

УДК 621.373.5

Г.М. Шевченко, В.С. Поздняков, Э.В. Семенов, А.А. Березин

Генератор пар импульсов противоположной полярности с повышенной мощностью с применением сумматора на нерегулярно-включенных полосковых линиях

Рассмотрен генератор пар импульсов с субнаносекундным фронтом, в котором импульсы противоположной полярности создаются отдельными формирователями, а затем подаются на мостовой сумматор оригинальной конструкции. Впервые в устройствах подобного типа достигнута выходная мощность 18 Вт. Отличительной особенностью данной структуры является то, что половина мощности формирователей рассеивается на балластном резисторе моста (из-за попеременного появления импульсов на входах сумматора). Для частичной компенсации этого эффекта входное сопротивление сумматора выбрано вполнину меньше стандартного (25 Ом), что в действующей схеме формирователей приводит к увеличению отбора мощности от них. Сами формирователи выполнены на диодах с накоплением заряда (ДНЗ) по схеме близкой к традиционной, но отличаются диодной цепью на выходе, которая устраняет проникновение на выход паразитных выбросов противоположной полярности и защищает ДНЗ от действия импульса соседнего формирователя. Формирователь применяется в экспериментах по нелинейной видеоимпульсной локации.

Ключевые слова: Иоды с накоплением заряда, согласованно-развязанный сумматор, нелинейная локация.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-1-7-12

Нелинейная локация является одним из путей повышения избирательности радиолокационных систем за счет использования признаков нелинейности в рассеянном объектами сигнале. Она используется для обнаружения электронных устройств при досмотре [1], мониторинга самодвижущихся аппаратов [2] и выявления некачественных электрических контактов [3].

Надежды на существенное улучшение характеристик нелинейных локаторов связаны с переходом к видеоимпульсным тестовым сигналам [4]. Для обнаружения нелинейного объекта с использованием видеоимпульсного нелинейного локатора необходимо воздействовать на объект двумя отличающимися тестовыми сигналами. Частным случаем различия является случай, когда два сигнала имеют разную полярность [4]. Иными словами, для реализации принципа нелинейной видеоимпульсной локации требуются генераторы пар импульсов противоположной полярности с большой пиковой мощностью.

В настоящее время известны схемы генераторов пар импульсов противоположной полярности только на относительно небольшую мощность (не более 3,4 Вт) [5]. Такая мощность позволяет лишь проводить эксперименты в ТЕМ-камерах небольшого размера. Увеличение выходной мощности таких генераторов весьма актуально. Решение этой задачи и является целью настоящей статьи.

Структурная схема формирователя импульсов

В принципе возможно два способа объединения выходов ключей, формирующих положительные и отрицательные импульсы. Первый способ: гальваническое соединение [5, 6]. В этом случае на ключи приходится подавать дополнительное запирающее напряжение для исключения их паразитного срабатывания от импульса соседнего канала. Это приво-

дит к тому, что выходное напряжение генератора в целом оказывается значительно меньше предельного напряжения ключей.

Второй способ: выполнять формирователи положительной и отрицательной полярности отдельно, а сложение их сигналов выполнять в отдельном устройстве, обладающем развязывающими свойствами. В таком случае ключи могут работать в предельном для них режиме (по напряжению). Далее рассматривается именно этот вариант.

На рис. 1 приведена структурная схема генератора пар импульсов противоположной полярности. Он состоит из трех устройств: формирователя импульса положительной полярности $G1$, формирователя импульса отрицательной полярности $G2$ и согласованно-развязанного сумматора $A1$.

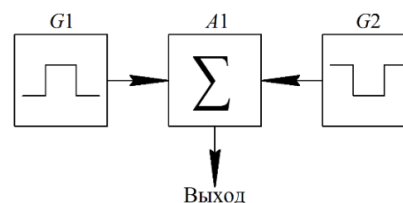


Рис. 1. Структурная схема формирователя

Формирователи импульсов положительной и отрицательной полярности

В настоящее время основным используемым методом для формирования импульсных сигналов большой мощности, имеющих фронт пикосекундной длительности, является прямой разряд накопленного заряда на реактивных элементах на нагрузку [7]. Данным способом возможно обеспечить формирование импульсов с необходимой амплитудой и пикосекундным фронтом.

Наибольшим потенциалом увеличения импульсной мощности для нашей задачи обладают форми-

рователи импульсов на диодах с накоплением заряда (ДНЗ) [7]. Известны варианты таких диодов, называемые дрейфовыми диодами с резким восстановлением, на которых достигаются импульсные мощности до 1 МВт и более.

Наиболее мощные варианты схем формирователей импульсов на ДНЗ предполагают импульсный режим накачки диода [8]. Для дальнейшей проработки мы выбрали такой вариант схемы. Удобная для наших задач модификация схемы приведена на рис. 2.

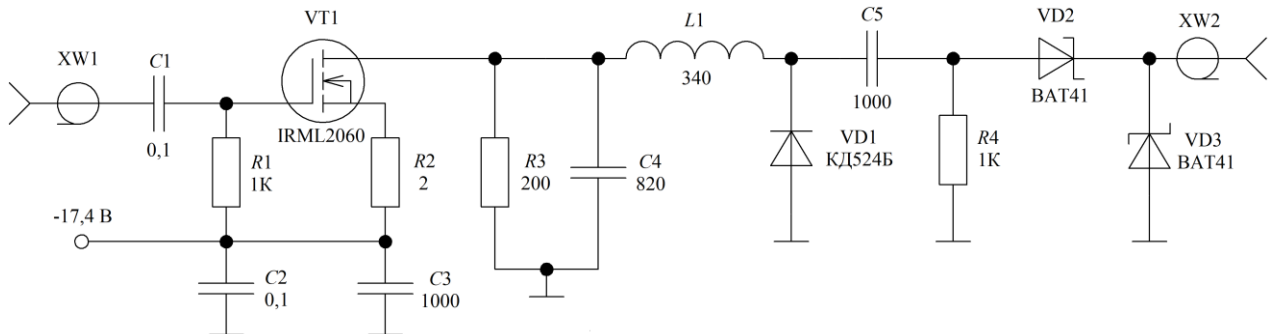


Рис. 2. Принципиальная схема формирователя импульсов положительной полярности

Схема формирователя изображена для создания выходного импульса положительной полярности. Формирователь отрицательного импульса устроен аналогично, за исключением другой полярности питания и другого типа канала полевого транзистора (использован транзистор IRFL9014). Кроме того, катод и анод для всех диодов меняются местами.

Схема реализует известный принцип работы обострителя импульса на диоде с накоплением заряда [7] с импульсной накачкой, которая уменьшает влияние инерционных процессов в диоде при переключении. Если импульс накачки выбрать по длительности меньше времени жизни неосновных носителей заряда в базе диода, то они практически не успевают рекомбинировать, что делает процесс их экстракции при запираии диода максимально быстрым.

В схеме применяется накопление энергии в форме магнитного поля вокруг индуктивности $L1$. На вход формирователя подается прямоугольный импульс запуска, в результате чего транзистор $VT1$, работающий в режиме источника тока, заряжает конденсатор $C4$. Напряжение на $C4$ вызывает ток по цепи $L1-VD1$, что соответствует режиму накачки ДНЗ $VD1$. После окончания импульса запуска резонансный процесс в системе $L1-C4$ приводит вначале к уменьшению тока $L1$, а затем к его инверсии. Инвертированный ток $L1$ разряжает ДНЗ и приводит к его закрыванию. Номиналы резонатора $L1-C4$ выбираются так, чтобы в момент закрывания ДНЗ ток индуктивности был максимален. При закрывании $VD1$ этот ток перебрасывается в нагрузку, формируя выходной импульс.

В экспериментах импульсы запуска формирователей вырабатывались двухканальным генератором Nantek HDG6202B (время нарастания не более 5 нс). Амплитуда импульсов регулировалась в соответствии с крутизной используемых полевых транзисторов для получения заданного тока заряда конденсатора $C4$ (около 1,2 А). Для формирователя поло-

жительного импульса импульс запуска имеет амплитуду 7,7 В, а для отрицательного -10 В. Длительность импульса запуска выбирается исходя из достижения требуемого тока накачки ДНЗ (1,6 А) с учетом выбранной емкости конденсатора $C4$. В экспериментах длительность импульса запуска составляла 60 нс.

Отличия схемы на рис. 2 от классической состоят в устройстве выходной ступени $C5-R4-VD2-VD3$. Данная цепь решает две задачи. Во-первых, благодаря ей устраняется проникновение на выход паразитных выбросов противоположной полярности. Во-вторых, для импульса противоположной полярности, проникающего со второго канала, данная схема работает как короткозамыкатель, отражающий паразитные остатки импульса соседнего канала обратно в сумматор. На рис. 3 показаны импульсы на выходе формирователя с выходной ступенью (кривая 1) и без нее (кривая 2).

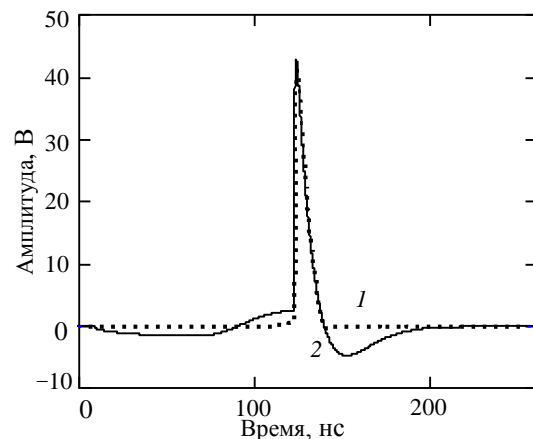


Рис. 3. Форма импульсов на выходе формирователя: 1 – с выходной ступенью из диодов $VD2$ и $VD3$, 2 – без выходной ступени

Представленная схема формирователей обеспечивает напряжение выходного импульса 52 В (поло-

жительный импульс) и 48 В (отрицательный импульс) на нагрузке 50 Ом с временем нарастания 0,6 нс.

Устройство суммирования сигналов формирователей

Выбранный способ генерирования пар импульсов противоположной полярности двумя отдельными формирователями с последующим суммированием предъявляет к сумматору весьма жесткие требования по полосе пропускаемых частот, а также развязке входных портов. Эффективная развязка входных портов обеспечивается в мостовых схемах сумматоров [9], поэтому было решено использовать сумматор мостового типа.

Относительной простотой отличаются мостовые схемы сумматоров, выполненные на одном магнитопроводе [9, 10]. Однако такие устройства с минимальным числом магнитопроводов, например сумматоры со сложением токов или напряжений в нагрузке, оказываются недостаточно широкополосными, поскольку их полоса рабочих частот сверху ограничена фазовым набегом в линиях передачи [11]. В то же время существуют схемы сложения сигналов двух генераторов, представляющие собой цепи неминимально-фазового типа, признаком которых является наличие двух и более каналов прохождения сигнала. В одном из этих каналов располагается полезная нагрузка, в другом – балластный резистор. В таких схемах фазовый набег в линиях передачи уже не является фактором, ограничивающим верхнюю рабочую частоту. При этом входы сумматора оказываются взаимно развязанными [11, 12]. Одна из схем такого устройства приведена на рис. 4.

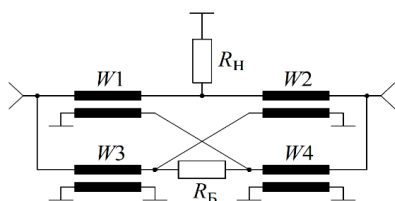


Рис. 4. Схема согласованно-развязанного сумматора

Такой сумматор содержит четыре линии передачи с волновым сопротивлением W , для двух из которых импеданс общего провода используется для развязки по переменному току входной и выходной пары полюсов линии. Линии передачи $W1$, $W3$ и $W2$, $W4$ соединяются на входе параллельно. Таким образом, входное сопротивление со стороны формирователей равно

$$R_{вх} = W/2.$$

По выходу $W1$, $W4$ и $W2$, $W3$ образуют две пары последовательно соединенных линий, которые соединяются параллельно, образуя выходное сопротивление сумматора, равное

$$R_{вых} = W.$$

Согласованный режим работы сумматора обеспечивается при условии равенства волновых сопротивлений линий передач W и сопротивления балластно-

го резистора $R_б$, а также при равенстве выходного сопротивления сумматора $R_{вых}$ сопротивлению нагрузки $R_н$. Отсюда условие согласования сумматора выглядит следующим образом:

$$R_н = R_б = W = R_{вых}.$$

Особенностью режима работы сумматора в структурной схеме, представленной на рис. 1, является то, что сигнал во втором входе сумматора отсутствует при появлении импульса на первом входе. Из-за этого половина поступающей на сумматор мощности рассеивается на балластном резисторе. Однако при этом и сопротивление нагрузки сумматора вдвое больше входного, что приводит к равенству напряжений импульса на входе и выходе сумматора. Это свойство сумматора хорошо согласуется с особенностями используемых формирователей импульсов. Диоды с накоплением заряда ограничивают амплитуду выходного импульса собственным напряжением пробоя. То, что сумматор не уменьшает напряжение выходного сигнала по отношению ко входному, позволяет получить амплитуду генерируемых пар импульсов, практически равную напряжению пробоя ДНЗ. Конечно, для компенсации потерь в балластном резисторе потребуется увеличить ток, отдаваемый формирователем на относительно низкоомную нагрузку (25 Ом), но это не представляет технической проблемы.

Сложная схема соединений линий на выходе сумматора и в окрестности балластного резистора ведет к тому, что обычно его выполняют из отрезков коаксиального кабеля или двухпроводных линий передачи, а для обеспечения необходимого значения синфазной индуктивности прибегают к использованию ферритовых сердечников [11–14]. Паразитные параметры такой конструкции ограничивают его верхнюю граничную частоту [12]. Обычно такие сумматоры имеют диапазон до частоты порядка 100 МГц.

В нашем случае требуется диапазон частот сумматора ориентировочно до 1 ГГц. Для снижения паразитных параметров применены нерегулярно-включенные линии в полосковом исполнении (рис. 5) [15].

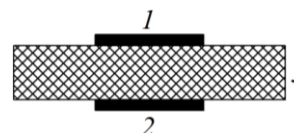


Рис. 5. Поперечное сечение линий передачи: 1 и 2 – металлические проводники, 3 – диэлектрик

В полосковой реализации весьма сложно выполнить все необходимые перемычки в сумматоре так, чтобы их индуктивность была минимальной. Входы линий на верхней стороне подложки подключены к общему проводу входных разъемов (рис. 6, а). Выходы пары накрест лежащих проводников соединены через переходные отверстия с контактами балластного резистора. Оставшаяся пара также накрест лежащих линий соединена с общим проводом выходного разъема.

С обратной стороны подложки (рис. 6, б) входы линий подключены к сигнальному проводнику входных разъемов. Выходы накрест лежащих проводников также подключаются к выводам балластного резистора. Другая пара накрест лежащих проводников через переходное отверстие подключается к сигнальному выводу выходного разъема.

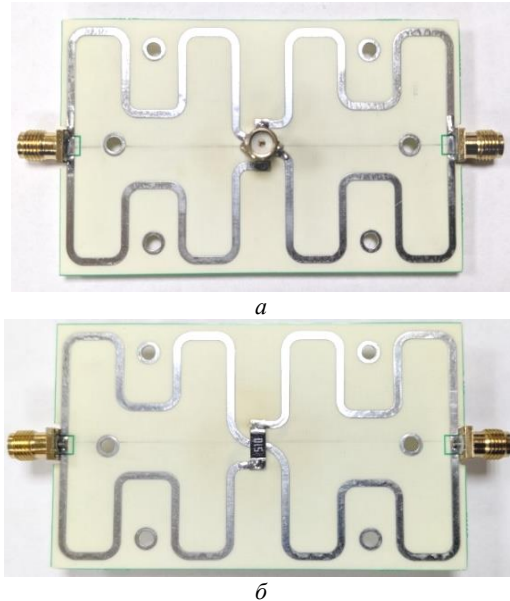


Рис. 6. Топология сумматора: а – верхняя сторона, б – нижняя сторона

Представленный на рис. 6 сумматор изготовлен на ламинате марки WL-CT338 толщиной 0,508 мм. Ширина линий равна 1,5 мм, что обеспечивает волновое сопротивление линий передачи, близкое к 50 Ом.

Нижняя рабочая частота в рассматриваемом сумматоре определяется значением индуктивности между входом и выходом линий передачи $W1$ и $W3$ при их синфазном возбуждении, поскольку эта индуктивность оказывается приведенной ко входному порту в виде шунта. Поскольку в полосковой реализации сумматора не используются ферромагнетики, единственным способом управления синфазной индуктивностью линий является изменение их длины. В представленной на рис. 6 топологии длина линий составляет 102 мм, что обеспечивает диапазон частот от 30 МГц [16].

Генератор пар импульсов противоположной полярности в целом

Конструкция генератора пар импульсов противоположной полярности в сборе приведена на рис. 7.

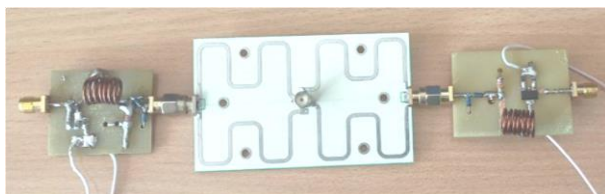


Рис. 7. Внешний вид генератора пар импульсов противоположной полярности

Форма импульсов на выходе генератора пар импульсов приведена на рис. 8. Амплитуда импульсов составляет 30 В (положительный импульс) и 31 В (отрицательный импульс). Снижение амплитуды импульса по отношению к выходному сигналу отдельных формирователей обусловлено тем, что формирователи теперь нагружены на сопротивление 25 Ом вместо 50 Ом. Это снижение напряжения может быть скомпенсировано увеличением тока накачки индуктивности $L1$ в формирователях.

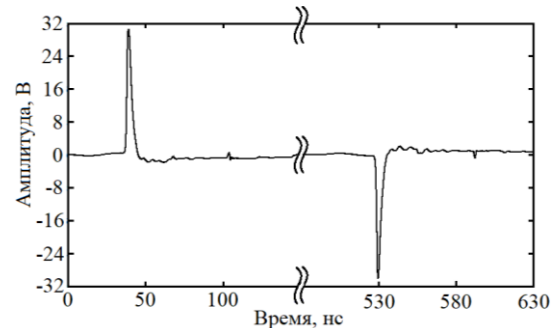


Рис. 8. Сигнал на выходе сумматора импульсов

Длительность фронта импульсов на выходе сумматора не отличается от длительности фронта импульсов отдельных формирователей и составляет 0,6 нс. Это говорит о том, что верхняя граница частотного диапазона сумматора вполне достаточна для наших целей.

Длительность спада импульсов на выходе генератора составляет 4,5 нс, что несколько меньше, чем длительность спада импульсов на выходах формирователей (8 нс). Это сокращение длительности спада обусловлено синфазной индуктивностью линий, которая определяется их длиной. Генератор используется далее для задач нелинейного зондирования объектов, и указанное соотношение длительностей фронта и спада вполне приемлемо: спад не имеет существенного зондирующего действия по сравнению с фронтом.

Заключение

Рассмотренный в работе способ генерации импульсов противоположной полярности позволил получить на выходе формирователя пиковую мощность порядка 18 Вт. В сравнении с предыдущей работой, посвящённой увеличению мощности двухтактных формирователей на ДНЗ [5], выходная мощность возросла в 5,3 раза. Длительность фронта составляет 0,6 нс с возможностью уменьшения данного показателя за счет замены выходного диода BAT41 на диод с лучшим быстродействием.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2021-0015).

Литература

1. EDD-24T, handheld non-linear junction detector. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.jndigital.com/assets/files/Products/datasheets/EDD-24T%20Datasheet.pdf>, свободный (дата обращения: 23.03.2023).

2. A transponder for harmonic radar tracking of the black vine weevil in behavioral research / R.D. Brazee, E.S. Miller, M.E. Reding, M.G. Klein, B. Nudd, H. Zhu // *Trans. of the American Society of Agricultural Engineers*. – 2005. – Vol. 48, No. 2. – P. 831–838.

3. Near-field scanner for the detection of passive intermodulation sources in base station antennas / S. Hienonen, V. Golikov, P. Vainikainen, A.V. Räsänen // *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*. – 2004. – Vol. 46, No. 4. – P. 661–667.

4. Modeling and Experimental Study of the Nonlinear Baseband Pulse Radar Prototype / E.V. Semyonov, A.V. Fateev, M.A. Nazarov, A.A. Berezin // *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves: proc. of Int. IEEE Conf. – Divnomorskoe, Russia, 2023*. – 4 p.

5. Увеличение выходной мощности двухтактных обострителей импульсов на диодах с накоплением заряда / Э.В. Семёнов, В.С. Поздняков, К.М. Полторыхин, А.А. Берёзин // *Доклады ТУСУР*. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 7–12.

6. Березин А.А. Двухтактный обостритель импульсов на диодах с накоплением заряда // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо – 2022): матер. 32-й Междунар. Крым. конф.; под ред. Ю.Б. Гимпилевича, П.П. Ермолова*. – Севастополь: СевГУ, 2022. – С. 247–248.

7. Пикосекундная импульсная техника / В.Н. Ильюшенко, Б.И. Авдоченко, В.Ю. Баранов, В.С. Липин, В.П. Чурек. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 368 с.

8. Мегаваттный генератор наносекундных импульсов на основе карбидокремниевых дрейфовых диодов с режимом восстановления / А.В. Афанасьев, Ю.А. Демин, Б.В. Иванов, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, К.А. Сергушичев, А.А. Смирнов, А.Ф. Кардо-Сысоев // *Изв. высш. учеб. заведений России. Радиоэлектроника*. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 21–24.

9. Лондон С.Е., Томашевич С.В. Справочник по высокочастотным трансформаторным устройствам. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.

10. Проектирование радиопередающих устройств: учеб. пособие для вузов / В.В. Шахгильдян, В.А. Власов, В.Б. Козырев и др.; под ред. В.В. Шахгильдяна. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993. – 512 с.

11. Генераторы высоких и сверхвысоких частот: учеб. пособие / О.В. Алексеев, А.А. Головкин, А.В. Митрофанов и др. – М.: Высшая школа, 2003. – 326 с.

12. Устройства сложения и распределения мощностей высокочастотных колебаний / В.В. Заенцев, В.М. Катюшкина, С.Е. Лондон, З.И. Модель; под ред. З.И. Моделя. – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с.

13. Широкополосный синфазный сумматор мощности ВЧ-колебаний / В.Т. Аралов, Е.А. Гусева, Е.В. Орлов, А.С. Строев, Н.А. Трухин // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. – 2023. – Т. 4, № 1. – С. 23–25.

14. Naeimi T. Design and analysis of a broadband 4-way high power combiner in the VHF/UHF band / T. Naeimi, A. Ahmadi // *IET Science, Measurement & Technology*. – 2018. – Vol. 12, No. 2. – P. 255–261.

15. Миниатюрные устройства УВЧ- и ОВЧ-диапазонов на отрезках линий / Э.В. Зелях, А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.С. Брилон. – М.: Радио и связь, 1989. – 112 с.

16. Pozdnyakov V.S. Broadband Signals Combiner on Suspended Striplines / V.S. Pozdnyakov, E.V. Semyonov // *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2023): proc. of XVI IEEE International Scientific-Technical Conference*. – Novosibirsk: NSTU, 2023. – P. 660–663.

Шевченко Глеб Михайлович

Канд. техн. наук, м.н.с. Института сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН
Академический пр-т, 2/3, г. Томск, Россия, 634055
Тел.: +7 (382-2) 49-15-44
Эл. почта: gleb.m.shevchenko@tusur.ru

Поздняков Владислав Сергеевич

Мл. науч. сотрудник ИСЭ СО РАН
Академический пр-т, 2/3, г. Томск, Россия, 634055
ORCID: 0000-0003-1775-4987
Тел.: +7 (382-2) 49-15-44
Эл. почта: 25pozdneyakov.v.s@gmail.com

Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, с.н.с. ИСЭ СО РАН
Академический пр-т, 2/3, г. Томск, Россия, 634055
ORCID: 0000-0001-5470-1185
Тел.: +7 (382-2) 49-15-44
Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Березин Андрей Александрович

Мл. науч. сотрудник ИСЭ СО РАН
Академический пр-т, 2/3, г. Томск, Россия, 634055
ORCID: 0000-0002-8589-0289
Тел.: +7 (382-2) 49-15-44
Эл. почта: andrei0433@mail.ru

Shevchenko G.M., Pozdnyakov V.S.,
Semyonov E.V., Berezin A.A.

Opposite polarity pulse pair generator with increased power using adder on suspended striplines

A pulse pair generator with a subnanosecond front is considered, in which pulses of opposite polarity are created by separate generators, and then supplied to the bridge combiner of the original design (on suspended striplines). For the first time in devices of this type, an output power of 18 watts was achieved. A distinctive feature of this structure is that a half of the power of the generators is dissipated on the ballast resistor (due to the alternating appearance of pulses at the inputs of the combiner). To partially compensate for this effect, a half-standard (25 ohms) input resistance of the adder is selected. In the current circuit of generators it leads to an increase in power takeoff from them. The generators themselves are made on step recovery diodes (SRD) according to a scheme close to the traditional one, but differ by a diode circuit at the output, which eliminates penetration of parasitic lobes of a pulse of opposite polarity to the output and protects the SRD from the action of the pulse of the neighboring generator. The shaper is used in experiments to study nonlinear scattering.

Keywords: step recovery diodes, matched and isolated combiner, nonlinear radar.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-1-7-12

References

1. EDD-24T, handheld non-linear junction detector. Datasheet [Online]. Available at: <https://www.jjndigital.com/assets/files/Products/datasheets/EDD-24T%20Datasheet.pdf>, free (Accessed: March 23, 2023).

2. Brazee R.D., Miller E.S., Reding M.E., Klein M.G., Nudd B. and Zhu H. A transponder for harmonic radar tracking of the black vine weevil in behavioral research. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2005, vol. 48, pp. 831–838.

3. Hienonen S., Golikov V., Vainikainen P. and Räisänen A.V. Near-field scanner for the detection of passive intermodulation sources in base station antennas. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, vol. 46, pp. 661–667.

4. 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 International IEEE Conference. Divnomorskoe, Russia, 2023, 4 p.

5. Semenov E.V., Pozdnyakov V.S., Poltorykhin K.M., Berezin A.A. Increasing the output power of push-pull pulse sharpeners on diodes with charge storage. *Proceedings of TUSUR University*, 2023, vol. 26, no. 3, pp. 7–13 (in Russ.).

6. Berezin A.A. Dvuhstaktnyj obostritel' impul'sov na diodah s nakopleniem zarjada [Two-Stroke Step Recovery Diode Pulse Sharpener]. SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii (CriMiCo 2022). Materialy 32 Mezhdunarod. konf. [Microwave & Telecommunication Technology. Proceedings of 32 International Conference]. Sevastopol, SevSU, 2022, pp. 247–248 (in Russ.).

7. Ilyushenko V.N., Avdochenko B.I., Baranov V.Yu., Lipin V.S., Churekov V.P. Pikosekundnaya impul'snaya tekhnika [Picosecond pulse technology]. Moscow, Energoatomizdat, 1993, 368 p. (in Russ)

8. Afanasiev A.V., Demin J.A., Ivanov B.V., Ilin V.A., Luchinin V.V., Serguibchev K.A., Smirnov A.A., Kardosysoev A.F. Megawatt generator of nanosecond impulses on the basis of carbide-silicon drift diodes with sharp restoration. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radioelektronika*. 2015, vol. 1, no. 3, pp. 21–24 (in Russ.).

9. London S.E., Tomashevich S.V. *Spravochnik po vysokochastotnym transformatornym ustrojstvam* [Handbook of high-frequency transformer devices]. Moscow, Radio i svyaz', 1984, 216 p. (in Russ.).

10. Shakhgildyan V.V., Vlasov V.A., Kozyrev V.B. et al. *Proektirovanie radioperedayushchih ustrojstv* [Design of radio transmitting devices]. M., Radio i svyaz', 1993, 512 p. (in Russ.).

11. Alekseev O.V., Golovkov A.A., Mitrofanov A.V. et al. *Generatory vysokih i sverhvysokih chastot* [Generators of high and ultra-high frequencies]. Moscow, Vysshaya shkola, 2003, 326 p. (in Russ.).

12. Zaentsev V.V., Katushkina V.M., London S.E., Model' Z.I. *Ustrojstva slozheniya i raspredeleniya moshchnostej vysokochastotnykh kolebanij* [Devices for addition and distribution of power of high-frequency oscillations]. Moscow, Soviet radio, 1980, 296 p. (in Russ.).

13. Aralov V.T., Orlov E.V., Stroev A.S., Trukhin N.A. *Shirokopolosnyj sinfaznyj summator moshchnosti VCH kolebanij* [Broadband common-mode RF power combiner], *Sistemy sinhrnizatsii i obrabotki signalov* [Synchroni-

zation, signal generation and processing systems], 2013, vol. 4, no. 1, pp. 23–25 (in Russ.).

14. Naeimi T., Ahmadi A. Design and analysis of a broadband 4-way high power combiner in the VHF/UHF band. *IET Science, Measurement & Technology*, 2018, vol. 12., no. 2., pp. 255–261.

15. Zelyah E.V., Fel'dshtejn A.L., YAvich L.R., Brilon V.S. *Miniatyurnye ustrojstva UVCH i OVCH diapazonov na otrezkah linij* [Miniature UHF and VHF devices on line segments]. Moscow, Radio i svyaz', 1989, 112 p. (in Russ.).

16. Pozdnyakov V.S., Semyonov E.V. Broadband Signals Combiner on Suspended Striplines. *IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, Russian Federation, Novosibirsk, 2023, pp. 660–663.

Gleb M. Shevchenko

Junior Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 2/3, Akademicheskyy pr., Tomsk, Russia, 634055
ORCID: 0000-0002-1752-3671
Phone: +7 (382-2) 49-15-44
Email: gleb.m.shevchenko@tusur.ru

Vladislav S. Pozdnyakov

Junior Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 2/3, Akademicheskyy pr., Tomsk, Russia, 634055
ORCID: 0000-0003-1775-4987
Phone: +7 (382-2) 49-15-44
Email: 25pozdnyakov.v.s@gmail.com

Edward V. Semyonov

Doctor of Science in Engineering, Senior Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 2/3, Akademicheskyy pr., Tomsk, Russia, 634055
ORCID: 0000-0001-5470-1185
Phone: +7 (382-2) 49-15-44
Email: edwardsemyonov@narod.ru

Andrey A. Berezin

Junior Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 2/3, Akademicheskyy pr., Tomsk, Russia, 634055
ORCID: 0000-0002-8589-0289
Phone: +7 (382-2) 49-15-44
Email: andrei0433@mail.ru