

Формирование сверхкоротких импульсов с помощью сумматора конструкции Уилкинсона

А.М. Бобрешов , А.Е. Елфимов, В.А. Степкин, Г.К. Усков 

Воронежский государственный университет
394018, Россия, г. Воронеж,
Университетская пл., 1

Аннотация – В работе исследована возможность увеличения амплитуды сверхкоротких импульсов и формирования моноцикла Гаусса путем сложения сигналов с нескольких генераторов. Для этого были использованы кольцевые сумматоры конструкции Уилкинсона, конструкция которых была выбрана из-за низких потерь и высокой развязки входов. Было произведено моделирование S-параметров сумматоров с разными геометрическими параметрами в полосе частот до 5 ГГц. Полученные результаты совпали с экспериментально измеренными характеристиками. С помощью сумматоров путем сложения сверхкоротких импульсов одинаковой и различной полярностей была увеличена амплитуда монополярного импульса и сформирован импульс биполярной формы. Данный подход характеризуется возможностью подстройки параметров выходного сигнала путем подбора задержек запускающих сигналов.

Ключевые слова – СШП-сигналы; сверхкороткие импульсы; СВЧ; сложение импульсов; колокольный импульс; биполярный импульс; моноцикл Гаусса; делитель Уилкинсона.

Введение

Одной из перспективных областей радиолокации является использование сверхкоротких импульсов (СКИ) в форме колокола Гаусса, моноцикла Гаусса и дублета Гаусса. Подобные сигналы имеют высокую разрешающую способность. Однако при их формировании возникают проблемы, связанные с одновременным обеспечением малой длительности и высокой амплитуды. Если для формирования колокольных СКИ используются известные решения на основе сверхбыстрых переключателей, например диодов с накоплением заряда (ДНЗ) [2; 10; 13], то для формирования моноциклов и дублетов в большинстве случаев применяется пассивная фильтрация колокольных импульсов. Такой метод искажает спектр и форму сигнала, что снижает в целом КПД генератора за счет фильтрации низкочастотных составляющих.

Одним из способов формирования сверхкоротких моноимпульсов гауссовской формы большой амплитуды является суммирование импульсов с выходов нескольких генераторов [3]. В настоящей работе для формирования двуполярных СКИ предлагается использовать колокольные импульсы с управляемой временной задержкой. Такая система, состоящая из нескольких генераторов и сумматора, является достаточной гибкой в настройке и позволяет регулировать форму с минимальными энергетическими потерями. Однако такой подход требует реализации с учетом частотного диапазо-

на СКИ. При прямом подключении нескольких генераторов СКИ [2] к общей нагрузке имеет место их влияние на работу друг друга [3], что приводит к искажению импульса. Поэтому важно обеспечить развязку между выходами всех генераторов моноимпульсов для уменьшения их влияния друг на друга.

Для сложения импульсов в работе рассматривается сумматор конструкции Уилкинсона, который в последнее время достаточно часто используется для сложения СШП-сигналов [4–6]. Однако в приведенных публикациях не исследуется вопрос суммирования сверхкоротких импульсов гауссовской формы.

В работе представлен сумматор на основе кольцевой конструкции Уилкинсона для сверхширокополосных сигналов. Экспериментально удалось добиться увеличения амплитуды формируемого импульса при помощи суммирования выходных сигналов с нескольких генераторов [2]. Также был сформирован моноцикл, состоящий из двух колокольных сигналов.

Модель сумматора Уилкинсона

Схематичный внешний вид кольцевого сумматора представлен на рис. 1. Он обладает двумя входами, обозначенных <2> и <3>, и одним выходом – <1>. Для развязки между входами устройства используется балластный резистор R . Также ширину полосы работы сумматора задают длины и ширина микрополосков кольца.

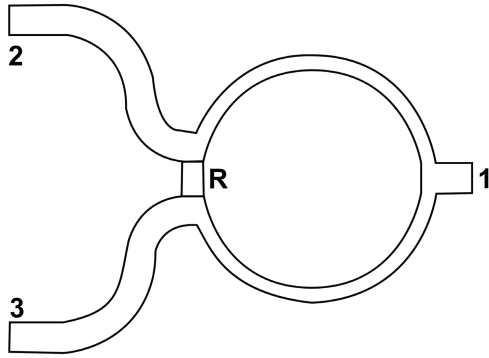


Рис. 1. Кольцевой сумматор
 Fig. 1. Ring adder

Аналитическую модель такого устройства можно представить через нормированную матрицу четырехполюсника [12]:

$$[A]^{++} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}\cos\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) & j\sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right)/\sqrt{2}Y_1 \\ j\sqrt{2}Y_1\sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) & \sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right)/\sqrt{2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$[A]^{+-} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{Y_3}}\cos\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) & \frac{j\sqrt{Y_3}}{Y_1}\sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) \\ \frac{Y_2}{\sqrt{Y_3}}\cos\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) + \sqrt{Y_3}\cos\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) + & \\ +j\frac{Y_1}{\sqrt{Y_3}}\sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) & +\frac{jY_2\sqrt{Y_3}}{Y_1}\sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) \end{bmatrix},$$

где $Y_1 = z_0/z_1$ – нормированная волновая проводимость отрезка однородной линии с длиной l ; $Y_1 = 2z_0/R_6$ – нормированная проводимость активной нагрузки, умноженная на два; Y_3 – нормированная проводимость короткого замыкания, для идеального случая предполагается, что этот параметр равен бесконечности; Λ – длина волны.

С помощью матриц, представленных выше, можно определить матрицы рассеяния на средней частоте f_0 рабочего диапазона. Эта частота, соответственно, определяется из соотношения $l = \Lambda_0/4$, где длина волны Λ_0 соответствует частоте f_0 .

Матрица рассеяния состоит из S -параметров, которая описывается выражением:

$$S_{33} = \frac{1-2Y_1^2}{1+2Y_1^2},$$

$$S_{11} = S_{22} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-2Y_1^2}{1+2Y_1^2} + \frac{1-Y_2}{1+Y_2} \right), \quad (2)$$

$$S_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-2Y_1^2}{1+2Y_1^2} - \frac{1-Y_2}{1+Y_2} \right).$$

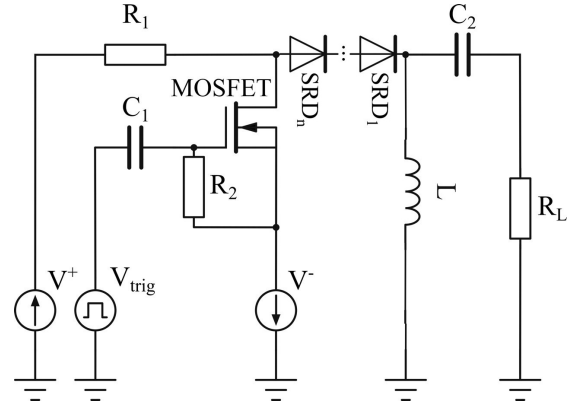


Рис. 2. Схема генератора импульсов с использованием диодов с накоплением заряда
 Fig. 2. Circuit of a pulse generator using diodes with charge storage

Исходя из полученных соотношений, можно сделать вывод, что идеальное согласование, то есть равенство параметров $S_{11} = S_{22} = S_{33} = 0$, и идеальную развязку между входными плечами сумматора $S_{12} = 0$ можно достигнуть, если:

$$Y_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad Y_2 = 1, \quad (3)$$

$$z_1 = z_0\sqrt{2}, \quad R_2 = 2z_0.$$

В таком случае матрица рассеяния для идеального делителя примет вид

$$[S] = -j \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Моделирование сложения импульсов

Для анализа схем суммирования была построена модель генератора, описанная в [13] и изображенная на рис. 2. При параллельном подключении двух генераторов к одной нагрузке было выяснено, что на выходе системы формируются импульсы колокольной формы, но при этом не наблюдается увеличения амплитуды, а длительность импульса растет почти вдвое.

Затем был рассчитан сумматор Уилкинсона, который показал хорошее совпадение с теоретическими формулами, описанными выше. Для расширения рабочей полосы сумматора была выполнена оптимизация его геометрических параметров. В качестве оптимизируемых параметров использовались радиус, ширина и длина микрополосков кольцевой части. Для оптимизации были заданы требуемые параметры для S_{12} в коридоре от -3 дБ

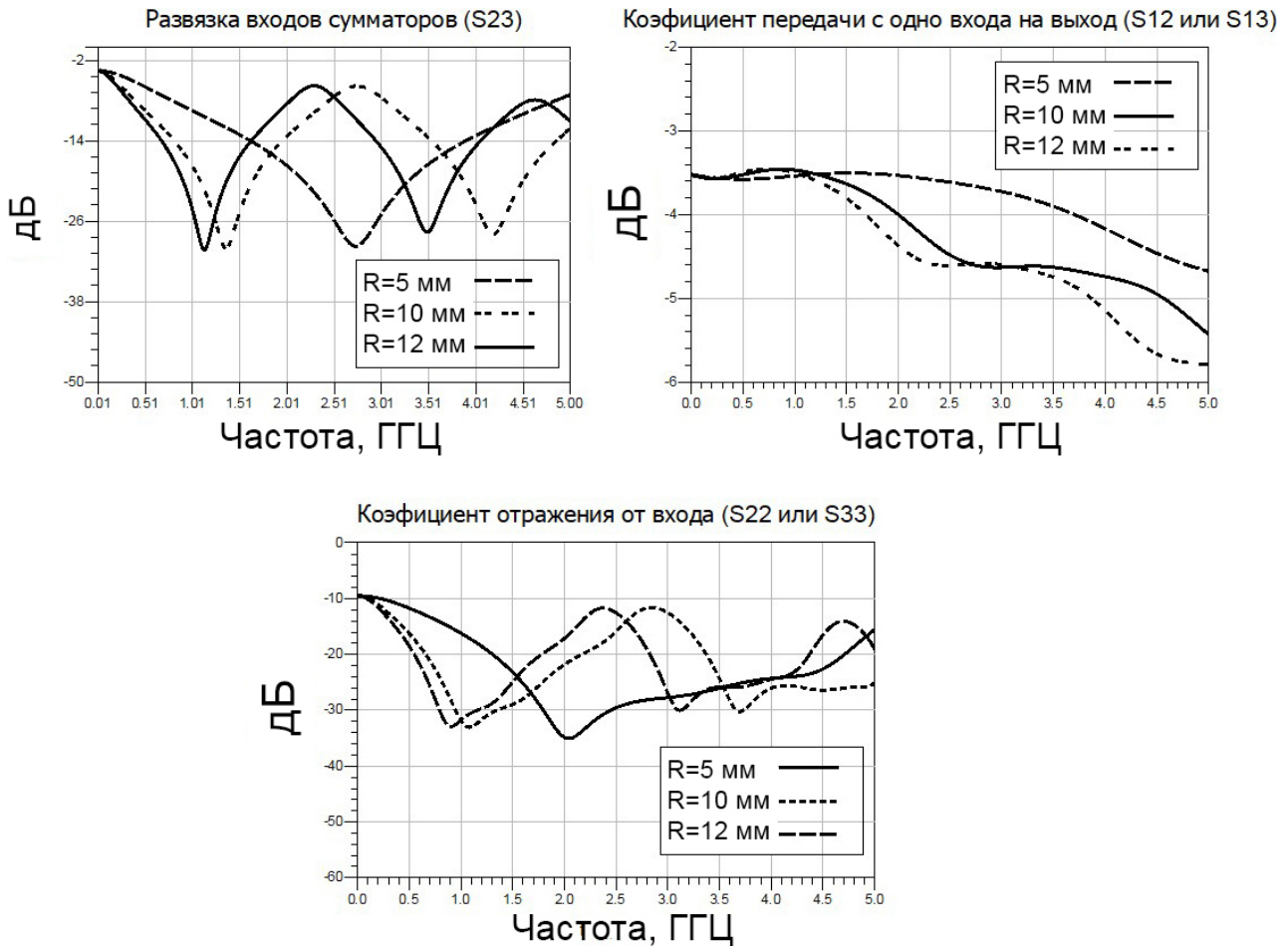


Рис. 3. S-параметры кольцевых сумматоров с радиусами 5, 10 и 12 мм
Fig. 3. S-parameters of ring adders with radii of 5, 10 and 12 mm

до -4 дБ, для S_{23} и S_{22} меньше -10 дБ – в полосе от 0,5 до 5 ГГц.

В модели были учтены реальные параметры диэлектрика FR4 ($\epsilon_r = 4,3$, $H = 0,8$ мм, тангенс угла потерь – 0,025) и получены следующие параметры микрополоска кольцевой части.

- Толщина полоска – 0,7 мм.
- Сопротивление балластного резистора – 100 Ом.
- Было выбрано три радиуса кольца, показавших удовлетворительные характеристики: 5, 10 и 12 мм.

Выбранные параметры хорошо соответствуют сигналам, полученным с генераторов, описанных и промоделированных согласно [13]. Характеристики, полученные во время моделирования сумматоров с различными радиусами колец, представлены на рис. 3.

Сложение импульсов без временного сдвига

Для подтверждения результатов моделирования было проведено экспериментальное исследование работы кольцевого сумматора. Печатная плата сумматора изготовлена из материала FR4

толщиной 0,8 мм. Измеренные S-параметры изготовленных сумматоров представлены на рис. 4. Их измерение производилось с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L N5230A.

Для суммирования импульсов входы сумматора подключались к выходам двух идентичных генераторов СКИ [13]. Напряжение на выходе сумматора регистрировалось стробоскопическим осциллографом DCA-X N86100D с входным сопротивлением 50 Ом и полосой пропускания 20 ГГц.

Сумматоры по схеме Уилконсона были реализованы на печатных платах (рис. 5), и с их помощью производилось сложение импульсов с двух генераторов. Длительности формируемых импульсов, измеренные на полувысоте, составляли 300 пс при амплитуде 31,3 В.

Значение амплитуды выходных импульсов для сумматоров:

- при радиусе 5 мм составила 37 В;
- при радиусе 10 мм – 36,4 В;
- при радиусе 12 мм – 33,5 В.

Увеличение амплитуды импульса менее чем в два раза объясняется наличием потерь в диэлек-

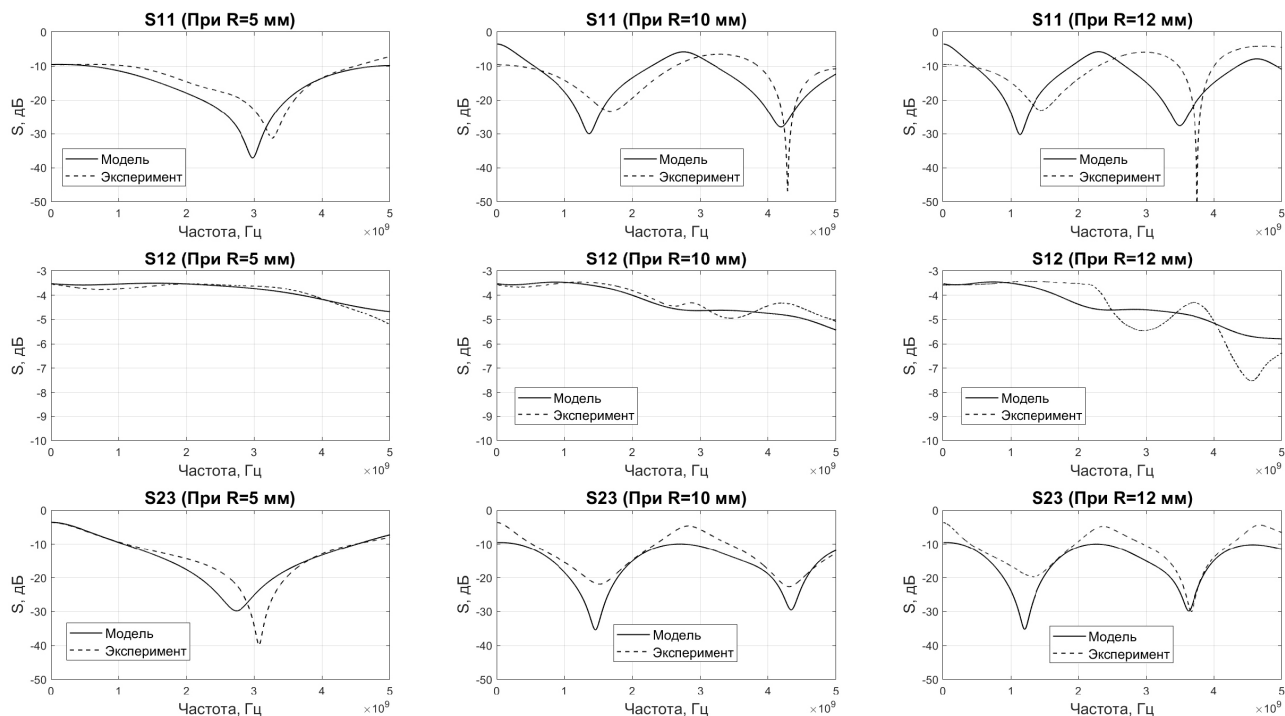


Рис. 4. Теоретически рассчитанные и измеренные S -параметры сумматоров
 Fig. 4. Theoretically calculated and measured S -parameters of adders

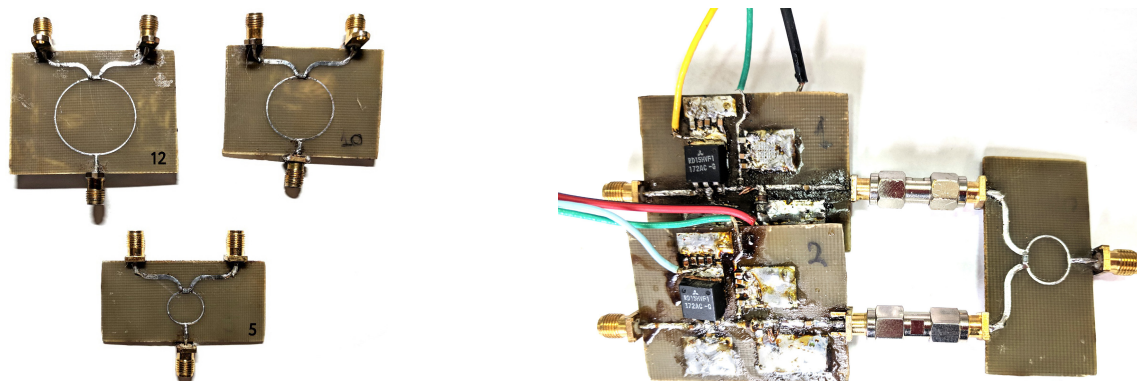


Рис. 5. Экспериментальные реализации сумматоров конструкции Уилкинсона на микрополосках
 Fig. 5. Experimental implementations of Wilkinson microstrip adders

трике платы. Как видно на рис. 4, параметры S_{12} для всех сумматоров ниже -3 дБ во всей полосе, а на частотах выше 3 ГГц характеристики ухудшаются.

Формирование биполярного импульса

Для формирования биполярного импульса использовались генераторы колокольных импульсов разной полярности. Отрицательный импульс подавался на вход сумматора с задержкой относительно положительного. Импульсы на выходах генераторов изображены на рис. 6, а. Их амплитуды также составляли 30 В при длительности 300 пс на полувысоте.

Сформированный биполярный импульс представлен на рис. 6, б. Размах импульса составил

33,1 В. Положительный выброс в конце импульса объясняется формой монополярных импульсов генераторов, в осциллограммах которых также имеются положительные выбросы. Данные выбросы складываются кольцевым сумматором, формируя искажения. Следует отметить, что, подбирая задержку между положительным и отрицательными импульсами, можно реализовать управление спектром генерируемого сигнала.

Заключение

В работе представлен кольцевой сумматор для сложения сверхширокополосных импульсных сигналов. Рабочая полоса частот сумматора по уровню -20 дБ находится в диапазоне от 0,5 до 5 ГГц. Экспериментально удалось выполнить сложение

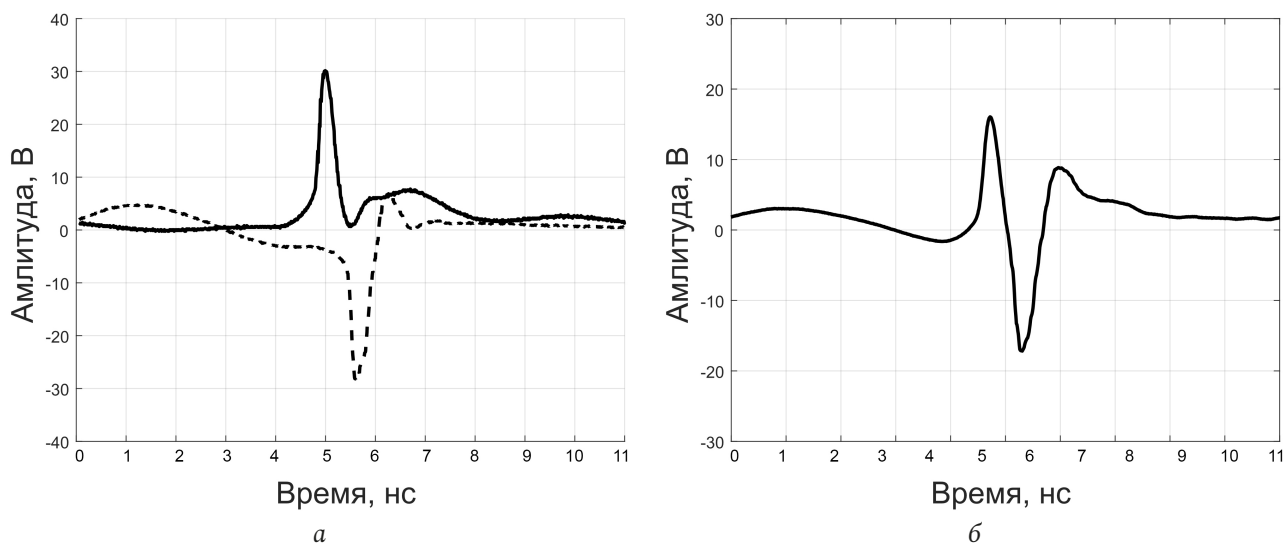


Рис. 6. Сформированные однополярные сверхкороткие импульсы (а) и биполярный импульс (б), полученный с помощью сумматора

Fig. 6. Formed unipolar ultrashort pulses (a) and bipolar pulse (b), obtained using an adder

двух импульсных сигналов субнаносекундной длительности. При этом амплитуда формируемого сигнала увеличилась в 1,23 раза, длительность и форма при этом остались без изменения. Кроме того, с использованием генераторов импульсов

разной полярности удалось сформировать биполярный импульс.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00323, <https://rscf.ru/project/21-19-00323/>.

Список литературы

1. Nguyen C., Miao M. Design of CMOS RFIC Ultra-Wideband Impulse Transmitters and Receivers. Cham: Springer International Publishing AG, 2017. 118 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53107-6>
2. Novel tunable ultrashort pulse generator with high amplitude and low ringing level / A.M. Bobreshov [et al.] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2017. Vol. 27, no. 11. P. 1013–1015. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2750085>
3. Protiva P., Mrkvice J., Machác J. High power monocycle pulse generator for through-the-wall radar transmitter // 2009 Asia Pacific Microwave Conference. 2009. P. 2324–2327. DOI: <https://doi.org/10.1109/APMC.2009.5385448>
4. Kasar Ö., Kahriman M. A theoretical design of ultra-wideband multisection Wilkinson power divider using Euler polynomials // Microwave Optical Technology Letter. 2020. Vol. 62, no. 12. P. 3869–3875. DOI: <https://doi.org/10.1002/mop.32589>
5. N-way compact ultra-wide band equal and unequal split tapered transmission lines wilkinson power divider / S. Saleh [et al.] // Jordanian Journal of Computers and Information Technology. 2020. Vol. 6, no. 3. P. 291–302. DOI: <https://doi.org/10.5455/jjcit.71-1590536342>
6. An optimization algorithm in ultrawideband bandpass Wilkinson power divider for controllable equal-ripple level / C. Bao [et al.] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2020. Vol. 30, no. 9. P. 861–864. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.3011516>
7. Yankelevich Y., Pokryvailo A. A compact former of high-power bipolar subnanosecond pulses // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. Vol. 33, no. 4. P. 1186–1191. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2005.852443>
8. Yin Q., Pan Z., Zhang Z. Design of a high-performance ultra-wideband monocycle pulse generator // Proceedings of the 2018 International Conference on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering (MECAE 2018). 2018. P. 158–164. DOI: <https://doi.org/10.2991/mecae-18.2018.34>
9. Lee D., Shaker G., Melek W. Development of a compact monocycle pulse generator for UWB impulse radar applications // Microwave Optical Technology Letter. 2020. Vol. 62, no. 10. P. 3119–3123. DOI: <https://doi.org/10.1002/mop.32424>
10. Vishwakarma M., HariKrishna A. High amplitude sharp pulse generation using step recovery diode for radar applications // 2019 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMARC). 2019. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMaRC45935.2019.9118740>
11. Two-stage design of high power UWB monocycle generator for radar sensor applied in the fourth industry revolution / Y. Ahajjamab [et al.] // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 46. P. 730–737. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.103>
12. Parad L.I., Moynihan R.L. Split-tee power divider // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1965. Vol. 13, no. 1. P. 91–95. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.1965.1125934>
13. Improvement of ultrashort pulses by serial connection of step recovery diodes / A.M. Bobreshov [et al.] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2021. Vol. 31, no. 2. P. 204–206. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.3046925>

References

1. Nguyen C., Miao M. Design of CMOS RFIC Ultra-Wideband Impulse Transmitters and Receivers. Cham: Springer International Publishing AG, 2017, 118 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53107-6>

2. Bobreshov A.M. et al. Novel tunable ultrashort pulse generator with high amplitude and low ringing level. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, vol. 27, no. 11, pp. 1013–1015. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2750085>
3. Protiva P., Mrkvice J., Machác J. High power monocycle pulse generator for through-the-wall radar transmitter. *2009 Asia Pacific Microwave Conference*, 2009, pp. 2324–2327. DOI: <https://doi.org/10.1109/APMC.2009.5385448>
4. Kasar Ö., Kahrman M. A theoretical design of ultra-wideband multisection Wilkinson power divider using Euler polynomials. *Microwave Optical Technology Letter*, 2020, vol. 62, no. 12, pp. 3869–3875. DOI: <https://doi.org/10.1002/mop.32589>
5. Saleh S. et al. N-way compact ultra-wide band equal and unequal split tapered transmission lines wilkinson power divider. *Jordanian Journal of Computers and Information Technology*, 2020, vol. 6, no. 3, pp. 291–302. DOI: <https://doi.org/10.5455/jjcit.71-1590536342>
6. Bao C. et al. An optimization algorithm in ultrawideband bandpass Wilkinson power divider for controllable equal-ripple level. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, vol. 30, no. 9, pp. 861–864. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.3011516>
7. Yankelevich Y., Pokryvailo A. A compact former of high-power bipolar subnanosecond pulses. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, vol. 33, no. 4, pp. 1186–1191. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2005.852443>
8. Yin Q., Pan Z., Zhang Z. Design of a high-performance ultra-wideband monocycle pulse generator. *Proceedings of the 2018 International Conference on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering (MECAE 2018)*, 2018, pp. 158–164. DOI: <https://doi.org/10.2991/mecae-18.2018.34>
9. Lee D., Shaker G., Melek W. Development of a compact monocycle pulse generator for UWB impulse radar applications. *Microwave Optical Technology Letter*, 2020, vol. 62, no. 10, pp. 3119–3123. DOI: <https://doi.org/10.1002/mop.32424>
10. Vishwakarma M., Harikrishna A. High amplitude sharp pulse generation using step recovery diode for radar applications. *2019 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMARC)*, 2019, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMaRC45935.2019.9118740>
11. Ahajjamab Y. et al. Two-stage design of high power UWB monocycle generator for radar sensor applied in the fourth industry revolution. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 46, pp. 730–737. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.103>
12. Parad L.I., Moynihan R.L. Split-tee power divider. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1965, vol. 13, no. 1, pp. 91–95. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.1965.1125934>
13. Bobreshov A.M. et al. Improvement of ultrashort pulses by serial connection of step recovery diodes. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2021, vol. 31, no. 2, pp. 204–206. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.3046925>



Physics of Wave Processes and Radio Systems

2021, vol. 24, no. 4, pp. 46–52

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.4.46-52

Received 16 November 2021
Accepted 17 December 2021

Generation of ultra-short pulses using the Wilkinson adder

Anatoly M. Bobreshov , Aleksey E. Elfimov, Vladislav A. Stepkin, Grigoriy K. Uskov 

Voronezh State University
1, Universitetskaya Square,
Voronezh, 394018, Russia

Abstract – In this work the possibility of increasing the amplitude of ultra-short pulses and formation of a monocycle Gaussian by adding signals from several oscillators was investigated. For this purpose, the ring adders of Wilkinson design were used. The design of which has been chosen due to low losses and high input decoupling. The S-parameters of the adders with different geometrical parameters have been simulated in the frequency band up to 5 GHz. The obtained results coincided with the experimentally measured characteristics. The monopulse amplitude was increased and a bipolar pulse shape was formed by adding ultrashort pulses of equal and different polarities using the adders. This approach allows you to adjust the parameters of the output signal by adjusting the delays of the triggering signals.

Keywords – UWP signals; ultra-short pulses; microwave; pulse addition; bell pulse; bipolar pulse; Gaussian monocycle; Wilkinson divider.

Информация об авторах

Бобрешов Анатолий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники, заведующий кафедрой электроники физического факультета Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: нелинейные явления во входных твердотельных приборах; автоматизированные измерительные системы научных исследований; хаотические системы связи, сверхширокополосные системы локации и связи.

E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5429-3780>

Information about the Authors

Anatoly M. Bobreshov, Doctor of Physics and Mathematics, professor of the Department of Electronics, head of the Department of Electronics of the Physics Faculty, Voronezh State University, Voronezh, Russia.

Research interests: nonlinear effects in input solid-state equipment, automated measuring systems for scientific research, chaotic communication systems, ultra-wide band radar and communication systems.

E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5429-3780>

Елфимов Алексей Евгеньевич, аспирант кафедры электроники физического факультета Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: генерация и суммирование сверхкоротких импульсов.

E-mail: elfimov_a@phys.vsu.ru

Степкин Владислав Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: нелинейные явления в усилительных каскадах, сверхширокополосные системы связи и радиолокации, цифровые системы связи, автоматизация радиофизического эксперимента.

E-mail: stepkin@phys.vsu.ru

Усков Григорий Константинович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: нелинейные явления в усилительных каскадах, генерация сверхкоротких импульсов, сверхширокополосные системы связи и радиолокации, антенны и антенные решетки для сверхширокополосных систем связи.

E-mail: uskov@phys.vsu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8250-2511>

Aleksey E. Elfimov, postgraduate student of the Department of Electronics of the Physics Faculty, Voronezh State University, Voronezh, Russia.

Research interests: generation and summation of ultrashort pulses.

E-mail: elfimov_a@phys.vsu.ru

Vladislav A. Stepkin, Candidate of Physics and Mathematics, associate professor of the Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia.

Research interests: nonlinear effects in amplifiers cascades, ultra-wide band communications and radar systems, digital communication systems, automation of radio experiments.

E-mail: stepkin@phys.vsu.ru

Grigoriy K. Uskov, Doctor of Physics and Mathematics, associate professor of the Department of Electronics, Voronezh State University, Voronezh, Russia.

Research interests: nonlinear effects in amplifiers cascade, ultra-short impulses generation, ultra-wide band communication systems and radars, antennas and antennas lattices for ultra-wide band communication systems.

E-mail: uskov@phys.vsu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8250-2511>

Неганов, В.А.

Современная теория и практические применения антенн: монография / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой; предисл. акад. Ю.В. Гуляева; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.

Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П.

ISBN 978-5-88070-222-0

УДК 621.396.67

ББК 32.845

Современная теория
и практические применения
антенн

Издательство «Радиотехника»
Москва, 2009

Рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, т. е. вопросам электромагнитной совместимости.

Принципиальное отличие книги от известных заключается в последовательном применении метода физической регуляризации (самосогласованного метода) к расчету электромагнитного поля антенн, позволяющего осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее. С помощью самосогласованного метода получены новые результаты по теории антенн: установлены связь между поверхностной плотностью тока на вибраторной антенне и напряженностью электромагнитного поля, однонаправленный режим излучения для кольцевой (рамочной антенны), режимы стоячих и бегущих волн в цилиндрической спиральной антенне, входное сопротивление практически для всех типов антенн. Теоретический материал подкреплен примерами применения многолучевых антенн.

Предназначено для разработчиков антенно-фидерных устройств, аспирантов и докторантов, занимающихся вопросами проектирования антенных систем различного назначения, студентов радиотехнических специальностей высших учебных заведений.