

Особенности пространственной локализации временного шума в цифровых каналах связи

© Б.Г. Подласкин, Е.Г. Гук, А.А. Сухарев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: bgp@holo.ioffe.rssi.ru

(Поступило в Редакцию 24 августа 2010 г.)

Исследована реализуемость метода пространственной локализации временного шума канала связи для случая передачи цифрового сигнала. Подобно рассмотренному ранее методу пространственной локализации временного шума, для случая аналогового сигнала использовано интегральное преобразование Адамара со специальным упорядочением базисных функций. Показана идентичность пространственной локализации шума для аналоговых и цифровых сигналов при оценке величины шума через вероятность ошибки определения выходного сигнала с различной разрядностью цифровых слов.

Введение

В теории информации и теории помехоустойчивого кодирования достаточно подробно исследовались вопросы использования преобразования сигналов с помощью матриц Адамара и функций Уолша. В результате проведенных исследований были предложены алгоритмы кодирования (сжатия) источников информации, помехоустойчивые коды Адамара и сигнальные конструкции для специальных систем передачи данных. Возможность использования преобразования Адамара для пространственно-временной обработки сигналов не рассматривалась

Впервые идея использования интегральных преобразований Адамара для оптической обработки двумерных изображений и главным образом реализация пространственной локализации временного шума была предложена и опубликована нами в работах [1,2]. Так, в работе [1] приведена принципиально новая концепция борьбы с шумом канала связи на основе пространственной локализации этого шума в результате использования интегрального преобразования Адамара со специальным упорядочиванием базисных функций. Математически подтверждена корректность этой операции и приведена математическая модель для случая аналогового сигнала при малой размерности преобразования. Свое развитие эти исследования нашли в работе [2], посвященной двойному ортогональному преобразованию Адамара с размерностью 32×32 , что обеспечило возможность концентрации дисперсии шума по периметру восстановленного изображения. Во всех этих работах, а также в [3,4] процесс пространственной локализации дисперсии временного шума рассматривался применительно к аналоговому типу канала связи.

В настоящее время подавляющая часть вычислительной, измерительной техники, систем связи основаны на использовании цифровых, а не аналоговых устройств. В частности, передача информации в системах связи основана на цифровых сигналах и использовании целого

ряда методов предварительной обработки этих сигналов с целью улучшить помехоустойчивость передачи.

Целью данной работы является исследование возможности реализации метода пространственной локализации временных шумов канала с использованием преобразования Адамара со специальным упорядочиванием базисных функций для случая передачи по каналу связи цифрового сигнала.

Пространственная локализация шума для случая цифрового канала

Принципиальное отличие цифровых каналов связи от аналоговых заключается в дискретности передаваемых по ним сигналов. При этом методы детектирования, основанные на принятии решения о значении сигнала в присутствии шума, переводят аналоговые значения шума в вероятности ошибок при оценке величины сигнала. Вопрос о возможности пространственной локализации шума в пространстве восстановленного изображения требует дополнительного исследования.

В настоящей работе рассматриваются цифровые сигналы, в которых каждый элемент сигнала может принимать два значения — двоичная единица (s_1) или двоичный нуль (s_2), а также соответствующая модель канала — двоичный симметричный канал с гауссовым шумом. Обобщение анализа на цифровые сигналы с большим набором дискретных значений может быть получено без нарушения логики и подхода к задаче.

В отличие от аналогового сигнала, при котором на выходе присутствуют передаваемый сигнал и наложенная на него шумовая составляющая канала связи, в случае передачи дискретных сигналов шум на выходе детектора проявляются в виде ошибок принятия решения о дискретном значении сигнала, т.е. если на вход детектора поступает выборка $z(T) = f_i(T) + n_0(T)$, то решение относительно цифрового значения выборки принимается на основании величины принятого сигнала

и величины шума (здесь $f_i(T)$ — полезный сигнал, $n_0(T)$ — шум, $i = 1, 2$).

Особенностью метода пространственной локализации шумов с использованием преобразования Адамара является процедура обратного преобразования Адамара, в результате которой восстановленный сигнал приобретает аналоговую форму. Вследствие этого ошибки определения дискретов, обусловленные наличием шумов, в пространстве восстановленного изображения также проявляются в виде аналогового шума.

Рассмотрим взаимосвязь аналоговых шумов канала связи и ошибок принятия решения о дискретном значении сигнала, которые в свою очередь проявляются в пространстве восстановленного изображения в виде аналогового шума.

Будем полагать, что шум канала связи является стационарным случайным процессом с нулевым средним и известной спектральной характеристикой. Известно [5], что в этом случае вероятность ошибки в принятии решения оценивается из плотности вероятности случайного процесса:

$$p(n_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{n_0^2}{\sigma^2}\right] \quad (1)$$

(σ^2 — дисперсия шума) и плотности условных вероятностей $p(z|s_1)$ и $p(z|s_2)$ выбора нуля или единицы соответственно:

$$p(z|s_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z - f_1)^2}{\sigma^2}\right] \quad (2)$$

и

$$p(z|s_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z - f_2)^2}{\sigma^2}\right]. \quad (3)$$

Детектирование выполняется посредством выбора гипотезы, являющейся следствием порогового измерения [6]:

$$\begin{array}{l} H_1 \\ z(T) > \gamma, \\ H_2 \end{array} \quad (4)$$

где H_1 и H_2 — две возможные (бинарные) гипотезы. Гипотеза H_1 выбирается при условии $z(T) > \gamma$, а гипотеза H_2 — при $z(T) < \gamma$. Достоверность результата при этом определяется вероятностью ошибки, величина которой непосредственно связана с отношением сигнал/шум.

Такие особенности регистрации цифровых сигналов требуют внесения изменений в методы расчета оценки шумовых характеристик, применявшихся к аналоговым сигналам и рассмотренным в работах [1–4].

После детектирования из выборки $z(T)$ образуется вектор, над которым в соответствии с принятой процедурой осуществляются обратное преобразование Адамара \mathbf{H}^{-1} и преобразование, задаваемое оператором \mathbf{L}^{-1} . Последнее преобразование приводит к переходу от временного представления сигнала в канале к его пространственному представлению, соответствующему

пространству изображения. Таким образом, вероятности ошибок, полученных в результате принятия решений, в поле восстановленного изображения переводятся в пространственное распределение дисперсии аддитивного шума.

Существуют два случая, заслуживающие отдельного рассмотрения. Оценка вероятности ошибки одно-разрядных слоев представляет интерес в том случае, когда по каналу связи передаются однобитовые посылки, не связанные между собой в слова. Такой вариант реализуется, например, в случае, когда посылки передаются поочередно из различных массивов данных. В этом случае их вероятности ошибок должны оцениваться с равным весом. При передаче последовательности битов, образующих цифровое слово и содержащих q разрядов, каждый из разрядов имеет различную информационную ценность, или вес. Поэтому суммарная ошибка определения слова должна определяться с учетом значимости каждого разряда.

В нашем случае при передаче сигнала по цифровому каналу связи, вне зависимости от цифровой или аналоговой природы исходного сигнала, он подвергается интегральному преобразованию Адамара с заданным упорядочиванием. Затем полученный вектор-трансформант проходит оцифровку, вследствие чего появляется возможность образовать разрядные матрицы как наборы q векторов, содержащих элементы одинаковой разрядности двоичных слоев соответствующих аналоговых трансформант сигнала. Важным для нас обстоятельством является то, что порядок передачи слов, а также быть различным, составляющих цифровые слова, может быть различным. Будем передавать по каналу связи набор q векторов в порядке возрастания разрядности составляющих их элементов. При этом передаваемые элементы каждого из векторов представляют собой однобитовые, не зависящие друг от друга и не составляющие слова двоичные посылки.

Итак, на каждом шаге оцифровки, который соответствует формированию одного разряда, возникает бинарный вектор соответствующего разряда преобразованного сигнала и вектор, подлежащий дальнейшему разложению. При таком способе передачи многобитовых слоев появляется возможность на каждом шаге кодирования для каждого из векторов q_n учитывать вероятность ошибки с разным весом. Так, для 4-разрядного слова ошибки в первом, втором, третьем и четвертом разрядах должны учитываться с весом 1, 2, 4 и 8 соответственно.

В канале на передаваемый цифровой сигнал воздействует аддитивный гауссов шум заданной спектральной плотности. На выходе детектора канала производится принятие решения о значении бинарного сигнала, на основе чего формируются вектора разрядов трансформант. Над этими векторами осуществляется обратная двоичному разложению процедура, обратное преобразование Адамара и преобразование, задаваемое оператором \mathbf{L}^{-1} , что приведет к переводу вероятностей ошибок в пространственное распределение шума.

Для двойного преобразования Адамара, как в случае аналогового, так и цифрового канала, схема не изменяется. Матрица сигнала передается дважды, первый раз, — развернутая построчно, второй раз — по столбцам. Затем, после осуществления обратного преобразования на выходе, две передачи складываются.

Результаты модельного эксперимента

Для подтверждения возможности пространственной локализации временного шума при передаче сигнала по цифровому каналу связи был проведен модельный эксперимент по исследованию распределения шума в пространстве восстановленного изображения в случае использования интегрального преобразования Адамара. Предполагалось, что исходный сигнал S представляет собой стационарный, аналоговый пространственно-дискретизированный сигнал. Спектральная плотность мощности шума задавалась функцией Гаусса с дисперсией σ^2 . При этом считалось, что шум распределен относительно несущей частоты и целиком находится в полосе передаваемого сигнала.

В рамках эксперимента величина дисперсии и размерность преобразования были связаны между собой соотношением $\sigma = KN/\tau$, где N — количество элементов сигнала, τ — время, затрачиваемое на передачу одного элемента, величина K принималась за константу, что обеспечивало возможность анализа пространственного распределения шума инвариантно к скорости передачи массива данных.

Для анализа результатов, полученных при моделировании, были выработаны следующие оценки. Основным критерием оценки пространственной локализации шума был выбран порог, соответствующий среднему значению дисперсии шума в пространстве восстановленного изображения для случая передачи сигнала без применения преобразования Адамара. В этом случае дисперсия шума распределена равномерно по пространству изображения, а ее величина равна дисперсии шума канала связи.

При передаче сигнала по аналоговому каналу величина шума в выходном изображении оценивались относительно порогового значения как корень из дисперсии шума в пространстве восстановленного изображения в случае передачи без использования интегрального преобразования.

Аналогично для оценки результатов моделирования шума цифрового канала связи также был введен порог, равный корню из дисперсии шума, получаемой в пространстве восстановленного изображения при передаче без использования интегрального преобразования. В отличие от аналогового канал в этом случае величина дисперсии шума восстановленного изображения отлична от величины дисперсии шума канала связи и различна для случаев передачи слов с разным количеством разрядов, что объясняется различным весом передаваемых разрядов. Значение порога, относительно которого оце-

нивается зашумленность слов, состоящих из k разрядов, выражается через значение порога для одноразрядных слов следующим образом:

$$\alpha_k = \alpha_1 \sqrt{\sum_{i=0}^{k-1} 2^{2i}},$$

где α_k — порог для слоев, состоящих из k разрядов, α_1 — порог для одноразрядных слов, который определяется выражением

$$\alpha_1 = \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma^3 \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \sigma^2 \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\right) \right]^{1/2}$$

где σ^2 — дисперсия шума канала связи.

В результате моделирования были получены распределения ошибок, которые в пространстве восстановленного изображения проявляют себя в виде дисперсии шума. На рис. 1 приведены распределения шума в пространстве выходного изображения при передаче 4- и 8-разрядных слов для двух различных величин отношения сигнал/шум по мощности при использовании способа упорядочивания матрицы Адамара „Inc_Even“ [2]. Величина дисперсии шума канала равна 1.0, значения α_1 , α_4 и α_8 составляют 0.5, 4.6 и 73.9 соответственно. На рис. 1 количество оттенков серого (от белого до

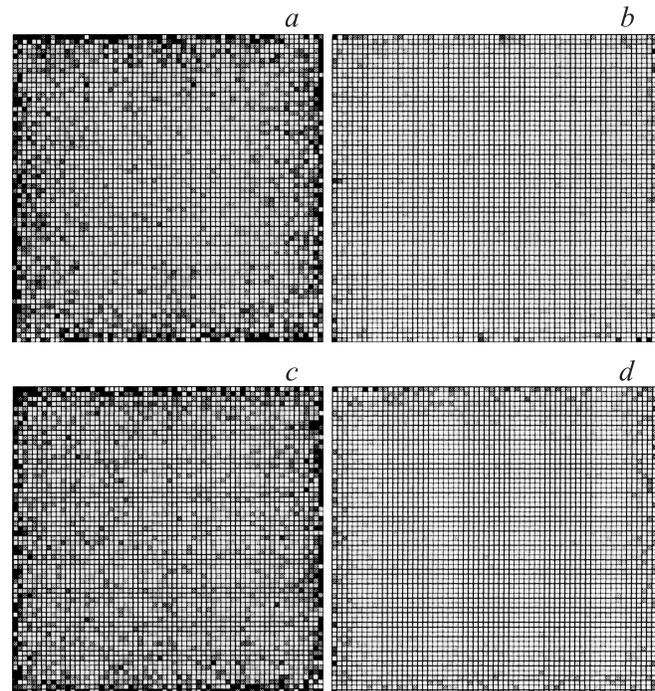


Рис. 1. Распределение шума при модельном эксперименте в пространстве изображения для способа упорядочивания „Inc_Even“ для случая цифрового сигнала: *a* — 4-разрядные слова, отношение сигнал/шум — 1, величина порога — 4.6; *b* — 4-разрядные, сигнал/шум — 3, порог — 4.6; *c* — 8-разрядные, сигнал/шум — 1, порог — 73.9; *d* — 8-разрядные, сигнал/шум — 3, порог — 73.9.

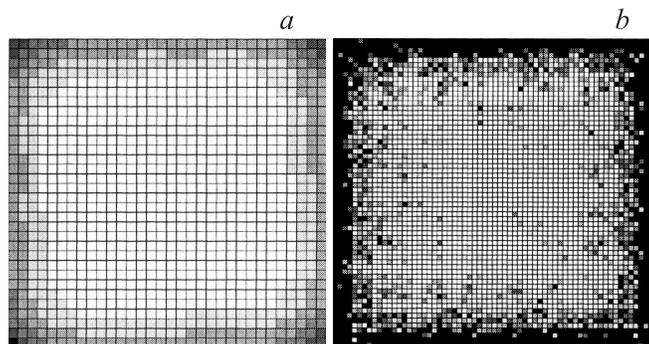


Рис. 2. Распределение дисперсии шума в пространстве изображения для способа упорядочивания „Inc_Even“ для случая аналогового сигнала; *a* — рассчитанное распределение дисперсии шума, отношение сигнал/шум — 1, величина порога — 0.2; *b* — распределение шума при модельном эксперименте, сигнал/шум — 1, порог — 0.5.

черного) соответствует количеству разрядов двоичного разложения. Каждым из цветов отмечены значения шума, превышающие вес определенного разряда. Величины шума, превышающие значения порога, отмечены черным цветом, градациями серого отмечены величины шума, превышающие 20, 40, 60 и 80% от величины порога, белым цветом — не превышающие 20% от порогового значения.

Для сравнения на рис. 2 приведены результаты расчета распределения дисперсии шума для случая аналогового сигнала при использовании двойного преобразования Адамара [2] и результат модельного эксперимента, проведенного нами для этого случая. Из сравнения с результатами, полученными ранее для аналогового канала, видно, что пространственная локализация шума в случае цифровой передачи сигнала сохраняет все основные закономерности при переходе оценки влияния шумов через вероятность ошибки распознавания сигналов при различной разрядности.

Заключение

Таким образом, результаты работы подтверждают гипотезу о том, что пространственная локализация временного шума канала связи, основанная на использовании интегрального преобразования Адамара, реализуется при цифровой передаче сигнала не менее эффективно, чем при аналоговой передаче. Полученный результат позволяет рассчитывать на совместимость метода пространственной локализации временного шума с использованием различных методов кодирования, направленных на улучшение помехозащищенности передаваемого сигнала и его шифрование.

Список литературы

- [1] Подласкин Б.Г. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 5. С. 139–142.
- [2] Подласкин Б.Г., Гук Е.Г. // Мат. Междунар. науч. технич. конф. „Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения“. М., 2007. Ч. 2. С. 136–139.
- [3] Подласкин Б.Г., Гук Е.Г., Сухарев А.А. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 8. С. 9–13.
- [4] Патент РФ № 2350021 / Б.Г. Подласкин, Е.Г. Гук, А.А. Сухарев. Приоритет от 03.10.07. Оpubл. 20.03.2009.
- [5] Van Trees H.L. // Detection, Estimation and Modulation Theory. Pt I. NY: John Wiley & Sons, 1968.
- [6] Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.–СПб.–Киев: Вильямс, 2003. 1095 с.