



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.2.10>

УДК: 621.396.96

## ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЙЯНИЯ УГОЛКОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ С ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ТРАНСФОРМАЦИЕЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СВЧ РАДИОСИГНАЛАМИ МИКРОСЕКУНДНОЙ И НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Е.Л. Шошин

Сургутский государственный университет  
628400, Сургут, пр. Ленина, 1

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2023 г.

**Аннотация.** Рассматриваются потенциальные возможности резонатора волноводного типа, формирующего сжатые СВЧ импульсы. Выполнен анализ функции неопределенности радиосигналов, сформированных методом резонансной компрессии. Проведено исследование влияния предимпульса и постимпульса на потенциальное разрешение по дальности. Приведены результаты экспериментальных исследований рассеивающих характеристик уголкового отражателя с поляризационной трансформацией при облучении СВЧ радиосигналами микросекундной и наносекундной длительности.

**Ключевые слова:** резонансная компрессия, функция неопределенности, глубина поляризационной модуляции, искусственный отражатель.

**Автор для переписки:** Шошин Евгений Леонидович, [shoshin6@mail.ru](mailto:shoshin6@mail.ru)

## Введение

Возможности импульсной модуляции традиционных приборов, генерирующих СВЧ радиоимпульсы, ограничены шириной полосы пропускания самих приборов и малым уровнем мощности сигналов, не превышающим несколько десятков киловатт. Резонансная компрессия СВЧ импульсов позволяет преодолеть ограничения традиционных приборов за счет накопления энергии электромагнитного поля в резонаторах, возбуждаемых от генераторов, работающих в режиме относительно длинных импульсов и в быстром выводе из них запасенной энергии за время много меньшее времени накопления [1-4]. При этом происходит увеличение пиковой мощности выходных импульсов по отношению к мощности возбуждающего генератора [5-7].

Целью исследования является анализ функции неопределенности радиосигнала, сформированного методом резонансной компрессии и экспериментальное исследование рассеивающих характеристик уголкового отражателя с поляризационной трансформацией.

### 1. Резонансная компрессия СВЧ радиосигналов.

На рис. 1 изображена конструкция резонатора волноводного типа, на выходе которого формируются сжатые СВЧ-импульсы [1].

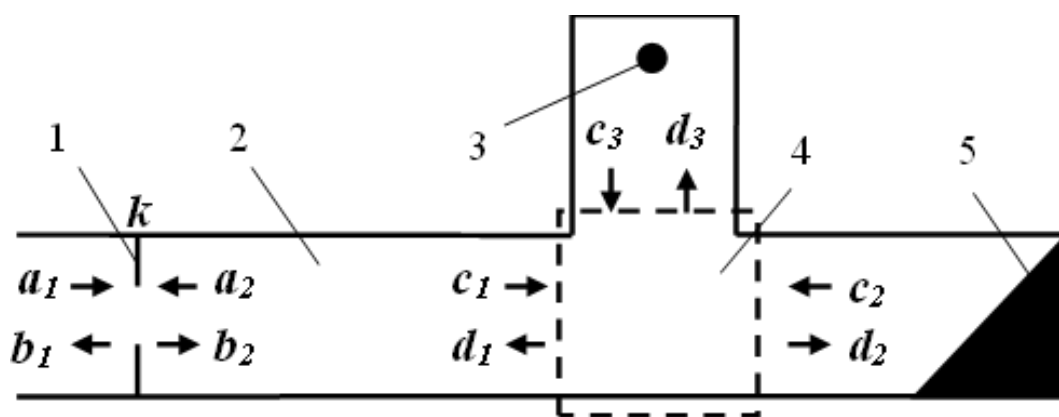


Рис. 1. Конструкция резонатора.

Резонатором компрессора является однородная волноводная линия 2, возбуждаемая через элемент ввода, выполненный в виде диафрагмы 1 с величиной связи  $k$ . На другом конце линии установлен волноводный тройник 4

с короткозамкнутым плечом, в котором имеется газоразрядный коммутатор 3. Длина плеча выбрана такой, чтобы в режиме накопления энергии волны, излучаемые из этого плеча и резонатора в направлении согласованной нагрузке 5, интерферировали в противофазе, а в режиме вывода после срабатывания коммутатора суммировались в фазе. На рис. 1  $a_1, a_2, c_1, c_2, c_3$  – амплитуды падающих и  $b_1, b_2, d_1, d_2, d_3$  – амплитуды отраженных волн.

При возбуждении волноводной линии в резонаторе возникает переходный процесс, по завершении которого и срабатывания коммутатора в короткозамкнутом плече тройника высокочастотная энергия выводится из резонатора в течение временного интервала  $T$  с амплитудой волны  $b_2$  в момент переключения. Если связь с нагрузкой будет неполной, тогда время вывода будет больше  $T$ , амплитуда выходного импульса уменьшится, а его форма приобретет вид экспоненциально затухающих колебаний с постоянной времени  $\tau_0 = 2Q_b/\omega$  ( $Q_b$  – добротность резонатора во время вывода). При полной связи с нагрузкой мгновенная мощность выходных импульсов будет иметь вид, показанный на рис. 2, где  $t_G$  – время возбуждения резонатора, равное длительности импульса генератора (предимпульс),  $t_0$  – длительность выходного наносекундного импульса, равная времени двойного пробега волны вдоль накопительного резонатора,  $P_{ex}$  – мощность импульса СВЧ генератора,  $P_{вых}$  – мощность наносекундного импульса.

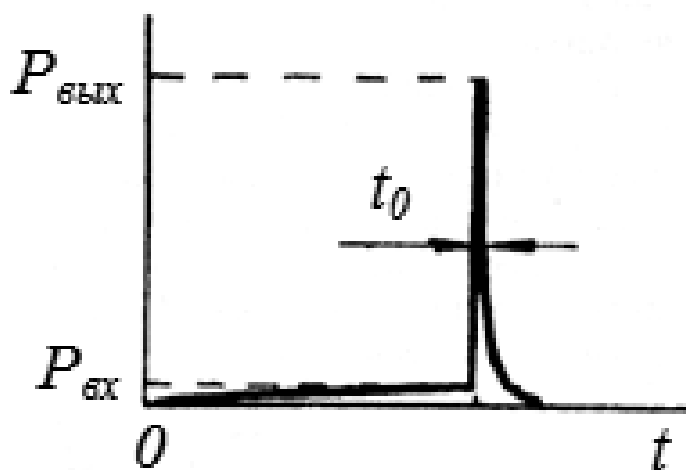


Рис. 1. Временная диаграмма зондирующего сигнала.

Предимпульсное излучение возникает при передаче колебаний, формируемых СВЧ генератором, через резонансную систему компрессора в процессе накопления энергии, при этом, предимпульс имеет длительность 50 нс – 1 мкс, а его амплитуда меньше амплитуды наносекундного сигнала на 40 – 120 дБ. Сжатый наносекундный импульс в трехсантиметровом диапазоне в зависимости от согласования с нагрузкой может иметь длительность 4 – 10 нс. После вывода запасенной энергии возникает постимпульсное излучение, длительность которого составляет 20 – 300 нс, а его максимальная амплитуда на 20 – 40 дБ меньше амплитуды сжатого наносекундного импульса.

Оценим влияние предимпульса и постимпульса на потенциальное разрешение формируемых сигналов по дальности. Математическая модель огибающей сжатого методом резонансной компрессии сигнала, составленная по данным измерений, имеет вид [8]:

$$y(t) = \begin{cases} M_0(1 - \exp(-t/\tau_0))\delta^2 a(t)/4 & \text{если } 0 \leq t < \tau_G \\ \beta M_0 a(t) & \text{если } \tau_G \leq t \leq \tau_G + t_0 \\ E & \text{если } \tau_G + t_0 < t \leq \tau_G + t_0 + \tau_p \end{cases}, \quad (1)$$

где  $a(t)$  – решетчатая функция, равная 1 на интервале времени, равном длительности возбуждающего импульса;  $M_0$  – коэффициент усиления мощности резонатором;  $\tau_G$  – длительность возбуждающего импульса;  $t_0$  – длительность сжатого импульса;  $\delta$  – величина затухания при двойном пробеге вдоль короткозамкнутого плеча тройника;  $\beta$  – коэффициент связи резонатора;  $E$  – относительный уровень постимпульса по мощности;  $\tau_p$  – длительность постимпульса.

Потенциальное разрешение по радиальной скорости и дальности сигналов характеризует функция неопределенности:

$$\chi(\tau, \Delta f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t - \tau) e^{i2\pi\Delta f\tau} dt \right|, \quad (2)$$

где  $\tau$  – задержка сигнала,  $\Delta f$  – доплеровская частота.

Данные измерений свидетельствуют о том, что в формируемом методом резонансной компрессии сигнале отсутствуют фазовые скачки. Данное обстоятельство позволяет при нахождении функции неопределенности в качестве исследуемой функции  $s(t)$  использовать выражение для огибающей (1).

В 3-см диапазоне типичными значениями являются:

$$\frac{\tau_0}{\tau_G} \approx 0,2 \dots 0,3; M_0 = 4 \dots 40; t_0 = 7 \text{ нс} \dots 20 \text{ нс}; \beta = 0,9 \dots 1; \frac{\delta^2}{4} \approx 0,03;$$

$$E = -40 \text{ дБ} \dots -20 \text{ дБ}; \tau_p = 200 \text{ нс} \dots 300 \text{ нс}.$$

Подставив (1) в (2), получим

$$\chi(\tau, \Delta f) \approx \beta \left| \left( 1 - \frac{\delta^2}{2} \right) \left( 1 - \frac{|\tau|}{t_0} \right) + 0,375 \delta^2 + \frac{\delta^4}{16} \left( 1 - \frac{|\tau|}{t_0 + \tau_G} \right) + E \left( 1 - \frac{|\tau|}{t_0 + \tau_G + \tau_p} \right) \right| \times \left| \frac{\sin(\pi \Delta f)}{\pi \Delta f} \right|. \quad (3)$$

На рис. 3а приведена функция неопределенности радиосигнала, сформированного для типичных значений резонансного компрессора в 3-см диапазоне, на рис. 3б приведено сечение главного лепестка. Приведенные данные свидетельствуют о том, функция неопределенности радиосигнала, формируемого методом резонансной компрессии, подобна функции неопределенности прямоугольного радиоимпульса.

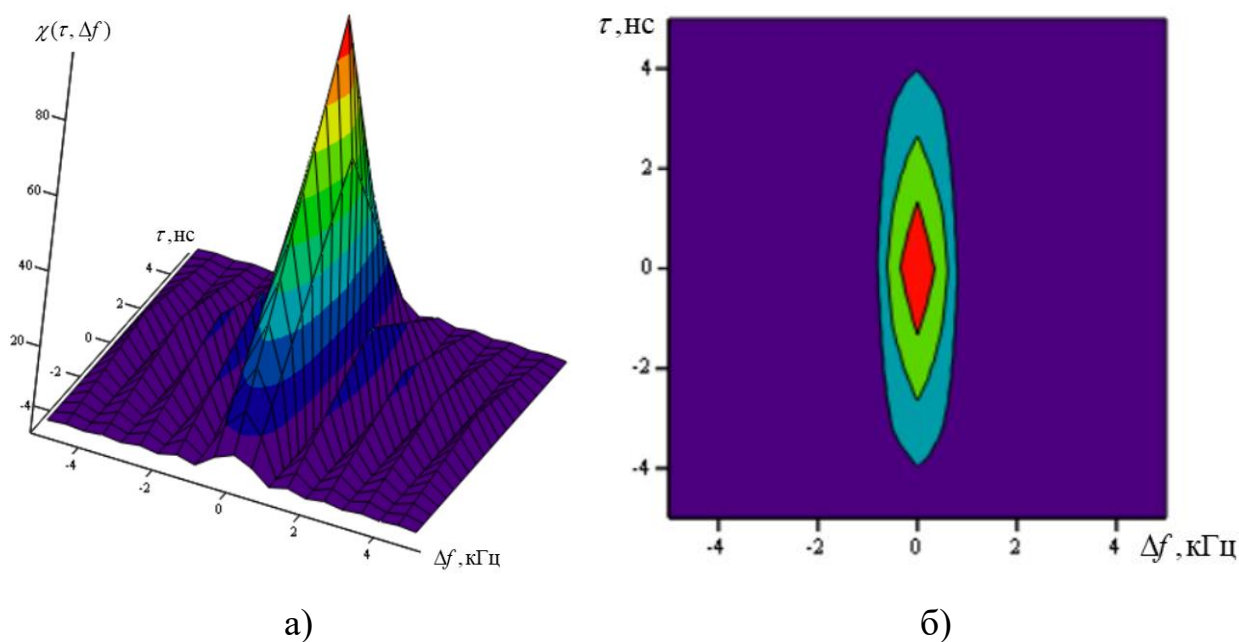


Рис. 3. Функция неопределенности радиосигнала:  
 а) 3D изображение; б) сечение главного лепестка.

На рис. 4 приведено сечение функции неопределенности радиосигнала в отсутствии доплеровского смещения частоты (1 – сечение для прямоугольного радиоимпульса, 2 – сечение для радиосигнала, сформированного методом резонансной компрессии).

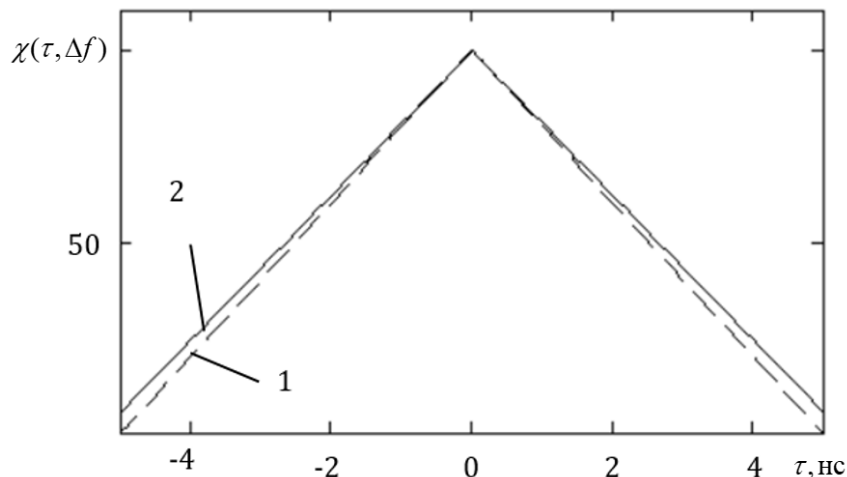


Рис. 4. Сечение функции неопределенности при  $\Delta f = 0$ .

Приведенные на рис. 4 сечения функции неопределенности свидетельствуют о том, что разрешающая способность радиосигналов, сформированных методом резонансной компрессии, близка к разрешающей способности прямоугольных радиоимпульсов (отличие не более 5%).

## 2. Исследование характеристик рассеяния уголкового отражателя.

С целью экспериментального исследования эффективности применения радиосигналов, сформированных методом резонансной компрессии, был создан макет радиолокационного передатчика (рис. 5). В конструкции макета РЛС использовались штатные волноводы и магнетронные генераторные устройства от радиолокаторов «Гроза-154» и «МРЛ-2». Передающая параболическая антенна управлялась с помощью азимутального и угломестного приводов, которые обеспечивали радиолокационное сканирование местности на расстоянии 5...55 км.

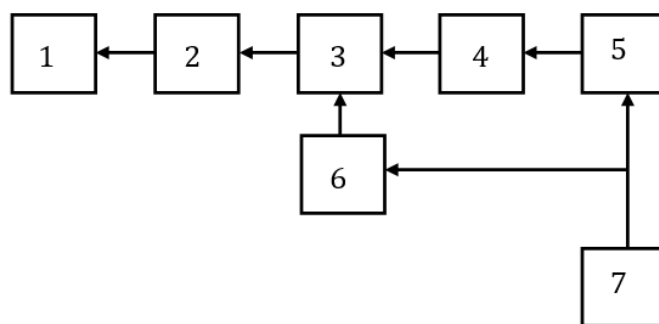


Рис. 5. Структурная схема передающего устройства:  
 1 – параболическая антенна, 2 – поляризационный модулятор,  
 3 – устройство компрессии СВЧ-импульсов, 4 – генератор СВЧ,  
 5 – модулятор, 6 – блок поджига газоразрядного коммутатора,  
 7 – синхронизатор.

Характеристики параболической антенны:

- диаметр зеркала, м: 3
- ширина главного лепестка, град: 0,8
- коэффициент усиления, дБ: 55
- уровень боковых лепестков, дБ: -35.

Характеристики магнетрона:

- длительность СВЧ импульса, мкс: 0,8
- рабочая частота, МГц: 9370
- импульсная мощность, кВт: 9,5.

Устройство системы компрессии было встроено в волноводный тракт, соединяющий генератор СВЧ и передающую антенну. В систему компрессии входили накопительный волноводный резонатор, блок запуска коммутирующего разрядника и циркулятор для обеспечения стабильной работы СВЧ-генератора на резонансную нагрузку. Конструкция резонатора представляла собой круглый волновод диаметром 58 мм и длиной 520 мм, который плавно переходил в волновод диаметром 30 мм, и тройник в Н плоскости. Закороченное боковое плечо тройника имело прямоугольное сечение 12 мм × 28 мм, и в нем был размещен поджигающий разрядник тригатронного типа. Коммутация осуществлялась при развитии СВЧ-разряда, проходившем в среде аргона при стандартном атмосферном давлении. Система резонансной компрессии позволяла формировать СВЧ импульсы длительностью 4 – 12 нс. С целью

уменьшения требований к полосе пропускания приемного тракта, длительность формируемых СВЧ-импульсов составляла 10 нс за счет неполного вывода высокочастотной энергии при небольшом рассогласовании тройника. Поляризационный модулятор представлял собой вращающуюся секцию круглого волновода со встроенной фазовой полуволновой пластиной, при этом для вращения использовался шаговый двигатель.

Прием рассеянных сигналов осуществлялся с помощью волноводно-щелевой антенны и приемного устройства, имевшего чувствительность -65 дБм и полосу пропускания 130 МГц.

Технические характеристики макета передающего устройства с резонансной компрессией излученных сигналов:

- длительность СВЧ импульсов, нс: 9
- пиковая мощность СВЧ импульсов, кВт: 40
- коэффициент усиления пиковой мощности, дБ: 6
- частота следования импульсов, Гц: 400.

При проведении экспериментальных исследований радиолокационное зондирование осуществлялось с высокого берега реки Томь, на другом берегу которой находились свежевспаханное поле, лес и малый населенный пункт. В качестве радиолокационных мишеней использовались трехгранные отражатели с различными значениями ЭПР, которые размещались на расстоянии 1800 м. На рис. 6 приведены временные диаграммы, отраженных микросекундного и наносекундного радиоимпульсов от трехгранного отражателя из граней в виде горизонтально ориентированных металлических решеток с шагом 3 мм.



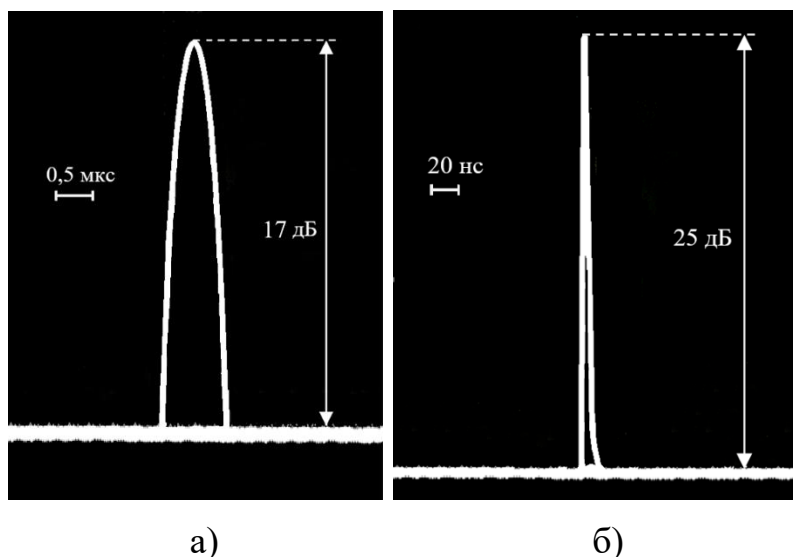


Рис. 6. Форма сигнала на выходе видеоусилителя:  
 а) микросекундный импульс; б) наносекундный импульс.

Рис. 6 свидетельствуют о том, что глубина поляризационной модуляции радиосигналов, рассеянных уголковым отражателем с поляризационной трансформацией, больше при облучении сжатыми СВЧ импульсами наносекундной длительности, что связано с лучшим пространственным разрешением ( $<1,5$  м), формирующем большее отношение цель-фон. Разные типы подстилающей поверхности (таблица 1) влияют на глубину поляризационной модуляции при приеме наносекундных и микросекундных импульсов составляющей 22 – 25 дБ и 14 – 17 дБ соответственно.

В таблице 1 приведены измеренные значения глубины поляризационной модуляции радиосигналов, рассеянных уголковым отражателем с поляризационной трансформацией, для разных типов подстилающей поверхности, полученные при зондировании микросекундными и наносекундными импульсами.

Таблица 1. Поляризационные характеристики уголкового отражателя с поляризационной трансформацией.

Объект		Поле	Малый населенный пункт
Глубина поляризационной модуляции, дБ	Микросекундный импульс	17	14
	Наносекундный импульс	25	22

Была проведена оценка разрешающей способности макета РЛС по дальности в режиме излучения наносекундных импульсов. Для этого два уголкового отражателя с одинаковой ЭПР ( $5 \text{ м}^2$ ) первоначально были размещены на расстоянии 3 м, на котором были получены отдельные радиолокационные отражения. После этого выполнялся маневр сближения отражателей с измерением величины провала уровней рассеянных сигналов. Разрешающая способность по уровню 3 дБ от максимального уровня мощности отраженных сигналов составила 1,5 м.

## **Заключение**

Проведенные исследования показали, что разрешающая способность радиосигналов, сформированных методом резонансной компрессии, близка к разрешающей способности прямоугольных радиоимпульсов, при этом влияние предимпульса и постимпульса на потенциальное разрешение по дальности минимально.

Облучение радиолокационного отражателя с поляризационной трансформацией сжатыми СВЧ импульсами наносекундной длительности позволяет увеличить глубину поляризационной модуляции рассеянных сигналов.

На глубину поляризационной модуляции рассеянных сигналов влияет выбор подстилающей поверхности при размещении на ней искусственного радиолокационного отражателя.

## **Литература**

1. Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. *Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности*. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.

2. Юшков Ю.Г., Бадулин Н.Н., Бацула А.П., Мельников А.И., и др. Наносекундный радиолокатор с временной компрессией СВЧ-импульсов передатчика. // *Электромагнитные волны & электронные системы*, 1997. №6. Т2. С.71-76.
3. Новиков С.А., Разин С.В., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Получение мощных сверхширокополосных радиоимпульсов с помощью резонансных формирователей. // *Письма в Журнал технической физики*. 1991. Т. 17. № 13. С. 37.
4. Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г., Ваулин В.А., Слинко В.Н. Источник мощного СВЧ излучения наносекундной длительности трехсантиметрового диапазона длин волн. // *Приборы и техника эксперимента*. 2009. № 4. С. 183.
5. Ваулин В.А., Пересыпкин А.С., Слинко В.Н., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Резонансный СВЧ-компрессор с полупроводниковым переключателем. // *Известия вузов. Физика*. 2013. Т. 56. № 11-2. С. 235-237.
6. Чумерин П.Ю., Слинко В.Н., Ваулин В.А., Ховаев А.Ю. Формирование сверхширокополосного импульсного излучения метрового диапазона длин волн методом резонансной компрессии. // *Известия вузов. Физика*. 2007. № 10-3. С. 110.
7. Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Формирователь гигаваттного наносекундных СВЧ импульсов с применением временной компрессии энергии излучения магнетрона. // *Приборы и техника эксперимента*. 2000. № 3. С. 85.
8. Диденко А.Н., Винтизенко И.П., Мащенко А.И., Рябчиков А.И., Фоменко Г.П., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Резонансная компрессия СВЧ-импульсов на выходе релятивистского магнетрона. // *Доклады Академии наук*. 1999. Т. 366. № 5. С. 619.

**Для цитирования:**

Шошин Е.Л. Характеристики рассеяния уголкового отражателя с поляризационной трансформацией при облучении СВЧ радиосигналами микросекундной и наносекундной длительности. // *Журнал радиоэлектроники*. – 2024. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.2.10>