

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОГРАНИЧЕННОГО ЧИСЛА РАЗРЯДОВ АЦП ЦИФРОВОГО ПРИЕМНИКА НА ОШИБКУ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ФАЗ ПРИНИМАЕМЫХ СИГНАЛОВ

И.А. Мошкин, Н.С. Никитин

В данной статье исследуется влияние снижения количества разрядов АЦП цифрового приемника на ошибку измерения разности фаз принимаемых сигналов. Описывается модель для проведения исследований, разработанная в среде MATLAB. Моделирование производится при разрядностях АЦП 8, 4, 2, 1 бита в полосе частот от 0,125 до 0,375 частоты дискретизации. При снижении разрядности с 8 до 1 бита наблюдается увеличение математического ожидания ошибки и среднеквадратичного отклонения в 9,6 раза. Отмечены основные особенности ошибки измерения разности фаз принимаемых сигналов в условиях малой разрядности АЦП цифрового приемника, сформулированные рекомендации по снижению данной ошибки измерения.

Ключевые слова: разность фаз, цифровой приемник, ошибка измерения, разрядность АЦП.

Введение

Одним из наиболее важных параметров, измеряемых радионавигационным цифровым приемником, является угол прибытия входных сигналов, измеряемый посредством сигналов от элементов антенной решетки. Этот параметр используется для определения местоположения ракет, радаров, самолетов и другого оборудования. Ошибка вычисления угла прибытия входных сигналов пропорциональна ошибке измерения разности фаз входных сигналов [1].

Очевидно, что точность измерения разности фаз принимаемых сигналов уменьшается при уменьшении количества разрядов АЦП, однако задача уменьшения разрядности АЦП остро стоит перед современными разработчиками радиоэлектронной аппаратуры. При уменьшении количества разрядов АЦП снижаются требования к элементной базе, а именно к вы-

числительным устройствам и самим АЦП, что существенно снижает сложность, стоимость и габариты разрабатываемого устройства. Данная задача особенно актуальна в условиях ограничений по поставке современной элементной базы в нашу страну, вызванных санкциями определенных западных стран. В связи с вышесказанным, данная статья ставит перед собой цель оценить влияние снижения количества разрядов АЦП цифрового приемника на ошибку измерения разности фаз принимаемых сигналов.

Для измерения разности фаз принимаемых сигналов в данном исследовании используется быстрое преобразование Фурье с последующим вычислением разности аргументов соответствующих частотных бинов. Использование быстрого преобразования Фурье в системах радионавигации обусловлено тем, что помимо возможности измерения разности фаз сигналов имеется информация о частоте и возможность работы в многосигнальной обстановке [2, 3].

Для оценки влияния ограниченного числа разрядов АЦП цифрового приемника на ошибку измерения разности фаз принимаемых сигналов в модели используются математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение (СКО) ошибки.

Описание исследовательской модели и результаты исследования

Структурная схема модели для проведения исследований, реализованная в среде математического моделирования MATLAB [4] представлена на рис. 1.

Для приближения результатов моделирования к результатам работы реального цифрового приемника исходный гармонический должен суммироваться с шумовым сигналом. Выбранное соотношение сигнал/шум равно 20 дБ. Для обеспечения заданного соотношения сигнал/шум предусмотрены генераторы шума А3 и А6. Генератор сигналов А1 формирует гармонический сигнал, который на суммируется с шумовым сигналом в сумматорах А4 и А6. На сумматор А6 поступает сигнал с фазовым сдвигом распределенным по равномерному закону от 0 до 2π . Данный фазовый сдвиг обеспечивается устройством сдвига фазы А2. После сумматоров А4 и А6 исходный и фазосдвинутый сигнал в сумме с шумом поступают на входы АЦП А9 и А10 соответственно. АЦП тактируется сигналом, формируемым генератором А7. С помощью устройства сдвига фазы А8 фаза тактового сигнала также распределена по равномерному закону от 0 до 2π для обеспечения случайного фазового сдвига между входным и тактовым сигналом АЦП. Далее оцифрованные сигналы поступают на блоки вычисления 1024-точечного БПФ А11 и А12. Результаты БПФ накапливаются и анализируются в вычисляющем устройстве А13.

Для измерения ошибки разности фаз принимаемых сигналов генератор сигналов А1 настраивается на определенную частоту и далее выполняется серия измерений. При этом для каждого измерения формируются

случайные шумовые сигналы в генераторах А4 и А5, а также случайные сдвиги фаз в устройствах сдвига фаз А2 и А8.

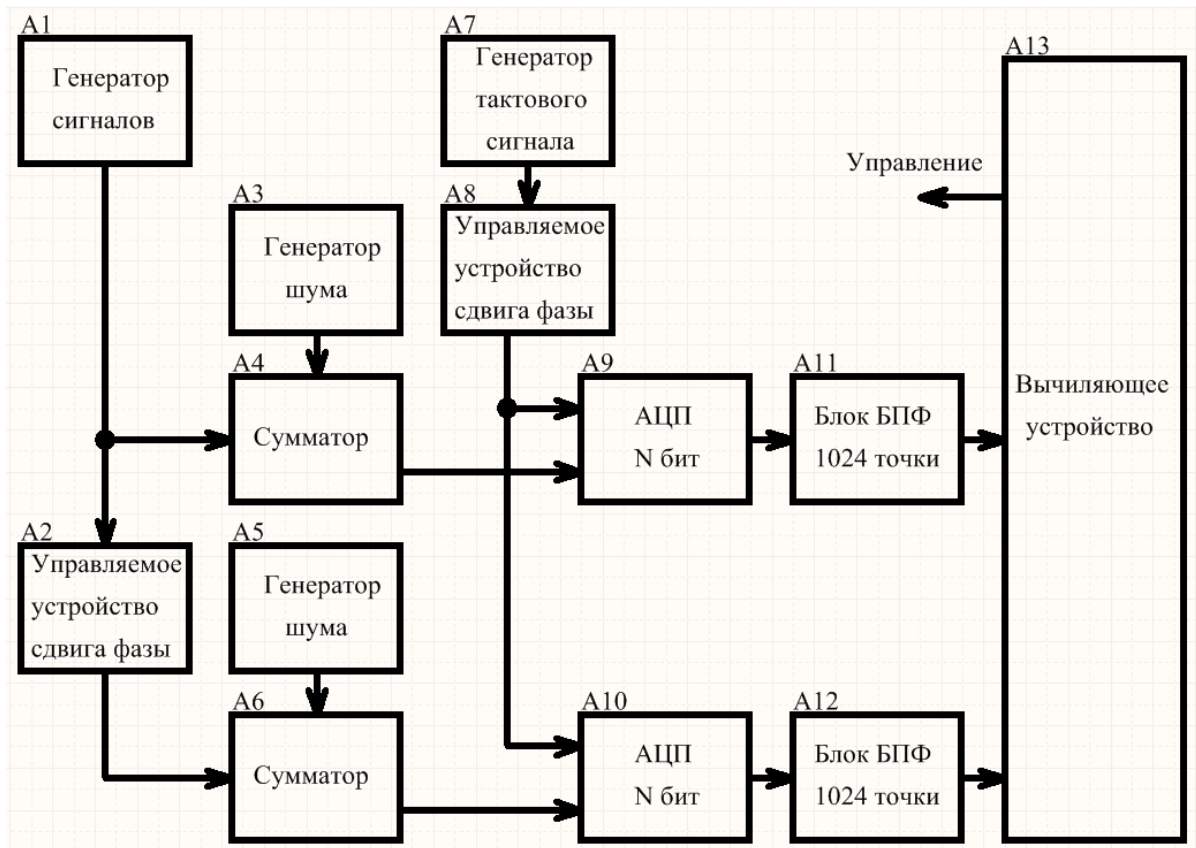


Рис. 1. Структурная схема модели для проведения исследований

Исследование ошибки измерения разности фаз выполнялось со следующими основными параметрами:

- исследуемый частотный диапазон от 0,125 до 0,375 частоты дискретизации;
- частотный шаг в выбранном частотном диапазоне равен 0,00001 частоты дискретизации;
- количество измерений на одной частоте равно 20000;
- исследуемая разрядность АЦП – 8, 4, 2, 1.

Полученные зависимости величин математического ожидания и СКО ошибки измерения разности фаз принимаемых сигналов от частоты входного сигнала для разрядностей АЦП цифрового приемника 8, 4, 2, 1 представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

Средние значения математического ожидания и СКО ошибки измерения разности фаз, усредненные в частотной полосе от 0,125 до 0,375 частоты дискретизации, представлены в табл.

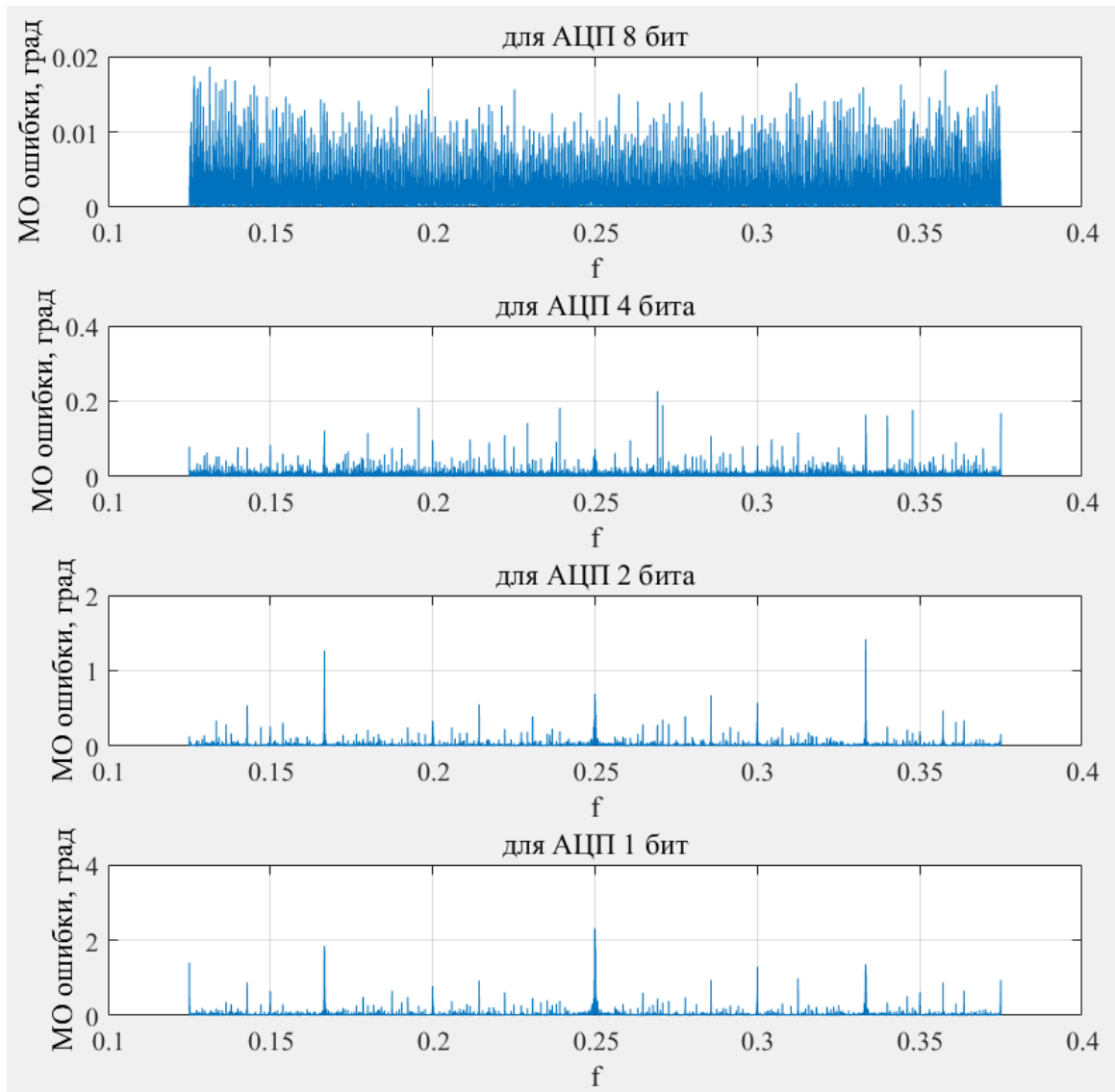


Рис. 2. Зависимости математического ожидания ошибки от частоты при разрядностях АЦП цифрового приемника 8, 4, 2, 1

Таблица
Средние значения математического ожидания и СКО ошибки

Разрядность АЦП, ед	Математическое ожидание ошибки, градусы	СКО ошибки, градусы
8	0,0024	0,0525
4	0,0051	0,1117
2	0,0122	0,2696
1	0,0231	0,5068

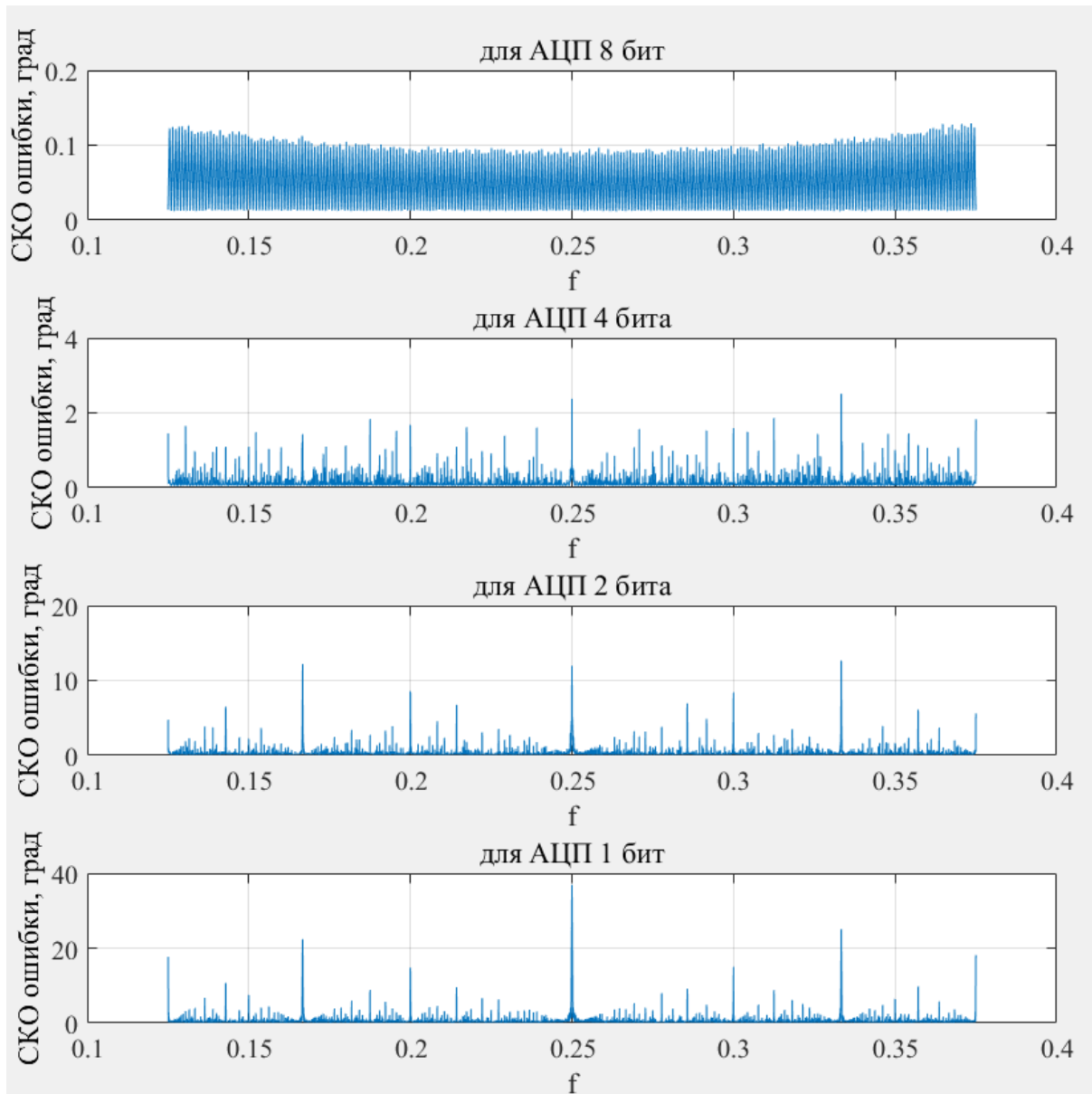


Рис. 3. Зависимости СКО ошибки от частоты при разрядностях АЦП цифрового приемника 8, 4, 2, 1

Обсуждение и основные выводы

Увеличение ошибки измерения разности фаз при уменьшении количества разрядов АЦП цифрового приемника объясняется искажением формы входного сигнала, которое вызвано квантованием сигнала. При искажении формы гармонического сигнала у данного сигнала начинают появляться побочные гармоники на частотах кратных частоте полезного сигнала [5]. Дискретизация сигнала приводит к тому, что все побочные гармоники сигнала появляются вместе с полезным сигналом в одной зоне Найквиста. Наибольшие искажения наблюдаются на частотах, где перекрываются полезный сигнал и несколько побочных гармоник сигнала. При работе в первой зоне Найквиста это частоты 0,125, 0,167, 0,2, 0,25, 0,3, 0,33, 0,375 час-

тоты дискретизации. Для снижения ошибки измерения разности фаз принимаемых сигналов при проектировании системы с ограниченной разрядностью АЦП необходимо заранее избегать работы на данных частотах, путем планирования рабочего частотного диапазона.

С уменьшением разрядности АЦП цифрового приемника математическое ожидание и СКО ошибки увеличиваются линейно. При сокращении разрядности АЦП в два раза математическое ожидание и СКО ошибки увеличиваются приблизительно в два раза. Отметим, что в случае необходимости уменьшения разрядности АЦП цифрового приемника, усреднение серий измерений разности фаз может быть использовано для уменьшения величины ошибки измерения.

При применении однобитных АЦП в цифровых приемниках, в сравнении с 8-битными АЦП, математическое ожидание и СКО ошибки измерения разности фаз принимаемых сигналов увеличиваются в 9,6 раза (табл.), однако применение однобитной обработки имеет ряд значительных преимуществ. Во-первых, упрощается схема оцифровки входного сигнала, так как однобитный АЦП представляет собой обыкновенный компаратор. Во-вторых, однобитные данные требуют меньше ресурсов для вычисления параметров сигнала, что снижает требования к системе цифровой обработки в целом.

При упрощении цифрового приемника посредством применения АЦП с более ограниченной разрядностью для снижения уровня ошибки измерения разности фаз принимаемых сигналов необходимо производить следующие мероприятия: использовать накопление сигнала с последующим усреднением вычислений; планировать частотный диапазон цифрового приемника, избегая мест скопления побочных частотных гармоник.

Библиографический список

1. Свистов, В.М. Радиолокационные сигналы и их обработка / В.М. Свистов. – М.: Сов. радио, 1977. – 488 с.
2. Richard A. Poisel. Electronic Warfare. Receivers and Receiving systems. Artech House. 2016.
3. James Tsui, Chi-Hao Cheng. Digital Techniques for Wideband Receivers. Scitech Publishing. 2016.
4. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс / Ю. Лазарев. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.
5. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: Мир, 1978. – 848 с.

[К содержанию](#)