

УДК 621.396+517

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ТЕСТОВЫЙ ГЕНЕРАТОР ПОМЕХ

В.М. ЧЕРТКОВ, А.В. ТОЛМАЧЕВ
(Полоцкий государственный университет)

Отражены результаты исследования, полученные в ходе разработки малогабаритного генератора радиопомех для испытаний радиолокационного оборудования и моделирования различных тактических ситуаций в условиях интенсивного использования противником средств радиоэлектронной борьбы. Представлен анализ структурных схем генератора радиопомех. Указаны достоинства и недостатки рассмотренных структур. Обоснована принципиальная схема исполнения малогабаритного тестового генератора радиопомех.

Ключевые слова: генератор помех, радиоэлектронная борьба, зондирующий сигнал, радиопомеха, лавинно-пролетный диод.

Введение. В последнее время значимость радиоэлектронной борьбы (РЭБ) значительно возросла. С каждым годом увеличивается разнообразие средств РЭБ и способов их применения. Возникает необходимость создания образцов РЭБ, максимально реализующих свои боевые возможности в условиях применения противником всех возможных средств и систем противодействия.

В ходе проектирования и разработки радиолокационного оборудования возникает вопрос об имитации сложной помеховой обстановки в процессе испытаний. При этом существует необходимость моделирования реальных тактических ситуаций, в которых для решения подобных задач можно использовать малогабаритные тестовые генераторы радиопомех.

Основная часть. Малогабаритный тестовый генератор радиопомех (МТГР) разработан с целью испытаний радиолокационного оборудования в условиях широкого применения условным противником средств РЭБ с использованием тактических приемов. Для полноценной имитации какой-либо тактической обстановки генератор обеспечивает создание помех в рабочем частотном диапазоне испытываемого радиолокационного оборудования.

Для повышения точности измерения координат воздушных объектов в радиолокации используют волны сантиметрового диапазона, исходя из этого будем считать, что частота зондирующего сигнала радиолокационной станции (РЛС) находится в X-диапазоне от 9100 до 9500 МГц [1].

Для эффективной защиты от активных помех в РЛС зачастую используются сложные импульсные зондирующие сигналы с двумя типами законов модуляции: кодо-фазовой модуляцией (КФМ) и линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), а также прямоугольные радиоимпульсы. Сигналы КФМ построены в соответствии с кодами Баркера или вырезками из кодов M-последовательностей [2].

При использовании M-последовательности из N_d символов может быть сформировано несколько типов импульсных КФМ-сигналов со схожими автокорреляционными функциями. Каждый из различных типов КФМ сигналов имеет характерную только для него автокорреляционную функцию. Автокорреляционные функции таких типов сигналов отличаются друг от друга расположением и уровнем боковых выбросов [3].

Для снижения уровня взаимных помех от близко расположенных РЛС используют ЛЧМ-сигналы с возрастающим и убывающим законами изменения частоты. Изменение типа сигнала происходит с изменением режима работы станции [2].

Определив основные характеристики зондирующего сигнала, выбирают ширину спектра зондирующего сигнала таким образом, чтобы обеспечить разрешающую способность по дальности $\Delta r = 300$ м [1]. В соответствии с этим требованием ширина спектра зондирующего КФМ-сигнала равна $\Delta f_0 = 500$ кГц. Такой ширине спектра соответствует длительность дискрета КФМ-сигнала, равная $T_d = 2$ мкс. Ширина спектра ЛЧМ-сигнала с учетом расширения отклика фильтра сжатия на 33% при весовой обработке принятого сигнала с помощью окна Хемминга равна $\Delta f_0 = 665$ кГц. Ширина спектра зондирующего прямоугольного радиоимпульса равна $\Delta f_0 = 500$ кГц, а его длительность – $T_0 = 2$ мкс [3].

Выбор частоты зондирующего сигнала РЛС обуславливает частотный диапазон излучений от 9100 до 9500 МГц для малогабаритного генератора радиопомех. Для обеспечения перестройки по частоте в течение длительности импульса предлагается использовать ЛЧМ-сигнал, который должен иметь ширину спектра, перекрывающую ширину спектра излучаемых радиолокационных сигналов. Согласно проведенным нами расчетам, мощность излучаемого сигнала должна составлять от единиц до десятков милливатт. Для создания помехи прицельного типа антенная система должна обладать хорошими направленными свойствами и обеспечивать работу при изменении частоты излучаемого сигнала [3].

Коэффициент усиления антенны для создания помехи на входе приемника РЛС заданной мощности при известной мощности излучаемой помехи должен быть около 24 дБ. Габариты генератора совместно с антенной системой составляют 315×300×120 мм с учетом расчета на эксплуатацию одним человеком.

Чтобы уменьшить габаритные размеры и вес в современной радиоэлектронной аппаратуре широко применяются диодные твердотельные генераторы (ДТГ). К их достоинствам относятся также большой срок службы, высокая механическая прочность и низкие рабочие напряжения [4]. В качестве активного элемента в таких генераторах используют туннельный диод (ГТД), лавинно-пролетный диод (ЛПД) и диод Ганна (ДГ), работу которых наиболее целесообразно рассматривать с позиции понятия отрицательной проводимости (сопротивления) нелинейного элемента.

Для разработки структурной схемы МТГР выполнен анализ трех вариантов построения малогабаритного генератора радиопомех с использованием ДТГ на лавинно-пролетном диоде с входным сигналом, представляющим:

- 1) аддитивную смесь шума и пилообразного напряжения;
- 2) усиленный по мощности шум;
- 3) пилообразное напряжение.

Первый вариант построения. Структурная схема первого варианта показана на рисунке 1. Вид спектра излучаемого сигнала, полученного в результате компьютерного моделирования в пакете MATLAB, представлен на рисунке 2.

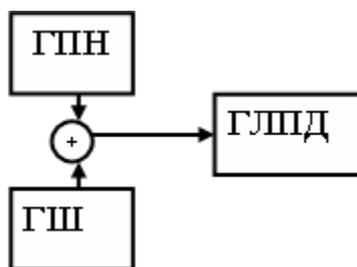


Рисунок 1. – Структурная схема генератора радиопомех (вариант 1)

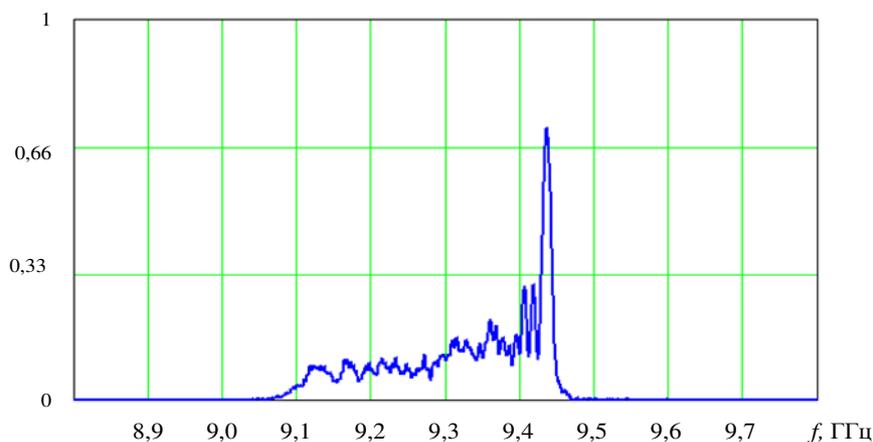


Рисунок 2. – Вид спектра излучаемого сигнала

В схему включены генератор пилообразного напряжения (ГПН), генератор шума (ГШ), смеситель и генератор на лавинно-пролетном диоде (ГЛПД). Пилообразное напряжение, создаваемое ГПН, суммируется с шумом на смесителе. Результирующий сигнал поступает на ГЛПД, на выходе которого формируется ЛЧМ-сигнал со случайными составляющими в амплитуде и фазе. Таким образом формируется сигнал помехи с шириной спектра чуть более 50 МГц. Благодаря шумовой составляющей спектр образованного сигнала несколько «размывается» по частоте. Однако необходимо отметить, что уровень шума, вырабатываемого ГШ, должен быть невысоким, иначе спектр выходного сигнала полностью «размывается» по частоте, что приводит к потере мощности. Необходимо также отметить, что получить строго линейное изменение модулирующего напряжения сложно.

К достоинствам структурной схемы на лавинно-пролетном диоде с входным сигналом, представляющим аддитивную смесь шума и пилообразного напряжения, можно отнести следующее:

- спектр выходного сигнала расширяется, что обеспечивает работу в более широком диапазоне частот;
- при незначительном уровне шума в модулирующем напряжении получают достаточно большую мощность излучаемого сигнала.

Вместе с тем определены и недостатки:

- усложняется техническая реализация схемы за счет применения смесителя и генератора шума;
- при большом уровне шума спектр выходного сигнала «размывается» по частоте, в результате чего теряется мощность формируемого сигнала.

Второй вариант построения. Структурная схема генератора радиопомех, включающая в себя лавинно-пролетный диод с усилителем мощности, изображена на рисунке 3. Вид спектра, сформированного по такой структуре излучаемого сигнала в результате моделирования в MATLAB, представлен на рисунке 4.

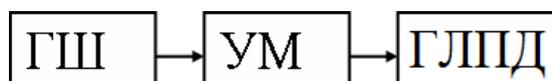


Рисунок 3. – Структурная схема генератора радиопомех (вариант 2)

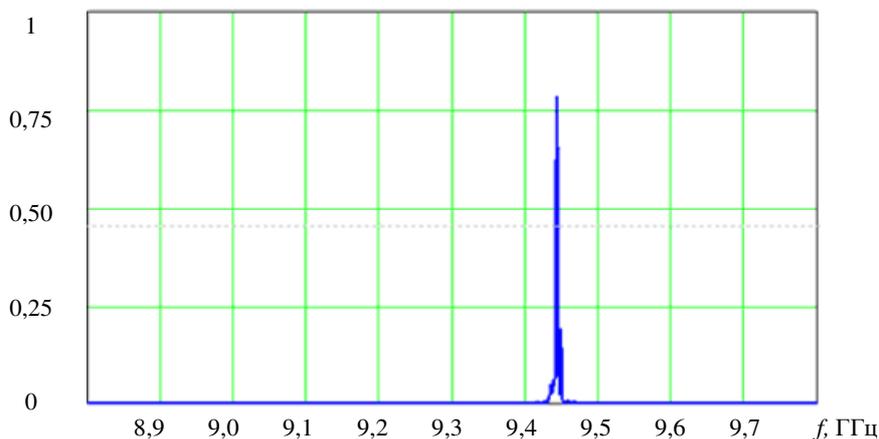


Рисунок 4. – Вид спектра излучаемого сигнала радиопомех

Структура генератора радиопомех представляет собой последовательную цепочку, состоящую из генератора шума, усилителя мощности (УМ) и генератора на лавинно-пролетном диоде. Шум на выходе ГШ усиливается и поступает на ГЛПД в качестве модулирующего напряжения. На выходе генератора на лавинно-пролетном диоде формируется помеха, у которой амплитуда и частота меняются только по случайному закону. Спектр такого сигнала очень узкий (от сотен герц до единиц килогерц, в зависимости от уровня шума), что в конечном итоге не обеспечивает создание помехи с необходимой шириной спектра. Следовательно, образованная помеха будет эффективной только для нескольких отдельных частот. Это обстоятельство не удовлетворяет предъявляемым к МТГР требованиям. К тому же, если подать в качестве модулирующего напряжения шум, то управлять режимами работы ГЛПД становится невозможно: уровень мощности излучаемого сигнала и его частота не поддаются регулированию.

К достоинствам такой схемы можно отнести следующие свойства:

- нет необходимости создавать модулирующее напряжение, которое должно изменяться по определенному закону;

- высокий уровень энергетического спектра сформированного сигнала помехи.

Недостатки:

- небольшая ширина энергетического спектра сигнала;
- невозможно управлять режимами ГЛПД (амплитудой и частотой излучаемого сигнала);
- конструкция усложняется введением дополнительного усилителя мощности.

Третий вариант построения. Структурная схема имеет последовательную цепочку, состоящую лишь из двух элементов, и представлена на рисунке 5. По результатам моделирования в MATLAB вид

спектра формируемого сигнала показан на рисунке 6. В качестве модулятора используется генератор пилообразного напряжения. На его выходе создается линейное пилообразное напряжение.

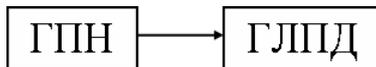


Рисунок 5. – Структурная схема генератора радиопомех (вариант 3)

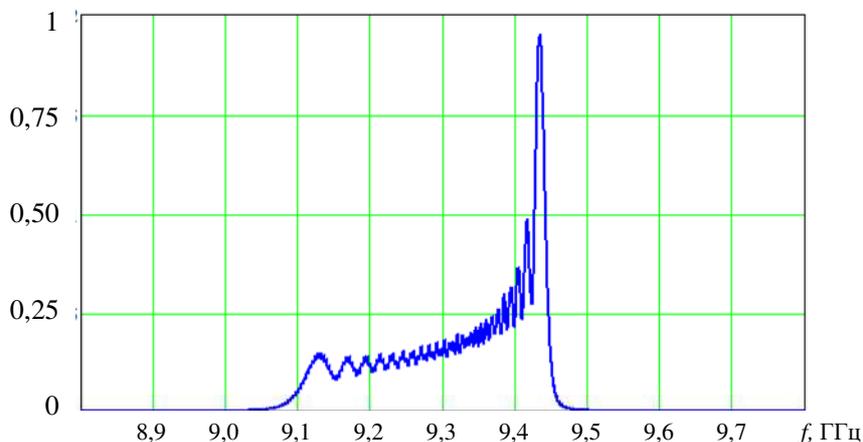


Рисунок 6. – Вид спектра излучаемого сигнала радиопомех

В результате на выходе ГЛПД формируется ЛЧМ-сигнал без шумовой составляющей, обеспечивающий автоматическую перестройку по частоте. Ширина энергетического спектра ЛЧМ-сигнала составляет чуть менее 50 МГц, что несколько меньше, чем в структуре первого варианта. Но это удовлетворяет предъявляемым требованиям к генератору помех. В энергетическом спектре имеется четко выраженный максимум, который объясняется наличием в модулирующем напряжении некоторой нелинейности. Уровень мощности помехи незначительно меньше, чем в случае дополнительного использования шума в качестве модулирующего напряжения. При этом упрощается техническая реализация устройства, так как нет необходимости дополнительного использования генератора шума, смесителя или усилителя мощности.

К достоинствам такой схемы можно отнести следующие свойства:

- ширина энергетического спектра позволяет создавать помехи РЛС в заданном частотном диапазоне;
- большая мощность сигнала на выходе;
- простота технической реализации по сравнению с другими вариантами;
- высокая вероятность безотказной работы благодаря использованию малого количества элементов.

Недостаток – отсутствие случайной составляющей в законе модуляции выходного сигнала.

Разработка принципиальной схемы малогабаритного тестового генератора радиопомех. По результатам анализа и сравнения вариантов структурных схем построения МТГР был выбран третий вариант, который является более надежным и простым в технической реализации. Данное решение базируется на следующих выводах:

- мощность, достигаемая при использовании ЛПД, может составлять до 12 Вт, в то время как у туннельных диодов – менее 10 мВт, а у диодов Ганна – от 100 до 400 мВт [5];
- долговечность ЛПД выше, чем у ГДГ и ГТД с параметрами: $t_{лпд} = 10^4-10^7$ ч, $t_{дг} = 10^5$ ч, $t_{тд} = 10^4-10^6$ ч [5].
- коэффициент полезного действия, получаемый при использовании ЛПД, выше, чем при использовании ТД и ДГ [5]: $\eta_{глпд} \leq 42\%$, $\eta_{гдг} \leq 20\%$, $\eta_{дг} \leq 15\%$.

В отличие от генераторов на туннельных диодах, в ГЛПД эффект образования отрицательной проводимости проявляется только в динамическом режиме. Лавинное умножение носителей с образованием пространственного заряда происходит при напряжении на диоде $e_d > E_{лп}$, где $E_{лп}$ – напряжение лавинного пробоя.

Существует несколько разновидностей динамического режима колебаний с образованием пространственного заряда. Из них широко используются два основных: пролетный режим и режим с захва-

том плазмы (аномальный режим). В рассматриваемом случае использован пролетный режим. Этот режим удобно рассматривать с использованием диода Рида, рассмотренном более подробно в [5], где представлено распределение напряженности электрического поля и отмечен слой умножения заряда, в котором напряженность поля превышает $E_{лп}$.

Кроме диода ГЛПД включает в себя источник питания $E_{лп}$ и резонансную колебательную систему $L_k C_k$. Поскольку параллельно диоду подключена колебательная система, то на нем в стационарном режиме кроме $E_{лп}$ будет действовать гармоническое колебание с установившейся амплитудой U_m . Следовательно, суммарное мгновенное напряжение на диоде будет равно $e_d = E_{лп} + U_m \sin \omega t$ [5].

Пространственно-временные диаграммы движения электронов в пролетном пространстве, а также эпюры процесса образования импульсов тока лавинного пробоя и наведенного тока в ГЛПД представлены и проанализированы в [5].

Следует отметить, что процесс лавинного пробоя повторяется с периодом, равным периоду высокочастотных колебаний. Таким образом, наведенный ток представляет собой периодическую последовательность импульсов.

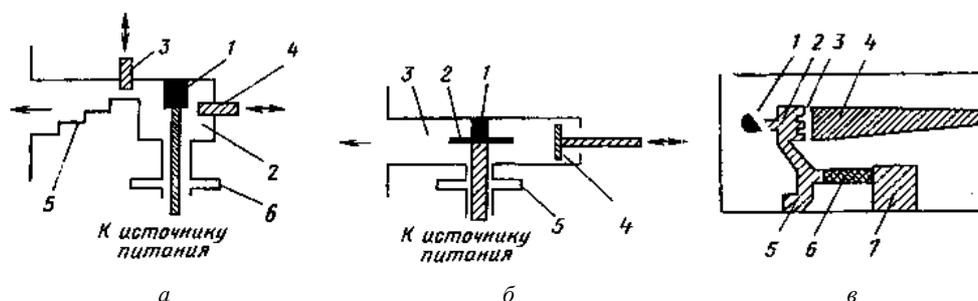
Определив лавинно-пролетный диод в качестве активного элемента, возникает необходимость выбора конкретной марки ЛПД с учетом того, что генератор должен излучать помеху в диапазоне от 9100 до 9500 МГц с мощностью от единиц до десятков милливатт. По результатам анализа справочной литературы [6] и возможностей реализации генератора выбор был сделан в пользу ЛПД 1А704В (диод германиевый планарно-диффузионный лавинно-пролетный), предназначенного для работы в генераторах в диапазоне частот от 8,3 до 10 ГГц.

Источник питания диода должен быть стабилизированным источником тока с внутренним сопротивлением более 2 кОм и емкостью не менее 10 пФ. Напряжение на зажимах источника тока при разрыве цепи питания диода не должно превышать более чем на 15 В напряжение при замкнутой цепи питания и установлении на диоде рабочего режима. Пределы регулирования тока источника от 15 до 50 мА. Максимальный ток диода с учетом выбросов не должен превышать $1,4 I_p$, где I_p – номинальный рабочий ток диода. В этом режиме допускается работа диода не более 3 мин [6].

Не допускается проверка годности диода с помощью прибора, который может задавать прямой ток более 50 мА. Допускается работа диода 1А704В:

- в импульсном режиме при токе в импульсе $I_{п} \leq I_p$ любой длительности и скважности;
- в диапазоне частот от 6 до 8 ГГц [6].

Основные конструкции ГЛПД схематически изображены на рисунке 7.



а – генератор волнового типа с коаксиальным резонатором; **б** – генератор волнового типа с открытым радиальным резонатором; **в** – генератор на микрополосковых линиях
Рисунок 7. – Основные схемы подключения ГЛПД

На рисунке 4, *а* показана конструкция генераторов волноводного типа с коаксиальным резонатором. Лавинно-пролетный диод 1 расположен в коаксиальном резонаторе 2, который перестраивается с помощью винта 4. Винт 3 служит для регулировки связи генератора с нагрузкой. Ступенчатый переход 5 является трансформатором сопротивлений. Дроссель 6 предназначен для разделения СВЧ-цепи и цепи питания [4].

Рисунок 4, *б* иллюстрирует другой вариант конструкции волноводного генератора. Лавинно-пролетный диод 1 установлен в открытом радиальном резонаторе 2, помещенном в прямоугольном волноводе 3. Перемещение замыкающего волновод плунжера 4 изменяет степень связи генератора с нагрузкой. Дроссель 5, как и в предыдущей конструкции, служит для разделения СВЧ-цепи и цепи питания [4].

На рисунке 4, *в* показана топология генератора на микрополосковых линиях. Бескорпусный ЛПД 1 установлен в полосковом резонаторе 2, который связан с выходной линией через трансформирующую

сопротивление линию 4 и блокировочный конденсатор 3. Питание ЛПД подводится через контактную площадку 7, ограничительный резистор 6 и фильтр 5, отделяющий СВЧ-цепь от цепи питания [4].

Заключение. При проектировании и разработке малогабаритного генератора помех был произведен анализ всех возможных активных элементов. Исходя из требований к уровню излучаемой мощности, частотному диапазону и долговечности, в качестве управляемого источника электронов был выбран лавинно-пролетный диод 1A704В, который полностью удовлетворяет размерам имеющегося короткозамкнутого волновода.

В качестве дополнительных мер для перестройки по частоте было выбрано параллельно колебательное включение в контур варикапа, подавая на который небольшое положительное напряжение получают изменение емкости, и, как следствие, изменение частоты излучаемого сигнала (на 200 МГц, по результатам проведения натуральных экспериментов). Кроме того, дополнительно в резонаторе размещены два плунжера, которые путем механической перестройки изменяют погонную емкость и индуктивность колебательного контура, а значит, и частоту сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиолокационная станция обнаружения маловысотных наземных объектов X-диапазона «Родник» [Электронный ресурс] / KB RADAR. – Режим доступа: <http://www.kbradar.by/products/radiolokatsiya/radiolokatsionnye-stantsii/519/>. – Дата доступа: 17.01.2018.
2. Моделирование в радиотехнике / А.И. Леонов [и др.] ; под ред. А.И. Леонова. – М. : Советское радио, 1979. – 264 с.
3. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория : справ. / под ред. Я.Д. Ширмана. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Радиотехника. 2007.
4. Проектирование радиопередающих устройств СВЧ / под ред. Г.М. Уткина. – М. : Сов. радио, 1979.
5. Павловский, А.В. Радиопередающие устройства : в 2 ч. / А.В. Павловский, И.В. Макаров, Д.А. Шаров. – Минск : Военная академия Респ. Беларусь, 2006.
6. Полупроводниковые приборы : справ. / под ред. Н.Н. Горюнова. – М. : Энергоатомиздат, 1987.

Поступила 02.03.2018

SMALL-SIZED TEST GENERATOR NOISE

V. CHERTKOV, A. TOLMACHEV

The research results which was obtained during the small-scale jamming generator developing that used for radar testing and various tactical situations in case intensive usage radioelectronic warfare devices by hostiles modeling. The analysis of the structural circuits of the avalanche-diode oscillator is presented. The advantages and disadvantages of the structures are indicated. The basic scheme for the execution of a small-sized test jamming generator is substantiated.

Keywords: jamming generator, radioelectronic warfare, noise, probing signal, avalanche-diode oscillator.