



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.2.2>

УДК: 621.39

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ

Ю.Э. Корчагин, К.Д. Титов, Е.Э. Головацкая

Воронежский государственный университет
394018, г. Воронеж, ул. Университетская площадь, д. 1

Статья поступила в редакцию 8 января 2023 г.

Аннотация. Исследованы понятия параметра узкополосности и показателя широкополосности при излучении и обработке сверхширокополосных сигналов, сформулированы основные особенности классификации сигналов, а также их достоинства и недостатки. Выполнена оценка влияния параметра узкополосности на характеристики передачи и приёма сверхширокополосных сигналов, а также сформулированы рекомендации по повышению эффективности их применения в прикладных задачах радиофизики и электроники.

Ключевые слова: параметр узкополосности, показатель широкополосности, сверхширокополосные сигналы, функция спектральной плотности, вероятность пропуска сигнала.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00452, <https://rscf.ru/project/23-21-00452/>.

Автор для переписки: Титов Константин Дмитриевич, titovkd@gmail.com

Введение

Большинство традиционных радиофизических систем работают в узкой полосе частот и используют в качестве несущего колебания для передачи информации гармонические сигналы. Однако, узкая полоса частот ограничивает информативность радиофизических систем, поскольку количество информации, передаваемой в единицу времени, прямо пропорционально этой полосе [1].

Развитие телекоммуникационных систем в основном базируется на расширении спектра и повышении уровня модуляции используемых для передачи информации сигналов. Благодаря этому в настоящее время все больше проявляется тенденция в создании новых и усовершенствовании существующих радиотехнических систем, с целью повышения пропускной способности, достижения высокой помехозащищенности и др. В последние годы сверхширокополосные (СШП) сигналы успешно применяются в различных областях науки и техники. Основное преимущество СШП перед традиционными узкополосными и широкополосными сигналами заключается в том, что сигналы переносят в $\mu/\mu_n \gg 1$ раз большее количество информации (здесь μ и μ_n – показатели широкополосности СШП и узкополосного сигналов соответственно [2]), а также обладают более высокой разрешающей способностью в радиолокационных системах. Одним из дополнительных преимуществ СШП сигналов является высокая скрытность из-за малого значения удельной спектральной плотности мощности, что затрудняет обнаружение таких сигналов [3]. Платой за получаемые преимущества является принципиальная неприменимость для СШП сигналов как традиционных методов генерации, излучения, приема и обработки сигналов, так и соответствующих технических средств, основанных на преобразовании Фурье, использовании резонансных свойств элементов и устройств.

При этом в литературе существует множество определений СШП сигнала [1-3] и неясно, во-первых, при каком именно показателе широкополосности сигнал можно считать СШП в задачах статистической радиофизики [2], а во-

вторых, отсутствует количественное представление о степени влияния показателя широкополосности на эффективность передатчиков и приёмников СШП сигналов, т.е. какое значение наиболее целесообразно использовать при проектировании радиотехнических устройств.

1. Основные понятия и определения

Под СШП сигналом понимают [1] сигнал, показатель широкополосности μ которого удовлетворяет условию $\mu_{\min} \leq \mu < 2$ и задается соотношением:

$$\mu = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = 2 \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\max} + \omega_{\min}}, \quad (1)$$

где ω_0 , ω_{\min} , ω_{\max} – средняя, минимальная и максимальная частоты функции спектральной плотности (ФСП) одномерного преобразования Фурье данного сигнала $s(t)$, а $\Delta\omega$ – ширина полосы частот сигнала.

Если полоса частот $\Delta\omega$ и частота ω_0 сигнала удовлетворяют условию:

$$\Delta\omega \ll \omega_0, \quad (2)$$

то сигнал (2) является узкополосным.

Согласно определению комиссии управления перспективных военных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Министерства обороны США (DARPA) $\mu_{\min} = 0.25$, а ω_{\min} и ω_{\max} следует находить по уровню -20 дБ уменьшения ФСП относительно главного максимума. В то же время определение Федеральной комиссии связи США Federal Communication Commission (FCC), предлагает считать $\mu_{\min} = 0.20$, а ω_{\min} и ω_{\max} определять по уровню -10 дБ, причем ширина полосы частот, занимаемая СШП сигналом, должна удовлетворять условию $\Delta\omega \geq 500$ МГц. Тогда сигналы с $\mu = 2$ относятся к СШП видеосигналам (сверхкороткий импульс без несущей), с $2 > \mu \geq 0.2$ – к СШП сигналам, с $0.2 > \mu \geq 0.01$ – к широкополосным, а с $\mu \leq 0.01$ – к узкополосным сигналам [1]. Естественно, показатель широкополосности также будет оказывать влияние и на характеристики передачи и приема широкополосных сигналов с большой относительной полосой. Однако, такое

влияние на СШП сигналы будет гораздо сильнее, а для узкополосных сигналов им и вовсе можно пренебречь.

Среди множества СШП сигналов выделяют отдельный класс – СШП квазирадиосигналы (КРС) [2], определяемые аналитически аналогично узкополосным радиосигналам:

$$s(t) = a f(t) \cos[\omega_0 t - \varphi_0] \cdot [I(t) - I(t - \tau)], \quad I(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где a , φ_0 , ω_0 – амплитуда, начальная фаза и частота сигнала, а $f(t)$ – модулирующая функция, описывающая его форму [1]. При этом, хоть и структура СШП КРС подобна узкополосным радиосигналам, условие относительной узкополосности (2) для них может не выполняться. Следует отметить, что в рамках этой терминологии класс узкополосных радиосигналов является частью класса СШП КРС. При этом известные результаты по решению задачи обработки узкополосных радиосигналов не могут быть использованы применительно к СШП КРС, поскольку при получении известных результатов существенно используется условие относительной узкополосности (2).

В литературе [2] для описания СШП КРС введен более физичный, по сравнению с показателем широкополосности, параметр узкополосности $\kappa = \omega_0 \tau / 2\pi = 1/\mu$, равный числу периодов гармонического колебания, уместяющихся на временном отрезке $0 \leq t \leq \tau$, равном длительности сигнала, с помощью которого можно определить степень узкополосности сигнала. С учетом описанной выше терминологии, ввести классификацию можно и через параметр узкополосности:

$\kappa = 0.5$ – СШП видеосигнал,

$0.5 > \kappa \geq 5$ – СШП сигнал (рис. 1а, 1б),

$5 > \kappa \geq 100$ – широкополосный сигнал,

$\kappa > 100$ ($\kappa \gg 1$) – узкополосный сигнал (рис. 1в).

Поскольку основным параметром, определяющим СШП КРС, является параметр узкополосности, можно сделать вывод о том, что модель СШП КРС является наиболее общей и включает в себя все известные модели сигналов –

узкополосные, широкополосные, сверхширокополосные радио-, видеосигналы, как совокупность частных случаев в зависимости от численного значения параметра узкополосности.

Пример вида СШП КРС (3) во временной области представлен на рис. 1, который может содержать часть гармонического колебания на интервале длительности (рис. 1а, $\kappa = 0.3$), несколько колебаний (рис. 1б, $\kappa = 3$) или большое число гармонических колебаний (рис. 1в, $\kappa \gg 1$).

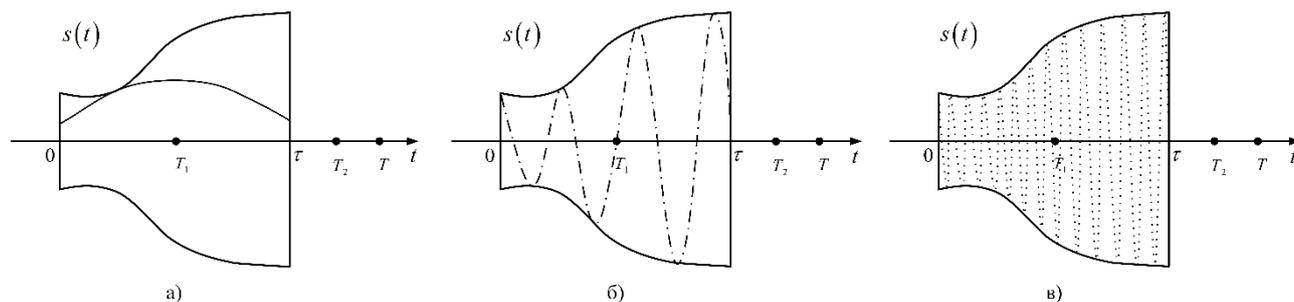


Рис. 1. Вид радиосигнала во временной области при различных значениях параметра узкополосности

Из рисунка видно, что при $\kappa < 1$ описание СШП сигналов с помощью понятий огибающей и начальной фазы не совсем корректно, однако, сигналы с $\kappa < 0.5$ рассматривать теоретически возможно. При этом, существенную роль на вид полученного сигнала оказывает параметр φ_0 . Судить о том, что на рис. 1 изображена часть радиосигнала можно лишь зная аналитический вид функции (3), которая его описывает. Переменные a , φ_0 , ω_0 в выражении (3) являются параметрами гармонического колебания, используемого для формирования СШП КРС. Однако, для краткости далее будем называть a , φ_0 и ω_0 амплитудой, начальной фазой и частотой СШП КРС (3).

Соответствующим подбором начальных фаз и формы огибающей сигнала, можно ввести в рассмотрение сигналы с $\kappa < 0.5$. В таком случае модель СШП КРС позволяет расширить классические определения для СШП сигналов, описанные в литературе [1,3], при которых параметр узкополосности может принимать значения $0 < \kappa < 5$ (или $\mu > 2$). При таком подходе возникает вопрос, какое значение κ является оптимальным для использования в СШП системах, особенно при $\kappa < 0.5$, поскольку возникает противоречие: чем больше параметр

узкополосности, тем сигнал проще излучить, но уже спектр сигнала, а чем он меньше – тем шире спектр (соответственно выше пропускная способность), но возникают сложности с эффективным излучением такого сигнала.

2. Исследование влияния параметра узкополосности на характеристики передачи сигнала

Рассмотрим амплитудно-частотный спектр (АЧС) СШП КРС (3). Применяя к нему преобразование Фурье, получаем выражение для спектральной плотности:

$$S(y) = \frac{ja_0}{2\omega_0} \left[\frac{\exp(-j\varphi_0) \cdot (\exp\{-j2\pi\kappa(y-1)\} - 1)}{y-1} + \frac{\exp(j\varphi_0) \cdot (\exp\{-j2\pi\kappa(y+1)\} - 1)}{y+1} \right], \quad y = \omega / \omega_0. \quad (4)$$

На рисунке 2 представлена зависимость $U(y) = |S(y)| / \max |S(y)|$ при $\varphi_0 = 0$ и тех же значениях параметра узкополосности, что и на рисунке 1.

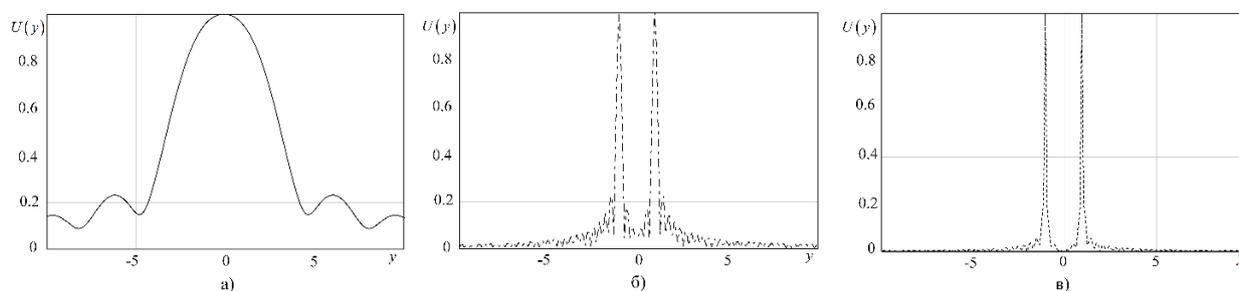


Рис. 2. Вид АЧС радиосигнала при различных значениях параметра узкополосности

Из рисунка 2 видно, что чем параметр узкополосности меньше, тем спектр сигнала шире. На рис. 2а максимум спектральной плотности сосредоточен вблизи нулевой частоты, следовательно при излучении такого сигнала будут большие потери.

Поскольку существенную роль на вид полученной огибающей, и как следствие спектра сигнала, оказывает параметр φ_0 , его изменением можно добиться смещения максимума ФСП. Такой подход, в отличие от использования модели видеосигналов, позволяет улучшить эффективность излучения СШП

сигналов за счет использования параметра узкополосности $0.1 < \kappa < 0.5$ с соответствующим подбором начальных фаз. На рисунке 3 представлен вид СШП КРС с параметром узкополосности $\kappa = 0.3$ во временной (рис. 3а) и частотной (рис. 3б) областях при различных значениях начальных фаз.

На рисунке 3а представлены фрагменты трети одного гармонического колебания ($\kappa = 0.3$). На рисунке 3б штрихпунктирной линией показана зависимость спектральной плотности сигнала при начальной фазе $\varphi_0 = 4\pi/5$, при которой достигаются лучшие условия излучения сигнала. Таким образом, можно сделать вывод, что модуль ФСП СШП КРС существенным образом зависит от значения параметра φ_0 . Такой подход позволяет исследовать сигналы с более широким спектром, чем сигналы, называемые СШП в классической литературе, при более высоких показателях эффективности их излучения, что является ключевой проблемой для таких сигналов.

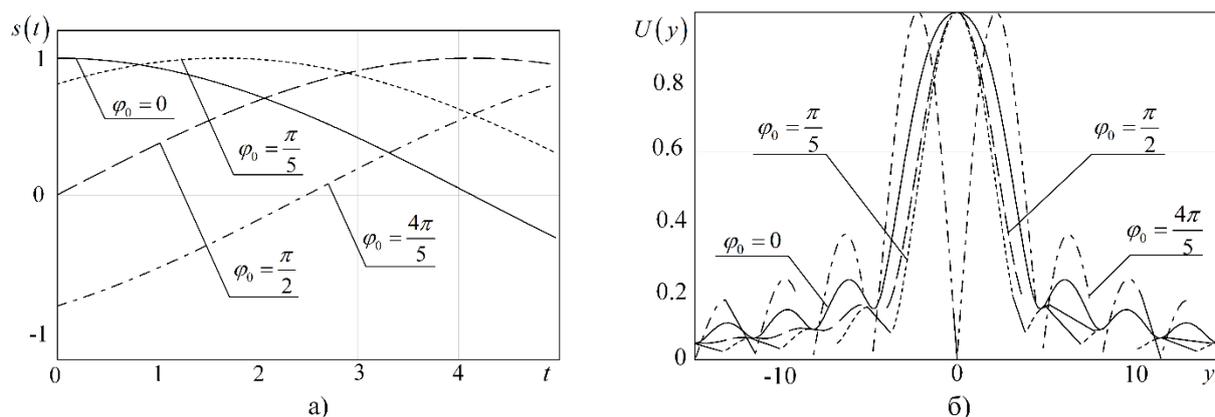


Рис. 3. Вид СШП КРС во временной (а) и частотной (б) областях

Определить значение начальной фазы СШП КРС, при котором достигается максимум спектральной плотности при заданном параметре узкополосности, возможно решив уравнение или графически. На рисунке 4 представлены трехмерный график зависимости ФСП от параметра узкополосности и начальной фазы (рис. 4а) и контурный график зависимости ФСП от относительной частоты и начальной фазы сигнала при параметре узкополосности равном $\kappa = 0.3$ (рис. 4б).

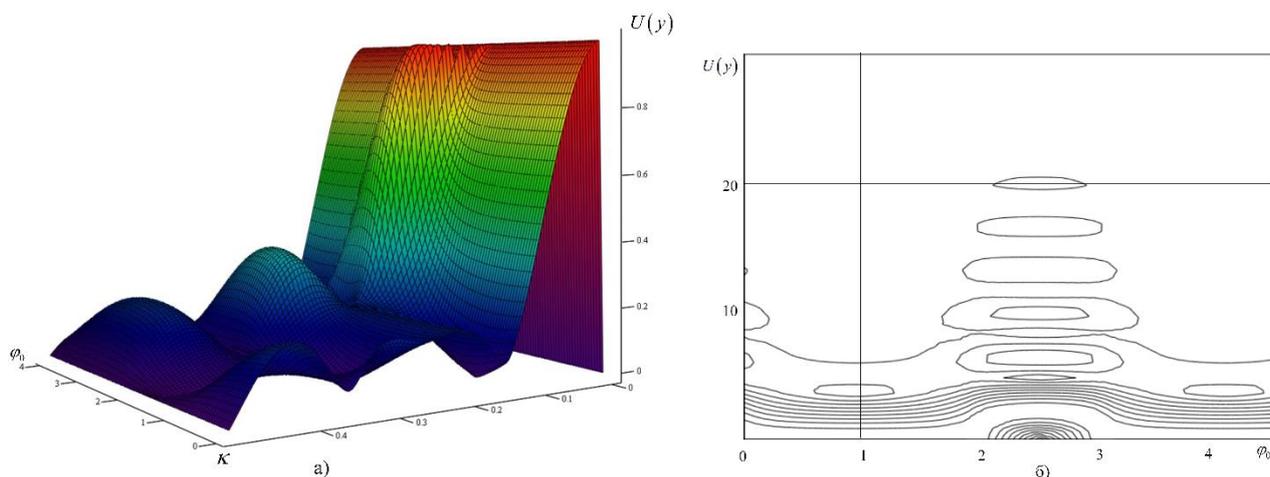


Рис. 4. График зависимости ФСП от параметра узкополосности и начальной фазы (а) и от относительной частоты и начальной фазы сигнала (б)

Из рисунка 4 видно, что максимум спектральной плотности достигается при начальной фазе сигнала $\varphi_0 = 4\pi/5$ и его значение уменьшается с ростом относительной частоты. Из представленных зависимостей можно определить оптимальные соотношения параметра узкополосности и начальной фазы, при которых достигается наибольшее значение спектральной плотности на заданной частоте. Из рисунка видно, что с ростом параметра узкополосности, максимум спектральной плотности смещается по оси начальной фазы. Наибольшее смещение наблюдается при $\kappa < 1$, после чего становится незначительным. Например, при изменении параметра узкополосности с $\kappa = 0.3$ до $\kappa = 0.1$ максимум спектральной плотности смещается примерно на $\pi/5$. Таким образом, при выборе параметров СШП КРС с $\kappa < 1$ нужно точно рассчитывать значение начальной фазы, а при $\kappa \geq 1$ им можно пренебречь.

3. Исследование влияния параметра узкополосности на характеристики приема сигнала

Для оценки влияния параметра узкополосности на эффективность обработки СШП КРС, рассмотрим квазиравдоподобный обнаружитель, осуществляющий прием СШП КРС с неизвестными амплитудой и начальной фазой на фоне гауссовского белого шума [2].

При построении графических зависимостей полагалось, что порог h выбирался по критерию Неймана-Пирсона при фиксированном уровне вероятности ложной тревоги равном 10^{-3} . На рисунке 5 представлены зависимости вероятности пропуска сигнала от параметра узкополосности при различных значениях начальной фазы в разном масштабе: на рис. 5а – $0 > \kappa \geq 10$, на рис. 5б – $0 > \kappa \geq 1$. Сплошные кривые соответствуют начальной фазе $\varphi_0 = 0$, штриховые – $\varphi_0 = \pi/5$, штрихпунктирные – $\varphi_0 = \pi/2$, пунктирные – $\varphi_0 = 4\pi/5$. При построении зависимостей было введено понятие отношение сигнал/шум (ОСШ) $z^2 = 2a_0^2\tau/N_0 = 5$ на выходе приёмника максимального правдоподобия для СШП КРС с амплитудой a_0 , длительностью τ , односторонней спектральной плотностью белого гауссовского шума N_0 и прямоугольной модулирующей функцией [2].

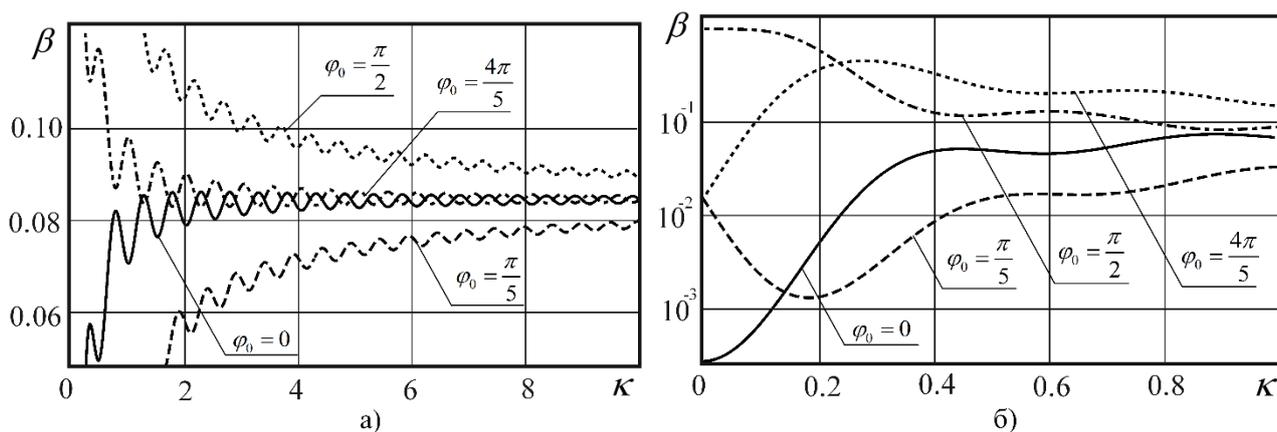


Рис. 5. Зависимость вероятности пропуска сигнала от параметра узкополосности

Из рисунка 5а видно, что с ростом параметра узкополосности влияние на вероятность пропуска сигнала снижается, что согласуется с результатами на рисунке 4. Значение начальной фазы сигнала оказывает сильное влияние на эффективность обнаружения для $\kappa < 5$ и с ростом параметра узкополосности кривые сходятся к одному значению вероятности пропуска. На рисунке 5б показано, что разброс значений вероятности пропуска в диапазоне $0 > \kappa \geq 1$ в зависимости от значений начальной фазы может достигать нескольких порядков. Исходя из выбранного в предыдущем разделе соотношения параметра

узкополосности и начальной фазы $\kappa = 0.3$ и $\varphi_0 = 4\pi/5$ видно, что эффективность обнаружения такого сигнала будет невысокой относительно других значений начальных фаз. Таким образом, в зависимости от характеристик передатчика и приемника, необходимо решать задачу поиска оптимальных параметров для одновременного обеспечения максимума спектральной плотности при минимуме вероятности пропуска сигнала.

На рисунке 6 представлены зависимости вероятности пропуска сигнала от ОСШ z (рис. 6а) и от начальной фазы сигнала φ_0 (рис. 6б) при различных значениях параметра узкополосности. На рисунке 6а сплошная кривая соответствует параметру узкополосности $\kappa = 0.01$, штриховая – $\kappa = 0.3$, штрихпунктирная – $\kappa = 3$, пунктирная – $\kappa = 100$. На рисунке 6б сплошная кривая соответствует параметру узкополосности $\kappa = 0.01$, штриховая – $\kappa = 0.3$, штрихпунктирная – $\kappa = 1$, пунктирная – $\kappa = 3$. При расчете кривых полагалось $\varphi_0 = 4\pi/5$ (рис. 6а), $z = 5$ (рис. 6б).

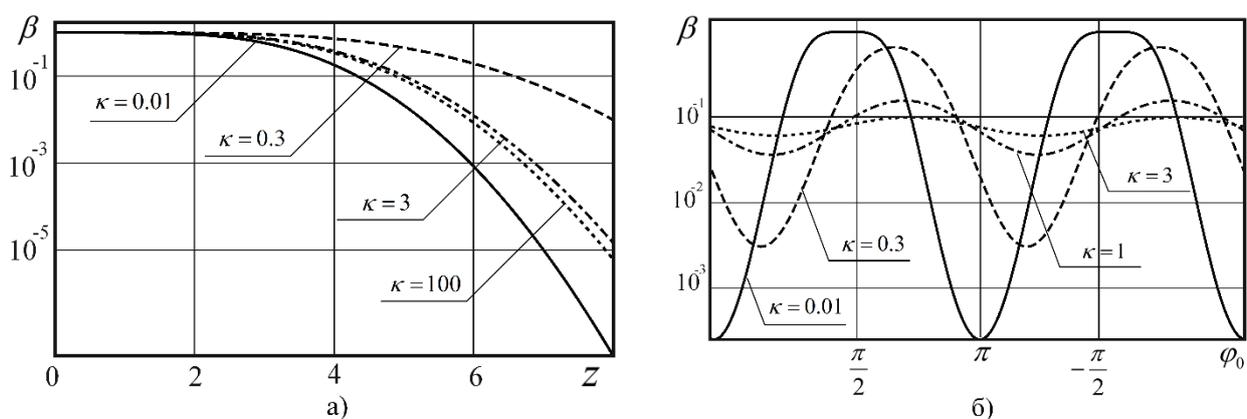


Рис. 6. Зависимость вероятности пропуска сигнала от ОСШ (а) и начальной фазы сигнала (б)

Из рисунка 6а видно, что лучшей эффективностью приема обладает СШП видеоимпульс (сплошная кривая), худшей – СШП КРС. Чуть более лучшей эффективностью обладают узкополосные и широкополосные сигналы. При этом, для СШП КРС с $\kappa = 0.3$ вероятность пропуска сигнала $\beta = 10^{-3}$ достигается при ОСШ $z = 8$, а вероятность $\beta = 10^{-6}$ – при $z = 11$, тогда как такие же вероятности пропуска для узкополосного сигнала достигаются при ОСШ $z = 6.5$ и $z = 8.5$

соответственно. С учетом высокой спектральной эффективности СШП КРС, при оптимально выбранной начальной фазе, сигнал может быть успешно детектирован с заданной достоверностью. Из рисунка 6б видно, что при небольших значениях параметра узкополосности выбор начальной фазы оказывает сильное влияние на вероятность пропуска сигнала, аналогично результатам анализа ФСП на рис. 4 при излучении СШП КРС. Например, при небольшом изменении параметра узкополосности с $\kappa = 0.3$ до $\kappa = 0.1$ максимум ФСП также смещается примерно на $\pi/5$. Таким образом, при выборе параметров СШП КРС с $\kappa < 1$ нужно точно рассчитывать значение начальной фазы, однако пренебрегать им можно только при $\kappa > 5$ (т.е. только для широкополосных и узкополосных сигналов).

Заключение

Проведенный анализ показал, что использование СШП КРС с малым значением параметра узкополосности позволяет использовать в радиофизических системах сигналы с более широким спектром чем сигналы, называемые сверхширокополосными в классической литературе. При этом, их использование позволяет достичь более высоких показателей эффективности излучения, что является ключевой проблемой для СШП сигналов. Характеристики приема таких сигналов, в сравнении с СШП видеоимпульсами или узкополосными сигналами, оказываются ниже. Однако за счет высокой спектральной эффективности сигнала при оптимально выбранной начальной фазе сигнал может быть успешно детектирован с заданной достоверностью относительно узкополосных сигналов при незначительно большем ОСШ. В зависимости от характеристик передатчика и приемника, необходимо решать задачу поиска оптимальных параметров для одновременного обеспечения максимума спектральной плотности при минимуме вероятности пропуска сигнала. В ходе проведенного исследования установлено, что при проектировании приемников и передатчиков выбор начальной фазы СШП КРС будет оказывать сильное влияние на эффективность и излучения, и обработки, и

пренебрегать им можно только при $\kappa > 5$. Для улучшения характеристик приемников можно провести смещение начальной фазы исходя, например, из свойств излучающей антенны или генератора КРС. Также, для снижения вероятностей ошибок можно исследовать использование различных форм огибающей сигнала и разрабатывать более совершенные статистические и нейросетевые приемники СШП КРС.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00452, <https://rscf.ru/project/23-21-00452/>.

Литература

1. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2008. Т.13. С.166-194.
2. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д. *Синтез и анализ алгоритмов обработки сверхширокополосных квазирадиосигналов*. Воронеж, Издательский дом ВГУ. 2019. 127 с.
3. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. *Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений*. Москва, Радио и связь. 1989. 192 с.

Для цитирования:

Корчагин Ю.Э., Титов К.Д., Головацкая Е.Э. Оценка влияния параметров сверхширокополосных радиосигналов на характеристики их приема и передачи. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.2.2>