

## **Фокусировка сверхширокополосных сигналов линзой Френеля**

*Рассматривается возможность использования зеркала или линзы Френеля для фокусировки сверхширокополосных (СШП) сигналов. Показано, изначально узкополосная такое устройство с высокой добротностью хорошо фокусирует сигналы, основная часть спектра которых большей своей частью, укладываемой в первую полосу пропускания. Возникающие искажения корректируются с помощью винеровской фильтрации. При уменьшении числа используемых зон Френеля устройство обретает относительно более низкую добротность и, конечно, несколько хуже фокусирует излучение, но при использовании винеровской фильтрации реализует практически полностью неискаженный прием СШП сигналов.*

**Ключевые слова:** узкополосная линза Френеля, СШП сигналы, обратная задача, винеровская фильтрация, добротность

Сверхширокополосные (СШП) сигналы отличаются очень широкой полосой занимаемых частот и, как правило, имеют форму импульсных сигналов. СШП сигналы начинают все более широко применяться на практике – радиолокация, радиотомография, связь []. Сдерживающим фактором является то, что практически вся радиоэлектроника еще остается узкополосной. Если проблема генерации СШП сигналов более или менее уже решена, то проблема их приема остается «узким» местом. Здесь существуют два альтернативных подхода - с использованием стробоскопических приемников и приемников реального времени. Оба эти подхода достаточно сложны. В настоящем докладе предлагается вариант решения проблемы с использованием узкополосных систем при совместном применении технологии решения обратных задач [1-7]. В качестве примера узкополосного устройства рассматривается линза или зеркало Френеля. Большим его достоинством является возможность усиления сигналов без каких-либо энергетических затрат [8-12].

Зонная теория Френеля гласит, что всё пространство вокруг источника излучения (А) и точки наблюдения (В), может быть разделено на так называемые зоны Френеля, имеющие форму концентрических эллипсоидов. На границах двух таких соседних зон волна имеет разность фазы равную  $\pi$ . Применение зонной теории позволяет конструировать плоские фокусирующие линзы и зеркала (FZP). В линзе Френеля между источником и приёмником излучения помещается экран, который экранирует либо все четные, либо все нечетные зоны. В случае зеркала Френеля используется фокусировка отраженного сигнала в зеркальной точке В<sub>г</sub> (рис. 1).

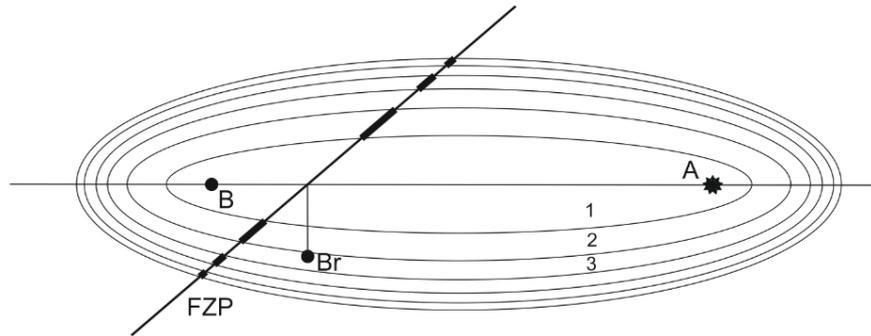


Рис. 1. Зоны Френеля и зонная фокусирующая пластинка FZP

Таким образом, в точке приёма реализуется синфазное сложение вкладов от работающих зон Френеля. Помимо этого, существует возможность повышения качества фокусировки, путём профилирования поверхности рефлектора (рис. 2). Так реализуется синфазное сложение вкладов от всех зон Френеля.

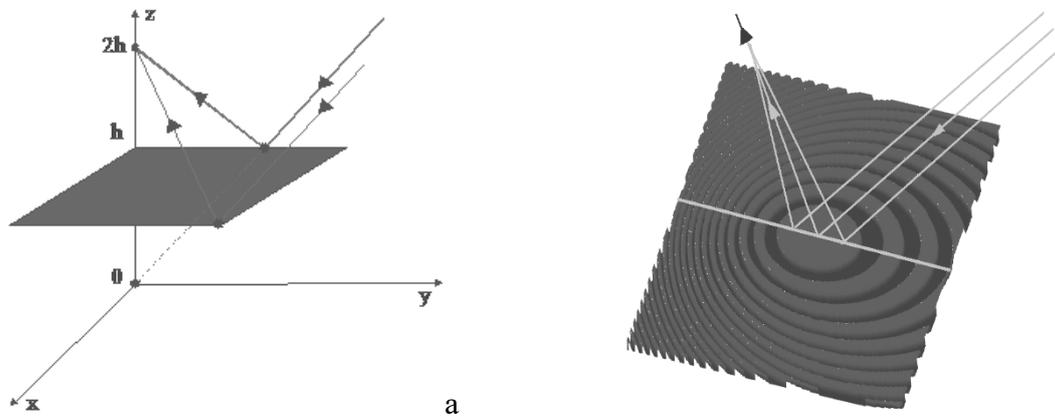


Рис. 2. Моделирование рефлектора: а – геометрия задачи; б – профиль рефлектора

Поясним кратко технологию расчета зеркала Френеля. Пусть в свободном пространстве в заданной декартовой системе координат под некоторым углом  $\alpha$  к оси  $z$  падает волна с волновым вектором  $\mathbf{k} = (-k \sin \alpha, 0, -k \cos \alpha)$ , модуль которого  $k = 2\pi f/c$  (Рис. 2а). Начало координат совмещено с зеркальной точкой ожидаемого фокуса. Отражающая плоскость расположена на расстоянии  $h$  от плоскости  $xy$ . Будем считать фазовый набег по осевой линии рефлектора нулевым:  $\varphi_0 = \mathbf{k}\mathbf{r}_0 = 0$ . Тогда фазовый набег волны, отраженной от произвольной точки рефлектора  $\mathbf{r} = (x, y, h)$  будет определяться как

$$\varphi = k\mathbf{r} + \mathbf{k}\mathbf{r} = k(\sqrt{x^2 + y^2 + h^2} - x \sin \alpha - h \cos \alpha)$$

При этом условие

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0 = m\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

определяет границы расположения зон Френеля. Четные значения  $m$  соответствуют синфазным зонам Френеля, а нечетные значения – противофазным. В общем случае, форма этих зон представляют собой концентрические эллипсы, а в случае плоской волны – параболоиды. Если просто устранить вклад в общее поле в точке наблюдения либо синфазных, либо противофазных зон можно добиться эффекта фокусировки плоским отражателем. Если же еще изменить знак вклада, например, противофазных зон, путем рифления поверхности рефлектора (рис. 2б), можно добиться усиления эффекта фокусировки и увеличения интенсивности поля в точке фокуса дополнительно в 4 раза.

Подобным образом рассчитывается и линза Френеля. Как видно из приведенных соотношений форма зеркала и линзы Френеля существенным образом зависит от длины волны  $\lambda$ , а значит, соответствующее устройство является узкополосным.

Для расчета частотной характеристики, например, линзы Френеля воспользуемся принципом Гюйгенса-Френеля. Зафиксируем угол падения излучения  $\alpha = 0^\circ$ . Тогда зоны Френеля примут вид концентрических окружностей. Проведем расчет поля в области фокуса с использованием интеграла Кирхгофа:

$$E(\mathbf{r}) = -2 \iint_S E_0(\mathbf{r}_s) w(\mathbf{r}_s) \frac{d}{dz_s} G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s) dS,$$

где весовой множитель  $w(\mathbf{r}_s)$  равен 1 и 0 для синфазных или противофазных зон, соответственно, а функция Грина определяется как

$$G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s) = -\exp\{ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|\} / 4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|.$$

Приведенная формула представляет собой интегральную свертку, которая вычисляется с использованием прямого и обратного преобразований Фурье. Для функции Грина используем спектрального разложения Вейля [2]:

$$\frac{d}{dz} G(\mathbf{r}) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \iint \exp(iz\sqrt{k^2 - u^2 - v^2}) \exp\{i(ux + vy)\} dudv.$$

На рис. 3 показана частотная характеристика рефлектора Френеля в случае удержания 13 зон. Фокусное расстояние равнялось 30 см, а рабочая частота была задана как  $f = 10$  ГГц. Видно, что на частотах  $3f$  и  $5f$  также наблюдаются фокусировка. Физически это связано с тем, что на этих частотах вклады отрезков спиралей Корню подобны вкладам на основной частоте.

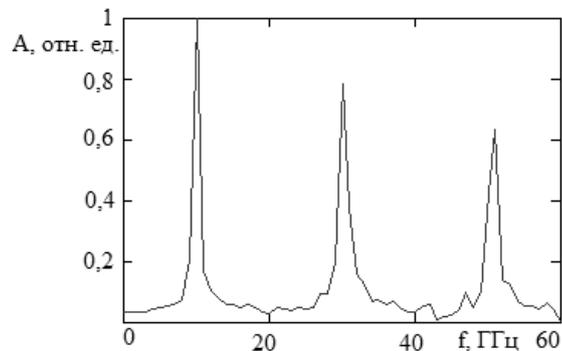


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика рефлектора Френеля

При фокусировке СШП импульсов линзой или зеркалом Френеля неизбежно возникнут искажения сигналов. Так при спектре сигнала занимающим полосу до 30 ГГц работать будет только область вблизи первого участка фокусировки, и тогда принимаемый сигнал станет квазиузкополосным. Форма такого сигнала подобна синусоиде. Однако, зная передаточную функцию фокусирующего зеркала можно восстановить реальную форму СШП сигнала (рис. 4). Для этого достаточно использовать винеровскую фильтрацию с регуляризацией [13-15]. При этом в реконструируемом сигнале (б) наблюдаются следы синусоидальности.

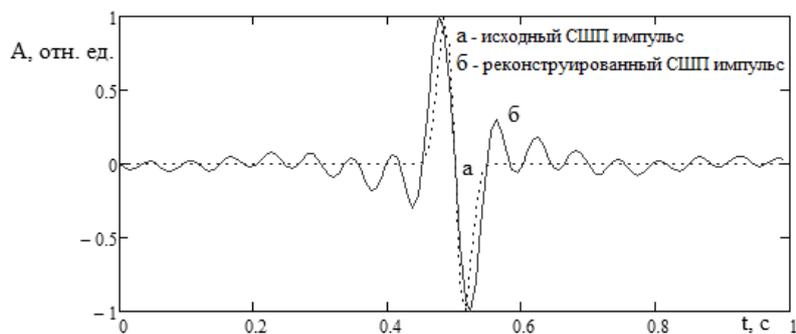


Рис. 4. Временная форма СШП сигнала

Наблюдаемый результат объясняется не полным восстановлением спектра исходного сигнала (рис. 5).

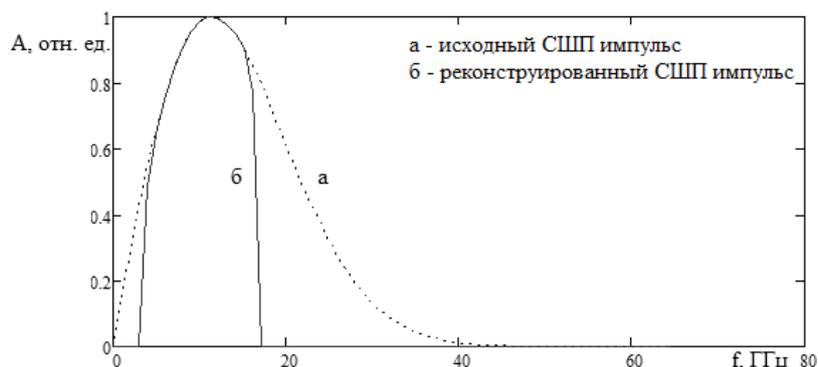


Рис. 5. Спектры сигналов

Сказанное выше подсказывает направление для дальнейшего развития предложенной технологии, когда СШП сигнал имеет еще более широкую рабочую полосу частот, например, от 0 до 60 ГГц (рис. 6).

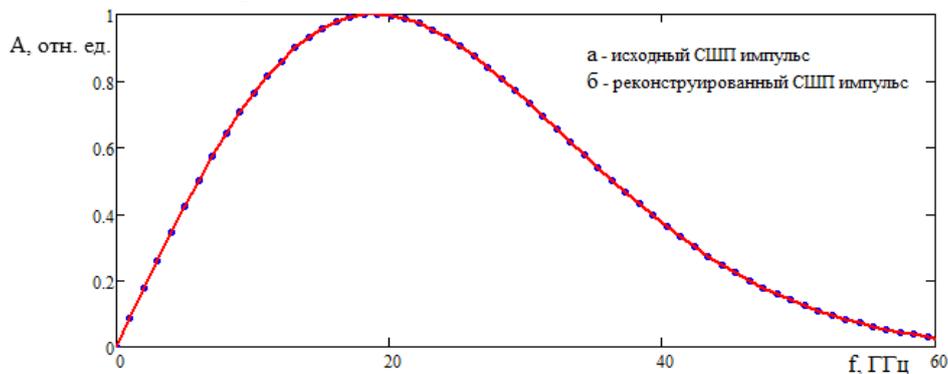


Рис. 6. Спектры сигналов

В этом случае необходимо воспользоваться уже тремя частотными полосами фокусировки. Для улучшения результата необходимо несколько понизить добротность возникающих резонансов фокусировки. Это обеспечивается простым уменьшением используемых рабочих зон Френеля. При уменьшении числа зон до трех частотная характеристика зеркала Френеля имеет вид, показанный на рис. 7.

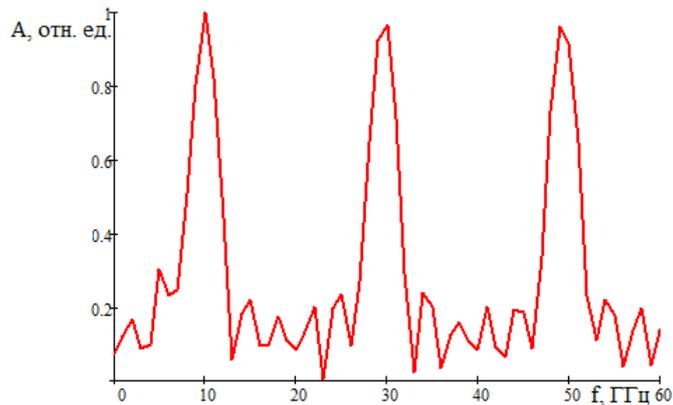


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика зеркала Френеля из трех зон

Регистрируемый импульс при этом существенно искажается (рис. 8), но использование винеровской фильтрации приводит к практически полному восстановлению формы СШП импульса. При этом восстанавливается и спектр принимаемого импульса (рис. 6).

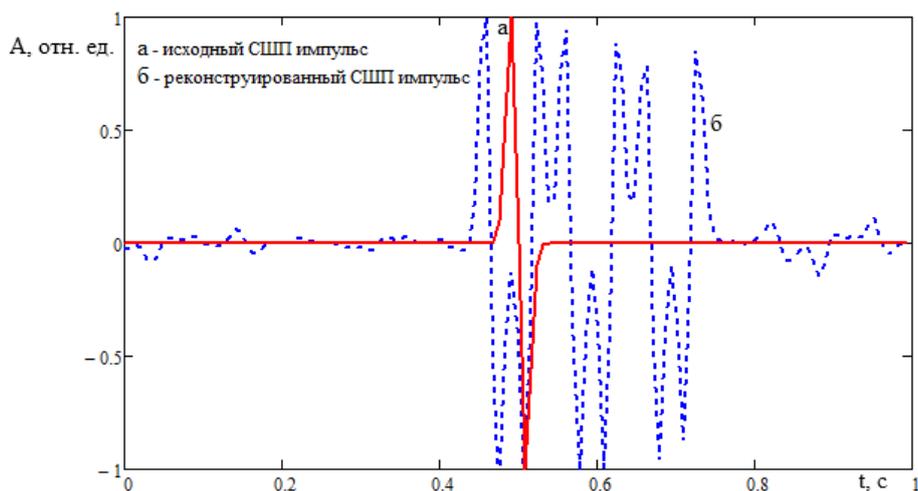


Рис. 8. Временная форма СШП сигнала

Таким образом, проведенное исследование показывает, что узкополосное устройство – линза или зеркало Френеля при небольшом числе используемых зон может быть использовано для приема СШП сигналов. Оказывается достаточным использовать известное решение обратной задачи – винеровскую фильтрацию, компенсирующую провалы в передаточной функции устройства Френеля.

Предложенное решение может найти приложение, например, при радиолокации, при космическом мониторинге земли и для повышения качества связи, когда использование больших параболических антенн затруднено или даже невозможно.

Результаты исследования получены при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

#### Библиографический список

1. Локшин Г.Р. Основы радиооптики / Г.Р. Локшин. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 108 с.
2. Виноградова М.Б. Теория волн / М.Б. Виноградова, О.В. Руденко, А.П. Сухоруков. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
3. Ахманов С.А. Физическая оптика / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – Изд-во "Наука", 2004. – 656 с.

4. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн /ред.: Яковлева. Изд. Стереотип. – М.: ЛЕНАНД, 2017.- 496 с.
5. Yakubov V. P., Shipilov S.E., Antipov V.B., Ponomarev S. V., Kamenev A., Kharapudchenko O.V. Frenel flat reflector with focusing capability //Известия вузов. Физика. 2015. Vol. 58, № 10/3. P. 228-231.
6. Yakubov V. P., Shipilov S. E., Sukhanov D. Ya., Klokov A. V. Wave tomography / ed. by V. P. Yakubov. – Tomsk: Scientific Technology Publishing House, 2017. – 248 p.
7. Якубов В.П., Беличенко В.П., Фисанов В.В. Основы электродинамики излучения и его взаимодействия с веществом: Учебное пособие. Томск: Изд-во НТЛ, 2010. - 296 с.
8. Шипилов С.Э., Якубов В.П., Антипов В.Б., Каменев А. Плоский рефлектор для тропосферной связи //Системы связи и радионавигации. Сборник тезисов. Красноярск, 2015. С. 30-34.
9. Yakubov V.P., Kamenev A.V., Ponomarev S.V. Spherical lens-reflector for aerospace communication //Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2017), 22-25 may 2017, St. Petersburg : proceedings. St. Peterburg, 2017. P. 3895-3899.
10. Антипов В.Б. Цыганок Ю.И., Шипилов С.Э., Якубов В.П. СВЧ антенна с фокусирующей зонной пластинкой // Патент РФ № 154066 (ПМ, 10.08.2015).
11. Шипилов С.Э., Еремеев А., Каменев А., Якубов В.П. Управляемая фокусировка микроволнового излучения //Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 8/3. С. 49-53.
12. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Антипов В.Б., Еремеев А.И., Каменев А.В. Управляемая фокусировка Френеля для радиотомографии //26-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". (КрыМиКо 2016). Севастополь, 4 - 10 сентября 2016 г. Материалы конф. в 13 т. Том 10. Москва; Минск; Севастополь, 2016. С. 2308-2314.
13. Якубов В.П., Шипилов С.Э. Обратные задачи радиофизики: учебное пособие / под ред. В.П. Якубова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 164 с.
14. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография: достижения и перспективы: монография. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 264 с.
15. Webb G.W. Variable Reference Phase in Diffractive Antennas / G.W. Webb, I.V. Minin, O.V. Minin // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2011. – Vol.53, no. 2. – pp. 77-94.