DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.1

УДК: 623.746.4-519

Противодействие микро-БПЛА с применением резонансных нелинейных эффектов

Г.Н. Щербаков, А.В. Рычков, С.Р. Богати

Военный учебно-научный центр сухопутных войск общевойсковой академии вооруженных сил Российской Федерации, Россия, Москва

Статья поступила в редакцию 23 июля 2026 г.

Аннотация. Противодействие беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) актуально в наши дни, так как дроны представляют угрозу военным и гражданским объектам, физическим лицам. Растет число инцидентов с использованием дронов в несанкционированных целях, а также случаев применения микро-БПЛА для промышленного шпионажа, нарушения периметров охраняемых объектов, доставки запрещенных грузов и дестабилизации обстановки в зонах конфликта. В статье рассматривается способ противодействия маловысотным микро-БПЛА при электромагнитном излучении на полупроводниковые элементы бортовой аппаратуры, вследствие чего происходит наведение паразитных токов, частоты которых близки к тактовым частотам работы электронных устройств на борту микро-БПЛА, но не равны им, однако достаточных для вывода из строя бортовой системы управления или некорректной работы ее отдельных элементов. Использование мощного электромагнитного излучения основано на действии СВЧ-комплекса, негативно воздействующего на радиоэлектронную аппаратуру микро-БПЛА, приводящего к сбоям в ее работе – функциональному подавлению носителей

аппаратуры или выходу аппаратуры из строя вследствие электрического пробоя в полупроводниковых и других ее компонентах.

Ключевые слова: нелинейность, полупроводниковые элементы, микро-БПЛА, СВЧ.

Автор для переписки: Богати Сергей Роландович, bogati93@gmail.com

Введение

Известны зенитно-ракетные комплексы, предназначенные для поражения воздушных целей, но недостатком данных технических средств является малая эффективность по поражению малоразмерных низколетящих целей, особенно микро-БПЛА на высотах до 100 м.

Наиболее близким по технической сущности является способ выведения из строя микро-БПЛА с помощью электромагнитного излучения дециметрового диапазона длин волн [1]. Способ заключается в визуальном обнаружении летящего БЛА, в сторону которого ориентируется излучающая антенна. Далее с помощью программно-аппаратного комплекса осуществляется расчет мощности излучения, необходимой для противодействия БЛА, находящегося на данном расстоянии, и осуществляется излучение в направлении БЛА электромагнитных волн. В результате на его паразитных антеннах появляются наведенные токи, которые вызывают отказы в работе электронного оборудования бортовой системы управления. Способ использует электромагнитное излучение с длинами волн от 10 до 20 см (дециметровый диапазон), что позволяет осуществлять поражение БЛА с меньшими энергетическими затратами (требуемая плотность мощности 0,007-40 Вт/см2).

Главным недостатком данного способа является низкая вероятность поражения микро-БПЛА, т.к. заранее неизвестна частота СВЧ-сигнала, обеспечивающего эффективное воздействие на полупроводниковые радиодетали бортовой системы БПЛА. К следующим недостаткам относятся высокие энергетические затраты СВЧ-излучателя и большой вес конструкции.

Техническим результатом предлагаемого способа является предварительное выявление частоты максимального взаимодействия зондирующего поля с нелинейными элементами микро-БПЛА путем облучения БПЛА сигналом с непрерывно изменяющейся частотой и определение наличия резонансных всплесков отраженного (переизлученного) сигнала на второй гармонике, так как данная гармоника обладает максимальной амплитудой на p-n-переходе.

1. Влияние полупроводниковых элементов на отражательные свойства

Нелинейно-резонансные отражательные свойства у микро-БПЛА обусловлены двумя факторами. Во-первых – наличие нелинейных p-n-переходов у различных полупроводниковых радиоэлементов (диодов, транзисторов, микросхем и др.) в бортовой аппаратуре БПЛА. Во-вторых – наличие резонансов у тонких проводников, соединенных с полупроводниковыми элементами, длина которых соизмерима с длиной волны облучающего микро-БПЛА СВЧ-электромагнитного поля (проводники печатных плат, соединительные провода и др.). Резонансные отражения могут также создавать щели металлических корпусов бортовой аппаратуры, сквозь которые ЭМП может попадать на нелинейные элементы.

Рабочие длины волн зондирующего СВЧ-магнитного поля должны быть соизмеримы с размерами объекта поиска. В этом случае возникает резонансное явление при отражении радиоволн [2]. Так как характерные размеры микро-БПЛА составляют единицы дециметров, то соответственно должен использоваться дециметровый диапазон радиоволн.

В состав оборудования входят, как правило, следующие полупроводниковые устройства микро-БПЛА, обладающие нелинейными свойствами:

- приемник сигналов спутниковой навигационной системы (ГЛОНАСС/GPS);
- устройства получения видовой информации;
- радиолинии приема-передачи видовой и телеметрической информации;
- командно-навигационные радиолинии с антенно-фидерным устройством;
- устройство обмена командной информацией;

- устройство информационного обмена;
- бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ);
- устройство хранения (накопления) видовой информации.

Необходимо отметить, что энергопотребление информационного радиоканала (НРЛС) значительно меньше (на несколько порядков), чем энергопотребление канала электромагнитного поражения. Достигнутый технический результат предлагаемого способа обеспечивает такое воздействие СВЧ-поля, которое приводит к появлению на полупроводниковых элементах паразитных токов, вызывающих отказы в работе бортовой системы микро-БПЛА [3, 4], отличающиеся от выбранного прототипа тем, что предварительно с использованием многочастотной нелинейной радиолокации выявляют резонансную частоту максимального взаимодействия зондирующего поля с нелинейными элементами БЛА и затем кратковременно облучают его мощным СВЧ-полем на этой резонансной частоте.

Длительность зондирующих радиоимпульсов нелинейной радиолокации составляет от десятых долей до единиц микросекунд, а пауза – от единиц до десятков миллисекунд [5]. В то же время канал поражения создания помехи является квазинепрерывным с большими затратами энергии в диапазоне длин волн 10-20 см. В отличие от прототипа, в заявленном способе дежурный канал – информационный (информационный канал на основе нелинейной радиолокации), потребляющий сравнительно небольшую мощность, работает непрерывно [6, 7].

2. Экспериментальная проверка метода обнаружения микро-БПЛА

С целью проверки работоспособности предлагаемого способа был проведен эксперимент в лабораторных условиях внутри безэховой камеры. В эксперименте использовался дециметровый диапазон радиоволн. Использовались два объекта поиска. Первый – это микро-БПЛА марки MJX Bugs 3[8, 9] на рисунке 1.



Рис. 1. Микро-БПЛА марки MJX Bugs 3.

Его характеристики:

- размеры: 440 × 440 × 150 мм с защитой винтов;
- диагональное расстояние между двигателями: 310 мм;
- двигатели: 1805 1800 kv / 190 мм пропеллеры;
- вес 447 г (с батареей / без защиты винтов);
- аккумулятор 7,4 В 1800 мА·ч разъем XT30;
- рабочий диапазон частот – 2400-2483,5 МГц;
- количество каналов управления – 4;

Второй – индикатор СВЧ-поля. Он состоял из тонкого линейного вибратора длиной 20 см. В центре вибратора включен диод 2А201А (типовой p-n-переход), низкочастотный LC-фильтр, миниатюрная индикаторная головка 0-100 мкА. Макет НРЛС включал передающий и приемный блоки. Передающий блок содержал СВЧ-генератор Г4-37А (1 Вт), ФНЧ с частотой среза 1000 МГц, широкополосную передающую СВЧ-антенну П6-31. Приемный блок состоял из измерительного СВЧ-приемника П5-4Б (чувствительность до 10^{-12} Вт), дополнительного входного аттенюатора 10 дБ, широкополосной приемной антенны П6-23А.

Рабочие частоты передающего блока изменялись в пределах от 600 МГц до 900 МГц, с шагом в 50 МГц. Регистрировалась вторая гармоника в спектре отраженного сигнала в диапазоне от 1200 МГц до 1800 МГц. Расстояние

от измерительных антенн до объекта поиска составляло 1 м. При изменении частоты поддерживался постоянный уровень зондирующего СВЧ-поля. Объекты поиска располагались на вращающейся радиопрозрачной подставке из пенопласта. Эксперимент с вращающимся микро-БПЛА показал, что его диаграмма обратного рассеяния на второй гармонике имеет многолепестковую форму. В неподвижном положении при изменении частоты зондирующего СВЧ-поля в диапазоне 600-900 МГц наблюдались значительные всплески принимаемого сигнала величиной 18-23 дБ на второй гармонике зондирующего СВЧ-поля [10, 11].

При использовании в качестве объекта поиска индикатора СВЧ-поля наблюдают всплески тока через p-n-переход, достигающие 12-15 дБ. При этом максимальные значения тока наблюдались, когда половина длины волны зондирующего поля равнялась длине вибратора. Это соответствовало частоте 750 МГц.

Был также проведен эксперимент с зондирующим амплитудно-модулированным СВЧ-полем. Импульсная модуляция СВЧ-генератора Г4-37А осуществлялась от генератора импульсов Г5-15. Длительность зондирующих радиоимпульсов составляла 1 мкс, длительность паузы 1 мс, что являлось экономически обоснованным применением предлагаемого способа. Для увеличения чувствительности приемного блока в импульсном режиме на низкочастотном выходе приемника П5-4Б устанавливался селективный микровольтметр С4-48. Частота настройки равнялась частоте следования зондирующих импульсов 1 кГц. Резонансные всплески отраженного сигнала при этом сохранялись для обоих объектов поиска. При этом излучаемая средняя мощность составляла всего 1 мВт. В режиме силового воздействия индикатора СВЧ-поля мощность составляла 1 Вт (в тысячу раз больше). Эксперимент подтвердил наличие резонансных эффектов при изменении частоты зондируемого СВЧ-поля у макета НРЛС. Поляризация измерительных СВЧ-полей была линейной, согласованной.

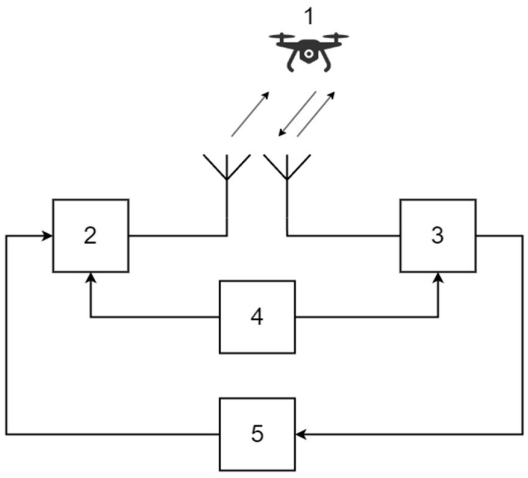


Рис. 2. Структурная схема установки.

На рисунке 2 представлена структурная схема установки, реализующая способ борьбы с маловысотными микро-БПЛА (1) за счет воздействия на них электромагнитным полем мощного СВЧ-передатчика (2), который отличается тем, что предварительно с использованием многочастотной нелинейной радиолокации (3) и регистрации второй гармоники (5) несущей СВЧ.

Сначала выявляют резонансную частоту максимального взаимодействия с полупроводниковыми элементами микро-БПЛА, затем на данной частоте кратковременно облучают мощным СВЧ-электромагнитным полем, задаваемым блоком управления (4). Блок обеспечивает наведение токов на паразитных антеннах микро-БПЛА с нелинейными элементами, достаточных для вывода из строя бортовой системы управления [12].

Заключение

Результат использования данного способа продемонстрировал, что воздействие СВЧ-поля приводит к появлению паразитных токов на нелинейных элементах, вызывающих отказы в работе радиоэлектронной аппаратуры. Этот способ отличается от известных тем, что предварительно благодаря многочастотной нелинейной радиолокации определяется резонансная частота нелинейных элементов максимального взаимодействия зондирующего поля и затем кратковременно происходит облучение мощным СВЧ-полем на выявленной резонансной частоте.

Литература

1. Патент на изобретение № 2551821C1 Российская Федерация, СПК H01Q 1/00 (2006.01). Способ борьбы с беспилотными летательными аппаратами ближнего и малого радиуса действия с помощью электромагнитного излучения дециметрового диапазона длин волн: № 2013159255/08: заявл. 30.12.2013: опубл. 27.05.2015/ Белоконь И.Н., Бойко Е.Н., Зайцев Д.В., Иванов Е.В., Кудряшов А.С., Пирожков А.А., Сосков Д.Ю., Холод С.В.; заявитель Федеральное государственное казенное учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации. 6 с.
2. Финкельштейн, Моисей Ионович. Основы радиолокации [Учеб. для вузов гражд. авиации] / М. И. Финкельштейн. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Радио и связь, 1983.
3. Ю. М. Перунов, К. И. Фомичев, Л. М. Юдин / Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием /; под ред. Ю. М. Перунова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Радиотехника, 2008.
4. Мырова Л.О. /Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. Москва Радио и связь, 1988.
5. Щербаков Г.Н. / Применение нелинейной радиолокации для дистанционного обнаружения малоразмерных объектов, Специальная техника, 1999, N1, с.34-39.
6. Щербаков, Г. Н. / Новые методы обнаружения скрытых объектов / Г. Н. Щербаков, М. А. Анцелевич. – М.: Эльф ИПР, 2011. -503 с.
7. Щербаков Г.Н., Рычков А.В., Богати СР., Ужицин М.В. Определение оптимальных параметров датчика цели устройства обнаружения низколетящих беспилотных летательных аппаратов малого размера // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. № 3. С. 41-47. https://doi.org/10.18127/j5604128-202503-06
8. Распопов В.Я. Микросистемная авионика: учебное пособие. – Тула: «Гриф и К», 2010.

9. Сенюшкин Н.С., Ямалиев Р.Р., Ялчибаева Л.Р. Применение композиционных материалов в конструкции БПЛА // Молодой ученый, 2011. № 4. Т. 1. С. 59-61.
10. Аминов С. ПВО в борьбе с БЛА // Беспилотная авиация: спецвыпуск. МАКС. 2011. С. 34-36.
11. Е.И. Нефедов, В.В. Козловский, А.В. Згурский. Микро-полосковые излучающие и резонансные устройства // Киев «Тэхника», 1990, с.35
12. Патент № 2856507 Российская Федерация, СПК F41H 11/02 (2025.08), F41H 13/0068 (2025.08), F41B 6/00 (2025.08). Способ борьбы с маловысотными микро-БПЛА с помощью электромагнитного излучения: № 2025108926: заявл. 10.04.2025: опубл. 24.08.2026/ Щербаков Г.Н., Рычков А.В., Прохоркин А.Г., Богати СР., Николаев А.В.; заявитель «ОБЩЕВОЙСКОВАЯ ОРДЕНА ЖУКОВА АКАДЕМИЯ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ». 9 с.

Для цитирования:

Щербаков Г.Н., Рычков А.В., Богати С.Р. Противодействие микро-БПЛА с применением резонансных нелинейных эффектов // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 9. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.1