# УДК 621.396.96

# Исследование степени когерентности дискретно-квантованных радиосигналов

Королев Алексей Михайлович

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

E-mail: korolev.alm10@gmail.com

Фитасов Евгений Сергеевич

ФГАУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский университет   
им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород;

E-mail: fitasoves@mail.ru

## Аннотация: в работе проведен анализ степени когерентности дискретно-квантованных радиосигналов. Рассмотрены основные факторы, влияющие на степень когерентности. Построена модель дискретно-квантованного радиосигнала. В качестве количественной меры степени когерентности сигналов использовалась энтропия распределения сигнала по собственным подпространствам его выборочной корреляционной матрицы. Показана зависимость энтропии сигнала от параметров дискретизации и квантования: отношения сигнал-шум, отношения частоты сигнала к частоте дискретизации, отношения амплитуды сигнала к кванту амплитуды сигнала. Показано резкое изменение значения энтропии в области частот сигнала кратных частоте дискретизации. Построено значение скалярного произведения непрерывного сигнала и дискретно-квантованного сигнала в зависимости от отношения частоты сигнала к частоте дискретизации. Показано распределение энергии сигнала по собственным числам выборочной корреляционной матрицы для различных значений отношения частоты сигнала к частоте дискретизации, соответствующих. Показано отличие энтропии дискретно квантованного радиосигнала и непрерывного радиосигнала в зависимости отношения сигнал-шум в случае различных отношений частоты сигнала к частоте дискретизации.

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

## Введение

В современных приемных устройствах используются аналого-цифровые преобразователи (АЦП), которые преобразуют непрерывный входной сигнал в дискретный по времени и квантованный по амплитуде сигнал. АЦП характеризуются большим набором параметров. К статическим параметрам относят, например, разрядность, значение младшего значащего разряда, максимальный уровень входного сигнала; примером динамического параметра может быть частота дискретизации. С ростом разрядности АЦП оцифрованный сигнал содержит меньшие ошибки квантования, но более высокочастотные АЦП c частотой дискретизации от сотен мегагерц до единиц гигагерц могут обеспечить разрешение по амплитуде не более 12-14 разрядов. Также рост частоты дискретизации увеличивает энергопотребление АЦП. Высокая частота дискретизации накладывает более жесткие требования на синхронизацию входных и выходных сигналов АЦП, а именно на топологию полосковых линий на плате и длины этих линий, на тактовые генераторы, уровень их шумов и помех, на постоянные уровни напряжений, питающие микросхему.

Задача оценки оценка когерентности сигналов возникает в многих радиофизических приложениях. Оценка когерентности важна в задачах многоканального приема отраженного от цели сигнала, при исследовании влияния различных типов помех на радиотехническую систему, при исследовании собственных помех и шумов различных систем. Когерентность показывает, насколько исследуемые сигналы скоррелированы друг с другом, насколько изменения фазовых фронтов исследуемых сигналов согласованы друг с другом. Детерминированный незашумленный сигнал когерентен сам с собой в то время как белый шум некогерентен. Таким образом 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 кругового обзора, радиодальномеры, системы навигации GPS и ГЛОНАСС. На когерентность излучаемого и принимаемого сигнала в системах с внутренней когерентностью влияет множество 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 т.д.

АЦП с различной производительностью неизбежно будут искажать сигнал с точки зрения амплитуды и фазы, внося шум квантования. Различные уровни шума квантования будут по-разному влиять на когерентность принятого сигнала. Представляется интересным исследовать, какой вклад в изменение когерентности вносит АЦП, а также как при различных параметрах АЦП этот вклад изменяется.

Известны различные частные показатели когерентности, в том числе радиолокационных сигналов [1-3]. Оценка когерентности сводится к оценке уровня энергии сигнала, заключенной в полезной составляющей. В качестве количественной меры степени когерентности сигналов в работе [4] было предложено использовать значение оценки энтропии распределения сигнала по собственным подпространствам его выборочных корреляционной матриц.

К преимуществам использования энтропии для оценки когерентности можно отнестиинвариантность относительно формы сигнала и возможность вычисления оценки на основе выборочной корреляционной матрицы сигнала при отсутствии априорных данных. Стоит отметить, что спектрально корреляционная теория отвечает на вопросы поведения и оценки сигналов произвольной формы и шумов, но ее математический аппарат достаточно громоздкий и не подходит для инженерных расчетов [1, 5-7].

В работе [8] рассматривалась энтропия непрерывного зашумленного сигнала с флуктуациями частоты, фазы. В результате была показана зависимость энтропии от отношения сигнал шум (ОСШ) для различных значений дисперсий гауссовых   
флуктуаций фазы и частоты.

В работе [9] рассматривались факторы, влияющие на степень когерентности, а также были показаны результаты натурного эксперимент по селекции имитирующих сигналоподобных помех, было показано отличие значения энтропии для сигналов, отраженных от реальных целей, и для сигналов имитатора.

В работе [10] был предложен метод селекции имитирующих сигналоподобных радиопомех, основанный на оценке когерентных свойств радиолокационных сигналов. Метод применим для систем с внутренней когерентностью–таких систем, которые подразумевают знание закономерности фазовой структуры излучаемого и отражённого сигналов. Внутренняя когерентность тем лучше, чем лучше параметры, обеспечиваемые элементно-компонентной базой устройства и составными частями устройства: генераторами, фильтрами, системами синхронизации, преобразователями частот и т.д. Метод селекции подразумевает, что сигнал радиолокационной системы и имитационная радиопомеха при прочих равных будут иметь различную степень когерентности. Полученная методика оценки степени когерентности сигналов была использована и апробирована при синтезе системы селекции имитационных помех и ложных целей, на устройство селекции ложных целей оформлен патент [11].

Исследовав, как меняется когерентность сигнала от АЦП приемного устройства, можно перейти к исследованию того, как влияет на когерентность сигналов цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) различных передающих устройств, в том числе имитирующих. В результате есть перспектива получить признак имитирующих систем с различными техническими параметрами (например, ЦАП или фильтрами), которые будут иметь различную когерентность с учетом приемной системы с АЦП.

В данной работе целью стало исследование степени когерентности дискретно-квантованного сигнала в виде энтропии распределения сигнала по собственным подпространствам его выборочной корреляционной матрицы.

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

Рассмотрим методику, по которой будет проводиться моделирование энтропии дискретно-квантованного радиосигнала. Пусть на вход идеального АЦП радиолокационной системы поступает сигнал в виде аддитивной смеси детерминированного сигнала и гауссового белого шума. Модель идеального АЦП учитывает разрядность преобразователя и размер шага квантования, считая его собственный шум нулевым, а характеристику преобразования линейной.   
Амплитуда дискретизированного по времени сигнала после АЦП будет иметь следующий вид:

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

Вектор амплитуды детерминированного и дискретизированного сигнала имеет вид:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2) |

где a–фиксированный амплитудный множитель, L–длительность сигнала;   
ω–частота сигнала; –период дискретизации, где–частота дискретизации; знак ∗– эрмитово сопряжение.

–вектор гауссового белого шума с среднеквадратическим отклонением 𝜎 и   
распределением плотности вероятности , –случайная величина.

–корреляционная матрица гауссового шума, задаваемого вектором **Z**,   
**I**–единичная матрица.

Каждое значение вектора амплитуды сигнала квантовалось в соответствии с выбранной разрядностью АЦП и соответствующей ему линейной передаточной характеристикой:

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

где–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.

Слагаемое  вводится для переноса входного сигнала из области значений ±a в область амплитуд квантования от 0 до as, а множитель (1+i) позволяет квантовать действительную, и мнимую части аналитического сигнала. Слагаемое переносит сигнал в область значений ±a.

Смоделированный сигнал **Y** в свою очередь делится на выборки  длительностью N,   
количество таких выборок.

Выборочная корреляционная матрица R имеет вид:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4) |

Для корреляционной матрицы находятся собственные числа. Нормированные собственные числа имеют вид:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5) |

Энтропия вычисляется на основе нормированных собственных чисел выборочной корреляционной матрицы R:

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

Для сравнения полученных в ходе моделирования результатов с известной теоретической оценкой энтропии использовались данные из работы [12].







**Анализ результатов моделирования**

Целью моделирования было исследование зависимости энтропии дискретно-квантованного сигнала от частоты входного сигнала и отношения сигнал шум, сравнение результатов с результатами, получаемыми для непрерывных сигналов.

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

* Отношение сигнал шум–;
* Отношение амплитуды сигнала к кванту амплитуды АЦП–;
* Отношение частоты сигнала к частоте дискретизации–;
* Параметр N\_mean, который показывает количество усреднений рассчитанного значения энтропии, усреднение выполнялось с целью уменьшения разброса значений энтропии для одного набора параметров.

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=1000N, количество усреднений N\_mean=200.

На рисунке 1 представлена зависимость разности энтропий от отношения частоты сигнала к частоте дискретизации при отношении сигнал шум q=1. Красному, синему и черному цвету соответствуют значения отношения амплитуды сигнала к кванту амплитуды АЦП d=5, d=25 и d=125 соответственно.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 1 |

Линейная зависимость разности энтропий от отношения частот в случае d=5 (красный график) наблюдается на участке до отношения частот 0,1. При больших значениях отношения частот зависимость не наблюдается. Существует набор значений, при которых разность энтропий резко уменьшается. Диапазон изменения разностей энтропий для разных пиковых значений колеблется от 0,5% до 1,7%. Для проявления некоторых пиков требуется большая вычислительная способность и время расчета.

Зависимость разности энтропий от отношения частот в случае d=25 (синий график) не наблюдается. Диапазон изменения разностей энтропий до 0,5%.

Зависимость разности энтропий от отношения частот в случае d=125 (черный график) не наблюдается, нет явно выраженных пиков.

Разность энтропий в пределах пика на частоте  приведена на рисунке 3.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3 |

Значение отношения сигнал шум q=1, отношение амплитуды сигнала к кванту амплитуды АЦП d=5. Ширина пика по половине глубины составляет 0,00005. При минимальном значении разность энтропий уменьшается до -1,5 %, что указывает на резкое уменьшение значения энтропии дискретно квантованного сигнала.

На рисунке 2 представлена зависимость разности энтропий от отношения частоты сигнала к частоте дискретизации при отношении сигнал шум q=5. Красному, синему и черному цвету соответствуют значения отношения амплитуды сигнала к кванту амплитуды АЦП d=5, d=25 и d=125 соответственно.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2 |

Линейная зависимость разности энтропий от отношения частот в случае d=5 (красный график) наблюдается на участке до отношения частот 0,1. При больших значениях отношения частот зависимость не наблюдается. Существуют значения, при которых разность энтропий резко уменьшается. Наблюдаются пиковые значения, кратные по частоте 0,025. Диапазон изменения разностей энтропий в пиках до 4%. Для проявления некоторых пиков требуется большая вычислительная способность и время расчета.

Линейная зависимость разности энтропий от отношения частот в случае d=25 (синий график) наблюдается на участке до отношения частот 0,1. При больших значениях отношения частот зависимость не наблюдается. Существуют значения, при которых значение разности энтропий резко уменьшается. Диапазон изменения разностей энтропий в резонансе до 0,3%.

Зависимость разности энтропий от отношения частот в случае d=125 (черный график) не наблюдается, нет явно выраженных пиков.

Уменьшение шумов квантования также наблюдается, если рассмотреть отдельно собственные числа оценочной корреляционной матрицы. На рисунке 5 представлены значения отношения собственного числа к теоретическому значению собственного числа, выраженное в дБ, для собственных чисел с 1 по 10:

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

где******–нормированные собственные числа выборочной корреляционной матрицы дискретно-квантованного сигнала, ******–нормированные собственные числа, рассчитанные теоретически для непрерывного сигнала.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 5 |

Красной линии соответствуют собственные числа в случае; синей   
линии–собственные числа в случае отстройки . Отношения собственных чисел рассматриваются для отношения сигнал шум q=5.

Значение отношения собственных чисел выше на 0,5 дБ (в 1,1 раз больше) для 1-8 собственных чисел в случае  по сравнению со случаем. Значение отношения для девятого собственного числа больше на 7 дБ (в 5 раз больше) в случае.

Значение девятого собственного числа больше теоретической оценки значения собственного числа не больше 0,7 дБ (в 1,18 раз больше) в случае.   
В случае  значение девятого собственного числа больше теоретической оценки на 7,7 дБ (в 5,9 раз больше). Значение отношения для десятого собственного числа мало отличается (менее чем на 0,1 дБ) для двух отношений частот.

Из результатов на рисунке 5 можно сделать вывод, что шумы квантования, порождаемые некратной частотой сигнала относительно частоты дискретизации, описываются в первую очередь девятым собственным числом, а также в меньшей степени 1-8 собственными числами.

На рисунке 6 представлена зависимость разности энтропий в зависимости от отношения сигнал шум для двух значений отношений частот: красной линии соответствуют разность энтропий в случае; синей линии–разность энтропий в случае отстройки . Отношение амплитуды сигнала к кванту амплитуды АЦП d=5.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 6 |

Зависимость в случае отношения частот  нелинейная и имеет минимум при q=1,1. С увеличением q значение разности энтропий уменьшается до значения   
-1,5% при q=1,1, с дальнейшим увеличением значение разности энтропий плавно увеличивается, доходя до 0.5% при q=8.

Зависимость в случае отношения частот  нелинейная. С увеличением q значение разности энтропий увеличивается, доходя до 5% при q=8.

На рисунке 7 представлена зависимость разности энтропий в зависимости от отношения сигнал шум для трех различных отношений амплитуды сигнала к кванту амплитуды: красной линии соответствуют отношение d=5, синей линии–отношение d=25, черной линии– отношение d=125. Отношение частот выбрано .

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 7 |

Зависимость в случае d=5 нелинейная. С увеличением q значение разности энтропий увеличивается, доходя до 5% при q=8.

Зависимость в случае d=25 и d=125 нелинейная. С увеличением q значение разности энтропий плавно увеличивается, но не превышает 0.5%.

На рисунке 8 представлена зависимость разности энтропий в зависимости от отношения сигнал шум для трех различных отношений амплитуды сигнала к кванту амплитуды: красной линии соответствуют отношение d=5, синей линии–отношение d=25, черной линии– отношение d=125. Отношение частот выбрано .

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 8 |

Зависимость в случае d=5 нелинейная и имеет минимум при q=1,1. С увеличением q значение разности энтропий уменьшается до значения в -1,6% при q=1,1, с дальнейшим увеличением значение разности энтропий плавно увеличивается, доходя до 0,5% при q=8.

Зависимость в случае d=25 и d=125 нелинейная. С увеличением q значение разности энтропий увеличивается, но не превышает 0,5%. В случае d=25 наблюдается минимум при q=1,1 с уменьшением разности энтропий до -0,5%.

**Заключение**

В работе проведен анализ степени когерентности радиолокационных сигналов на выходе модели 12-ти разрядного АЦП. В качестве количественной меры степени когерентности сигналов использовалась энтропия распределения сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы. Анализ проводился для случая АЦП, не вносящего дополнительный шум в результат обработки.

Результаты рассматривались в виде разности энтропии дискретно-квантованного сигнала и теоретической оценки энтропии непрерывного сигнала, полученное значение нормировалось на длину выборки сигнала и выражалось в процентах. По результатам проведенного в работе моделирования можно сделать следующие основные выводы:

1.

1. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
2. *Черных М.М.* Экспериментальная оценка когерентности радиолокационного сигнала, отраженного от воздушной цели / M.М. Черных, О.В.Васильев // Радиотехника. - 1999, №2, C.36-42.
3. *Аганин А.Г., Замараев В.В., Васильев О.В.* Способ измерения когерентности сигналов // Радиотехника. 2003. № 6. С. 50–57.
4. *Михеев П.В.* Метод оценки когерентных свойств радиолокационных сигналов / П. В. Михеев // Известия вузов. Радиофизика. – 2006. – Т. XLIX, № 1. – С. 82–87.
5. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1982. 624 с.
6. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая. Изд. 2-е., перераб.   
   М. : Сов. радио, 1974. 552 с.
7. *Пестряков В.Б.* Фазовые радиотехнические системы. М. : Советское радио, 1968. 468 с.
8. Оценка когерентности радиолокационных сигналов с флуктуациями параметров // Изв. вузов.   
   Радиофизика. 2021. Т. 64, № 1. C. 69–82.
9. Селекция имитирующих сигналоподобных помех в радиолокационных системах с внутренней когерентностью // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 11. C. 917–925.
10. *Фитасов Е.С.* Система селекции имитирующих помех // Датчики и системы. 2017. №3. С.24-28.
11. Пат. 184465 РФ, МПК G01S13/52. Устройство селекции ложных целей : № 2018126557 : заявл. 18.07.2018 : опубл. 06.12.2018 / Фитасов Е.С., Козлов С.А. ; заявитель АО «ФНПЦ «ННИИРТ». 8 с.
12. *Михеев П.В.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 1. С. 82-87. doi: [10.1007/s11141-006-0039-8](https://doi.org/10.1007/s11141-006-0039-8)