

デジタルコヒーレントライダー

土田 英実

産業技術総合研究所（〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1）

Digital Coherent LiDAR

Hidemi TSUCHIDA

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

A new concept of “digital coherent LiDAR” is proposed, which employs digital signal processing of received signals to compensate for various impairments such as nonlinear frequency chirp and FM noise of light sources. A proof-of-principle experiment is reported on FMCW distance measurement with a directly modulated laser diode. It is shown that the influence of nonlinear frequency chirp can be mitigated by the use of time domain regression analysis of beat signals.

Key Words: LiDAR, FMCW, digital signal processing, laser diode, direct frequency modulation, nonlinear chirp

1. はじめに

周波数変調とコヒーレント検波を利用する FMCW-LiDAR (Frequency-Modulated Continuous Wave Light Detection and Ranging) は、高分解能、高検出感度等の特徴を有し、車載ミリ波レーダーの代替、ロボット用センサ等への応用が期待されている。小型、低価格の半導体レーザは、光周波数を直接変調できることから、FMCW-LiDAR の有望な光源と考えられるが、直接変調に伴う非線形チャープや、光周波数雑音（コヒーレンス）の影響により、著しい精度劣化を引き起こすことが知られている。これらを補償するため、負帰還制御によるチャープとコヒーレンスの制御^{1,2)}、サンプリング制御によるチャープ線形化³⁾が報告されている。しかしながら、これらの方法は光周波数をモニタする光学系や制御回路を必要とするため、小型、低価格の特徴は失われる。

本発表では、このような付加的なハードウェアを用いることなく、デジタル信号処理により種々の劣化要因を克服するデジタルコヒーレントライダーを提案し、信号処理により非線形チャープの影響を格段に低減する実験を報告する。

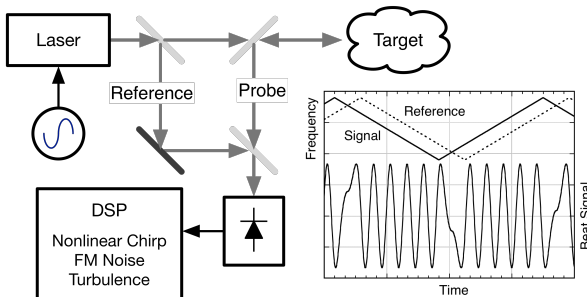


Fig.1 FMCW-LiDAR with digital signal processing.

2. 原理

2.1 デジタルコヒーレントライダー

デジタル信号処理を用いた FMCW-LiDAR の構成を Fig.1 に示す。直接変調半導体レーザを光源として使い、光検出器から出力されるビート信号に対して、デジタル信号処理を施し、非線形チャープ、光周波数雑音、大気擾乱等の補償を行う。

2.2 非線形チャープの測定

直接変調した半導体レーザの周波数変化を把握するため、ヘテロダイン干渉を利用した周波数変調波形測定技術⁴⁾を開発した。測定結果を Fig.2 に示す。変調周波数 5kHz、電流振幅 60mA に対して、周波数偏移 15GHz が得られた。(a)は理想的な三角波との比較、(b)は測定結果をフーリエ級数展開した波形である。直接変調は熱効果に起因し、周波数応答特性が平坦ではないため、変調波形は理想的な三角波にはならず、1.3GHz の誤差を生じる。このような非線形チャープ波形は、フーリエ級数展開により、4.8MHz の誤差で表現できることがわかる。

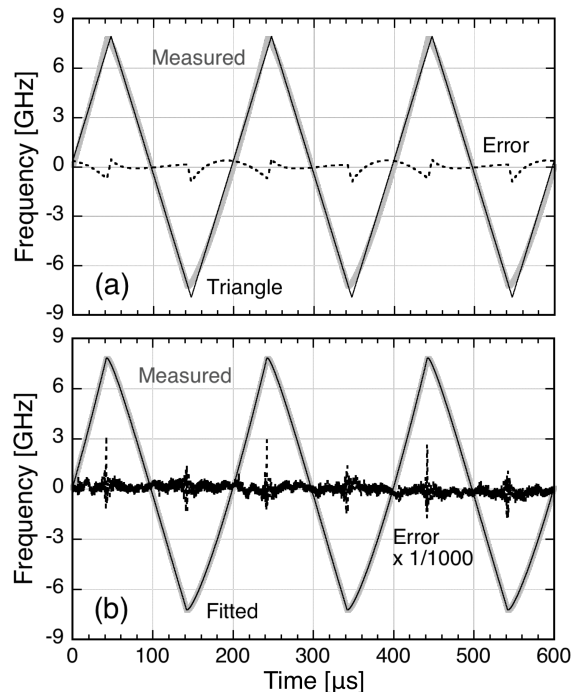


Fig.2 Frequency modulation waveforms.

2.3 回帰分析による距離算出

前節で述べたように、非線形チャープを有する周波数変調波形は、フーリエ級数展開により解析的に表現できる。周波数変調波形を $v(t)$ とし、測定対象物までの光の往復時間が τ_d のとき、検出さ

れるビート周波数は $\nu(t)-\nu(t-\tau_d)$ により表すことができる。したがって、測定したビート周波数に対して、既知の波形 $\nu(t)$ を基に回帰分析を行うことにより、光の往復時間 τ_d 、すなわち、対象物までの距離を求めることができる。

3. 実験

直接変調半導体レーザと光ファイバ干渉計を用いて、距離測定の実験を行った。光ファイバ端面のFresnel反射と参照光のビート信号を検出し、ベクトル信号解析を利用してビート周波数を求め、オフラインの回帰分析により距離を算出した。

ビート周波数波形を Fig.3 に示す。可変光遅延線により距離を 8mm 単位で変化させた場合の結果を Fig.3 (a), (b)に、パッチコードにより 1m 単位の変化を与えた場合の結果を Fig.3 (c)に示す。(b)の拡大波形より、わずかではあるが距離に応じてビート周波数に変化していることがわかる。

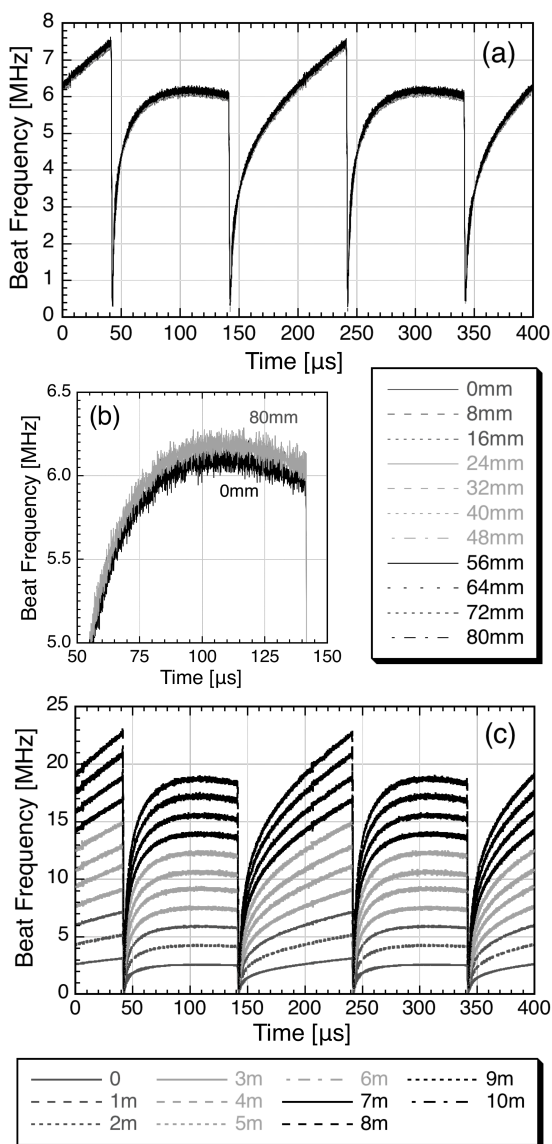


Fig.3 Beat frequency waveforms.

Fig.3 の波形から回帰分析により求めた相対距離を Fig.4 に示す。Fig.4(a)は 8mm 単位の距離変化、Fig.4(b)は 1m 単位のファイバ長変化に対する測定結果である。Fig.4(a)の誤差は ± 0.5 mm 以内で

あり、極めて高精度の測定が実現できている。

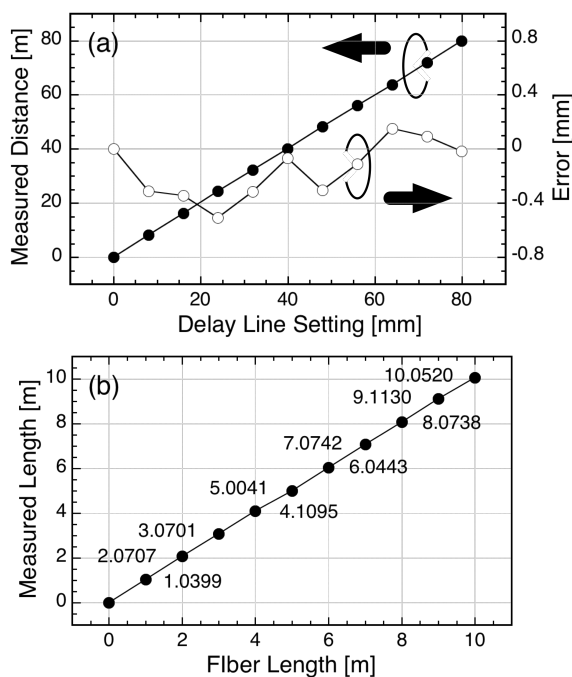


Fig.4 Distances obtained with regression analysis.

4. まとめ

デジタル信号処理を用いた FMCW-LiDAR を提案し、回帰分析を利用した距離測定の実験を報告した。周波数変調波形が既知であれば、非線形チャープを補償しなくても、極めて正確な測定が可能であることが示した。今後は、デジタル信号処理の FPGA への実装、より簡便な距離算出法、レーザ光周波数雑音の補償等の研究開発を進める予定である。

謝 辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。

参考文献

- 1) N. Satyan, A. Vasilyev, G. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv: "Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback," Opt. Express **17** (2009) 15991.
- 2) J. Qin, Q. Zhou, W. Xie, Y. Xu, S. Yu, Z. Liu, Y. T. Tong, Y. Dong, and W. Hu: "Coherence enhancement of a chirped DFB laser for frequency-modulated continuous-wave reflectometry using a composite feedback loop," Opt. Lett. **40** (2015) 4500.
- 3) P. D. L. Beasley: "Frequency modulated continuous wave radar having improved frequency linearity, US Patent 7592943 (2009).
- 4) H. Tsuchida, "Waveform measurement technique for phase/frequency-modulated lights based on self-heterodyne interferometry," Opt. Express **25** (2017) 4793.