# УДК 621.396.96

Королев Алексей Михайлович

АО «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский Научно-Исследовательский Институт Радиотехники» г. Нижний Новгород;

E-mail: [korolev.alm10@gmail.com](mailto:korolev.alm10@gmail.com)

Листратов Анатолий Игоревич

АО «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский Научно-Исследовательский Институт Радиотехники» г. Нижний Новгород;

# Экспименталья ОЦЕНКА когерентности дискретно-квантованных радиосигналов

## Ключевые слова: когерентность, энтропия, аналого-цифровое преобразование, выборочная корреляционная матрица, шум квантования.

## Введение

Задача оценки когерентности сигналов возникает в многих радиофизических приложениях: многоканального приема отраженного от цели сигнала, при исследовании влияния различных типов помех на радиотехническую систему, при исследовании собственных помех и шумов различных систем и др. [1-3]. При этом, в радиотехнических системах с внутренней когерентностью используется знание закономерности фазовой структуры излучаемого и отражённого сигналов. К примерам систем с внутренней когерентностью можно отнести радиолокационные станции, радиодальномеры, радиопеленгаторы, системы радионавигации.

Известны различные частные показатели когерентности, в том числе радиолокационных сигналов. В качестве количественной меры степени когерентности сигналов в работе [4] было предложено использовать значение оценки энтропии распределения сигнала по собственным подпространствам его выборочной корреляционной матрицы [5-7]. В работах [8, 9] было проведено исследование степени когерентности радиосигналов с флуктуациями параметров (амплитуды, частоты, фазы), а также помех различного происхождения (активных шумовых, импульсных, пассивных).

Активно развивающаяся область радиоэлектронной борьбы делает ставку на использование сложных имитационных помех [10-12]. В работе [13] для противодействия таким помехам был предложен метод их селекции, основанный на оценке когерентных характеристик радиолокационных сигналов. В результате исследования было показало, что когерентность излучаемого и отраженного сигналов в системе нарушается под влиянием ряда факторов. К ним относятся различия в характеристиках фильтров приемного и передающего трактов, флуктуации сечения рассеяния цели, нестабильность опорных генераторов и нелинейные искажения в элементах тракта аппаратуры.

В работе [] было показано, что аналого-цифровые преобразователи (АЦП), активно используемые в современных цифровых системах, оказывают влияние шумами квантования на степень когерентности принимаемого сигнала. Количественная оценка изменения когерентности зависит от частоты сигнала, уровня мощности сигнала относительно шума, а также разрядности АЦП.

Представляет интерес практическое исследование эффектов, влияющих на степень когерентности радиосигналов, количественное и качественное сравнение полученных результатов с оценкой, получаемой путем численного моделирования при различных значениях параметров АЦП и радиосигнала.

**Оценка степени когерентности радиолокационных сигналов в виде энтропии распределения сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы.**

Пусть на вход АЦП радиолокационной системы поступает сигнал в виде аддитивной смеси детерминированного сигнала и аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ). Модель АЦП учитывает разрядность преобразователя, размер шага квантования и собственный шум преобразователя, характеристика преобразования считается линейной.

В работе [Королев А. М. Исследование степени когерентности дискретно-квантованных радиосигналов / А. М. Королев, А. Е. Тимофеев // Труды XXVIII научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород, 14–31 мая 2024 года. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2024. – С. 263-266. – EDN CSTRGW.] рассматривалась модель сигнала, модель линейного АЦП, был показан алгоритм построения корреляционной матрицы и значения энтропии дискретно-квантованного сигнала и ее теоретической оценки [ссылка на статью с оценкой,Михейцев?]. В данной работе модель сигнала имеет дополнительное слагаемое, отвечающее за собственный шум АЦП:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | , | (1) |

где a – амплитуда сигнала; – комплексный вектор детерминированного сигнала длиной L, где ω - частота сигнала, − период дискретизации;  
Z = ZRe + iZIm – комплексный вектор гауссовского белого шума с среднеквадратическим отклонением 𝜎 и распределением плотности вероятности компонент , – случайная величина; – среднеквадратичное отклонение комплексного шума;   
Zadc = Zadc Re + iZadc Im – комплексный вектор гауссовского белого собственного шума АЦП с среднеквадратическим отклонением 𝜎adc и распределением плотности вероятности компонент, – случайная величина; 𝜎adc– среднеквадратичное отклонение комплексного шума. Так как на выходе АЦП при проведении эксперимента мы получим действительный сигнал, рассмотрим действительную часть от промоделированного сигнала.

Выбранная в работе линейная передаточная характеристика преобразователя соответствует преобразователю типа «midtread» [William A. Pearlman, Amir Said. Digital Signal Compression: Principles and Practice. — Cambridge University Press, 2011. — ] и имеет следующий вид:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | , | (3) |

где *m=0,1…L*, –m-ый элемент вектора амплитуды дискретно-квантованного сигнала;   
–m-ый элемент вектора амплитуды дискретизованного сигнала; –амплитуда младшего значащего разряда, где as–размах входного напряжения АЦП, *M*–разрядность преобразующего устройства, «»–знак взятия целой части числа.

В ходе работы использовались следующие параметры, описывающие дискретно-квантованный сигнал:

* Отношение сигнал шум– *q=a/σ*;
* Отношение амплитуды сигнала к кванту амплитуды АЦП–*d= a/aadc*;
* Частота сигнала *ω*;
* Параметр *N\_mean*, который показывает количество усреднений рассчитанного значения энтропии, усреднение выполнялось с целью уменьшения разброса значений энтропии для одного набора параметров.

При моделировании значения длительности выборки *N*=10, длительности сигнала *L*=1000*N*, количества усреднений *N\_mean*=200 выбраны идентичными в соответствии с () в [моя статья].

Энтропия вычисляется на основе нормированных собственных чисел выборочной корреляционной матрицы [статья с расчетом энтропии]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | . | (6) |

**Экспериментальная установка**

Для проверки полученных в процессе моделирования результатов был проведен ряд экспериментов. Экспериментальная установка изображена на рис.1 состоит из генератора сигналов (SMB-100A), макетных плат источника шума (генератор шума на рисунке), аттенюаторов (keysight 8494B, 8496B) для развязки источников при суммировании сигнала и шума, а также регулировки уровня сигнала, и цифровой платы ЦОС-310-4К-АЦП (далее–плата ЦОС). Цифровая плата представляет собой 4-х канальное устройство цифровой обработки на основе ПЛИС и включает в себя два двухканальных четырнадцатиразрядных АЦП LTC2158-14, ПЛИС Xilinx Kintex-7, синтезатор тактовой частоты LMX2581.

Радиосигнал, сформированный как сумма детерминированного сигнала и шума, поступает на плату через коаксиальный SMA разъем. В модели уровни сигналов и шумов предполагаются заданными на входе преобразователя, поэтому для пересчета мощности с выхода источников до входа платы ЦОС были учтены потери в трактах передачи сигнала. Уровень выходной мощности детерминированного сигнала выбирается на генераторе сигналов в соответствии с выбранным уровнем отношения d. Уровень шумового сигнала выставляется аттенюаторами в соответствии с выбранным отношением q. Частота сигнала *ω* выбирается на генераторе сигналов, в то время как частота дискретизации АЦП остается постоянной. Частота дискретизации равна 300 МГц. Для каждого уровня квантования формируется свое битовое слово длиной 14 бит, передаваемое на ПЛИС. Полученные битовые значения передаются с платы ЦОС на персональный компьютер через разъем JTAG с использованием среды проектирования Vivado. Выборка сигнала сохраняется в формате .dat файла на персональном компьютере и обрабатывается в системе MathCad. По выборке сигнала строится выборочная корреляционная матрица и находятся ее собственные числа. Значения собственных чисел нормируются и по ним вычисляется значение энтропии. Экспериментальные значения сравниваются со значениями, полученными в ходе моделирования.

|  |
| --- |
| D:\doc\Аспирантура\asp\Статья экспериментальная оценка когерентности д-к радиосигналов\Рисунок1.jpg |
| Рис. 1 |

Для экспериментальной оценки энтропии радиосигнала, состоящего из полезного сигнала и шума, необходимо пройти несколько подготовительных этапов:

1. Измерение уровня собственных шумов АЦП;
2. Измерение уровня шумов с генератора шума;
3. Измерение энтропии радиосигнала, полученного с генератора сигналов без подключенного генератора шума.

**Измерение уровня собственных шумов АЦП**

Уровень собственного шума АЦП – минимальный уровень шума, который всегда присутствует на выходе АЦП. Он обусловлен в первую очередь ошибками квантования, но вклад дают также тепловой шум и фликкер шум.

В документации на АЦП LTC2158-14 указан уровень шумов (transition noise) равный 2,11 младших значащих разрядов (LSB – Least Significant Bit). Если предположить в простейшем случае, что шум на выходе АЦП является АБГШ, то стандартное отклонение равняется .

Для измерения экспериментального значения уровня шума на вход платы ЦОС была подключена согласованная нагрузка 50 Ом. Полученная выборка сигнала представлена в виде гистограммы значений на рис.2. Каждый столбик на гистограмме соответствует своему битовому 14-ти разрядному слову на выходе АЦП. Значение смещения нулевого уровня напряжения на входе АЦП составляет 2220 мкВ.

Для АБГШ уровень мощности сигнала связан с стандартным отклонением АБГШ соотношением , где Ym – элементы выборки сигнала, L – длина выборки. Полученное значение .

На рис.2 представлены значения собственных чисел выборки, красным цветом показаны собственные числа, полученные в эксперименте, синим цветом – полученные путем моделирования. Значения собственных чисел представлены в логарифмической шкале   
. В левом верхнем углу показаны значения энтропии сигнала. Результаты, полученные в эксперименте и в моделировании, достаточно близки по абсолютным значениям.

Равномерный по частоте спектр выборки шума АЦП представлен на рис.2.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  | |
| Рис. 2 | |

**Измерение уровня шумов с генератора шума**

Макетная плата источника шума представляет собой два каскада широкополосных усилителей, ко входу которых подключена согласованная нагрузка 50 Ом. Диапазон усиления макетной платы составляет 0–8 ГГц, коэффициент усиления составляет не менее 36 дБ

Для измерения экспериментального значения уровня шума макетная плата была подключена к входу платы ЦОС. Полученная выборка сигнала представлена в виде гистограммы значений на рис.3.

Предположив в простейшем случае, что шум генератора шума является АБГШ. Уровень мощности сигнала связан с стандартным отклонением АБГШ соотношением . Полученное значение .

На рис.3 представлены значения собственных чисел выборки, красным цветом показаны собственные числа, полученные в эксперименте, синим цветом – полученные путем моделирования. Значения собственных чисел представлены в логарифмической шкале  
. В левом верхнем углу показаны значения энтропии сигнала. В эксперименте наблюдается большее значение девятого собственного числа и, следовательно, меньшее значение энтропии сигнала.

В спектре генератора шума на рис. 3 наблюдается неравномерность уровня шума в области 15 МГц и помеховый сигнал в области 300 кГц.

На основе оценки спектра и собственных чисел сигнала можно отметить, что поведение генератора шума не полностью описывается моделью АБГШ.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  | |
| Рис. 3 | |

**Измерение энтропии радиосигнала генератора сигналов**

Аналоговый генератор СВЧ сигналов SMB100A используется в эксперименте в качестве источника непрерывных сигналов. К преимуществам генератора можно отнести низкое значение фазовых шумов (менее минус 140 дБн при мощности 10 дБм на выходе для частоты 100 МГц) и низкий уровень гармоник на выходе генератора (менее минус 30 дБн при мощности не более 13 дБм на выходе).

Для измерения экспериментального значения энтропии генератор сигналов был подключен в соответствии с рис.1. Уровень мощности на генераторе выставлялся таким, чтобы с учетом линии передачи непрерывная мощность на входе платы ЦОС была равна минус 29,95 дБм. Уровню мощности минус 29,95 дБм соответствует напряжение амплитудой a=10062,5 мкВ, что при амплитуде кванта АЦП adac=80,5 мкВ дает значение параметра d=125. В эксперименте были выбраны несколько значений частот: 29 МГц, 30 МГц и 60 МГц.

На рис.4 представлены значения собственных чисел выборки, красным цветом показаны собственные числа, полученные в эксперименте, синим цветом – полученные путем моделирования. Значения собственных чисел представлены в логарифмической шкале  
. В левом верхнем углу графиков показаны значения энтропии сигнала. График (а) описывает сигнал на частоте 29 МГц, график (б) описывает сигнал на частоте 30 МГц, график (в) описывает сигнал на частоте 60 МГц. Результаты эксперимента качественно сходятся с результатами моделирования. В случае (а) наблюдается почти одинаковое значение восьмого и девятого собственных чисел, значения которых сильно превышают значения остальных собственных чисел. В случае (б) наблюдается одно максимальное значение девятого собственного числа, а в эксперименте наблюдается на 8 дБ большее значение восьмого собственного числа. В эксперименте в случае (в), с ростом частоты с 30 МГц в (б) до 60 МГц в (в), наблюдается повышенное значение собственных чисел с первого по восьмое по сравнению с результатами моделирования.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 4 |

**Измерение энтропии радиосигнала с шумом**

В работе [] были приведены зависимости разности энтропий (формула (7)) от отношения частоты сигнала к частоте дискретизации для различных значений параметров q и d. Для выбранных в данной работе модели сигнала и модели преобразователя была построена зависимость разности энтропий от частоты сигнала, изображенная на рис.5. Частота дискретизации при построении равна fd=300 МГц.

Из графика на рис.5 видно, что характер зависимости частично повторяет результаты, полученные в []. Провалы на характеристиках наблюдаются на частотах 15 МГц (ω/ωd=0.05), 30 МГц (ω/ωd=0.1), 45 МГц (ω/ωd=0.15).

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 5 |

Для измерения экспериментального значения энтропии была собрана схема в соответствии с рис.1. Уровень мощности на входе АЦП, соответствующий параметру d=125, равен минус 29,95 дБм, уровень мощности на входе АЦП, соответствующий параметру d=25, равен минус 43,95 дБм.

Уровень мощности с генератора шума выставляется введением ослабления на аттенюаторах. Уровень мощности генератора шума при фиксированном уровне мощности с генератора сигнала выставляется следующим образом:

* для получения параметра q=1 уровень мощности генератора шума должен быть равен уровню мощности с генератора сигналов;
* для получения параметра q=2 уровень мощности генератора шума должен быть меньше уровню мощности с генератора сигналов на 6 дБ;
* для получения параметра q=5 уровень мощности генератора шума должен быть меньше уровню мощности с генератора сигналов на 14 дБ;
* для получения параметра q=10 уровень мощности генератора шума должен быть меньше уровню мощности с генератора сигналов на 20 дБ.

На основе рис.5 были выбраны следующие значения частот сигнала: 29 МГц, 29,9 МГц, 29,99 МГц, 30 МГц, 59,9 МГц и 60 МГц.

На рис.6 представлены значения собственных чисел выборки для частоты сигнала 29 МГц, красным цветом показаны собственные числа, полученные в эксперименте, синим цветом – полученные путем моделирования. Значения собственных чисел представлены в логарифмической шкале . В левом верхнем углу графиков показаны значения энтропии сигнала.

Графики (а) и (б) описывают сигнал с параметром d=125, график (а) построен для параметра q=5, график (б) построен для параметра q=10. Графики (в) и (г) описывают сигнал с параметром d=25, график (в) построен для параметра q=1, график (г) построен для параметра q=2. Из графиков видно, что для частоты 29 МГц наблюдаются одинаковые высокие значения восьмого и девятого собственных чисел. Значения собственных числе с нулевого по шестое в эксперименте близки к результатам, полученным при моделировании. Седьмое собственное число превышает значение, полученное при моделировании не менее, чем на 2 дБ. С ростом значения q уровень собственных чисел с нулевого по седьмое падает, как и значение энтропии сигнала.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 6 |

На рис.7 представлены значения собственных чисел выборки для частоты сигнала 30 МГц, красным цветом показаны собственные числа, полученные в эксперименте, синим цветом – полученные путем моделирования. Значения собственных чисел представлены в логарифмической шкале . В левом верхнем углу графиков показаны значения энтропии сигнала.

Графики (а) и (б) описывают сигнал с параметром d=125, график (а) построен для параметра q=5, график (б) построен для параметра q=10. Графики (в) и (г) описывают сигнал с параметром d=25, график (в) построен для параметра q=1, график (г) построен для параметра q=2. Из графиков видно, что для частоты 30 МГц наблюдается высокое значения девятого собственных чисел. Значения собственных числе с нулевого по седьмое в эксперименте близки к результатам, полученным при моделировании. Восьмое собственное число превышает значение, полученное при моделировании не менее, чем на 3 дБ. С ростом значения q уровень собственных чисел с нулевого по восьмое падает, как и значение энтропии сигнала.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 7 |

На рис.8 представлены значения собственных чисел выборки для фиксированных значений параметра d=125, красным цветом показаны собственные числа, полученные в эксперименте, синим цветом – полученные путем моделирования. Значения собственных чисел представлены в логарифмической шкале . В левом верхнем углу графиков показаны значения энтропии сигнала.

Графики (а) и (б) описывают сигнал с частотой 59,9 МГц, график (а) построен для параметра q=5, график (б) построен для параметра q=10. Графики (в) и (г) описывают сигнал с частотой 60 МГц, график (в) построен для параметра q=5, график (г) построен для параметра q=10. С ростом параметра q значения собственных чисел с нулевого по седьмое убывают, а в случаях (в) и (г) – с нулевого по восьмое. Между парами случаев (а), (б) и (в), (г) наблюдается различие в распределении восьмого и девятого собственных чисел. Как и для случая входного сигнала с частотой 29 МГц, случаи (а), (б) имеют два близких по уровню собственных числа. Случаи (в), (г) показывают одно максимальное собственное числа, как и в случае сигнала с частотой 30 МГц.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 8 |

На рис.9 представлены значения собственных чисел выборки для фиксированных значений параметров d=25, q=2, красным цветом показаны собственные числа, полученные в эксперименте, синим цветом – полученные путем моделирования. Значения собственных чисел представлены в логарифмической шкале . В левом верхнем углу графиков показаны значения энтропии сигнала.

Графики построены для частот 29 МГц (а), 29,9 МГц (б), 29,99 МГц (в), 30 МГц (г). Из графиков видно, что с ростом частоты значение девятого собственного числа растет, а значение восьмого собственного числа падает. В случае (г) наблюдается уменьшение значения седьмого собственного числа до уровня результатов моделирования. Значения собственных числе с нулевого по шестое в эксперименте близки к результатам, полученным при моделировании. Энтропия с ростом частоты убывает.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 9 |

**Заключение**

В работе исследована степень когерентности дискретно-квантованного радиосигнала, полученного на экспериментальной установке. Полученные результаты были подвергнуты сравнению с результатами, полученными путем моделирования радиосигнала на выходе модели аналого-цифрового преобразователя. В качестве количественной меры степени когерентности сигналов использовалась энтропия распределения сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы.

Результаты представлены в виде распределений значений собственных чисел выборочной корреляционной матрицы и энтропии полученного дискретно-квантованного сигнала.

Основными исследуемыми параметрами системы являются отношение сигнал шум *q*, частота сигнала *ω* при фиксированной частоте дискретизации *ωd=*300 МГц и отношение амплитуды сигнала к амплитуде кванта АЦП *d*. По результатам проведенного в работе эксперимента и численного моделирования можно сделать следующие основные выводы:

1. Измерена мощность собственных шумов АЦП , получено экспериментальное значение энтропии выборки Н=2,935, значение энтропии, полученное при моделировании, близко к экспериментальному Н=2,971.
2. Измерена мощность генератора шумов АЦП , получено экспериментальное значение энтропии выборки Н=2,385, значение энтропии Н=2,973, полученное при моделировании, отличается от экспериментального на 20%.
3. Получены значения энтропии сигнала с выхода генератора для различных значений входной частоты. Получены различия между распределениями собственных чисел для частот дискретизации кратных (30 МГц и 60 МГц) и некратных (29 МГц) частоте дискретизации.
4. Получены значения энтропии сигнала с шумом для различных значений входной частоты, полученные значения отличаются от результатов, полученных при моделировании, не более чем на 20% при малых значениях энтропии для сигналов на частотах 29 МГц и 30 МГц и не более чем на 25% при малых значениях энтропии для сигналов на частотах 59,9 МГц и 60 МГц.
5. Показан рост собственных значений и значений энтропии при уменьшении отношения сигнал шум q. Продемонстрированы изменения в распределении собственных чисел около частоты 30 МГц и уменьшение восьмого собственного числа при приближении частоты сигнала к частоте, кратной частоте дискретизации.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и повышении эффективности систем защиты от имитационных помех в активных и пассивных радиолокационных системах с внутренней когерентностью.

1. *Малахов А.Н.* Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука, 1967. 660 с.
2. *Болховская О.В.* Решающие статистики для некогерентного обнаружения сигналов в многоэлементных антенных решётках / *О. В. Болховская, А. А. Мальцев* // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2018. – Т. 61, № 2. – С. 163-179.
3. Bolkhovskaya O., Davydov A., Maltsev A. Detection characteristics of the random and deterministic signals in antenna arrays International Journal of Electronics and Communication Engineering. – 2015. – Vol. 9. No. 12. – P. 1430-1433.
4. *Михеев П.В.* Метод оценки когерентных свойств радиолокационных сигналов / П.В. Михеев // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2006. – Т. XLIX, № 1. – С. 82–87.
5. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
6. *Черных М.М.* Экспериментальная оценка когерентности радиолокационного сигнала, отраженного от воздушной цели / *M.М. Черных, О.В.Васильев* // Радиотехника. – 1999. – №2. – C. 75-78.
7. *Аганин А.Г.* Способ измерения когерентности сигналов / *А. Г. Аганин, В.В. Замараев, О.В. Васильев* // Радиотехника. – 2003. – № 6. – С. 50–57.
8. Оценка когерентности радиолокационных сигналов с флуктуациями параметров / *Е.С. Фитасов,* *И.Я. Орлов, Е.В. Леговцова*, *В.В. Насонов* // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 1. – C. 69–82.
9. Селекция имитирующих сигналоподобных помех в радиолокационных системах с внутренней когерентностью / *Е.С. Фитасов, Е.В. Леговцова, О.Е. Кудряшова*[и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 11. – C. 917–925.
10. Защита от радиопомех. Под ред. *М.В. Максимова*. М.: Сов. радио, 1976. 496 с.
11. *Карманов Ю.Т.* Способ защиты РЛС со сложным сигналом от имитирующей помехи / *Ю.Т. Карманов, Г.А. Непомнящий* // Вестник ЮУрГУ. – 2009. – №26. – С. 41-46.
12. *Черноусов А.В.* Оценка устойчивости широкополосных сигналов к имитационным помехам / *А.В. Черноусов, А.В. Кузовников, В.Г. Сомов* // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – №4. – С. 81–84.
13. *Фитасов Е.С.* Система селекции имитирующих помех / *Е.С.* *Фитасов* // Датчики и системы. – 2017. – №3. – С. 24-28.
14. *Михеев П.В.* Метод оценки когерентных свойств радиолокационных сигналов */ П.В. Михеев* // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2006. – Т. 49, № 1. – С. 82-87.