

О преимуществах интермодуляционного метода нелинейного сверхширокополосного зондирования

Э. В. Семенов

*Институт сильноточной
электроники СО РАН;
Томский государственный
университет систем управления
и радиоэлектроники*

edwardsemyonov@narod.ru

И. В. Безрукова

*Институт сильноточной
электроники СО РАН;
Томский государственный
университет систем управления
и радиоэлектроники*

bezrukova_i03@mail.ru

И. А. Градов

*Институт сильноточной
электроники СО РАН;
Томский государственный
университет систем управления
и радиоэлектроники*

ilyagradow@gmail.com

Аннотация. Исходя из анализа обнаруженных особенностей нелинейного рассеяния малоразмерными электронными устройствами видеопульсных сигналов, предложен интермодуляционный метод сверхширокополосного зондирования. Экспериментально показано, что интермодуляционным методом можно получить в несколько раз больший нелинейный отклик от объекта, чем при использовании простых ступенчатых импульсов. Обосновано, что интермодуляционный метод менее чувствителен к собственным нелинейным искажениям сигналов в приемном устройстве и позволяет проще генерировать зондирующие воздействия большой мощности.

Ключевые слова: нелинейное зондирование; сверхширокополосные сигналы; интермодуляционный метод

I. ВВЕДЕНИЕ

Для увеличения дальности нелинейных систем распознавания объектов с электронной «начинкой» нужно увеличивать мощность тестового сигнала [1] с сокращением длительности импульса (для сохранения энергии зондирующего импульса в допустимых рамках). При этом средняя частота зондирующего сигнала не должна превышать ~ 1 ГГц; на больших частотах возрастает шунтирующее действие емкостей полупроводниковых приборов. В этих условиях сокращение длительности импульса до ~ 1 нс дает полосу сигнала также около 1 ГГц, т.е. зондирующая система получается сверхширокополосной (СШП).

Предложения по нелинейной СШП локации известны [2–5]. Однако с первых публикаций в этом направлении прошло более 20 лет, а эта технология остается лишь на уровне умозрительных предложений. Наши исследования показывают, что моноцикл (классический тестовый импульс в СШП зондирующих системах) вызывает весьма слабый нелинейный отклик от электронных устройств. Это же обстоятельство подтверждается в смежной области исследования восприимчивости электронных устройств к паразитным излучениям и помехам. Из [6] известно, что энергия, воспринятая электронным устройством из

электромагнитного поля, уменьшается с увеличением частоты.

Исследуя нелинейный отклик электронных устройств на СШП импульсы различной формы, нам удалось получить более определенные результаты части влияния различных частей спектра тестового сигнала на нелинейный отклик объекта [7]. Общий отклик от объекта, и в том числе нелинейная его часть, определяется верхними частотами в спектре тестового сигнала, но на проявление объектом нелинейных свойств влияют нижние частоты, 100...300 МГц, хотя они почти не вызывают отраженного от объекта сигнала. Это объясняет низкую эффективность нелинейного зондирования короткоимпульсными сигналами, в которых положительный энергетический лепесток сразу компенсируется отрицательным лепестком.

На основе разработанных моделей нелинейного рассеяния СШП сигналов объектами [8–9] мы выполнили структурно-параметрическую оптимизацию тестового сигнала, которая позволяет в несколько раз увеличить нелинейный отклик от объекта без увеличения напряженности зондирующего поля. Анализ результатов этой оптимизации позволяет сделать выводы качественного характера для развития систем нелинейного СШП зондирования, чему и посвящен настоящий доклад.

II. ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД НЕЛИНЕЙНОГО СШП ЗОНДИРОВАНИЯ КАК ЛОГИЧЕСКОЕ СЛЕДСТВИЕ СТРУКТУРЫ ОПТИМАЛЬНОГО ТЕСТОВОГО СИГНАЛА

При структурном синтезе оптимального тестового сигнала в [9] мы придерживались двух основных соображений. Во-первых, в тестовом сигнале должен остаться медленный (низкочастотный) импульсный лепесток для создания нелинейного воздействия на электронные цепи объекта зондирования. Во-вторых, чтобы улучшить сигнал по отношению к простому ступенчатому импульсу, ступенчатый фронт сигнала был заменен на волновой цуг (вейвлет). Это позволяет, не наращивая напряженность тестового сигнала, увеличить отклик от объекта (в том числе и нелинейный). Кроме того, выбирая форму вейвлета, можно преимущественно увеличить амплитуду нелинейного отклика в сравнении с общим (за счет структурной и спектральной разницы

Работа выполнена в рамках государственного задания
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации
(проект № FWRM-2024-0001)

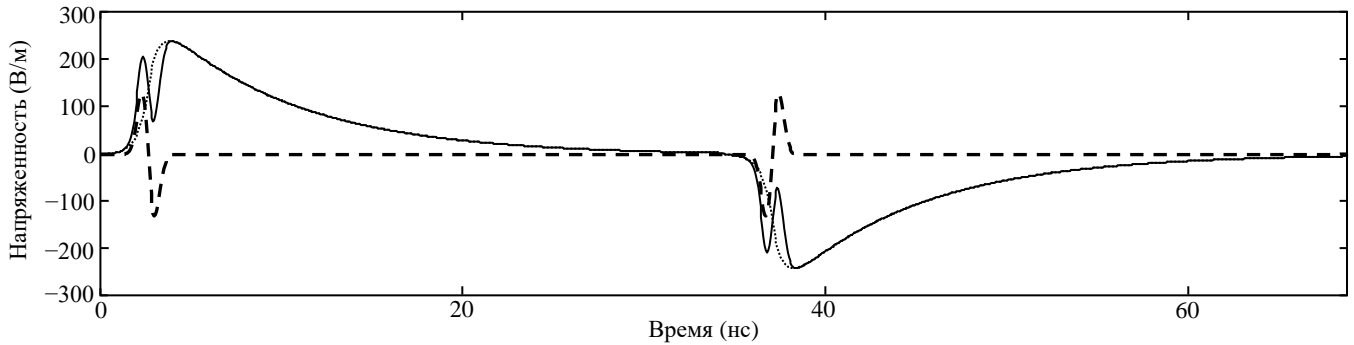


Рис. 1. Представление оптимального зондирующего сигнала как двухкомпонентного: пунктир – низкочастотный импульс, штриховая кривая – высокочастотный вейвлет, сплошная кривая – суммарный сигнал

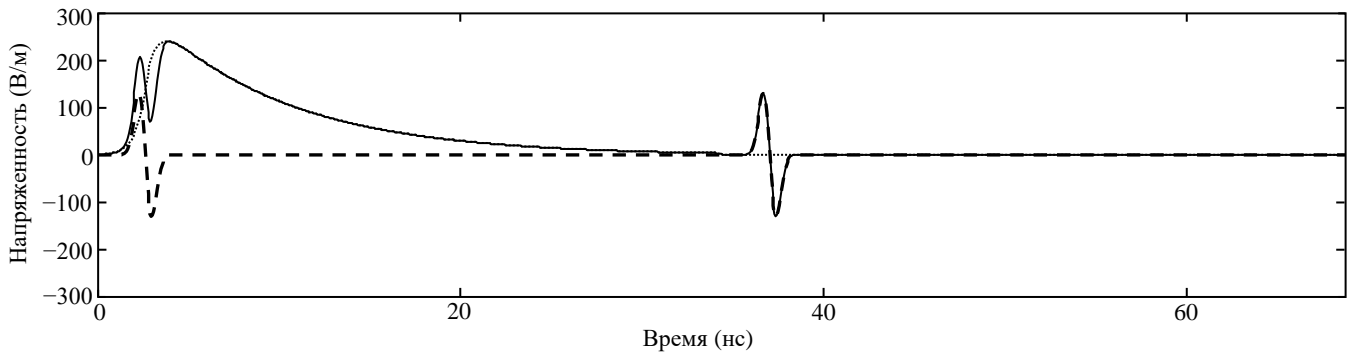


Рис. 2. Тестовое воздействие, формируемое в рамках интермодуляционного метода нелинейной локации: пунктир – низкочастотный видеоимпульс, штриховая кривая – высокочастотный вейвлет, сплошная кривая – суммарный сигнал

общего и нелинейного откликов). Последнее обстоятельство позволяет улучшить двухсигнальную чувствительность нелинейной системы зондирования (способность обнаружить малый нелинейный отклик на фоне общего). В итоге тестовый сигнал (рис. 1, сплошная кривая) оказывается состоящим из двух компонент: низкочастотного импульса нелинейного воздействия (пунктир) и зондирующего вейвлета (штриховая кривая).

На рис. 1 от предыдущих работ [10] унаследован принцип нелинейного зондирования, состоящий в воздействии на объект парой тестовых сигналов одинаковой формы, но противоположной полярности. В дальнейшем отклики на такие сигналы совмещаются во времени и складываются. Ненулевая сумма указывает на разницу форм откликов на такие сигналы, что, в свою очередь, означает наличие у зондируемого объекта нелинейных свойств. Однако при использовании сигнала, составленного из двух слагаемых, возможен и более эффективный подход, в котором учитывается различное функциональное назначение компонент сигнала. Низкочастотный импульс практически не вызывает регистрируемого отклика от объекта, но дает нелинейное воздействие на внутренние цепи объекта. И наоборот, высокочастотный вейвлет дает портрет объекта, с учетом действия на него низкочастотного импульса, но сам практически не способен изменить состояние объекта нелинейным образом. Отсюда возникает идея, что нет надобности во втором тесте инвертировать низкочастотный импульс, создавая нелинейное действие противоположного знака. Достаточно выключить этот импульс во втором тесте, сравнивая отклик объекта на вейвлет с нелинейным действием низкочастотного импульса и без него (рис. 2). Фактически, в этом случае нелинейный отклик объекта

возникает в результате интермодуляции в нем двух компонент тестового сигнала.

Интермодуляционный метод нелинейного зондирования в принципе уже известен из литературы [11–12]. Однако в [11–12] в качестве импульса нелинейного воздействия использовался гармонический сигнал частотой 850 МГц. Фиксированная частота сигнала может не достичь внутренних нелинейных цепей конкретного объекта зондирования из-за, например, действия преселектора на входе приемного устройства зондируемого объекта. Также фиксированный гармонический вид сигнала нелинейного воздействия не позволяет решать задачу поиска оптимальной формы сигнала для максимизации нелинейного воздействия при заданной энергии импульса. Кроме того, изложенный в [11–12] подход предполагал включение гармонического импульса нелинейного воздействия на длительное время. В результате проводимые два теста (с сигналом нелинейного воздействия и без) оказывались разделенными на значительное время. Это существенно увеличивало влияние различных нестационарностей как в зондируемой сцене, так и в измерительной установке.

Предложенный метод интермодуляционного зондирования с видеоимпульсом нелинейного воздействия имеет следующие преимущества. Во-первых, упрощается генерация тестовых сигналов. Не требуются специальные технические решения для формирования пары импульсов противоположной полярности. И низкочастотный импульсный сигнал, и высокочастотный вейвлет представляют собой простые периодические сигналы одинаковой формы и полярности. Различается только частота их следования (в два раза), но при их отдельной генерации это не создает сложностей. Во-вторых, упрощается излучение этих сигналов в пространство. Вместо одной весьма

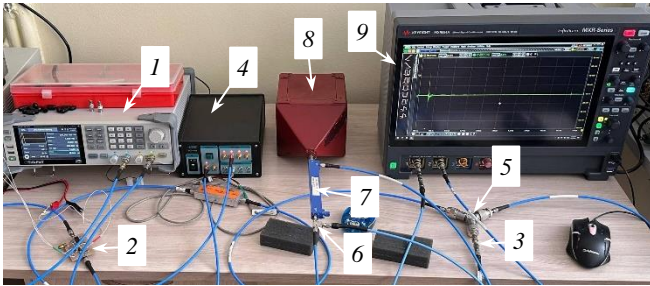


Рис. 3. Измерительная установка: синхрогенератор (1), формирователь импульса нелинейного воздействия (2) с аттенуатором (3), генератор высокочастотного вейвлета (4), сумматор (5), датчик напряжения (6), направленный ответвитель (7), ТЕМ-камера (8), осциллограф (9)

широкополосной антенны можно использовать две, но более узкополосные и оптимизированные для излучения импульсов в различных диапазонах частот.

В-третьих, поскольку низкочастотный видеоимпульс практически не дает наблюдаемого отклика от объекта, отклики объекта в обоих тестах будут близки по форме. Это существенно уменьшает влияние нелинейных искажений сигнала в приемном устройстве на регистрируемый нелинейный отклик объекта. Действительно, сигналы нелинейных искажений приемника будут иметь одинаковую полярность (фазу) в обоих тестах. Поскольку нелинейный отклик формируется как разность откликов объекта в двух тестах, то сигналы нелинейных искажений этих откликов приемником будут компенсировать друг друга при вычитании.

III. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Проверку предлагаемого принципа зондирования целесообразно провести в ТЕМ-камере небольшого размера. Это позволяет легче создать нужную напряженность поля и упрощает интерпретацию результатов.

Разработанная измерительная установка (рис. 3) включает синхрогенератор (1), формирователь импульса нелинейного воздействия (2) с аттенуатором (3), генератор высокочастотного вейвлета (4), резистивный сумматор для получения комбинированного тестового сигнала Я4С-101 (5), датчик напряжения для регистрации тестовых сигналов (6), направленный ответвитель для отделения отраженного от объекта сигнала Mini-Circuits ZUDC20-183+ (7), ТЕМ-камеру [13] (8) и осциллограф Keysight MXR604A (9).

Запуск формирователей высокочастотного вейвлета и импульса нелинейного воздействия осуществляется от двухканального синхрогенератора Siglent SDG 7000A (к

каждому из каналов подключен соответствующий формирователь). Регулируя фазовый сдвиг между сигналами на выходах синхрогенератора, мы имеем возможность располагать высокочастотный вейвлет в разных точках импульса нелинейного воздействия.

Для формирования высокочастотного вейвлета использован генератор Trim ТМГ3-4-01 с формирователем импульса ТМГ1000.110Р0. Он обеспечивает на своем выходе импульс длительностью ~1 нс по форме близкий к первой производной импульса Гаусса (моноцикл). Максимум спектральной плотности мощности этого сигнала располагается на частоте ~800 МГц. Амплитуда выходного сигнала составляет 62 В.

Формирователь импульса нелинейного воздействия изготовлен специально для этой установки на основе транзисторных ключей в лавинном режиме. За основу взята схема, приведенная в [14]. Дополнительно в состав формирователя включен делитель частоты на два. Таким образом импульсы нелинейного воздействия присоединяются к каждому второму высокочастотному вейвлету, что и обеспечивает реализацию интермодуляционного принципа зондирования. Формирователь вырабатывает на своем выходе видеоимпульс с длительностью фронта 1.4 нс и относительно медленным спадом. Исходя из длительности фронта расчетным путем получаем, что верхняя граничная частота спектра этого сигнала составляет около 250 МГц. На оптимальную нагрузку формирователь отдает мощность около 1 кВт, поэтому на его выход установлен аттенуатор. Ослабление аттенуатора выбрано так, чтобы каждый из компонентов комбинированного тестового сигнала имел амплитуду около 20 В. Это обеспечивает напряженность поля компонент тестового сигнала в ТЕМ-камере ~400 В/м. Итоговая форма тестовых сигналов на входе ТЕМ-камеры приведена на рис. 4.

В датчике напряжения к проходящему коаксиальному волноводу подключен резистор сопротивлением 470 Ом, ко второму выводу которого присоединен коаксиальный волновод, ведущий к одному из каналов осциллографа.

IV. ПРИМЕР СШП ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННОГО МЕТОДА

В качестве примера объекта зондирования используем FM-приемник Precision PS-298 размерами 60×73×16 мм.

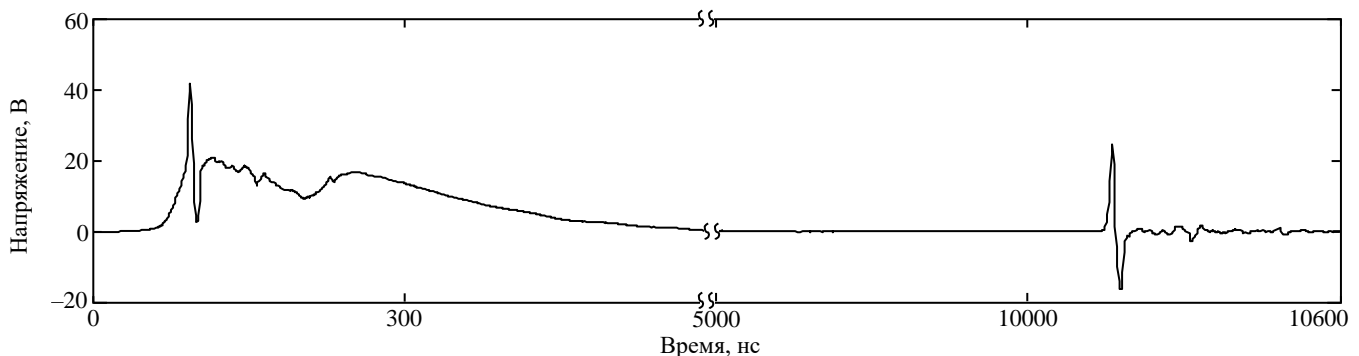


Рис. 4. Полученные экспериментально тестовые сигналы

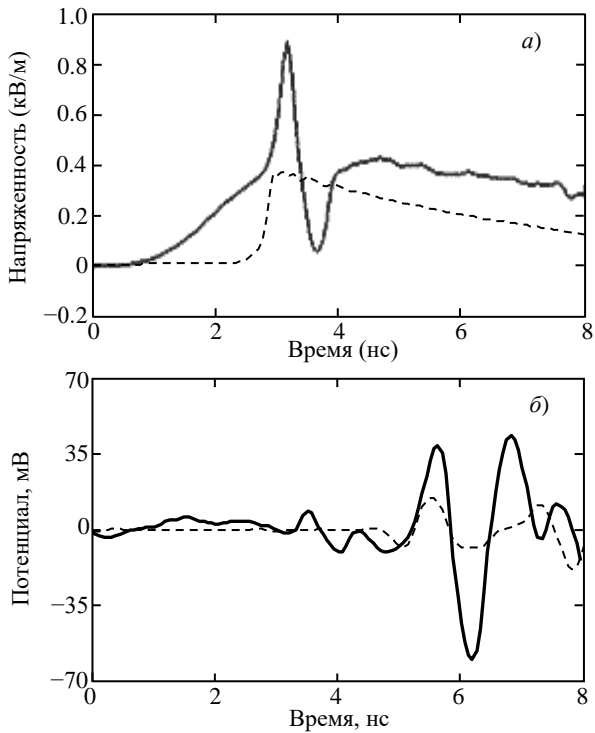


Рис. 5. Тестовые сигналы (а) и нелинейные отклики объекта (б): сплошная линия – для комбинированного тестового сигнала, штриховая линия – для ступенчатого импульса

Для сравнения эффективности предложенного интермодуляционного метода зондирования с классическим подходом (когда используются два ступенчатых сигнала противоположной полярности) выполнен тест ступенчатым сигналом (рис. 5а, штриховая кривая). Этот сигнал создает примерно такую же пиковую напряженность в ТЕМ-камере (400 В/м), как и компоненты комбинированного сигнала (сплошная кривая).

Нелинейные отклики объекта зондирования на комбинированный тестовый сигнал и на ступенчатый импульс приведены на рис. 5б соответственно сплошной и штриховой кривыми. Можно видеть, что нелинейный отклик в рамках интермодуляционного метода зондирования получается в четыре раза больше, чем в тесте парой ступенчатых сигналов противоположной полярности. По рис. 5б можно определить также, что средняя частота волнового пуга меньше в отклике на комбинированный сигнал. Это является следствием того обстоятельства, что при тестах парами противоположных импульсов подавляются продукты нелинейного преобразования нечетного характера (в том числе на основных частотах тестового воздействия). Их демаскировка в рамках интермодуляционного метода увеличивает его информативность и проникающую способность.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Требования увеличения дальности и разрешающей способности систем нелинейного зондирования при условии ограничения средней частоты зондирующих сигналов ведут к необходимости использования СШП воздействий.

Проведенные исследования показывают, что в части воздействия не нелинейный объект СШП сигнал разделяется на нижние частоты, оказывающие нелинейное влияние на объект, но не дающие отклика от него, и верхние частоты, формирующие отклик от

объекта, включая информацию о его нелинейном состоянии. Эта разница ведет к идее интермодуляционного метода СШП зондирования, в котором эти две части СШП сигнала по-разному комбинируются.

На примере малоразмерного электронного устройства экспериментально показано, что интермодуляционным методом можно получить в несколько раз больший нелинейный отклик, чем при использовании простых ступенчатых сигналов (при той же пиковой напряженности импульса нелинейного воздействия). Кроме того, потенциально интермодуляционный метод менее чувствителен к собственной нелинейности приемного устройства и позволяет проще генерировать мощные тестовые воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Mazzaro G.J., Martone A.F., Ranney K.I., Narayanan R.M. Nonlinear radar for finding RF electronics: system design and recent advancements // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017. V. 65, No. 5. P. 1716–1726.
- [2] Якубов В.П., Лосев Д.В., Мальцев А.И. Использование сверхширокополосного излучения для диагностики нелинейностей // Журнал радиоэлектроники. 2000. № 3.
- [3] Пат. РФ 2253878 / Симонов А.В. Способ нелинейной радиолокации № 2003131201/09; заявл. 24.10.2003; опубл. 10.06.2005.
- [4] Авдеев В.Б., Бердышев А.В., Панычев С.Н. Сверхкороткоимпульсная сверхширокополосная нелинейная радиолокация // Телекоммуникации. 2006. № 8. С. 23–27.
- [5] Лоцилов А.Г. Разработка принципов нелинейной сверхширокополосной радиолокации // Доклады ТУСУР. 2013. № 4. С. 31–38.
- [6] Усыченко В.Г., Сорокин Л.Н., Усыченко А.С. Проникновение энергии электромагнитных излучений в полупроводниковую элементную базу технических средств, не имеющих специализированных приемных антенн // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65, № 12. С. 1234.
- [7] Semyonov E.V., Nazarov M.A., Poltorkhin K.M., Berezin A.A., Fateev A.V. Features and behavioral modeling of ultra-wideband signals nonlinear scattering by small-sized electronic devices // IEEE Transactions on Radar Systems. 2025. V. 3. P. 843–851.
- [8] Безрукова И.В., Семенов Э.В. Моделирование сложных нелинейных откликов объектов на сверхширокополосные сигналы // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 35 Международной конференции. Севастополь, 7–13 сентября 2025 г. Севастополь: Изд-во СевГУ, 2025. С. 247–248.
- [9] Семенов Э.В., Безрукова И.В. Об оптимальной форме тестового сигнала для систем нелинейного видеоимпульсного зондирования // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: материалы всероссийской научной конференции. Дивноморское, 23–27 июня 2025 г. 7 с.
- [10] Semyonov E.V., Fateev A.V., Nazarov M.A., Berezin A.A. Modeling and experimental study of the nonlinear baseband pulse radar prototype // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves: proceedings of IEEE International conference. Divnomorskoe, Russia, June 26–30, 2023. 4 p.
- [11] Якубов В.П., Шпилов С.Э., Сатаров Р.Н., Юрченко А.В. Дистанционная сверхширокополосная томография нелинейных радиоэлектронных элементов // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, вып. 2. С. 122–125.
- [12] Шпилов С.Э., Якубов В.П. Нелинейные преобразования сигналов в импульсной радиотомографии // Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. Т. 63, № 2. С. 5–14.
- [13] Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Матвеев О.А. ТЕМ-камера для оценки уровней помехозащиты и помехоустойчивости радиоэлектронных средств с возможностью исследования биологических объектов в диапазоне частот до 2ГГц // Технологии электромагнитной совместимости. 2018. № 4. С. 46–56.
- [14] Avdochenko V.I., Pozdnyakov V.S., Semyonov E.V., Trenkal E.I. Bipolar reference pulse generation device for correlation processing // Proceedings of IEEE International Siberian Conference on Control and Communications. Tomsk, Russia, November 17–19, 2022. 4 p.