

УДК 681.5.08

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ РАЗНОСТИ ФАЗ СИГНАЛА ПУЧКА ИОНОВ И УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Г. В. Карпов¹, А. С. Стюф^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

²Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: G.V.Karpov@inp.nsk.su
a-styuf@yandex.ru

Предложен быстродействующий измеритель разности фаз двух сигналов произвольной формы, следующих с частотой 0,2–6 МГц. Прибор позволяет за время ~ 20 мкс измерить разность фаз по первой гармонике с погрешностью не более 1° . Частота сигналов может меняться со скоростью до 20 МГц/с, а амплитуда — до 40 дБ/с. Основная обработка сигналов и вычисление фазы осуществляются в цифровом виде в программируемой пользователем вентильной матрице. Представлены особенности построения электроники, описаны методы обработки сигналов, приведены параметры измерителя и результаты, полученные на физической установке.

Ключевые слова: цифровая обработка сигнала, измерение фазы, квадратурное детектирование, синхронное детектирование.

Введение. Задача измерения разности фаз двух сигналов широко распространена в различных областях техники и научных исследований. В частности, такую задачу необходимо решать при работе на всех ускорителях тяжёлых частиц, когда требуется измерять разность фаз между высокочастотным ускоряющим напряжением и первой гармоникой сигнала от пучка ионов. В этих случаях измерение усложняется тем, что частота ускоряющего напряжения и амплитуды сигналов изменяются в течение цикла ускорения достаточно высокими темпами. Задача может быть решена, если оба сигнала преобразовать в цифровой вид и подвергнуть обработке в программируемой пользователем вентильной матрице (ППВМ).

Сформулируем задачу на примере измерителя разности фаз сигналов для бустера комплекса NICA (г. Дубна Московской обл.) [1]. Итак, необходимо измерить разность фаз между синусоидальным ускоряющим напряжением и первой гармоникой сигнала пучка ионов, взятой из широкополосного датчика тока [2], в течение цикла ускорения ионов, длящегося около 2 с. Вид сигнала пучка показан на рис. 1. Пучок ионов состоит из четырёх сгустков, вращающихся в кольце бустера с периодом обращения T_0 . На протяжении цикла ускорения частота меняется от 0,5 до 6 МГц, амплитуда сигнала увеличивается примерно на порядок, общий диапазон амплитуд сигналов составляет от 50 мкВ до 10 мВ. Погрешность измерения фазы должна быть не более 1° , минимальное время измерения 20 мкс. Помимо средней фазы от сигналов всех четырёх сгустков за период T_0 необходимо измерять фазы отдельных сгустков с погрешностью не более 5° . Данная задача была успешно решена на основе применения метода синхронного детектирования [3], реализованного в цифровом виде. На базе сигнала ускоряющего напряжения формируются два ортогональных опорных напряжения, используемых для квадратурного синхронного детектирования сигнала пучка.

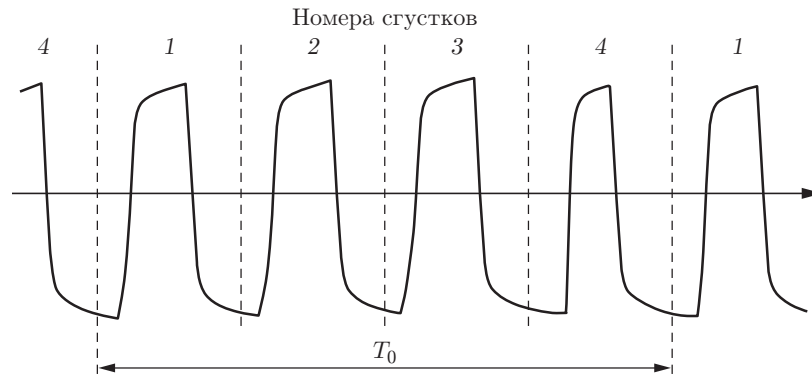


Рис. 1

Цель данной работы — изготовление прибора, позволяющего измерять разность фаз двух сигналов с необходимой точностью в большом диапазоне изменения амплитуд и частот исследуемых сигналов.

Принцип работы измерителя разности фаз сигналов. Функциональная схема измерителя представлена на рис. 2. Сигналы от источников 1 и 2 (S_1 и S_2) поступают в два идентичных канала, в которых после усиления и фильтрации преобразуются в цифровой вид с помощью 14-разрядного АЦП и передаются в ППВМ. Поскольку основной блок электроники находится на расстоянии десятков метров от источников сигналов, для уменьшения влияния помех на соединительные кабели вблизи источников сигналов расположены маломощные предусилители. Коэффициенты передачи каналов могут программироваться в диапазоне 28 дБ, что позволяет расширить динамический диапазон входных сигналов. Фильтр нижних частот (ФНЧ) с полосой ~ 50 МГц ограничивает полосу входного сигнала до частоты Найквиста. Вся цифровая обработка сигналов и вычисление фазы осуществляются в ППВМ "Cyclon-3" фирмы "Altera" [4]. Результаты измерений в реальном времени передаются через быстрый канал связи, а также записываются в память компьютера, откуда могут быть прочитаны через специальный порт передачи данных.

Алгоритм обработки сигнала. Структура ППВМ показана на рис. 3. В основе процесса измерения фазы лежит квадратурное синхронное детектирование. Для опорного сигнала S_2 задаётся ортогональная компонента $S_{2\text{ort}}$. Формируется эта компонента путём прохождения сигнала S_2 через цепочку регистров, запись в каждый последующий регистр осуществляется с задержкой, равной периоду тактовой частоты ППВМ ($\sim 8,7$ нс). Компонента $S_{2\text{ort}}$ создаётся на основе сигналов S_{2i} и S_{2j} , взятых с выходов регистров i, j , для

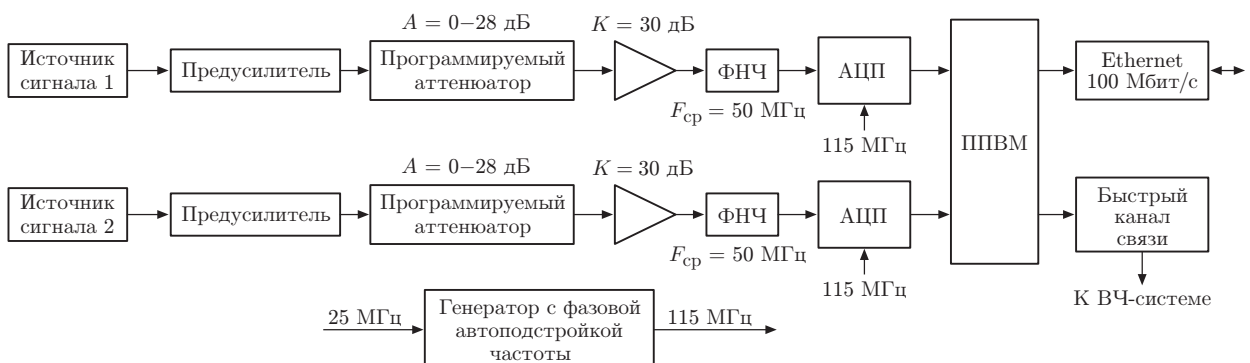


Рис. 2

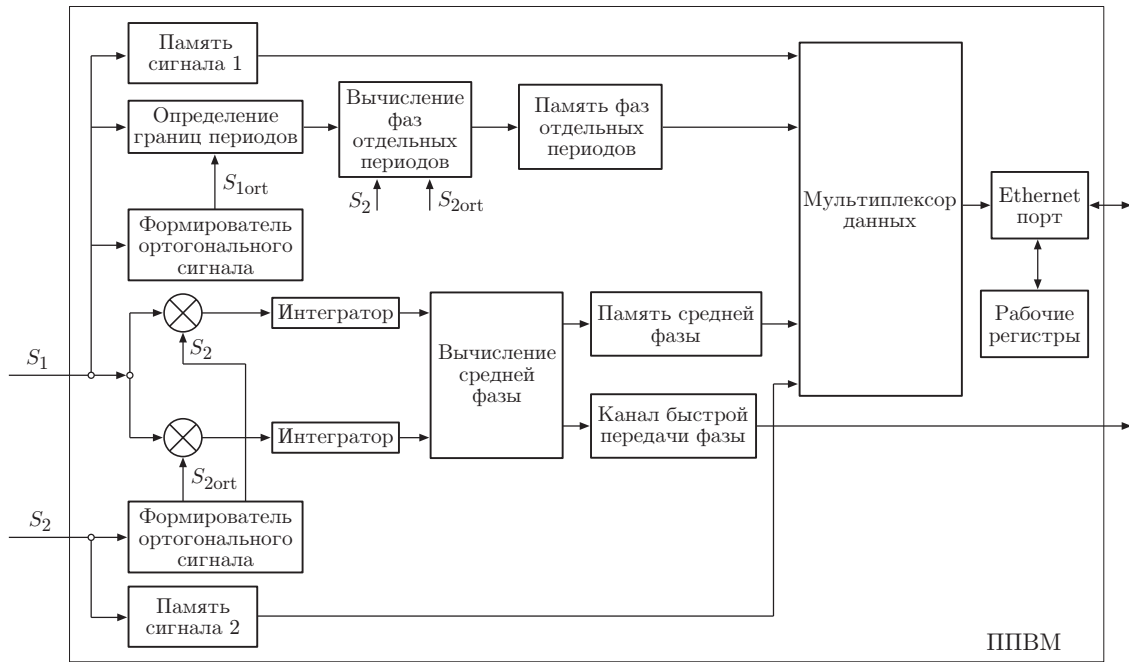


Рис. 3

которых величина $E = \int_0^T S_2 S_{2ort} dt$ меняет знак, переходя через нуль (T — период сигнала).

При вычислении S_{2ort} используется линейная интерполяция.

Далее происходит вычисление квадратурных компонент F_{sin} и F_{cos} сигнала S_1 :

$$F_{sin} = \int_0^{nT} S_1 S_2 dt = \frac{nT}{2} \sin(\varphi_0), \quad (1)$$

$$F_{cos} = \int_0^{nT} S_1 S_{2ort} dt = \frac{nT}{2} \cos(\varphi_0), \quad (2)$$

где φ_0 — разность фаз между первыми гармониками S_1 и S_2 ; n — число периодов сигнала, в течение которого осуществляется интегрирование.

Величина n выбирается как целая часть отношения T_n к T , где T_n — заданное время одного измерения (устанавливается в пределах 20–50 мкс). Далее разность фаз φ_0 находится как арктангенс отношения F_{sin}/F_{cos} . Арктангенс вычисляется с использованием итерационного алгоритма CORDIC [5].

Определение разности фаз для отдельного сгустка, например сгустка 2 (из четырёх), происходит путём интегрирования в формулах (1) и (2) в течение каждого второго периода сигнала из каждой четвёрки периодов. Для нахождения границ сгустков выделялась первая гармоника сигнала и задавалась ортогональная к нему компонента S_{1ort} с помощью того же самого алгоритма, что и S_{2ort} . Границы сгустков определялись как точки пересечения компоненты S_{1ort} с нулевым уровнем.

Ортогональные компоненты S_{1ort} и S_{2ort} вычисляются непрерывно, в течение того же самого времени T_n , что и разность фаз. Таким образом, осуществляется слежение за частотой сигналов в случае изменения последней на протяжении цикла измерения.

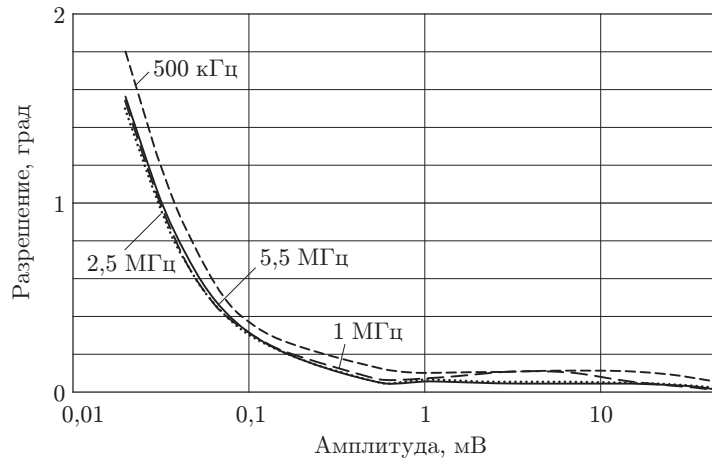


Рис. 4

Точность измерения. Погрешность измерения средней разности фаз (усреднённой по всем сгусткам) определяется главным образом тремя факторами:

- ошибкой нахождения ортогонального сигнала $S_{2\text{ort}}$,
- амплитудными шумами электроники в канале сигнала S_1 ,
- температурным дрейфом.

Если разность фаз между компонентами S_2 и $S_{2\text{ort}}$ отличается на величину $\Delta\varphi$, погрешность измерения фазы будет примерно равна $\Delta\varphi$. Величина ошибки $\Delta\varphi$ определяется главным образом задержкой в вычислении $S_{2\text{ort}}$ при быстром изменении частоты сигнала. По результатам моделирования и экспериментального тестирования можно сделать следующий вывод: при скорости изменения частоты сигнала до 20 МГц/с ошибка $\Delta\varphi$ не превышает $\sim 0,4^\circ$.

Влияние амплитудных шумов электроники в канале сигнала S_1 было исследовано экспериментально на лабораторном стенде. Зависимость среднеквадратичной ошибки измерения (или разрешения) от амплитуды сигнала показана на рис. 4. Как видно из рисунка, при напряжениях сигнала более 30 мкВ разрешение измерений фазы лучше 1° .

Проведённые испытания показали, что при изменении температуры от 25 до 45 °С измеренная разность фаз меняется менее чем на $0,3^\circ$.

Таким образом, можно считать, что при реальных амплитудах входных сигналов максимальная суммарная погрешность измеренной средней для всех сгустков разности фаз не превышает 1° . Проведённые аналогичные измерения для фаз отдельных сгустков показали, что погрешность измеренной разности фаз не превышает 4° .

Заключение. Разработанный в Институте ядерной физики СО РАН измеритель разности фаз позволяет за время ~ 20 мкс определять разности фаз сигналов, частота которых меняется со скоростью до 30 МГц/с, а амплитуда — до 40 дБ/с, при этом обеспечивая точность измерений лучше 1° . Это достигнуто за счёт выполнения основного объёма обработки сигналов на цифровом уровне в ППВМ. Измеритель успешно испытан с реальным пучком ионов на установке «Нуклотрон» в г. Дубна [6]. Были получены зависимости фазы пучка по отношению к фазе ускоряющего ВЧ-напряжения в течение всего цикла ускорения пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trubnikov G., Agapov N., Alexandrov V. et al. Project of the Nuclotron-based ion collider facility (NICA) at JINR // Proc. of the XXIII Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2012). Saint-Petersburg, Russia, Sept. 24–28, 2012. P. 82–84.

2. **Сисакян А. Н., Сорин А. С., Агапов Н. Н. и др.** Ускорительно-накопительный комплекс NICA: Технический проект // Объединенный институт ядерной физики, Дубна. 2009. URL: http://nucloweb.jinr.ru/nica/TDR/Part_VI.pdf (дата обращения: 16.06.2013).
3. **Титце У., Шенк К.** Полупроводниковая схемотехника. М.: ДМК Пресс, 2007. Т. 2. 589 с.
4. **Cyclone III Device Handbook** // Сайт фирмы "Altera". 2012. URL: http://www.altera.com/literature/hb/cyc3/cyclone3_handbook.pdf (дата обращения: 08.01.2014).
5. **Ray Andraka.** A survey of CORDIC algorithms for FPGA based computers // Andraka Consulting Group. 1998. URL: <http://www.andraka.com/files/crdcsrvy.pdf> (дата обращения: 08.01.2014).
6. **Kovalenko A. D.** NUCLOTRON: first beams and experiments at the superconducting synchrotron in Dubna // Объединенный институт ядерной физики, Дубна. 2004. URL: http://nucloserv.jinr.ru/text/2004/nuclotron_overview.htm (дата обращения: 16.06.2013).

Поступила в редакцию 12 сентября 2013 г.
