

УДК 621.396

А.В. Шахматов

Алгоритм цифровой демодуляции фазоманипулированных сигналов с произвольным индексом модуляции, ориентированный на использование цифрового синтезатора частоты

Предложен алгоритм цифровой демодуляции фазоманипулированных сигналов с произвольным индексом модуляции, основанный на фазо-цифровом преобразовании и делении фазовой плоскости на сектора с последующим декодированием номера текущего сектора в информационную последовательность. Рассматривается способ расширения полосы захвата ФАПЧ за счет использования предварительной оценки разностной частоты в квадратурном сигнале. Приводится структурная схема реализации алгоритма.

Ключевые слова: демодуляция ФМ-сигналов, фазовая манипуляция, фазовая плоскость, прямой синтез частоты, программируемые логические интегральные схемы.

Построение ФМ демодуляторов на старых классических принципах связано с достаточно сложными аппаратными решениями и требуют тщательной настройки [1, 2]. При этом появление современных цифровых решений позволяет реализовать весьма сложные цифровые алгоритмы обработки сигналов в пределах одного компактного корпуса микросхемы. К этой категории устройств можно отнести программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

Выбор ПЛИС в качестве базы для разработки алгоритма демодуляции фазоманипулированных сигналов обусловлен возможностью применения гибких архитектурных решений при проектировании. Такой подход, известный как проектирование «систем на кристалле» позволяет встроить в тракт обработки информации произвольные IP-ядра цифровой обработки сигналов. Таким образом, возможно гибкое конфигурирование разрабатываемой системы для различных задач, таких как помехоустойчивое кодирование и обработка информации на различных уровнях.

Еще одним современным решением в области демодуляции ФМ-сигналов является применение технологии прямого синтеза частоты (DDS) [3] в опорном генераторе. Этот узел способен формировать на выходе требуемую частоту согласно управляющим сигналам. DDS уникальны своей цифровой определенностью – генерируемый ими сигнал синтезируется со свойственной цифровым системам точностью. Частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени точно известны и подконтрольны.

Одни из наиболее эффективных методов анализа сигналов с угловой манипуляцией – фазо-цифровое преобразование (ФЦП) и обработка полученной «фазовой линии» [4]. В современных приемниках применяется метод квадратурной демодуляции. В основе метода лежит выделение двух компонент сигнала – I (in-phase, синфазная) и Q (quadrature, квадратурная). Такое преобразование можно выполнить с помощью современной элементной базы как в аналоговом, так и в цифровом виде. Для получения фазовой линии затем лишь необходимо вычислить арктангенс частного двух компонент.

Описание алгоритма. Описываемый алгоритм построен на одном из свойств цифрового синтезатора частоты (Direct Digital Synthesizer, DDS) – прямое изменение фазы синтезируемого сигнала. Это позволяет очень быстро установить фазовую синхронизацию генератора и принимаемого сигнала.

Данный алгоритм применим для демодуляции многопозиционных фазоманипулированных сигналов с числом $M = 2 \dots 16$ и фазоманипулированных сигналов с произвольным индексом модуляции, в зависимости от которого выбирается число M . Также предлагается способ значительно расширить полосу захвата петель ФАПЧ несущего сигнала вплоть до 10–20 кГц, осуществив предварительно оценку разностной частоты между генератором и входным сигналом.

В данной реализации демодулятора блоки «Цифровой синтезатор частоты» и «Квадратурный приемник» выполнены как внешние элементы, поэтому они вынесены из структурной схемы

(рис. 1). Однако вполне возможна их реализация в цифровом виде на той же платформе ПЛИС вместе с остальными блоками демодулятора. Также в структуру алгоритма входят [1, 2] «Блок вычисления фазы», «Блок вычисления текущего сектора и фазовой ошибки», «Декодер», блок «Вычисление фазы генератора» и блок для расширения полосы ФАПЧ «Оценки разностной частоты».

Рассмотрим порядок работы цифрового демодулятора.

На вход «Блока вычисления фазы» поступают оцифрованные отсчеты синфазной (I) и квадратурной (Q) компонент входного сигнала, на основании которых он вычисляет текущее значение фазы. Работа блока основана на преобразовании прямоугольных координат в полярные координаты, но поскольку прямое вычисление арктангенса по I - и Q -компонентам затруднено, при реализации на ПЛИС используется алгоритм CORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer) [5]. Идея метода заключается в сведении вычисления значений сложных функций к набору простых шагов вида сложений, вычитаний и сдвига. Кроме того, поскольку шаги однотипны, то при аппаратной реализации алгоритм поддается развёртыванию в конвейер либо свёртыванию в цикл. Результатом работы блока является нормированный 8-битный вектор.

Поскольку в начальный момент частота опорного генератора может довольно сильно отличаться от частоты несущего сигнала, изменение значения текущей фазы будет иметь вполне определенную скорость и направление. Оценив эти параметры, с некоторой точностью можно получить значение разностной частоты и ее знак, что позволит внести корректировку частоты опорного генератора и уменьшить разностную частоту до значений, которых будет достаточно для уверенного захвата петли ФАПЧ. Экспериментальные данные показали, что применение блока «Оценки разностной частоты» позволяет осуществить фазовую синхронизацию генератора и входного сигнала при начальных отклонениях по частоте на 15 кГц, при этом полоса захвата ФАПЧ составляла 500 Гц.

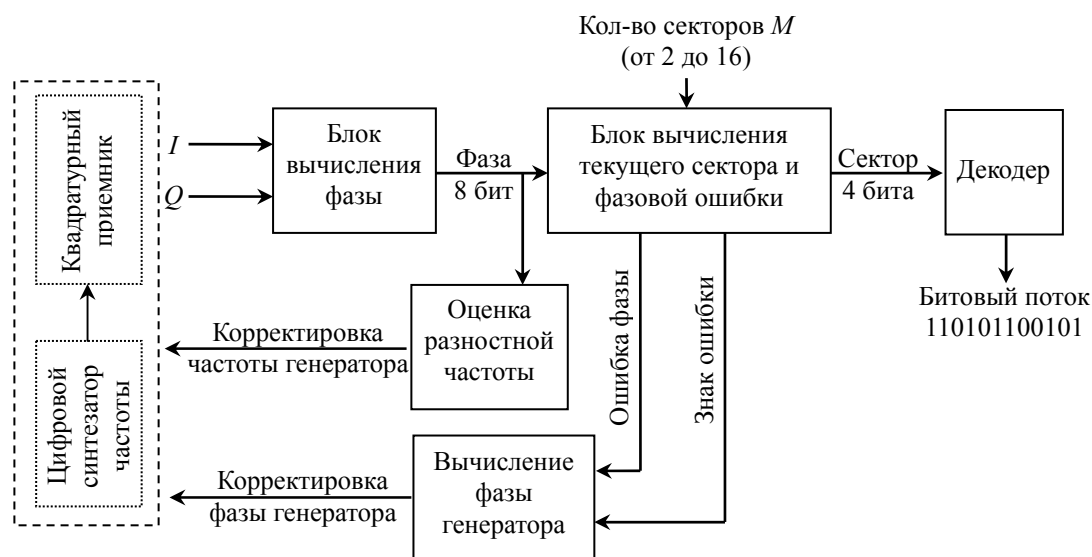


Рис. 1. Структурная схема демодулятора

Механизм фазовой автоподстройки включается после первоначальной корректировки частоты опорного генератора. Он реализован в «Блоке вычисления текущего сектора и фазовой ошибки». Для корректной работы этого блока необходимо задать количество секторов на фазовой плоскости, отражающих количество возможных фазовых состояний. Поскольку нет ограничения на четность секторов, то возможно использовать данный алгоритм при любых индексах ФМ-сигнала. Количество секторов выбирается исходя из соотношения $M \approx \frac{360^\circ}{\text{Инд.мод}}$. Так, для индекса модуляции 70° –

$M = 5$, для 120° – $M = 3$ и т.п. Сектора располагаются так, что середина первого сектора всегда находится на оси Q (рис. 2).

Выходными данными «Блока вычисления текущего сектора и фазовой ошибки» являются: текущий сектор, текущая фазовая ошибка и ее знак (рис. 3). Текущий сектор показывает, в каком из секторов на фазовой плоскости располагается точка фазы входного сигнала. Относительно середи-

ны сектора вычисляется ошибка фазы и знак этой ошибки – $\pm\delta$, соответственно диапазон подстройки фазы генератором составляет $\left[-\frac{180^\circ}{M}, \frac{180^\circ}{M}\right]$.

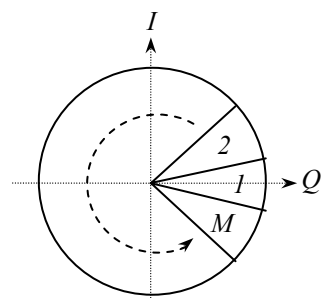


Рис. 2. Деление фазовой плоскости на сектора

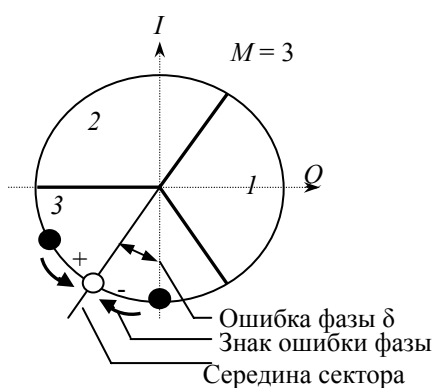


Рис. 3. Фазовая автоподстройка при $M = 3$

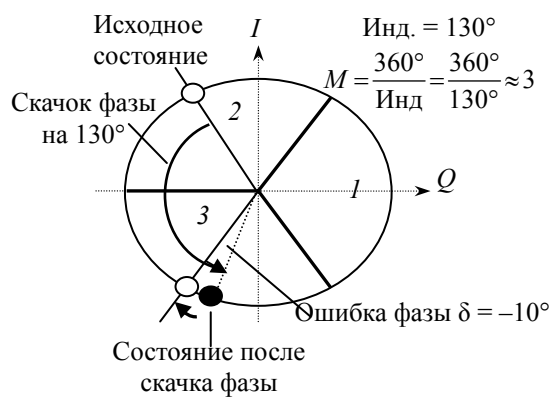


Рис. 4. Фазовая автоподстройка при скачке фазы на 130° и $M = 3$

Для получения демодулированных данных используется блок «Декодер». В зависимости от типа модуляции (PSK, BPSK, QPSK, M-PSK) и информации о текущем секторе на фазовой плоскости блок выдает соответствующий информационный бит. Так, для PSK с произвольным индексом модуляции или BPSK изменение текущего сектора приводит к инверсии информационного бита, для M позиционных типов модуляции номер сектора преобразуется в последовательность информационных бит.

Таким образом, последовательность работы алгоритма состоит из следующих шагов:

1. Оценка смещения частоты генератора от частоты несущего сигнала.
2. Корректировка частоты генератора.
3. Захват ФАПЧ и демодуляция.

Заключение. Описанный алгоритм разработан специально для использования в ПЛИС, поэтому все его блоки легко реализуются в программируемой логике при достаточно небольших затратах ресурсов.

Использование цифрового синтезатора частоты (DDS синтезатора) позволяет реализовать фазовую автоподстройку, непосредственно изменяя мгновенное значение фазы генератора. Это позволяет сократить время захвата петли ФАПЧ.

Применение оценки разностной частоты в квадратурных составляющих сигнала позволяет предварительно подстроить частоту генератора, значительно расширив полосу захвата ФАПЧ.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» ГК №П757 от 20.05.2010 и №Т1032 от 27.05.2010.

Литература

1. Meyr Н. Digital Communication Receivers: Synchronization, Channel Estimation, and Signal Processing / Н. Meyr, М. Moeneclaey, S.A. Fechtel. – New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998. – 843 p.
2. Окунев Ю.Б. Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами. – М.: Радио и связь, 1991. – 296 с.
3. Fundamentals of Direct Digital Synthesis (DDS). MT-085 TUTORIAL / Analog Device Inc, 2008. – URL: <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-085.pdf>.
4. Скляр Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
- 5 Байков В.Д. Аппаратурная реализация элементарных функций в ЦВМ / В.Д. Байков, В.Б. Смолов. – Л.: ЛГУ, 1975. – 96 с.

Шахматов Александр Владимирович

Аспирант каф. безопасности информационных технологий СибГАУ, г. Красноярск

Тел.: 8-905-997-32-55

Эл. почта: sanecsan@rambler.ru

Shakhmatov A.V.

Algorithm of digital demodulation of multi-position phase-shift keying signals with an arbitrary index of modulation oriented to the usage of a digital frequency synthesizer

In the paper we offer the algorithm of digital demodulation of multi-position PSK-signals with an arbitrary index of the modulation, based on phase-digital conversion and division of a phase plane into sectors with the subsequent decoding of number of current sector in informational sequence. The way for the extension of PLL capture bar at the expense of usage of a tentative estimation of a difference frequency in a quadrature signal is considered. The block diagram of algorithm implementation is given in the paper.

Keywords: demodulation of PM signals, phase-shift keying, a phase plane, direct synthesis of the frequency, programmed logical integrated networks.