УДК 621.391.

С.И. СИВАЩЕНКО

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Украина

РАЗДЕЛЕНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ И ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА ИНТЕРПОЛЯЦИИ

Предложено решение задачи разделения аддитивной смеси хаотических и регулярных последовательностей, при маскировке передаваемых сигналов, с целью повышения скрытности работы информационных радиотехнических систем. Рассматриваемая задача относится к классу задач фильтрации временных последовательностей, которая решается методом максимально правдоподобной интерполяции последовательностей. В качестве компонент смеси использовались последовательности, порождаемые нелинейной дискретной динамической системой заданной логистическим отображением. Определена потенциальная точность совместной оценки элементов компонент смеси и их весовых коэффициентов. Проведен сравнительный анализ качества разделения последовательностей предложенным алгоритмом и алгоритмом, основанным на квазилинейной Калмановской фильтрации. Показана большая эффективность предложенного алгоритма разделения при априорной неопределенности начальных условий и весовых коэффициентов компонент смеси.

Ключевые слова: *радиотехнические системы, хаотические последовательности, Калмановская фильтрация, интерполяция, потенциальная точность.*

Введение

Новые возможности решения задачи обеспечения высокой скрытности радиотехнических систем (РТС) открываются достижениями в области детерминированного хаоса. Хаотические последовательности (сигналы) можно использовать для переноса информации, расширения спектра сигналов и генерирования практически бесконечного ансамбля реализаций для кодирования сообщений. Кроме того, они могут так же быть использованы для маскировки передаваемой информации без использования расширения спектра [1]. Однако, одной из проблем использования хаотических последовательностей (колебаний) в задаче маскировки сигнала является устойчивость алгоритма разделения компонент смеси нескольких хаотических и регулярных последовательностей по наблюдению в условиях шумов и априорной неопределенности о некоторых параметрах сигнально-помеховой обстановки.

Хорошо разработанная статистическая теория выделения сигналов на фоне флуктуационных помех, к сожалению, недостаточно применяется, а существующие исследования в этом направлении показали сложность решения этой проблемы в силу нелинейного характера эффектов хаотической динамики, положенных в основу методов передачи информации [2, 3].

В работе [4] был предложен алгоритм разделения последовательностей, генерируемых нелинейными динамическими системами, основанный на общих уравнениях оптимальной фильтрации в квазилинейном приближении. Однако этот алгоритм обладает рядом недостатков, в том числе, необходимостью знания начальных условий, управляющих параметров и вектора весовых коэффициентов. Кроме этого он обладает низкой эффективностью при разделении хаотических последовательностей на фоне аддитивного шума даже небольшого уровня. Поэтому представляет интерес поиск нового подхода к решению задачи разделения последовательностей, свободного от указанных недостатков.

Постановка задачи исследования

При маскировки информационного сигнала (последовательности) хаотическим в приемном устройстве необходимо решить задачу их разделения. Не теряя общности рассматриваемой задачи в качестве информационной можно использовать периодическую последовательность, порождаемую нелинейным логистическим отображением

$$x_n = f(x_{n-1}) = x_{n-1}\lambda\ (1 - x_{n-1}) \qquad (1)$$

с управляющим параметром $\lambda = 3,55$, а в качестве маскирующей хаотическую последовательность задаваемую тем же отображением, но с управляющим параметром $\lambda = 3,99$ обеспечивающим режим развитого хаоса. Совокупность информационной и маскирующей последовательностей можно представить в виде

$$Z_n = \sum_{k=1}^{K} \mathbf{V}^T x_n^{(k)}, \qquad (2)$$

где k – номер последовательности, K – количество компонент, $\mathbf{V} = (a,\ b)$ – вектор весовых коэффициентов.

На вход приёмного устройства поступает аддитивная смесь

$$y_n = Z_n + \xi_n, \qquad (3)$$

где ξ_n – отсчеты белого гауссовского шума.

Для решения поставленной задачи разделения, использовался приведенный ниже методом максимально правдоподобной интерполяции.

Интерполяционный метод решения задачи разделения

Улучшить качество разделения последовательностей можно за счет вовлечения в обработку последующих наблюдений, на основе использования метода максимально правдоподобной интерполяции. Реализация этого метода сводится к решению уравнения максимального правдоподобия. Однако уже при использовании двух наблюдений приходится решать кубическое уравнение и разрешать неоднозначность, которая зависит от уровня шумов в канале связи. При больших уровнях шумов исключить неоднозначность практически невозможно, что приводит к появлению аномальных ошибок. Вовлечение в обработку дополнительного числа наблюдений приводит к необходимости разрешения неоднозначного полиномиального уравнения еще большей степени, что при заданном уровне шума увеличивает вероятность появления аномальных ошибок.

Откажемся от решения уравнения максимального правдоподобия, а оценки элементов последовательности и ее параметров будем находить по наблюдаемой последовательности численной минимизацией критериальной функции (логарифма функции максимального правдоподобия)

$$F(x_n^{(1)}, x_n^{(2)}, a, b) = \\ = \frac{1}{\sigma_\xi^2} \sum_{i=0}^{I} \left[y_{n+i} - \left(a f_1^{(i)}\left(x_n^{(1)}\right) + b f_2^{(i)}\left(x_n^{(2)}\right) \right) \right]^2, \qquad (4)$$

полученной для модели наблюдения суммы y_n двух последовательностей $x_n^{(1)}$ и $x_n^{(2)}$ с различными весовыми коэффициентами a и b на фоне дельта-коррелированного гауссовского шума.

Результаты ошибок численной минимизации функции (4) при глубине интерполяции $I = 3$, по элементам последовательностей с управляющими параметрами $\lambda_1 = 3{,}55$, $\lambda_2 = 3{,}99$, и весовыми коэффициентами $a = b = 0{,}5$ представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

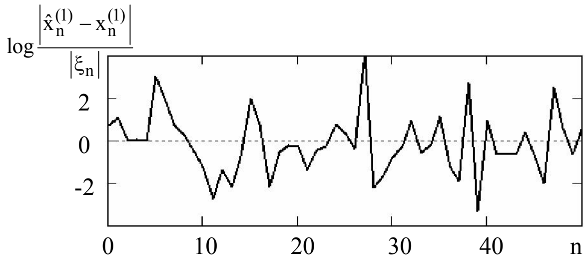

Рис. 1. Реализация логарифма относительной ошибки восстановления периодической компоненты

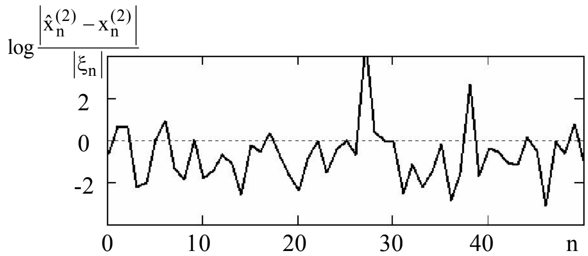

Рис. 2. Реализация логарифма относительной ошибки восстановления хаотической компоненты

Нетрудно заметить, что реализация погрешности выделения хаотической компоненты для большинства ее значений меньше шумовой составляющей. Для периодической компоненты соответствующая погрешность больше.

Представляет интерес сравнить качество разделения последовательностей предложенным алгоритмом с алгоритмом, основанным на квазилинейной калмановской фильтрации описанной в работах [3, 4]. Результаты сравнительного анализа обоих алгоритмов при разделении хаотических последовательностей представлены на рис. 3 в виде реализации логарифма относительной погрешности разделения

$$\Delta_{np} = \log \frac{\left|\hat{x}_{nкр}^{(2)} - x_n^{(2)}\right|}{\left|\hat{x}_{nфк}^{(2)} - x_n^{(2)}\right|}, \qquad (5)$$

где $\hat{x}_{nкр}^{(2)}$ – интерполяционная оценка хаотической компоненты; $\hat{x}_{nфк}^{(2)}$ – оценка хаотической компоненты алгоритмом, основанным на квазилинейной калмановской фильтрации.

Из рисунка видно, что ошибка разделения полученным алгоритмом в среднем меньше в 5 раз.

Как уже отмечалось выше, качество разделения существенно зависит от точности задания весовых коэффициентов и числа наблюдений. Однако часто значения весовых коэффициентов неизвестны и требуется их определять совместно с компонентами наблюдаемой последовательности.

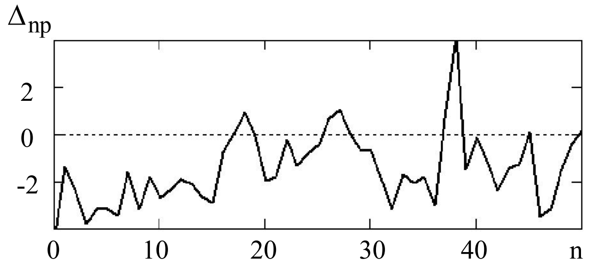

Рис. 3. Реализация логарифма относительной ошибки Δ_{np}

Определим потенциальную точность совместной оценки элементов компонент наблюдаемой последовательности и их весовых коэффициентов. Не снижая общности, будем полагать, что $a = 1$.

Найдем матрицу Фишера совместных оценок элементов последовательностей (компонент) и параметра b

$$\mathbf{\Phi} = \begin{Vmatrix} \Phi_{x_n^{(1)}x_n^{(1)}} & \Phi_{x_n^{(1)}x_n^{(2)}} & \Phi_{x_n^{(1)}b} \\ \Phi_{x_n^{(2)}x_n^{(1)}} & \Phi_{x_n^{(2)}x_n^{(2)}} & \Phi_{x_n^{(2)}b} \\ \Phi_{bx_n^{(1)}} & \Phi_{bx_n^{(2)}} & \Phi_{bb} \end{Vmatrix}. \qquad (6)$$

Для логистического отображения элементы матрицы Фишера $\mathbf{\Phi}$ имеют вид

$$\Phi_{x_n^{(1)}x_n^{(1)}} = \frac{2}{\sigma_0^2}\left(\sum_{i=1}^{I}\left(\prod_{k=1}^{i}\left(A_{n+k}^{(1)}\right)\right)^2 + 1\right), \qquad (7)$$

$$\Phi_{x_n^{(2)}x_n^{(2)}} = \frac{2}{\sigma_0^2}\left(\sum_{i=1}^{I}\left(\prod_{k=1}^{i}\left(A_{n+k}^{(2)}\right)\right)^2 + 1\right), \qquad (8)$$

$$\Phi_{bb} = \frac{2}{\sigma_0^2}\sum_{i=1}^{I}\left(A_{n+i}^{(2)}\right)^2, \qquad (9)$$

$$\Phi_{x_n^{(1)}x_n^{(2)}} = \Phi_{x_n^{(2)}x_n^{(1)}} = \\ = \frac{2}{\sigma_0^2}\sum_{i=1}^{I}\left(\prod_{k=1}^{i}\left(A_{n+k}^{(1)}\right)\prod_{k=1}^{i}\left(A_{n+k}^{(2)}\right)\right); \qquad (10)$$

$$\Phi_{x_n^{(1)}b} = \Phi_{bx_n^{(1)}} = \frac{2}{\sigma_0^2}\sum_{i=1}^{I}\left(A_{n+i}^{(2)}\prod_{k=1}^{i}A_{n+k}^{(1)}\right), \qquad (11)$$

$$\Phi_{x_n^{(2)}b} = \Phi_{bx_n^{(2)}} = \frac{2}{\sigma_0^2}\sum_{i=1}^{I}\left(A_{n+i}^{(1)}\prod_{k=1}^{i}A_{n+k}^{(2)}\right), \qquad (12)$$

где $A_n = \left.\frac{df(x,\lambda)}{dx}\right|_{x_n}$ – производная отображения.

На рис. 4 представлены зависимости элементов обратной матрицы $\mathbf{\Phi}^{-1}$ от глубины интерполяции для наблюдения совокупности хаотических компонент и периодической компоненты на фоне хаотической.

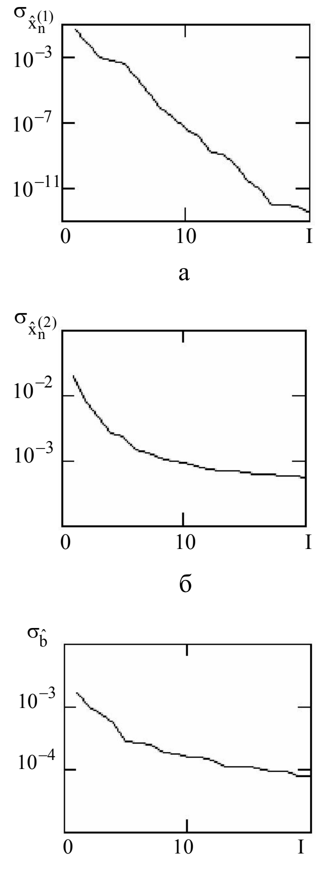

Рис. 4. Графики зависимостей дисперсий оценки от глубины интерполяции: а – хаотической компоненты; б – периодической компоненты; в – весового коэффициента

Из рисунка видно, что с увеличением числа наблюдений участвующих в оценке (глубины интерполяции), дисперсии оценок отсчетов периодической последовательности и параметра b насыщаются, а дисперсия оценок отсчетов хаотической уменьшается экспоненциально. Корреляция между оценками быстро убывает.

В случае, когда элементы последовательностей $x_n^{(1)}$, $x_n^{(2)}$ отличаются один от другого неизвестным временным сдвигом i, то есть $x_n^{(1)} = x_{n+i}^{(2)}$, алгоритм интерполяции предполагает минимизацию критериальной функции (4) по вектору переменных $\vec{q} = (x_n^{(1)},\ b,\ i)$. Учитывая, что вектор $\vec{q}$ содержит одну хаотически меняющуюся компоненту $x_n^{(1)}$, эффективность её интерполяции будет выше.

Заключение

Таким образом, применение интерполяционного алгоритма выделения хаотической последовательности, основанный на совместной минимизации критериальной функции по искомым переменным, оказывается более эффективным, чем квазилинейная фильтрация, и позволяет решать задачу разделения при априорной неопределенности начальных условий и весовых коэффициентов компонент.

Литература

1. Дмитриев А.С. Динамический хаос как парадигма современных систем связи / А.С. Дмитриев, А.И. Панас, С.О. Старков / Зарубежная радиоэлектроника. – 1997. – №10. – С. 4-26.

2. Тратас Ю.Г. Применение методов статистической теории связи к задачам приема хаотических колебаний / Ю.Г. Тратас // Зарубежная радиоэлектроника. – 1998. – № 11. – С. 57-80.

3. Костенко П.Ю. Особенности нелинейной фильтрации хаотического процесса, заданного логистическим отображением / П.Ю. Костенко, Д.В. Минюков, С.И. Сиващенко // Зарубежная радиоэлектроника. – 1999. – № 12. – С. 62-65.

4. Сиващенко С.И. Анализ квазилинейного алгоритма разделения совокупности хаотических и регулярных последовательностей / С.И. Сиващенко, П.Ю. Костенко // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – Вып. 22. – Х., 2001. – С. 273-276.

Поступила в редакцию 2.09.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. 404 П.Ю. Костенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков, Украина.

РОЗДІЛЕННЯ ХАОТИЧНИХ І ПЕРІОДИЧНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМУ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

С.І. Сиващенко

Запропоновано розв'язання задачі розділення адитивної суміші хаотичних і регулярних послідовностей, при маскуванні переданих сигналів, з метою підвищення скритності роботи інформаційних радіотехнічних систем. Розглянута задача відноситься до класу задач фільтрації часових послідовностей, яка розв'язується методом максимально правдоподібної інтерполяції послідовностей. В якості компонент суміші використовувалися послідовності, породжувані нелінійною дискретною динамічною системою заданою логістичним відображенням. Визначено потенційну точність спільної оцінки елементів компонент суміші і їхніх вагових коефіцієнтів. Проведено порівняльний аналіз якості розділення послідовностей запропонованим алгоритмом і алгоритмом, заснованим на квазілінійної Калмановської фільтрації. Показано більшу ефективність запропонованого алгоритму розділення при апріорній невизначеності початкових умов і вагових коефіцієнтів компонент суміші.

Ключові слова: радіотехнічні системи, хаотичні послідовності, Калмановська фільтрація, інтерполяція, потенційна точність.

DIVISION OF CHAOTIC AND PERIODIC SEQUENCES ON BASIS OF THE USE OF ALGORITHM OF INTERPOLATION

S.I. Sivaschenko

Was propound decisions of task division additive mixture of chaotic and regular sequences, at disguise of transferable signals, with the purpose for increase secrecy of work informative radio engineering's systems. The examined task behaves to the class of tasks filtration of temporal sequences, which decides the method of maximally plausible interpolation of sequences. Like components of mixture used sequences which generated by the nonlinear discrete of dynamic system which set by a logistic reflection. Potential exactness of simultaneous estimation of elements component of mixture and their gravimetric coefficients is certain. Was show comparative analysis of quality of division sequences between the offered algorithm and algorithm which based on linear Kalmanov filtration. Large efficiency of the offered algorithm for division at a priori vagueness of initial conditions and gravimetric coefficients component of mixture was show.

Key words: radio engineering's systems, chaotic sequences, Kalmanov filtration, interpolation, potential exactness.

Сиващенко Сергей Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков, Украина.