



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.5.4>

УДК: 621.382.32, 621.373

ГЕНЕРАЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕННАХ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ С ПОЛЕВЫМИ ТРАНЗИСТОРАМИ

Д.Е. Радченко, В.И. Калинин, В.Е. Любченко, С.В. Маречек, С.А. Телегин, Е.О. Юневич

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2022 г.

Аннотация. В данной работе исследована возможность создания источников шумового излучения на основе микрополосковых антенн логопериодического типа, интегрированных с полевыми транзисторами. Экспериментально изучена возможность управления спектральными характеристиками генераторов, сложения мощностей и расширения спектра излучения в диапазоне частот 5-7 ГГц.

Ключевые слова: СВЧ, генерация излучения, стохастизация, логопериодическая антенна, полевой транзистор.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №20-07-00634-а).

Автор для переписки: Телегин Сергей Александрович, telegins@bk.ru

Введение

Твердотельные генераторы шумоподобных сигналов СВЧ диапазона представляют интерес для систем радиосвязи, радиовидения и средств радиоэлектронной борьбы [1]. Перспективной конструкцией таких устройств являются микрополосковые антенны-генераторы (АГ), которые представляют собой антенну логопериодического типа, интегрированную с полевым транзистором [2]. Исполнение АГ в виде такой гибридной интегральной схемы позволяет обеспечить миниатюризацию источников излучения, а также создание из них многоэлементных решеток и матриц. Возможность стохастизации колебаний СВЧ диапазона в АГ на основе антенны логопериодического типа и полевого транзистора была экспериментально продемонстрирована в [3]. Однако наблюдаемый при малых толщинах подложки режим самопроизвольной стохастизации является неустойчивым и трудно воспроизводимым, а при толщине подложки более 1мм генерация переходит в многочастотную. Использование низкочастотного шума, подаваемого на затвор транзистора в качестве модулирующего сигнала позволяет существенно улучшить спектр шумового излучения [4], однако ширина спектра редко превышает 200 МГц. Задача может быть решена путем суммирования излучения от матрицы АГ, в которой каждый элемент имеет отличную от соседей основную частоту. Однако уплощенная вершина спектральной кривой в условиях модуляции основной частоты низкочастотным шумом наблюдается весьма редко, и спектр на вершине кривой обычно очень узок, что при ограниченности числа АГ не дает возможности получить достаточно широкий и равномерный шумоподобный спектр. Настоящая работа посвящена дальнейшему исследованию вопросов стохастизации сигналов в микрополосковых антеннах-генераторах, в том числе возможности суммирования мощности и спектров излучения на примере трех автономных АГ, перестраиваемых по частоте.

1. Конструкция генератора шумоподобных сигналов

Генератор представляет собой три блока АГ, включающих в себя микрополосковую логопериодическую антенну, интегрированную с полевым транзистором, а в случае необходимости, и с варикапом. Все три платы размещены на стенде, каждый из которых снабжен отражающим экраном, который с помощью микроподачи может изменять свое расстояние до антенны в диапазоне 1-20 мм (рис.1).

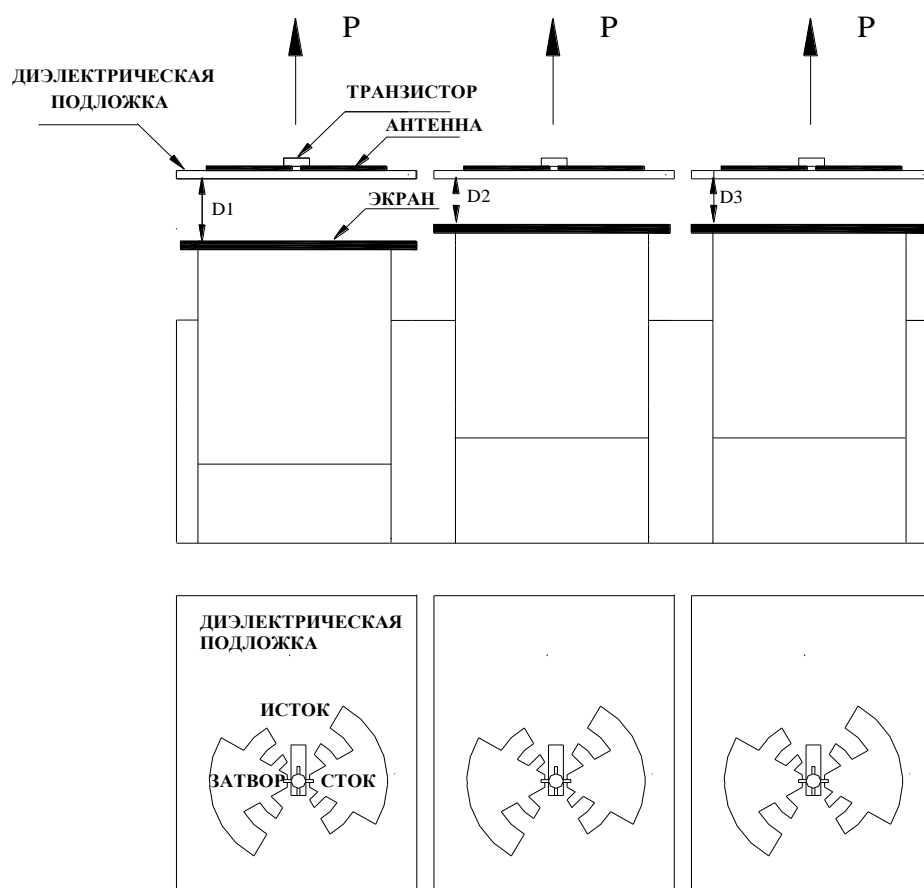


Рис. 1. Структурная схема измерительного стенда

Для изучения процессов, происходящих в системе из трех АГ, была изготовлена партия логопериодических антенн, рассчитанных на работу в диапазоне 5-7 ГГц с шагом по частоте порядка 150 МГц. Блок питания обеспечивает все АГ независимо регулируемые напряжения сток-исток,

постоянными напряжениями затвора, а также возможностью модуляции излучения сигналами низкочастотного шума в диапазоне 1-80 МГц.

На рис. 2 изображен один из выходов блока питания с подключенной к нему антенной-генератором. Кроме основных элементов, изображены также паразитные емкости $C1$, $C2$, $C3$, которые входят в схему генератора, как элементы емкостной трехточки.

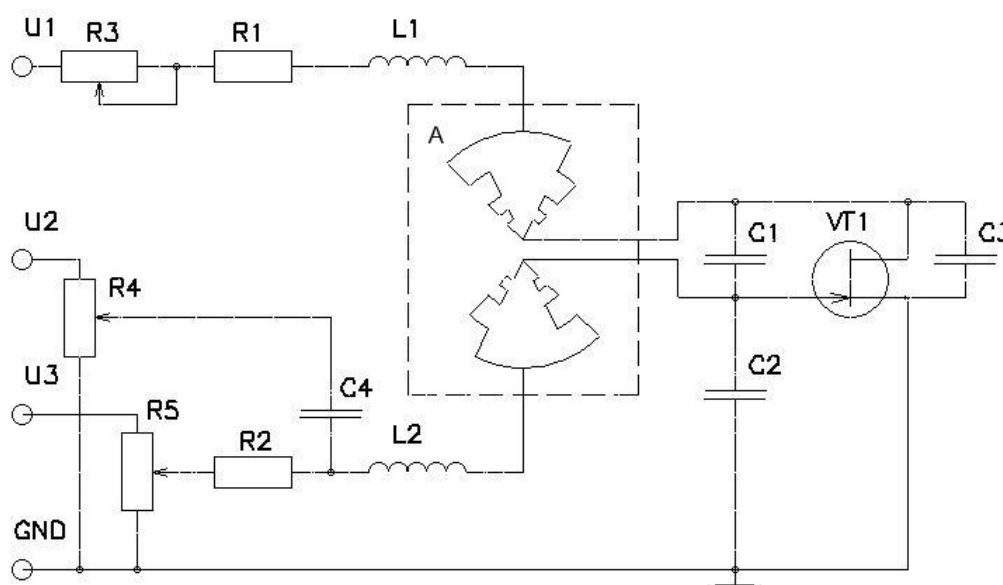


Рис. 2. Принципиальная схема АГ

На рис. 3 изображена принципиальная схема АГ, где используется СВЧ полевой транзистор VT1 (NE350184C). Питание стока (+5В) поступает на контакт U1 и далее через регулировочный резистор R3, ограничительный R1, а также через развязывающий по СВЧ дроссель L1.

На контакт U2 поступает напряжение -1В, которое далее через регулировочный резистор R5, ограничительный R2 и развязывающий по СВЧ дроссель L2 поступает на затвор транзистора VT1. Дополнительно на затвор может подаваться сигнал шума через регулировочный резистор R4, конденсатор C4 и дроссель L2.

Собственная резонансная частота дросселей L1 и L2 лежит выше рабочего диапазона, при этом их реактивное сопротивление велико. На схеме приведены паразитные емкости полевого транзистора C1, C2, C3 и планарная логопедическая структура АЕ, включенная между стоком и затвором.

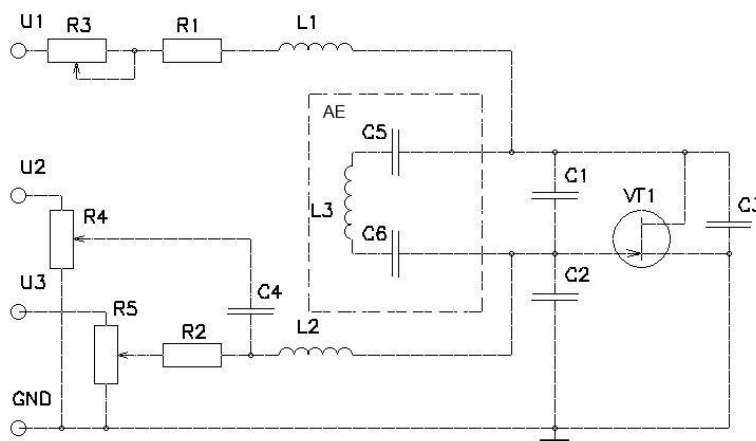


Рис. 3. Эквивалентная схема антенны генератора.

AE – эквивалентная схема логопериодической антенны с подвижным экраном, C5 и C6 – распределенные емкости для одной из возможных мод возбуждения, определяемые положением экрана, L3 – индуктивность антенны

2. Результаты измерений

Включение одиночной антенны-генератора в условиях, когда к затвору транзистора подключен низкочастотный шумовой сигнал, приводит, как правило, к генерации расширенной спектральной линии (у основания до 200 МГц) (рис. 4а) и узкой в верхней части, что характерно для амплитудной модуляции [5]. Включение сразу трех независимых АГ приводит к возникновению суммарного спектра всех трех АГ. Взаимная синхронизация при этом не наблюдается (рис. 4б). Получить непрерывный шумовой спектр в этом случае практически невозможно при сколь угодно малых расстояниях между рабочими частотами отдельных АГ.

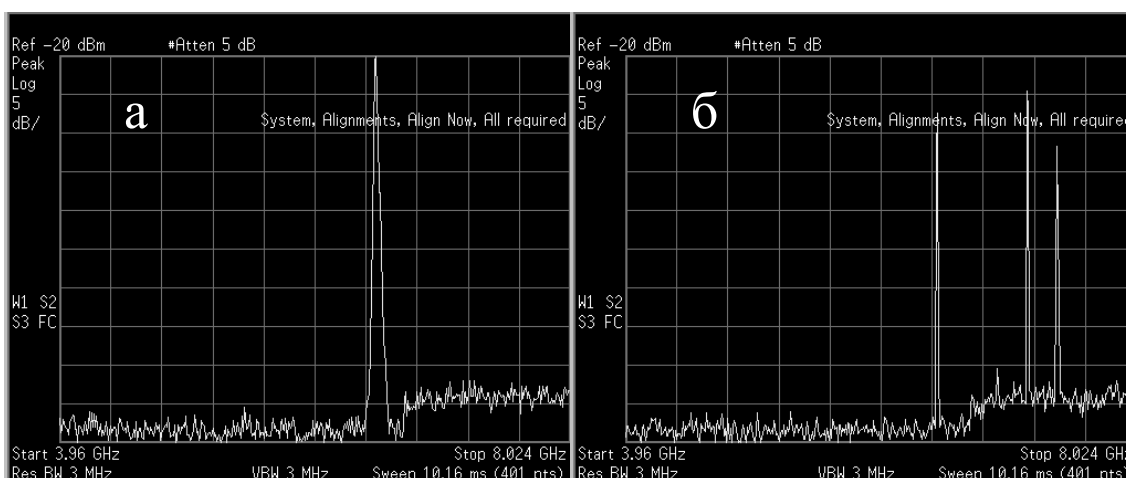


Рис.4. Работает один генератор с расчетной частотой 6,4 ГГц. Подключен НЧ шум (а). Работают одновременно три образца. Подключен НЧ шум (б)

Однако спектр одиночной антенны может быть и более сложным, что зависит, в первую очередь, от расстояния между антенной и экраном. Так, на рис. 4 приведены спектры, полученные при D порядка четверти длины волны. При D меньше или больше этой величины спектры могут быть сложнее (рис. 5а). Суммарный спектр трех АГ представляет при этом хаотический сигнал шириной около 4 ГГц (рис. 5б). Поскольку при работе полевого транзистора изменяется не только проводимость канала, но и барьерная емкость затвора, можно было бы ожидать наряду с амплитудной модуляцией и фазовую модуляцию, при которой амплитуда несущей остается почти постоянной, и могут быть получены спектры, имеющие расширение в области максимальных амплитуд сигналов. Но так как фазовая модуляция осуществляется за счет изменения достаточно малой нелинейной емкости гетероперехода, она наблюдается редко и, в основном, при очень малых D .

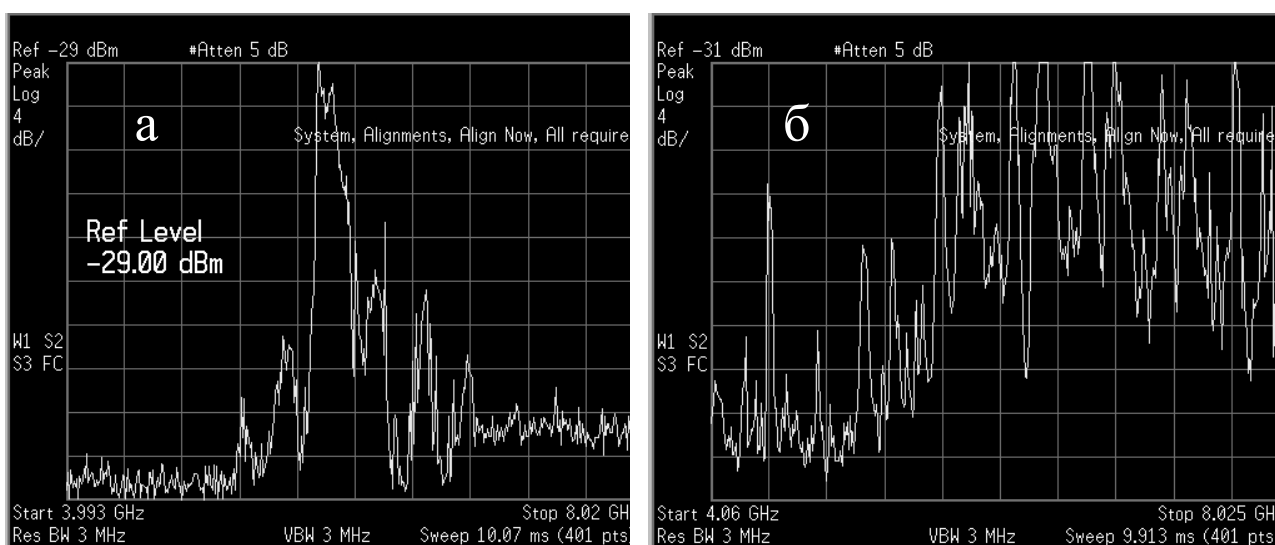


Рис. 5. Одиночная антенна с шумом без варикапа (а), антенны с шумом без варикапа (б).

Ситуация изменяется при включении в цепь сток-затвор варикапа (рис. 6), у которого относительное изменение емкости во много раз больше, чем у входной емкости полевого транзистора.

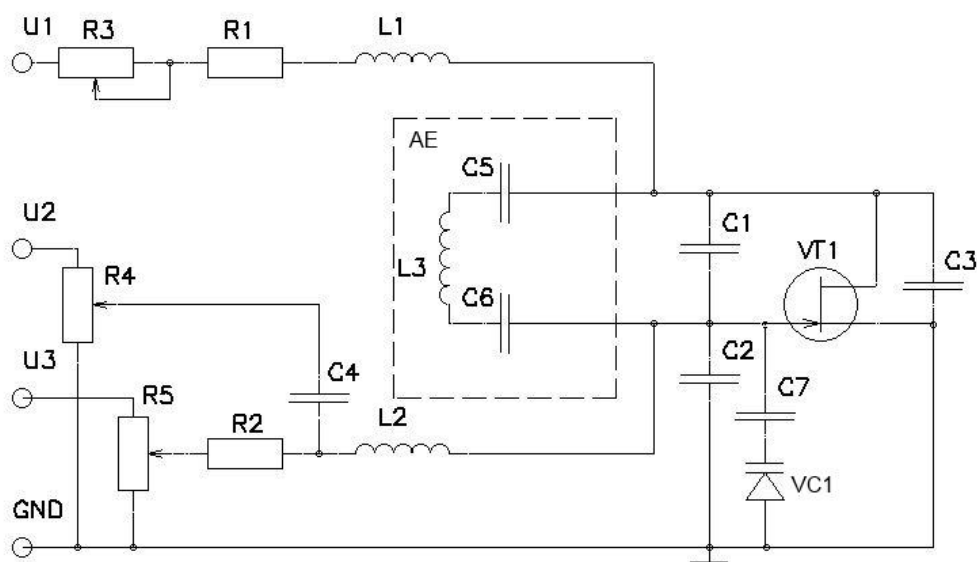


Рис. 6. Схема включения варикапа VC1 в АГ

Поскольку геометрические размеры логопедической структуры и экрана соизмеримы с длинами волн генерации, то они обладают эквивалентными индуктивностями и емкостями, образуя для разных частот и мод возбуждения систему резонаторов. Условия возбуждения колебаний на этих модах зависят от распределенных емкостей и индуктивностей (поперечные и продольные моды на экране, лепестках логопедической структуры и т.д.), и во многом зависят от емкости, определяемой положением экрана, т.е. от D . Генерация частот может возникать сразу на нескольких модах (частотах) если для них выполняется баланс фаз и амплитуд в замкнутом контуре емкостной трехточки. При включении одиночной антенны-генератора могут наблюдаться различные виды спектров, сложным образом зависящие от положения экрана и тока в цепи стока транзистора. Это может быть как одночастотный (рис. 4а), шумоподобный (рис. 5а) или многочастотный сигнал (рис. 7). При подключении достаточно большой нелинейной емкости (варикапа) в результате суперпозиции токов СВЧ различных частот создается дополнительно большой набор частот суммарно-разностного характера.

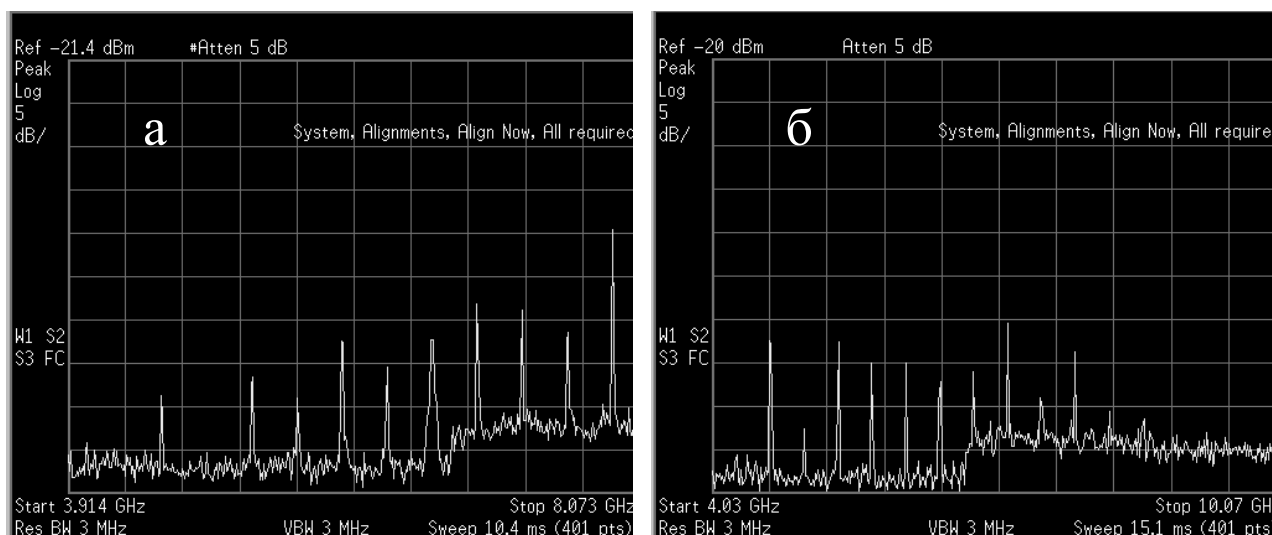


Рис .7. Спектры одиночных антенн без варикапа

На рис. 7 изображены многочастотные спектры одиночных антенн, работающих без варикапа и при довольно больших значениях D ($0,4-0,5\lambda$). Амплитуда спектральных составляющих мала и их частота зависит от D . Можно предположить, что генерация на этих модах обусловлена резонансными системами, не связанными с собственными частотами ЛПА. При подключении варикапа режим возбуждения в антенне-генераторе резко изменяется, что приводит к установлению регулярного линейчатого спектра, идентичному спектру при фазовой модуляции (рис. 8а).

Модулирующий сигнал может быть образован при суперпозиции двух колебаний близкой частоты, дающих биения на разностной частоте. Этот довольно мощный сигнал модулирует по фазе несущую частоту, образуя спектр шириной около 2 ГГц, с боковыми полосами, отстоящими от несущей на 300-500 МГц (частота биений) (рис. 8а).

При подаче на затвор транзистора НЧ шума частотой 1–80 МГц, каждая полоса, уширяется примерно до 200 МГц (рис. 8б). В результате общий спектр представляет собой шумоподобные полосы шириной около 200 МГц, разделенные промежутками около 200 МГц. Однако получить сплошной равномерный шумовой спектр для одной АГ не удастся. Включение одновременно трех АГ, собственные частоты которых разнесены на 150 МГц,

позволяет получить сплошной, однако не полностью равномерный, шумоподобный спектр.

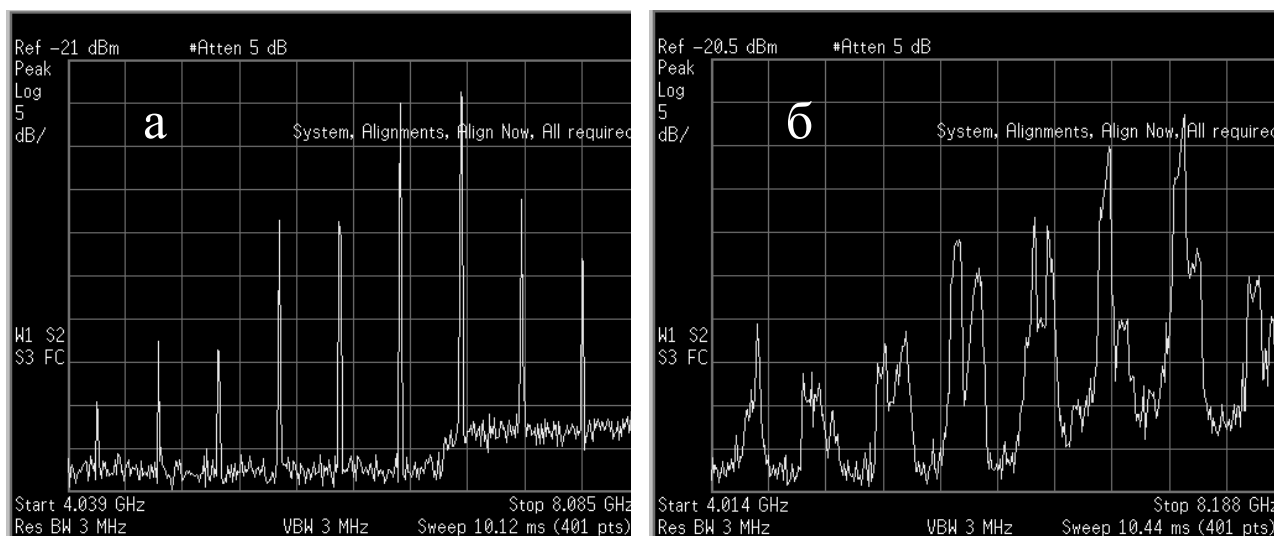


Рис. 8. Одиночная антенна с варикапом: без шума (а), с шумом (б)

Попытка просуммировать излучение трех антенн, когда на них не подается сигнал НЧ шума, приводит к наложению спектров всех трех антенн (рис. 9а), что подтверждает отсутствие синхронизации между АГ.

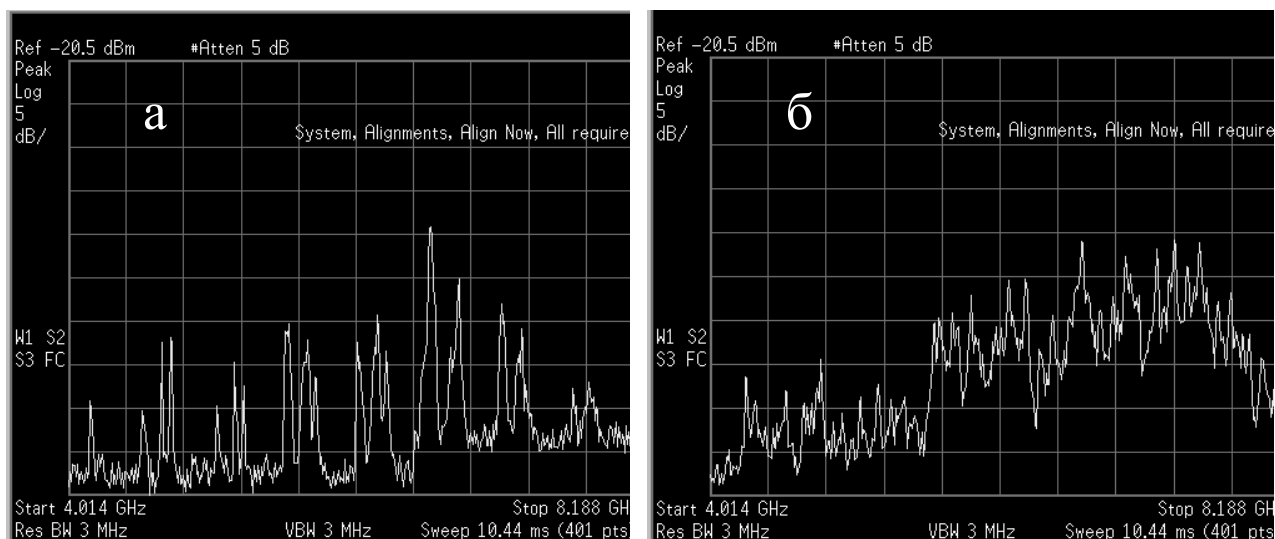


Рис. 9. Одновременное включение 3 антенн с варикапом: без шума (а), с шумом (б)

Под воздействием НЧ шума происходит размытие спектра вплоть до 2 ГГц (рис. 9б), хотя и при большой (порядка 10 дБ) неравномерности спектральной характеристики.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что рассматриваемая система из трех АГ с подвижными отражающими экранами представляет собой три независимые системы, каждая из которых является сложным многочастотным генератором, в каждом из которых спектр частот определяется не только логопериодической антенной, но и эквивалентными индуктивностями и емкостями, определяемыми отражающим экраном. Условия возбуждения колебаний на этих модах зависят от распределенных емкостей и индуктивностей (поперечные и продольные моды на экране, лепестках логопедической структуры и т.д.), и во многом зависят от емкости, определяемой положением экрана, т.е. от D . Генерация частот может возникать сразу на нескольких модах (частотах), если для них выполняется баланс фаз и амплитуд в замкнутом контуре емкостной трех точки, что приводит к нестабильности спектров. При подключении варикапа режим возбуждения в антенне-генераторе резко изменяется и приводит к установлению регулярного линейчатого спектра, идентичному спектру при фазовой модуляции.

Включение НЧ шума в цепь затвора может расширить шумоподобный спектр максимум на двойную ширину полосы всего НЧ шума, т.е. на ~ 160 МГц. Одновременное увеличение нелинейной емкости в цепи затвора позволяет значительно расширить общую полосу генерации шумоподобного сигнала вплоть до 3-4 ГГц при средней частоте 6 ГГц.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-00634-а).

Литература

1. Дмитриев А.С. и др. *Генерация хаоса*. Москва, Техносфера. 2012. 423 с.
2. Радченко Д.Е. и др. Генерация шумоподобных сигналов СВЧ диапазона в микрополосковых антеннах-генераторах. *Радиотехника и электроника*. 2020. Т.65. №3. С.285-287. <https://doi.org/10.31857/S003384942003016X>
3. Юневич Е.О., и др. Генерация шумоподобных сигналов в микрополосковых активных антеннах, интегрированных с полевыми транзисторами. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2017. №11. <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/2/text.pdf>
4. Радченко Д.Е., и др. Хаотизация колебаний СВЧ диапазона в микрополосковых антеннах-генераторах при воздействии низкочастотного шума. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2018. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.9.17>
5. Юневич Е.О., и др. Стохастизация СВЧ колебаний в микрополосковой логопериодической антенне-генераторе в условиях модуляции низкочастотным шумовым сигналом. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.12>

Для цитирования:

Радченко Д.Е., Калинин В.И., Любченко В.Е., Маречек С.В., Телегин С.А., Юневич Е.О. Генерация стохастических сигналов в микрополосковых антеннах, интегрированных с полевыми транзисторами. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.5.4>