

КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЕ ДЕМОДУЛЯТОРЫ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Аливер В.Ю.

МГТУ им. Н. Э. Баумана

В настоящее время во всех научно-технических областях идет интенсивное изучение явления динамического хаоса. Понятие «динамический хаос» вошло в научную картину мира сравнительно недавно, главным образом, в последней четверти XX века. В наши дни наблюдается тенденция к тому, что интерес ученых и инженеров к хаосу становится обусловлен не только как к новому физическому явлению с теоретических позиций современной науки, но и как к феномену, который может иметь важное практическое значение для различных отраслей народного хозяйства и обороны страны. В частности, прослеживается интерес к применению хаоса в следующих областях: синтез и распознавание звуковых сигналов (речь, музыка: <http://www.trinitas.ru/rus/002/a0202007.htm>), медицина (анализ и воспроизведение биоритмов организмов как сложных динамических систем) [1, 2] и, конечно же, связь (передача информации с использованием хаотических колебаний) [3 – 14].

Хаотические колебания относятся к широкополосным, шумоподобным сигналам, а такие сигналы потенциально очень эффективны для передачи информации. Широкополосные сигналы могут обладать высокой помехоустойчивостью, скрытностью, большой информационной емкостью. Главная особенность систем связи, использующих хаотическую модуляцию, заключается в криптостойкости передаваемых сообщений, поскольку главными свойствами хаотических колебаний являются внешнее сходство с посторонними шумовыми процессами и экспоненциальное разбегание фазовых траекторий при малейшей разнице как в начальных условиях, так и в параметрах источников хаоса. Но даже если не обращать внимание на перечисленные полезные свойства динамического хаоса, построение систем связи с хаотической модуляцией только лишь с научно-методической точки зрения представляет огромный интерес, поскольку хаотические колебания с полной уверенностью можно назвать новыми носителями информации (на сегодняшний день).

Существует достаточно много работ по хаосу и по системам передачи информации на основе хаотических колебаний [5 – 14]. Тем не менее, имеется ряд нерешенных проблем, являющихся следствием свойств динамического хаоса и заключающихся, в основном, в следующем:

- 1) передача информации осуществима только при слишком большом отношении сигнал/шум (ОСШ), как правило, не достижимом в реальных ситуациях;
- 2) даже при достаточно большом ОСШ периодически наблюдается явление временной десинхронизации передающей и приемной систем;
- 3) накладываются значительные ограничения на допуск разброса параметров передатчика и приемника, погрешность значений параметров обычно не должна превышать 1 – 2 %;
- 4) начальные состояния передатчика и приемника должны совпадать или различаться незначительно.

Наряду с главными перечисленными выше недостатками существующих образцов (или станций, моделей) коммуникационных систем, использующих хаотические колебания, имеются и другие. Их причиной является слишком малое внимание достижениям в области статистического синтеза оптимальных приемных устройств. Целью настоящей работы является максимально, насколько это возможно, устранить перечисленные выше недостатки и ограничения, что должно оказаться возможным при использовании методов теории оптимальной фильтрации сигналов.

Математический аппарат оптимальной линейной и нелинейной фильтрации давно известен и достаточно хорошо развит. Системы, в которых наблюдаются хаотические колебания, являются типичными представителями нелинейных динамических систем. Возникает естественный интерес применить известные методы нелинейной оптимальной фильтрации к приему сигналов с хаотической несущей и выяснить, остаются ли такие методы адекватными в данном случае. При необходимости и возможности следует их скорректировать в связи со спецификой приема хаотических колебаний. Интересен тот факт, что теория оптимальной фильтрации сформировалась раньше, чем современная теория динамического хаоса, и развитие методов оптимального приема шло, по-видимому, без принятия во внимание хаотических явлений.

Первым из известных автору ученых в России, который применял методы статистической теории передачи информации к приему сообщений на хаотической несущей, является Тратас Ю. Г. (1997 – 1998 гг., [5 – 7]). Из зарубежных ученых следует отметить Donald J. Sobiski и James S. Thorp. (1998 г., [8]). Во всех этих случаях в качестве демодулятора хаотических колебаний использовался расширенный фильтр Калмана (РФК).

Научно-исследовательская работа, в рамках которой подготовлена настоящая публикация, также посвящена синтезу устройств приема хаотических колебаний с применением методов оптимальной фильтрации. Актуальность работы обусловлена, по крайней мере, следующими положениями и нерешенными по настоящее время вопросами:

- отсутствие общей (для разных способов ввода информационного сигнала в хаотический) и достаточно наглядной математической модели системы связи с хаотической модуляцией (нет достаточно четкого алгоритма);
- необходимость проведения анализа помехоустойчивости;

- необходимость проведения анализа стойкости к перехвату сигнала посторонними пользователями;
- реализация коммуникационных систем с хаотической модуляцией.

К моменту подготовки данной публикации часть перечисленных вопросов решена автором – решена в рамках своей диссертации на тему «Использование хаотических колебаний для передачи информации». В этой работе представлен и обоснован для применения новый вид модуляции сигналов – хаотическая модуляция. Показано, что хаотическое колебание можно использовать в качестве носителя информационного сигнала, причем с ничуть не меньшим успехом, чем гармоническое колебание, но при условии использования методов оптимальной фильтрации для построения демодуляторов. Исследования проводились на моделях коммуникационных систем, составленных в пакете “MatLab”. Определены наилучшие условия, для которых передача информации при хаотической модуляции еще возможна при использовании в качестве приемного устройства РФК: исследовано влияние гауссова белого шума (ГБШ) на работоспособность демодуляторов хаотических колебаний и получены минимально допустимые ОСШ и отношения несущая/сообщение (ОНС), при которых еще сохраняется работоспособность. Рассмотрены и сравнены между собой случаи с двумя способами взаимодействия хаотической несущей и сообщения, называемыми «модуляция параметра» и «нелинейное подмешивание». Рассмотрены две типичные модели полезного сигнала. Первая из них – двухкомпонентный марковский процесс $\lambda(t)$, удовлетворяющий системе обыкновенных дифференциальных уравнений (ДУ)

$$\begin{aligned}\dot{\lambda}(t) &= -\alpha\lambda(t) - \omega_0\mu(t) + n_1(t)\cos\omega_0t + n_2(t)\sin\omega_0t, \\ \dot{\mu}(t) &= -\alpha\mu(t) + \omega_0\lambda(t) + n_1(t)\sin\omega_0t - n_2(t)\cos\omega_0t,\end{aligned}\quad (1)$$

где $\alpha = const$, $\omega_0 = const$, $n_1(t)$ и $n_2(t)$ – взаимонезависимые ГБШ с одинаковой двусторонней спектральной плотностью $N_\lambda/2$. Сигналы вида (1) часто используются на практике, поскольку это гармонические сигналы, модулированные по амплитуде и/или фазе, с не очень большой глубиной модуляции. Центральная частота полезного сигнала ω_0 сопоставима по величине с центральной частотой спектра хаотической несущей. Другая модель полезного сигнала удовлетворяет ДУ

$$\dot{\lambda}(t) = 0, \quad (2)$$

т. е. формально считается, что полезный сигнал $\lambda(t)$ очень медленно меняется во времени по сравнению с изменением хаотической несущей. Фактически при моделировании в пакете “MatLab” $\lambda(t)$ представлял собой участок синусоиды с очень низкой частотой.

РФК выполнял совместную оценку хаотических компонент и полезного сообщения. Согласно алгоритму РФК вектор оценок для случая, когда наблюдение $\xi(t)$ представляет собой аддитивную смесь полезного сигнала (одной из хаотических компонент) и ГБШ с двусторонней спектральной плотностью $N/2$, удовлетворяет векторному ДУ

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + \frac{2}{N} \mathbf{R}(t, \mathbf{X}) \mathbf{A} [\xi(t) - \mathbf{x}_i(t)], \quad (3)$$

где вектор текущих коэффициентов линеаризации \mathbf{A} и корреляционная матрица $\mathbf{R}(t, \mathbf{X})$ определяются согласно [3, 4, 12 – 14], \mathbf{X} – вектор состояния хаотического модулятора, \mathbf{X} – его оценка, получаемая в приемнике, x_i – i -ая компонента вектора \mathbf{X} , передаваемая по каналу связи, $\mathbf{f}(\mathbf{X})$ – векторная функция, описывающая хаотический модулятор.

Особенность и отличие математической модели, представленной в диссертации и работах автора [12 – 14], от модели Тратаса Ю. Г. заключается в произвольном взаимодействии хаотических и информационных сигналов (а не только в их аддитивном суммировании), а также в обобщении: при любом способе ввода информации в генератор хаоса (хаотическая маскировка, модуляция параметра, нелинейное подмешивание) структура передатчика и приемника не меняется, меняются только значения их параметров. Отличие работ автора [12 – 14] от работы Donald J. Sobiski, James S. Thorp [8] также заключается в более общем подходе: в работе [8] рассматривается только передача дискретной информации (импульсы фиксированной амплитуды и длительности), а в работах [12 – 14] сообщение непрерывное, причем в случае модели сообщения (1) частотные диапазоны информационного сигнала и хаотической несущей значительно перекрываются.

Главный вывод, сделанный на основе проведенных исследований, заключается в том, что методы оптимальной фильтрации, с одной стороны, остаются адекватными при их использовании для демодуляции хаотических колебаний. С другой стороны, только с использованием теории статистического синтеза оптимальных радиоустройств возможен эффективный прием сообщений, переданных на хаотической несущей.

Литература

1. *Анищенко В. С.* Знакомство с нелинейной динамикой: Лекции соровского профессора: Учеб. Пособие. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002.
2. *Комаров В. М., Моргунов В. Л., Монаенков А. И., Рассторгуев Б. П.* Компьютерный анализ фонокардиограмм // Сб. «Вопросы разработки радиоэлектронных систем и устройств в диагностике сердечно-сосудистых заболеваний». – М.: Радио и связь, 1984.
3. *Тихонов В. И.* Фильтрация сообщений. Учебное пособие. В двух частях. – М.: Радио и связь, 1998.
4. *Тихонов В. И., Харисов В. Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 2004.
5. *Тратас Ю. Г.* Применение методов статистической теории связи к задачам приема хаотических колебаний // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники, 1998, №11, с. 57 – 80.
6. *Тратас Ю. Г.* Хаотическая синхронизация генераторов при наличии шума. // Радиотехника и электроника, 1997, т.42, №4, с. 457 – 463.
7. *Тратас Ю. Г.* Применение методов статистической теории связи к задачам приема хаотических колебаний // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники, 1998, №11, с. 57 – 80.
8. *Donald J. Sobiski, James S. Thorp.* PDMA-1: Chaotic Communication via the Extended Kalman Filter. IEEE Transactions On Circuits And Systems – I: Fundamental Theory And Applications, Vol. 45, № 2, 1998, pp. 194 – 197.
9. *Дмитриев А. С., Панас А. И.* Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. – М.: Физматлит, 2002.
10. *Мун Ф.* Хаотические колебания. Вводный курс для научных работников и инженеров: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990.
11. *Суото T.L., Oppenheim A.* Circuit Implementation of Synchronized Chaos with Application to Communications. // Rhys. Rev. Letters, 1993, V. 71, № 1, pp. 65-68.
12. *Аливер В. Ю.* Хаотическая модуляция: теория и возможные пути практической реализации // Электромагнитные волны и электронные системы. (принята редакцией для рассмотрения на предмет опубликования 20.10.2004)
13. *Аливер В. Ю.* Использование расширенного фильтра Калмана для демодуляции хаотических колебаний. // Вестник МГТУ им. Баумана. Приборостроение. (принята редакцией для рассмотрения на предмет опубликования 27.10.2004)
14. *Аливер В. Ю.* Демодуляторы хаотических колебаний для случая медленно меняющихся сообщений // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. (принята редакцией для рассмотрения на предмет опубликования 28.10.2004)

