

09

Генераторы хаоса на базе пленок железо-иттриевого граната для систем связи с хаотическим синхронным откликом

© Н.И. Мезин, А.А. Глуценко, Ю.Е. Кузовлев

Донецкий физико-технический институт НАН Украины
E-mail: niams@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 марта 2012 г.

Сообщается о создании прямохаотической коммуникационной системы, в которой генераторы хаоса выполнены на базе пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ). Генераторы хаоса на базе пленок ЖИГ обеспечивают устойчивый хаотический синхронный отклик и практически идеальную маскировку сигнала при высокой надежности и качестве связи. Проведено сравнение характеристик этих генераторов с традиционными генераторами хаоса.

Одной из причин, сдерживающих развитие систем связи с использованием хаотических сигналов, является отсутствие генераторов хаоса, позволяющих реализовывать нестандартные инженерные решения. До настоящего времени применялись генераторы хаоса, основанные на электрических схемах Колпитца или Чуа [1–3]. Для получения устойчивого хаотического синхронного отклика в системе связи, использующей эти схемы, требуются высокая степень идентичности генераторов хаоса, слабое влияние масштаба сигнала и уровня шумов на процесс синхронизации. Трудность достижения устойчивого хаотического синхронного отклика и, как следствие, ухудшение качества связи вынуждают отказываться от хаотической синхронизации связанных систем [4,5]. Это приводит к потере одного из уникальных свойств систем связи с хаотическим синхронным откликом — абсолютной конфиденциальности канала связи без искусственного кодирования.

В последнее время внимание исследователей привлекают пленки ЖИГ в связи с перспективой их использования для создания широкополосных генераторов хаоса [6,7]. Генераторы хаоса на базе пленок

ЖИГ обладают расширенными возможностями для возбуждения и регулирования хаоса, что может облегчить их синхронизацию.

Данная работа посвящена созданию канала связи с хаотическим синхронным откликом, приемо-передающие устройства которого выполнены на базе пленок ЖИГ.

Для изготовления хаотических генераторов были использованы пленки ЖИГ, полученные из слабодиссоциированного раствора-расплава [8]. Особенности параметрического хаоса в этих пленках изложены в [9]. За основу хаотического генератора была выбрана схема автогенератора с нелинейной спин-волновой линией задержки в цепи обратной связи [7,9]. Генератор выполнен на пленке ЖИГ толщиной $10\ \mu\text{m}$ и размерами $2 \times 5\ \text{mm}$ и усилителе на микросхеме MGA-83563. Намагниченность насыщения, поле одноосной анизотропии и ширина линии ФМР в этих пленках соответственно составляли: $4\pi M_s = 1870\ \text{Gs}$; $H_A = 150\ \text{Oe}$; $2\Delta H = 0.3\ \text{Oe}$. Передающая и приемная антенны на пленке выполнены из посеребренных проводников диаметром $50\ \mu\text{m}$. Характерная мощность, потребляемая генератором хаоса, составляет примерно $100\ \text{mW}$.

В зависимости от величины поля подмагничивания пленки и взаимного расположения антенн на ней центральная частота генерируемого хаотического сигнала может изменяться от 1 до 6 GHz, а ширина полосы от 100 до 500 MHz. Энергетический спектр колебаний, излучаемых генератором хаоса в типичном режиме, представлен на рис. 1. Существенно, что он не содержит низких частот, поскольку спектр магнитных волн в пленке имеет четкий полосовой характер (ограничен как сверху, так и снизу). Поэтому, несмотря на широкополосность, хаотическая несущая характеризуется текущими („мгновенными“) частотой и фазой, что позволяет различать ее амплитудную, частотную и фазовую модуляции. Собственная хаотическая модуляция амплитуды частоты и фазы несущей является настолько сильной, что позволяет легко спрятать искусственную информационную модуляцию. В принципе, даже глубокая (до 180°) искусственная фазовая модуляция может быть идеально скрыта собственной хаотической модуляцией фазы и частоты несущей. Кроме того, дополнительную маскировку обеспечивает хаотически разбросанное во времени проскальзывание фазы несущей (скачки на 180°). Эти скачки наблюдаются экспериментально, а также при численном моделировании. Технически фазовая модуляция может быть осуществлена путем изменения сдвига фазы сигнала (времени его

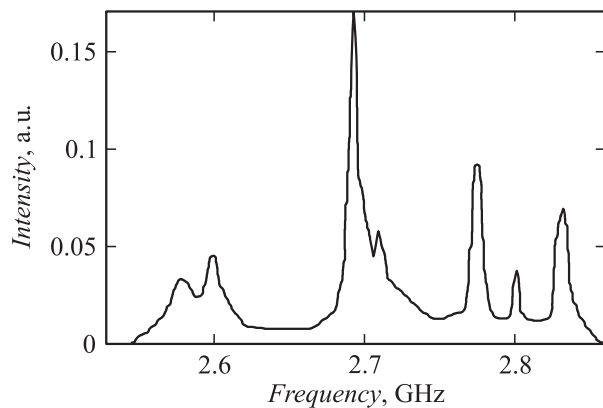


Рис. 1. Спектр микроволновых колебаний, излучаемых генератором хаоса на базе пленки ЖИГ.

задержки) в цепи обратной связи автогенератора несущей. Например, цифровую модуляцию фазы можно получить переключением между сигналом обратной связи и его инвертированной копией. Другой вариант — переключение между сигналами, полученными с двух различных приемных антенн (антенн обратной связи), напряжения на которых различаются по фазе. Извлечение информационного сигнала в приемнике обеспечивается фазовым детектором, включенным в разрыв обратной связи генератора хаоса приемника.

Числовая реализация процессов модуляции и демодуляции хаотического сигнала информационным сигналом представлена на рис. 2.

Рис. 3 иллюстрирует характер маскировки информации собственными изменениями фазы хаотического сигнала при глубине фазовой модуляции 90° . Как видно из рисунка, введение информационного сигнала в хаотический не изменило его характеристик, промодулированный хаотический сигнал практически не отличается от исходного сигнала.

Следует особо отметить, что с увеличением скорости ввода информации хаотический спектр становится более равномерным, а маскировка сигнала улучшается. Это связано с уменьшением амплитудной модуляции сигналом хаотического спектра. Уменьшение амплитудной модуляции обусловлено инерционностью процессов перераспределения

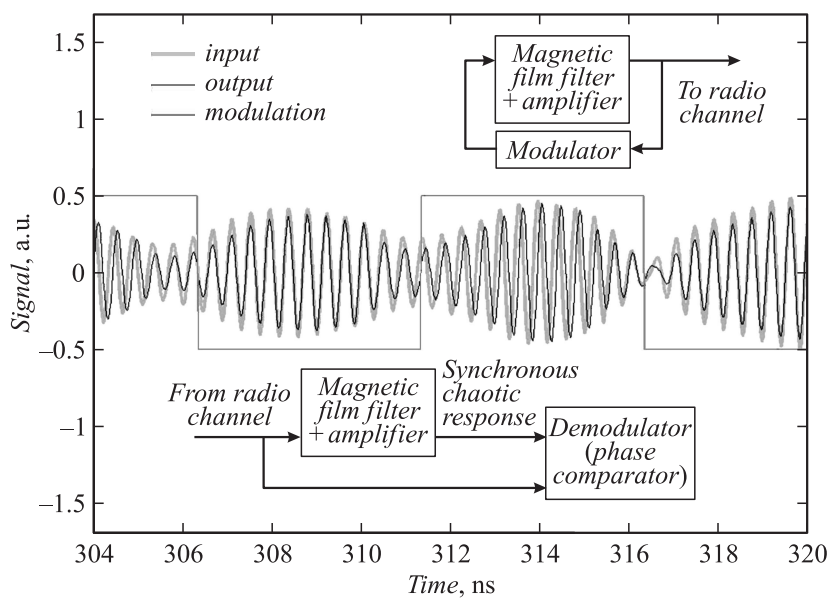


Рис. 2. Фазовая модуляция и демодуляция хаотического сигнала.

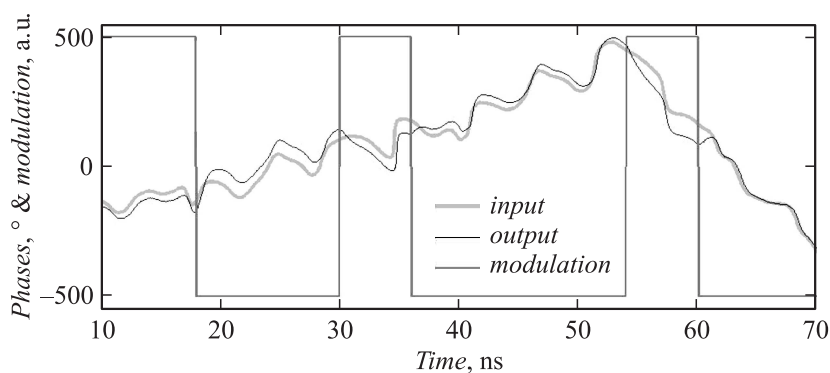


Рис. 3. Влияние искусственной фазовой модуляции на собственную (хаотическую) фазовую модуляцию.

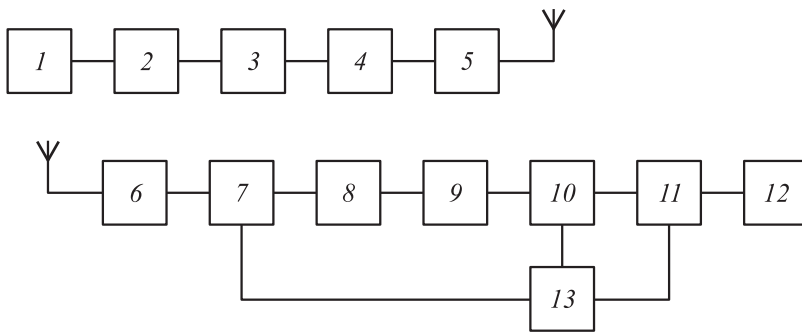


Рис. 4. Структурная схема приемопередатчика: 1 — источник информации; 2 — преобразователь кода; 3 — модулятор; 4 — генератор хаоса передатчика; 5 — усилитель мощности; 6 — предварительный усилитель высокой частоты; 7 — аттенюатор; 8 — генератор хаоса приемника; 9 — демодулятор; 10 — усилитель напряжения; 11 — преобразователь кода; 12 — приемник информации; 13 — автоматический регулятор усиления.

энергии магнитоэлектрических волн (МЭВ) в пленке между их различными модами.

Для обеспечения устойчивого хаотического синхронного отклика необходимо выполнить условие равенства мощностей генераторов хаоса в приемнике и передатчике. Практически это требование оказывается не слишком жестким (различие мощностей генераторов 1.5–2 раза не приводит к десинхронизации отклика), и его не сложно выполнить, включив в конструкцию приемника модуль автоматической регулировки усиления (АРУ). Модуль предназначен для работы в режиме приема и содержит усилитель сигнала со схемой симметрирования, выходной компаратор и двухступенчатое устройство АРУ.

Структурная схема приемопередатчика для прямохаотической коммуникационной системы представлена на рис. 4.

Основную часть приемопередатчика, определяющую его свойства, представляет высокочастотный (ВЧ) модуль. Он состоит из генератора хаоса, каналов ВЧ-передатчика и приемника, эфирной антенны, переключающих режимы и регулирующих элементы схем, управляющих этими элементами, синхронного детектора и предварительного усилителя приемника.

Приемопередатчики имели размеры $3 \times 5 \times 3$ см и выходную мощность 18 dBm. Средняя рабочая частота составляла 2.7 GHz. Прямохаотическая конфиденциальная связь осуществлялась между двумя компьютерами в дуплексном режиме. Передавались файлы неограниченного объема. Предельная скорость передачи информации, определяемая шириной полосы хаотического сигнала, может достигать 350 Mbps., однако, в реальности она была лимитирована пропускной способностью COM-портов компьютеров и равнялась 250 Kbps. Дальность связи составляла 100 м. Связь характеризовалась повышенной устойчивостью к многолучевому распространению и интерференционным искажениям. Качество связи между компьютерами определялось посредством контроллера ошибок связи. Ошибок связи не было зафиксировано при передаче сигнала через многоэтажные железобетонные перекрытия, при работе вблизи радио и телепередатчиков, базовых станций и ретрансляторов сотовой связи, при движении на автомобилях с относительной скоростью до 140 km/h.

Экспериментальное исследование работы генераторов хаоса на базе пленок ЖИГ в различных режимах, а также результаты численного моделирования позволили провести сравнительный анализ свойств этих генераторов и традиционных генераторов хаоса. В таблице представлены сравнительные характеристики одного из самых распространенных генераторов хаоса, основанного на схеме Чуа, и генератора хаоса на базе пленки ЖИГ. Фрактальная размерность хаоса, производимого генератором на базе пленки ЖИГ, определялась как корреляционная размерность по стандартной процедуре [10].

Таким образом, генераторы хаоса на базе пленок ЖИГ превосходят традиционные хаотические генераторы по большинству параметров, важных для инженерных решений. Несмотря на простоту их схемы, они способны производить огромное разнообразие вариантов хаоса в зависимости от геометрических характеристик пленки, ее подмагничивания, геометрии расположенной на ней антенной системы, характеристик элементов цепи обратной связи. Использование CMOS-технологий позволит создавать на их основе миниатюрные многофункциональные хаотические модули для разнообразных систем передачи и обработки информации. Характеристики хаоса, полученные с помощью таких генераторов, обеспечивают устойчивый хаотический синхронный отклик. Введение информации в хаос, обладающий такими характеристиками, не сопровождается его изменениями, что обеспечивает сохранение

Сравнительные характеристики генератора Чуа и генератора на базе пленок ЖИГ

Свойство	Генератор Чуа	Генератор ЖИГ
Тип	Генератор с сосредоточенными параметрами	Генератор с распределенными параметрами
Состав	Нелинейный усилитель плюс линейный фильтр	Линейный усилитель плюс нелинейный фильтр
Число степеней свободы	1.5	Много (определяется числом различных мод МСВ в пленке)
Задержка обратной связи	Нет	Есть (и может регулироваться)
Механизм хаоса	Переключение между двумя неустойчивыми состояниями электрической цепи	Перераспределение энергии между различными модами МСВ в пленке
Фрактальная (корреляционная) размерность хаоса	Обычно около 2 (в принципе, не больше 3)	Обычно между 2 и 4 (в принципе, может быть больше)
Характер спектра	Присутствуют низкие частоты, ширина спектра порядка основной частоты	Отсутствуют низкие частоты, ширина спектра в несколько раз меньше частоты основного пика
Характер сигнала	Хаотическое чередование цугов переменной амплитуды и различной длительности	Квазигармонический сигнал с хаотической амплитудной, фазовой и частотной модуляцией
Диапазон	От звуковых частот до единиц гигагерц	От мегагерц до десяти гигагерц
Возможность использования хаотического сигнала в качестве несущей	Без искажения сигнала не может	Может в микроволновом диапазоне

Продолжение таблицы

Свойство	Генератор Чуа	Генератор ЖИГ
Элементы управления	Коэффициент усиления, подстроечные емкости	Коэффициент усиления, магнитное поле, геометрия антенн, подстроечные емкости
Возможности переключения режимов хаоса	Нет (один режим)	Есть (много качественно отличающихся режимов)
Характер синхронизации, влияние идентичности параметров системы и масштаба сигналов на процесс синхронизации	Требует очень точной подгонки параметров (совпадение с точностью до 1%)	Не требует точной подгонки параметров (допустимы различия в пределах 15–20%)

одного из ценных свойств хаотических коммуникационных систем — абсолютной конфиденциальности канала связи. При этом сохраняются повышенная устойчивость к многолучевому распространению и интерференционным искажениям, а также расширяется ресурс для множественного доступа. Кроме того, генераторы хаоса на базе пленок ЖИГ обладают расширенными возможностями для манипулирования с хаотическими сигналами. Они позволяют осуществлять следующие типы модуляций: амплитудная модуляция огибающей хаотических колебаний; фазовая модуляция (переключение фазы на любой угол); сдвиг частотного спектра или изменение частоты; переключение между различными режимами хаотических колебаний (различными типами аттрактора). Возможны также комбинации этих типов модуляций.

Список литературы

- [1] *Kennedy M.* // IEEE Trans. Circuit and System. 1994. V. 41. N 11. P. 771.
 [2] *Madan R.* Chua's Circuit: A Paradigm for Chaos. Singapore: World Scientific, 1993.

- [3] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
- [4] *Kolumban G., Kennedy M.P., Chua L.O.* // IEEE Trans. Circuit and System. 1997. V. 44. P. 927.
- [5] *Kolumban G., Kennedy M.P., Chua L.O.* // IEEE Trans. Circuit and System. 1998. V. 45. P. 1129.
- [6] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 7. С. 66–71.
- [7] *Mingzhong Wu., Kalinikos V.A., Patton C.E.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 237 202.
- [8] Патент РСТ/WO2004/042752 А1.
- [9] *Мезин Н.И.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 23. С. 61–67.
- [10] *Лихтенберг А., Либерман М.* Регулярная и стохастическая динамика. М.: Мир, 1984.