

干渉計測のための高速完全デジタル型位相計の開発

Development of high speed full digital processing phase detector
for interferometer

南貴司¹、秋山毅志²、伊藤康彦²、大谷芳明³、野崎勇樹³、大島慎介¹、
中西秀哉²、山田一博²、舟場久芳²、安原亮²

T.Minami¹, T.Akiyama², Y.Itoh², Y.Ohtani³, Y.Nozaki³, S.Ohshima¹, H.Nakanishi²,
I.Yamada², H.Funaba², R.Yasuhara²

京都大学エネルギー理工学研究所¹, 核融合科学研究², 京都大学エネルギー科学研究科³
IAE Kyoto Univ.¹, NIFS², GSES Kyoto Univ.³

マイクロ波や遠赤外レーザーを用いたプラズマの線積分密度計測のための干渉計は核融合プラズマ研究において基本となる計測装置である。従来の干渉計測はペレット入射などによる急激な密度上昇時に正しく位相変化量を求めることができないフリンジジャンプという問題がある。そこで高速に位相が変化する領域や入力信号レベルが小さい領域でも動作可能なプラズマ干渉計測用の完全デジタル型位相検出器の開発を進めている。

干渉系の IF 信号がゼロレベルをクロスする時間間隔を測定し、そこから位相を計算するのが従来のアナログ型位相検出器は仕組みである。この方法は信号がゼロクロスする情報のみを用いるので信号ノイズや光源の発振が不安定な場合に誤った位相値を導出しやすく、また位相が高速に変化する領域では時間間隔を正確に計測することが困難で、フリンジジャンプの原因を起こす原因になった。完全デジタル型位相検出器は干渉計の IF 信号波形全てを直接 AD 変換し論理回路で信号処理することで波形情報全てを用いて位相を導出する。信号処理方法は干渉計の IF 信号をヒルベルト変換により I/Q 信号に変換し、デジタルローパスフィルタで処理した後に CORDIC アルゴリズムにより極座標変換して位相を求める。本方法は高速フーリエ変換を用いる方法に比べて信号を逐次的に処理していくことができ、位相信号のレイテンシが少なく干渉系も用いた密度フィードバックシステムなどの制御信号として用いることも可能になる。

この完全デジタル型位相計の性能を予測するために、IF 周波数が 1MHz で 30% のランダムなノイズを含む干渉計信号を擬似的に生成し、フリンジジャンプが起こる位相の変化速度をシミュレーションした。100MHz サンプリングの高速 AD コンバータを用いた場合、 $0.85 \times 10^6 \text{ rad/s}$ 以下の位相変化速度でフリンジジャンプが起こらないという結果が得られた。この値はペレット等による密度上昇において想定される位相速度と比較して十分大きい。また、実際に Heliotron

J 装置で計測された IF 周波数が 998kHz の遠赤外レーザーによる干渉計信号を用いて位相検出をシミュレーションした。性能評価のため従来の位相計では、位相導出が困難なレーザー発振が非常に不安定な場合の、図 1(a) に示した干渉計信号を用いたにもかかわらず、図 1(b) に示したように、フリンジジャンプを起こすことなく位相を導出することができた。この時のデジタルローパスフィルタの遮断周波数は 10kHz である。またデジタルローパスフィルタの遮断周波数を低くした場合 (1kHz) の位相信号を参照基準データとして、フリンジジャンプが頻発する遮断周波数が高い場合の位相信号の補正を行う手法を用いることにより、図 1(c) に示すように 100kHz 以上に遮断周波数を高くしても、位相を導出することが可能であることがわかった。本講演では、完全デジタル型位相検出器の実機の開発状況についても、あわせて報告する。

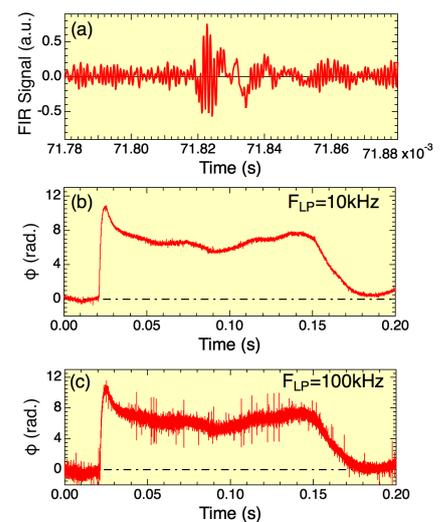


図 1: (a) Heliotron J 装置で計測された遠赤外レーザー干渉計信号、(b) 遮断周波数 10kHz のローパスフィルタを用いた場合の位相信号、(c) 遮断周波数 100kHz のローパスフィルタを用いフリンジジャンプ補正を行った場合の位相信号