# 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).

В настоящее время активно развивается направление радиоэлектронной борьбы с применением имитационных (сигналоподобных, структурных, интеллектуальных) помех [10-12]. В работе [13] был предложен и исследован метод селекции имитирующих сигналоподобных радиопомех, основанный на оценке когерентных свойств радиолокационных сигналов. Показано, что на когерентность излучаемого и принимаемого сигнала в системах с внутренней когерентностью влияет ряд факторов: различия амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик фильтров тракта передачи и приема, флуктуации отражающей поверхности объекта, стабильность синтезаторов частот, тактовых генераторов и гетеродинов, уровень нелинейных искажений на активных элементах приемно-передающего тракта и др.

При этом, очевидно, что аналого-цифровые преобразователи (АЦП), которые являются неотъемлемой частью современных цифровых радиолокационных систем, также будут влиять на степень когерентности сигналов.

Таким образом, представляет интерес как теоретический, так и практический задача исследования влияния на степень когерентности радиосигналов различных параметров АЦП: разрядность, значение младшего значащего разряда, максимальный уровень входного сигнала, частота дискретизации.

**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. 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. 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.

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

**Подготовка к проведению эксперимента**

В первую очередь при проведении эксперимента последовательно выбираются параметры *ω,* d и q. Радиосигнал на входе платы ЦОС поступает на АЦП, а дискретно-квантованный сигнал поступает на ПЛИС для обработки и последующей выдачи результатов на персональный компьютер. Для первоначальной оценки результатов эксперимента выборка сигнала с выхода АЦП передается в формате .dat файла на персональный компьютер 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.

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 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. 8 |

На рис.9 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. 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% для сигналов на частотах 29 МГц и 30 МГц и не более чем на 25% 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.

В работе проведен анализ степени когерентности дискретно-квантованных радиосигналов на примере радиолокационных сигналов на выходе АЦП с 12 разрядами. В качестве количественной меры степени когерентности сигналов использовалась энтропия распределения сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы.

Результаты рассматривались в виде разности энтропии дискретно-квантованного сигнала и теоретической оценки энтропии непрерывного сигнала, полученное значение нормировалось на натуральный логарифм длины выборки сигнала и выражалось в процентах. Основными исследуемыми параметрами системы являются отношение сигнал шум *q*, отношение частоты сигнала к частоте дискретизации *w* и отношение амплитуды сигнала к амплитуде кванта АЦП *d*. По результатам проведенного в работе численного моделирования можно сделать следующие основные выводы.

1. Для сигналов с амплитудой, сравнимой с квантом амплитуды АЦП (*d*=5) при определенных значениях отношения частоты сигнала к частоте дискретизации наблюдается резкое (пиковое) уменьшение разности энтропий дискретно-квантованного сигнала, масштаб изменений при отношении сигнал шум *q*=1 составляет до 2÷3 %, *q*=5 составляет до 4÷5 %.
2. Резкий характер уменьшения разности энтропий приводит к образованию пиков на графике зависимости разности энтропий от отношения частоты сигнала к частоте дискретизации, ширина отдельно взятого пика при отношении частот *w*=0,1 и отношении сигнал шум *q*=1 составляет 5∙10-5 отн.ед.
3. Оценки скалярного произведения и корреляционной функции показывают наличие пиков при тех же значениях отношения частоты сигнала к частоте дискретизации, что и в случае рассмотрения зависимости разности энтропий.
4. Для сигналов с значениями отношения частоты сигнала к частоте дискретизации меньшими, чем обратное значение длины выборки (1/*N*), наблюдается уменьшение разности энтропий и рост интервала когерентности сигнала, т.е. рост когерентности выборки, с уменьшением отношения частоты сигнала к 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.

**Анализ результатов моделирования**

Анализ результатов моделирования разделен на несколько этапов. В первую очередь было выбрано представление рассчитанного значения энтропии в виде разности энтропии рассчитанного значения (6) и оценки энтропии по отношению к натуральному логарифму *N*, полученная величина была выражена в процентах:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | , | (7) |

где .

Представление в виде разности энтропий (7) количественно демонстрирует отличие энтропии дискретно-квантованного сигнала и энтропии непрерывного сигнала, а также позволяет исследовать характер изменения отличий, что может быть проблематично, исследуя абсолютные значения энтропии. Значениям больше нуля соответствуют значения энтропии дискретно-квантованного сигнала больше, чем теоретическая оценка энтропии.

Следующим шагом была проанализирована зависимость разности энтропий от отношения частоты сигнала к частоте дискретизации для различных значений отношения амплитуды сигнала к кванту амплитуды сигнала при различных значениях отношения сигнал шум. Изучалась модель 12-ти разрядного АЦП, длительность выборки *N*=10, длительность сигнала *L*=1000*N*, количество усреднений *N\_mean*=200.

На рис.1 (а) и (б) представлены зависимости разности энтропий от отношения частоты сигнала к частоте дискретизации при отношении сигнал шум *q*=1 (а) и *q*=5 (б), отношение амплитуды сигнала к кванту амплитуды АЦП *d*=5 (красный), *d*=25 (синий) и *d*=125 (зеленый).

Возрастание разности энтропий в случае *d*=5 наблюдается на участке до отношения частот 0,1. При больших значениях отношения частот зависимость не наблюдается. Существует набор значений отношений частот, при которых разность энтропий резко уменьшается.

Диапазон изменения разностей энтропий колеблется от 0,5% до 1,7% для случая на рис.1 (а) и до 4% для случая на рис.1 (б).

Зависимость разности энтропий от отношения частот в случае *d*=25 и *d*=125 не наблюдается. При *d*=25 наблюдаются пиковые изменения разности энтропий, а диапазон изменения разностей энтропий меньше 0,5% для случая на рис.1 (а) и меньше 0,3% для случая на рис.1 (б). При *d*=125 явно выраженные пики отсутствуют.

Рассмотрим отдельный пик в большем разрешении. Разность энтропий в пределах пика для отношения частот *ω/ωd*=0,1 (рис. 2). Отношения сигнал шум *q*=1, отношение амплитуды сигнала к кванту амплитуды АЦП *d*=5.

Ширина пика по половине глубины составляет 5∙10-5 отн.ед. Разность энтропий резко уменьшается до -1,5 %.

Рассмотрим пиковые значения на графике разности энтропий с точки зрения других параметров, описывающих связь сигналов между собой: корреляционной функции и скалярного произведения сигналов. Построим зависимость корреляционной функции и скалярного произведения квантованного сигнала и непрерывного сигнала от отношения частоты сигнала к частоте дискретизации.

Корреляционная функция задается в следующем виде:

|  |
| --- |
| , (8) |

где *Yi*–i-ый элемент вектора амплитуды дискретно-квантованного сигнала, *Xi*–i-ый элемент вектора амплитуды непрерывного сигнала, *L*–длительность сигнала, знак «∗»– комплексное сопряжение, знак «—»–арифметическое среднее.

Скалярное произведение задается в следующем виде:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (9) |

С ростом значений корреляционной функции и скалярного произведения растет когерентность исследуемых сигналов.

На рис.3 представлены разность энтропий (красным), модуль значения корреляционной функции (синим, рис.3 (а)), модуль значения скалярного произведения (синим, рис.3 (б)) в зависимости от отношения частоты сигнала к частоте дискретизации при отношении сигнал шум *q*=1, отношение амплитуды сигнала к кванту амплитуды АЦП *d*=5.

Пикам разности энтропий на рис.3 (а) соответствуют пики увеличения модуля корреляционной функции, а пикам разности энтропий на рис.3 (б) соответствуют пики увеличения модуля скалярного произведения. Корреляционная функция и скалярное произведение показывают наличие большего   
количества пиков возрастания с меньшей амплитудой, а также пиков, в которых значение корреляционной функции уменьшается.

Для анализа эффекта плавного возрастания разности энтропий в области малых значений отношения частот рассмотрим разность энтропий при различных длинах выборки сигнала *N*. На рис. 4 представлены разности энтропий в зависимости от отношения частоты сигнала к частоте дискретизации при отношении сигнал шум *q*=1, отношении амплитуды сигнала к кванту амплитуды АЦП *d*=5. Красным цветом показана разность энтропий при длине выборки *N*=10, синим–при *N*=100.

Графики отличаются количеством пиков. Кроме того, плавное возрастание разности энтропий прекращается около отношения частот *ω/ωd*=0,1 для *N*=10, а для *N*=100– *ω/ωd*=0,01.

Плавный спад разности энтропий указывает на увеличение когерентности. Вычислим значение интервала когерентности двух сигналов в области малых значений отношения частоты сигнала к частоте дискретизации. Интервал когерентностивозможно интерпретировать как длительность в отсчетах, на протяжении которых отсчеты сигнала считаются зависимыми. Зависимость отсчетов увеличивает когерентность сигнала и уменьшает энтропию. Интервал когерентности, нормированный на период дискретизации, задается в следующем виде:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (10) |

где *Yi*–i-ый элемент вектора амплитуды дискретно-квантованного сигнала, знак «∗»– комплексное сопряжение, *T\_d*–период дискретизации, *N*–длительность выборки, используемой для вычисления выборочной корреляционной матрицы.

На рис. 5 представлен интервал когерентности сигнала, нормированный на период дискретизации, в зависимости от отношения частоты сигнала к частоте дискретизации для различных длин выборки. Красной линией показан интервал когерентности для длины выборки *N*=100, синей линией–интервал когерентности для длины выборки *N*=10. Интервал когерентности увеличивается при уменьшении отношения частоты сигнала к частоте дискретизации при значениях отношения частот меньших 1/*N*. При длине выборки *N*=10 в области значений больше *ω/ωd*=0,1 значение интервала когерентности меньше 1. При длине выборки *N*=100 в области значений больше *ω/ωd*=0,01 интервал когерентности периодически изменяется и при увеличении отношения частот стремится к значению 2.

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.