

## I-Q デモジュレータとマイコンを用いた積雪深計の検討

田邊 崇\* 佐藤栄一\*\* 中島繁雄\*\*\*

(平成 15 年 10 月 31 日受理)

A Study on snowfall depth measuring equipment using an I-Q demodulator and a one-chip microcomputer

Takashi TANABE\* Eiichi SATO\*\* Shigeo NAKAJIMA\*\*\*

The purpose of this paper is to develop equipment for measuring snowfall depth. This equipment consists of an optical transmitting and receiving unit and a base-band processing unit. We have studied the base-band unit using an I-Q demodulator and a one-chip microcomputer, which is suitable for realizing smaller size and more flexible operation than a conventional unit. A table look-up method with an I-Q selected-phase-area unequal-interval sampling technique is proposed to detect phase information, which corresponds to snowfall depth. Through analysis using a computer simulation, we show that the proposed method can give the maximum phase-error below 0.5 degrees on a 12-bit A/D converter, even if a receiving signal level has fluctuation of 15 dB. Moreover, we experimentally estimate the phase-error performance by testing the implemented base-band unit.

Key words: snowfall depth, I-Q demodulator, phase detection, digital signal processing

### 1. はじめに

雪害の克服(克雪), 雪を利用した水資源の確保のような利雪, また, 雪氷寒冷との共存・調和を図ろうとする親雪等, 雪を積極的に活用して我々の生活に役立てる試みが近年活発に行なわれている。これに伴って, 各種の雪計測器の小型・高機能化・低価格化が必要とされている。これらの雪計測器の中で積雪深自動計測器に着目すると, 既に種々の計測器が開発され実用化されている。例えば, 超音波を利用した測器<sup>[1]</sup>, グラスファイバーを利用した測器<sup>[2]</sup>, 光検出方式を用いた測器<sup>[3]</sup>等である。しかし, これらの計器は建造物的に巨大, 法的な規制が厳しい, 夜間の計測ができない等の問題点を有している。

このような背景のもとで, 本稿では光学式距離測定システム<sup>[4]</sup>を対象に, 近年進歩の著しいマイコン, デジタル信号処理を積極的に制御に用いた, 積雪深自動計測器の開発を目標

---

\* 新潟富士ゼロックス製造(株) (平成 14 年大学院工学研究科博士前期課程修了)

\*\* 情報電子工学科 助教授

\*\*\* 情報電子工学科 教授

としている。今回、そのベースバンド処理部の検討を行い、I-Q 部分選択サンプリング方式と仮称したアルゴリズムで積雪深をより高精度に評価できることを明らかにした結果を述べる。

## 2. I-Q デモジュレータとマイコンを用いて構成した積雪深計の動作原理

本稿で対象とした積雪深計のブロック図を Fig. 1 に示す。本ブロック図の特徴は、光変調信号を I-Q デモジュレータで直接検波して、積雪深に比例して変化する位相情報を抽出し、この位相情報を後述する提案アルゴリズムを用いて精度高く推定している点にある。以下、Fig. 1 の動作について説明する。Fig. 1 の信号発振器から発せられる  $f$ [MHz] の信号を分配器によって分配する。このとき一方を基準信号とし、他方を積雪表面に照射し、反射して返ってきたものを受信信号とする。従って、受信信号は積雪の深さによってその値が変化することになる。この基準信号と受信信号を I-Q デモジュレータに入力する。これを受けて I-Q デモジュレータは直流の I 信号と Q 信号を出力する。この I 信号と Q 信号からマイコンによって現在の積雪深に対する位相の推定を行う。これに対して無積雪時の位相を基準位相とし、基準位相とマイコンで推定された位相との差から積雪深を求める。

従来の光学式距離測定システムでは分周回路、ミキシング回路を用い、低い周波数信号の位相情報を PLL (Phase Locked Loop) 回路で検出している。これに対し、本研究の構成ではこれらの回路を使用せず、上記で説明したように、I-Q デモジュレータとマイコンで位相情報を推定する方式を用いる。このため、従来の構成より簡易化・高機能化をはかることが可能である。

また、I-Q デモジュレータの構成は Fig. 2 のようになり、I-Q デモジュレータから得られる I, Q 信号の特性は Fig. 3 のようになる。Fig. 3 より、位相  $360^\circ$  の変化に対して I, Q 信号値が正円の軌道を描くことがわかる。

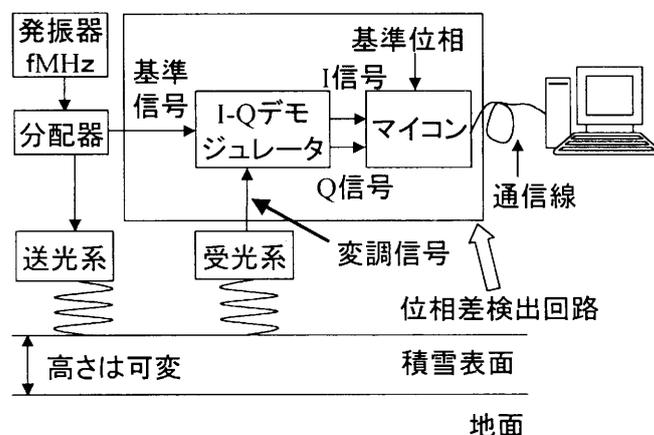


Fig.1 Block diagram of snowfall depth measuring equipment.

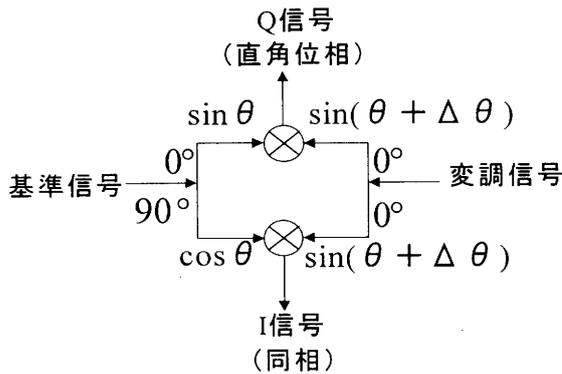


Fig.2 I-Q demodulator.

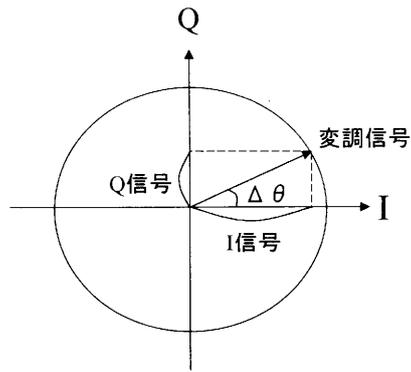


Fig.3 Signal space diagram of I-axis and Q-axis signals.

### 3. マイコンを利用した位相推定方式の比較・評価

Fig.1 で示した I 信号値, Q 信号値の各値を利用してマイコンによって位相の推定を行う. その方法としてテーブルを利用した方式と計算を利用した方式を提案する. 両方式について, シミュレーションにより比較・評価した結果を以下に示す. また, 受信レベルの変動が発生した場合の評価を示す.

#### 3-1. I 信号均一サンプリングによるテーブルを利用した位相推定方式

Fig.1 の I 信号値を利用して位相の推定を行う. I 信号値に対してサンプリングを行い, これに対応した位相テーブルを用意する. 位相  $360^\circ$  の変化は I, Q 信号値の変化を絶対値化すると  $0^\circ \sim 90^\circ$  の変化の繰り返しである. 従って, 評価は第一象限のみに限定して行う. 第一象限の  $0^\circ \sim 90^\circ$  において I 信号値を等間隔に 100 点サンプリングすることで位相テーブルを作成する.

また, 位相誤差がどのようにして発生するかを Fig.4 に示す. 得られた実測値が, あるサンプリング点 N 番目と N+1 番目の 2 等分点にあった場合, 推定される位相誤差が最も大きくなる. この値を最大位相誤差とする. この最大位相誤差は全てのサンプリングした各点間において発生する.

この最大位相誤差が, I 信号値 0~1 の範囲で均一に 100 点でサンプリングされたときにどのように発生するかをシミュレーションによって求めた. これを Fig.5 に示す.

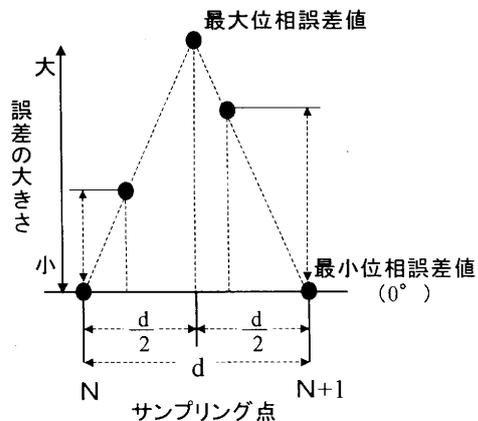


Fig.4 Phase error depending on sampling position.

この結果から I 信号値が 1 に近づく程最大位相誤差が大きくなることがわかる。

### 3-2. I-Q 部分選択サンプリングによるテーブルを利用した位相推定方式

Fig. 1 の I, Q 信号値それぞれに対してテーブルを用意する。Fig. 5 の結果から I, Q 信号のサンプリング間隔は値が大きくなるにつれてサンプリング間隔を狭めることとした。実際の流れとしては、入力されてきた I, Q 信号値の大小関係を比較し、小さい方の信号値を利用して位相の推定を行う。Q 信号値の方が小さい場合には Q 信号値側のテーブルを利用して  $0^\circ \sim 45^\circ$  範囲の位相を推定し、I 信号値の方が小さい場合には I 信号値側のテーブルを利用して  $45^\circ \sim 90^\circ$  の範囲の位相を推定する。この方法を I-Q 部分選択サンプリング方式と仮称し、シミュレーションにより評価した結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の結果から、Fig. 5 の I 信号のみを用いたときの最大位相誤差曲線における最悪値の約  $2.4^\circ$  に比べて、同値が約  $0.5^\circ$  まで低減できていることがわかる。

### 3-3. 計算を利用した位相推定方式

Fig. 3 より I, Q 信号の軌道を利用して、位相  $\theta = \tan^{-1}(I/Q)$  によって推定が行えるということがわかる。しかし、マイコンでは  $\tan^{-1}$  の計算を行うことはできない。このため、マクローリン展開を行うことでこの代用とする。しかし、マクローリン展開の項数を無限に用意することはできないため、どの程度の項数でどの程度の精度が得られるかを評価した。その結果が Fig. 7 になる。この結果から許容する誤差を  $0^\circ$  とした場合には無限に項数を要しても収束することはできない。また、許容する誤差を  $1^\circ$  まで落とせばマクローリン展開後の項数を 15 項用意することによって収束させることができる。

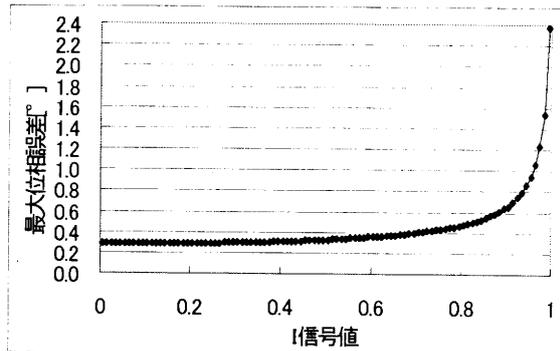


Fig.5 Maximum phase-error performance with equal-interval sampling.

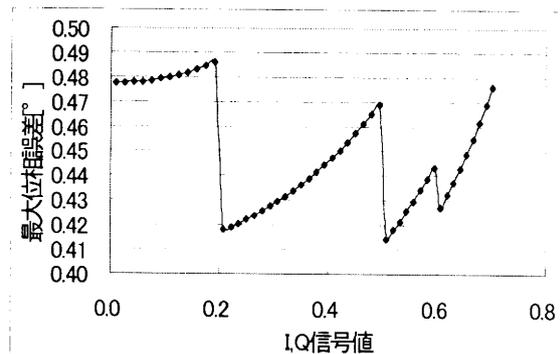


Fig.6 Maximum phase-error performance with unequal-interval sampling.

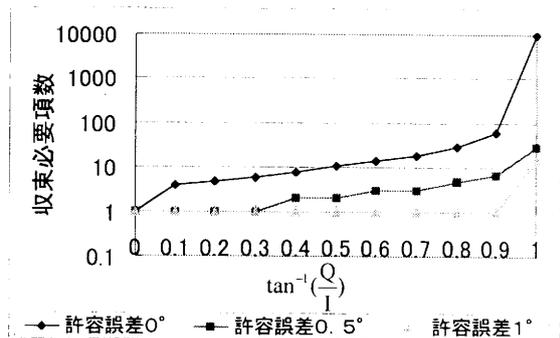


Fig.7 Required terms of maclaurin's expansion in calculation of  $\tan^{-1}(Q/I)$ .

### 3-4. テーブルと計算による位相推定方式の比較

テーブルを利用した方式では、提案した I-Q 部分選択サンプリング方式を用いることで、発生する最大位相誤差が約  $0.5^\circ$  になる。これと同様の精度をテーブルを用いた場合にも要求すると Fig.7 より、マクローリン展開後の項数として 29 項必要になる。マクローリン展開時の 29 項目では  $(Q/I)$  の 57 乗の計算が必要になる。この計算量、ステップ数、出力に要する時間等を考慮するとテーブルの方が有効な位相推定方式であると考えられる。

### 3-5. 受信レベルに変化が起きた場合の位相推定方式

これまで述べてきたものは受信レベルが一定である場合について位相を推定する方法であった。しかし、実際に積雪深計として使用する場合には外気の状態として霧の有無等、そして積雪表面の状態が凹凸である場合や鏡面状である場合によって受信レベルに変動が生じる。これらは AGC (Auto Gain Control) 回路を用いることによってハードウェア的に受信レベル変動をある程度無くすることができるが、完全に無くすることはできない。これまで述べてきたものの中で最も有効に位相を推定できるものが I-Q 部分選択サンプリング方式であった。この概念図を Fig.8 に示す。Fig.8 に示すように I-Q 部分選択サンプリング方式では受信レベルに変動が生じた場合に推定する位相に矢印の分だけ誤差が生じる。このため、Fig.9 に受信レベル変動を考慮した位相推定方式を提案する。これまでは I 信号値と Q 信号値の大小関係から小さい方の信号を利用して位相の推定を行っていたが、新たに提案する方式では I 信号と Q 信号の比を利用して位相の推定を行う。これにより受信レベルに変動が起こった場合にも正しく位相が推定できる。

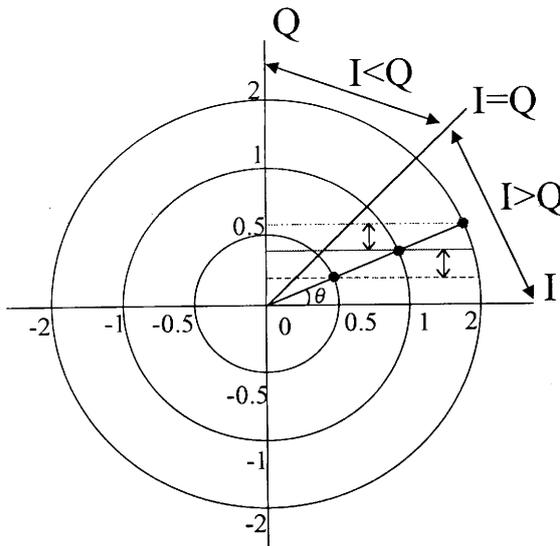


Fig.8 Signal space diagram for an I-Q level comparing method.

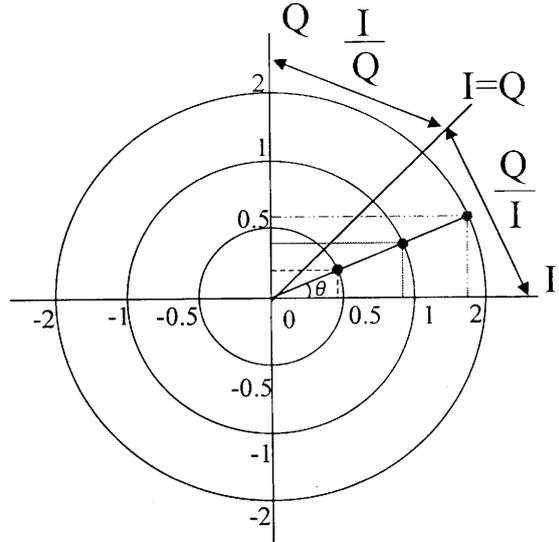


Fig.9 Signal space diagram for an I-Q level-ratio comparing method.

この受信レベル変動を考慮した場合について受信レベルが標準で 0dB (Fig. 3 の半径が 1) として, 最小で -20dB (同じく半径が 0.1), 最大で 6dB (同じく半径が 2) の範囲で変動するとする. また, マイコンに搭載されている A/D コンバータが 8~16bit であったとして, 固定小数点演算による桁落ち誤差を考慮した場合についてシミュレーションにより評価を行った. その結果を Fig. 10 に示す. Fig. 10 より受信レベル変動及びマイコンによって生じる桁落ち誤差を考慮した場合, 必要とされる A/D コンバータの分解能として 12bit あれば位相誤差  $0.5^\circ$  以内で位相の推定が行えることがわかる.

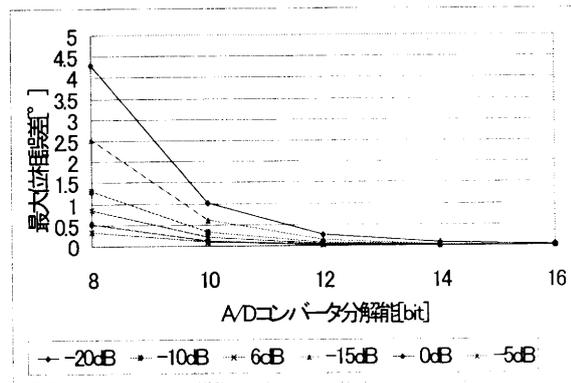


Fig.10 Maximum phase-error performance depending on the bit numbers of A/D

#### 4. 試作器による位相誤差評価

Fig. 13 に試作した 100 [MHz] 帯 I-Q デモジュレータ型位相推定回路を示す. Fig. 13 の左端の I-Q デモジュレータに基準信号と変調信号が入力される. すると, それに応じて I, Q 信号値が出力される. この I, Q 信号値が非常に微弱であるため, 同図中央の演算増幅器によってマイコンで処理できる 0~5 [V] の範囲まで信号の増幅を行う. 増幅された I, Q 信号値は同図右端のマイコンによって位相の推定を行う.

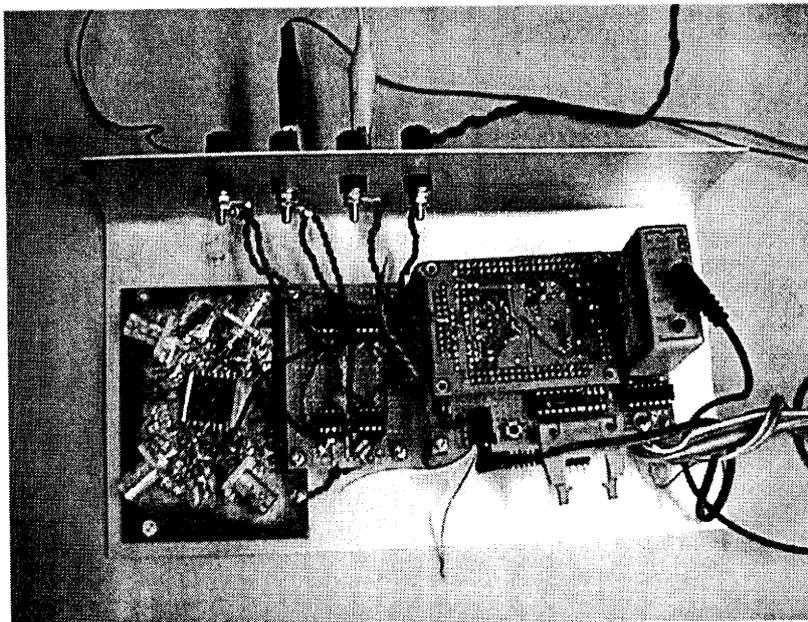


Fig.13 Implemented base-band unit.

Fig. 13 を利用して、マイコンに受信レベル変動を考慮した位相推定方式のアルゴリズムを実装し、シミュレーション値との比較を行った。この結果を Fig. 14 に示す。Fig. 14 においてシミュレーション値は実質テーブル無限大の状態で行っている。このため、最大位相誤差が小数点以下も詳細に表示されている。実測値ではテーブルを  $1^\circ$  刻みで用意している。このため、最大位相誤差が閾値  $0.5^\circ$  で小数点以下繰り上げまたは繰り下げされて表示されている。

この結果から、A/Dコンバータの分解能として12bitあれば、受信レベル-15dB以上の範囲で最大位相誤差  $0.5^\circ$  以下の測定が実測で行えるということがわかる。ただし、実際に屋外で測定を行う場合はさらに誤差要因が増えることが考えられる。また、AGC回路を用いた場合には受信レベルの範囲としては-20dB~6dBの内に十分に収まると考えられる。

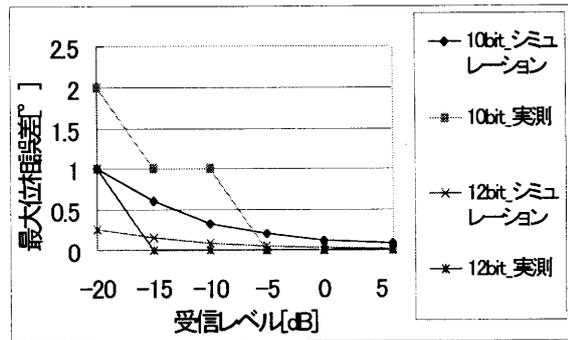


Fig.13 Phase-error performances obtain by measured and by simulation data.

## 5. まとめ

本稿では、受光した光変調信号を直接 I-Q デモジュレータで復調する積雪深計のシステムを対象に、I-Q 信号値から位相を推定するアルゴリズムについて提案し、I, Q 信号値の変化による位相誤差評価を行った。その結果、15dB の受信レベル変動を考慮した場合でも、A/Dコンバータの分解能として12bitあれば、最大位相誤差が  $0.5^\circ$  以内で推定が行えるということを示した。今後の課題は送光系・受光系の光学系ユニットの検討である。

## 参考文献

- [1] 日本雪氷学会北海道支部【編】，雪氷調査法，pp. 3-4(1991)。
- [2] 油川英明，グラスファイバー式積雪深計，雪氷 39 巻 4 号(1997)
- [3] 田中耕平，八巻正利，増田茂，光検出積雪深計の考案とその実験報告，雪氷 39 巻 4 号(1997)
- [4] 田中正芳，光学式距離測定システムの設計，pp. 288-303 トランジスタ技術 7 月号(1997)