法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-12-27

KTN波長掃引光源を用いたSS-OCTシステムの 雑音評価に関する研究

ENDO, Kazuma / 遠藤, 和馬

(出版者 / Publisher)
法政大学大学院理工学研究科
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学大学院紀要.理工学・工学研究科編
(巻 / Volume)
59
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
4
(発行年 / Year)
2018-03-31
(URL)
https://doi.org/10.15002/00021582

法政大学

KTN 波長掃引光源を用いた SS-OCT システムの雑音評価に関する研究

NOISE EVALUATION OF SS-OCT SYSTEM USING KTN WAVELENGTH SWEPT LIGHT SOURCE

遠藤和馬

Kazuma ENDO

指導教員 品川満

法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士課程

This paper describes the noise evaluation of the swept source optical coherence tomography (SS-OCT) system using KTN wavelength swept light source. The contrast of a tomographic image depends on the rescaled signal noise. The SS-OCT system has the noise of the source and rescaled signal. The relationship between the source signal noise and rescaled signal noise was investigated. We found that the rescaled signal noise depends on the source signal noise.

Key Words : SS-OCT, source signal noise, rescaled signal noise

1. 序論

光干渉断層計(OCT: Optical Coherence Tomography)は生体組織の断層構造を,数 μ m オーダという高い空間分解能で調べることのできるイメージング技術である[1][2]. OCT は視覚障害の原因疾患の主な原因である緑内障,糖尿病網膜症などの診断に用いられる.

OCTの中でも Swept Source OCT(SS-OCT)は高速画像取 得の最も有効な手法とされていて光源に波長掃引光源を 用いることが特徴である[3].

2. 研究目的

SS-OCT システムで得られる断層画像は干渉信号を信 号処理した後のリスケーリング信号スペクトルで構成さ れるため,リスケーリング信号スペクトルの信号対雑音 比(SNR)は断層画像のコントラストに影響し SS-OCT シ ステムの感度の評価指標となっている.そのため SS-OCT に用いる波長掃引光源の雑音評価の際はリスケ ーリング信号スペクトルの雑音を評価するのが一般的と なっているが,その際干渉計を使った評価となるため複 雑な評価となってしまう.そこで本研究では干渉計を使 わずに光源のノイズを評価する方法を提案する.本研究 の目的は光源信号ノイズとリスケーリング信号ノイズの 相関関係を示してその評価方法の妥当性を証明すること である.

3. 雑音モデルと雑音評価方法

SS-OCT システムの雑音モデルを図1に示す.



SS-OCT システムは波長掃引光源,干渉計,受光器,ア ナログデジタル変換器(A/D 変換器),信号処理器で構成 される.波長掃引光源は出力光のレーザーノイズ,干渉計 はファイバの揺れによる偏波ノイズ,受光器は光を電気 変換した際のショットノイズと内蔵されたアンプが発生 するノイズを持つ.A/D 変換器は内蔵された回路のノイ ズと A/D 変換で発生する量子化ノイズをもち,信号処理 器では信号処理のときに発生するノイズを持つ.

図1のようにSS-OCTシステムの持つノイズを光源信号 ノイズ,干渉信号ノイズ,リスケーリング信号ノイズに分 類して段階的に関係を調べる.今回はレーザーノイズを 変えることで相関関係を調べる.まず光源信号ノイズと 干渉信号ノイズに相関関係を調べ,最後に光源信号ノイ ズとリスケーリング信号ノイズの関係を調べる. 図2に光源信号の特性を測定するためのノイズ評価系 を示す.



本研究ではKTN 光偏向器[4][5]を組み込んだKTN 高速波 長掃引光源[6][7]を使用した.この実験系では光源から出 射された光を受光器(PD)で電気信号に変換したあと,ア ンプで信号を増幅し,スペクトラムアナライザで計測す る.スペクトラムアナライザでの測定では,ゼロスパンモ ードという設定を用いる.ゼロスパンモードでは測定し た高調波信号スペクトルのピーク値を 40 秒間測定する ことで,ピーク値の時間特性を測定可能である.

図3に光源高調波信号のピーク値の時間特性を示す.



図3 (a)50 次と(b)53 次高調波ピーク値の時間特性

KTN 波長掃引光源の基本周波数は 200 kHz である. 周波 数 10 MHz の 50 次高調波では 2 dB 以内の変動であるの に対して 10.6 MHz の 53 次高調波で最大約 5 dB もの変 動がある. このように 50 次と 53 次という近しい次数の 高調波信号のピーク値であっても時間的な揺らぎが大き く違うことがわかる. この高調波の信号揺らぎというノ イズの影響に着目し, この高調波の信号揺らぎを光源信 号, 干渉信号, リスケーリング信号について評価するため の系, 方法について述べる.

図4にSS-OCTシステム雑音評価系を示す.





光源信号はカプラ1で分岐した光源の光をPDで電気信 号に変換し,アンプで増幅して,カットオフ周波数225 MHzのローパスフィルタ(LPF)を通してオシロスコープ で得られる.干渉信号はカプラ1で分岐した光源の光を バランス型光検出器(BPD)で電気信号に変換し,アンプ で増幅して,周波数帯域10から250 MHzのバンドパスフ ィルタ(BPF)を通してオシロスコープで得られる.使用す るフィルタの帯域が違うのは光源信号と干渉信号でメイ ンのスペクトルの周波数帯域が異なるためである.リス ケーリング信号は干渉信号を信号処理して得られる. 図5に雑音評価の解析手法を示す.



図5 雑音評価の解析手法

オシロスコープで光源信号と干渉信号のデータが得られる.これらの信号を一周期ごとに分割して 400 波形の分割した波形データに高速フーリエ変換(FFT)を含む信号処理,統計処理を用いて解析して雑音評価を行う.

図 6 に光源信号,干渉信号の雑音解析についての図を 示す.

リスケーリング信号の雑音解析について図7に示す.



図6 光源信号と干渉信号の雑音解析

光源信号と干渉信号は 400 波形あるためその数だけ FFT 結果が得られる.その FFT 結果から時間的な周波数成分 の信号揺らぎを測定することが可能である.n は高調波 次数であり Ns は雑音解析範囲の最初の高調波次数であ り.NE は雑音解析範囲の最後の高調波次数である.

光源信号の雑音評価に用いる式を以下に示す.

$$\sigma_{\mathrm{S}n}^{2} = \sum_{i=1}^{400} \frac{(V_{\mathrm{S}ni} - V_{\mathrm{S}An})^{2}}{400 - 1} / \sum_{n=N_{\mathrm{S}}}^{N_{\mathrm{E}}} V_{\mathrm{S}An}^{2}$$
(1)

$$A_{\rm S} = \sum_{n=N_{\rm S}}^{N_{\rm E}} \sigma_{{\rm S}n}^2 \tag{2}$$

ここで、V_{Sni}は光源信号の n 次高調波の i 波形目の電圧実 効値のピーク値である. V_{SAn}は V_{Sni}の 400 波形分の平均で ある. σ_{sn}^2 は Ns 次高調波から N_E 次高調波までの光源信号 平均ピークパワーの合計で規格化された n 次高調波の電 圧分散である. As は光源信号の強度分散である. この強 度分散を用いて光源信号の雑音を評価する.

干渉信号の雑音評価に用いる式を以下に示す.

$$\sigma_{\mathrm{In}}^{2} = \sum_{i=1}^{400} \frac{(V_{\mathrm{In}i} - V_{\mathrm{IAn}})^{2}}{400 - 1} / \sum_{n=N_{\mathrm{S}}}^{N_{\mathrm{E}}} V_{\mathrm{IAn}}^{2}$$
(3)

$$A_{\rm I} = \sum_{n=N_{\rm S}}^{N_{\rm E}} \sigma_{\rm In}^2 \tag{4}$$

ここで、*V*_{Ini}は干渉信号の n 次高調波の i 波形目の電圧 実効値のピーク値である.*V*_{IAn}は *V*_{Ini}の 400 波形分の平均 である.*σ*_{In}²は *N*_S 次高調波から *N*_E 次高調波までの干渉信 号平均ピークパワーの合計で規格化された n 次高調波の 電圧分散である.*A*_Iは干渉信号の強度分散である.この強 度分散を用いて干渉信号の雑音を評価する.



干渉信号が 400 波形取得できるので,干渉信号を信号処 理したリスケーリング信号も複数取得できる.

リスケーリング信号の雑音評価に用いる式を以下に示 す.

$$\sigma_{\rm P}{}^2 = \sum_{i=1}^{400} \frac{(V_{\rm Pi} - V_{\rm PA})^2}{400 - 1} / V_{\rm PA}{}^2 \tag{5}$$

ここで, V_{Pi} は *i* 波形目のリスケーリング信号スペクトルの実効値のピーク値である. V_{PA} は V_{Pi} の 400 波形分の平均である. σ_{P}^{2} は規格化されたリスケーリング信号の強度分散である. この σ_{P}^{2} でリスケーリング信号ノイズを評価する.

4. 評価結果

本研究では KTN 光源内の半導体光増幅器(SOA)の駆動 電流を変えてレーザーノイズを変動させ,強度信号ノイ ズ,干渉信号ノイズ,リスケーリング信号ノイズの関係を 調べる.図 8 に解析帯域が 200 kHz(Ns = 1)から 225 MHz(Ne=1125)の光源信号ノイズAsのSOA 電流特性を示 す.また,図9に解析帯域が 10 MHz(Ns = 50)から 225 MHz (Ne=1250)の干渉信号ノイズAiのSOA 電流特性を示す.





図9 AIの SOA 電流特性

SOA 駆動電流を 300,350,400,450,500,550 mA と変化さ せて As と A_Iを解析した. As と A_Iは SOA 電流に依存して いることがわかる. As と A_Iが最小になったのは 450 mA で最大になったのは 550 mA であった. 干渉信号ノイズの 特性が光源信号ノイズの特性と一致した. このことから 干渉信号ノイズは光源信号ノイズに依存していることが わかる.

次に op²の SOA 電流特性を図 10 に, op²の As 特性を図 11 に示す.



SOA 駆動電流を 300,350,400,450,500,550 mA と変化させ て σ_P^2 を解析した. 図 10 より σ_P^2 は SOA 電流に依存して いることがわかる.

図 11 より光源信号ノイズ As が大きくなると or² も大き くなっていることがわかる. つまり, リスケーリング信号 ノイズが光源信号ノイズに依存していることがわかる.

5. 結論

本研究では干渉計を使わずに SS-OCT に用いる波長掃 引光源の雑音評価をする方法を提案し,一般的な光源雑 音評価に使用されているリスケーリング信号ノイズが光 源信号ノイズに依存することを示すことによって、その 評価方法の妥当性を証明した.

本研究で提案した評価方法を用いて光源信号ノイズを 低減できる光源内の設計や設定方法を見つけることがで きれば SS-OCT システムで得られる断層画像に影響する 雑音を低減することができる.また,本研究で SOA の駆 動電流が SS-OCT システムのノイズに影響することがわ かっているのでノイズの発生が少ない SOA を使うこと で雑音を低減することが可能である.

参考文献

- 1) Huang, D. et al. : Optical coherence tomography, Science, Vol.254, No.5035, pp.1178–1181,1991.
- Mason, C. et al. : Doppler optical coherence tomography for measuring flow in engineered tissue, Elsevier Bios. Bioe., Vol.20, pp.414–423, 1996.
- 3) Yasuno, Y. et al. : Three-dimensional and high-speed swept-source optical coherence tomography for *in vivo* investigation of human anterior eye segments, Opt. Express, Vol.13, No.26, pp.10652–10664,2005.
- 4) Miyazu, J. et al. : New beam scanning model for high-speed operation using KTa_{1- x}Nb_xO₃ crystals, Appl. Phys. Express, Vol.4, pp.111501-1–111501-3, 2011.
- 5) Shinagawa, M. et al. : Sensitive electro-optic sensor using KTa_{1- x}Nb_xO₃ crystal, Sens. Actuators A, Vol.192, No.42, 2013.
- 6) Okabe, Y. et al. : High-speed optical coherence tomography system using a 200-kHz swept light source with a KTN deflector, Opt. and Photo. J., Vol. 3, pp.190-193, 2013.
- 7) Okabe, Y. et al. : Three-dimensional high-speed optical coherence tomography system using KTN swept light source, Electro. Lett., Vol.49, No.16, pp.981–982,2013.