

УДК 004.33

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.31.4.019](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.019)

## Оптимизация значения постоянной времени интегрирующей цепи радиодетектора импульсного амплитудного детектора по критерию близости формы видеопульса к идеальной

**В.Е. Осипов**

*ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»,  
Омск, Российская Федерация*

**Резюме:** Целью статьи является поиск оптимальных значений постоянной времени интегрирующей цепи радиодетектора импульсного амплитудного детектора по критерию минимума расстояния между двумя сигналами: видеопульса на выходе детектора и видеопульса идеальной формы. Оптимумы найдены для трех форм радиопульсов: идеальной прямоугольной формы, неидеальной прямоугольной формы, гауссовской формы. Обращение к данной теме связано с тем, что в литературе не освещен вопрос расчета постоянной времени интегрирующей цепи радиодетектора тракта, работающего в режиме детектирования. Моделирование выполнено в среде Matlab версии R2017b с использованием библиотеки блоков Simulink. Оптимизация осуществлялась по методу золотого сечения. По критерию, рассматриваемому в настоящей статье, получены следующие оптимальные значения постоянной времени интегрирующей цепи: около 1,5 периодов несущей – для идеального прямоугольного радиопульса; около 2 периодов несущей – для неидеального прямоугольного радиопульса; около 0,3 длительности радиопульса – для гауссовского радиопульса. Значения постоянной времени, полученные по данному критерию, не отвечают общеизвестной формуле, из которой вытекает, что постоянная времени детектора должна быть много больше периода несущей и много меньше длительности радиопульса.

**Ключевые слова:** радиодетектор, амплитудный импульсный детектор, постоянная времени, форма видеопульса, оптимизация

**Для цитирования:** Осипов В.Е. Оптимизация значения постоянной времени интегрирующей цепи радиодетектора импульсного амплитудного детектора по критерию близости формы видеопульса к идеальной. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=865> DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.019

## Optimization of the time constant value of the integrating circuit of a microwave photonic pulse amplitude detector according to the criterion of the proximity of the video pulse shape to the ideal one

**V.E. Osipov**

*FSBEI OF HE «Omsk State Technical University»,  
Omsk, Russian Federation*

**Abstract.** The aim of the article is to find the optimal values of the time constant of the integrating circuit of the microwave photonic pulse amplitude detector according to the criterion of the minimum distance between two signals: a video pulse at the detector output and an ideal video pulse. Optima were found for three forms of radio-frequency pulses: ideal square, non-ideal square, and Gaussian ones. The reference to this topic is due to the fact that the literature does not cover the issue of calculating the time constant value of the integrating circuit of the ultra-wideband radio-photonic path operating in the detection mode. The simulation was carried out in the R2017b version Matlab environment using the

Simulink block library. Optimization was carried out using the golden section method. According to the criterion considered in this article, the following optimal values of the time constant of the integrating circuit were obtained: about 1.5 periods of the carrier – for an ideal square radio-frequency pulse; about 2 carrier periods – for a non-ideal square radio-frequency pulse; about 0.3 radio-frequency pulse width – for a Gaussian one. The values of the time constant obtained according to this criterion do not correspond to the well-known formula, from which it follows that the time constant value of the detector should be much greater than the carrier period and much less than the radio-frequency pulse width.

**Keywords:** microwave photonics, amplitude pulse detector, time constant, video pulse shape, optimization

**For citation:** Osipov V.E. Optimization of the time constant value of the integrating circuit of a microwave photonic pulse amplitude detector according to the criterion of the proximity of the video pulse shape to the ideal one. *Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=865> DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.019 (In Russ).

## Введение

В работах [1, 2] было предложено в качестве амплитудного детектора использовать радиотонный тракт, одним из элементов которого является интегрирующая цепь, стоящая на выходе фотодетектора.

Возникает вопрос о конкретизации значения постоянной времени интегрирующей цепи. Известно [3, с. 245], что постоянная времени  $RC$  выбирается с учетом следующего неравенства:

$$\frac{2\pi}{\omega_0} \ll RC \ll \frac{2\pi}{\Omega}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$ ,  $\Omega$  – угловые частоты несущего и модулирующего колебаний соответственно.

Формула (1) задает довольно широкий диапазон значений. Для технической реализации устройства требуется знание конкретного значения постоянной времени. При этом имеет смысл ориентироваться на некое оптимальное значение, а не произвольное.

Можно назвать ряд критериев, по которым возможна оптимизация постоянной времени. В настоящей работе осуществляется поиск оптимальных значений постоянной времени по критерию близости форм видеоимпульса на выходе интегрирующей цепи и идеального видеоимпульса (а точнее – по критерию минимума расстояния между этими сигналами) для различных форм радиоимпульсов.

## Материалы и методы

**Параметры радиоимпульсов.** Детектор, рассматриваемый в настоящей работе, предназначен для работы в составе станции предупреждения о радиолокационном облучении. С учетом того, что несущие частоты зондирующих сигналов радиолокации находятся в пределах от  $3 \cdot 10^8$  Гц до  $3 \cdot 10^{12}$  Гц [4, с. 30], была выбрана частота несущей равная 1 ГГц.

Так же известно, что «для получения большой мощности в импульсе необходимо, чтобы в установившемся режиме было совершено не менее 300 ÷ 400 колебаний» [5, с. 55], поэтому длительность радиоимпульса принята равной пятистам колебаниям несущей или 500 нс.

В настоящей работе рассматриваются три формы огибающей радиоимпульса:

- 1) идеальная прямоугольная;
- 2) неидеальная прямоугольная;

3) гауссовская.

В качестве исходной модели *идеального прямоугольного радиоимпульса* были приняты следующие формулы [4, с. 31–32]:

$$x(t) = X(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$X(t) = \begin{cases} X_0, & |t| \leq \tau_n/2 \\ 0, & |t| > \tau_n/2 \end{cases},$$

где  $\tau_n$  – длительность радиоимпульса.

При моделировании в данные формулы внесены следующие поправки и уточнения:

- амплитуда идеального прямоугольного радиоимпульса, поступающего на вход детектора, принята равной 100 мВ;
- несущая подчиняется закону синуса с нулевой начальной фазой;
- начало и конец радиоимпульса находятся в точках 1 мкс и 1,5 мкс модельного времени соответственно.

*Неидеальная прямоугольная форма радиоимпульса* была принята к рассмотрению с учетом того, что в контурах генератора амплитуда модулированного сигнала не становится сразу максимальной, а увеличивается по нарастающей в течение 50...70 периодов несущей (фронт импульса), и столько же периодов требуется для затухания радиоимпульса на его срезе [5, с. 55]. На Рисунке 1 показана экранная форма подсистемы формирования амплитудного множителя для неидеального прямоугольного радиоимпульса. На вход подсистемы поступает идеальный прямоугольный видеоимпульс, а на выход поступает неидеальный прямоугольный видеоимпульс, фронт и срез которого изменяются по экспоненциальному закону. На Рисунке 2 и Рисунке 3 показаны соответственно фронт и срез полученного неидеального прямоугольного радиоимпульса.

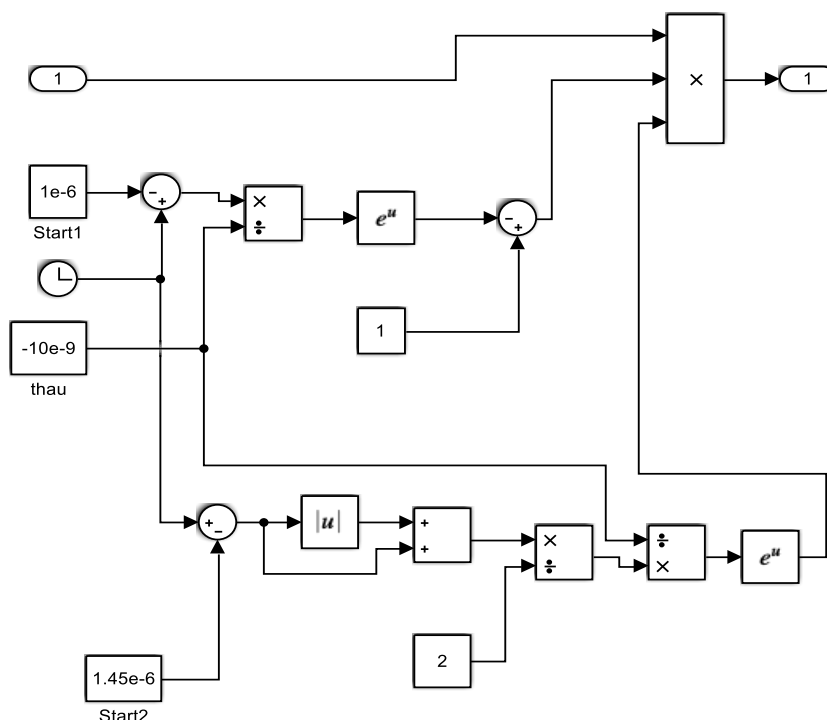


Рисунок 1 – Подсистема формирования амплитудного множителя в неидеальном прямоугольном радиоимпульсе

Figure 1 – Subsystem for the formation of the amplitude factor in a nonideal square RF-pulse

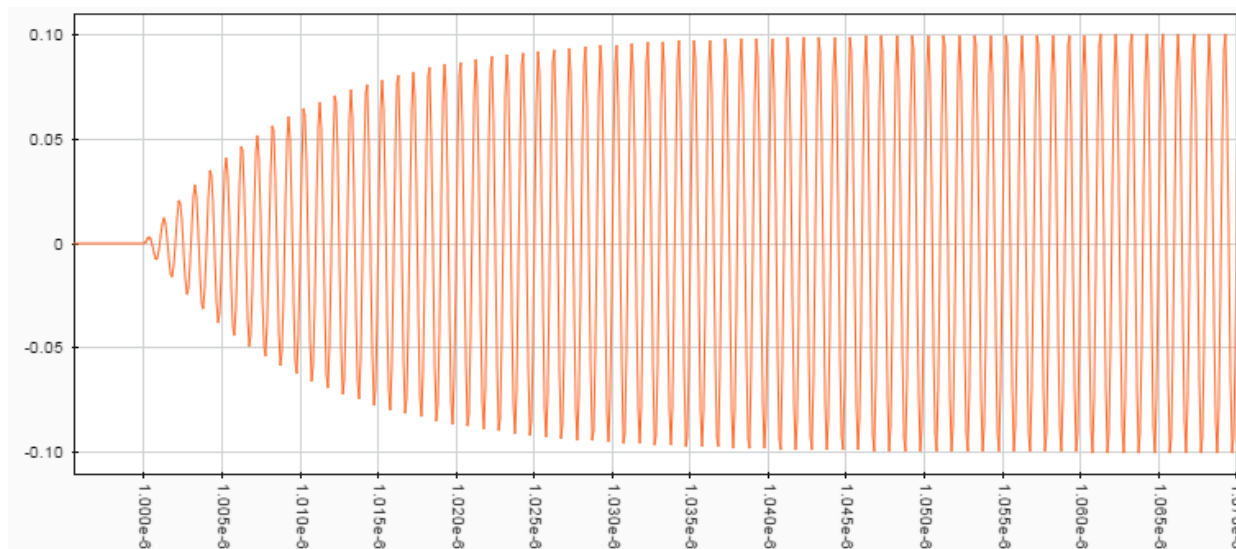


Рисунок 2 – Фронт неидеального прямоугольного радиоимпульса  
 Figure 2 – Leading edge of nonideal square RF-pulse

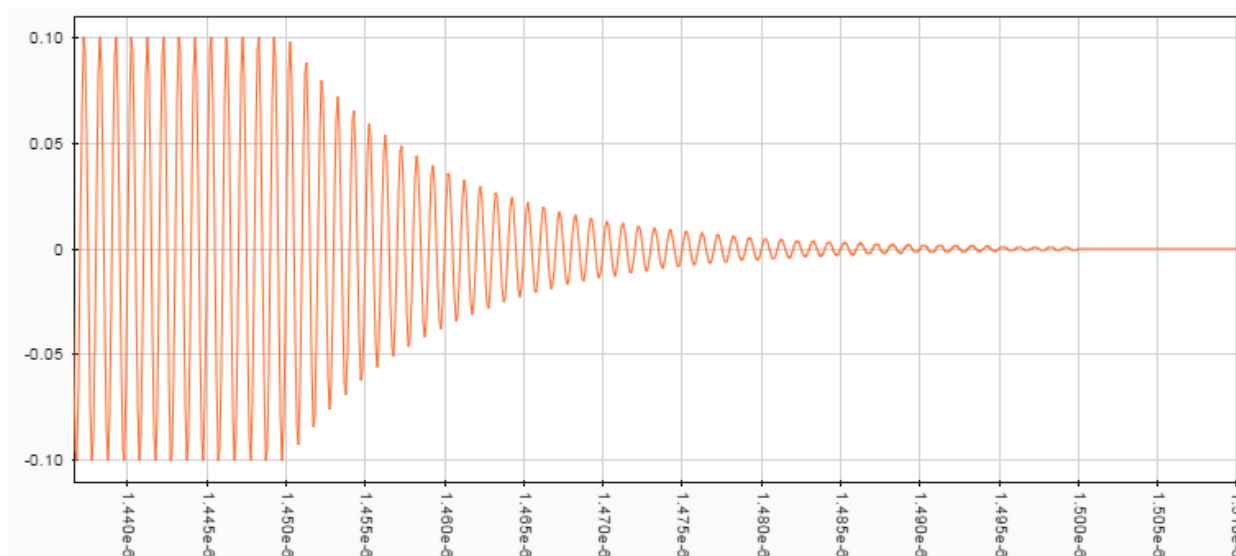


Рисунок 3 – Срез неидеального прямоугольного радиоимпульса  
 Figure 3 – Trailing edge of nonideal square RF-pulse

В качестве исходной формулы для модели *гауссовского радиоимпульса* принята следующая формула [4, с. 31–32]:

$$x(t) = X(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$X(t) = X_0 e^{-\pi \left(\frac{t}{\tau_n}\right)^2},$$

которая была принята со следующими поправками и уточнениями:

- несущая будет синусоидой с нулевой начальной фазой и амплитудой 100 мВ;

- дополнительный амплитудный множитель уводит центр импульса в точку 1,25 мкс модельного времени (Рисунок 4).

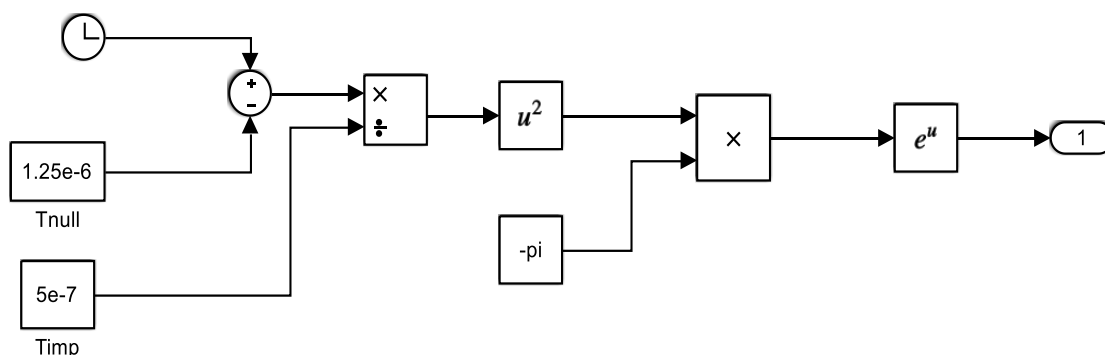


Рисунок 4 – Дополнительный амплитудный множитель при формировании гауссовского видеоимпульса

Figure 4 – Additional amplitude factor in the formation of a Gaussian video pulse

В качестве **целевой функции** для идеального прямоугольного и неидеального прямоугольного радиоимпульсов выбран квадрат расстояния между двумя сигналами [6, с. 27]:

$$\rho^2 = \int_{t1}^{t2} (u - v)^2 dt, \quad (2)$$

где  $\rho$  – метрика или расстояние между сигналами;

$u=u(t)$ ,  $v=v(t)$  – сравниваемые сигналы (соответственно сигнал в выхода детектора и идеальный видеоимпульс);

$t1=0,5$  мкс,  $t2=2,99$  мкс – пределы интегрирования.

**Исходный диапазон поиска оптимального значения  $\tau=RC$ .** Поиск минимума целевой функции осуществляем на отрезке  $[a, b] = [0, 500]$  нс.

**Совмещение сигналов.** Сравнимые сигналы (видеоимпульс идеальной формы и видеоимпульс с выхода детектора) совмещались следующим образом.

В случае *идеального прямоугольного радиоимпульса* (Рисунок 5, Рисунок 6) и в случае *неидеального прямоугольного радиоимпульса* (Рисунок 7) совмещались начальные точки фронтов сравниваемых видеоимпульсов.

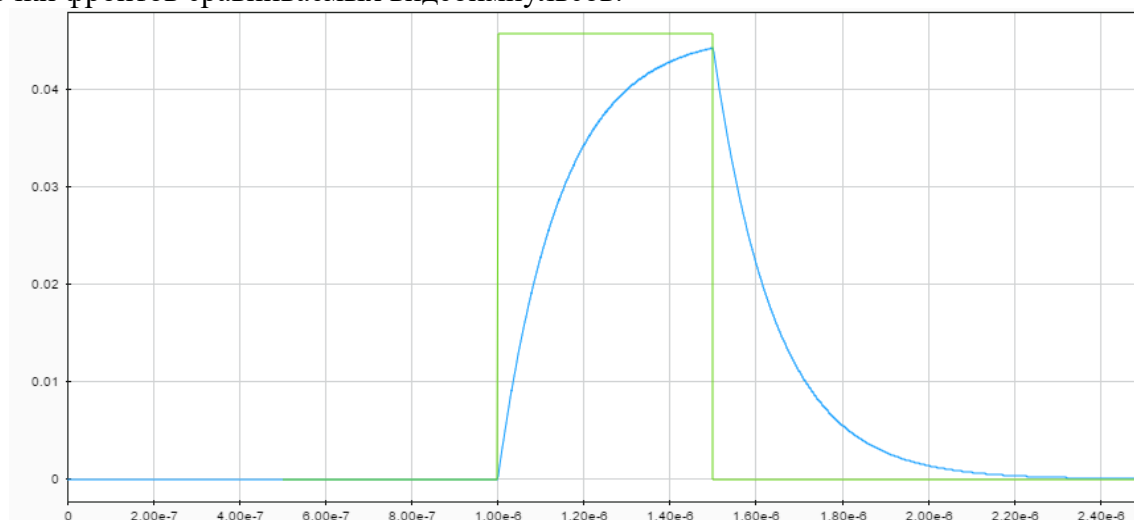


Рисунок 5 – Осциллограммы идеального прямоугольного видеоимпульса и видеоимпульса с выхода детектора при чрезмерно большой постоянной времени

Figure 5 – Oscillograms of an ideal square video pulse and video pulse from the detector output with an excessively long time constant

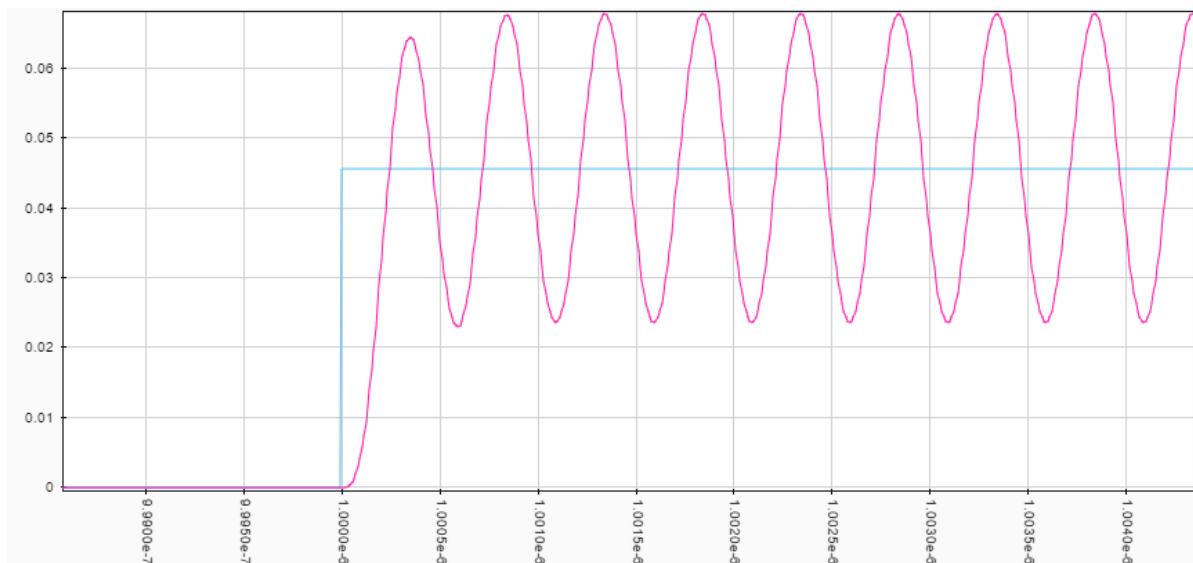


Рисунок 6 – Осциллограммы идеального прямоугольного видеоимпульса и видеоимпульса с выхода детектора при чрезмерно малой постоянной времени (фрагмент вблизи фронта)  
 Figure 6 – Oscillograms of an ideal square video pulse and a video pulse from the detector output with an extremely small time constant (fragment near the front edge)

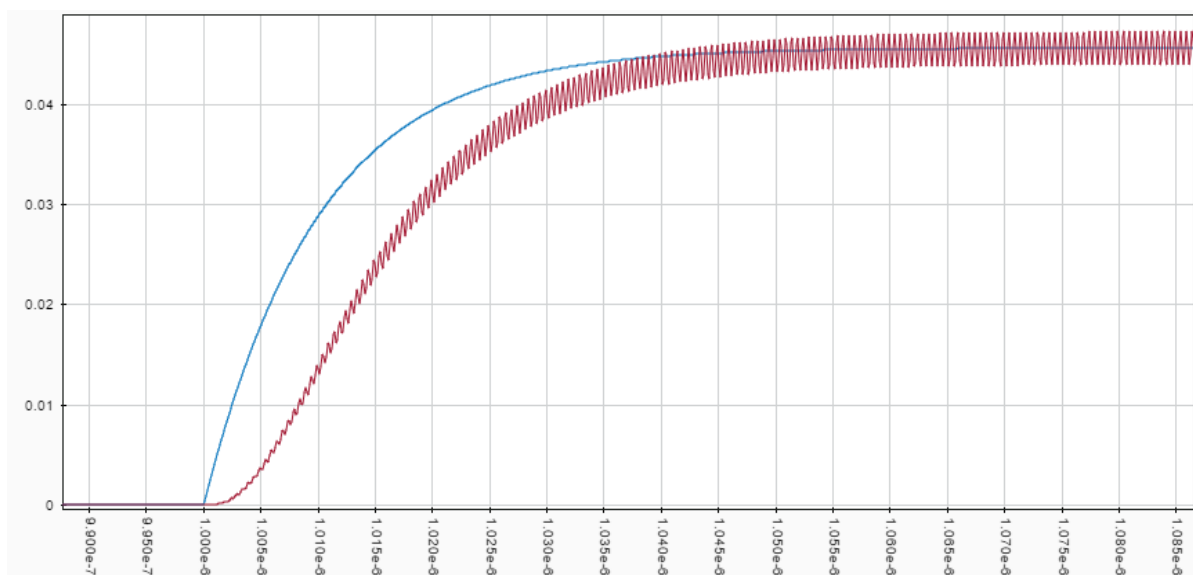


Рисунок 7 – Фронты сравниваемых видеоимпульсов при неидеальном прямоугольном радиоимпульсе

Figure 7 – The Leading edges of the compared video pulses with a non-ideal square RF-pulse

Очевидно, что при чрезмерно большом значении постоянной времени (Рисунок 5) сигнал с выхода детектора сильно отличается от идеального прямоугольного за счет завала фронта и среза, а при чрезмерно малом значении постоянной времени (Рисунок 6) сигнал с выхода детектора сильно отличается от идеального прямоугольного за счет больших пульсаций на вершине импульса.

Для случая *гауссовского радиоимпульса* завал фронта (с вытекающим смещением центра видеоимпульса) и различие по амплитуде видеоимпульсов дадут слишком

большое расстояние между сигналами даже при большом сходстве их формы (Рисунок 8).

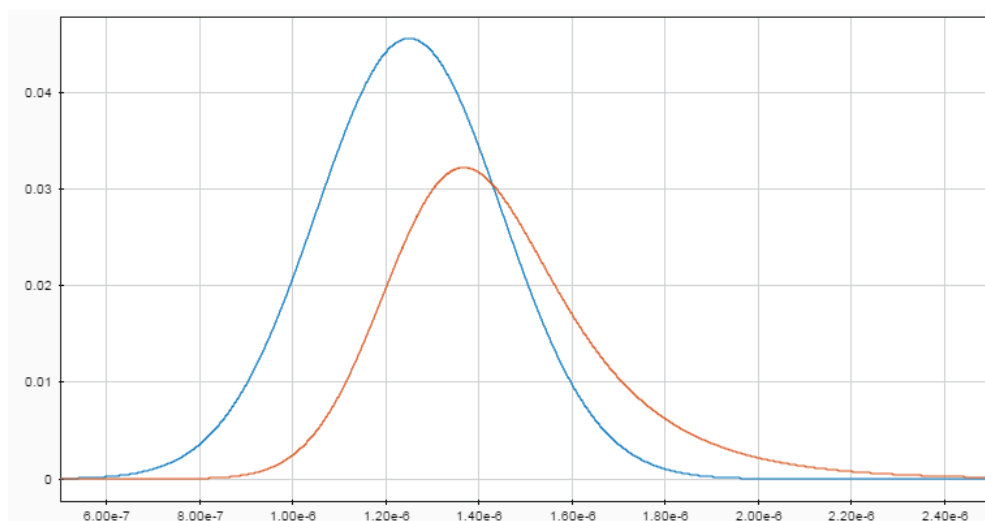


Рисунок 8 – Идеальный гауссовский видеоимпульс (большей амплитуды) и видеоимпульс с выхода детектора при постоянной времени  $\tau = 190,98$  нс  
 Figure 8 – Ideal Gaussian video pulse (higher amplitude) and video pulse from the detector output at a time constant  $\tau = 190,98$  ns

Поэтому в случае гауссовского радиоимпульса принято решение отойти от указанного выше способа совмещения сигналов, и выбран следующий способ. Путем изменения двух параметров – сдвиг во времени и амплитудный множитель – совмещались вершины видеоимпульсов (Рисунок 9).

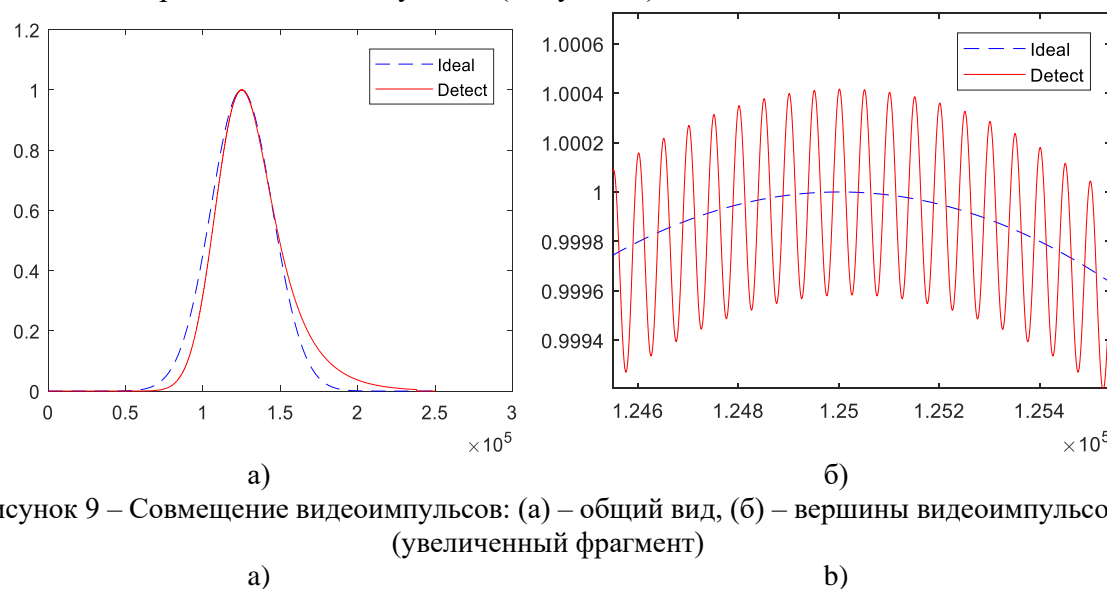


Рисунок 9 – Совмещение видеоимпульсов: (а) – общий вид, (б) – вершины видеоимпульсов (увеличенный фрагмент)

Figure 9 – Alignment of video pulses: (a) – general view, (b) – tops of video pulses (enlarged fragment)

Совмещение по амплитуде импульсов осуществлялось таким образом, чтобы максимум идеального гауссовского видеоимпульса совпадал со средним арифметическим следующих двух точек видеоимпульса с выхода детектора: точкой максимума (самого верхнего пика) и точкой соседнего локального минимума.

Совмещение по времени осуществлялось следующим образом. В видеоимпульсе с выхода детектора находилась точка максимума, а также несколько соседних локальных



максимумов (с обеих сторон от абсолютного максимума). Через этот массив точек проводился кубический сплайн. Затем максимум сплайна совмещался по времени с максимумом идеального гауссовского видеоимпульса путем циклического сдвига массива.

В случае гауссовского радиоимпульса расстояние между сигналами видеоимпульсов вычислялось по следующей формуле:

$$rho = \sum_{k=1}^N |Gaus_k - Dt_k|, \quad (3)$$

где  $rho$  – расстояние между сигналами;

$k$  – номер элемента массива;

$N$  – объем массива;

$Gaus$  – массив сигнала идеальной формы;

$Dt$  – массив преобразованного сигнала с выхода детектора.

Расстояние  $rho$  было выбрано в качестве *целевой функции* для гауссовского радиоимпульса.

В качестве *метода оптимизации* использован метод золотого сечения [7, с. 252–255], и установлена точность  $\varepsilon = 1$  пс. Также использовались методы интерполяции и регрессии.

*Средства моделирования.* Моделирование осуществлялось в среде Matlab версии R2017b с использованием библиотеки Simulink с помощью программного модуля [8].

### Результаты

Результаты вычислений на всех итерациях процесса оптимизации для *прямоугольного радиоимпульса* приведены в Таблице 1. Таблица имеет следующие колонки:

- первая колонка ( $n$ ) – номер итерации;
- вторая и третья колонки ( $a, b$ ) – соответственно левая и правая границы текущего интервала поиска;
- четвертая и пятая колонки, первая строка ( $\alpha, \beta$ ) – точки, разбивающие текущий интервал поиска на части, соответствующие золотому сечению (Рисунок 10);
- четвертая и пятая колонки, вторая строка ( $\rho^2(\alpha), \rho^2(\beta)$ ) – квадраты расстояния между сигналами в соответствующих точках разбиения;
- $\Delta$  – длина текущего интервала поиска.

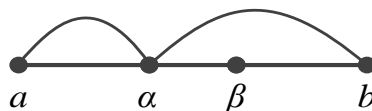


Рисунок 10 – Текущий интервал и точки его разбиения в методе золотого сечения

Figure 10 – The current interval and the points of its division in the method of the golden section

Таблица 1 – Результаты оптимизации постоянной времени детектора для идеального прямоугольного радиоимпульса

Table 1 – Results of optimization of the detector time constant for an ideal square RF-pulse

| n | a | b           | α                |                 | β                |                 | Δ |
|---|---|-------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|---|
|   |   |             | $\rho^2(\alpha)$ | $\rho^2(\beta)$ | $\rho^2(\alpha)$ | $\rho^2(\beta)$ |   |
| 0 | 0 | 5,00000E-07 | 1,90983006E-07   | 3,09016994E-07  | 5,00000E-07      |                 |   |



|    |             |             |                |                |             |  |
|----|-------------|-------------|----------------|----------------|-------------|--|
|    |             |             | 3,68733822E-10 | 5,15634018E-10 |             |  |
| 1  | 0           | 3,09017E-07 | 1,18033989E-07 | 1,90983006E-07 | 3,09017E-07 |  |
|    |             |             | 2,42277367E-10 | 3,68733822E-10 |             |  |
| 2  | 0           | 1,90983E-07 | 7,29490169E-08 | 1,18033989E-07 | 1,90983E-07 |  |
|    |             |             | 1,51781347E-10 | 2,42277367E-10 |             |  |
| 3  | 0           | 1,18034E-07 | 4,50849719E-08 | 7,29490169E-08 | 1,18034E-07 |  |
|    |             |             | 9,39129082E-11 | 1,51781347E-10 |             |  |
| 4  | 0           | 7,29490E-08 | 2,78640450E-08 | 4,50849719E-08 | 7,29490E-08 |  |
|    |             |             | 5,80534716E-11 | 9,39129082E-11 |             |  |
| 5  | 0           | 4,50850E-08 | 1,72209269E-08 | 2,78640450E-08 | 4,50850E-08 |  |
|    |             |             | 3,58954745E-11 | 5,80534716E-11 |             |  |
| 6  | 0           | 2,78640E-08 | 1,06431181E-08 | 1,72209269E-08 | 2,78640E-08 |  |
|    |             |             | 2,22148163E-11 | 3,58954745E-11 |             |  |
| 7  | 0           | 1,72209E-08 | 6,57780875E-09 | 1,06431181E-08 | 1,72209E-08 |  |
|    |             |             | 1,37956309E-11 | 2,22148163E-11 |             |  |
| 8  | 0           | 1,06431E-08 | 4,06530938E-09 | 6,57780875E-09 | 1,06431E-08 |  |
|    |             |             | 8,68632006E-12 | 1,37956309E-11 |             |  |
| 9  | 0           | 6,57781E-09 | 2,51249937E-09 | 4,06530938E-09 | 6,57781E-09 |  |
|    |             |             | 5,77452082E-12 | 8,68632006E-12 |             |  |
| 10 | 0           | 4,06531E-09 | 1,55281001E-09 | 2,51249937E-09 | 4,06531E-09 |  |
|    |             |             | 4,61704875E-12 | 5,77452082E-12 |             |  |
| 11 | 0           | 2,51250E-09 | 9,59689363E-10 | 1,55281001E-09 | 2,51250E-09 |  |
|    |             |             | 5,57107084E-12 | 4,61704875E-12 |             |  |
| 12 | 9,59689E-10 | 2,51250E-09 | 1,55281001E-09 | 1,91937873E-09 | 1,55281E-09 |  |
|    |             |             | 4,61704875E-12 | 4,91057788E-12 |             |  |
| 13 | 9,59689E-10 | 1,91938E-09 | 1,32625808E-09 | 1,55281001E-09 | 9,59689E-10 |  |
|    |             |             | 4,64861039E-12 | 4,61704875E-12 |             |  |
| 14 | 1,32626E-09 | 1,91938E-09 | 1,55281001E-09 | 1,69282680E-09 | 5,93121E-10 |  |
|    |             |             | 4,61704875E-12 | 4,69307487E-12 |             |  |
| 15 | 1,32626E-09 | 1,69283E-09 | 1,46627487E-09 | 1,55281001E-09 | 3,66569E-10 |  |
|    |             |             | 4,60189531E-12 | 4,61704875E-12 |             |  |
| 16 | 1,32626E-09 | 1,55281E-09 | 1,41279322E-09 | 1,46627487E-09 | 2,26552E-10 |  |
|    |             |             | 4,60797275E-12 | 4,60189531E-12 |             |  |
| 17 | 1,41279E-09 | 1,55281E-09 | 1,46627487E-09 | 1,49932835E-09 | 1,40017E-10 |  |
|    |             |             | 4,60189531E-12 | 4,60431598E-12 |             |  |
| 18 | 1,41279E-09 | 1,49933E-09 | 1,44584670E-09 | 1,46627487E-09 | 8,65351E-11 |  |
|    |             |             | 4,60268685E-12 | 4,60189531E-12 |             |  |
| 19 | 1,44585E-09 | 1,49933E-09 | 1,46627487E-09 | 1,47890018E-09 | 5,34817E-11 |  |
|    |             |             | 4,60189531E-12 | 4,60229587E-12 |             |  |
| 20 | 1,44585E-09 | 1,47890E-09 | 1,45847200E-09 | 1,46627487E-09 | 3,30535E-11 |  |
|    |             |             | 4,60198369E-12 | 4,60189531E-12 |             |  |
| 21 | 1,45847E-09 | 1,47890E-09 | 1,46627487E-09 | 1,47109731E-09 | 2,04282E-11 |  |
|    |             |             | 4,60189531E-12 | 4,60196991E-12 |             |  |

|    |             |             |                |                |             |
|----|-------------|-------------|----------------|----------------|-------------|
| 22 | 1,45847E-09 | 1,47110E-09 | 1,46329444E-09 | 1,46627487E-09 | 1,26253E-11 |
|    |             |             | 4,60189834E-12 | 4,60189531E-12 |             |
| 23 | 1,46329E-09 | 1,47110E-09 | 1,46627487E-09 | 1,46811688E-09 | 7,80287E-12 |
|    |             |             | 4,60189531E-12 | 4,60191225E-12 |             |
| 24 | 1,46329E-09 | 1,46812E-09 | 1,46513645E-09 | 1,46627487E-09 | 4,82244E-12 |
|    |             |             | 4,60189201E-12 | 4,60189531E-12 |             |
| 25 | 1,46329E-09 | 1,46627E-09 | 1,46443286E-09 | 1,46513645E-09 | 2,98043E-12 |
|    |             |             | 4,60189272E-12 | 4,60189201E-12 |             |
| 26 | 1,46443E-09 | 1,46627E-09 | 1,46513645E-09 | 1,46557129E-09 | 1,84201E-12 |
|    |             |             | 4,60189201E-12 | 4,60189262E-12 |             |
| 27 | 1,46443E-09 | 1,46557E-09 | 1,46486770E-09 | 1,46513645E-09 | 1,13842E-12 |
|    |             |             | 4,60189204E-12 | 4,60189201E-12 |             |
| 28 | 1,46487E-09 | 1,46557E-09 |                |                | 7,03584E-13 |

Из Таблицы 1 (последняя строка, последний столбец) видно, что на двадцать восьмой итерации текущий интервал поиска становится меньше заданной точности  $\Delta^{(28)} = 7 \cdot 10^{-13} < \varepsilon = 1$  пс. Поэтому процесс оптимизации прекращаем и принимаем за результат значение постоянной времени  $\tau = (1,465 \pm 0,001)$  нс, полученное на двадцать седьмой итерации и соответствующее минимальному квадрату расстояния между сигналами  $\rho^2 = 4,60189201 \cdot 10^{-12}$  В<sup>2</sup>·с (оба значения обведены рамкой).

Значение  $\tau = 1,465$  нс составляет около полутора периодов несущей.

По данным Таблицы 1 построен график зависимости квадрата расстояния между сигналами от постоянной времени (Рисунок 11).

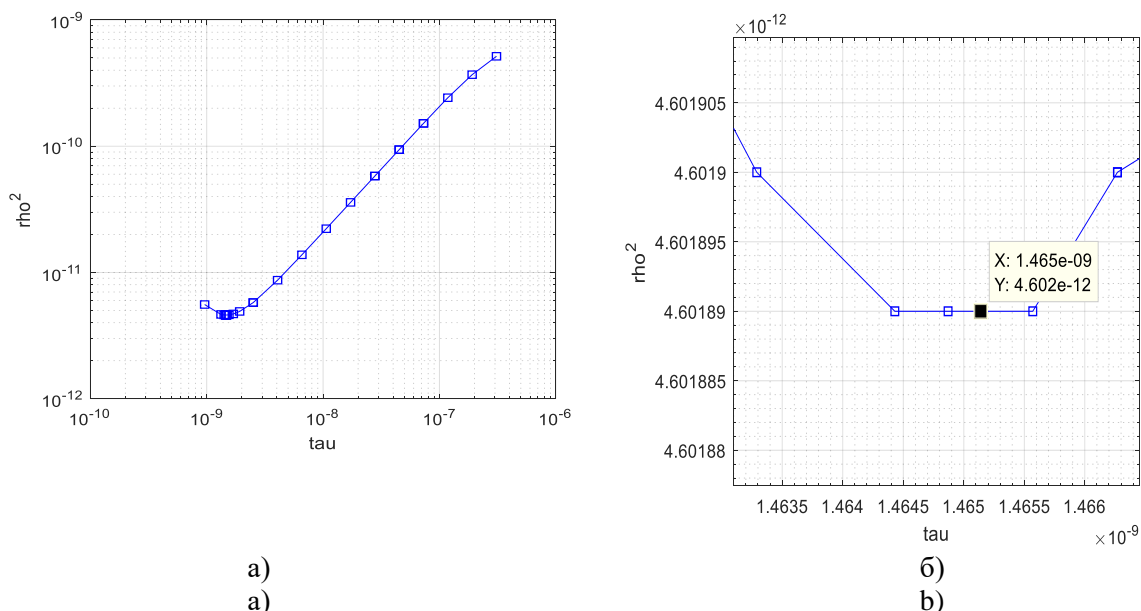


Рисунок 11 – Зависимость квадрата расстояния между сигналами от постоянной времени: (а) – полный график; (б) – увеличенный фрагмент  
Figure 11 – Dependence of the squared distance between signals on the time constant: (a) – full graph; (b) – enlarged fragment

На Рисунке 12 показаны фрагменты двух видеоимпульсов вблизи среза: идеального прямоугольного видеоимпульса и видеоимпульса с выхода детектора при оптимальном значении постоянной времени  $\tau = 1465$  пс. Из графика видно, что двойная амплитуда пульсаций  $(47-44)=3$  мВ составляет приблизительно семь процентов от амплитуды видеоимпульса (46 мВ).

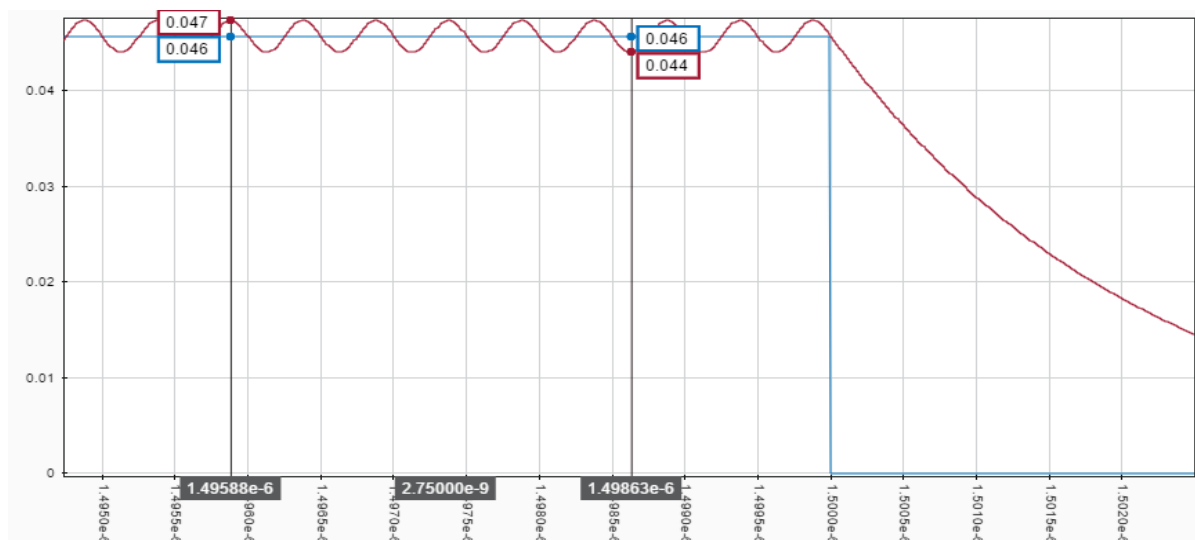


Рисунок 12 – Видеоимпульсы при оптимальном значении постоянной времени  $\tau = 1465$  пс (увеличенный фрагмент графика на срезах импульсов)

Figure 12 – Video pulses at the optimal value of the time constant  $\tau = 1465$  ps (enlarged graph fragment near the pulse trailing edges)

Аналогичная оптимизации для *неидеального прямоугольного радиоимпульса* дает значение постоянной времени интегрирующей цепи  $\tau = 2180 \pm 1$  пс при квадрате расстояния между сигналами  $\rho^2 = 4,688105 \cdot 10^{-12}$  В<sup>2</sup>·с.

Значение  $\tau = 2,18$  нс составляет около двух периодов несущей.

На Рисунке 13 приведен график зависимости квадрата расстояния от постоянной времени.

На Рисунке 14 и Рисунке 15 приведены фронты и срезы сравниваемых сигналов соответственно.

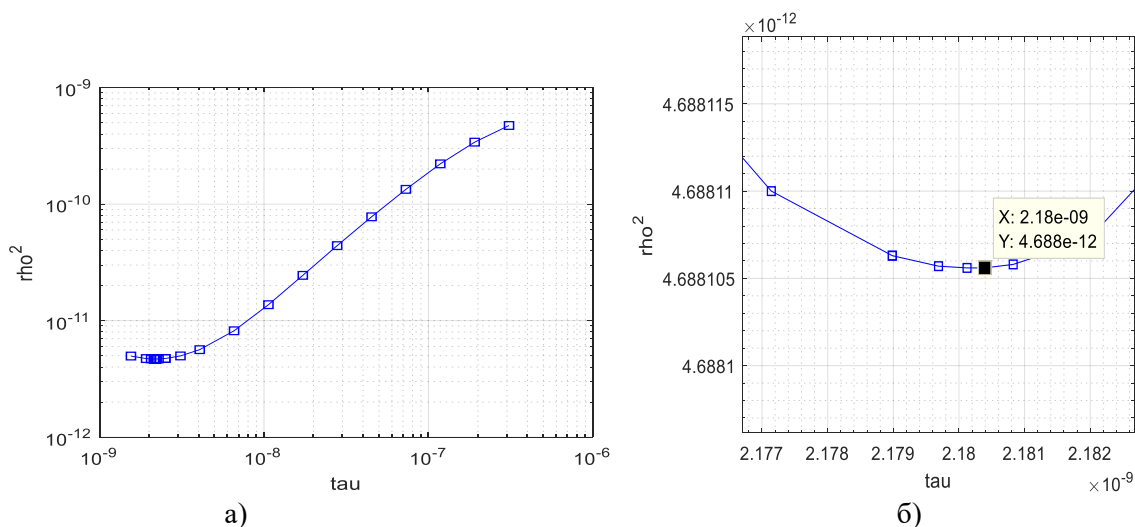


Рисунок 13 – Зависимость квадрата расстояния между сигналами от постоянной времени: (а) – полный график; (б) – увеличенный фрагмент

Figure 13 – Dependence of the squared distance between signals on the time constant: (a) – full graph; (b) – enlarged fragment

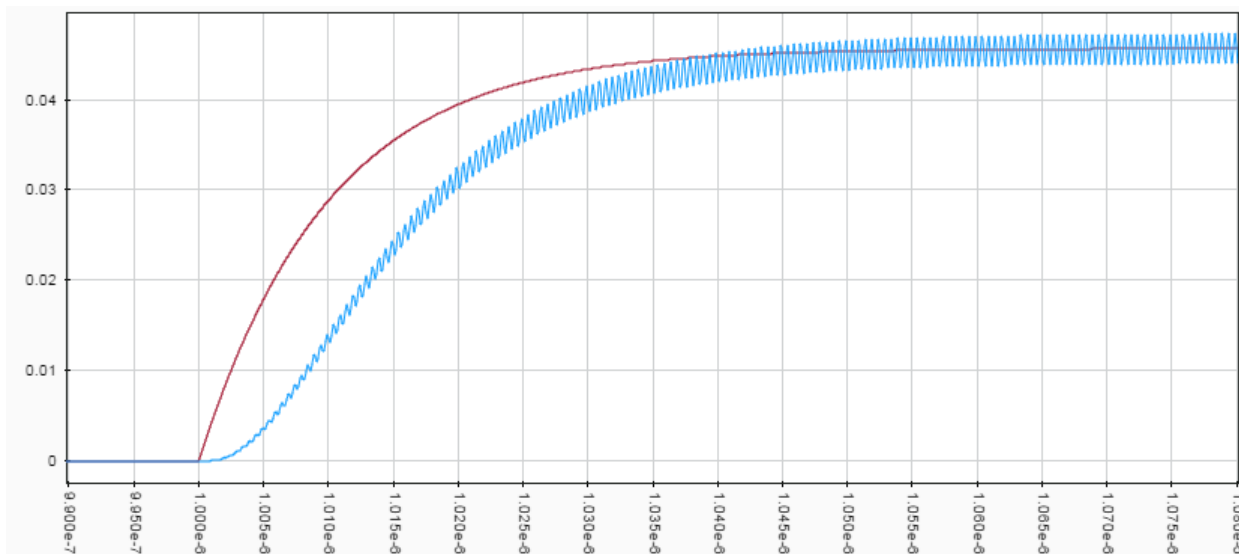


Рисунок 14 – Фронты сравниваемых сигналов при оптимальном значении постоянной времени  $\tau = 2180$  пс

Figure 14 – The Leading edges of the compared signals at the optimal value of the time constant  $\tau = 2180$  ps

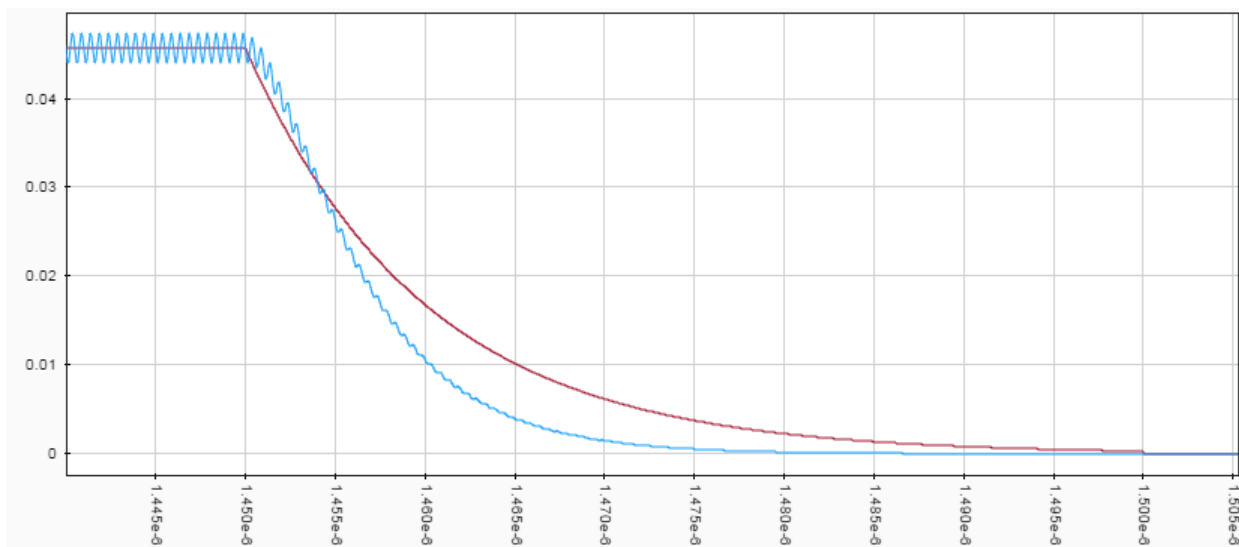


Рисунок 15 – Срезы сравниваемых сигналов при оптимальном значении постоянной времени  $\tau = 2180$  пс

Figure 15 – The trailing edges of the compared signals at the optimal value of the time constant  $\tau = 2180$  ps

Для *гауссовского радиоимпульса* оптимизация по методу золотого сечения при периоде дискретизации равном 10 пс дала следующие результаты: оптимальное значение постоянной времени и минимальное расстояние между сигналами

$$\tau_{opt} = 144,113 \text{ нс}, \quad rho = 7096,395 \text{ В}$$

соответственно.

График зависимости  $rho=f(\tau)$  в общем виде, а также его увеличенный фрагмент, показывающий вид кривой на дне впадины, представлены на Рисунке 16.

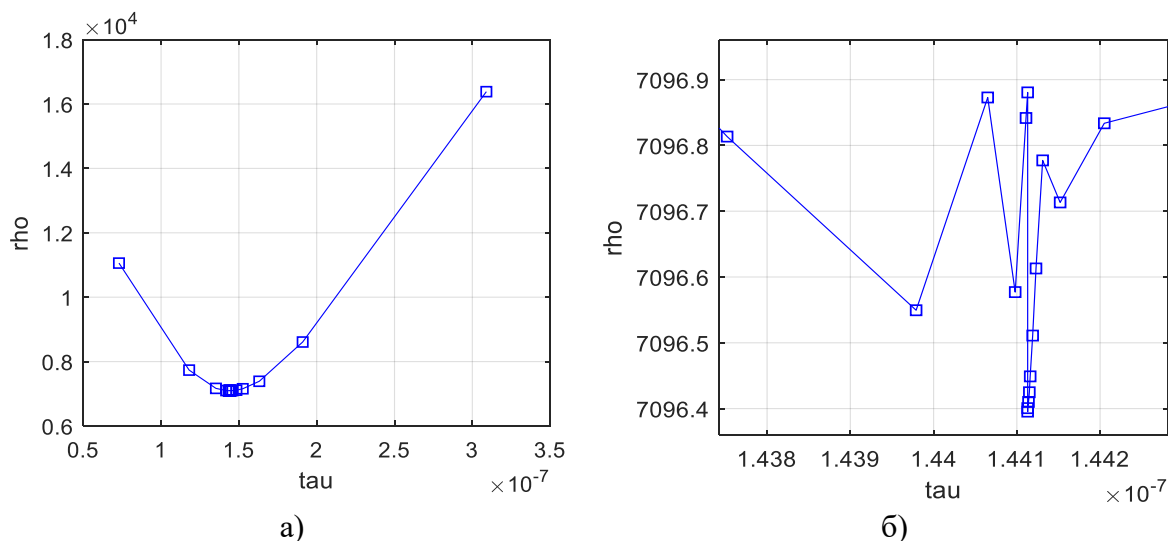


Рисунок 16 – Зависимость расстояния  $\rho$  от постоянной времени  $\tau$  при периоде дискретизации равном 10 пс: (а) – общий вид; (б) – увеличенный фрагмент

Figure 16 – Dependence of the distance  $\rho$  on the time constant  $\tau$  for a sampling period of 10 ps: (a) – general view; (b) – enlarged fragment

Как видно из графика, изображенного на Рисунке 16(б), говорить о точном положении минимума довольно сложно в силу шума, обусловленного дискретизацией. В связи с этим было решено найти оценочное значение оптимума постоянной времени следующим образом. Сначала на отрезке  $\tau \in [141 \cdot 10^{-9}, 147 \cdot 10^{-9}]$  с шагом 100 пс по формуле (3) была вычислена величина  $\rho$ . Затем на основании этого массива с помощью функции `polyfit()`, встроенной в Matlab, была получена кривая регрессии третьего порядка, Рисунок 17, Рисунок 18. Наконец, на указанном отрезке с помощью функции `fminbnd()` был найден локальный минимум кривой регрессии, который и можно принять за искомое оптимальное значение постоянной времени.

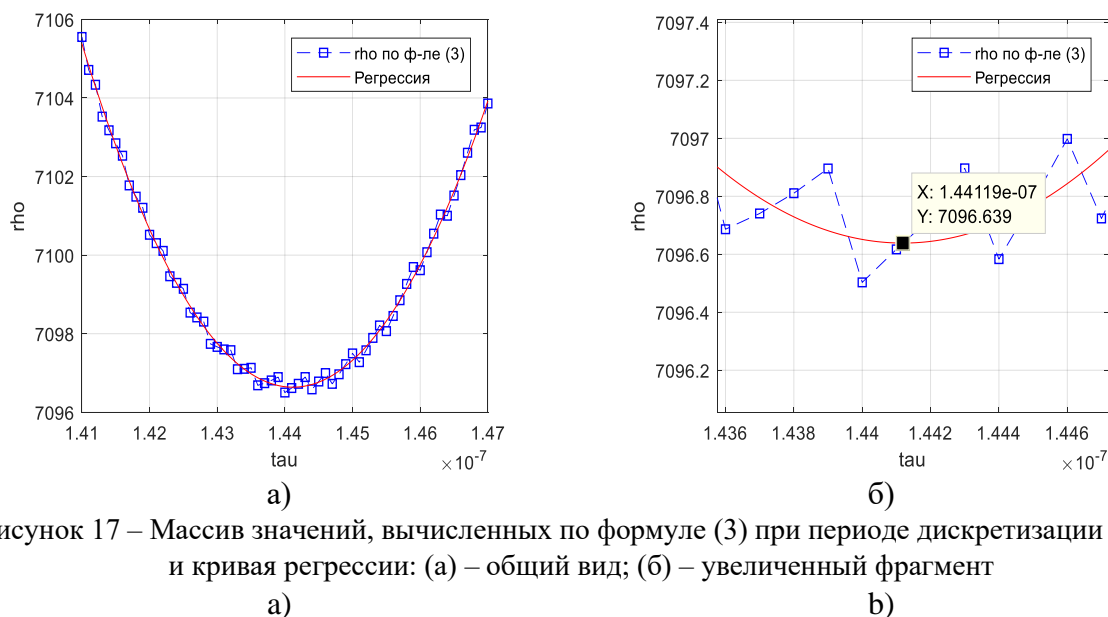


Рисунок 17 – Массив значений, вычисленных по формуле (3) при периоде дискретизации 10 пс, и кривая регрессии: (а) – общий вид; (б) – увеличенный фрагмент

Figure 17 – An array of values calculated by formula (3) with a sampling period of 10 ps, and a regression curve: (a) – general view; (b) – enlarged fragment.

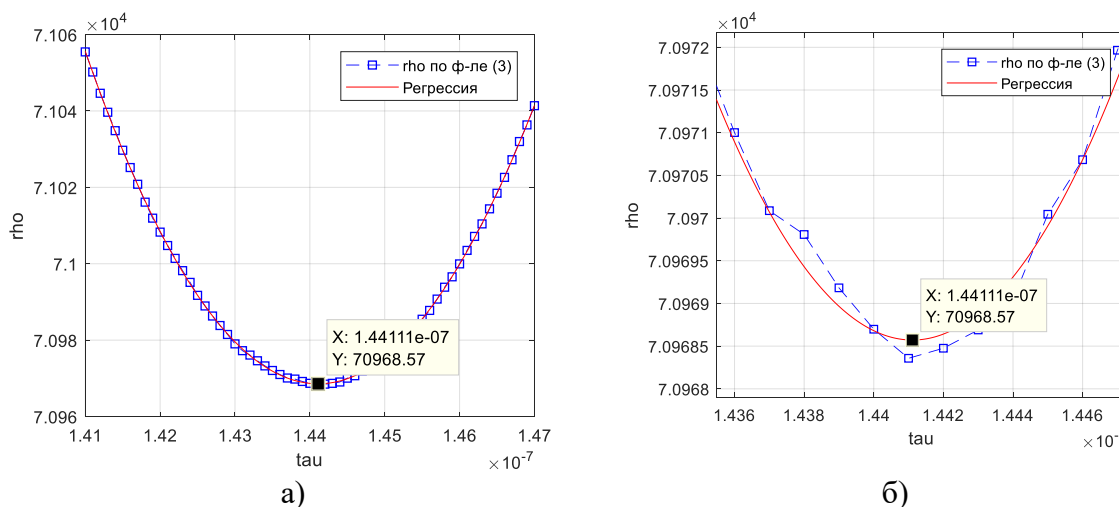


Рисунок 18 – Массив значений, вычисленных по формуле (3) при периоде дискретизации 1 пс, и кривая регрессии: (a) – общий вид; (б) – увеличенный фрагмент

Figure 18 – An array of values calculated by formula (3) with a sampling period of 1 ps, and a regression curve: (a) – general view; (b) – enlarged fragment

Уменьшая период дискретизации в 10 раз, мы видим, что оптимальное значение постоянной времени, оцениваемое по кривой регрессии, изменяется всего на 0,006 %:

- при периоде дискретизации равном 10 пс получаем оптимальное значение  $\tau = 144,119 \pm 0,001$  нс,  $\rho = 7096,639$  В, Рисунок 17(б);
- при периоде дискретизации равном 1 пс получаем оптимальное значение  $\tau = 144,111 \pm 0,001$  нс,  $\rho = 70968,57$  В, Рисунок 18(а,б).

### Заключение

Полагая, что частота модуляции в формуле (1) соответствует первому нулю в спектральной плотности прямоугольного видеоимпульса, получаем следующие преобразования:

$$\frac{2\pi}{\omega_0} \ll RC \ll \frac{2\pi}{\Omega},$$

$$\frac{2\pi}{2\pi f_0} \ll RC \ll \frac{2\pi}{2\pi F},$$

$$T_0 \ll RC \ll T_H, \tag{4}$$

где  $f_0$  – линейная частота несущего колебания;

$F$  – линейная частота модулирующего колебания или частота первого нуля спектральной плотности прямоугольного видеоимпульса;

$T_0$  – период несущего колебания;

$T_H$  – длительность видеоимпульса.

Результаты моделирования показывают, что для рассмотренных в настоящей работе форм радиоимпульсов оптимальные значения постоянной времени (оптимальные с точки зрения близости формы видеоимпульса на выходе детектора к идеальной форме) не отвечают формуле (4). Для идеального прямоугольного и неидеального

прямоугольного радиоимпульсов оптимальные значения постоянной времени не много больше периода несущей, а имеют один порядок с ней. А именно, постоянная времени имеет следующие оптимальные значения:

- для идеального прямоугольного радиоимпульса  $RC \approx 1,5 \cdot T_0$ ;
- для неидеального прямоугольного радиоимпульса  $RC \approx 2 \cdot T_0$ .

Для гауссовского радиоимпульса оптимальное значение постоянной времени не много меньше длительности импульса, а  $RC \approx 144 \cdot T_0 \approx 0,3 \cdot T_{II}$ .

В настоящей работе не обсуждается возможность физической реализации значения  $\tau = (1,5 \dots 2) \cdot T_0$  при приемлемом значении коэффициента передачи детектора (см.: [9, с. 118; 10]), а получен лишь теоретический ориентир в аспекте близости форм импульсов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов А.А., Вольхин Ю.Н., Дубровская А.А. Обзор и исследование возможных вариантов реализации сверхширокополосных детекторов, смесителей и других аналоговых процессоров диапазона СВЧ с использованием методов и средств радиофотоники. *Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: Материалы V юбилейной общероссийской научно-технической конференции ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение», ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет»*. Омск: Издательство: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет" (Омск), 2014:37-60.
2. Гамиловская А.В., Белоусов А.А., Тихонов Е.В., Дубровская А.А., Вольхин Ю.Н. Обзор и исследование возможности вариантов реализации сверхширокополосных аналоговых процессоров диапазона СВЧ с использованием методов и средств радиофотоники. *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. 2015;5(239):4-11.
3. Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов*. М.: Радио и связь, 1986:512.
4. Радиолокационные системы : учебник / В.П. Бедрышев, Е.Н. Гарин, А.Н. Фомин [и др.]; под общ. ред. В.П. Бедрышева; разработ.: Центр обучающих систем ИнТК СФУ. – Версия 1.0. – Электрон. Дан. (4 Мб). – Красноярск : СФУ, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD). – Систем. требования: Intel Pentium (или аналогичные процессор других производителей) 1 ГГц; 512 Мб оперативной памяти; 50 Мб свободного дискового пространства; привод CD; операционная система Microsoft Windows XP / Vista / 7. – Adobe Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата pdf). – Электрон. версия печатной публикации 2011. – № гос. Регистрации 0321201020.
5. Бельянинов А.С. *Основы радиолокации. Учебное пособие*. Рылъск: РАТК ГА, 2003:72.
6. Баскаков С.И. *Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. для вузов по спец. «Радиотехника»*. М.: Высш. шк., 1988:448.
7. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. *Вычислительные методы для инженеров: учебное пособие*. М.: Высш. шк., 1994:544.



8. Осипов В.Е. Программный модуль «Переходные процессы в квадратичном амплитудном радиофотонном детекторе». ОФЭРНиО. Свидетельство №24419 от 20.12.2019.
9. Осипов В.Е. Исследование и разработка детектора для станции предупреждения о радиолокационном облучении: выпускная квалификационная работа. Омск: ОмГТУ, 2020:127.
10. Осипов В.Е. Об оптимизации структуры постоянной времени радиофотонного амплитудного детектора импульсов. Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. (Омск, 11 авг. 2020 г.) / АО «КТРВ», АО «ЦКБА», ОмГТУ; [отв. за вып. С.Д. Сиберт]. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2020:252. DOI: 10.25206/978-5-8149-3074-3-152-161

## REFERENCES

1. Belousov A.A., Volkhin Y.N. Dubrovskaya A.A. Review and study of possible options for the implementation of ultra-wideband detectors, mixers and other analog processors of the microwave range using methods and means of radio-photonics. *Exchange of experience in the field of creating ultra-wideband radio-electronic systems: Materials of the 5th Anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference of Tactical Missile Armament Corporation OJSC, Central Automation Design Bureau OJSC, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Omsk State Technical University*. Omsk: Publisher: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Omsk State Technical University" (Omsk), 2014: 37-60. (In Russ)
2. Gamilovskaya A.V., Belousov A.A., Tikhonov E.V., Dubrovskaya A.A., Volkhin Yu.N. Overview and the study of possible methods of ultra-wideband microwave analog processors implementation using radio-photonics techniques. *Electronic equipment. Series 2. Semiconductor devices*. 2015;5(239):4-11. (In Russ)
3. Gonorovsky I.S. *Radio engineering circuits and signals: a textbook for universities*. Moscow: Radio and communication, 1986: 512. (In Russ)
4. Radar systems [Electronic resource]: textbook / V.P. Bedryshev, E.N. Garin, A.N. Fomin [and others]; under total. ed. V.P. Bedryshev; developed by: Center of training systems of the SibFU Institute of Technology and Technology. - Version 1.0. - Electron. Dan. (4 Mb). - Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2012. - 1 electron. wholesale disc (CD). - System. requirements: Intel Pentium (or similar processor from other manufacturers) 1 GHz; 512 MB of RAM; 50 MB of free disk space; CD drive; operating system Microsoft Windows XP / Vista / 7. - Adobe Reader 7.0 (or a similar product for reading pdf files). - Electron. version of the printed publication 2011. - State No. Registrations 0321201020. (In Russ)
5. Belyaninov A.S. *Radar basics. Tutorial*. Rylysk: RATK GA, 2003: 72. (In Russ)
6. Baskakov S.I. *Radio engineering circuits and signals: textbook for universities in the specialty "Radio Engineering"*. Moscow: High school, 1988: 448. (In Russ)
7. Amosov A.A., Dubinsky Yu.A., Kopchenova N.V. *Computational Methods for Engineers: A Study Guide*. Moscow: High school, 1994: 544. (In Russ)
8. Osipov V.E. *Software module "Transient processes in a quadratic amplitude microwave photonic detector"*. OFERNiO. Certificate No. 24419 dated 12/20/2019. (In Russ)
9. Osipov V.E. *Research and development of a detector for a radar warning receiver: final qualification work*. Omsk: OmSTU, 2020: 127. (In Russ)
10. Osipov V.E. About optimization of the time constant structure of a microwave photonic amplitude pulse detector. *Exchange of experience in the field of creating ultra-wideband radio electronic systems: materials of the VIII All-Russia. scientific and technical conf.*

(Omsk, Aug. 11, 2020) / KTRV JSC, TsKBA JSC, OmSTU; [resp. for issue. S. D. Sibert].  
Omsk: Publishing house of OmSTU, 2020:252. DOI: 10.25206/978-5-8149-3074-3-152-161.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Осипов Вадим Евгеньевич**, аспирант,  
кафедра «Радиотехнические устройства и  
системы диагностики», ФГБОУ ВО «Омский  
государственный технический университет»,  
Омск, Российская Федерация.  
*e-mail*: [osvad@list.ru](mailto:osvad@list.ru)  
ORCID: [0000-0003-1859-1374](https://orcid.org/0000-0003-1859-1374)

**Vadim E. Osipov**, Phd Student, Radio  
Engineering Devices And Diagnostic Systems  
Department, Federal State Budgetary  
Educational Institution Of Higher Education  
"Omsk State Technical University", Omsk,  
Russian Federation