超低位相雑音マイクロ波発生と、光サンプリング法による高感度位相雑音測定法

Ultra-low phase noise microwave generation and high-sensitivity phase noise characterization by femtosecond optical sampling

°(P)Mamoru Endo[1], Tyko D. Shoji[1], and Thomas R. Schibli[1,2]
1. Dept. of Phys., Univ. of Colorado, 2. NIST, JILA and Univ. of Colorado
E-mail: mamoru.endo@colorado.edu

超低雑音マイクロ波は、次世代航空管制用レーダーをはじめ、光時計、超長基線電波干渉計、X 線自由電子レーザー、超高速アナログ・デジタル変換といった分野の局部発振器として大きな需要がある[1,2]。位相雑音の目標値としては 10 GHz のキャリア周波数において-170 dBc/Hz（10 kHz オフセット）という値であり、電気的な信号発生器から得られるマイクロ波に比べて 40 dB 以上低い雑音が求められる。こうした超低雑音マイクロ波の発生は、現時点では光周波数コムのパルス列を高速・高パワーのフォトディテクタで受光することによって得ることができ、この手法は Optical Frequency Division (OFD)と呼ばれる。近年では、精密に制御された光周波数コムを modified uni-traveling carrier photodiode (MUTC [3])によって受光することで 12 GHz のキャリア周波数において-174 dBc/Hz（10 kHz オフセット）という結果も得られている[2]。しかし、現状の課題として、非常に複雑な実験系が必要であるというだけでなく、位相雑音の測定自体も困難を極め、一回の測定に 10 時間以上の測定時間が必要となることがある。主な原因として、位相検出に使用するマイクロ波ミキサーの位相感度が 0.4 V/rad と低く、またマイクロ波の振幅雑音が位相雑音測定に影響を与えてしまうことが挙げられる。そこで私たちは、マイクロ波をフェムト秒レーザーによって光サンプリングすることで、位相雑音を高感度に測定する手法を考案した（Fig. 1 および[4]）。通信用のデュアルアウトプット・マッハツェンダ変調器 (DO-MZM) を用いたこの手法は、位相感度が 30 V/rad と高いだけでなく、振幅雑音に対する影響も抑制されるという特徴を持つ。この結果、位相雑音測定のダイナミックレンジとして 186 dB という値を記録し、これは最先端のマイクロ波の評価に十分使用できる値である。

この手法を用いて、OFD によって生成された 1 GHz のマイクロ波の雑音を測定したところ、光周波数コム自体の雑音、MUTC のフリッカー雑音、およびマイクロ波の熱雑音によって予想される値を、1 時間程度の測定時間で得ることができた。本手法の他の応用例としては、MUTC の特性（特にフリッカー雑音）を調べることがある。OFD において MUTC は重要な役割を果たし、フリッカー雑音は達成可能な位相雑音の決定する大きな要因である。しかし、その諸特性を評価することは、その雑音レベルが低いこともあり困難であった。そこで、私達の手法を応用することで、本実験で使用した MUTC のフリッカー雑音を-130 dBc/Hz（1 Hz オフセット）と評価することに成功した。

本講演では、私達の考案した位相雑音測定手法のみならず、OFD の概要・応用例をまとめ、MUTC の特性評価についても簡単に触れる。

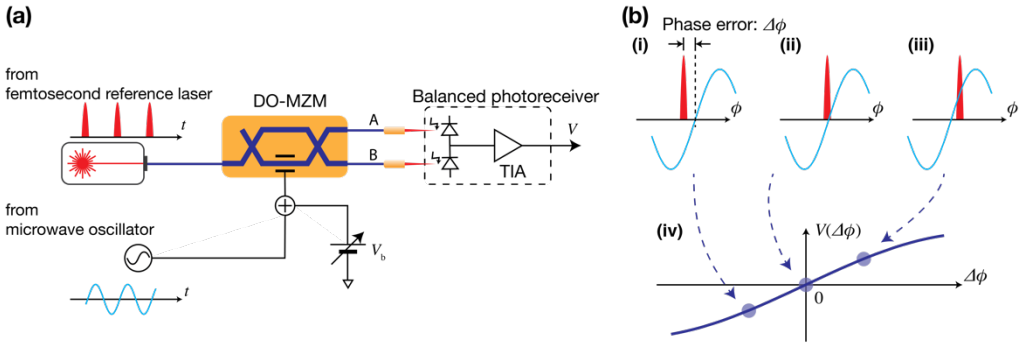

Figure 1. (a) Concept apparatus of a DO-MZM phase detector. (b) Phase error and discrimination signal. (i), (ii) and (iii) illustrate phase errors of < 0, = 0 and > 0, respectively. (iv) shows the discrimination signal. Each blue circle corresponds to (i) to (iii). After employing a low-bandwidth phase lock, the residual voltage noise corresponds to the phase noise.

References

[1] T. M. Fortier *et al*, “Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division,” Nat. Photon. **5**(425) (2011).
[2] X. Xie *et al*, "Photonic microwave signals with zeptosecond-level absolute timing noise," Nat. Photon. **11**(1) (2017).
[3] A. Beling *et al*, “High-power, high-linearity photodiodes,” Optica **3**(3) (2016).
[4] M. Endo *et al*, “High-sensitivity optical to microwave comparison with dual- output Mach-Zehnder modulators,” Sci. Rep. **8** (2018).