

Talbot-Bänder und Frequenzkämme

Jürgen Jahns*, Adolf W. Lohmann**

*LG Optische Nachrichtentechnik, FernUniversität Hagen

**LSt. Multimediakommunikation u. Signalverarbeitung, Univ. Erlangen-Nürnberg

mailto:jahns@fernuni-hagen.de

Ein inkohärenter Frequenzkamm wird vorgeschlagen und demonstriert, der auf der Verwendung eines ultrapräzisionsgefertigten Retroreflektoren-Arrays beruht. Der Zusammenhang zwischen inkohärenten und kohärenten Frequenzkämmen wird dargestellt und der Bezug zu den Talbot-Bändern erläutert.

1 Kohärente Frequenzkämme

Im Jahr 2005 erhielt Theodor Hänsch den Nobelpreis für seine Beiträge zur ultrapräzisen Vermessung atomarer Frequenzen [1]. Durch Verwendung sog. „Frequenzkämme“ ist es möglich, Frequenz (bzw. Zeit) mit einer relativen Genauigkeit von 10^{-15} zu bestimmen. Ein Frequenzkamm ist allgemein eine Anordnung, welche ein diskretes Frequenzspektrum erzeugt mit äquidistanten schmalen Peaks. Herkömmlich erzeugt man einen Frequenzkamm durch kohärente Modenkopplung in einem Fabry-Pérot-Resonator. Der erzeugte Pulszug weist das erwünschte diskrete Linienspektrum auf. Der Linienabstand ist durch die Pulsrate des modengekoppelten Lasers gegeben und liegt typisch im Bereich von 100 MHz. Solche kleine Werte sind für die erwähnten Frequenzmessungen wünschenswert. Andererseits könnte man sich auch vorstellen, Frequenzkämme für andere Zwecke, z.B. in WDM-Systemen einzusetzen. Für solche Anwendungen wäre der geringe Modenabstand (in Wellenlängenbereich kleiner als 10 nm!) allerdings ungünstig, weil er eine individuelle Adressierung einzelner Linien praktisch unmöglich machen würde. Daher ergibt sich die Fragestellung, wie man „grobe“ Frequenzkämme einfache erzeugen kann. Unser Vorschlag beruht auf der Verwendung von breitbandiger (d.h., zeitlich inkohärenter) Strahlung und optischer Filterung mit einem optischen Transversalfilter, welches ausreichend grosse zeitliche Verzögerungen erzeugt.

2 Optische Filterung im Zeitbereich

Jedes optische Interferometer lässt sich allgemein im Zeitbereich beschreiben. Die unterschiedlichen Wege, die im Interferometer erzeugt werden, ergeben unterschiedliche Zeitverzögerungen. Mathematisch lässt sich der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangssignal durch eine diskrete Faltung darstellen:

$$s_{\text{aus}}(t) = \sum_{m=1}^M h_m s_{\text{ein}}(t - m\tau) \quad (1)$$

Der Fall $M=2$ beschreibt ein Zweistrahlinterferometer, der Fall $M>2$ ein Mehrstrahlinterferometer. Es wird angenommen, dass bei einem Mehrstrahlinterferometer mehrfach dieselbe zeitliche Verzögerung τ auftritt.

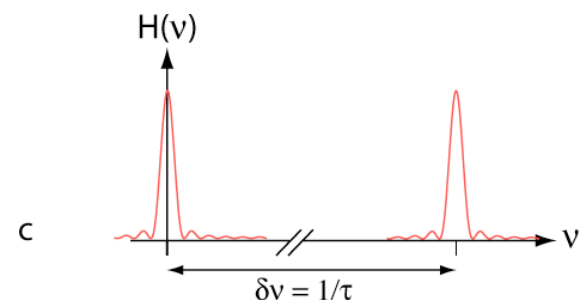
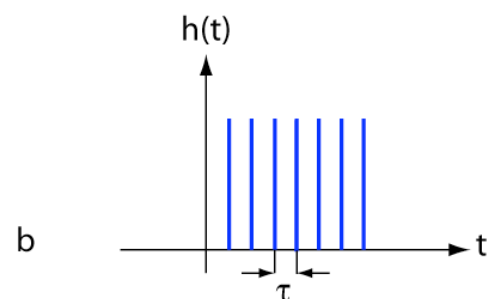
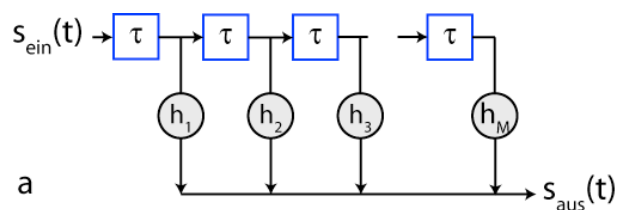


Abb. 1 a) Struktur eines Transversalfilters. b) Impulsantwort. c) Frequenzkamm als Übertragungsfunktion.

Abbildung 1 zeigt die Struktur eines Transversalfilters, seine Impulsantwort (bei gleichen Filterkoeffizienten) und seine Übertragungsfunktion, welche aus diskreten Linien im Abstand $\delta\nu$ besteht.

Dieser ist invers proportional zur implementierten Zeitverzögerung.

3 Array von Retroreflektoren als variables Transversalfilter

Ein Array von Retroreflektoren (RA) eignet sich, um ein Mehrstrahlinterferometer zu realisieren. Die Zeitverzögerungen ergeben sich zwischen den einzelnen Facetten des Arrays durch Drehung von RA um einen Winkel α (Abb. 2).

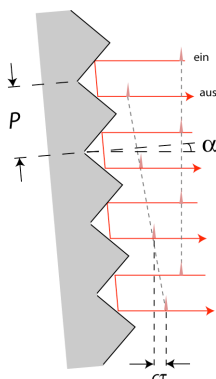


Abb. 2 Retroreflektoren-Array als Verzögerungsfilter.

Die Zeitverzögerung ergibt sich zu

$$\tau = 2P \sin \alpha / c \quad (1)$$

Typische erreichbare Werte liegen im Bereich 10-1000 fs, so dass sich ein Modenabstand im Linienspektrum von 1-100 THz ergibt. Dieser Abstand ist gross genug, um für WDM-Anwendungen eine räumliche Trennung der Kanäle zu erzielen.

4 Demonstration im Zeitbereich

Mit Hilfe eines fs-Lasers und eines Autokorrektors wurde die Wirkungsweise des RAs im Zeitbereich untersucht. Die Messungen wurden von R. Grunwald am Max-Born-Institut, Berlin, durchgeführt. Das Messfenster des Autokorrektors erfasst dabei i.w. zwei Pulse einer Folge von fs-Pulsen. Das Autokorrelationssignal besteht also i.w. aus der Autokorrelation eines Doppelpulses (Abb. 3). Zeitabstand und Winkelverdrehung des RAs können miteinander verglichen werden. Das verwendete Array wurde mit Diamantfäden in Aluminium hergestellt und hatte einen Pitch $P=640\mu\text{m}$. Für das dargestellte Ergebnis ist $\tau \approx 450\text{fs}$, was bei einem Winkel $\alpha \approx 6^\circ$ entspricht.

Die Demonstration der Anordnung im Spektralbereich wurde in [2] beschrieben. Dort wurde auch auf den Zusammenhang zu den Talbot-Bändern [3] hingewiesen, siehe auch [4].

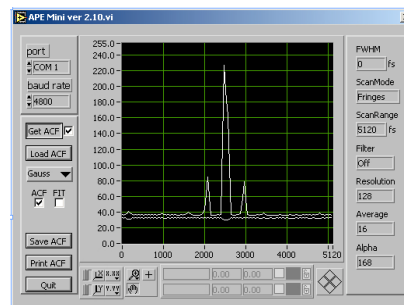


Abb. 3 Experimentelles Ergebnis einer Messung mit dem Autokorrektor.

5 Talbot-Bänder als Frequenzkämme

Talbot-Bänder beobachtet man im Spektrum einer breitbandigen Lichtquelle, wenn man die Beleuchtungswelle unterteilt und teilweise verzögert. Im klassischen Experiment [3] wird dies durch Verwendung einer Glasplatte erreicht. In [5] wurde gezeigt, dass dieser Fall einem Zweistrahlinterferometer entspricht und dass man die Anordnung zu einem Mehrstrahlinterferometer erweitern kann, indem man komplexere Elemente in den Beleuchtungsstrahl einführt, welche M Zeitverzögerungen erzeugen. Das beschriebene RA stellt eine solche Möglichkeit dar. Die Intensitätsmodulation im Spektralband stellt dann einen periodischen Frequenzkamm dar.

6 Zusammenfassung

Die Verwendung speziell gefertigter mikrooptischer Bauelemente eignet sich zur Erzeugung scharfer Frequenzkämme bei Verwendung von breitbandigem Licht. Variabel einstellbare Parametern ermöglichen Systemanwendungen wie z.B. bei WDM-Übertragungsstrecken.

7 Literatur

- [1] R. Holzwarth, Th. Udem, T. W. Hänsch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth, P. St. J. Russell, „Optical frequency-synthesizer for precision spectroscopy“, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2264–2267 (2000).
- [2] A. Sabatyan, J. Jahns, „Retroreflector array as a tapped delay-line filter for ultra-short optical pulses“, *J. Eur. Opt. Soc-RP* **1**, 06022 (2006).
- [3] H. F. Talbot, „An experiment on the interference of light“, *Phil. Mag.* **10**, 364 (1837).
- [4] K. Schmid, W. Dultz, E. Frins, H. Schmitzer, „Ein einfaches optisches Kammfilter für Faserstrecken nach dem Prinzip der Talbotschen Streifen“, *DGaO-Proc.* (2006) B31.
- [5] J. Jahns, A. W. Lohmann, M. Bohling, „Talbot bands and temporal processing of optical signals“, *J. Eur. Opt. Soc-RP* **1**, 06001 (2006).