

アンダーサンプリング方式を用いた高分解能パルスレーザー測距装置 High resolution rangefinder with pulsed laser by undersampling method

○大石 政裕、大友 文夫、矢部 雅明、鹿子木 満、齋藤 貴昭、鈴木 康顕

Masahiro Ohishi, Fumio Ohtomo, Masaaki Yabe, Mituru Kanokogi, Takaaki Saito, and Yasuaki Suzuki

株式会社 トプコン

TOPCON CORPORATION

Abstract—We have developed a high resolution rangefinder with pulsed laser by using the undersampling method. A reference frequency signal of temperature-compensated crystal oscillator (TCXO/15MHz) is undersampled by received repetition pulses (8.5KHz) which are emitted at slightly difference phase from TCXO and we reproduced the low frequency signal (85Hz). A distance is calculated from a phase of the low frequency signal. As a result, our pulsed laser rangefinder achieves $\pm 1\text{mm}$ accuracy.

1 はじめに

測量分野における光を用いた距離測定には CW 光の位相を計測する位相差方式と、パルス光の往復時間を計測するパルス方式がある。測距精度として 2~3mm が必要であることから、計測クロック以下の測定を行うための内挿技術がいずれの方式にも用いられている。

歴史的にはAGA社Geogimeter 6A(1967)⁽¹⁾に代表されるようにヘテロダインを内挿技術とした位相差方式が先行していた。その後パルス方式における内挿技術が開発され、高いピークパワーを活かした測定距離伸張が行われてきた。

パルス方式の代表的内挿技術にtime-to-amplitude converter⁽¹⁾がある。これは、計測クロック以下の時間計測をコンデンサにチャージされた電荷量から測定する技術であり、パルス光を用いた初期の代表的な測量用測距儀WILD社DISTOMAT DI3000(1985)⁽¹⁾に使用され、その後Time-to-Digital Converterの内挿ユニット⁽²⁾としても使用されている。

本報告では、パルス光を用いた mm オーダーの距離分解能を実現する内挿技術として、アンダーサンプリング方式提案し、これを実際に用いたパルスレーザー測距装置での測定結果について報告する。

2 アンダーサンプリングの原理

アンダーサンプリングは、エイリアシングを積極的に利用して、高周波信号をナイキスト周波数より低い周波数でサンプルし、低周波信号に変換する手法である。この

手法の一般的な応用例としては、デジタルレシーバーにおける中間周波数変換手段である Direct IF-to-Digital⁽³⁾が挙げられる。また、測距装置への応用としては、位相差方式のヘテロダイン周波数変換部に応用したものがS.Poujouly等⁽⁴⁾によって報告されているが、パルス方式での報告例は未だ無い。

Fig.1 にアンダーサンプリングの原理を周波数領域で説明した図を示す。(a)は、ベースバンド周波数をサンプリング周波数 f_s でサンプルする通常のサンプリングを示している。(b)は 6~7MHz の周波数帯にある帯域 1MHz の信号が、2MHz のアンダーサンプリングにより、DC~1MHz の周波数帯へ周波数変換される過程を示している。

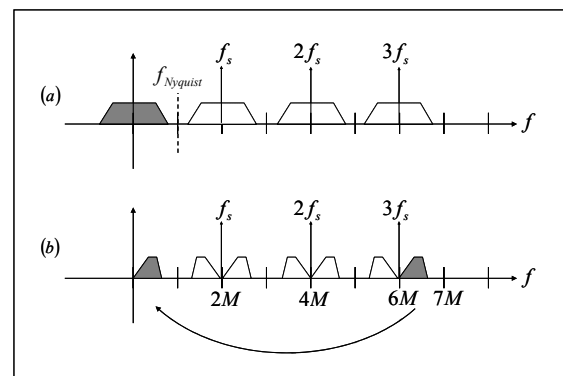


Fig.1 Frequency domain analysis of the undersampling method
(a)Conventional sampling
(b)Undersampling

アンダーサンプリングを利用したパルス光測距の原理は、繰り返し発光周期が基準発振器信号周期に対して僅かにずれたパルス光を発光し、その受信タイミングで

基準発振器信号をアンダーサンプリングすることにより、基準信号を低周波信号に変換し、その位相から距離を測定するというものである。

3 パルスレーザー測距システム

3-1 システムの構成

パルスレーザー測距システムの構成図を Fig.2 に示す。基準発振器として 15MHz の水晶発振器を使用している。シンセサイザーにより基準発振器周波数の 100/99 倍の周波数を生成し、その出力を分周器により分周し、Pulse Laser Diode (PLD) を発光させる。発光周波数は、 $15 \times 10^6 \times \frac{100}{99} \times \frac{1}{23 \times 77} \cong 8.5 \times 10^3 [Hz]$ である。

PLD は、パルス幅 8nsec、20A の電流で駆動され、ピーク出力 40W の光パルスを発生する。但し実際のシステム外部への出力は光学系のロスにより 3.5W である。プリズムで反射された光パルスは、APD で光電変換されアンプ、コンパレータにより受信タイミング信号が生成され、A/D 変換器のサンプリングクロックとなる。

一方、基準発振器出力はバンドパスフィルター (BPF) により正弦波信号に変換され、A/D 変換器に入力される。A/D 変換器は BPF 出力を変換クロックで A/D 変換し、その結果は CPU に送られ、メモリに記憶される。

本システムは内部に基準光路を持ち、光パルスはチョッパーにより、外部光路と内部基準光路に交互に切り替えられる。プリズムまでの距離は、内部基準光路で得られた距離を外部光路で得られた距離から減ずることで求められる。

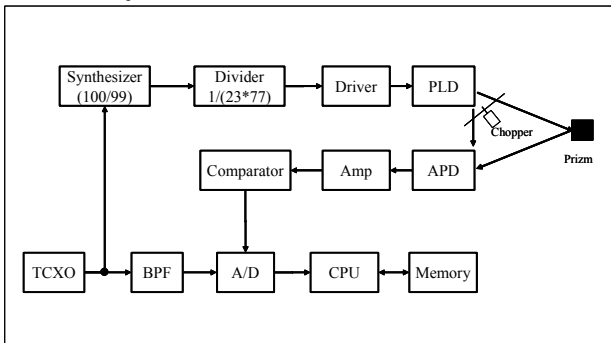


Fig.2 Block diagram of the system

3-2 サンプリング過程の詳細

次に、システムのアンダーサンプリングによる周波数変換の過程を Fig.3 で説明する。右側が周波数領域における表現、左側が時間領域における表現である。

(a)は、BPF を通過した正弦波の基準信号を表している。(b)は、シンセサイザーで生成された基準信号の 100/99 倍の信号を表している。基準信号との周波数差は $15 \times 10^6 \times \frac{1}{99} \cong 15.1515 \times 10^3 [Hz]$ であり、1 周期毎に基準発振器周波数に対して 1/100 ずつ位相がずれる関係にある。

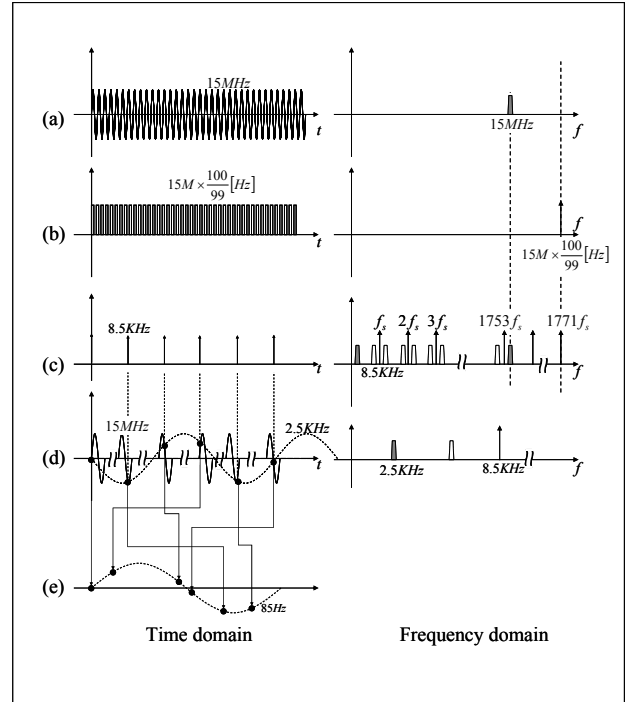


Fig.3 Process of undersampling in time and frequency domain

- (a)Signal of band-pass-filtered TCXO
- (b)Output signal of synthesizer
- (c)Sampling clock
- (d)Detail view of sampling
- (e)Arranging the phase shift order

(c)は、受信タイミング信号を表している。これは、シンセサイザー出力を $1/(23 \times 77)$ に分周した PLD 発光タイミングにより発光したパルス光が内部基準光路もしくは、外部光路を経由して受信、生成されたものであり、これが A/D 変換器のサンプリングクロックになる。サンプリング周波数は、PLD の発光周波数と等しい 8.5KHz であるので、15MHz を 8.5KHz でサンプリングするアンダーサンプリングの関係となっている。基準信号のスペクトル 15MHz は、サンプリングクロックの 1753 次と 1754 次のスペクトルの間に存在し、1753 次スペクトルに対し約 +2.5KHz となっている。

基準信号とサンプリングクロックとの関係を詳細に表したものが (d) である。最も低い周波数領域に現れるスペクトルも高次スペクトルと同様の周波数関係になっており、

サンプル後の波形は約 2.5KHz の波形が生成される。

本システムでは、更に低い周波数変換を行い、基準信号を低周波に変換している。この様子を(e)に示す。基準周波数とシンセサイザ出力の周波数関係は、1:(100/99)となっており、シンセサイザから生成されたサンプリング信号は基準信号を 100 等分した位相関係でサンプルするタイミング情報を持っている。

この全ての位相関係のタイミングで基準信号をサンプルする事で、基準信号を低周波信号に変換することが出来る。100 ポイント全てをサンプルする順序は、分周器の分周比 $1/(23 \times 77)$ で一定の関係になっている ($2\pi \times 71/100$ ずつずれた位相関係となっている)。このため、サンプルされたデータを位相関係順に並べなおすことで、100ポイント全てを用いた、元の基準波形が再生される。このときの周波数は、

$$15 \times 10^6 \times \frac{100}{99} \times \frac{1}{23 \times 77} \times \frac{1}{100} \cong 85[\text{Hz}] \text{ となる。}$$

再生された 85Hz の低周波波形は、内部基準光路、外部光路それぞれの測定でメモリ上に記憶される。

3-2 距離算出過程

次に、距離算出過程について説明する。距離計算は、メモリ上に記憶された内部基準光路、外部光路それぞれの低周波波形の基本波成分の位相を計算する事で求められる。低周波波形 1 周期は、

$$L = \frac{1}{2} C \frac{1}{f_{TCXO}} = 10[m]$$

C : 光速 $C(3 \times 10^8 [m/s])$
 f_{TCXO} : 基準周波数 (15MHz)

より、10m に相当する。

位相は、sin、cos 波形データとの積和を行い、その比の \tan^{-1} を計算する事で求められる。計算式を下式に示す。

$$\theta_{ext} = \tan^{-1} \frac{\sum_{k=1}^{100} f_{ext}(k) \cos\left(\frac{2\pi}{100} \times k\right)}{\sum_{k=1}^{100} f_{ext}(k) \sin\left(\frac{2\pi}{100} \times k\right)}$$

$$L = \frac{\theta_{ext} - \theta_{ref}}{2\pi} \times 10[m]$$

なお、10m 以上の長い距離については、発光から受光までの時間差を内部のクロックで計測し、上記の L と組み合わせられて計算される。

4 測定結果と精度評価

本システムで得られた A/D 変換データを Fig.4 に示す。(a)は、サンプルされたデータを時系列順に 100 ポイント並べた図で、(b)は、初めの 10 データを拡大したもので、破線はアンダーサンプリングによって、ベースバンドとして再生された約 2.5KHz の波形を示している。

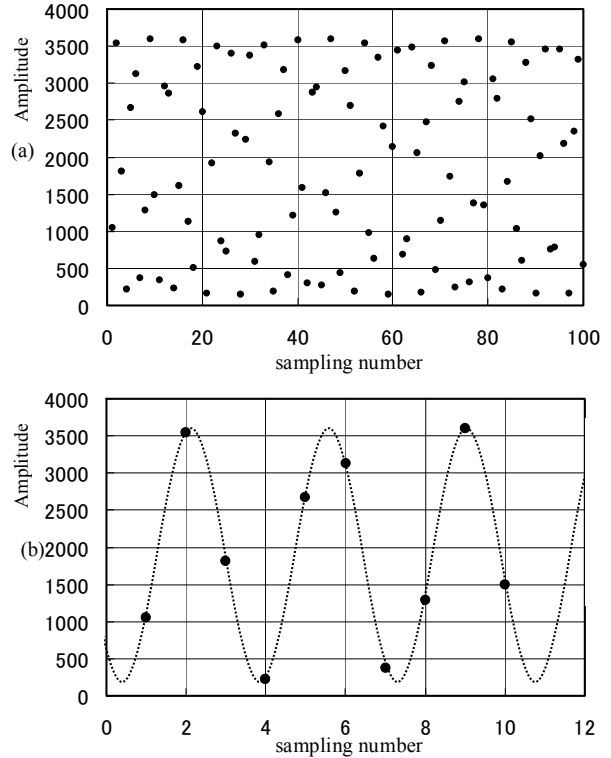


Fig.4 Results of undersampling
(a) Time-series data of 100 samples
(b) Result of undersampling in first 10 data.

Fig.5 は、基準信号波形をサンプルされた位相順にしたがって、元の基準信号波形を再生するように並べなおした波形であり、100 ポイントで基準波形が再生されている様子が示されている。

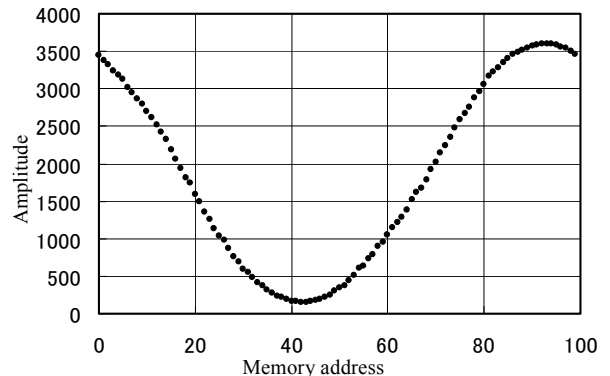


Fig.5 Reproduction result of band-pass-filtered TCXO signal by arranging the phase shift order

次に、信号処理系の安定性を測定した。測距システムとしては、信号処理系以外に PLD の発光タイミングの不安定性、APD のショットノイズ、アンプ系の熱雑音、コンパレーターのジッターが含まれることになる。そこで、信号処理系自身の安定性を確認するために、PLD と APD、アンプ、コンパレーターを含まず、分周器出力を直接 A/D 変換器のサンプリングクロックとして用い、擬似的な測距動作を行なった。

測定結果を Fig.5 に示す。各測定データは内部基準光路相当でのデータおよび、外部光路相当でのデータそれぞれ 4000 回の A/D 変換データから計算されたものである。

バラツキは、 $\sigma=0.3\text{mm}$ (2psec) が得られた。これから、低周波波形 1 波形を再生する 100 回の A/D 変換でのバラツキ量は、 $\sigma=1.3\text{mm}$ (9psec) と計算される。A/D 変換器のアパーチャジッター (aperture jitter) は 0.8psec (typical) であるので、上記のバラツキはシンセサイザーの安定度が支配的であると考えられる。

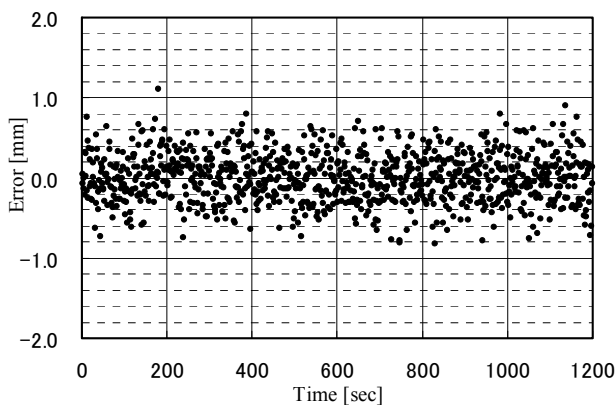


Fig.5 Stability of the circuit

次に、PLD、APD、アンプ、コンパレーターを実装し、測距装置としての距離分解能と真値からの誤差量 (linearity) を測定した。評価はレーザー干渉計基線にて行った。測定の結果を Fig.6 に示す。測定距離範囲は 45m。レーザー干渉計との誤差は、幅約 2mm であった。この結果から、距離分解能 1mm 以下、距離測定精度 $\pm 1\text{mm}$ が得られているといえる。

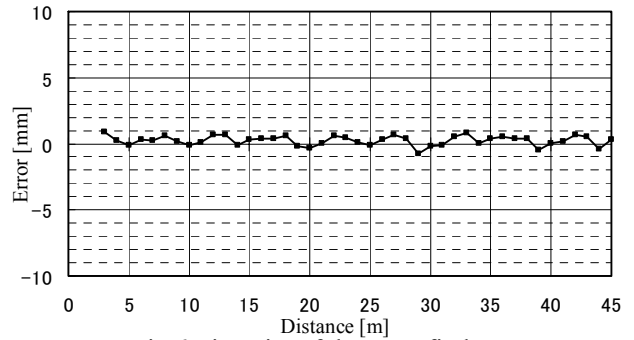


Fig.6 Linearity of the rangefinder

5 まとめ

パルス光を用いた測距装置として、アンダーサンプリング方式による高い距離分解能を持つ装置を開発した。本方式は、受信パルス信号で基準発振器信号をアンダーサンプリングする事で低周波に変換し、その低周波信号の位相を測定することで、高い内挿効果を得るものである。

内挿技術としては、15MHz の基準信号に対し標準偏差 0.3mm の安定性を確認し、パルス半導体レーザーを搭載した測距装置としては、距離分解能 1mm 以下、距離測定精度 $\pm 1\text{mm}$ を得る事ができた。また、本システムは、パルス半導体レーザーの高い発光パワーを活かして、到達距離 7000m (1 プリズム/視程 20Km) の能力を持っている。本測距方式は、弊社 GPT シリーズに既に適応されているが、今後更なる高精度化を進めてゆきたい。

参考文献

- (1) J.M.Rueger, "Electronic Distance Measurement: An Introduction, third Edition", Springer-Verlag, New York, 1990.
- (2) Kari Määttä and Juha Kostamovaara, "A High-Precision Time-to-Digital Converter for Pulsed Time-of-Flight Laser Radar Applications", IEEE Trans. on Inst. and Meas, VOL. 47, NO. 2, 521-536, 1998
- (3) Walt Kester "Undersampling applications", Practical Analog Design Techniques, ANALOG DEVICES 1995
- (4) Stephane Poujouly, Bernard Journet, Dominique Placko, "Digital Laser Range Finder: Phase-Shift Estimation by Undersampling Technique", Industrial Electronics Society, 1999, Volume3, 1312-1317