

半導体レーザーカオス信号のヘテロダイン検出

渡 辺 伸 之

半導体レーザーは実効的な端面反射率が30%程度であることから、外部反射物があるとき容易に複合共振器を形成することが知られている^{1,2)}。このような復号共振器による光カオスのゆらぎの周波数はレーザーの媒質と注入電流に依存するが、数GHz~10数GHzのオーダーである。最近のデジタル測定器の測定可能な周波数は年々向上している(~5GHz)が、それらが高価であることと、比較的高周波まで(26GHz)測定可能なスペクトルアナライザの情報によってもカオスの動的な性質には迫れないなどの問題がある。そのため観測しやすい周波数にヘテロダイン検波でダウンコンバージョンして波形を計測する手法がとられる²⁾。

本稿では、ヘテロダイン検波を簡単にシミュレーションする方法を紹介し、中間周波数信号の分岐構造と相関次元解析と検波器の特性の関係について述べる。

1. ヘテロダイン検波のモデル³⁾

ここで議論するモデルは復号共振器からの光を受光素子で電気信号(RF信号)に変換し、その後RF信号とローカルオシレーター(LO)を乗算混波し、中間周波数信号を適当なバンド幅をもつバンドパスフィルターで濾過した信号(IF信号)の性質である。計算モデルではファブリー・ペロー・タイプの共振器を想定し、活性層の電界分布が均一であり、外部共振器の長さが半導体レーザーの共振器に比べ十分長いものとした。また外部反射体からの実効反射率が0.1%以下として多重反射の影響を無視した。このような拘束条件で電場 $E(t) = E_0(t) \exp \{j(\omega t + \phi(t))\}$ とキャリア密度 $N(t)$ の振舞いを基本的なファンデルポール方程式を用いてあらわす²⁾。

ヘテロダイン検波では、LO (L_1) の周波数 $f_{l_0} = \omega/2\pi$ をRF信号 ($|E(t)|^2$) のピーク周波数に対して0.1GHzだけ異なるようにして、 L_1 と ($|E(t)|^2$) を乗算混合し中間周波数信号を作る。中心周波数濾過用のフィルターは

中心周波数 $f_c = \omega_c/2\pi = 0.1$ GHz, 通過帯域周波数 $f_d = \omega_d/2\pi$, フィルターの急峻さの係数 $\xi = 0.7$ の2次のバンドパスフィルターを想定するとその微分方程式表現は式(1)~(4)となる。

$$\frac{dZ_1(t)}{dt} = -\omega_c^4 Z_4(t) \tag{1}$$

$$\frac{dZ_2(t)}{dt} = -2\xi\omega_c^2\omega_d Z_4(t) + Z_1(t) \tag{2}$$

$$\frac{dZ_3(t)}{dt} = -(2\omega_c^2 + \omega_d^2)Z_4(t) + Z_2(t) + (|E_0(t)|^2 \cdot L_1(t)) \tag{3}$$

$$\frac{dZ_4(t)}{dt} = -2\xi\omega_d Z_4(t) + Z_3(t) \tag{4}$$

中間出力信号のフィルター出力は Z_4 である。

2. 光カオス信号とIF信号の分岐構造とスケーリング指数

カオス的に振る舞う系においてまず調べておきたいことは、パラメーターによる時系列信号の分岐構造であろう。ここでは、キャリアの注入を $J = J_0(1 + m \sin(2\pi f_m t))$ と変調したときに変調深度 m による時系列信号の分岐構造⁴⁾ について、複合共振器の出力(RF信号)とバンドパスフィルターを通過したIF信号のものを比較してみる(図1)。微細な構造は異なっているが、カオス的に振る舞う領域と周期的に振る舞う領域は一致し

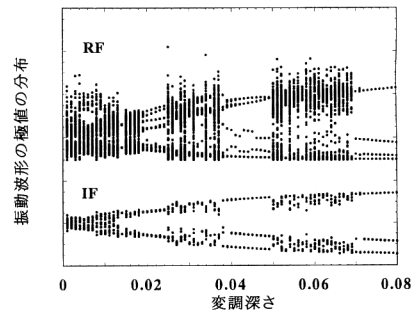


図1 複合共振器の出力光強度信号(RF)と中間周波数信号(IF)の分岐ダイアグラムの比較。外部共振器600mm, 反射率0.112%, 動作電流 $1.1J_{th}^*(1 + m \sin(2\pi f_m t))$, $f = 1.182$ GHz, ヘテロダイン検波 $f_{l_0} = 2.9$ GHz, $f_c = 0.1$ GHz, $f_d = 0.05$ GHz。

オリンパス光学工業(株)技術開発本部 (〒192 八王子市久保山町 2-3)
E-mail: no_watanabe@ot.olympus.co.jp

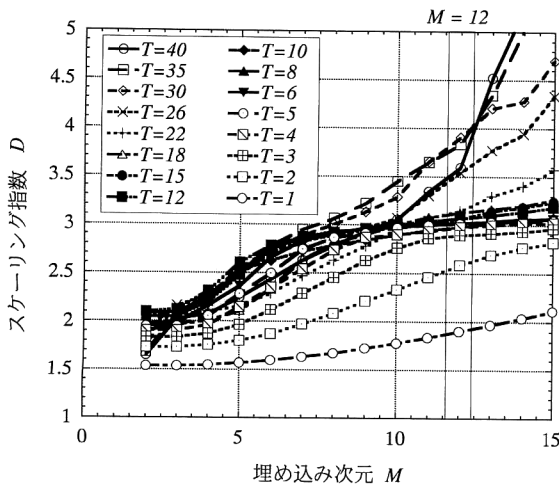


図2 IF信号のスケール指数解析。多様体への埋め込みの遅延時間 T を変化させたときの埋め込み次元 M とスケール指数 D の関係。

ている。したがって、ダウンコンバージョンによって得られるIF信号は、RF信号のカオスの分岐構造を知る目安にはなる。

ところで、多くの測定実験ではA/D変換による離散化した時系列を扱うことになる。そこで、離散化したIF信号のスケール指数について検討してみよう。離散的時系列をTakensの方法で M 次元の多様体に埋め込み、相関次元 $C(r)$ を計算しその M 次元距離 r に対するスケール指数 D を

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i \neq j}^N \Theta(r - |X_i - X_j|) \quad (5)$$

$$D = \frac{d \log C(r)}{d \log r} \quad (6)$$

と定義する。離散的時系列 s_1, s_2, \dots, s_N に対してベクトル $X_i = (s_i, s_{i+T}, s_{i+2T}, \dots, s_{i+(M-1)T})$ をとり離散時間 T をかえてアトラクタのスケール指数を調べると、ある離散時間 T の領域では T の変化に対して、埋め込み次元 M とスケール指数 D の関係を示す曲線が大きく変化しない(図2)。そこで、これらの曲線群で各々の曲線が M の増加に対してスケール指数 D が飽和した値 ($M=12$ における D の値) の平均値をスケール指数としてこの値がバンドパスフィルターの幅によってどのように変化するかを調べてみた(図3)。高周波の光カオス(RF信号)の時系列のスケール指数を

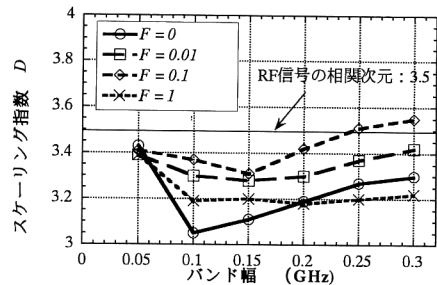


図3 バンド幅、雑音指数とIF信号のスケール指数との関係、RF信号の相関次元：3.5。

同じ方法で計算すると約3.5であった。この値に対して、 $M=12$ としたときのIF信号のスケール指数の平均は、調べたバンド幅の値では近い値を示し、それがランジュバン雑音の強さ F によって大きく変化していないことがわかる。実際の系でランジュバン雑音のみを変化させることは困難であるが、結果として高周波の光カオスの時系列のスケール指数をIF信号から推測することができた。

本稿では半導体レーザーの光カオスを例にとり、ヘテロダイン検波の利用について考察した。中間周波数信号の分岐構造と埋め込みによる多様体のスケール指数は高周波の光カオス信号の性質を知る上での目安になることを示した。他の種類の高速な光カオスの現象についても、帯域が足りないために波形をダイレクトに測定できないからといって諦めず、ぜひ一度ヘテロダイン検波も検討に加えていただきたい。

文 献

- 1) 大坪順次：“戻り光半導体レーザーにおける光カオスとその制御”，光学，26 (1997) 581-586.
- 2) J. Mørk, B. Tromborg and J. Mark: “Chaos in semiconductor lasers with optical feedback: Theory and experiment,” IEEE Quantum Electron., 28 (1992) 93-108.
- 3) N. Watanabe and K. Karaki: “Correlation dimension analysis of heterodyne detection of high frequency chaotic oscillations from a laser diode with optical feedback,” Nonlinear Dynamics in Optical Systems (NDOS) '95 (University of Rochester, 1995) TE35.
- 4) N. Watanabe and K. Karaki: “Inducing periodic oscillations from chaotic oscillation of compound-cavity laser diode with sinusoidally modulated drive,” Opt. Lett., 20 (1995) 1032-1034.

(1997年6月20日受理)