# 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)

**Ильясафов Александр Дмитриевич**

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

# ОЦЕНКА когерентности дискретно-квантованных радиосигналов

## В работе проведен анализ степени когерентности дискретно-квантованных радиосигналов. Рассмотрены основные факторы, влияющие на степень когерентности дискретно-квантованных радиосигналов. Приведены зависимости когерентности сигнала от параметров дискретизации и квантования: отношения сигнал-шум, отношения частоты сигнала к частоте дискретизации, отношения амплитуды сигнала к кванту амплитуды преобразователя. Показана связь между интервалом корреляции, длиной выборки и зависимостью энтропии в области малых значений входных частот.

## 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 гауссового белого шума. Модель 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; *Td=2π/ωd*–период дискретизации, где–частота дискретизации;   
знак «∗»– эрмитово сопряжение.

***Z***–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=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.

Слагаемое *–as(1+i)/2* 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 *–as(1+i)/2* переносит сигнал в область значений ±*a*.

Полученный методом численного моделирования сигнал ***Y*** в свою очередь делится на выборки *Yn* длительностью *N*, количество таких выборок *L/N*.

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 численного моделирования результатов с известной теоретической оценкой энтропии использовались данные из работы [14].

**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– *q=a/σ*;
* Отношение амплитуды сигнала к кванту амплитуды АЦП–*d= a/aadc*;
* Отношение частоты сигнала к частоте дискретизации– *w=ω/ωd*;
* 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 .

|  |
| --- |
| C:\Users\User\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Рис.1.jpg |
| Рис. 1 |

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.

|  |
| --- |
| C:\Users\User\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Рис.2.jpg |
| Рис. 2 |

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.

|  |
| --- |
| Рис |
| Рис. 3 |

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.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\User\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Рис.4.jpg | C:\Users\User\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Рис.5.jpg |
| Рис. 4 | Рис. 5 |

**Заключение**

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.

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.

Annotation: The paper analyzes the degree of coherence of discrete-quantized radar signals. The main parameters for the degree of coherence of discrete-quantized radar signals are considered. The dependences to concern the signal coherence on the sampling and quantization parameters are concerned: a signal-to-noise ratio, a ratio of the signal frequency to the sampling frequency, a ratio of the signal amplitude to a least significant bit. The dependencies are obtained between the correlation interval, the sample length and the entropy in the low-frequency band of the signal.