

### 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>

# 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  $\mu\text{m}$  オーダという高い空間分解能で調べることが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になってしまう。そこで本研究では干渉計を使わずに光源の雑音を評価する方法を提案する。本研究の目的は光源信号雑音とリスケーリング信号雑音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。

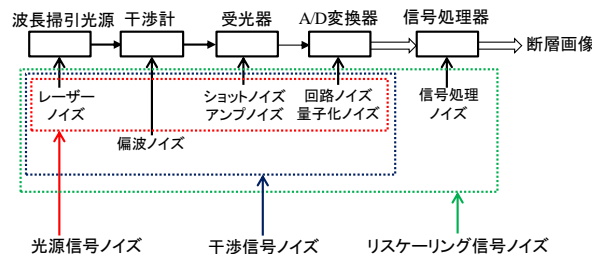


図 1 SS-OCT システムの雑音モデル

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雑音、干渉信号雑音、リスケーリング信号雑音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。まず光源信号雑音と干渉信号雑音に相関関係を調べ、最後に光源信号雑音とリスケーリング信号雑音の関係を調べる。

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。

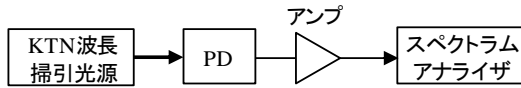


図2 光源信号ノイズ評価系

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。

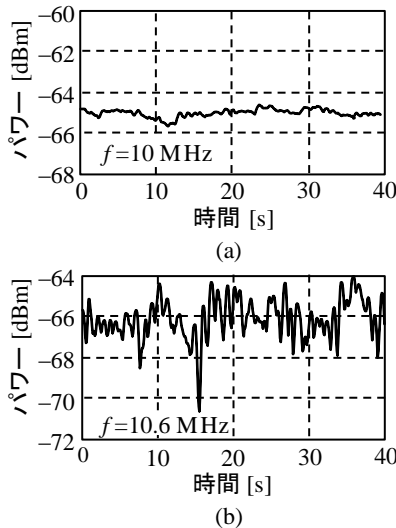


図3 (a)50次と(b)53次高調波ピーク値の時間特性

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。

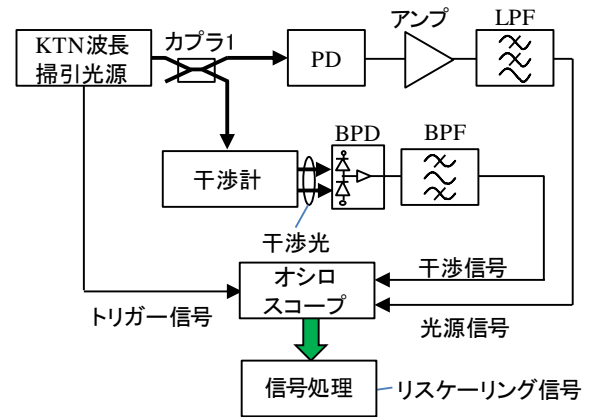


図4 SS-OCTシステム雑音評価系

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。

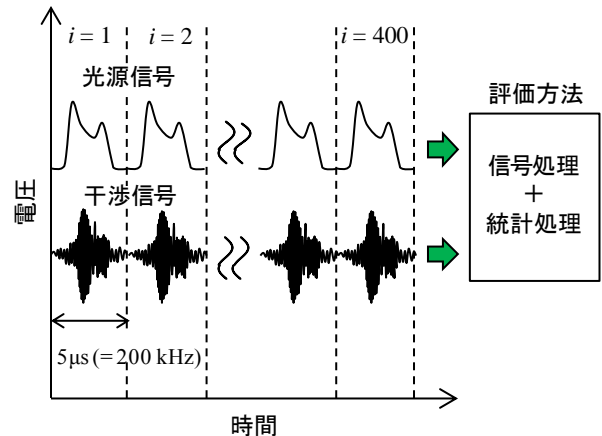


図5 雑音評価の解析手法

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。

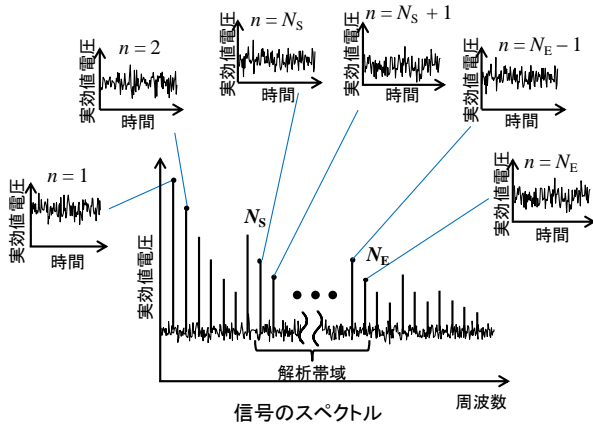


図6 光源信号と干渉信号の雑音解析

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 $N_S$ は雑音解析範囲の最初の高調波次数であり。 $N_E$ 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。

$$\sigma_{Sn}^2 = \sum_{i=1}^{400} \frac{(V_{Sni} - V_{SAi})^2}{400 - 1} / \sum_{n=N_S}^{N_E} V_{SAi}^2 \quad (1)$$

$$A_S = \sum_{n=N_S}^{N_E} \sigma_{Sn}^2 \quad (2)$$

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。 $V_{SAi}$ は $V_{Sni}$ の400波形分の平均である。 $\sigma_{Sn}^2$ は $N_S$ 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。 $A_S$ 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。

$$\sigma_{In}^2 = \sum_{i=1}^{400} \frac{(V_{Ini} - V_{IAi})^2}{400 - 1} / \sum_{n=N_S}^{N_E} V_{IAi}^2 \quad (3)$$

$$A_I = \sum_{n=N_S}^{N_E} \sigma_{In}^2 \quad (4)$$

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。 $V_{IAi}$ は $V_{Ini}$ の400波形分の平均である。 $\sigma_{In}^2$ 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。

リスケーリング信号の雑音解析について図7に示す。

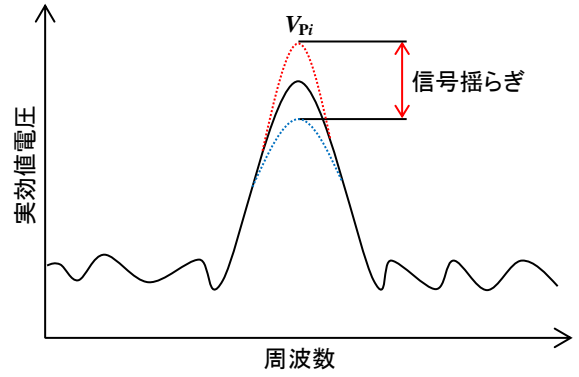


図7 リスケーリング信号の雑音解析

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。

$$\sigma_P^2 = \sum_{i=1}^{400} \frac{(V_{Pi} - V_{PA})^2}{400 - 1} / V_{PA}^2 \quad (5)$$

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。 $\sigma_P^2$ 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 $\sigma_P^2$ 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200kHz( $N_S = 1$ )から225MHz( $N_E = 1125$ )の光源信号ノイズ $A_S$ のSOA電流特性を示す。また、図9に解析帯域が10MHz( $N_S = 50$ )から225MHz( $N_E = 1250$ )の干渉信号ノイズ $A_I$ のSOA電流特性を示す。

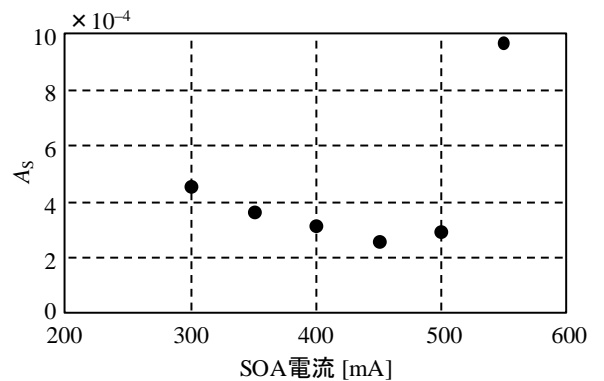


図8  $A_S$ のSOA電流特性

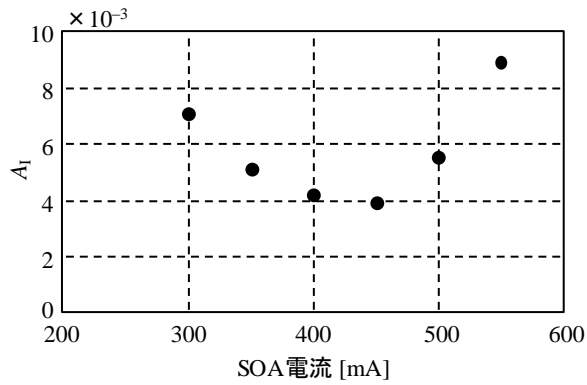


図9  $A_I$  の SOA 電流特性

SOA 駆動電流を 300,350,400,450,500,550 mA と変化させて  $A_S$  と  $A_I$  を解析した.  $A_S$  と  $A_I$  は SOA 電流に依存していることがわかる.  $A_S$  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  $\sigma_P^2$  の SOA 電流特性を図 10 に,  $\sigma_P^2$  の  $A_S$  特性を図 11 に示す.

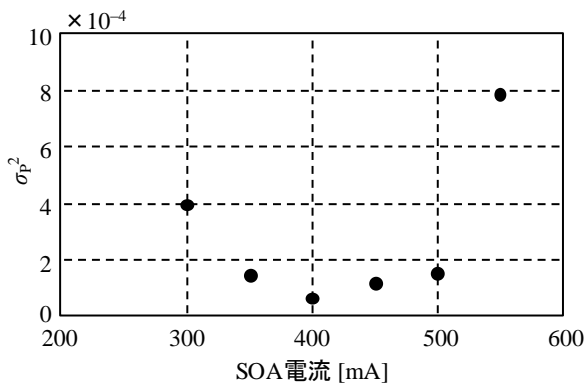


図 10  $\sigma_P^2$  の SOA 電流特性

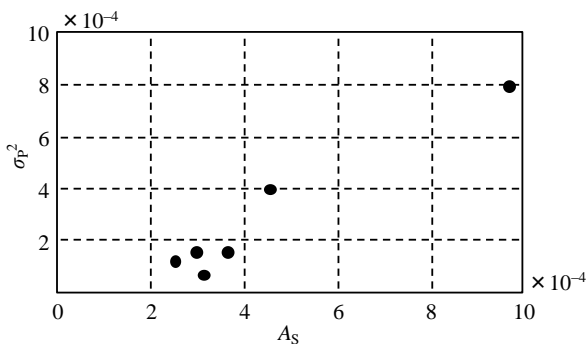


図 11  $\sigma_P^2$  の  $A_S$  特性

SOA 駆動電流を 300,350,400,450,500,550 mA と変化させて  $\sigma_P^2$  を解析した. 図 10 より  $\sigma_P^2$  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  $A_S$  が大きくなると  $\sigma_P^2$  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.
- 2) 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  $KTa_{1-x}Nb_xO_3$  crystals, Appl. Phys. Express, Vol.4, pp.111501-1–111501-3, 2011.
- 5) Shinagawa, M. et al. : Sensitive electro-optic sensor using  $KTa_{1-x}Nb_xO_3$  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.