

СПОСОБ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДУЛЯЦИИ ПАУЗЫ МЕЖДУ ИМПУЛЬСАМИ В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛАХ

Р. В. Антипенский, Е. Р. Антипенский, И. Х. Ерзин

ВУНЦ ВВС ВВА г. Воронеж

Поступила в редакцию 01.02.2021 г.

Аннотация. Рассматривается новый способ нелинейной модуляции паузы между импульсами в сверхширокополосных сигналах для повышения помехоустойчивости их приема в внутрикомплексных системах информационного обмена. Приводятся результаты оценки уровней боковых лепестков сжатых сигналов на выходе фильтра, согласованного с последовательностью сверхширокополосных импульсов, сформированных предлагаемым способом для функции нелинейной модуляции вида $\sin(x)$.

Ключевые слова: сверхширокополосные сигналы, оценка помехоустойчивости, нелинейная модуляция паузы.

METHOD FOR NONLINEAR PAUSE MODULATION BETWEEN PULSES IN ULTRA WIDEBAND SIGNALS

R. V. Antipensky, E. R. Antipensky, I. H. Erzin

Abstract. A new method of nonlinear pause modulation between pulses in ultra-wide-band signals to increase the noise immunity of their reception in intra-complex information exchange systems is considered. The results of estimation of the levels of side lobes of compressed signals at the filter output consistent with the sequence of ultra-wide-band pulses formed by the proposed method for the nonlinear modulation function of the form $\sin(x)$ are presented.

Keywords: ultra-wide-band signals, noise immunity estimation, nonlinear pause modulation.

ВВЕДЕНИЕ

Для организации информационного обмена в радиоэлектронных комплексах и системах применяются все более сложные сигналы, в которых для повышения скрытности работы и помехоустойчивости приема сигналов применяются различные методы модуляции и кодирования данных [1–2], среди которых все большее распространение получают системы связи на основе сверхширокополосной (СШП) импульсной радиосвязи. Авторами в работах [3–8] показано, что дальность линии СШП радиосвязи можно увеличить до 10–12 км, используя направленные антенные решетки и применяя способ линейной модуляции паузы [9], основанный на передаче единичных и нулевых информационных посылок последовательностями СШП импульсов с линейно возрастающей и линейно убывающей паузой между импульсами. Применяя дополнительную нелинейную модуляцию паузы между импульсами в последовательностях, можно добиться еще более существенного подавления боковых лепестков сжатого сигнала на выходе фильтра, согласованного с последовательностью СШП импульсов в единичном и нулевом каналах приемника. *Цель работы* — разработка нового способа нелинейной модуляции паузы, выбор и обоснование рациональных значений параметров СШП сигналов для нелинейной функции модуляции паузы вида $\sin(x)$.

© Антипенский Р. В., Антипенский Е. Р., Ерзин И. Х., 2021

1. РАЗРАБОТКА СПОСОБА НЕЛИНЕЙНОЙ МОДУЛЯЦИИ ПАУЗЫ МЕЖДУ ИМПУЛЬСАМИ В СШП СИГНАЛАХ

Наибольшее распространение при описании СШП импульсной радиосвязи нашли модели сигналов в виде производных функций Гаусса в силу их наиболее простой физической реализации. В работе в качестве базовой модели используется вторая производная импульса Гаусса [10]

$$s(t) = \left(1 - 4\pi \left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right) e^{-2\pi\left(\frac{t}{\tau}\right)^2}, \quad (1)$$

где τ — масштабирующий временной параметр, определяющий длительность СШП импульса. Так как функция (1) определена на промежутке $[-\tau/2; \tau/2]$, то для формирования СШП сигналов необходимо будет ввести временной сдвиг $-\tau/2$.

Для формирования требуемой временной задержки импульсов в последовательности, соответствующей передаче логической единицы, просуммируем предшествующие паузы в соответствии с выражением (2):

$$\Delta t_{k+1}^{(1)} = \Delta t_k + p \cdot \Delta t_1 + m \cdot f_k(t), \quad (2)$$

где p — глубина линейной модуляции, Δt_1 — время сдвига второго импульса относительно первого (начальная пауза), k — номер импульса в последовательности, $f_k(t)$ — нелинейный закон изменения паузы между импульсами, m — коэффициент глубины нелинейного сдвига. Выберем в качестве нелинейного закона модуляции функцию вида $\sin(x)$. При этом зададим частоту колебаний таким образом, чтобы один полупериод функции приходился на длительность всей последовательности СШП импульсов. С учетом этого выражение (2) запишется в виде:

$$\Delta t_{k+1}^{(1)} = \Delta t_k + p \cdot \Delta t_1 + m \cdot \sin\left(\frac{2\pi k}{N_{\text{имп}}}\right), \quad (3)$$

где $N_{\text{имп}}$ — количество СШП импульсов в последовательности, соответствующей передаче логической единицы.

Для формирования пауз между импульсами при передаче логического нуля будем уменьшать текущую паузу между импульсами, начав с максимальной паузы. Для расчёта максимальной паузы необходимо просуммировать все паузы, сформированные для единичного канала. Выражение для формирования пауз нулевого канала можно представить в виде:

$$\Delta t_{k+1}^{(0)} = \sum_{k=0}^{N_{\text{имп}}} \Delta t_k^{(1)} - p \cdot \Delta t_1 - m \cdot \sin\left(\frac{2\pi k}{N_{\text{имп}}}\right), \quad (4)$$

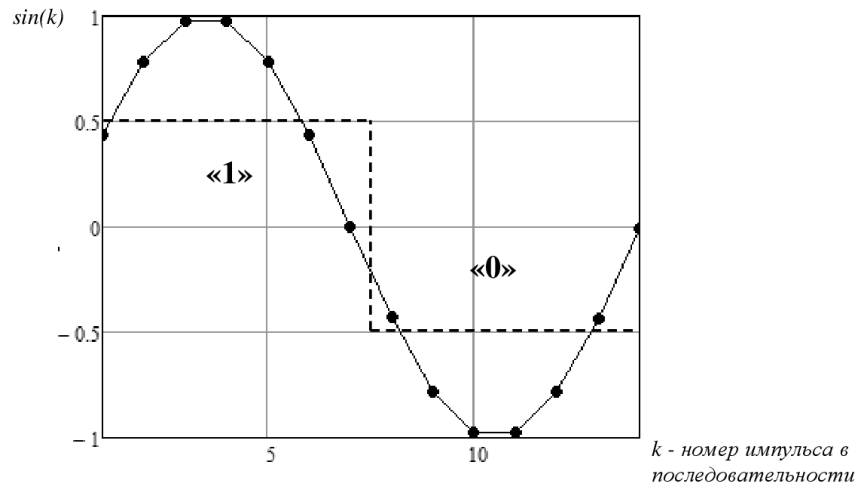
Тогда выражение для нелинейно возрастающей и нелинейно убывающей временной модулирующей функции при формировании двух последовательностей (сначала единичной затем нулевой) сверхширокополосного сигнала может быть записано в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \Delta t_{k+1}^{(1,0)} = \\ & = if \left(k \leq \left[\frac{N_{\text{имп}}^{(1,0)}}{2} \right], \Delta t_k^{(1)} + p \cdot \Delta t_1 + m \cdot \sin\left(\frac{2\pi k}{N_{\text{имп}}}\right), \sum_{k=0}^{N_{\text{имп}}} \Delta t_k^{(1)} - p \cdot \Delta t_1 - m \cdot \sin\left(\frac{2\pi k}{N_{\text{имп}}}\right) \right), \end{aligned} \quad (5)$$

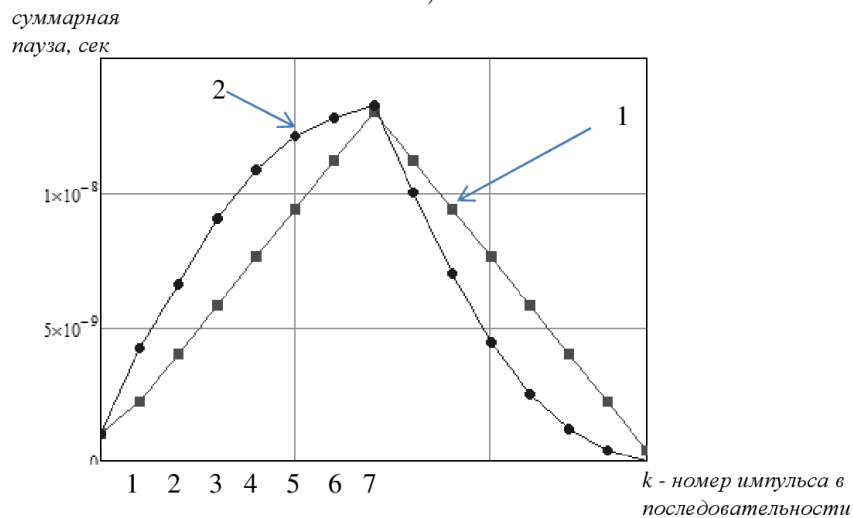
где $N_{\text{имп}}^{(1,0)}$ — количество импульсов в двух последовательно следующих друг за другом единичной и нулевой посылках, $[]$ означает выбор целой части выражения, if — условная функция вида:

$$y = \text{if} [\text{условие}, \text{выражение 1 (условие} = \text{TRUE)}, \text{выражение 2 (условие} = \text{FALSE)}]$$

На рисунке 1 представлены: а — вид нелинейной функции модуляции паузы $\sin(x)$; б — законы нарастания (убывания) паузы на временном промежутке, соответствующем передаче логических единицы и ноля для СШП сигнала, включающего 2 последовательности из семи импульсов каждая.



а)



б)

Рис. 1. а) вид нелинейной функции модуляции паузы $\sin(x)$; б) — законы нарастания (убывания) паузы на временном промежутке формирования логической единицы “1” и ноля “0” для сигнала с параметрами $\tau = 1$ нс, $\Delta t_1 = 1$ нс, $p = 1$, $m = 2 \cdot 10^{-9}$, $N_{\text{имп}} = 7$.

Под номером 1 показан линейный закон изменения пауз, под номером 2 — результирующий закон изменения пауз между импульсами для нелинейной функции вида $\sin(x)$ и параметров сигнала $\tau = 1$ нс, $\Delta t_1 = 1$ нс, $p = 1$, $m = 2 \cdot 10^{-9}$, $N_{\text{имп}} = 7$.

Выражение для формирования последовательности СШП импульсов с нелинейно возрастающей паузой, соответствующей передаче логической единицы, с учетом (1) можно пред-

ставить в виде:

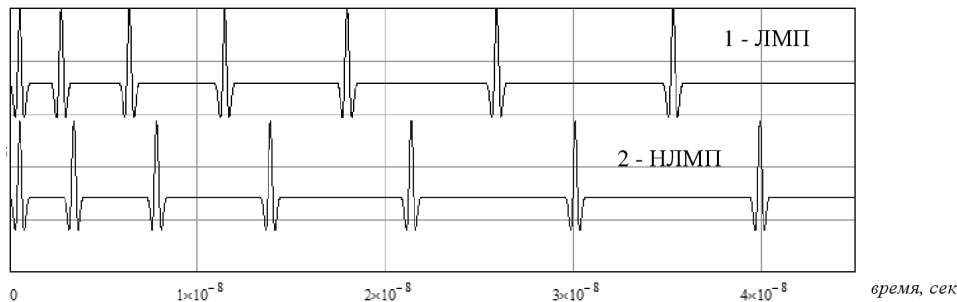
$$S_{\text{СШП}}^{(1)}(t) = \sum_{k=0}^{N_{\text{ИМП}}} \left[\left(1 - 4\pi \left(\frac{t - 0.5\tau - k\tau - \sum_{n=0}^k \Delta t_n^{(1)}}{0.5\tau} \right)^2 \right) \cdot \exp \left(-2\pi \left(t - 0.5\tau - k\tau - \sum_{n=0}^k \Delta t_n^{(1)} \right)^2 \right) \right]. \quad (6)$$

Для нелинейной функции вида $\sin(x)$ алгоритм формирования последовательности СШП импульсов с нелинейно возрастающей паузой можно представить выражением:

$$S_{\text{СШП}}^{(1)}(t) = \sum_{k=0}^{N_{\text{ИМП}}} \left[\left(1 - 4\pi \left(\frac{t - 0.5\tau - k\tau - \sum_{n=0}^k (\Delta t_n + p \cdot \Delta t_1 + m \cdot \sin(\frac{2\pi n}{N_{\text{ИМП}}}))}{0.5\tau} \right)^2 \right) \times \exp \left(-2\pi \left(t - 0.5\tau - k\tau - \sum_{n=0}^k (\Delta t_n + p \cdot \Delta t_1 + m \cdot \sin(\frac{2\pi n}{N_{\text{ИМП}}})) \right)^2 \right) \right]. \quad (7)$$

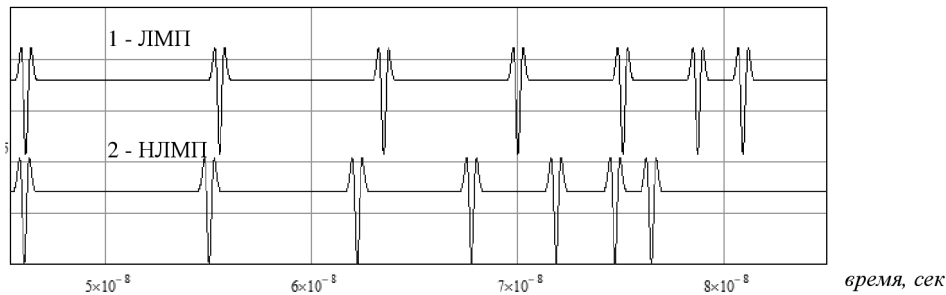
Для формирования последовательности СШП импульсов отрицательной полярности с нелинейно убывающей паузой, соответствующей передаче логического нуля, выражения в

$$S_{\text{СШП}}^{(1)}(t)$$



а)

$$S_{\text{СШП}}^{(0)}(t)$$



б)

Рис. 2. Последовательности СШП импульсов для передачи логических единицы (а) и нуля (б) для способов линейной (1) и нелинейной (2) модуляции паузы с параметрами сигнала $\tau = 1 \text{ нс}$, $\Delta t_1 = 1 \text{ нс}$, $p = 1.2$, $m = 1 \cdot 10^{-9}$, $N_{\text{ИМП}} = 7$.

общем виде (8) и для функции модуляции $\sin(x)$ (9) можно представить в виде

$$S_{\text{СШП}}^{(0)}(t) = \sum_{k=0}^{N_{\text{ИМП}}} \left[- \left(1 - 4\pi \left(\frac{t - 0.5\tau - k\tau - \sum_{n=0}^k \Delta t_n^{(0)}}{0.5\tau} \right)^2 \right) \cdot \exp \left(-2\pi \left(t - 0.5\tau - k\tau - \sum_{n=0}^k \Delta t_n^{(0)} \right)^2 \right) \right], \quad (8)$$

$$S_{\text{СШП}}^{(0)}(t) = \sum_{k=0}^{N_{\text{ИМП}}} \left[- \left(1 - 4\pi \left(\frac{t - 0.5\tau - k\tau - \sum_{n=0}^k \left(\sum_{n=0}^{N_{\text{ИМП}}} \Delta t_n^{(1)} - p \cdot \Delta t_1 - m \cdot \sin \left(\frac{2\pi n}{N_{\text{ИМП}}} \right) \right)}{0.5\tau} \right)^2 \right) \times \right. \\ \left. \times \exp \left(-2\pi \left(t - 0.5\tau - k\tau - \sum_{n=0}^k \left(\sum_{n=0}^{N_{\text{ИМП}}} \Delta t_n^{(1)} - p \cdot \Delta t_1 - m \cdot \sin \left(\frac{2\pi n}{N_{\text{ИМП}}} \right) \right) \right)^2 \right) \right]. \quad (9)$$

На рисунке 2 показаны последовательности СШП импульсов для передачи логических единицы (а) и нуля (б) для способов линейной (1) и нелинейной (2) модуляции паузы. Из рисунка видно, что применение способа нелинейной модуляции паузы (НЛМП) в данном случае (для заданной функции нелинейной модуляции $\sin(x)$) приводит к незначительному увеличению длительности единичной посылки по сравнению со способом линейной модуляции паузы (ЛМП), при этом нулевая посылка несколько уменьшается по длительности. Однако в сумме итоговая длительность двух посылок (единичной и нулевой) остается такой же, как и в способе ЛМП.

На приемной стороне будем осуществлять согласованную фильтрацию в единичном и нулевом каналах цифровым методом, выполняя дискретное обратное преобразование Фурье от произведения комплексного спектра сигнала на сопряженные комплексные частотные характеристики согласованных фильтров в каждом канале. В общем виде процедуры вычисления комплексного спектра сигнала и временной формы сигнала на выходах согласованных фильтров единичного и нулевого каналов приема могут быть представлены в виде:

$$\dot{W}_{\text{СШП}}(j\omega) = CFFT \left(S_{\text{СШП}}^{(1)}(t) + S_{\text{СШП}}^{(0)}(t) \right), \quad (10)$$

$$S_{\text{СФ}}^{(1)}(t) = Re \left[ICFFT \left(\dot{W}_{\text{СШП}}(j\omega) \cdot \overline{CFFT(S_{\text{СШП}}^{(1)}(t))} \right) \right], \quad (11)$$

$$S_{\text{СФ}}^{(0)}(t) = Re \left[ICFFT \left(\dot{W}_{\text{СШП}}(j\omega) \cdot \overline{CFFT(S_{\text{СШП}}^{(0)}(t))} \right) \right], \quad (12)$$

где $CFFT$, $ICFFT$ — стандартные функции дискретного прямого и обратного быстрого преобразования Фурье, $Re(\cdot)$ — функция, возвращающая вещественную часть комплексного аргумента в программе MathCad [11].

На рисунке 3 представлены амплитудные спектры единичных посылок СШП сигналов, сформированных способами ЛМП (1) и НЛМП (2).

Анализ представленных на рисунке 3 амплитудных спектров СШП сигналов позволяет заключить, что ширина спектра обоих сигналов соответствует ширине спектра одиночного СШП импульса, показанного пунктиром. При этом при использовании способа НЛМП (2) спектр СШП сигнала получается более равномерным по сравнению со спектром СШП

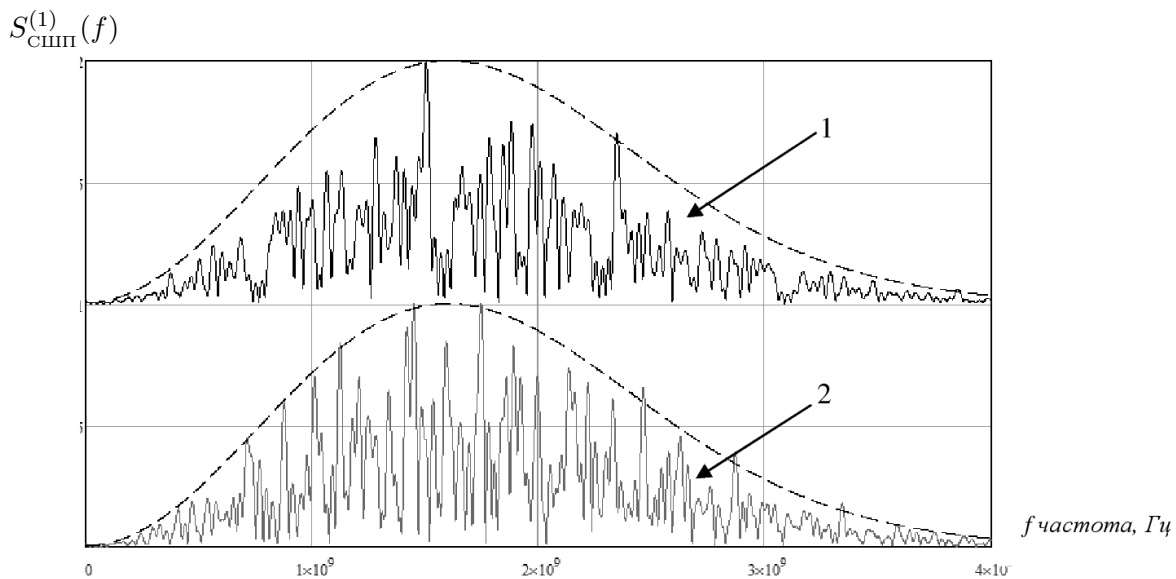


Рис. 3. Амплитудные спектры единичных посылок СШП сигналов, сформированных методом ЛМП (1) и методом НЛМП (2).

сигнала, сформированного по способу ЛМП (1), что позволяет снизить требования к равномерности АЧХ усилителей мощности сигналов в передающих устройствах. С ростом глубины нелинейной модуляции равномерность спектра возрастает.

На рисунке 4 представлены временные диаграммы формирования и согласованного приема СШП сигналов единичного канала, сформированных способами ЛМП (1) и НЛМП (2) с параметрами $\tau = 1$ нс, $\Delta t_1 = 0.9$ нс, $p = 1.6$, $m = 2.18 \cdot 10^{-9}$, $N_{\text{имп}} = 7$.

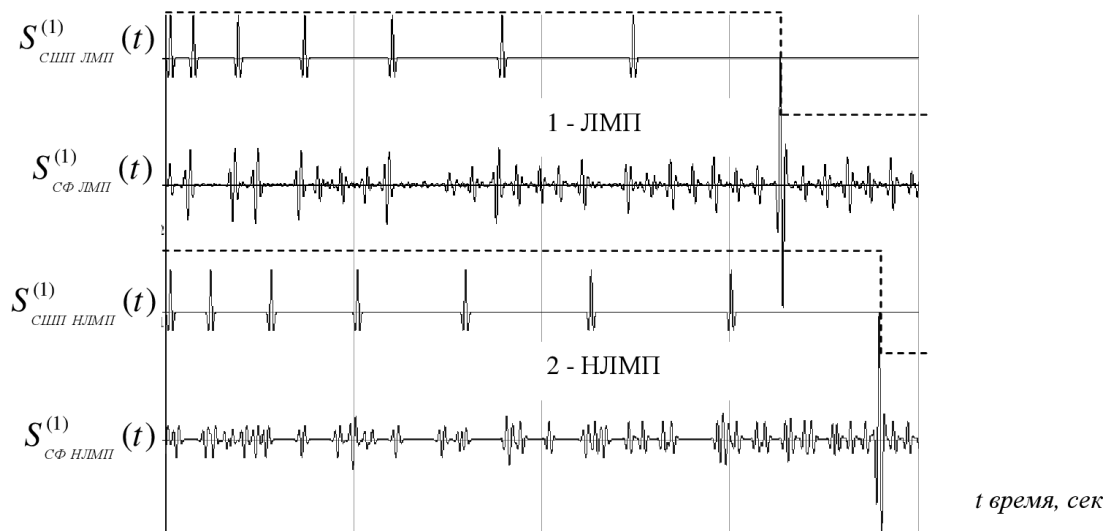


Рис. 4. Временные диаграммы формирования и согласованного приема СШП сигналов, сформированных способами ЛМП (1) и НЛМП (2) с параметрами $\tau = 1$ нс, $\Delta t_1 = 0.9$ нс, $p = 1.6$, $m = 2.18 \cdot 10^{-9}$, $N_{\text{имп}} = 7$.

Анализ временных диаграмм рисунка 4 показывает, что в момент окончания СШП сигнала (спад по заднему фронту пунктирной линии) на выходе согласованного фильтра формируется отклик (главный лепесток), значительно превышающий остальные (боковые лепестки).

Причем для СШП сигнала, сформированного по способу НЛМП, уровень боковых лепестков (УБЛ) ниже, чем для СШП сигнала, сформированного по способу ЛМП, что говорит о более высокой помехоустойчивости его приема. Проведем более детальный анализ сигналов $S_{СФ\ ЛМП}^{(1)}(t)$ и $S_{СФ\ НЛМП}^{(1)}(t)$ на выходах согласованных фильтров, представленных на рисунке 5.

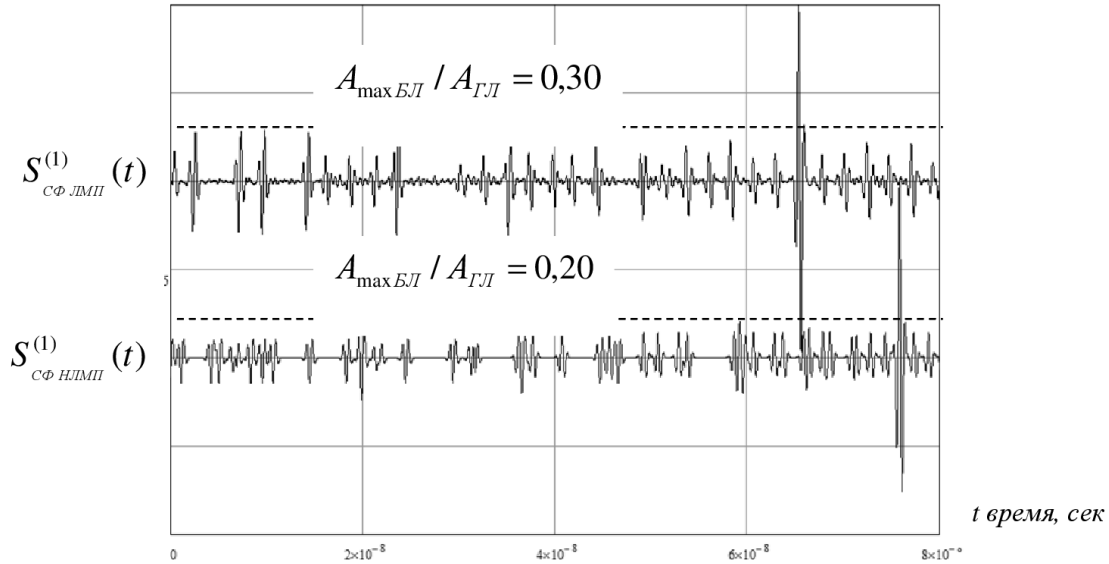


Рис. 5. Анализ сигналов $S_{СФ\ ЛМП}^{(1)}(t)$ и $S_{СФ\ НЛМП}^{(1)}(t)$ с параметрами $\tau = 1$ нс, $\Delta t_1 = 0.9$ нс, $p = 1.6$, $m = 2.18 \cdot 10^{-9}$, $N_{имп} = 7$.

Из рисунка 5 видно, что максимальный уровень боковых лепестков $A_{\max\ БЛ}$ сигнала $S_{СФ\ ЛМП}^{(1)}(t)$ составляет 0,30 относительно уровня главного лепестка, равного 1, при этом для сигнала $S_{СФ\ НЛМП}^{(1)}(t)$ это показатель составляет 0,20, что свидетельствует о более высокой помехоустойчивости последнего.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ УРОВНЯ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ В СШП НЛМП СИГНАЛЕ НА ВЫХОДЕ СОГЛАСОВАННОГО ФИЛЬТРА

Выполним оценку УБЛ сигналов $S_{СФ\ ЛМП}^{(1)}(t)$ и $S_{СФ\ НЛМП}^{(1)}(t)$ от параметров p , m , при этом функция оценки определяется выражением:

$$F(p,m) = \frac{A_{\max\ БЛ}(p,m)}{A_{ГЛ}(p,m)}, \quad \text{при } p = 0.2 \dots 1.5, m = (0.1 \dots 2) \cdot 10^{-9}. \quad (13)$$

На рисунке 6 приведена функция оценки (13) для различных значений глубины линейной p и нелинейной модуляции m и количества импульсов в пачке $N_{имп} = 7$. Цифрой 1 показана функция оценки (9) СШП сигнала, сформированного способом ЛМП, цифрой 2 — способом НЛМП с глубиной нелинейной модуляции $m = 0.5 \cdot 10^{-9}$, цифрой 3 — способом НЛМП с глубиной нелинейной модуляции $m = 2 \cdot 10^{-9}$, длительность импульса $\tau = 1$ нс, длительность начальной паузы $\Delta t_1 = 1$ нс.

Анализ представленных на рисунке 6 зависимостей показывает, что для способа ЛМП (график 1) УБЛ колеблется относительно значения 0.2 с плавным уменьшением амплитуды осцилляций при $p = 0.5 - 1.5$. Для способа НЛМП с глубиной нелинейной модуляции $m = 0.5 \cdot 10^{-9}$ (график 2) амплитуда осцилляций функции оценки существенно меньше, что положительно сказывается на стабильности показателя помехоустойчивости — при джиттере

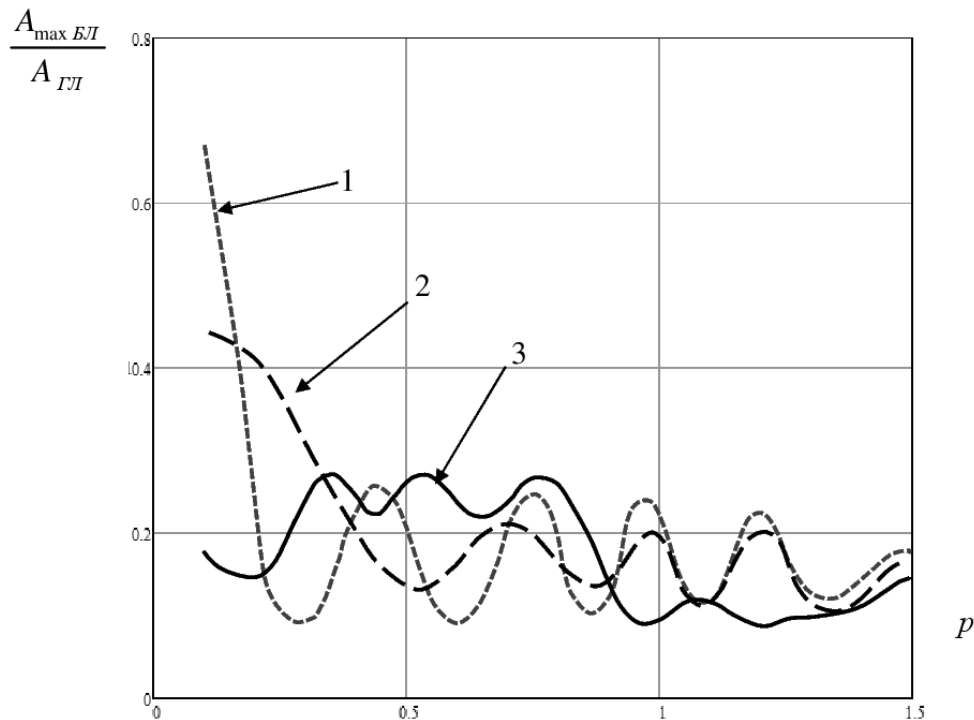


Рис. 6. Функция оценки (13) для различных значений глубины линейной p и нелинейной модуляции m и количества импульсов в пачке $N_{\text{имп}} = 7$.

импульсов в пачке вследствие нестабильностей параметров элементов схем формирователей сигналов способ НЛМП покажет лучшие результаты: меньший разброс в оценке УБЛ и более стабильную помехоустойчивость, следовательно, его применение на практике является предпочтительным. Для способа НЛМП с глубиной нелинейной модуляции $m = 2 \cdot 10^{-9}$ (график 3) амплитуда осцилляций функции оценки УБЛ еще меньше, при этом в области значений параметра $p = 0.3 - 0.8$ функция оценки несколько хуже, чем для способа ЛМП и колеблется возле значения УБЛ 0.26 против значения УБЛ 0.20 для способа ЛМП. Однако, при $p = 0.8 - 1.4$ УБЛ существенно падает до значения 0.14 с практически отсутствующей осцилляцией, что говорит о значительном выигрыше в помехоустойчивости способа НЛМП при соответствующем выборе параметров модуляции. Существует достаточно большое множество нелинейных функций, которые могут использоваться при формировании СШП сигналов по способу НЛМП, оценка помехоустойчивости приема таких сигналов является темой отдельных работ авторов и выходит за рамки статьи.

Таким образом, предложен новый способ нелинейной модуляции паузы между импульсами в СШП сигнале, при котором, изменяя количество импульсов в битовой посылке, а также закон и глубину нелинейной модуляции, можно добиться существенного снижения уровня боковых лепестков в принимаемом сигнале на выходе фильтра, согласованного с битовой посылкой, что ведет к повышению помехоустойчивости приема. Показано, что для закона нелинейной модуляции вида $\sin(x)$ с глубиной модуляции $m=2 \cdot 10^{-9}$ в области значений параметра $p = 0.8 - 1.4$ УБЛ составляет 0.14 с практически отсутствующей осцилляцией (при способе ЛМП УБЛ составляет 0.20), что говорит о значительном выигрыше в помехоустойчивости способа НЛМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляции...

ей псевдослучайной последовательностью / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев, В. И. Шестопапов. — М. : Радиософт, 2011. — 552 с.

2. Радзиевский, В. Г. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех / В. Г. Радзиевский, П. А. Трифонов. — М. : Радиотехника, 2009. — 286 с.

3. Антипенский, Р. В. Модель сверхширокополосного сигнала с линейно изменяющейся паузой между импульсами / Р. В. Антипенский, А. П. Любавский, Б. Ф. Змий // Сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения» ВУНЦ ВВС «ВВА». — Воронеж, 2016. — С. 24–27.

4. Антипенский, Р. В. Оценка уровня боковых лепестков сверхширокополосного сигнала с линейно изменяющейся паузой между импульсами на выходе согласованного фильтра / Р. В. Антипенский, А. П. Любавский, Б. Ф. Змий // Вестник ВУНЦ ВВС ВВА. — 2017. — № 2(29). — С. 61–63.

5. Антипенский, Р. В. Применение вейвлет-преобразований для анализа рассеяния сверхширокополосных сигналов объектами сложной формы / Р. В. Антипенский, А. П. Любавский, С. Н. Разиньков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2018. — Т. 21, № 2. — С. 39–43.

6. Любавский, А. П. Спектральные энергетические уравнения и оценка скорости передачи сверхширокополосных сигналов в радиоканалах / А. П. Любавский, С. Н. Разиньков // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2017. — № 2. — С. 21–30.

7. Антипенский Р. В., Бондаренко В. В., Любавский А. П. Патент на изобретение РФ № 2527487 «Устройство сверхширокополосной радиосвязи с повышенной помехозащищенностью». — М. : Роспатент, 2014.

8. Антипенский, Р. В. Метод цифрового синтеза сигналов на основе коммутации записанных в памяти шаблонов / Р. В. Антипенский, Б. Ф. Змий, А. П. Любавский // Сборник материалов XVI международной научно-методической конференции. — Воронеж, 2016. — С. 37–42.

9. Антипенский Р. В., Змий Б. Ф., Любавский А. П. Патент на изобретение РФ № 2654566 «Способ формирования помехоустойчивых сверхширокополосных сигналов». — М. : Роспатент, 2018.

10. Арслан, Х. Сверхширокополосная беспроводная связь / Х. Арслан, Чж. Н. Чен, М. Бенедетто. — М. : Техносфера, 2012. — 639 с.

11. Кирьянов, Д. В. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0 / Д. В. Кирьянов. — СПб. : БХВ-Петербург, 2012. — 432 с.

REFERENCES

1. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Shestopalov V.I. Noise immunity of radio communication systems with spectrum expansion by direct modulation by pseudorandom sequence. [Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Shestopalov V.I. Pomexozashhishhennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra pryamoyj modulyaciyj psevdosluchajnoyj posledovatel'nost'yu]. Moscow, 2011, 552 p.

2. Radzievsky V. G., Trifonov P. A. Processing of ultra-wide-band signals and noises. [Radzievskiy V.G., Trifonov P.A. Obrabotka sverxshirokopolosnyx signalov i pomex]. Moscow, 2009, 286 p.

3. Antipensky R.V., Lyubavsky A.P., Zmiy B.F. Model of an ultra-wide-band signal with a linearly changing pause between pulses. [Antipenskiy R.V., Lyubavskiy A.P., Zmiy B.F. Model' sverxshirokopolosnogo signala s linejno izmenyayushheyjsya pauzoyj mezhdu impul'sami]. Collection of materials of the III Russian scientific and practical conference, Academic Zhukovsky readings «VUNTS VVS «VVA», Voronezh, 2016, pp. 24–27.

4. Antipensky R.V., Lyubavsky A.P., Zmiy B.F. Estimation of the level of side lobes of an ultra-wide-band signal with a linearly changing pause between pulses at the output of a matched

filter. [Antipenskiy R.V., Lyubavskiy A.P., Zmiy B.F. Ocenka urovnya bokovykh lepestkov sverxshirokopolosnogo signala s linejno izmenyayushheysya pazoyj mezhdu impul'sami na vyxode soglasovannogo fil'tra]. *Vestnik VUNC VVS VVA – Vestnik VUNTS VVS VVA*, 2017, no. 2(29), pp. 61–63.

5. Antipenskiy R.V., Lyubavskiy A.P., Razinkov S.N. Application of wavelet transformations for analysis of scattering of ultra-wide-band signals by objects of complex shape. [Antipenskiy R.V., Lyubavskiy A.P., Razin'kov S.N. Primenenie veyjvlet-preobrazovaniy dlya analiza rasseyaniya sverxshirokopolosnykh signalov ob'ektami slozhnoy formy]. *Fizika volnovyx processov i radiotekhnicheskie sistemy – Physics of wave processes and Radio engineering systems*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 39–43.

6. Lyubavskiy A.P., Razinkov S.N. Spectral energy equations and estimation of the transmission rate of ultra-wide-band signals in radio channels. [Lyubavskiy A.P., Razin'kov S.N. Spektral'nye energeticheskie uravneniya i ocenka skorosti peredachi sverxshirokopolosnykh signalov v radiokanalax]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika – Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2017, no. 2, pp. 21–30.

7. Antipenskiy R.V., Bondarenko V.V., Lyubavskiy A.P. Patent for the invention of the Russian Federation No. 2527487 «device for ultra-wide-band radio communication with increased noise immunity». Moscow: Rospatent, 2014. [Antipenskiy R.V., Bondarenko V.V., Lyubavskiy A.P. Patent na izobrenenie RF № 2527487 “Ustroystvo sverxshirokopolosnoy radiosvyazi s povyshennoy pomexozashhishhennost'yu”. Moscow: Rospatent, 2014].

8. Antipenskiy R.V., Zmiy B.F., Lyubavskiy A.P. Method of digital signal synthesis based on switching of templates recorded in memory. [Antipenskiy R.V., Zmiy B.F., Lyubavskiy A.P. Metod cifrovogo sinteza signalov na osnove kommutacii zapisannykh v pamyati shablonov]. Collection of materials of the XVI International scientific and methodological conference, Voronezh, 2016, pp. 37–42.

9. Antipenskiy R.V., Zmiy B.F., Lyubavskiy A.P. Patent for the invention of the Russian Federation No. 2654566 «Method for forming noise-resistant ultra-wideband signals», Moscow: Rospatent, 2018. [Antipenskiy R.V., Zmiy B.F., Lyubavskiy A.P. Patent na izobrenenie RF № 2654566 “Sposob formirovaniya pomexoustoyjchivyx sverxshirokopolosnykh signalov”, Moscow: Rospatent, 2018].

10. Arslan H., Chen Zh.N., Benedetto M. Ultra-wide-band wireless communication. [Arslan X., Chen Chzh.N., Benedetto M. Sverxshirokopolosnaya besprovodnaya svyaz']. Moscow, 2012, 639 p.

11. Kiryanov D. V. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. [Kir'yanov D.V. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0]. SPb: BHV-Petersburg, 2012, 432 p.

*Антипенский Роман Валериевич, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры радиоэлектроники ВУНЦ ВВС ВВА, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: antipensky@yandex.ru*

*Antipensky Roman Valerievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radio Electronics of MSEC of AF AFA, Voronezh, Russian Federation
E-mail: antipensky@yandex.ru*

*Антипенский Евгений Романович, адъюнкт кафедры радиоэлектроники ВУНЦ ВВС ВВА, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: antipensky@yandex.ru*

*Antipensky Evgeny Romanovich, Postgraduate Officer of the Department of Radio Electronics of MSEC of AF AFA, Voronezh, Russian Federation
E-mail: antipensky@yandex.ru*

*Ерзин Игорь Хайдерович, старший преподаватель кафедры радиоэлектроники ВУНЦ ВВС ВВА, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: igorerzin@yandex.ru*

*Erzin Igor Haidarovich, senior lecturer of the Department of Radio Electronics of MSEC of AF AFA, Voronezh, Russian Federation
E-mail: igorerzin@yandex.ru*