

OSCILLATORE OTTICO CONTROLLATO IN TENSIONE PER UN ANELLO OTTICO AD AGGANCIO DI FASE

Viene descritto un anello ottico ad aggancio di fase (1), comprendente un rivelatore di fase ottico (2) ricevente in ingresso un segnale ottico da agganciare ($\vec{S}_1$) ed un segnale ottico agganciato ($\vec{S}_2$) e fornente in uscita un segnale elettrico d'errore (V_{PD}) indicativo della differenza di fase esistente fra il segnale ottico da agganciare ($\vec{S}_1$) ed il segnale ottico agganciato ($\vec{S}_2$); un filtro elettrico d'anello (3) ricevente il segnale elettrico d'errore (V_{PD}) e fornente un segnale elettrico d'errore filtrato (V_{PDF}), ed un oscillatore ottico controllato in tensione (4) ricevente in ingresso il segnale elettrico d'errore filtrato (V_{PDF}) ed un'uscita fornente il segnale ottico agganciato ($\vec{S}_2$). L'oscillatore ottico controllato in tensione (4) comprende un oscillatore elettrico controllato in tensione (8) ricevente in ingresso il segnale elettrico d'errore filtrato (V_{PDF}) e fornente in uscita un segnale elettrico modulante (V_{EVCO}), una sorgente laser (9) a semiconduttore a cavità esterna fornente una portante ottica (S_{OC}), ed un modulatore di ampiezza ottico (10) Mach-Zehnder ricevente in ingresso la portante ottica (S_{OC}) ed il segnale elettrico modulante (V_{EVCO}) e fornente in uscita il segnale ottico agganciato ($\vec{S}_2$), il quale è ottenuto modulando in ampiezza la portante ottica (S_{OC}) con il segnale elettrico modulante (V_{EVCO}).

D E S C R I Z I O N E

del brevetto per invenzione industriale

di ISTITUTO SUPERIORE MARIO BOELLA SULLE TECNOLOGIE
DELL'INFORMAZIONE E DELLE TELECOMUNICAZIONI

5 di nazionalità italiana,

con sede a CORSO TRENTO 21, 10129 TORINO

Inventori: FERRERO Valter, GAUDINO Roberto

*** ***** ***

La presente invenzione è relativa ad un oscillatore
10 ottico controllato in tensione per un anello ottico ad
aggancio di fase.

Gli anelli ad aggancio di fase ottici (Optical
Phase Locked Loop - OPLL) sono dispositivi ottici
utilizzati nella sintesi di frequenza e nella
15 demodulazione coerente in sistemi di comunicazione
ottici per generare localmente un segnale ottico con
frequenza e fase che inseguono quelle di un segnale
ottico di ingresso.

In particolare, un OPLL è essenzialmente formato da
20 un rivelatore di fase ottico, da un filtro elettrico
d'anello, e da un oscillatore ottico controllato in
tensione (Optical Voltage Controlled Oscillator - OVCO).

In particolare, il rivelatore di fase riceve in
ingresso un segnale ottico da agganciare ed un segnale
25 ottico agganciato, ossia avente frequenza e fase

"agganciate" a quelle del segnale ottico di ingresso, fornito dall'OVCO, e fornisce in uscita un segnale elettrico d'errore indicativo della differenza di fase esistente fra i segnali ottici di ingresso.

5 Il segnale elettrico d'errore generato dal rivelatore di fase 2 viene fornito in ingresso al filtro d'anello, il quale ha una funzione di trasferimento di tipo passa basso e fornisce in uscita un segnale elettrico d'errore filtrato che viene quindi fornito in
10 ingresso all'OVCO, il quale fornisce in uscita il summenzionato segnale ottico agganciato, la cui frequenza istantanea varia proporzionalmente con l'ampiezza del segnale elettrico filtrato.

Gli OVCO sono generalmente realizzati mediante
15 laser accordabili allo stato solido o a semiconduttore modulabili direttamente, i quali, sebbene utilizzati nel passato, presentano tuttavia alcuni inconvenienti che condizionano fortemente l'utilizzo degli OPLL in cui sono inseriti.

20 In particolare, sebbene presentino indubbi pregi in termini di efficienza spettrale e funzionalità (insensibilità agli effetti non-lineari) derivanti dalla ridotta larghezza di riga dei laser allo stato solido, gli OPLL utilizzanti OVCO basati su laser allo stato
25 solido sono però difficilmente applicabili ai sistemi di

comunicazione ottica in quanto il reperimento di laser
allo stato solido funzionanti nella griglia di frequenza
stabilita dalla ITU (International Telecommunication
Union) è alquanto difficoltoso, sono molto voluminosi ed
5 ingombranti, richiedono molta potenza per il loro
funzionamento, e sono nettamente più costosi degli OPLL
utilizzanti OVCO basati su laser a semiconduttore.

Questi ultimi, però, sebbene notevolmente meno
costosi degli OPLL utilizzanti OVCO basati su laser allo
10 stato solido, richiedono però l'impiego di una
tecnologia a contro-reazione distribuita (~~—~~Distributed
FeedBack: DFB) che richiede l'utilizzo di circuiti
elettronici di contro-reazione a larga banda, a causa
della notevole larghezza di riga dei laser a
15 semiconduttore controllati direttamente ed una corrente
di iniezione estremamente elevata a causa del
funzionamento non ideale di tali dispositivi.

La costante richiesta di mercato di velocità di
trasmissione dati sempre più elevate farà sì che
20 l'elevata efficienza spettrale e l'insensibilità agli
effetti non lineari degli OPLL saranno un fattore
fondamentale nei sistemi di comunicazione ottici della
prossima generazione.

Osservando infatti l'evoluzione dei sistemi di
25 trasmissione attuali, è immediato constatare che le

prestazioni dei sistemi di trasmissioni standard a modulazione di intensità e rivelazione diretta (IM-DD) basati sui formati "No Return to Zero" (NRZ) o "Return to Zero" (RZ), si stanno avvicinando sempre più ai
5 limiti teorici in termini di efficienza spettrale ed insensibilità agli effetti non lineari.

Per tali ragioni, ai fini di incrementare le prestazioni dei sistemi di comunicazione ottici, l'unica soluzione attualmente percorribile sembrerebbe essere
10 quella di una rilevante modifica della struttura del sistema di trasmissione, ad esempio utilizzando, in trasmissione, modulazioni di fase, di frequenza, di ampiezza e loro eventuali combinazioni, come ad esempio PSK (Phase Shift Keying), FSK (Frequency Shift Keying),
15 QAM (Quadrature Amplitude Modulation), ecc, ed, in ricezione, una rivelazione omodina coerente.

A titolo di esempio, un sistema di trasmissione binario PSK con rivelazione coerente omodina ha una sensibilità migliore di 3,5 dB rispetto ad un sistema di
20 trasmissione standard IM-DD con formato NRZ. Tale vantaggio può esser utilizzato per ridurre di circa 3,5 dB la potenza ottica media richiesta per ogni canale di trasmissione. In termini di potenza di picco si ottiene quindi una riduzione di circa 6,5 dB che riduce
25 drasticamente gli effetti non lineari in fibra, fonte di

degrado delle prestazioni.

Come ulteriore esempio, un sistema di trasmissione 4-PSK ha un'occupazione spettrale dimezzata rispetto ad un sistema di trasmissione binario standard con formato
5 NRZ.

Scopo della presente invenzione è quello di realizzare un OVCO per un OPLL che consenta di ovviare almeno in parte agli inconvenienti degli OPLL noti sopra descritti.

10 Secondo la presente invenzione viene realizzato un oscillatore ottico controllato elettricamente, come definito nella rivendicazione 1.

Secondo la presente invenzione viene inoltre realizzato un anello ottico ad aggancio di fase, come
15 definito nella rivendicazione 6.

Per una migliore comprensione della presente invenzione ne viene ora descritta una forma di realizzazione preferita, a puro titolo di esempio non limitativo e con riferimento alla figura allegata, nella
20 quale è mostrato uno schema a blocchi di principio di un anello ottico ad aggancio di fase secondo l'invenzione.

In particolare, nella figura allegata è indicato con 1, nel suo insieme, un OPLL secondo l'invenzione, il quale comprende essenzialmente un rivelatore ottico di
25 fase 2, un filtro elettrico d'anello 3, un OVCO 4 ed un

controllore di polarizzazione 5.

Il rivelatore ottico di fase 2 comprende un accoppiatore ottico 6 ricevente in ingresso un segnale ottico da agganciare $\vec{S}_1$ ed un segnale ottico agganciato
5 $\vec{S}_2$ fornito dall'OVCO 4 e fornente in uscita un segnale ottico accoppiato $\vec{S}_3$.

In particolare, supponendo di lavorare, per semplicità, su segnali monocromatici, e indicando con:

$$\begin{aligned} \vec{S}_1 &= S_1 \cdot e^{j(\omega_1 t + \varphi_1)} \cdot \hat{S}_1 \\ \vec{S}_2 &= S_2 \cdot e^{j(\omega_2 t + \varphi_2)} \cdot \hat{S}_2 \end{aligned}$$

in cui sono:

$$\begin{aligned} S_1, S_2 &: \text{ampiezze dei campi elettromagnetici } \vec{S}_1 \text{ e } \vec{S}_2 \\ \omega_1, \omega_2 &: \text{pulsazioni ottiche di } \vec{S}_1 \text{ e } \vec{S}_2 \\ \varphi_1, \varphi_2 &: \text{fasi ottiche di } \vec{S}_1 \text{ e } \vec{S}_2 \\ \hat{S}_1, \hat{S}_2 &: \text{polarizzazioni ottiche di } \vec{S}_1 \text{ e } \vec{S}_2 \end{aligned}$$

il segnale ottico accoppiato $\vec{S}_3$ fornito in uscita dall'accoppiatore ottico 6 può essere rappresentato mediante la seguente espressione generale:

$$\vec{S}_3 = \vec{S}_1' + \vec{S}_2' = k_1 \cdot S_1 \cdot \hat{S}_1' \cdot e^{j(\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_1')} + k_2 \cdot S_2 \cdot \hat{S}_2' \cdot e^{j(\omega_2 t + \varphi_2 + \varphi_2')}$$

in cui:

$$\begin{aligned} \hat{S}_1' &= \hat{S}_1 \cdot M_1 \\ \hat{S}_2' &= \hat{S}_2 \cdot M_2 \end{aligned}$$

e dove sono:

5 k_1, k_2 : fattori di attenuazione delle ampiezze
dei campi elettromagnetici $\vec{S}_1$ ed $\vec{S}_2$,
introdotti sull'uscita dall'accoppiatore
ottico,

φ_1', φ_2' : sfasamenti introdotti sull'uscita
dall'accoppiatore ottico,

$\hat{s}_1', \hat{s}_2'$: polarizzazioni ottiche di $\vec{S}_1$ ed $\vec{S}_2$
sull'uscita dell'accoppiatore ottico,

10 M_1, M_2 : matrici (2x2) di rotazione delle
polarizzazioni ottiche di $\vec{S}_1$ ed $\vec{S}_2$

Un esempio di accoppiatore ottico 6 può essere
rappresentato da un accoppiatore a 3 dB ideale, nel
quale sono:

15
$$\varphi_1' = 0^\circ; \varphi_2' = 90^\circ; k_1 = k_2 = 1/\sqrt{2}, M_1 = M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Un ulteriore esempio di accoppiatore ottico 6 può
essere rappresentato da un accoppiatore ibrido a 90°
ideale, il quale è un dispositivo ottico avente due
20 uscite ottiche fornenti, rispettivamente, un segnale
ottico $\vec{S}_3$ ed un segnale ottico $\vec{S}_4$ le cui espressioni
generali sono le seguenti:

$$\vec{S}_3 = \vec{S}_1'_{out1} + \vec{S}_2'_{out1} = k_{1_out1} \cdot S_1 \cdot \hat{s}_1'_{out1} \cdot e^{j(\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_1'_{out1})} + k_{2_out1} \cdot S_2 \cdot \hat{s}_2'_{out1} \cdot e^{j(\omega_2 t + \varphi_2 + \varphi_2'_{out1})}$$

$$\vec{S}_4 = \vec{S}_1'_{out2} + \vec{S}_2'_{out2} = k_{1_out2} \cdot S_1 \cdot \hat{s}_1'_{out2} \cdot e^{j(\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_1'_{out2})} + k_{2_out2} \cdot S_2 \cdot \hat{s}_2'_{out2} \cdot e^{j(\omega_2 t + \varphi_2 + \varphi_2'_{out2})}$$

in cui:

$$5 \quad \varphi_2'_{out1} = \varphi_1'_{out1}; \quad k_{1_out1} = k_{2_out1} = 1/\sqrt{2},$$

$$M_{1_out1} = M_{2_out1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\varphi_2'_{out2} = \varphi_1'_{out2} + 90^\circ; \quad k_{1_out2} = k_{2_out2} = 1/\sqrt{2},$$

$$M_{1_out2} = M_{2_out2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

e dove sono:

10 k_{1_out1}, k_{2_out1} : fattori di attenuazione delle
ampiezze dei campi elettromagnetici
 $\vec{S}_1$ ed $\vec{S}_2$ introdotti sulla prima
uscita dall'accoppiatore ottico,

k_{1_out2}, k_{2_out2} : fattori di attenuazione delle
15 ampiezze dei campi elettromagnetici
 $\vec{S}_1$ ed $\vec{S}_2$ introdotti sulla seconda
uscita dall'accoppiatore ottico,

$\varphi_1'_{out1}, \varphi_2'_{out1}$: sfasamenti introdotti sulla prima
uscita dall'accoppiatore ottico,

20 $\varphi_1'_{out2}, \varphi_2'_{out2}$: sfasamenti introdotti sulla seconda
uscita dall'accoppiatore ottico,

$\hat{s}_1'_{out1}, \hat{s}_2'_{out1}$: polarizzazioni ottiche di $\vec{S}_1$ ed $\vec{S}_2$

sulla prima uscita dell'accoppiatore
ottico,

$\hat{S}'_{1_{out2}}, \hat{S}'_{2_{out2}}$: polarizzazioni ottiche di $\vec{S}_1$ ed $\vec{S}_2$
sulla seconda uscita
5 dell'accoppiatore ottico,

$M_{1_{out1}}, M_{2_{out1}}$: matrici (2x2) di rotazione delle
polarizzazioni ottiche di $\vec{S}_1$ ed $\vec{S}_2$
sulla prima uscita dell'accoppiatore
ottico, e

10 $M_{1_{out2}}, M_{2_{out2}}$: matrici (2x2) di rotazione delle
polarizzazioni ottiche di $\vec{S}_1$ ed $\vec{S}_2$
sulla seconda uscita
dell'accoppiatore ottico.

Il rivelatore di fase 2 comprende inoltre un
15 fotorivelatore 7 ricevente in ingresso il segnale ottico
accoppiato $\vec{S}_3$ generato dall'accoppiatore ottico 6 e
fornente in uscita un segnale elettrico d'errore V_{PD} in
tensione indicativo della differenza di fase esistente
fra il segnale ottico da agganciare $\vec{S}_1$ ed il segnale
20 ottico agganciato $\vec{S}_2$.

Il segnale elettrico d'errore viene quindi fornito
in ingresso al filtro elettrico d'anello 3, il quale è
un filtro passa-basso del tipo comunemente utilizzato
negli anelli ad aggancio di fase elettrici e fornisce in
25 uscita un segnale elettrico d'errore filtrato V_{PDF} .

Il segnale elettrico d'errore filtrato V_{PDF} viene quindi fornito in ingresso all'OVCO 4, il quale genera in uscita il summenzionato segnale ottico agganciato $\vec{S}_2$, la cui frequenza varia proporzionalmente con l'ampiezza
5 del segnale elettrico d'errore filtrato V_{PDF} .

Il controllore di polarizzazione 5 è disposto in corrispondenza dell'ingresso dell'accoppiatore ottico 6 sul quale viene ricevuto il segnale ottico da agganciare e modifica, in modo di per sé noto e quindi non
10 descritto in dettaglio, la polarizzazione ottica del segnale ottico da agganciare in modo tale che le polarizzazioni ottiche del segnale ottico da agganciare e del segnale ottico agganciato siano parallele fra loro all'ingresso del fotorivelatore 7.

15 Secondo un aspetto della presente invenzione, l'OVCO 4 comprende essenzialmente un oscillatore elettrico controllato in tensione 8 (Electrical Voltage Controlled Oscillator - EVCO), una sorgente laser non modulata (Continuous Wave Laser Source) 9, ed un
20 modulatore ottico di ampiezza Mach-Zehnder 10.

L'EVCO 8 è un oscillatore avente una propria frequenza libera di oscillazione definibile in fase di progetto e la cui uscita è costituita da un segnale sinusoidale la cui deviazione di frequenza rispetto alla
25 frequenza libera di oscillazione è proporzionale

all'ampiezza del segnale elettrico fornito al suo ingresso. Nel caso specifico, l'EVC0 8 riceve in ingresso il segnale elettrico d'errore filtrato V_{PDF} fornito dal filtro elettrico d'anello 3 e fornisce in uscita un segnale elettrico modulante V_{EVC0} costituito da un tensione avente un andamento sinusoidale con frequenza che è funzione dell'ampiezza del segnale elettrico d'errore filtrato V_{PDF} .

La sorgente laser non modulata 9 è costituita da una sorgente laser a semiconduttore a cavità esterna del tipo comunemente reperibile in commercio e realizzata con tecnologia DFB tipica per le applicazioni DWDM e generante una portante ottica S_{0c} , ossia un segnale ottico pressoché monocromatico, ovvero avente un campo elettromagnetico ottico con andamento "quasi idealmente" sinusoidale, e frequenza ottica regolabile.

Il modulatore ottico Mach-Zehnder 10 riceve, su un ingresso ottico, la portante ottica S_{0c} generata dalla sorgente laser 9 e, su un ingresso elettrico, il segnale elettrico modulante V_{EVC0} (sinusoidale) generato dall'EVC0 8 (eventualmente amplificato mediante un driver per modulatori ottici) e fornisce su un'uscita ottica il summenzionato segnale ottico agganciato $\vec{S}_2$, le cui fase e frequenza sono funzione del segnale elettrico modulante V_{EVC0} generato dall'EVC0 8 per i motivi che

verranno qui di seguito descritti.

Il funzionamento dell'OPLL 1 verrà qui di seguito descritto iniziando da quello dell'OVCO 4 e supponendo soddisfatte le seguenti condizioni operative dell'OVCO 4
5 stesso:

a) il punto di funzionamento a riposo (ovvero in assenza di segnale modulante) del modulatore Mach-Zehnder 10 è posizionato su uno dei minimi della funzione di trasferimento elettro-ottica $F(V)$ (definita
10 come il rapporto della potenza ottica in uscita e la tensione applicata in ingresso) del modulatore stesso, la quale, come è noto, ha un andamento periodico di tipo coseno al quadrato in funzione della tensione applicata V , variabile fra un valore massimo ed un valore minimo
15 tipicamente quasi nullo); come verrà meglio chiarito in seguito, ciò permette all'OVCO 4 di funzionare in una modalità cosiddetta a portante soppressa, e a generazione di sottoportante grazie al segnale modulante sinusoidale in uscita dall'EVCO 8 (Sub Carrier Optical
20 Phase Locked Loop - SC-OPLL);

b) il rapporto di estinzione (Extinction Ratio) ER del modulatore Mach-Zehnder 10 è sufficientemente elevato ($ER > 15$ db), tale rapporto di estinzione ER viene definito come:

25

$$ER = 10 \log_{10} \frac{\max[F(V)]}{\min[F(V)]}$$

c) l'ampiezza del segnale elettrico modulante V_{EVCO} fornito al modulatore Mach-Zehnder 10 non è maggiore della tensione $V\pi$ definita come la differenza in
 5 tensione applicata V al modulatore Mach-Zehnder tra un punto di massimo ed un punto di minimo della funzione di trasferimento elettro-ottica $F(V)$ del modulatore stesso.

Indicando con F_{LASER} la frequenza ottica della portante ottica S_{OC} generata dalla sorgente laser 9 e con
 10 F_{EVCO} la frequenza elettrica del segnale elettrico modulante V_{EVCO} generato dall'EVCO 8, lo spettro di potenza del segnale di uscita del modulatore Mach-Zehnder 10 contiene:

- due righe spettrali principali alle frequenze
 15 $F_{LASER} - F_{EVCO}$ e $F_{LASER} + F_{EVCO}$ (sottoportante);

- una riga spettrale spuria alla frequenza F_{LASER} attenuata rispetto alle due righe spettrali principali di un fattore principalmente determinato dal rapporto di estinzione del modulatore;

- ulteriori righe spettrali spurie alle frequenze
 20 $F_{LASER} - n \cdot F_{EVCO}$ e $F_{LASER} + n \cdot F_{EVCO}$, dove n è un numero intero maggiore di uno.

In questo modo, all'uscita del modulatore Mach-Zehnder 10, si ottiene un segnale ottico avente le righe

spettrali principali (sottoportante) le cui frequenze e fasi ottiche sono proporzionali al segnale elettrico di pilotaggio dell'EVCO 8, da cui il nome precedentemente citato di oscillatore ottico controllato in tensione a
5 portante soppressa e a generazione di sottoportante.

Sulla base di quanto sopra descritto, si evince immediatamente come la presente invenzione consente di realizzare, utilizzando componenti comunemente reperibili in commercio, un OVCO 4 avente la medesima
10 funzionalità di un OVCO tradizionale realizzato mediante laser accordabili allo stato solido o a semiconduttore. Infatti, il segnale ottico $\vec{S}_2$ fornito dall'OVCO 4 ha uno spettro ottico che è costituito da due righe spettrali principali (sottoportante), le cui frequenze e fasi sono
15 controllate direttamente dal segnale elettrico d'errore filtrato V_{PDF} in ingresso all'OVCO 4, ingresso che coincide con quello dell'EVCO 8.

Il funzionamento dell'OPLL 1 nel suo complesso è invece del tutto identico a quello di un OPLL
20 tradizionale realizzato utilizzando un OVCO tradizionale realizzato mediante laser accordabili allo stato solido o a semiconduttore.

Infatti, ipotizzando di scegliere una delle due righe spettrali principali del segnale ottico $\vec{S}_2$
25 (chiamata in seguito, per comodità, riga agganciata), la

differenza fra la fase del segnale ottico $\vec{S}_1$ e la fase della riga agganciata del segnale ottico $\vec{S}_2$ fornito dal rivelatore di fase 2 rappresenta, un segnale d'errore utilizzato per pilotare l'EVCO 8, il quale fornisce in uscita una tensione sinusoidale V_{EVCO} la cui frequenza è
5 proporzionale a tale errore.

Pertanto, grazie al fatto che la fase della riga agganciata del segnale ottico $\vec{S}_2$ corrisponde a quella di una delle due righe spettrali principali presenti nello
10 spettro di potenza ottico in uscita dal modulatore Mach-Zehnder 10, ed essendo quest'ultima funzione della frequenza F_{EVCO} del segnale sinusoidale V_{EVCO} fornito in uscita dall'EVCO 8, lo stato di funzionamento dell'OPLL 1 evolverà in modo tale da annullare l'errore di fase
15 esistente fra il segnale ottico $\vec{S}_1$ e la riga agganciata del segnale ottico $\vec{S}_2$.

Infatti, supponendo di utilizzare come riga agganciata la seconda riga spettrale principale ($F_{LASER} + F_{EVCO}$) dello spettro di potenza di uscita del modulatore
20 Mach-Zehnder 10 e di utilizzare un EVCO 8 in cui la frequenza della tensione sinusoidale di uscita sia proporzionale al segnale di pilotaggio fornito al suo ingresso, allora se la frequenza (o la fase) del segnale ottico $\vec{S}_1$ tendesse ad aumentare, allora anche la
25 differenza fra la frequenza (o la fase) del segnale

ottico $\vec{S}_1$ e la frequenza (o la fase) della riga
agganciata ($F_{\text{LASER}} + F_{\text{EVC0}}$) del segnale ottico $\vec{S}_2$
tenderebbe a crescere, e quindi anche l'ampiezza del
segnale di pilotaggio dell'EVC0 8 tenderebbe ad
5 aumentare, facendo così crescere la frequenza F_{EVC0} della
tensione sinusoidale V_{EVC0} fornita in uscita dall'EVC0 8,
contrastando così l'aumento della differenza di
frequenza (o di fase) tra il segnale ottico $\vec{S}_1$ e la
frequenza (o la fase) della riga agganciata ($F_{\text{LASER}} +$
10 F_{EVC0}) del segnale ottico $\vec{S}_2$.

Ovviamente, considerazioni analoghe possono essere
fatte nel caso in cui la riga agganciata sia la prima
riga spettrale principale ($F_{\text{LASER}} - F_{\text{EVC0}}$) dello spettro di
potenza di uscita del modulatore Mach-Zehnder 10.

15 Secondo un ulteriore aspetto della presente
invenzione, la scelta di quale delle due righe spettrali
principali dello spettro di potenza di uscita del
modulatore Mach-Zehnder 10 debba essere utilizzata come
riga agganciata, può essere effettuata regolando la
20 frequenza ottica F_{LASER} della portante ottica S_{OC} fornita
dal laser a semiconduttore a cavità esterna 9, in modo
tale che la frequenza della riga agganciata sia la più
prossima possibile alla frequenza F_{INGRESSO} del segnale
ottico $\vec{S}_1$, ovvero sia all'interno della banda di
25 aggancio dell'OPLL 1.

Infatti, supponendo ad esempio che la frequenza F_{LASER} sia prossima alla frequenza $F_{\text{LASER}} + F_{\text{EVCO}}$ della seconda riga spettrale principale dello spettro di potenza di uscita del modulatore Mach-Zehnder 10, dopo l'accoppiamento del segnale ottico $\vec{S}_1$ e del segnale ottico $\vec{S}_2$ così come generato dal modulatore Mach-Zehnder 10, ossia composto dalle righe spettrali alle frequenze F_{LASER} , $F_{\text{LASER}} - n \cdot F_{\text{EVCO}}$ e $F_{\text{LASER}} + n \cdot F_{\text{EVCO}}$ ($n \geq 1$), il battimento, introdotto dalla fotorivelazione, fra la frequenza del segnale ottico $\vec{S}_1$, ossia F_{INGRESSO} , e le tre frequenze principali dello spettro del segnale ottico $\vec{S}_2$, ossia F_{LASER} , $F_{\text{LASER}} - F_{\text{EVCO}}$ e $F_{\text{LASER}} + F_{\text{EVCO}}$, genererà una serie di righe spettrali a differenti frequenze in cui vi sarà una riga spettrale in banda base (esattamente a 0 Hz se l'OPLL 1 è agganciato) ed altre righe spettrali spurie a frequenze $\pm n \cdot F_{\text{EVCO}}$. Progettando opportunamente il filtro elettrico d'anello 3, tali righe spettrali spurie saranno eliminate grazie al suo filtraggio ed eventualmente a quello introdotto dal fotorivelatore 7.

Dopo il filtraggio introdotto dal filtro elettrico d'anello 3, rimarrà quindi in banda base unicamente il battimento tra la riga spettrale principale scelta come riga agganciata ed il segnale da agganciare, il quale rappresenta il segnale elettrico d'errore filtrato V_{PDF} utilizzato per pilotare l'EVCO 8.

I principali vantaggi del SC-OPLL secondo l'invenzione sono i seguenti:

- L'utilizzo di un modulatore ottico esterno e di un EVCO permette un'estrema accuratezza nella sintesi della frequenza ottica, tanto che questa risulta limitata solo dalle caratteristiche dell'EVCO. Attualmente, gli EVCO commerciali sono disponibili con frequenze elettriche anche molto elevate (50-60 GHz) e un campo di accordabilità relativamente ampio (~ 10-100 MHz). Le soluzioni alternative precedentemente menzionate (EVCO a laser allo stato solido o a semiconduttore) richiedono invece un'estrema accuratezza nel controllo della corrente di polarizzazione del laser a semiconduttore modulato direttamente, la cui realizzazione è problematica.

- Lo schema di realizzazione dell'OVCO proposto permette una traslazione in frequenza pressoché ideale, la cui linearità in funzione della tensione applicata è limitata solo dalla linearità del EVCO e non dai componenti ottici utilizzati. Un ulteriore vantaggio è dovuto alla traslazione in frequenza non affetta da alcuna modulazione di ampiezza spuria, grazie al segnale in uscita dall'EVCO, la cui ampiezza è costante su tutto il suo campo di funzionamento. Nelle altre soluzioni basate sul controllo diretto del laser a semiconduttore,

la traslazione in frequenza è sempre accompagnata da una modulazione in ampiezza spuria che deve essere necessariamente compensata da un apposito circuito elettrico od ottico.

5 • Il progetto del SC-OPLL proposto, basato su un EVCO ed un modulatore ottico esterno, la cui accoppiata risulta essere equivalente ad un OVCO, può essere effettuato sfruttando la teoria sui PLL elettrici ben conosciuta e sviluppata da tempo; le altre soluzioni,
10 invece, richiedono uno specifico progetto basato sulle peculiarità del laser modulato direttamente che viene utilizzato.

 • Il laser utilizzato come oscillatore locale non è modulato (CW), quindi è possibile utilizzare un laser a
15 semiconduttore a cavità esterna accordabile lentamente in lunghezza d'onda. Con questa soluzione si ha il vantaggio di avere sia un'accordabilità veloce su un limitato campo di frequenza grazie al OVCO, sia un'accordabilità lenta su un ampio campo di lunghezze
20 d'onda, grazie al controllo diretto dei parametri, disponibile su ogni laser accordabile commerciale. Nelle altre soluzioni, invece, si richiedono sorgenti laser non commerciali da svilupparsi appositamente.

 Risulta infine chiaro che agli SC-OPLL e OVCO qui
25 descritti ed illustrati possono essere apportate

modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito protettivo della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

Ad esempio, la condizione operativa per cui il
5 punto di funzionamento a riposo del modulatore Mach-Zehnder 10 debba essere su un minimo della funzione di trasferimento elettro-ottica $F(V)$ del modulatore stesso non è strettamente necessaria per il buon funzionamento dell'OVCO 4. Infatti, nel caso in cui tale condizione
10 non fosse soddisfatta e quindi il punto di funzionamento a riposo del modulatore Mach-Zehnder 10 non fosse su un minimo della funzione di trasferimento elettro-ottica del modulatore stesso, lo spettro di potenza del segnale di uscita del modulatore Mach-Zehnder 10 conterrebbe una
15 riga spettrale alla frequenza F_{LASER} avente un'ampiezza non trascurabile rispetto alle due righe spettrali di interesse (sottoportante); tale riga spettrale verrebbe però comunque eliminata nel filtraggio effettuato dal filtro elettrico d'anello 3 ed eventualmente anche dal
20 fotorivelatore 7.

Inoltre, il controllore di polarizzazione 5
attraverso cui le polarizzazioni ottiche del segnale
ottico da agganciare e del segnale ottico agganciato
vengono mantenute parallele fra loro all'ingresso del
25 fotorivelatore 7, non necessariamente deve essere

disposto in corrispondenza dell'ingresso
dell'accoppiatore ottico 6 sul quale giunge il segnale
ottico da agganciare, ma può essere disposto in
qualunque altro punto dell'OPLL 1 in cui, comunque,
5 possa operare per mantenere parallele le polarizzazioni
ottiche del segnale ottico da agganciare e del segnale
ottico agganciato all'ingresso del fotorivelatore 7, ad
esempio in uscita dal modulatore ottico 10.

Inoltre, come modulatore ottico non necessariamente
10 deve essere utilizzato un modulatore Mach-Zehnder ma può
essere utilizzato qualunque altra tipologia di
modulatore ottico di ampiezza.

Infine, dato che maggiore è la frequenza del
segnale di uscita dell'EVCO 8, maggiore è la separazione
15 in frequenza delle righe spettrali dello spettro di
potenza di uscita del modulatore ottico di ampiezza 10,
maggiore è la separazione in frequenza dei battimenti
introdotti dalla fotorivelazione e migliori sono le
prestazioni dell'OVCO 4, una maggiore frequenza del
20 segnale di uscita dell'EVCO 8 potrebbe essere ottenuta
traslando verso frequenze più elevate la frequenza di
oscillazione libera dell'EVCO 8 stesso.

Tale traslazione può essere realizzata in modo
alquanto semplice utilizzando un oscillatore locale con
25 frequenza molto maggiore della frequenza di oscillazione

libera dell'EVCO 8. In particolare, facendo battere fra loro il segnale di uscita dell'EVCO 8 con frequenza di oscillazione libera F_{FO} ed il segnale di uscita dell'oscillatore locale con frequenza F_{LO} , ad esempio
5 utilizzando un semplice moltiplicatore, il battimento creerebbe due righe spettrali rispettivamente alle frequenze $F_{LO} - F_{FO}$ e $F_{LO} + F_{FO}$. Filtrando quindi via la riga a frequenza inferiore attraverso un opportuno filtro passa-banda, si otterrebbe quindi un segnale
10 elettrico avente una frequenza molto maggiore di quella dell'EVCO 8, il quale segnale può quindi essere fornito in ingresso al modulatore ottico di ampiezza per modulare la portante ottica fornita dal laser a semiconduttore a cavità esterna.

15 Infine, l'EVCO 8 potrebbe essere di una tipologia differente da quella precedentemente descritta, ed in particolare, anziché essere un oscillatore elettrico controllato in tensione, potrebbe anche essere un oscillatore elettrico controllato in corrente. In
20 quest'ultimo caso, quindi, l'OVCO 4 diventerebbe analogamente un oscillatore ottico controllato in corrente.

R I V E N D I C A Z I O N I

1. Oscillatore ottico controllato elettricamente
(4) caratterizzato dal fatto di comprendere:

- mezzi oscillatori elettrici controllati elettricamente (8) aventi un ingresso ricevente un segnale elettrico di pilotaggio (V_{PDF}) ed un'uscita fornente un segnale elettrico modulante (V_{EVC0}) avente una frequenza (F_{EVC0}) correlata a detto segnale elettrico di pilotaggio (V_{PDF});
- 10 - una sorgente laser (9) fornente una portante ottica (S_{oc});
- mezzi modulatori di ampiezza ottici (10) aventi un ingresso ottico ricevente detta portante ottica (S_{oc}) ed un ingresso elettrico ricevente detto segnale elettrico modulante (V_{EVC0}) ed un'uscita ottica fornente
15 un segnale ottico modulato ($\vec{S}_2$) ottenuto modulando in ampiezza detta portante ottica (S_{oc}) con detto segnale elettrico modulante (V_{EVC0}).

2. Oscillatore ottico controllato elettricamente
20 secondo la rivendicazione 1, in cui detti mezzi modulatori di ampiezza ottici sono un modulatore ottico d'ampiezza Mach-Zehnder (10).

3. Oscillatore ottico controllato elettricamente
 secondo la rivendicazione 2, in cui il punto di
25 funzionamento a riposo di detto modulatore Mach-Zehnder

(10) è posto in corrispondenza di un minimo della funzione di trasferimento elettro-ottica del modulatore Mach-Zehnder (10) stesso.

4. Oscillatore ottico controllato elettricamente
5 secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detta sorgente laser (9) è una sorgente laser non modulata.

5. Oscillatore ottico controllato elettricamente secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti,
10 in cui detta sorgente laser (9) è un laser a semiconduttore a cavità esterna.

6. Anello ottico ad aggancio di fase (1), comprendente:

- mezzi rilevatori di fase ottici (2) aventi un
15 primo ingresso ottico ricevente un segnale ottico da agganciare ($\vec{S}_1$) ed un secondo ingresso ottico ricevente un segnale ottico agganciato ($\vec{S}_2$) ed un'uscita elettrica fornente un segnale elettrico d'errore (V_{PD}) indicativo della differenza fra la fase di detto segnale ottico da
20 agganciare ($\vec{S}_1$) e la fase di detto segnale ottico agganciato ($\vec{S}_2$);

- mezzi oscillatori ottici controllati elettricamente (4) aventi un ingresso elettrico ricevente un segnale elettrico di pilotaggio (V_{PDF})
25 correlato a detto segnale elettrico d'errore (V_{PD}) ed

un'uscita ottica fornente detto segnale ottico
agganciato ($\vec{S}_2$); caratterizzato dal fatto che detti
mezzi oscillatori ottici controllati elettricamente (4)
sono realizzati secondo una qualsiasi delle
5 rivendicazioni precedenti.

7. Anello ottico ad aggancio di fase secondo la
rivendicazione 6, in cui detti mezzi rilevatori di fase
ottici (2) comprendono:

- mezzi accoppiatori ottici (6) aventi un primo
10 ingresso ottico ricevente detto segnale ottico da
agganciare ($\vec{S}_1$) ed un secondo ingresso ottico ricevente
detto segnale ottico agganciato ($\vec{S}_2$) ed un'uscita ottica
fornente un segnale ottico accoppiato ($\vec{S}_3$); e

- mezzi fotorilevatori (7) ricevanti detto segnale
15 ottico accoppiato ($\vec{S}_3$) e fornenti detto segnale
elettrico d'errore (V_{PD}).

8. Anello ottico ad aggancio di fase secondo la
rivendicazione 7, in cui detti mezzi accoppiatori ottici
(6) comprendono un accoppiatore a 3 dB.

20 9. Anello ottico ad aggancio di fase secondo la
rivendicazione 7, in cui detti mezzi accoppiatori ottici
(6) comprendono un accoppiatore ibrido a 90° ottico.

10. Anello ottico ad aggancio di fase secondo una
qualsiasi delle rivendicazioni da 6 a 9, comprendente
25 inoltre:

- mezzi di filtraggio elettrico d'anello (3)
interposti fra detti mezzi rilevatori di fase ottici (2)
e detti mezzi oscillatori ottici controllati
elettricamente (4).

5 p.i.: ISTITUTO SUPERIORE MARIO BOELLA SULLE
TECNOLOGIE DELL'INFORMAZIONE E DELLE
TELECOMUNICAZIONI