

実時間位相飛越修正型位相検出回路の設計・製作

伊藤康彦^{A)}、田中謙治^{B)}、徳沢季彦^{B)}、川端一男^{B)}

文部科学省 核融合科学研究所 ^{A)}技術部、^{B)}プラズマ計測研究系

はじめに

高温プラズマの電子密度計測用レーザー干渉計において、干渉信号から密度情報を取得するために位相検出回路が用いられており、この回路の動作を安定させるために新たに付加する位相飛越修正回路AFJC(Automatic Fringe Jump Correction)について報告する。

本干渉計による位相測定においては、位相の変化量が1フリンジ以上(1フリンジ=360度)となり、検出回路の位相測定範囲は3～31フリンジに相当する。ここで、検出回路の入力信号に雑音等が重畳されて誤動作を起こした場合、図7(a)に示すような1フリンジの整数倍で位相が飛越した波形が出力される。

この密度波形に飛越があると、データ解析に支障をきたすため、波形表示ソフトを用いて飛越の修正を半自動で行っている。修正処理は時間を要するため、実験間隔が数分周期で行われる場合には、その進行に合わせて正確なデータを提供することが困難である。AFJCの目的は、この面倒な波形処理を実時間(2～3μsec)で行い、波形解析時に行う修正作業を軽減させることである。

前回報告したFIR(Far InfraRed)レーザー干渉計用の試作回路^[1]は、大型ヘリカル装置(LHD)の実験データが殆ど得られなかったが、今回は多数の実験データを得ることができた。また、この回路はCO₂及びYAGレーザー干渉計用位相検出回路に適合するように改造され、試用中である。

1. プラズマ電子密度計測システム

電子密度の測定原理は、プラズマ中を伝播させた電磁波が、透過経路の電子密度の線積分値に比例した位相変化を受けるため、を検出すれば密度情報を得ることができることによる。

プラズマ電子密度計測用干渉計の基本構成を図1に示す。レーザー干渉計の光源は、LHD用では、波長=119μmのFIR、=10.9μmのCO₂及び、CO₂レーザー干渉計の振動補正用=1.064μmのYAGレーザー発振器が用いられている。ここでは、CO₂レーザー干渉計の構成を示す。

光源は先ず2分岐される。1つはプローブ波としてプラズマ全体を透過するように、ビーム径が拡大される。もう1つはプラズマの影響を受けない参照波として、プラズマの外郭を伝播する。1MHzのビート信号を得るため参照波とプローブ波はAOM(Acousto-Optic Modulator)で周波数変調される。

プラズマを透過しを受けたプローブ波は、参照波と混合され、光検出器アレイによって検波され、を含む差周波数1MHzのビート信号が得られる。干渉計からのビート信号は、位相検出回路によってを電圧Vに変換し、CAMAC規格のADCでVが収集され、PCによって線電子密度情報から電子密度分布を求める。

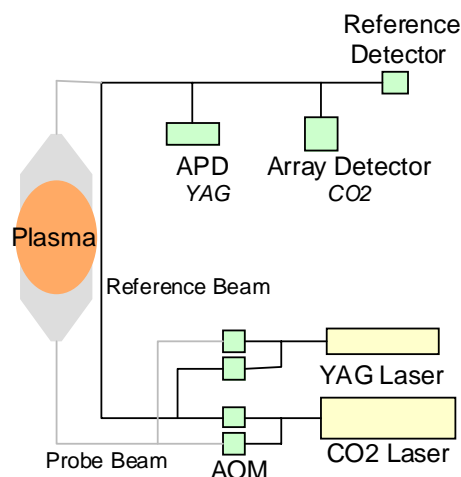


図1. CO₂レーザー干渉計の構成

2. 位相測定時に発生する問題

2.1 プローブ波の屈折

プラズマの電子密度分布は勾配を持つため、その屈折率分布にも勾配を持つ。ここに電磁波を透過させた場合には、図2に示すように電磁波は屈折され、その屈折角変化量は波長の2乗と電子密度に比例する^[2]。したがって、高密度領域では屈折率が增大し、

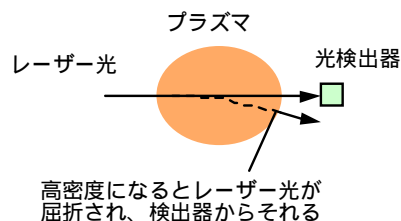


図2. プラズマ中を伝播するプローブ波

透過波は検出器からそれ、位相検出回路へ入力される信号強度は減少するか、または信号が途切れる。この現象は、CO₂ レーザーよりも波長の長い FIR レーザー干渉計で問題となる。

2.2 外来ノイズの影響

LHD の CO₂ レーザー干渉計においては、プローブ波用の検出器が LHD 本体に隣接している。LHD 本体付近には大電力の中性粒子ビーム入射装置(NBI)があり、これが動作または、ブレークダウンすると、電磁ノイズが発生してビート信号に重畳され、そのパルス列は乱される^[2]。このノイズに対する対策はまだ不十分であり、CO₂ レーザー干渉計が動作不安定となる最大の要因である。

2.3 位相飛越

前述の現象は、位相比較部のカウンタに計数ミスを起こさせ、位相は $2 \times n (n = \pm 1, 2, 3, \dots)$ の値で飛越する。図 7(a) は位相飛越の一例で、FIR レーザー干渉計による線電子密度波形である。位相飛越が発生している部分は、水素ペレットが入射され、密度が急上昇した部分である。

LHD 実験では、プラズマ放電回数が約 160 回 / 日で放電周期が 3 分間と短く、また干渉計のチャンネル数も 10 チャンネル以上と多数なため、実時間での飛越波形の修正は困難である。軽微な飛越は波形表示ソフトによる修正プログラムで修正することもできるが、複雑な飛越修正には対応できず、人手による処理が行われている。これには 1 ショットあたり最大数十分の時間を要することもあり、修正者にかかる負担は大きく、この軽減対策が切望されている。

3. 回路の設計

3.1 位相検出部

CO₂ レーザー干渉計用位相検出回路の仕様を以下に示す。

- ・入力信号周波数 ----- 1 MHz
- ・位相検出範囲 ----- 3 fringe
- ・位相分解能 ----- 約 1/700 fringe
- ・応答速度 ----- 10 μ sec

本回路の構成を図 3 に示す。本検出回路は、過去に報告した FIR レーザー干渉計用のクロック同期型位相比較器^[3]を使用せず、それ以前に使用していた非同期型位相比較器(図 3 の位相比較器 2)を用いている。その理由は、CO₂ レーザー干渉計は波長が短く、 f_n も小さいため、高位相分解能が要求されるためである。

非同期型回路は位相がゼロ・クロスする場合の位相歪が大きく、1/100 フリンジ程度である。本来は同期型での使用が望ましいが、その場合、内部クロック周波数に 500MHz 以上が要求され、製作が困難であるため、位相歪を承知で非同期型を選択した。

この選択により、現在の位相が何フリンジであるかを示すデータ f_n の取得に支障をきたすことになる。それは、図 4 に示すように、 f_n を参照波の立ち上がりエッジで加算器のデータから読み取る時、回路動作が非同期であるため f_n は連続的に変化しており、システム・クロックによる時間管理との整合性が取れなくなるためである。

この問題を避けるためには、PLL(Phase Lock Loop)を用いてクロック信号を参照波に同期させればよい。しかし、今回は開発時間の制約により、PLL の採用は断念した。その代替として、もう一つの同期型位相比較器(図 3 の位相比較器 1)を並列に動作させ、これを f_n の測定に利用した。 f_n と f_n の測定を分割したことで、

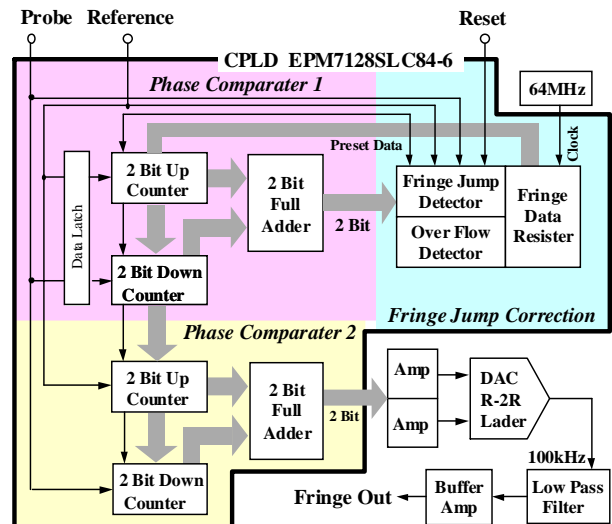


図 3. 位相検出回路の構成

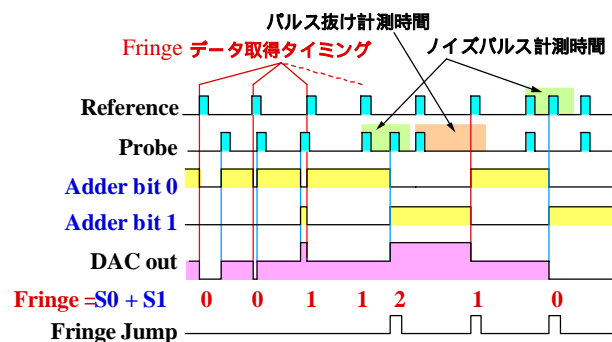


図 4. 位相比較部、APJC 部の動作タイミング

のゼロ・クロス付近で、兩位相比較器の間に測定誤差が発生し、誤った fn を認識してしまうことがある。しかしながら、その確率は低く、位相飛越修正の利点の方が大きいため、この問題を許容した。

3.2 AFJC部

AFJCの構成を図5に示す。位相飛越の検出は、FIR用のAFJC^[1]では、加算器出力パルスのデューティー比を測定し、その変化量から判断していた。本回路では、検出論理を簡略化するため、別の方法を用いた。

位相飛越の検出を、図4に示すように2つの場合に分けて行わせる。

- ・ノイズの検出、ビート信号にノイズが重畳された場合、ビートの周期(1 μ s)が短くなるので、周期が0.8 μ s以下で位相飛越と判断する。
- ・ビート信号欠落の検出、ビート信号が欠落し、周期が1.2 μ s以上で位相飛越と判断する。上記2つの検出は、FIR用ではプローブ波のみであったが、CO₂用では参照波にもノイズが重畳されるため、これを行う。

4. 回路の製作

AFJC部及び位相比較部は、1個のCPLD(Complex Programmable Logic Device)Altera社製EPM7128SLC84-6に1チャンネル分を書き込み、両面プリント基板に実装した。この基板は干渉計で使用中の1スパンのNIM moduleに収納された位相検出回路基板に上乗せした。位相検出及びAPJC部は、YAGレーザー用は1チャンネル/module、図6に示す写真はCO₂レーザー用で3チャンネル/moduleである。

本回路ではCPLDを用いたが、ここにAlteraのFPGAであるCycloneを用いれば、3チャンネル分を1チップに収納でき、内臓のPLLも利用することができたが、パッケージが0.5mmピッチの100pin-TQFPパッケージであり、自前での実装は困難であったため、今回は利用を見送った。

5. プラズマ実験への適用

FIRレーザー干渉計及び、CO₂レーザー干渉計にAFJCを適用し、LHDプラズマの線電子密度を測定した結果を図7及び、図8に示す。

図7(a)はFIRの場合で、プラズマに水素ペレットが入射されて密度が急上昇し、5回の位相飛越を引き起している。図7(b)はこれにAFJCを行った結果で、全ての位相飛越が修正されている。図8(a)はCO₂の場合で、NBI #3号機の入射による電磁ノイズの影響で位相飛越が発生しており、同図(b)はAFJCにより、これが修正されている。

図7及び図8でAFJCを行った際に生じているスパイク性ノイズは、一旦位相飛越が発生してから2~3 μ s遅れてAFJCが行われるためである。

次に、FIR用のAFJCで補正できなかった例を図9に示す。これは、水素ペレット入射時及び、プラズマが放射崩壊する際に密度が急上昇し、プローブ波が受信不能となっている間に、位相が1フリンジ以上変化したためである。この原因はAFJCを行った時に、補正用に記憶しておいた飛越前のフリンジ・データと、飛越後にプローブ波が受信可能となった時のフリンジとが異なっているためである。

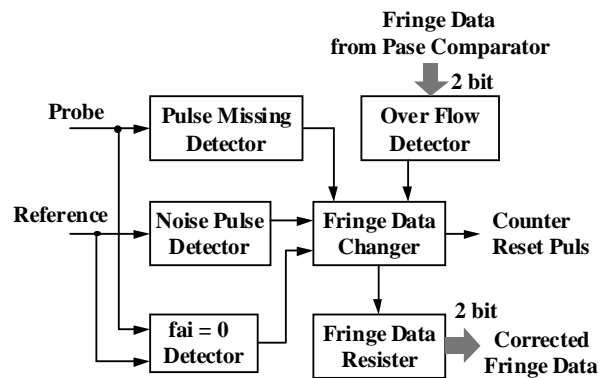
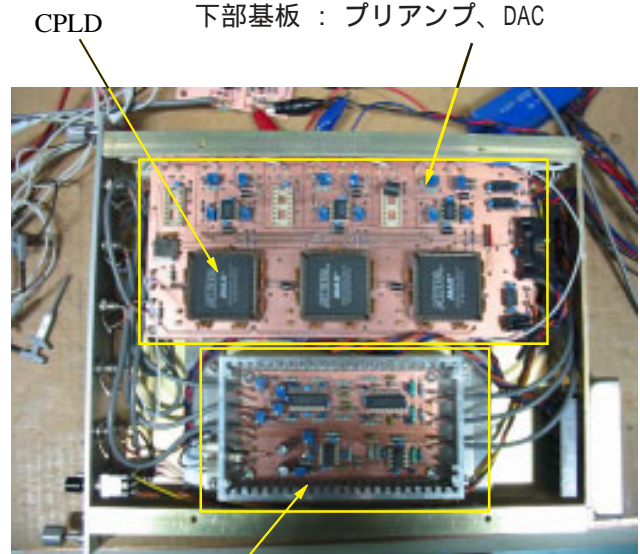


図5. APJC部の構成

上部基板 : 位相比較器、AFJC
下部基板 : プリアンプ、DAC



ローパスフィルタ

図6. 製作したAFJC付位相検出回路

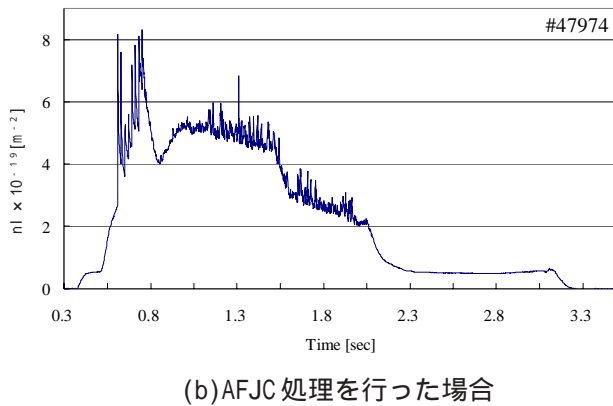
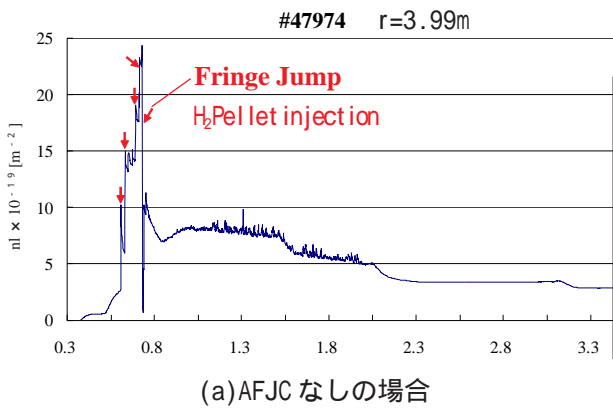


図 7. FIR レーザー干渉計による線電子密度

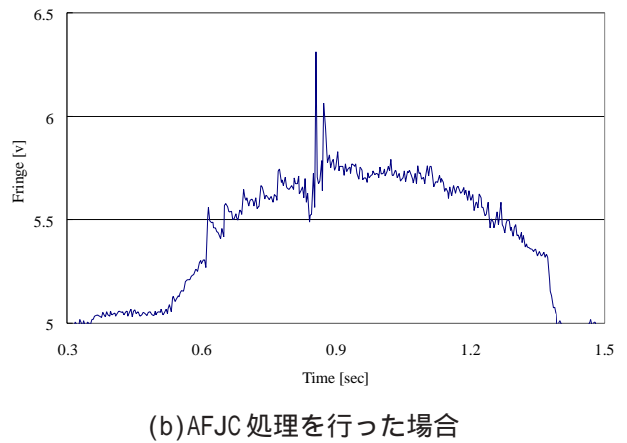


図 8. CO₂ レーザー干渉計による線電子密度

6. まとめ

多フリンジ計測用位相検出回路で発生する位相飛越問題の対策として、位相飛越修正回路 (AFJC) を開発した。本回路を大型ヘリカル装置 (LHD) のプラズマ電子密度計測に適用し、FIR レーザー干渉計で起こる、ペレット入射による位相飛越及び、CO₂ レーザー干渉計で発生する NBI からの電磁ノイズによる位相飛越を修正することができた。本回路は位相飛越修正において万能ではないが、人手による処理時間を大幅に軽減することが期待できる。

7. 今後の課題

本回路の位相比較器には、同期型と非同期型を併用しており、これでは回路規模が大きくなり、また両比較器間の同期が取り難くなるため、PLL を用いて参照波に同期したシステム・クロックを用意する。このため、PLL 内臓の TQFP、BGA パッケージの FPGA が利用できるよう、外注を含めた体制を整備する必要がある。

参考文献

- [1] 伊藤康彦 他 : "実時間位相飛越修正型位相検出回路の設計・製作", 平成 14 年度東京大学総合技術研究会報告集 P3-1
- [2] 秋山毅志 : "高密度核融合プラズマにおける電子密度計測偏光計およびイメージング干渉計の開発", 博士論文
- [3] Y.Ito : "Improved resolution for a multi-fringe phase detection circuit of a far infrared laser interferometer on LHD" Fusion Engineering and Design 56-57 (2001) p965

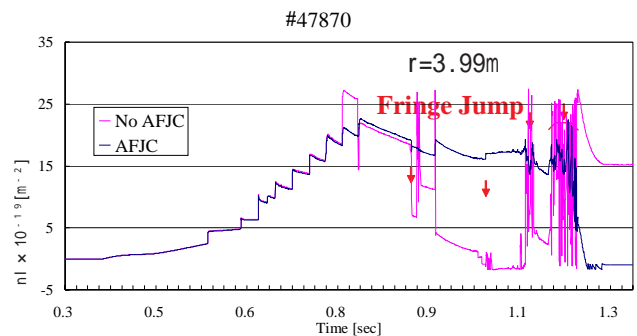


図 9. AFJC 処理に失敗した例