

О. В. НЕПОМНЯЩИЙ, В. А. ХАБАРОВ, И. Н. РЫЖЕНКО, А. А. КОМАРОВ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНОЙ ОШИБКИ СИГНАЛА СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Рассматриваются проблемы увеличения пропускной способности каналов модемной спутниковой связи и методы расчета частотной ошибки с позиций теории и практики цифровой обработки сигналов. Предложен метод расчета модуля комплексного числа на основе быстрого преобразования Фурье, позволяющий значительно снизить время обработки сигнала. Приведены результаты испытаний однокристалльных вычислителей, входящих в состав разрабатываемого комплекса спутниковой связи.

Ключевые слова: спутник, канал связи, цифровая обработка сигнала, система на кристалле, алгоритм.

Постоянно возрастающие объемы информации, передаваемой по каналам спутниковой связи, требуют поиска новых решений при создании приемопередающей аппаратуры. Известные решения, направленные на сокращение времени обработки сигнала, базируются на увеличении частоты передачи, снижении избыточности информации вследствие паразитных составляющих сигнала и использовании различных видов модуляции [1]. Одним из перспективных направлений повышения качества каналов спутниковой связи является использование высокостабильных генераторов частот, однако это существенно увеличивает конечную стоимость систем. Альтернативным решением является использование низкостабильных генераторов частоты с корректировкой сигнала по частотному смещению на принимающей стороне [2].

В рамках этого подхода решена задача увеличения скорости цифровой обработки сигнала демодулятором канала связи. При проектировании демодулятора было определено, что наибольший эффект достигается при уменьшении времени коррекции по частоте принятого сигнала в целях исключения смещения при переносе сигнала на нулевую частоту.

В большинстве случаев реализация алгоритмов коррекции осуществляется программно-аппаратным путем на базе процессоров цифровой обработки сигнала — DSP (Digital Signal Processor). Однако при высокой плотности информационного потока такие решения не обеспечивают требуемой скорости передачи данных, являясь также достаточно дорогостоящими и энергоемкими.

На начальной стадии алгоритма коррекции с помощью быстрого преобразования Фурье [3] вычисляется спектральная ошибка сигнала, при этом используется многократная операция вычисления модуля комплексного числа. Эта операция наиболее затратна по времени при расчетах спектра сигнала. При этом следует отметить, что большинство из существующих методов поиска модуля комплексной переменной (МКП) не позволяют осуществлять

обработку сигнала в режиме реального времени, поскольку не обеспечивают точность результата либо требуют больших временных затрат при расчете.

На рис. 1 представлена архитектура проектируемого модуля частотной коррекции, входящего в состав системы спутниковой связи. При проектировании данного модуля решалась частная задача аппаратной реализации системы расчета МКП. Известен [4] метод нахождения модуля комплексного числа:

$$r = |a + ib| = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (1)$$

При высокой скорости передачи данных в режиме реального времени возникает проблема, связанная со сложностью реализации многократных операций возведения в квадрат и извлечения корня, дающих результат с высокой точностью.

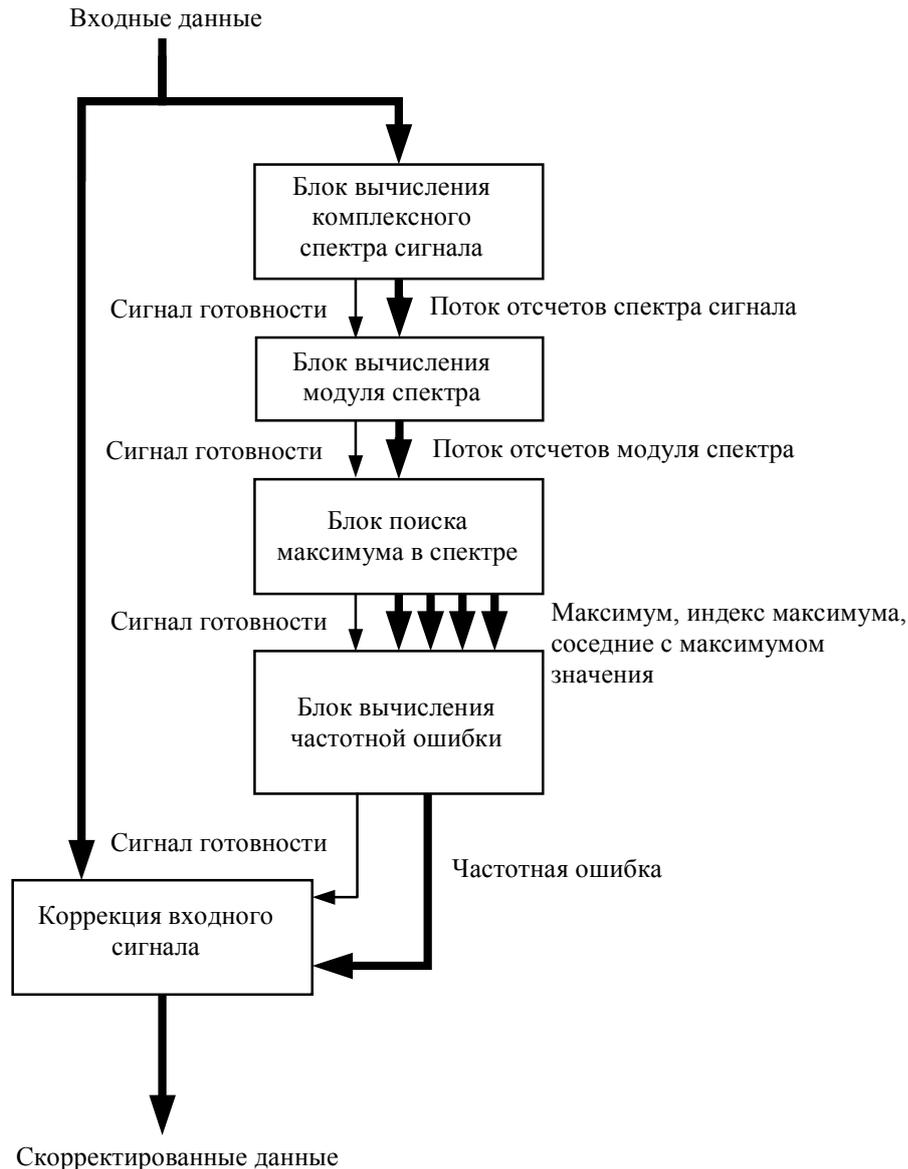


Рис. 1

Основой для разработки аппаратно-реализуемого алгоритма вычислений стал известный метод нахождения модуля комплексного числа, предложенный в работе [2]:

$$r = \max + \beta \cdot \min, \quad (2)$$

где \max — наибольшее значение из a и b , \min — наименьшее; β — коэффициент, принятый в работе [2] равным 0,375.

Известно [2], что комплексное число может быть интерпретировано как вектор. Метод, описанный в работе [2], имеет разную точность при различных значениях угла φ наклона вектора.

В программной среде MatLab были реализованы модели определения модуля комплексного числа согласно выражениям (1) и (2). На рис. 2 представлен результат вычисления модуля r по формуле (2) при различных значениях угла φ и $\beta=0,2774$, при этом истинное значение $r=1$. На графике прямая линия соответствует множеству векторов единичной длины, а кривая — длине вектора, рассчитанной согласно выражению (2). Получена минимальная средняя ошибка, равная 3,12 %, что недопустимо при расчетах частотной поправки.

Авторами настоящей статьи предложен метод вычисления модуля комплексного числа, обеспечивающий, с одной стороны, возможность аппаратной реализации в виде однокристалльной системы, а с другой — более высокие характеристики по производительности и достаточные по точности вычислений. Метод основан на расчетах в соответствии с формулой (2) и принципе подстановки „плавающих“ коэффициентов. Согласно работе [5] метод реализован в

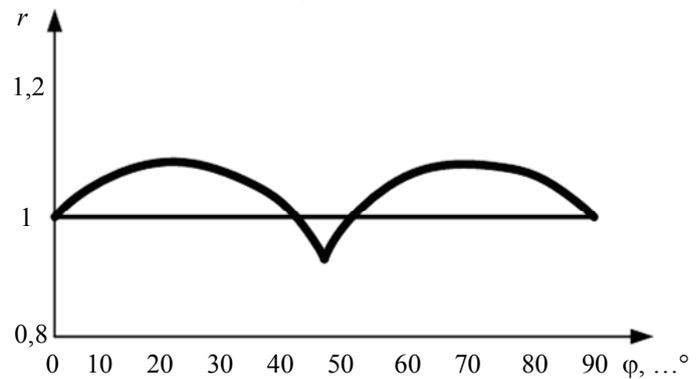


Рис. 2

виде конфигурируемой подсистемы, входящей в состав однокристалльного модуля управления демодулятором. Такой подход позволил обеспечить минимальное время расчета за счет высокой опорной частоты вычислителя и оптимизированной топологии кристалла.

При проектировании аппаратно-реализуемого алгоритма обработки сигнала было решено использовать различные значения β для разных углов φ . Однако расчет угла наклона вектора в режиме реального времени на основе его координатной сетки является не менее сложной вычислительной задачей.

На первом шаге алгоритма определяются максимальное (max) и минимальное (min) значения мнимой и действительной части комплексного числа (по модулю). Далее производится поиск старшей значащей единицы в выбранном максимальном значении числа и определяется вес (разряд). Используя несколько разрядов в выбранном минимальном значении числа, начиная с найденного веса можно с некоторой точностью определить диапазон углов, к которому принадлежит вектор. При этом точность расчетов можно повысить за счет увеличения количества анализируемых разрядов, что позволяет вычислить оптимальные значения коэффициентов β . Конкретное значение коэффициента β определяется из таблицы коэффициентов, которые были получены в результате экспериментального моделирования с помощью пакета MatLab (табл. 1).

Таблица 1

Разрядность выбранного минимального числа	$\varphi_{\min}, \dots^\circ$	$\varphi_{\max}, \dots^\circ$	r	β при двухступенчатом сложении
000	76	90	0,0875	0,0859
001	64	83	0,1494	0,1484
010	53	76	0,2493	0,2500
011	45	69	0,3153	0,3145
100	45	63	0,3346	0,3281
101	45	58	0,3541	0,3750
110	45	53	0,3739	0,3750
111	45	49	0,3939	0,3906

Был разработан и апробирован алгоритм расчета, согласно которому на первоначальном этапе определяются значения \min и \max , далее выделяется номер разряда старшей единицы значения \max . Затем, начиная от того же разряда в значении \min и исходя из требуемой точности расчета, задаются от 2 до 8 дополнительных младших разрядов числа \min . Угловой диапазон (количество углов расчета) для требуемого вектора определяется с учетом дополнительных разрядов числа \min . На заключительном шаге алгоритма для данного диапазона по сформированной таблице считывается значение β : например, при определении β на основе трех разрядов \min получаем 8 диапазонов. Для каждого диапазона найдено соответствующее значение β , при котором средняя ошибка минимальна.

В целях оптимизации топологии однокристального вычислителя операции умножения были заменены на операции логического сдвига, сложения и двухступенчатого сложения:

$$r = (\max + \min \gg x) + (\min \gg y + \min \gg z).$$

На рис. 3 представлена зависимость $r(\varphi)$, вычисленная с учетом „плавающих“ коэффициентов (рис. 4).

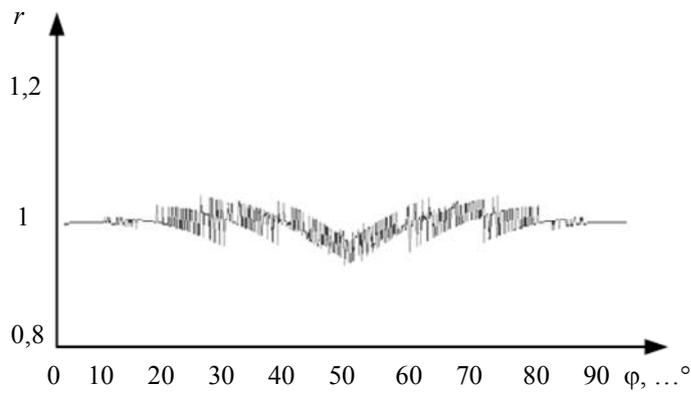


Рис. 3

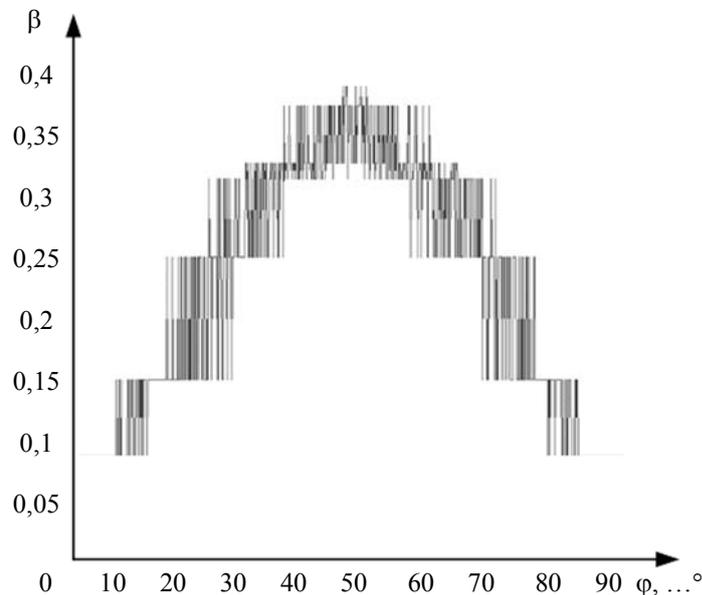


Рис. 4

Для проверки правильности предложенного метода были разработаны и протестированы аппаратные вычислители МКП для методов расчета по формулам (1) и (2), а также для метода „плавающих“ коэффициентов. Все три вычислителя были реализованы в виде СБИС на базе FPGA серии Spartan6 компании “Xilinx” (США). Следует отметить, что в целях минимизации задержек распространения сигнала при формировании топологии системы на кристалле

таблица коэффициентов размещалась в сверхоперативной памяти в непосредственной близости от вычислителя. Результаты тестирования СБИС приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр расчета	Метод		
	классический	Nezami [2]	„плавающих“ коэффициентов
Частота, МГц	150	200	180
Средняя ошибка, %	0	4,2	1,37
Максимальная ошибка	0	9,6	6,5
Количество тактов на одно вычисление (без учета конвейеризации)	15	4	11

По результатам исследований и тестирования определены принципы обработки входного сигнала однокристалльным демодулятором, обеспечивающие наибольшую временную задержку. Предложен метод аппаратной коррекции сигнала, базирующийся на быстром преобразовании Фурье и использующий принцип „плавающих“ коэффициентов. В отличие от программно-аппаратных решений, предложенный метод реализован только на аппаратном уровне, что позволяет достичь максимальной пропускной способности канала. Реализованы подсистемы аппаратной коррекции, входящие в состав специализированной СБИС демодулятора сигнала спутниковой связи, и проведены предварительные испытания моделей и аппаратных систем демодуляции. В ходе испытаний достигнуты скорости обработки сигнала, позволяющие осуществлять коррекцию частотной ошибки в режиме реального времени на частотах преобразования свыше 180 МГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Elbert B. R.* The Satellite Communication Applications Handbook. Boston — London: Artech House Inc., 2004.
2. *Nezami M. K.* Wireless Digital Receiver Techniques. N. Y.: Noble Pub, 2004.
3. *Лайонс Р.* Цифровая обработка сигналов. М.: Бинном, 2006.
4. *Dubrulle A. A.* A class of numerical methods for the computation of pythagorean sums // IBM J. of Research and Development. 1983. Vol. 27, iss. 6. P. 582—589.
5. *Непомнящий О. В., Хныкин А. В.* Анализ проектирования вычислительных систем на кристалле // Исследования наукограда. 2012. № 1(1). С. 42—46.

Сведения об авторах

- Олег Владимирович Непомнящий** — канд. техн. наук, доцент; Сибирский федеральный университет, кафедра вычислительной техники, Красноярск; E-mail: 2955005@gmail.com
- Виталий Александрович Хабаров** — канд. техн. наук; Сибирский федеральный университет, кафедра вычислительной техники, Красноярск; E-mail: haba@inbox.ru
- Игорь Николаевич Рыженко** — аспирант; Сибирский федеральный университет, кафедра вычислительной техники, Красноярск; E-mail: rodgi@kras.ru
- Алексей Александрович Комаров** — аспирант; Сибирский федеральный университет, кафедра вычислительной техники, Красноярск; E-mail: komarovalal@gmail.com

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
17.09.13 г.