

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2005-345289

(P2005-345289A)

(43) 公開日 平成17年12月15日(2005.12.15)

(51) Int. Cl.⁷

G01R 33/035

F I

G01R 33/035 Z A A

テーマコード(参考)

2G017

審査請求 有 請求項の数 8 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2004-165903 (P2004-165903)
 (22) 出願日 平成16年6月3日(2004.6.3)

(71) 出願人 503360115
 独立行政法人科学技術振興機構
 埼玉県川口市本町4丁目1番8号
 (74) 代理人 100058479
 弁理士 鈴江 武彦
 (74) 代理人 100101812
 弁理士 勝村 紘
 (74) 代理人 100113099
 弁理士 和田 祐造
 (74) 代理人 100117547
 弁理士 須田 浩史
 (72) 発明者 小林 宏一郎
 岩手県盛岡市高松4-17-20-303

最終頁に続く

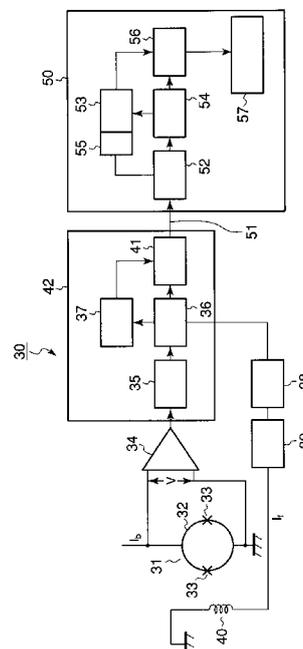
(54) 【発明の名称】 SQUID用ダブルカウンタ方式によるヒステリシス特性型デジタルFLL装置

(57) 【要約】

【課題】 SQUID磁束計において、処理ビット数が大きく高速処理が可能な高価な回路部品を使用することなく、高い分解能と高スループレートそして高ダイナミックレンジを達成する。

【解決手段】 ダブルカウンタ方式によるデジタルFLL回路であって、高速に処理を行うためのデジタルFLL内の変化量カウンタ(37)と制御・計測用コンピュータ内の再生用カウンタ(53)の2つのカウンタを利用する。また、本発明では、1₀プラスマージンを持たせたヒステリシス特性を用いる。即ち磁束の状態の変化をカウンタで数えるが、この変化の際、磁束が増加する場合と減少する場合で異なる経路をたどるように制御することにより制御を安定化する。

【選択図】 図4



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

磁場の増加に基き磁束量子 Φ_0 の周期で周期的に変動する電圧を生成する S Q U I D を用いて F L L 方式により磁界を計測する磁束計測装置であって、

S Q U I D からの周期的出力電圧を増幅し、増幅されたアナログ信号を出力する増幅器と、

前記増幅されたアナログ信号をデジタル信号に変換する A D 変換器と、

前記 A D 変換器の出力に基き、各周期毎の所定のロック点からの磁束変化分に対応する積分データを生成する積分器と、なお、各ロック点は磁束がこのロック点の対応する各制御範囲を超えると順次次のロック点移動し、かつ前記積分器はリセットされるように制御されており、

10

前記積分器に接続され、前記リセットの回数を計測する変化量カウンタと、

前記積分データとリセット回数のデータを合成するデータ合成部と、

前記データ合成部から所定の伝送路を介して伝送された合成データを受信しこの合成データを前記積分データと前記リセット回数のデータに分割するデータ分割部と、

分割された前記リセット回数のデータに基き、測定すべき磁束に対応する周期数をカウントする再生用カウンタと、

前記積分器のデータと前記カウントされた周期数に基き磁束値を計測するデータ再生部を有する磁束計測装置。

【請求項 2】

20

少なくとも前記積分器、前記変化量カウンタ、そして前記データ合成部はマイクロコンピュータ内に形成され、

前記データ分割部、前記再生用カウンタ、そして前記データ再生部は制御用コンピュータ内に形成される請求項 1 記載の磁束計測装置。

【請求項 3】

F L L 方式におけるフィードバック電流は前記積分器の前記リセットに対応してリセットされる請求項 1 記載の磁束計測装置。

【請求項 4】

磁場の増加に基き周期的に変動する電圧を生成する S Q U I D を用いて F L L 方式により磁界を計測する磁束計測装置であって、

30

S Q U I D からの周期的出力電圧を増幅し、増幅されたアナログ信号を出力する増幅器と、

前記増幅されたアナログ信号をデジタル信号に変換する A D 変換器と、

前記 A D 変換器の出力に基き、各周期毎の所定のロック点からの磁束変化分に対応する積分データを生成する積分器と、なお、各ロック点は磁束がこのロック点の対応する各制御範囲を超えると順次次のロック点移動し、かつ前記積分器はリセットされるように制御されており、

前記積分器に接続され、前記リセットの回数を計測する変化量カウンタと、

前記変化量カウンタに接続され、前記リセット回数のデータに基き、測定すべき磁束に対応する周期数をカウントする再生用カウンタと、

40

前記積分器のデータと前記カウントされた周期数に基き磁束値を計測するデータ再生部を有する磁束計測装置。

【請求項 5】

少なくとも前記積分器、および前記変化量カウンタはマイクロコンピュータ内に形成され、

前記再生用カウンタ、および前記データ再生部は制御用コンピュータ内に形成されている請求項 4 記載の磁束計測装置。

【請求項 6】

F L L 方式におけるフィードバック電流は前記積分器の前記リセットに対応してリセットされる請求項 4 記載の磁束計測装置。

50

【請求項 7】

前記各周期毎の所定のロック点に対する制御範囲が $\pm(0.5\phi_0 + \delta)$ （ δ は 0.5 未満）である請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の磁束計測装置。

【請求項 8】

前記各周期毎の所定のロック点に対する制御範囲が $\pm(0.5\phi_0 + \delta)$ であり、 δ は測定対象である磁場における雑音より大きい値に設定される請求項 7 に記載の磁束計測装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明はジョセフソン接合を有する超伝導リング即ち S Q U I D (超伝導量子干渉素子; Superconducting Quantum Interference Device)を使用した F L L (磁束ロックループ; Flux Locked Loop) 方式の磁束検出装置に関する。

【背景技術】

【0002】

F L L 方式は一般的に、初めに定めたロック点の値が維持されるように、または超伝導リング内の磁束の変化量が常に一定となるように、S Q U I D に併設されたフィードバックコイルにフィードバック電流を流すことによって磁界の測定を行う。即ち、外部磁界を打ち消すために、外部磁界と逆の磁界が生成されるようにフィードバック電流を流し、このフィードバック電流の大きさによって外部磁界の変化量を求めるものである。F L L 装置を使用することにより、測定対象である外部磁束とこの外部磁束の計測値である出力電圧とが比例関係にあるような線形性データの抽出をすることができる。

【0003】

その一方式として所謂デジタル F L L 方式による磁束検出方法が提案されている。デジタル F L L 方式においては、S Q U I D の $I - V$ 特性の周期性を利用する。磁束の大きな変化分は $I - V$ 特性における周期的変化の回数を数えることによって計測し、磁束の小さな変化分を線形的に計測して合成する。従来の S Q U I D 用 F L L 装置の計測部は主に、A D 変換器、デジタル積分器、カウンタ、D A 制御変換器、そして制御計測コンピュータを用いて構成されている。この場合、高い分解能と高スループートを達成するためには、処理ビット数が大きく高速処理が可能な高価な回路部品を必要とする。このため D S P (Digital Signal Processing) 2 2 内に形成される。

【0004】

かかる従来のデジタル F L L 磁束検出方法においては 1 個のカウンタを使用し、A D 変換器からのデータに基づくビット数とカウンタからの周期の回数を表現するビット数から磁束を表現する値を合成することにより外部磁束データを表現する。

【0005】

図 1 に従来のデジタル F L L 技術を使用する dc S Q U I D 磁束計 1 0 を示す。S Q U I D 1 1 は超伝導材料で作成したリング 1 2 の途中に 2 つのジョセフソン接合 1 3 を設けたものであり、直流電源(図示せず)からの直流電流 I_b によってバイアスされている。そしてこのバイアス電流の入力部と出力部間の電圧(出力電圧 V)は、S Q U I D のリング 1 2 を貫く外部磁束 x によって変化する。図 2 (a) および図 3 (a) に外部磁束 x と出力電圧 V との関係を示す。S Q U I D 1 1 の出力電圧 V はリング 1 2 を貫く外部磁束 x の変化に従って周期的に変化し、その周期は磁束量子である ϕ_0 である。このように出力電圧 V は周期的に変化するため、単に出力された電圧 V を測定しただけでは外部磁束 x の値は一義的には定まらない。

【0006】

このため、図 2 (a) に示すように任意の測定開始点(一般にロック点という) a_0 からの磁束の周期的変化を含めて測定する方法が用いられる。即ち、外部磁束に基く周期的変化の数 n と、最大の周期 a_n における磁束の変化分 Δ の値を基に、外部磁束 x の値を計算する方式が採用されている。通常ロック点は各周期毎に 1 点と同じ電圧で点において

10

20

30

40

50

定められる。ロック点はデータ処理の都合に応じて任意に設定することができ、図 2 に例示するように必ずしも $V = 0$ とする必要はない。

【0007】

周期性および変化分 ΔV に対応する値を計測するために、図 2 (b) に示すようにある瞬間のロック点 a_n からの磁束変化分 $\Delta \Phi$ に対応する出力電圧の変化分 ΔV を求め、積分回路を介して常時フィードバックコイル 20 にフィードバックする。このため測定点はロック点 a_n に固定され、各測定時における磁束の変化 $\Delta \Phi$ に基づく出力電圧の変化 ΔV は常に一定になるので、図 2 (c) に示すように磁束の変化分 $\Delta \Phi$ に対応する電圧変化分 ΔV を線形データとして得ることができる。このデータ値がロック点の制御範囲を超えると次のロック点に移動し、同時に積分器における前の積分データはリセットされる。

10

【0008】

図 1 の従来例において、SQUID 11 の出力電圧 V は増幅器 14 によって増幅され、AD変換器 15 によりデジタルデータに変換される。デジタルデータはデジタル積分器 16 によって積分される。積分値は各ロック点の制御範囲を超えるとリセットされ、このリセット回数により何周期までのデータであるかがカウンタ 17 によって計測される。各周期毎の積分値は DA 変換器 18 および SQUID 11 の特性に対応して定まるフィードバック電流 I_f を生成する電圧 / 電流変換器 19 を介してフィードバックコイル 20 にフィードバックされる。また各周期のロック点 ($a_0, a_1, a_2 \dots a_n$) 毎にリセットされた各積分値はデータ合成部 21 に送られる。フィードバック電流 I_f は各周期毎にリセットされるので一定値以上に増加することはない。

20

【0009】

データ合成部 21 はカウンタ 17 の計測したリセット回数に対応する磁界の値および最後の周期においてデジタル積分器 16 から得られた電圧変化分 ΔV に対応する磁界の値を計算しこれらの値を合計して外部磁束の値を得る。なお、AD変換器 15、デジタル積分器 16、カウンタ 17、データ合成部 21 の制御は、通常 DSP 22 の制御部 (図示せず) によって行なわれる。

【0010】

また、従来のデジタル FLL においては、各ロック点の各制御範囲を図 3 (b) に示すように、制御用ロック点 ($a_0, a_1, a_2 \dots a_n$) の $\pm 1/2$ をとしている。そして磁束 Φ がこの範囲を超えた場合に、ロック点をシフトさせ、カウンタ 17 により UP、DOWN の情報を記録し、制御 (フィードバック) を行う方法を用いている。この従来の方法においては、外部磁束が増加する場合と減少する場合とではロック点および電圧の変化する経路が異なる状態をとる所謂ヒステリシス特性を利用して制御範囲の切換え動作の安定化を図っている。

30

【非特許文献 1】Dietmar Drung "HIGH-Tc and low-Tc dc SQUID electronics" Superconductor Science and Technology 16 (2003) 1320-1136

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

従来のデジタル FLL 装置は図 1 に示すように通常 1 つのカウンタ 17 のみを使用している。このように 1 つのカウンタをデジタル FLL 内において使用した場合、そのビット数は DSP 等のハードウェアのビット数で制限されるため、(通常、カウンタ用ビットとフィードバック用ビットのトータルで 32 ビット程度を使用する。) 多くのビット数を割当てることができないという問題があった。またカウンタ 17 を制御用コンピュータ内に構成する場合、1 つのシフト以内でデータを転送する必要があるため、データ転送速度による制限を受け、スループットが大きくできないという問題点があった。

40

【0012】

また、従来の SQUID 用デジタル FLL 装置は、AD変換器 15、デジタル積分器 16、カウンタ 17、DA 変換器 18、制御・計測用コンピュータ 22 等により構成される。デジタル FLL においては、ビット数が分解能とダイナミックレンジを決定する

50

ため、測定対象や環境のノイズレベルを参酌して設計されている。高い分解能と高いスループレートと高いダイナミックレンジを得るためには、各部品に関して高ビットで高速な処理が可能な高価な部品を使用するか、DSPを使用せざるを得ないという問題点があった。

【0013】

システムの分解能は、制御範囲と制御のビット数で決定される。ビット数を一定とした場合に分解能を向上させるためには、制御範囲を狭くする必要がある。従来技術においては、安定な動作をさせるため、各ロック点に関し図3(b)に示すように、 $\pm 1 \phi$ (2周期に相当)を制御範囲としていた。しかし、デジタルFLCにおいては図5(a)および(b)に示すように、原理的には $\pm 0.5 \phi$ を制御範囲とすることができる。 $\pm 0.5 \phi$ は 1ϕ (1周期に相当)であるので全範囲をカバー可能であり、原理的にはFLCの動作が可能である。

10

【0014】

しかし、制御範囲を $\pm 0.5 \phi$ とした場合には、図5(b)に示すようなロック点をシフトさせる点Sまたはその近傍において、図5(c)に示すような外部ノイズや、信号自体の変化により、ロック点のシフトが起こり安定した動作が行えない問題がある。ロック点の変更時の回路動作においては、図5(b)に示すようにプラスの大きな値からマイナスの大きな値へ、即ち最大値から最小値へと頻繁に変更させる必要があるため動作が不安定となる。特にノイズの大きな環境や、信号がロック点の変更点の近傍で頻繁に変化するような場合にはロック点の頻繁な変更が生ずるという問題点がある。

20

【課題を解決するための手段】

【0015】

本発明においては変化量カウンタと再生用カウンタの2つのカウンタを備える。そしてデジタルFLC内部の変化量カウンタでは計測データの変化量のみを扱い、制御用コンピュータの再生用カウンタにおいて計測データの実際の周期数、即ち磁界の周期性を処理する。

【0016】

また、SQUIDのV-特性の周期性を利用することにより制御範囲を $\pm (0.5 \phi + \epsilon)$ とする。その結果、ヒステリシス特性を持たせることにより高分解を実現すると共に動作を安定させる。

30

【0017】

第一の実施の形態に基く本発明は、磁場の増加に基き磁束量子 ϕ_0 の周期で周期的に変動する電圧を生成するSQUIDを用いてFLC方式により磁界を計測する磁束計測装置であって、

SQUIDからの周期的出力電圧を増幅し、増幅されたアナログ信号を出力する増幅器と、

増幅されたアナログ信号をデジタル信号に変換するAD変換器と、

AD変換器の出力に基き、各周期毎の所定のロック点からの磁束変化分に対応する積分データを生成する積分器と、なお、各ロック点は磁束がこのロック点の対応する各制御範囲を超えると順次次のロック点移動し、かつ前記積分器はリセットされるように制御されており、

40

積分器に接続され、前記リセットの回数を計測する変化量カウンタと、

積分データとリセット回数のデータを合成するデータ合成部と、

データ合成部から所定の伝送路を介して伝送された合成データを受信しこの合成データを前記積分データと前記リセット回数のデータに分割するデータ分割部と、

分割された前記リセット回数のデータに基き、測定すべき磁束に対応する周期数をカウントする再生用カウンタと、

積分器のデータとカウントされた周期数に基き磁束値を計測するデータ再生部を有する磁束計測装置である。

【0018】

50

そして、この磁束計測装置は、少なくとも積分器、変化量カウンタ、そして記データ合成部はマイクロコンピュータ内に形成され、データ分割部、再生用カウンタ、そしてデータ再生部は制御用コンピュータ内に形成される。また、FLL方式におけるフィードバック電流は積分器の前記リセットに対応してリセットされる磁束計測装置である。

【0019】

本発明の第二の実施形態に係る発明は、磁場の増加に基き周期的に変動する電圧を生成するSQUIDを用いてFLL方式により磁界を計測する磁束計測装置であって、

SQUIDからの周期的出力電圧を増幅し、増幅されたアナログ信号を出力する増幅器と、

増幅されたアナログ信号をデジタル信号に変換するAD変換器と、

AD変換器の出力に基き、各周期毎の所定のロック点からの磁束変化分に対応する積分データを生成する積分器と、なお、各ロック点は磁束がこのロック点の対応する各制御範囲を超えると順次次のロック点移動し、かつ前記積分器はリセットされるように制御されており、

積分器に接続され、リセットの回数を計測する変化量カウンタと、

変化量カウンタに接続され、リセット回数のデータに基き、測定すべき磁束に対応する周期数をカウントする再生用カウンタと、

積分器のデータと前記カウントされた周期数に基き磁束値を計測するデータ再生部を有する磁束計測装置である。

【0020】

また、少なくとも積分器、および変化量カウンタはマイクロコンピュータ内に形成され、再生用カウンタ、およびデータ再生部は制御用コンピュータ内に形成されている磁束計測装置であり、そしてFLL方式におけるフィードバック電流は前記積分器の記リセットに対応してリセットされる磁束計測装置である。

【0021】

また各周期毎の所定のロック点に対する制御範囲が $\pm(0.5 - \delta + \delta)$ （ δ は0.5未満）であり、 δ は測定対象である磁場における雑音より大きい値に設定される磁束計測装置である。

【発明の効果】

【0022】

現在デジタルFLL磁束計は実用上は殆ど利用されていない。これは装置が高価であることが最大の原因であろう。本発明においては、2つのカウンタを用いることにより、安価な低ビットのマイクロコンピュータを用いてSQUID磁束計の高性能化を実現できる。また、制御範囲を狭くすることによって高分解を実現できる。この場合、ロック点の変更点を $\pm(0.5 - \delta + \delta)$ とすることによりヒステリシス特性を持たせ、ロック点の変更付近の信号変動においてもロック点の変更は1度のみとなり、ノイズが多い場合でも安定な動作が可能となった。

【発明を実施するための最良の形態】

【0023】

以下、本発明の実施の形態を、添付図面に示す具体的な例に基づいて、詳細に説明する。以下の説明は本発明に関する一実施の形態であり、本発明の一般的原理を理解することを目的とするものである。従って、本発明をこの実施の形態に具体的に記載された構成のみに限定するものではない。

【0024】

図4に本発明の第一の実施の形態によるdcSQUID磁束計30を示す。図3に示すように、SQUID31は超伝導材料で作成したリング32の途中に2つのジョセフソン接合33を設けた構造を有する。例えば、高温超伝導材料を使用したSQUIDの場合の、典型的な超伝導ループは厚さが $1\mu\text{m}$ 以下、例えば $0.2\mu\text{m}$ 、の薄膜で形成されている。そして幅が例えば $3\mu\text{m}$ の2個の超伝導的に弱い接合、即ちジョセフソン接合33、を有する。通常SQUID31は直流電源(図示せず)からの直流電流 I_b によってバイアス

されている。かかる S Q U I D 3 1 においては、バイアス電流の入力部と出力部間の電圧（出力電圧 V ）は、S Q U I D のリング 3 2 を貫く外部磁束 x によって変化する。

【0025】

S Q U I D 3 1 の出力は増幅器 3 4 に接続されており、増幅器の出力は A D 変換器 3 5 に接続されている。外部磁束に基づく S Q U I D 3 1 の出力電圧 V を増幅器 3 4 で適切な大きさに増幅して、増幅器 3 4 の出力に接続された A D 変換器 3 5 によりデジタルデータへの変換を行う。

【0026】

図 4 の実施の形態においては A D 変換器 3 5 の分解能即ち動作ビット数は比較的小さいビット数、例えば 10 ビット程度でよい。その理由は外部磁束 x とフィードバックコイル 4 0 からの打消し磁束との差をとるためである。つまり変化量のみを A D 変換するからである。

10

【0027】

A D 変換器 3 5 の出力はデジタル積分器 3 6 に接続され、デジタル積分器 3 6 は変化量カウンタ 3 7、フィードバック回路を構成する D A 変換器 3 8、そしてデータ合成部 4 1 に接続されている。A D 変換器 3 5、デジタル積分器 3 6、変化量カウンタ 3 7、およびデータ合成部 4 1 は、この方法に限定するわけではないが、例えばマイクロコンピュータ 4 2 を使用して形成することができる。1 例としてマイクロコンピュータ 4 2 内においてこれらは 16 ビットで処理される。また他の例として、デジタル積分器 3 6、変化量カウンタ 3 7、およびデータ合成部 4 1 についてはマイクロコンピュータ 4 2 内に形成し、A D 変換器 3 5 は外付けにすることができる。マイクロコンピュータ 4 2 としては所謂ワンチップマイコンを使用することができる。

20

【0028】

デジタル積分器 3 6 は例えば図 3 に示す各ロック点 (a_0 、 a_1 、 a_2 、 \dots) の制御範囲における磁束変化 Δx に対応する出力電圧 V を積分する。例えば、図 2 (b) に示すように、デジタル積分器 3 6 はロック点 a_n からの磁束変化分 Δx_n に対応する出力電圧の変化分 ΔV を積分し、D A 変換器 3 8、電圧 / 電流変換器 3 9 を介して常時フィードバックコイル 4 0 にその出力をフィードバックする。このため微小測定点は、次々とロック点 a_n に固定され、各測定時における磁束の変化 Δx に基づく出力電圧の変化 ΔV は常に一定になるので、デジタル積分器 3 6 による積分により、各制御範囲における磁束 x の変化に対する線形の出力データを得ることができる。デジタル積分器 3 6 は積分を実行していたあるロック点（例えば図 3 (b) の a_0 ）の制御範囲を超えると、積分値をリセットして次のロック点（例えば同 a_1 ）に移動する。

30

【0029】

S Q U I D 3 1 への電流フィードバック量は、上記のようにして、デジタル積分器 3 6 により電圧変化分 ΔV を積分することにより決定される。デジタル積分器 3 6 から出力された積分値は D A 変換器 3 8 によってアナログ値に変換される。そしてアナログ変換された積分値は電圧 / 電流変換器 3 9 へ送られる。電圧 / 電流変換器 3 9 は、外部磁界の変化に起因する測定電圧（上記アナログ値）に基づき、所定のフィードバック電流 I_f を生成する変換器である。S Q U I D 3 1 の近傍に配置されたフィードバックコイル 4 0 に所定のフィードバック電流を I_f 流すことにより、各ロック点からの磁束変化を打ち消すような磁場を発生させる。フィードバック電流値 I_f の値は、リング 3 2 やフィードバックコイル 4 0 の形状や配置および結合度等を参酌して例えばマイクロコンピュータ 4 2 が決定する。

40

【0030】

この実施の形態においては、積分器 3 6 のビット数が、S Q U I D 磁束計 3 0 の分解能を決定する。D A 変換器 3 8 に関しては例えばビット数の少ない安価な D A 変換器を複数個を利用することにより（例えば 8 ビットの D A 変換器を 2 個並列に使用する等）トータル価格を低減することができる。

【0031】

50

デジタル積分器 36 は、変化量カウンタ 37 および D A 変換器 38 に接続されている。デジタル積分器 36 は、図 3 (b)、および後に説明する図 5 (d) に示すような制御範囲内の磁束変化に対応する積分値を D A 変換器 38 およびデータ合成部 41 に送る。磁束が動作中のロック点に対する制御範囲を超えた場合、図 3 (a) に示すような - V 特性の周期性により、マイクロコンピュータ 42 は例えばロック点 a_0 の制御範囲からロック点 a_1 に係る隣の制御範囲に移動させるように制御する。かかる移動によりフィードバック電流 I_f を一定値以下に抑えることができる。このシフトは例えばマイクロコンピュータ 42 内の制御部 (図示せず) の命令により行われ、変化量カウンタ 37 がシフト回数をカウントする。

【 0 0 3 2 】

デジタル積分器 36 から D A 変換器 38 を介してフィードバックコイル 40 に至るフィードバック回路の動作は高速で行われる。これに対し、後に説明する制御用コンピュータ 50 へのデータ伝送は、磁束の計測に必要なサンプリングレートである例えば 1 k H z 程度の低速で行なわれる。このため、変化量カウンタ 37、次のデータ伝送時までの磁束変化によるシフト回数をカウントすると共にその変化量を保持する。

【 0 0 3 3 】

このように、変化量カウンタ 37 は後続する制御用コンピュータ 50 へデータを転送する間に、何回シフトが生じたか、即ちロック点 (図 4 (a) の a_0 、 a_1 、 a_2 、 \dots) がどれだけ移動したかを数える役割をする。制御用コンピュータ 50 にデータを転送すると、変化量カウンタ 37 は 0 にリセットされる。データ合成部 41 は変化量カウンタ 37 が計測した上記シフト回数と積分器 36 の積分値とを組み合わせ送信信号を作成する。S Q U I D 31 から積分器 36 までの処理は、後続するデータ転送とは独立に高速で行われており、処理速度を向上することができる。なお、A D 変換器 35、デジタル積分器 36、変化量カウンタ 37、データ合成部 41 の制御は、マイクロコンピュータ 42 内の制御部 (図示せず) によって行なわれる。

【 0 0 3 4 】

伝送路 51 のデータ通信のタイミングで、積分器 36 のデータと変化量カウンタ 37 のデータを有するデータ合成部 41 から出力された送信信号は、制御用コンピュータ 50 に転送される。制御用コンピュータ 50 としては通常の制御部、論理演算部、情報記録部、表示部、入力部としてのキーボード等 (図示せず) を備えた端末、例えば市販のパーソナルコンピュータ等が使用できる。通常の計測システムにおいては、データの転送速度がシステムの処理速度を低くする最大の原因である。この問題点を解消するために、本発明においてはカウンタ 37、53 を 2 つ用いることにより、変化量データの処理と実際の磁束に係るデータ処理とを分けることにより解決する。

【 0 0 3 5 】

制御用コンピュータ 50 においては、受信したデータによる積分器 36 のデータと変化量カウンタ 37 のデータを基に、実際の磁束の計測データを生成する。かかる方法により現在市販されている汎用のパーソナルコンピュータを用いた場合でも、非常に大きなダイナミックレンジを実現できる。

【 0 0 3 6 】

データ合成部 41 は変化量カウンタ 37 からのロック点の変化量と積分器 36 からの積分値を合わせて送信信号を形成してデータ通信路 51 に出力する。

【 0 0 3 7 】

データ分割部 52 は伝送されたデータから変化量カウンタ 37 のデータと積分器 36 からのデータとに分離し、再生用カウンタ 53 には変化量カウンタ 37 のデータを送り、積分器データ部 54 には積分器 36 のデータを送る。変数は 32 ビットを利用するが、プログラムで 32 ビット変数を複数利用 (容易に 100 以上) することができるので、実際には無限大に等しい。また、實際上 32 ビット変数を 2 つ用いた 64 ビットでは、1000 T (W b / m²) の範囲を計測できる (S Q U I D の変数係数が 1 。あたり 1 n T 換算) 。

10

20

30

40

50

【0038】

再生用カウンタ53には記録部55が設けられており、計測の開始時からの変化量カウンタ37の全てのデータが記録されている。そして再生用カウンタ53はマイクロコンピュータ42から送られてきた変化量カウンタ37のデータを合計する。この変換値データはロック点を通過した回数に対応するので、計測を始めてからの実際の磁束のデータの所謂上位ビットに対応する。

【0039】

積分器データ部54は分離された積分器36の積分値、即ち最後のロック点 a_n からの磁束の値に対応する積分値データを記憶する。この値は実際の磁束のデータを表すための下位ビットに対応する。データ合成部56において上記2つのデータが合成され、データ再生部57において実際の磁束値が計算される。

10

【0040】

具体的には、例えば積分器36は16ビットまたはそれ以上、変化量カウンタ37は8ビット、再生用カウンタは32ビットまたは64ビットで形成される。

【0041】

この方法においては、伝送路51を介するデータ転送とは独立して、FLL動作のための電流フィードバック処理が行われることに特徴がある。再生用カウンタ53とは別に変化量カウンタ37を設けることにより、FLLの動作に比較して低速なデータ転送に起因するFLLフィードバック処理の処理速度の低下を防止し、高速なフィードバックを実現できる。制御用コンピュータ50の再生用カウンタ53を利用することにより、デジタルFLL内のみのカウンタの利用と比較して、遥かに大きなビット数が使用可能となり、飛躍的にダイナミックレンジを広げることができる。したがって、データの高速処理とダイナミックレンジの向上を実現することができる。

20

【0042】

また、本発明におけるシステムでは、安価なマイクロコンピュータを利用しAD変換器やカウンタを構成可能であること、そして制御用コンピュータを2つ目のカウンタとして利用しているためコストアップすることなく、システム全体を安価で提供できる。

【0043】

次に本計測システムにおける分解能の向上について説明する。システムの分解能は、制御範囲と制御のビット数で決定される。ビット数を一定とした場合に分解能を向上させるためには、制御範囲を狭くする必要がある。

30

【0044】

従来技術においては、安定な動作をさせるため、各ロック点に関し図3(b)に示すように、 $\pm 1 \text{ } \mu\text{s}$ (2周期に相当)を制御範囲としていた。しかし、デジタルFLLにおいては図5(a)および(b)に示すように、原理的には $\pm 0.5 \text{ } \mu\text{s}$ を制御範囲とすることで全測定範囲をカバーすることができる。即ち、 $\pm 0.5 \text{ } \mu\text{s}$ は $1 \text{ } \mu\text{s}$ (1周期に相当)であるので全範囲をカバーでき原理的にはFLLの動作が可能である。

【0045】

しかし、 $\pm 0.5 \text{ } \mu\text{s}$ を制御範囲とする場合、図5(b)に示すようなロック点を次のロック点にシフトさせる点Sまたはその近傍において、図5(c)に示すような外部ノイズや、信号自体の変化により、ロック点のシフトが起こり、安定した動作が行えない問題がある。ロック点の変更時の回路動作に関しては、図5(b)に示すようにプラスの大きな値からマイナスの大きな値へ、即ち最大値から最小値へと変更させる必要がある。この変更が頻繁に起こると動作が不安定となる。ノイズの多い環境や、信号がロック点の変更点の近傍で頻繁に変化するような場合には、ロック点の頻繁な変更が生ずる。

40

【0046】

かかる状態を避けるため、図5(d)に示すように、 $\pm 0.5 \text{ } \mu\text{s}$ に $0.5 \text{ } \mu\text{s}$ 未満のマーヅン 例えは $0.1 \text{ } \mu\text{s}$ を持たせて動作範囲を $\pm 0.6 \text{ } \mu\text{s}$ にし、動作を安定させるためのヒステリシス特性を持たせることができる。かかるマーヅンの追加により頻繁なロック点のシフトを起こさせないようにすることができることがわかった。本発明の目的の

50

1つは分解能をあげることであるが、かかるヒステリシス特性を用いることによりより制御範囲を $\pm(0.5\theta_0 + \dots)$ と狭くした場合でも安定した動作が得られる。

【0047】

この場合、積分器36においては、AD変換器35によってAD変換されたデータを積分し、 $\pm(0.5\theta_0 + \dots)$ を超えた場合のみ、その情報を変化量カウンタ37に送り、積分値をリセットさせる。DA変換器38には常に積分された値(データ)を送っている。フィードバックコイル40はこの値に基づきフィードバック磁界を作り、SQUID31内の磁界をロック点に固定させている。 $\pm(0.5\theta_0 + \dots)$ を超えた場合に積分器36はリセットされ、リセット後の値をDA変換器38に送る。

【0048】

このように、SQUID31のV-特性の周期性を利用した場合、制御範囲を1周期にマージンを加えて $\pm(0.5\theta_0 + \dots)$ として、ヒステリシス特性を持たせる方法により、従来の制御範囲($\pm 1\theta_0$)と比較して、高分解を実現し且つ動作を安定させることができる。制御範囲の指定はマイクロコンピュータ42のプログラムにより行う。

【0049】

本発明の第二の実施形態のdcSQUID磁束計60について述べる。FLL部を構成する、SQUID31、リング32、ジョセフソン接合33、増幅器34、AD変換器35、デジタル積分器36、DA変換器38、電圧/電流変換器39、フィードバックコイル40、およびデータ合成部56、データ再生部57は第一の実施形態の場合と同等なので同じ参照符号で示している。

【0050】

マイクロコンピュータ62内の積分器36の積分処理の内容は第一の実施形態の場合と同じであるが、その出力は伝送路63を介して直接制御用コンピュータ64内の積分器データ部65にサンプリングのタイミングで入力される。変化量カウンタ66の処理内容も第一の実施形態の場合と同様であるが、その出力は伝送路67を介してサンプリングのタイミングで制御用コンピュータ64内の再生用カウンタ68の記録部69に入力される。再生用カウンタ68は測定される磁束の周期の数に合わせてデータを再生し、データ合成部56においてこのタイミングで上記2つのデータが合成され、データ再生部57において実際の磁束値が計算される。制御用コンピュータ64としては第一の実施形態の制御用コンピュータと同様の端末、例えば市販のパーソナルコンピュータ等が使用できる。

【0051】

本発明の方法によれば、ある条件(θ_0 周期)で、どれだけの外部磁界を計測したらロック点をシフトさせるかを定める位置であるロック点を変更させても、そのロック点の変更数を数えることにより、正しい計測磁界を得ることができる。また計測の分解能を低下させずにダイナミックレンジを広げることができる。かかる方法によりフィードバック電流値を増加させることなく、ダイナミックレンジを格段に大きくすることができる。

【0052】

本発明によるデジタルFLLは、磁気シールドルームのない環境やMRI(磁気共鳴画像法; Magnetic Resonance Imaging)などの強磁場空間においても安定に動作するため、SQUID磁束計の設置場所の制約がなくなり、高分解の磁束計としての利用範囲は格段に広がるであろう。またSQUID磁束計を利用したMRI技術へ応用できる。

【0053】

以上、本発明の実施の形態について図示し説明したが、本発明の技術的範囲を逸脱せずに、種々の変形が可能であることは明らかである。

【0054】

なお、本願発明は、上記実施形態に限定されるものではなく、実施段階ではその要旨を逸脱しない範囲で種々に変形することが可能である。

【図面の簡単な説明】

【0055】

【図1】デジタルFLL技術を使用して構成した従来のdcSQUID磁束計の回路図を

10

20

30

40

50

示す。

【図2】SQUIDにおける外部磁束と出力電圧の関係を示す。またロック点における積分処理の内容を示す。

【図3】従来のデジタルFL技術における各ロック点における制御範囲の移動状態を示す。

【図4】本発明の第一の実施形態におけるSQUID磁束計の回路図を示す。

【図5】本発明におけるヒステリシス特性を有する各ロック点における制御範囲の移動状態を示す。

【図6】本発明の第二の実施形態におけるSQUID磁束計の回路図を示す。

【符号の説明】

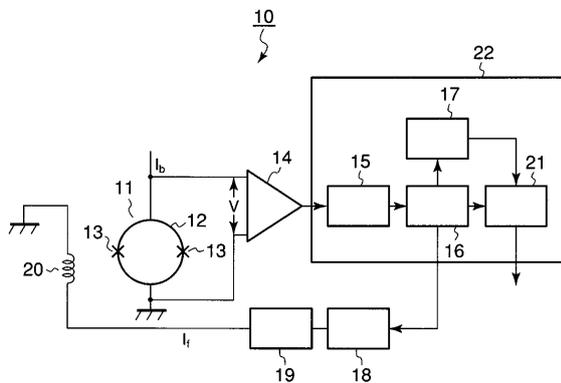
【0056】

10 ... dc SQUID 磁束計、 11 ... SQUID、 12 ... リング、 13 ... ジョセフソン接合、 14 ... 増幅器、 15 ... AD変換器、 16 ... デジタル積分器、 17 ... カウンタ、 18 ... DA変換器、 19 ... 電圧/電流変換器、 20 ... フィードバックコイル、 21 ... データ合成部、 22 ... 制御・計測用コンピュータ(DPS)、 31 ... SQUID、 32 ... リング、 33 ... ジョセフソン接合、 34 ... 増幅器、 35 ... AD変換器、 36 ... デジタル積分器、 37 ... 変化量カウンタ、 38 ... DA変換器、 39 ... 電圧/電流変換器、 40 ... フィードバックコイル、 41 ... データ合成部、 42 ... マイクロコンピュータ、 50 ... 制御用コンピュータ、 51 ... 伝送路、 52 ... データ分割部、 53 ... 再生用カウンタ、 54 ... 積分器データ部、 55 ... 記録部、 56 ... データ合成部、 57 ... データ再生部、 62 ... マイクロコンピュータ、 63 ... 伝送路、 64 ... 制御用コンピュータ、 65 ... 積分器データ部、 66 ... 変化量カウンタ、 67 ... 伝送路、 68 ... 再生用カウンタ、 69 ... 記録部、

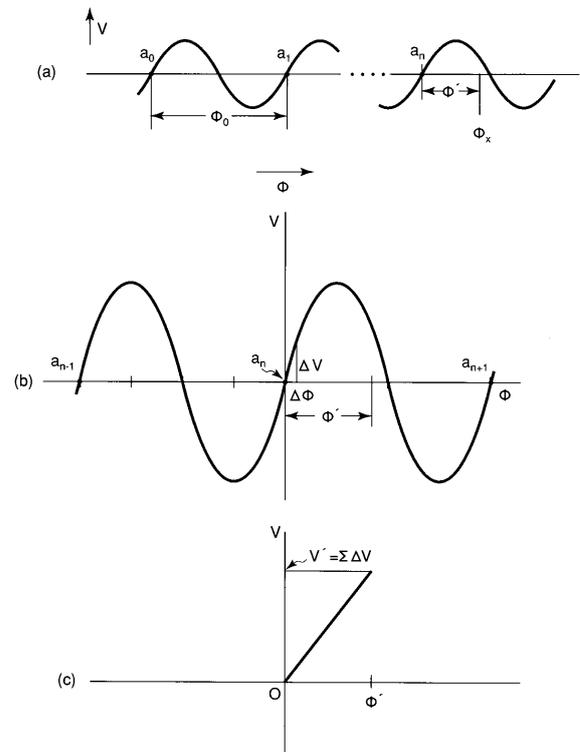
10

20

【図1】



【図2】



フロントページの続き

- (72)発明者 小山 大介
岩手県盛岡市上田3丁目9-3 寿恵荘2-1号
- (72)発明者 吉澤 正人
岩手県盛岡市箱清水1-13-32
- (72)発明者 中居 賢司
岩手県盛岡市上田堤1-12-14
- (72)発明者 清水 隆行
岩手県盛岡市西松園2-3-1-403
- (72)発明者 上田 智章
京都府京都市下京区中堂寺南町134 株式会社KRI内
Fターム(参考) 2G017 AA04 AD34