

АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО ОБЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РЕГУЛЯРИЗАЦИИ РЕШЕНИЯ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ

Агеев С.А., Васильев К.К.

ФГУП НПО "Марс", Ульяновский государственный технический университет
432027, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, кафедра САПР

Известно, что задачи, связанные с цифровой обработкой сигналов на фоне помех, имеют наиболее простые решения, когда помехи представляют собой белый шум [1-5].

Когда помехи обладают пространственно-временными корреляционными свойствами отличными от свойств белого шума, то одним из методов, применяемых в этом случае, является метод обеляющего фильтра (ОБФ), суть которого заключается в предварительной декорреляции входных наблюдений [1-9]. Метод ОБФ был предложен в работах [5,6]. Дальнейшее его развитие нашло отражение в работах [7-9]. Другие подходы к решению задачи декорреляции основаны на использовании обратной корреляционной матрицы входных наблюдений [1-4], элементы которой должны быть либо известны, либо их необходимо предварительно оценить. Подобные идентификационные процедуры имеют ограниченное применение в случаях, когда накладываются жесткие ограничения на время обработки. Таким образом, известные методы предполагают стационарность наблюдений и требуют значительных вычислительных затрат, что затрудняет их применение в решении практических задач.

В реальных условиях помехи обладают нестационарными пространственно-временными корреляционными свойствами, которые априори неизвестны, а также в процессе наблюдения могут меняться случайным образом. В этих ситуациях целесообразно применять адаптивные процедуры декорреляции, или выбеливания, входных наблюдений. Поэтому проблема создания относительно простых и эффективных процедур адаптивной декорреляции нестационарных случайных последовательностей и полей, работающих в режиме близком к режиму реального времени, является весьма актуальной. Решение задачи адаптивной декорреляции случайных последовательностей было рассмотрено в работах [11, 12]. В данной работе предлагается решение задачи адаптивной декорреляции случайных полей.

Пусть имеется последовательность кадров изображений, или случайных полей (СП) $\{x_{ij}^k\}$, $k = 1, 2, \dots$, представляющая собой дискретные отсчеты на прямоугольной сетке размера $M \times N$ $\Omega = \{i, j; i = \overline{1, M}; j = \overline{1, N}\}$. Корреляционная функция (КФ) $R_{x_{ij}^k}(\bar{u}, \bar{l}) = M \{x_{ij}^k(\bar{u}) * x_{ij}^k(\bar{u} + \bar{l})\}$ априори

неизвестна и может меняться случайным образом в зависимости от координат (i, j) . Единственным ограничением является то, что СП относятся к классу СП с дробно-рациональным спектром. Пусть отсчеты наблюдений $\{x_{ij}^k\}$ поступают по правилу обычной телевизионной развертки. Требуется построить адаптивное преобразование

$$z_{ij}^k = L\{x_{ij}^k\}, \quad (1)$$

такое, чтобы обеспечивалось условие

$$R_{z_{ij}^k}(\bar{u}, \bar{l}) = M \{z_{ij}^k(\bar{u}), z_{ij}^k(\bar{u} + \bar{l})\} \rightarrow 0, \quad (2)$$

для всех $i, j \in \Omega$. Дополнительным ограничением для преобразования (1) является требование работы в режиме близком к режиму реального времени.

Как известно, данная задача относится к классу некорректных задач, и для её решения может применён метод тихоновской регуляризации [9,14]. Для этого, например, входные наблюдения могут быть представлены в виде суммы $x_{ij}^k = y_{ij}^k + \sigma \cdot \zeta_{ij}^k$, где y_{ij}^k - поступающие на

вход ОБФ наблюдения, ζ_{ij}^k - нормальный некоррелированный гауссовский шум, искусственно

складываемый с входным сигналом, σ - СКО искусственного белого шума, значение которого может также подстраиваться адаптивно.

Представим адаптивное преобразование (1) в виде линейной комбинации наблюдаемых значений

$$z_{ij}^k = x_{ij}^k - \sum_{I \in \hat{U}} c_I x_{i+p, j+m}^k, \quad (3)$$

где $\{c_I\}$ – элементы матрицы весовых коэффициентов; I – область весового суммирования вблизи

наблюдения z_{ij}^k . Для выполнения условия (2) необходимо изменять значения $\{c_I\}$ в (3) в

соответствии с изменениями параметров наблюдений. С этой целью воспользуемся следующим псевдоградиентным алгоритмом [10]:

$$c_{p, m}(i, j+1) = c_{p, m}(i, j) - \dot{\epsilon}_{p, m}(i, j) \varphi(\nabla Q(c_{p, m}(i, j))),$$

где $\{p, m\}$ – координаты, изменяющиеся по области I , $\varphi(*)$ – некоторая функция от реализации градиента функционала качества $J(c_{p, m})$, т.е. $\nabla Q(c_{p, m}) = \nabla J(c_{p, m}) + \hat{\epsilon}_{p, m}$, где $\hat{\epsilon}_{p, m}$ – ошибка

наблюдения. В качестве $\varphi(*)$ в данной работе выбрана знаковая функция $\text{Sign}\{*\}$, а в качестве $J(c_{p, m})$ выбран квадрат функции ковариации, наблюдение которой

$$Q(c_{p, m}) = \sum_D \{z_{ij}^k(\bar{u}) \cdot z_{ij}^k(\bar{u} + \bar{I})\}^2$$

оценивается в скользящем окне, где D – область декорреляции.

Численное моделирование предложенных адаптивных алгоритмов декорреляции осуществлялось как для имитированных, так и для реальных СП. Остаточные корреляционные связи декоррелированного поля оценивались с помощью нормы Гильберта-Шмидта (НГШ) [13].

СП имитировались с помощью моделей с дробно-рациональным спектром, в частности с помощью авторегрессионной модели первого порядка, а также с помощью авторегрессионной модели второго порядка с кратными корнями характеристического уравнения. Размеры исходных как имитированных, так и реальных СП 200×200 пикселей. Представлены результаты зависимости НГШ от значения $\dot{\epsilon}_{p, m}(i, j)$, от величины области прогноза и области декорреляции, а также, для имитированных СП, от параметров модели, в частности от параметров, определяющих корреляционные связи СП. Представлены зависимости НГШ от отношения дисперсии входных наблюдений и дисперсии искусственного белого шума. Экспериментально установлено, что это отношение может быть $10^5 - 10^7$.

Во всех рассмотренных случаях форма области декорреляции была выбрана прямоугольной, область прогноза также имела прямоугольную форму. Значения $\dot{\epsilon}_{p, m}(i, j)$ были ограничены снизу. Начальные значения матрицы весовых коэффициентов выбирались одинаковыми во всех случаях, и как показали проведённые исследования, их целесообразно выбирать небольшими по абсолютной величине.

Проведённый анализ полученных результатов численного моделирования предложенных алгоритмов показал, что качество декорреляции как для имитированных, так и для многих реальных СП становится приемлемым при следующих параметра алгоритма декорреляции: область декорреляции лежит в пределах от 7×7 отсчётов до 11×11 отсчётов, область прогноза от 3×3 отсчётов до 7×7 отсчётов. Полученные точностные характеристики предложенных алгоритмов, позволяют сделать вывод о том, что статистические свойства декоррелированных СП приближаются к статистическим свойствам белого шума.

Показано, что предложенные алгоритмы могут быть реализованы в режиме близком к режиму реального времени, при минимальных аппаратных затратах.

Литература

1. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники, М.: Изд-во Радио и связь, 1989, 659с.
2. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов, М.: Изд-во Сов. радио, 1975, 704с.
3. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех, М., 1984, 416 с.
4. Обработка сигналов в радиотехнических системах: Учеб. пособие/Долматов А.Д., Елисеев А.А. и др.; Под ред. А.П. Лукошкина. - Л., 1987, 400с.

5. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М., Госэнергоиздат, 1956.
6. Фалькович С.Е. Прием радиолокационных сигналов на фоне флюктуационных помех. М., "Сов. радио", 1961.
7. Гуткин Л.С. Теория оптимальных методов радиоприема при флюктуационных помехах. М., "Сов. радио", 1972, 448 с.
8. Кайлатц. Метод порождающего процесса в применении к теории обнаружения и оценки.- ТИИЭР, 1970, т.58, N 5.
9. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. - М.: "Сов. радио", 1978, 320 с.
10. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Псевдоградиентные алгоритмы адаптации и обучения, Автоматика и телемеханика, 1973, N 3, с.45-68.
11. Агеев С.А., Васильев К.К. Адаптивная декорреляция случайных последовательностей // ЦИ Научная сессия, посвященная Дню радио, Тез. докл., М., 1997, с.58-59.
12. Агеев С.А., Васильев К.К. Алгоритм адаптивного выбеливания случайных последовательностей // Тез. докладов МНТК "Спутниковые системы связи и навигации", Красноярск, 1997, с.113-119.
13. Виттих В.А., Сергеев В.В., Сойфер В.А. Обработка изображений в автоматизированных системах научных исследований. М.: "Наука", 1982, 216 с.
14. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М: Наука, 1979, 286 с.



THE ALGORITHMS OF RANDOM FIELDS ADAPTIVE WHITENING WITH THE USE OF INCORRECT TASKS DECISION REGULARIZATION METHOD

Ageev S., Vasiliev K.

FGUP NPO "Mars", Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University,
432027, Ulyanovsk, Severny Venets, 32, Chair of CAD System

It is known, that many tasks concerned with digital signals processing against a background of obstacles, have the easiest solutions, when the obstacles are the white noise by nature.

If obstacles have spatially-timing correlative characteristics different from white noise' properties, then the method which is applied in that case, is the method of whitening filter (WF), the essence of which is a preliminary decorrelation of incoming observations. Another ways of solution decorrelation problem are based on the use of inverse correlative matrix of incoming observations, which elements need to be known, or they have to be estimated preliminary. Such identification procedures have limited application, when rigid limitations for processing time are applied. So known methods assume the stationarity of observations and require considerable calculation expenditures, what's why, it is difficult to apply them for practical needs.

In real conditions the obstacles have non-stationary spatially-timing correlative characteristics, which are known a priori, and they could be changed in time of correlation process at random. In these cases it is appropriate to apply decorrelation adaptive procedures, in other words, to apply whitening of incoming observations. That's why the problem of creation relatively simple and effective procedures of random non-stationary successions and fields adaptive decorrelation, working in the mode similar to the real-time mode is much urgent.

In this work you can see the task solution of random fields adaptive decorrelation with the use of incorrect tasks decision regularization. The adaptation of algorithms' parameters for statistical properties of observed field is made with the use of pseudogradient procedures.

In this work are investigated the dependencies of decorrelation quality from decorrelation algorithms' parameters and from parameters of random field (RF), which were imitated with the help of the models with bilinear spectrum, in particular with the help of autoregressive model of first order, and with the help of autoregressive model of second order with multiple roots of characteristic equation.

Traced analysis of obtained results from numerical modeling of suggested algorithms shows that the quality of decorrelation both for imitated and for real RF becomes acceptable, when the parameters of decorrelation algorithms are following: decorrelation field is in the bounds of 7x7 indications to 11x11 indications, the field of prognosis in the bounds of 3x3 indications to 7x7 indications. Obtained precision characteristics of suggested algorithms allows to make a conclusion that statistical properties of decorrelated RF tend to the statistical properties of white noise.

It was shown, that suggested algorithms could be realized in a mode similar to a real time mode with minimal equipment expenditures.