam von dem zweiten Leistungsverlauf $POW2$ zu einem weiteren hier als gestrichelte Kurve $POW3$ dargestellten Leistungsverlauf übergeht. Dieser Vorgang geht langsam vonstatten, so dass diese Funktion mittels einer herkömmlichen Regelung durchgeführt werden kann. Da sich der Gewinn der einzelnen Verstärkerstufen S1, S2, S3 in einem ersten Zeitintervall nicht verändern soll, können die sich nach dem Schaltvorgang am Eingang jeder Stufe einstellenden Summensignalleistungen unabhängig voneinander berechnet werden. Die dazu erforderlichen Pumpleistungen können direkt anhand der bereits dargelegten Formeln bestimmt werden.

[0061] Unter Umständen reicht die verfügbare Rechenleistung nicht aus, um nach dem Schaltvorgang in Echtzeit die neuen erforderlichen Pumpleistungen zu berechnen. In diesem Fall bietet es sich an, direkt nach Erreichen eines stabilen Zustandes prophylaktisch eine Tabelle anzulegen, die die zur Aufrechterhaltung des Gewinns erforderliche Pumpleistung für eine ausreichende Anzahl an Signaleingangsleistungen enthält, die bei Schaltvorgängen als Referenzwerte für eine Interpolation dienen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Anpassung einer Pumpleistung eines optischen Faser-Verstärkers, der eine dotierte Faser umfasst, mit dem ein optisches Wellenlängen-Multiplex-Signal mit mehreren Kanälen unterschiedlicher Wellenlänge verstärkt wird und bei dem eine Änderung von Eingangsleistung oder Ausgangsleistung detektiert wird, wobei nach der Änderung der Eingangsleistung die Summeneingangsleistung und die Summenausgangsleistung innerhalb eines Zeitintervalls, in dem der Gewinn des Verstärkers quasikonstant bleibt, gemessen wird und hieraus – ausgehend von der Summeneingangsleistung und der Summenausgangsleistung bei einem zuvor herrschenden Zustand des Gewinns – ein neuer Wert der Pumpleistung berechnet und eingestellt wird, so dass der Gewinnverlauf des Verstärkers möglichst konstant bleibt, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich die genannten Summeneingangs- und Summenausgangsleistungen auf die Leistung am Anfang bzw. am Ende der dotierten Faser des Faser-Verstärkers beziehen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Modell zur Errechnung der neuen Pumpleistung $P_{\text{pump}}^{\text{nach}}$ nach einem die Eingangsleistung ändernden Schaltvorgang durch folgende Formeln definiert wird:

$$P_{\text{pump}}^{\text{nach}} = P_0 \cdot \left[\exp\left\{ \frac{P_{\text{eff}}^{\text{nach}}}{P_0} \right\} - 1 \right] \text{ mit}$$

$$P_{\text{eff}}^{\text{nach}} = P_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{\bar{\lambda}_{\text{signal}}}{\lambda_{\text{pump}}} \cdot \frac{1}{G_{\text{norm}}} \cdot \left\{ P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}} + P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}} \right\} \text{ und}$$

$$P_{\text{eff}}^{\text{vor}} = P_0 \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{P_{\text{pump}}^{\text{vor}}}{P_0} \right\}$$

wobei es sich bei den Größen $P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}}$, $P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}}$ um Messgrößen handelt, die innerhalb des Zeitintervalls nach dem Schaltvorgang aufgenommen werden, in dem sich der Gewinn des Verstärkers nur geringfügig ändert, und $P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}}$ die Summenausgangsleistung nach dem Schaltvorgang, $P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}}$ die Summeneingangsleistung nach dem Schaltvorgang, $P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}}$ die Summenausgangsleistung vor dem Schaltvorgang, $P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}$ die Summeneingangsleistung vor dem Schaltvorgang, $\bar{\lambda}_{\text{signal}}$ und λ_{pump} die mittlere Signalwellenlänge nach dem Schaltvorgang bzw. die Pumpwellenlänge, G_{norm} , P_0 zwei Kalibrationsparameter des optischen Verstärkers, $P_{\text{pump}}^{\text{vor}}$ die gemessene Pumpleistung vor dem Schaltvorgang und $P_{\text{eff}}^{\text{nach}}$ und $P_{\text{eff}}^{\text{vor}}$ effektive Leistungen bezeichnen.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei einem Abschaltvorgang die Eingangsleistung während der Dauer mehrerer Zeitintervalle auf einen Endwert geändert wird, und dass die Berechnung und die Einstellung der Pumpleistung basierend auf der Summeneingangsleistung und der Summenausgangsleistung bei dem zuvor herrschenden Zustand des Gewinns sowie der aktuellen Summeneingangsleistung und der aktuellen Summenausgangsleistung nach jeweils einem Zeitintervall sukzessive durchgeführt werden.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass während stabiler Zustände des Gewinns neue Werte der erforderlichen Pumpleistung zur Aufrechterhaltung des Gewinns für unterschiedliche Eingangsleistungen berechnet und in eine Tabelle eingelesen werden, die als Stützstellen für eine Interpolation zur Einstellung neuer Pumpleistungen bei Schaltvorgängen dienen.

5. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**,

dass für N Pumpquellen die effektiven Pumpleistungen $P_{\text{eff},i}^{\text{vor}}$ der Pumpquellen vor einem Schaltvorgang mit dem Quotienten aus der mittleren Signalwellenlänge $\bar{\lambda}_{\text{signal}}$ und der jeweiligen Pump-Wellenlänge λ_{pump}^i gemäß der Formel

$$X_{\text{eff}}^{\text{vor}} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_{\text{pump}}^i}{\bar{\lambda}_{\text{signal}}} \cdot P_{\text{eff},i}^{\text{vor}}$$

gewichtet und zu einer ersten Hilfsgröße aufsummiert werden, und eine weitere Hilfsgröße $X_{\text{eff}}^{\text{nach}}$ aus den gemessenen Summenein- und Summenausgangsleistungen vor und nach dem Schaltvorgang und einem Kalibrationsparameter G_{norm} berechnet wird:

$$X_{\text{eff}}^{\text{nach}} = X_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}} + P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}\}, \text{ und}$$

dass aus der weiteren Hilfsgröße die jeweilig effektiven und tatsächlich einzustellenden Pumpleistungen der N Pumpquellen nach dem Schaltvorgang errechnet werden, wobei

$P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}}$ die Summenausgangsleistung nach dem Schaltvorgang,

$P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}}$ die Summeneinangsleistung nach dem Schaltvorgang,

$P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}}$ die Summenausgangsleistung vor dem Schaltvorgang und

$P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}$ die Summeneinangsleistung vor dem Schaltvorgang sind,

und wobei

$$P_{\text{eff},i}^{\text{vor}} = P_{0,i} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{P_{\text{pump},i}^{\text{vor}}}{P_{0,i}} \right\},$$

wobei $P_{0,i}$ ein Kalibrationsparameter des optischen Verstärkers und $P_{\text{pump},i}^{\text{vor}}$ die gemessene Pumpleistung vor dem Schaltvorgang ist.

6. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Zeitintervall von $\leq 10 \mu\text{s}$ verwendet wird.

7. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei konstanter Eingangsleistung auf eine Feed-back-Regelung der Pumpleistung umgeschaltet wird.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

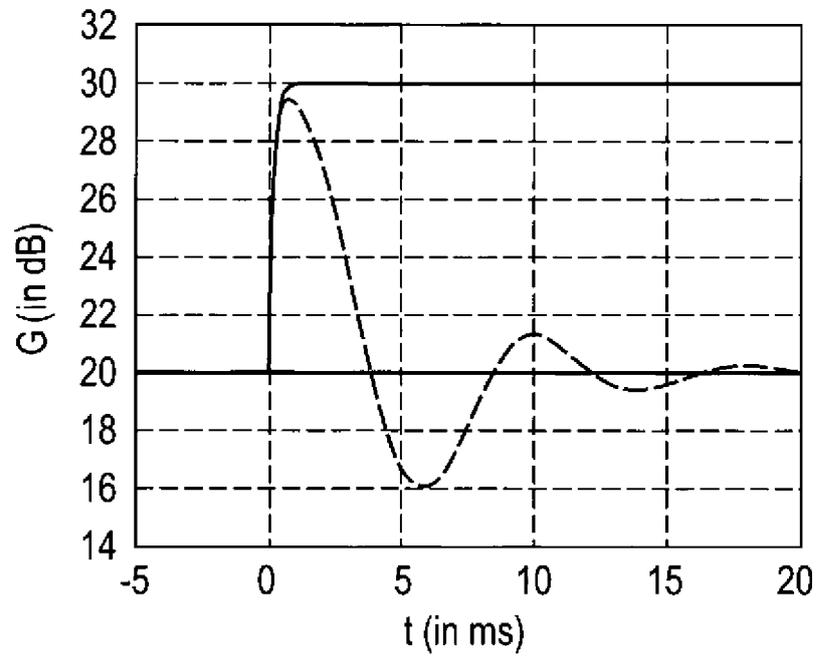


FIG 2

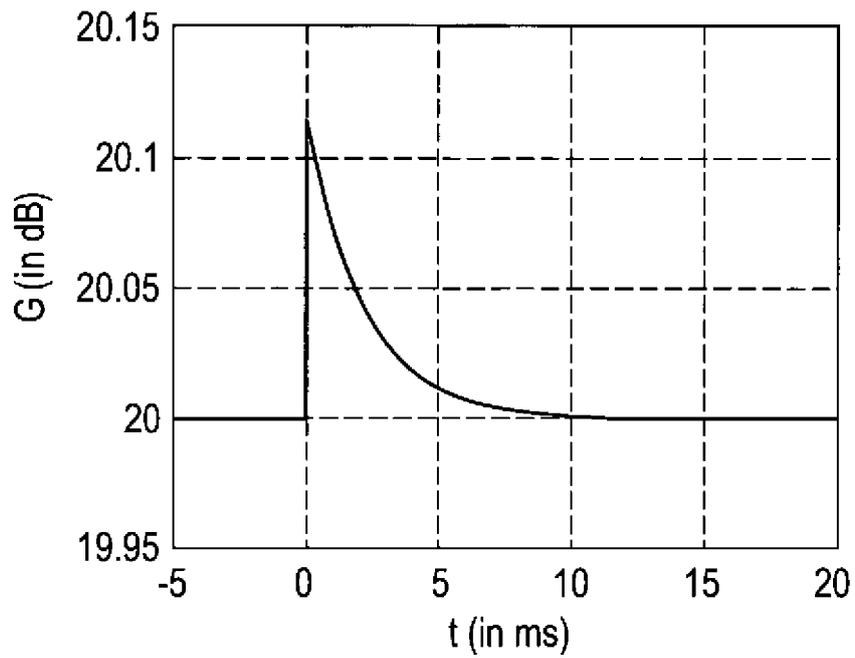


FIG 3

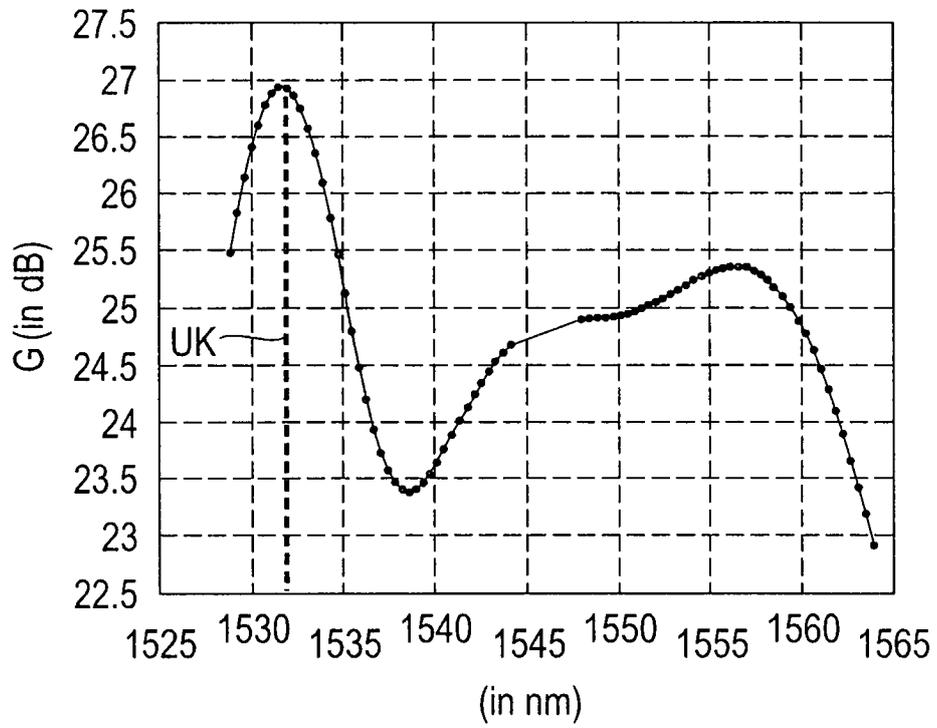


FIG 4

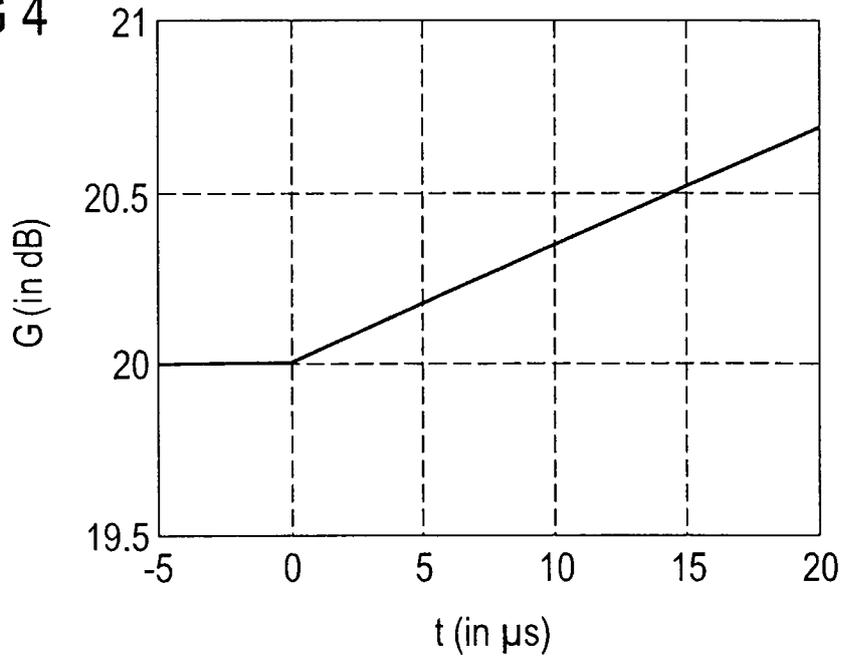


FIG 5

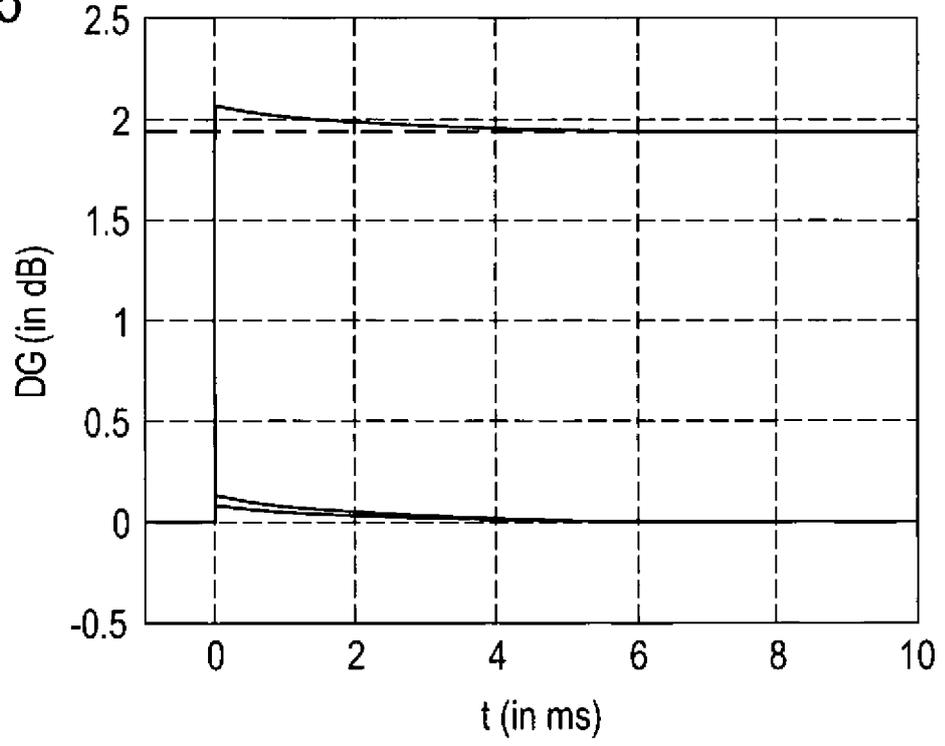


FIG 6

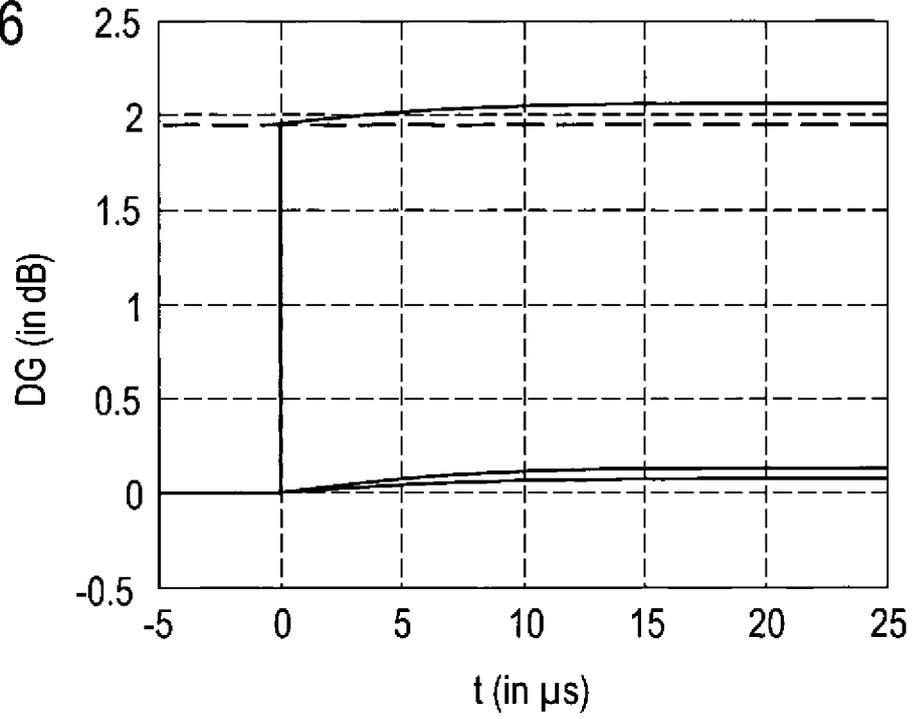


FIG 7

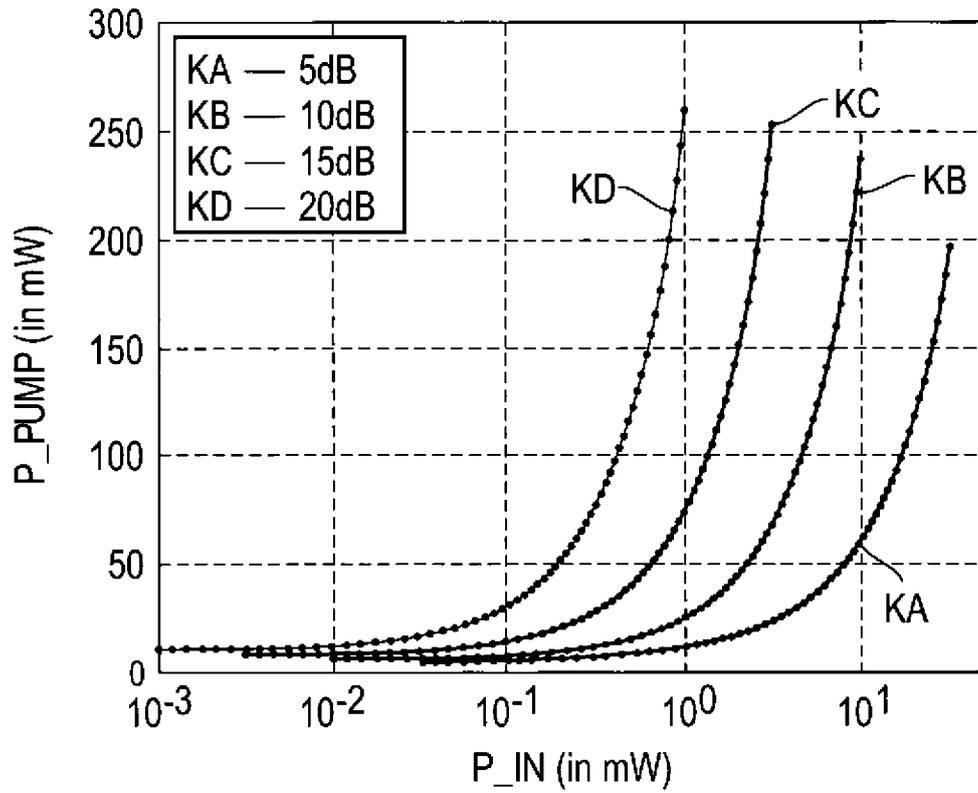


FIG 8

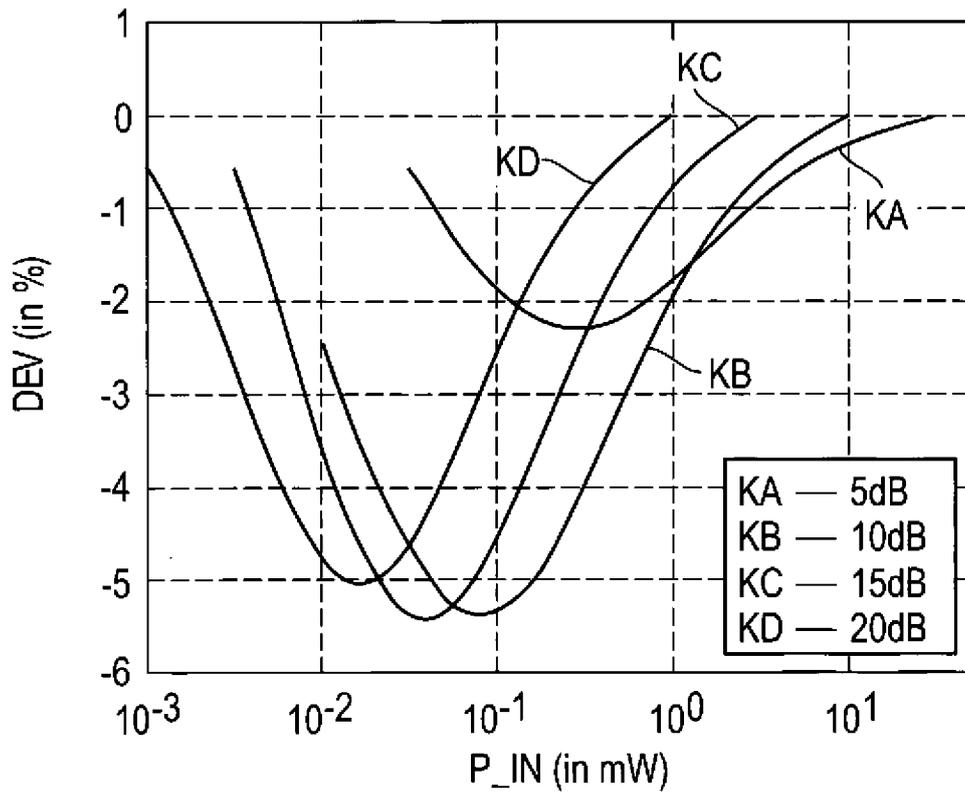


FIG 9

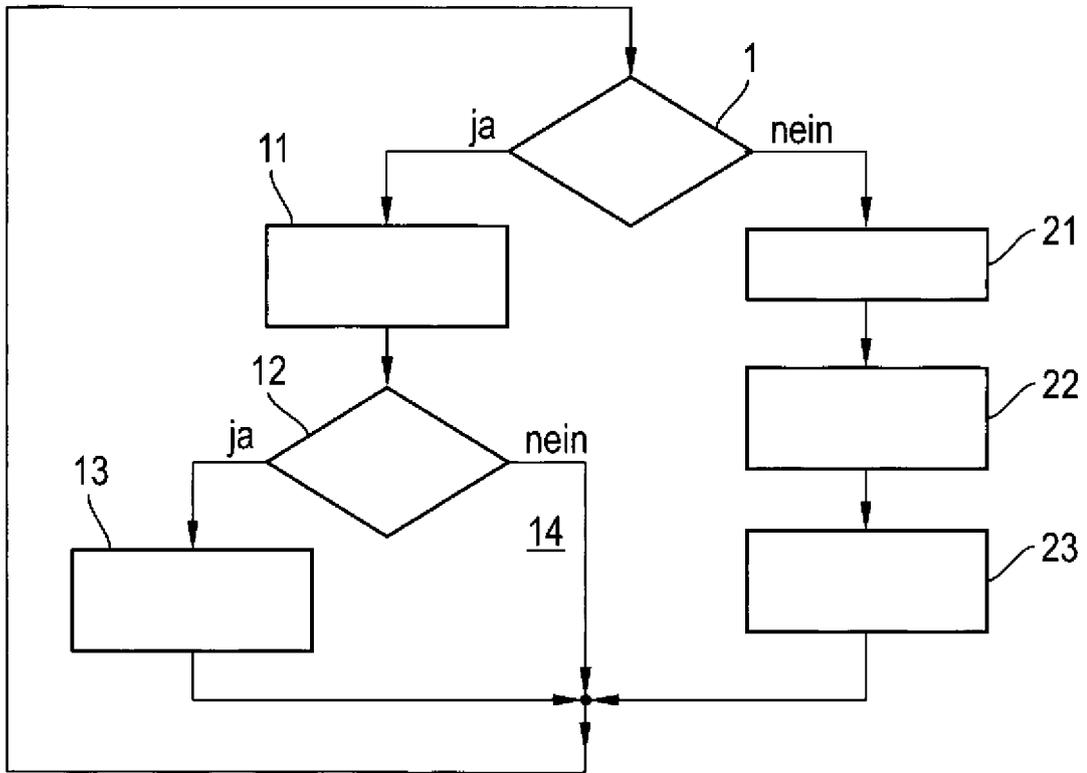


FIG 10A

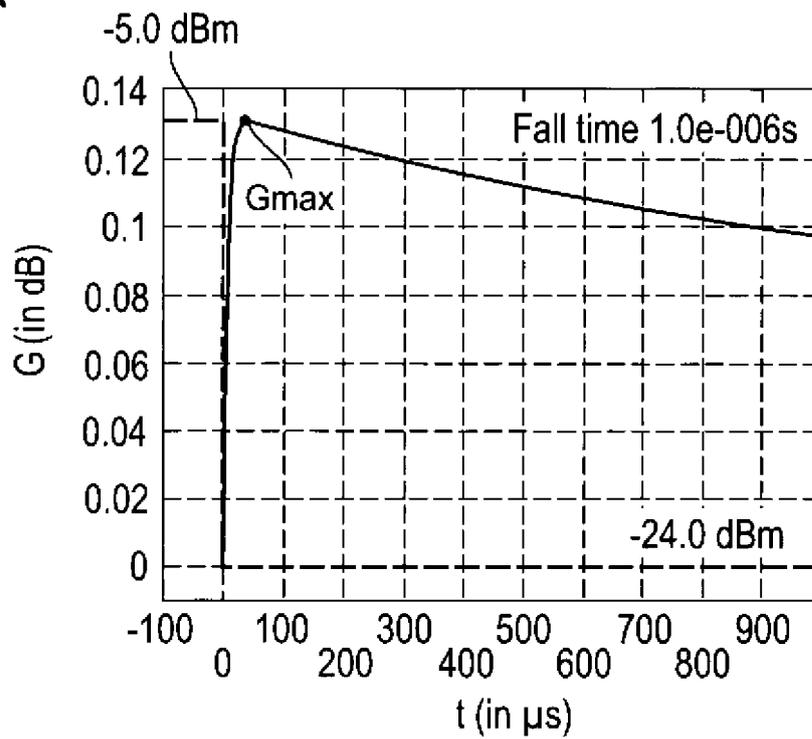


FIG 10B

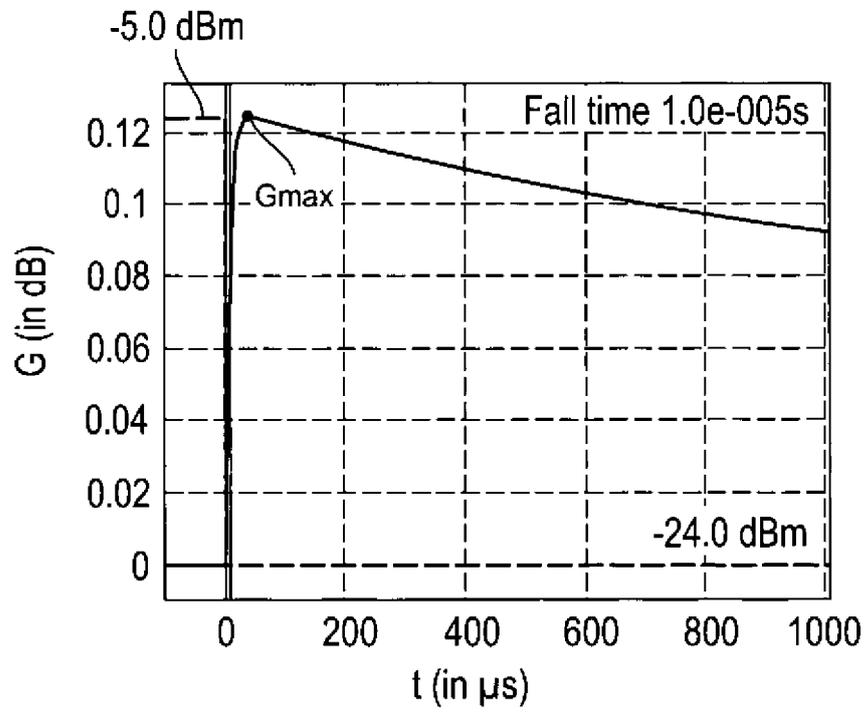


FIG 10C

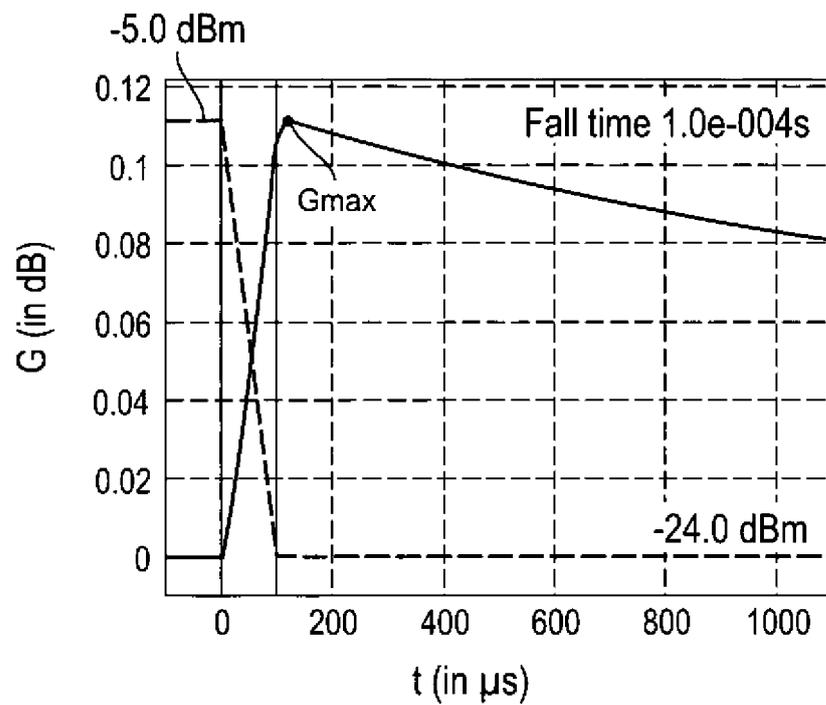


FIG 10D

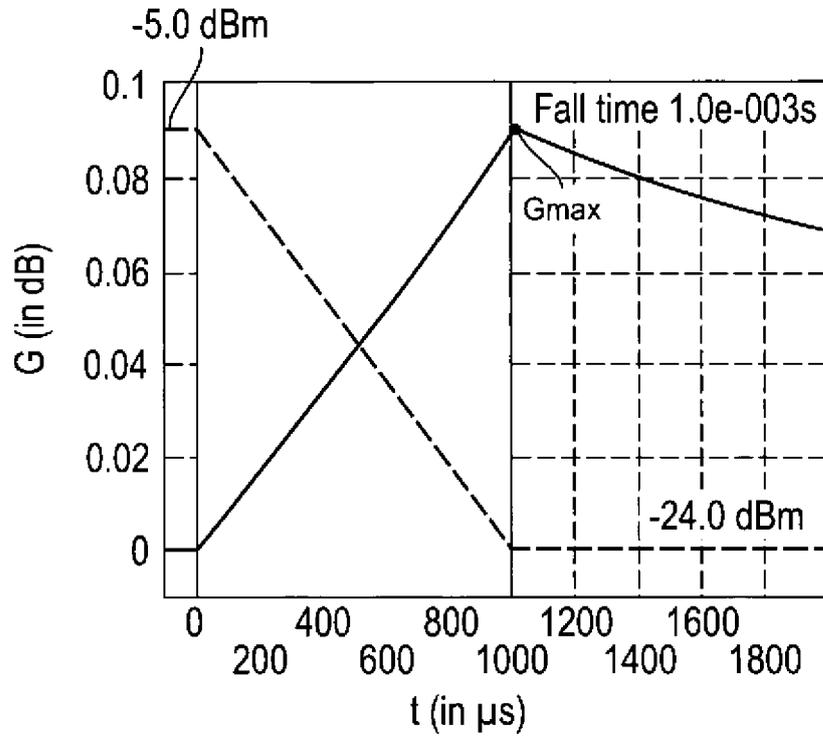


FIG 10E

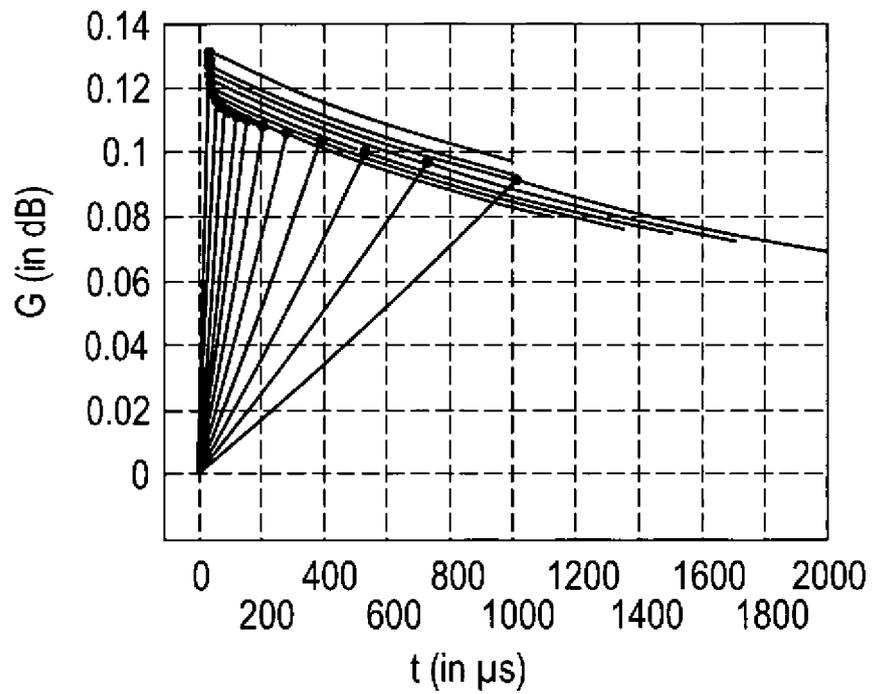


FIG 11

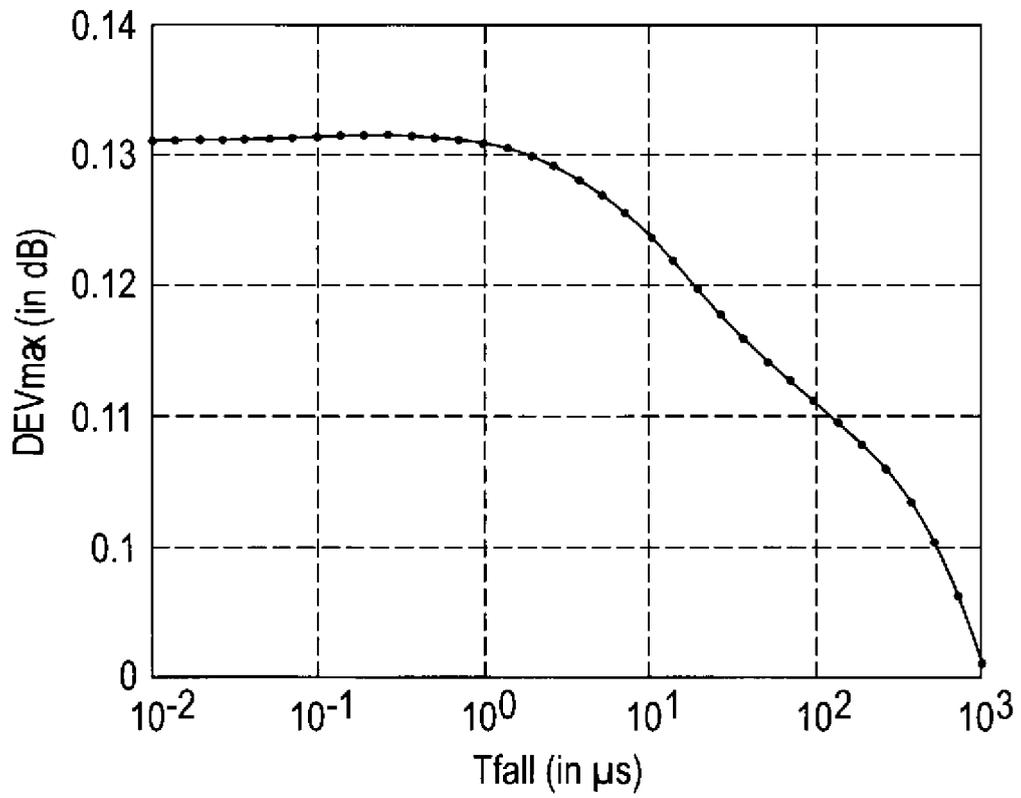


FIG 12

