**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОГЕРЕНТНОСТИ ДИСКРЕТНО-КВАНТОВАННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ**

**А.М. Королев1), А.И. Листратов1), Е.С. Фитасов2)**

*1)АО «ФНПЦ «ННИИРТ»*

*2)ННГУ им. Н.И. Лобачевского*

Задача оценки когерентности сигналов встречается в ряде радиофизических применений, к которым относятся исследование собственных помех и шумов систем, исследование взаимосвязанности различных сигналов внутри систем, многоканальный прием отраженного от цели сигнала и др. [1-3].

В качестве количественной оценки когерентности заключается в использовании оценки энтропии распределения сигнала по собственным подпространствам его выборочной корреляционной матрицы [4-7]. 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 результате исследования [13] показано, что когерентность излучаемого и отраженного сигналов в системе нарушается под влиянием ряда факторов: различия характеристик фильтров приемного и передающего трактов, флуктуаций сечения рассеяния цели, нестабильности опорных генераторов и наличия нелинейных искажений в элементах тракта аппаратуры.

В работе [14] 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 экспериментальное 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.

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 [14] рассматривалась модель сигнала, модель линейного АЦП, был показан алгоритм построения корреляционной матрицы и значения энтропии дискретно-квантованного сигнала и теоретической оценки энтропии [15]. Выбранная в работе линейная передаточная характеристика преобразователя соответствует преобразователю типа «midtread» [16] и имеет следующий вид:

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

где *m*=0,1…L, *Ym*–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.

Энтропия вычисляется на основе нормированных собственных чисел выборочной корреляционной матрицы [15]:

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

где λoi– нормированные собственные числа выборочной корреляционной матрицы.

**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 программируемой логической интегральной схемы (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. Полученные c АЦП битовые значения передаются с платы ЦОС на персональный компьютер через разъем JTAG с использованием среды проектирования Vivado в формате .dat файла и обрабатываются в системе MathCad. По выборке сигнала строится выборочная корреляционная матрица, находятся ее собственные числа и вычисляется энтропия. Экспериментальные значения сравниваются со значениями, полученными в ходе моделирования.

**Экспериментальное измерение энтропии радиосигнала в смеси с шумом**

В ходе эксперимента была измерена энтропия сигналов на выходе отдельных элементов измерительного тракта: АЦП, макетной платы источника шума и генератора сигналов.

Измеренное значение уровня шумов АЦП в приближении АБГШ составляет , что согласуется с величиной (2,11 младших значащих разряда), указанной в документации на АЦП. Энтропия шумов АЦП составляет , что соотносится с величиной, полученной в ходе моделирования уровня шумов АЦП: .

Измеренное значение уровня шумов генератора шума в приближении АБГШ составляет , что соответствует выходной мощности генератора шума минус 39,95 дБм. Энтропия шумов АЦП составляет , что отличается от величины, полученной в ходе моделирования уровня шумов АЦП: . Несоответствие обусловлено отличием характеристик шума генератора от АБГШ.

При измерении энтропии непрерывного синусоидального сигнала с генератора уровень мощности был выставлен равным минус 29,95 дБм, что соответствует параметру d=125. Измерения проводились на частотах 29 МГц, 30 МГц и 60 МГц.

На рис.1 представлены значения собственных чисел выборки, красным цветом показаны собственные числа, полученные в эксперименте, синим цветом – полученные путем моделирования. Значения собственных чисел представляются в логарифмической шкале , в левом верхнем углу графиков приводятся 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. В случае (а) наблюдается почти одинаковое значение восьмого и девятого собственных чисел, значения которых сильно превышают значения остальных собственных чисел. С ростом частоты с 30 МГц в (б) до 60 МГц в (в), наблюдается повышение значений собственных чисел с первого по восьмое по сравнению с результатами моделирования.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 1 |

В работе [14] были приведены зависимости разности энтропий (разность энтропий задана формулой (7)) от отношения частоты сигнала к частоте дискретизации для различных значений параметров q (отношение сигнал шум q=a/σ, a – амплитуда сигнала, σ – среднеквадратичное отклонение комплексного шума) и d (отношение d= a/aadc).

Для выбранных в данной работе моделей сигнала и преобразователя была промоделирована зависимость разности энтропий от частоты сигнала (красная линия) и построено значение энтропии для некоторых частот сигнала, изображенные на рис.2. Частота дискретизации при построении равна fd=300 МГц, q=2118, d=6439 (мощность сигнала минус 4,3 дБм). Характер зависимости частично повторяет результаты, полученные в [14]: форму характеристики и провалы характеристики на частотах, кратных частоте дискретизации: провалы наблюдаются на частотах 15 МГц (ω/ωd=0.05), 30 МГц (ω/ωd=0.1), 45 МГц (ω/ωd=0.15), 60 МГц (ω/ωd=0.2). Экспериментальные данные близки к результатам моделирования.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2 |

Таким образом 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.

Исследована когерентность сигналов и шумов различных элементов: АЦП, макета генератора шума, генератора сигналов и системы из генератора и источника шума. Получены распределения значений собственных чисел для различных частот сигнала, получены значения энтропии сигналов и шумов. Получены распределения энтропии сигнала от частоты сигнала для сигнала высокого уровня без шума.