



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2024.1.2>

УДК 621.376
ББК 32.841

Дата поступления статьи: 18.12.2023
Дата принятия статьи: 22.01.2024



ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Владимир Дмитриевич Захарченко

Доктор технических наук, профессор кафедры радиофизики,
Волгоградский государственный университет
zakharchenko_vd@mail.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Александр Александрович Писанко

Студент кафедры радиофизики,
Волгоградский государственный университет
alekspisanko@yandex.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматривается математическая модель стробоскопического преобразователя широкополосных импульсных сигналов, позволяющего регистрировать широкополосные сигналы и состоящего из перемножителя и низкочастотного фильтра. Методами численного моделирования произведены расчеты погрешности воспроизведения импульсного сигнала стробоскопическим преобразователем при действии аддитивных и мультипликативных помех. Низкочастотная фильтрация стробоскопических выборок осуществлялась с использованием алгоритма БПФ. Приводятся результаты численного моделирования, позволяющие оценить границы допустимого уровня помех при обработке импульсных сигналов.

Ключевые слова: стробоскопическое преобразование, широкополосные сигналы, потенциальная помехоустойчивость, численное моделирование, погрешность воспроизведения.

Введение

Стробоскопическое преобразование является эффективным методом обработки периодических сигналов, позволяющим сравнительно простыми техническими средствами согласовать частотный диапазон широкополосных импульсных сигналов с возможностями низкочастотной аппаратуры [10; 11]. Основным ограничением использования этого метода является требование к периодичности исследуемых сигналов на интервале наблюдения, однако в большинстве практических задач выполнение этого условия не представляет сложности. Временное квантование, присущее этому методу, хорошо сочетается с принципом цифровой фильтрации, что стимулирует использование стробоскопических методов в системах цифровой обработки сигналов наносекундной длительности [1; 6].

Преобразование временного масштаба широкополосных радиосигналов представляет значительный интерес в ряде задач локации и связи [4; 5]. В настоящее время потенциальные возможности стробоскопической трансформации наиболее полно реализуются в осциллографической технике. Так, например, произведение чувствительности на рабочую полосу частот у стробоскопических приборов на 2–3 порядка выше, чем у обычных аналоговых [3]. В реальных условиях радиоэлектронная аппаратура работает при действии различного вида помех, что сказывается на качестве ее работы. В этой связи представляет интерес оценка допустимого уровня внешних помех, не снижающих заданной погрешности работы стробоскопического преобразователя.

В радиотехнике под потенциальной помехоустойчивостью систем обычно понимается зависимость погрешности обработки сигнала от отношения сигнала к шуму на ее входе. В этой связи представляет интерес оценка допустимого уровня помех на входе стробоскопического преобразователя, не снижающих эффективность его работы. В предлагаемой работе производится расчет потенциальной помехоустойчивости стробоскопической обработки некоторых моделей периодических видео- и радиосигналов при действии на входе преобразователя нормального шума (аддитивная помеха) и при нарушении синхронизации входных сигналов и стробирующих импульсов (мультипликативная помеха).

1. Линейная модель стробоскопического преобразователя

При теоретическом анализе в работе используется упрощенная линейная модель стробоскопического преобразователя (см. рис. 1), введенная А.И. Найденовым [10] и состоящая из мультипликативного элемента ($См$), осуществляющего перемножение входного и стробирующего сигналов и узкополосного фильтра (Φ), выделяющего одну из спектральных составляющих продуктов преобразования.

В качестве входных периодических импульсных сигналов использованы модели видеосигналов, представленных на рисунке 2 и описываемых соотношением (1) [7]:

$$x(t) = \sum_{k=1}^N X_0(t - kT) \quad (1)$$

где T — период повторения; $X_0(t)$ — форма сигнала в одном периоде; N — число периодов. Параметры моделей: $T = 64 \text{ ms}$; $A_m = \max(X_0(t)) = 10$; $N = 65$.

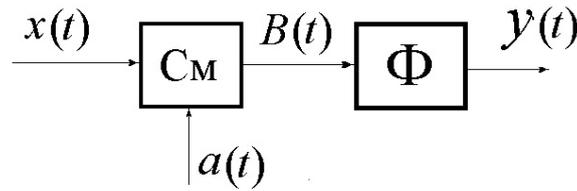


Рис. 1. Модель стробоскопического преобразователя

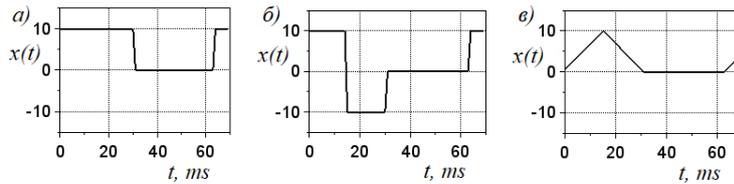


Рис. 2. Модельные видеосигналы: прямоугольной (а), биполярной (б) и треугольной (в) формы на входе стробоскопического преобразователя

Стробирующий сигнал $a(t)$ имеет вид прямоугольного видеоимпульса $A_0(t)$ длительностью $\tau_u = 3 \text{ ms}$ с периодом следования $T_1 = 65 \text{ ms}$. Таким образом, шаг считывания составляет $\Delta T = T_1 - T = 1 \text{ ms}$. Фильтрация выходного сигнала стробоскопического смесителя $B(t)$ осуществлялась с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ):

$$y(t) = F^{-1}\{k(j\omega)F[B(t)]\}, \quad (2)$$

где $k(j\omega)$ — частотная характеристика фильтра преобразователя (ФНЧ).

2. Моделирование работы стробоскопического преобразователя видеосигналов на фоне аддитивных и мультипликативных помех

Для оценки потенциальной помехоустойчивости к последовательности исследуемых сигналов (1) добавлялся белый гауссов шум $\xi(t)$ с распределением $W(\xi) = N(0, \sigma_\xi^2)$. Уровень шума (σ_ξ^2) изменялся в пределах $(0, 05 - 1, 0)A_m$. На рисунке 3 приведены результаты численного моделирования для видеосигналов с усреднением по 10 значениям. На них приведена относительная погрешность воспроизведения формы модельных сигналов (1) в зависимости от отношения сигнала к шуму A_m/σ_ξ :

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\|\Delta Y\|}{\|\Delta Y_0\|} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (Y[k] - Y_0[k])^2}{\sum_{k=1}^N (Y_0[k])^2}}, \quad (3)$$

где $M = 10$ — количество усреднений.

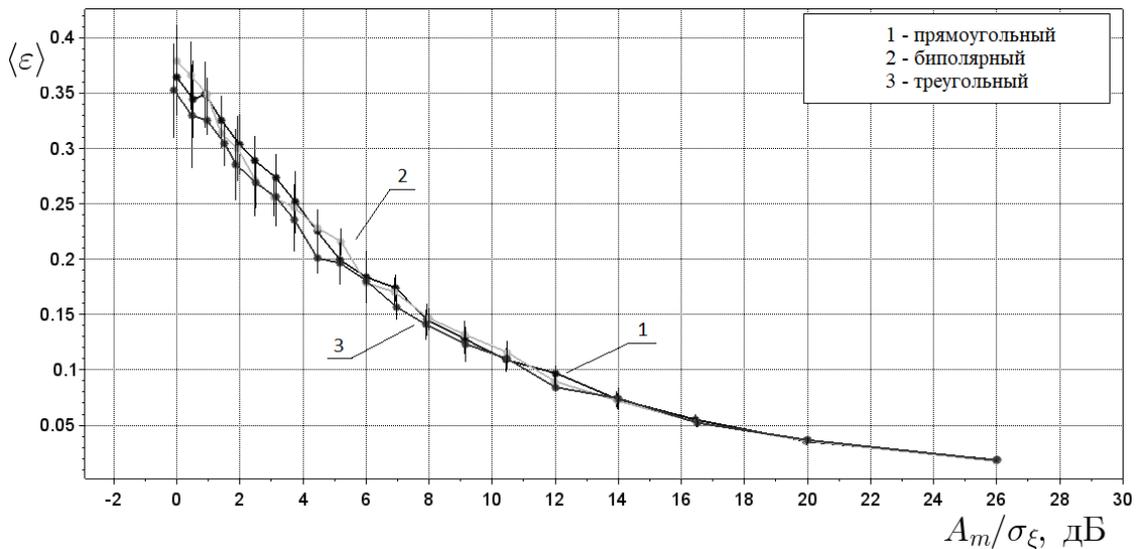


Рис. 3. Зависимость относительной ошибки воспроизведения от отношения сигнал / шум для прямоугольного (1), биполярного (2) и треугольного (3) видеосигналов

Как следует из графика, для обеспечения погрешности, например, для треугольного видеосигнала не более 18 %, необходимо, чтобы уровень шума не превышал 6 дБ. Моделирование мультипликативной помехи для видео- и радиосигналов происходило путем возбуждения положения стробирующего сигнала по равновероятному закону распределения в пределах от 2 до 8 ms [9]. Численные значения параметров модели были выбраны в соответствии с рисунком 2. Среднеквадратичное отклонение строга определялось по формуле:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N [P_t[k] - \langle P_t \rangle]^2}{N - 1}}, \quad (4)$$

где $\{P_t\}$ — массив значений мультипликативного шума с равновероятным законом распределения; $\langle P_t \rangle$ — среднее значение массива.

На рисунке 4 представлена зависимость относительной ошибки воспроизведения видеосигналов от временной нестабильности (σ_t) стробирующих импульсов. Так, например, для обеспечения погрешности не более 35 %, необходимо обеспечить уровень временной нестабильности стробирующих импульсов для биполярного сигнала не более $\sim 0,5$ ms.

3. Моделирование обработки радиосигналов в схеме радиоимпульсного стробирования

Стробоскопическая обработка периодической последовательности радиосигналов предполагает когерентность исследуемых $x(t)$ и стробирующих $a(t)$ радиоимпульсов на интервале наблюдения $t \in [0, NT]$:

$$x(t) = \sum_{k=1}^N X_0(t - kT) \cos(\omega_0 t); \quad a(t) = \sum_{k=1}^N A_0(t - kT_1) \cos(\omega_1 t). \quad (5)$$

При стробоскопической обработке радиосигналов в модели преобразователя (см. рис. 1) фильтр нижних частот (ФНЧ) заменяется на полосовой фильтр, выделяющий спектральные компоненты на выходе смесителя в окрестности разностной частоты несущих $\Omega = \omega_0 - \omega_1$ [8].

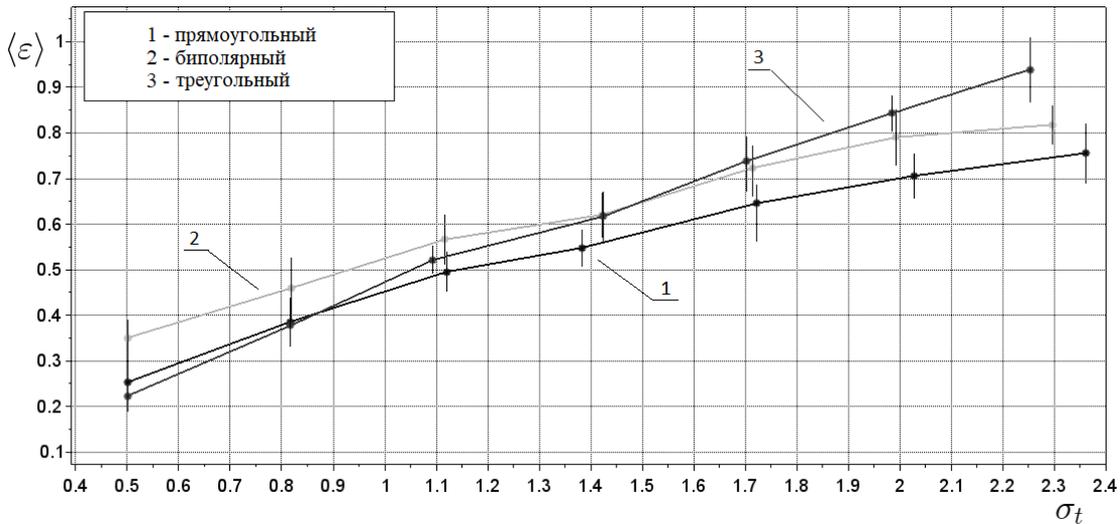


Рис. 4. Зависимость относительной ошибки воспроизведения видеосигналов от временной нестабильности (σ_t) стробирующих импульсов для: прямоугольного (1), биполярного (2) и треугольного (3) сигналов

Для расчета помехоустойчивости использовались модели радиосигналов с прямоугольной и гауссовой огибающей, представленные на рисунке 5 и описываемые соотношениями (6) и (7) соответственно:

$$a) X_0(t) = X_m \text{ при } t \in [0, \tau_1], \quad 0 \text{ при } t \notin [0, \tau_1]; \quad (6)$$

$$b) X_0(t) = X_m \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\tau_2} \right)^2 \right] \text{ при } t \in [0, 2t_0], \quad 0 \text{ при } t \notin [0, 2t_0]. \quad (7)$$

Параметры моделей: $X_m = 10$; $\tau_1 = 25 \text{ ms}$; $\tau_2 = 5 \text{ ms}$; $t_0 = 12,5 \text{ ms}$; $\omega_0 = 2\pi f_0$; $f_0 = 1,0 \text{ kHz}$; $\omega_1 = 2\pi f_1$; $f_1 = 0,9 \text{ kHz}$.

Стробирующий радиосигнал $a(t)$ моделировался коротким радиоимпульсом прямоугольной формы с несущей частотой f_1 , длительностью 5 ms и периодом повторения $T_1 = T + \Delta T$, где $\Delta T = 0,1 \text{ ms}$ — шаг считывания. График зависимости относительной ошибки от отношения сигнал / шум приведен на рисунке 6.

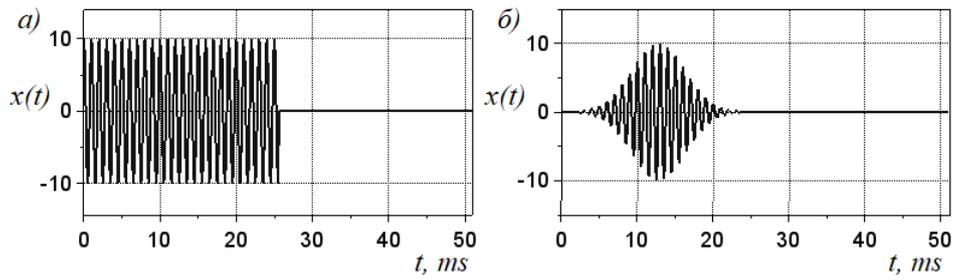


Рис. 5. Радиосигналы с прямоугольной (а) и гауссовой (б) огибающей на входе схемы радиопульсного стробирования

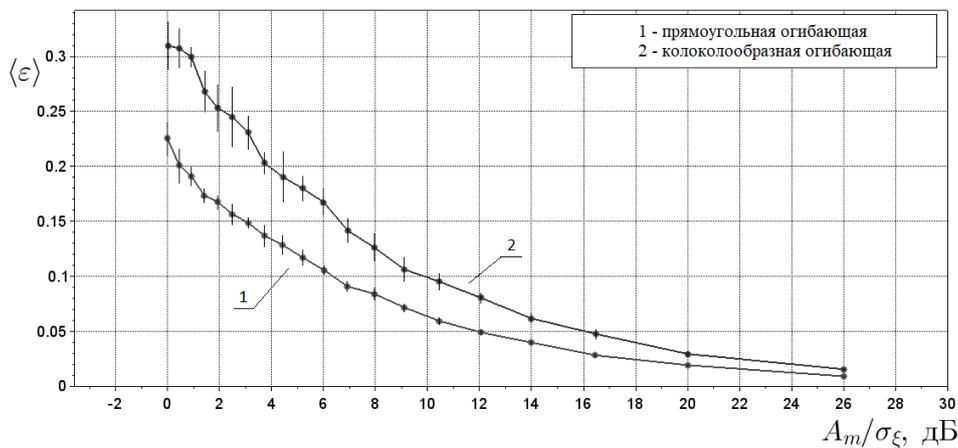


Рис. 6. Зависимость относительной ошибки воспроизведения от отношения сигнал / шум для радиосигналов с прямоугольной (1) и гауссовой (2) огибающей

Исследование помехоустойчивости модели стробоскопического преобразователя при работе с когерентной последовательностью сложных сигналов проводилось на примере радиосигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигнала). Вид сигнала приведен на рисунке 7.

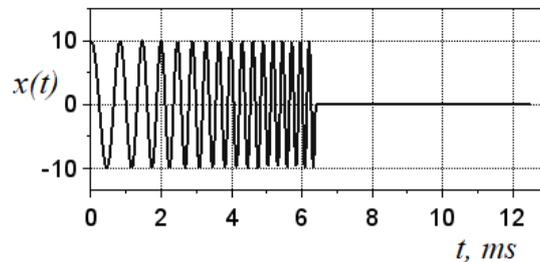


Рис. 7. ЛЧМ-радиопульс на входе стробоскопического преобразователя

В данной работе математическая модель ЛЧМ-радиосигнала и стробирующего импульса описывается соотношением (8). Исследуемый и стробирующий сигналы были выбраны одинаковыми, что имитирует работу корреляционного приемника РЛС [2]:

$$x(t) = A(t) \cos \left(\omega_0 t + \frac{\Delta \omega}{\tau_u} t^2 \right), \quad (8)$$

где $A(t)$ — прямоугольная огибающая ЛЧМ-радиоимпульса длительностью τ_u .

Моделирование производилось на временном интервале $t \in [0, NT]$, девиация частоты составляла $\Delta F = 1,63$ kHz, а база сигнала $\sim 10,5$. Результаты моделирования на фоне аддитивной помехи для ЛЧМ-импульса представлены на рисунке 8.

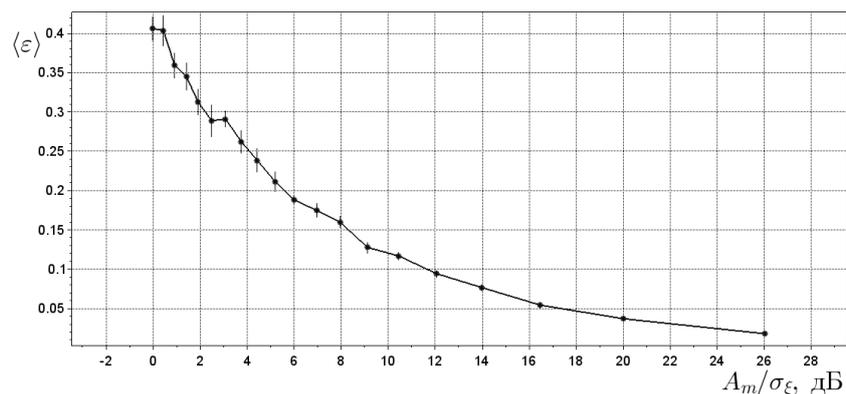


Рис. 8. Зависимость относительной ошибки воспроизведения ЛЧМ-радиоимпульса от отношения сигнал / шум

Заключение

В работе использована математическая модель стробоскопического преобразователя периодических сигналов, включающая в себя перемножитель и узкополосный фильтр. Методом численного моделирования произведен расчет погрешности воспроизведения видео- и радиоимпульсных сигналов на фоне белого гуссового шума.

В результате проведенных численных экспериментов показано, что нарушение синхронизации исследуемого и стробирующего сигналов в большей степени влияет на точность воспроизведения входных сигналов по сравнению с аддитивным шумом.

Полученные в процессе моделирования результаты позволяют оценить допустимый уровень помех при стробоскопической обработке широкополосных импульсных радиосигналов на этапе проектирования радиотехнических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астанин, Л. Ю. Основы сверхширокополосных измерений / Л. Ю. Астанин, А. А. Костылев. — М. : Радио и связь, 1989. — 192 с.
2. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. — М. : Высш. шк., 2000. — 462 с.
3. Захарченко, В. Д. Обработка сложных сигналов стробоскопическими методами / В. Д. Захарченко // АН СССР. Радиотехника и электроника. — 1980. — № 10. — С. 2099–2104.
4. Захарченко, В. Д. Численное моделирование высотомера малых высот с использованием генетического алгоритма для расчета частот дополнительной модуляции / В. Д. Захарченко, С. В. Захарченко // Математическая физика и компьютерное моделирование. —

2021. — Т. 24, № 2. — С. 18–26. — DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.2.2>

5. Захарченко, В. Д. Численное моделирование высотомера малых высот с двойной частотной модуляцией / В. Д. Захарченко, С. В. Захарченко, А. Л. Якимец // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2020. — Т. 23, № 3. — С. 5–11. — DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2020.3.1>

6. Захарченко, В. Д. Миссия «Астероид» выполнима / В. Д. Захарченко, И. Г. Коваленко. — Физика и астрономия: Библиотека РФФИ. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_1959244. — Загл. с экрана.

7. Захарченко, В. Д. Фазочувствительный режим работы радиопульсного преобразователя стробоскопической РЛС / В. Д. Захарченко, В. Ю. Рыжков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. — 2015. — № 3 (19). — С. 20–25.

8. Захарченко, В. Д. Особенности работы схемы радиопульсного стробирования в задачах радиолокационных измерений / В. Д. Захарченко, А. В. Хоперсков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. — 2020. — № 1. — С. 404–405.

9. Кловский, Д. Д. Теория электрической связи / Д. Д. Кловский. — М. : Радио и связь, 1998. — 433 с.

10. Найденов, А. И. Трансформация спектра наносекундных импульсов / А. И. Найденов. — М. : Советское радио, 1973. — 180 с.

11. Рябинин, Ю. А. Стробоскопическое осциллографирование / Ю. А. Рябинин. — М. : Советское радио, 1972. — 272 с.

REFERENCES

1. Astanin L.Yu., Kostylev A.A. *Osnovy sverkhshirokopolosnykh izmereniy* [Fundamentals of Ultra-Wideband Measurements]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1989. 192 p.

2. Baskakov S.I. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio Circuits and Signals]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 2000. 462 p.

3. Zakharchenko V.D. Obrabotka slozhnykh signalov stroboskopicheskimi metodami [Processing of Complex Signals by Stroboscopic Methods]. *AN SSSR. Radiotekhnika i elektronika*, 1980, no. 10, pp. 2099-2104.

4. Zakharchenko V.D., Zakharchenko S.V. Chislennoe modelirovanie vysotomera malykh vysot s ispolzovaniem geneticheskogo algoritma dlya rascheta chastot dopolnitelnoy modulyatsii [Numeric Low-Altitude Altimeter Modeling with Computation of Additional Modulation Frequencies Using a Genetic Algorithm]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2021, vol. 24, no. 2, pp. 18-26. DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.2.2>

5. Zakharchenko V.D., Zakharchenko S.V., Yakimets A.L. Chislennoe modelirovanie vysotomera malykh vysot s dvoynoy chastotnoy modulyatsiey [Numeric Modelling of Low-Altitude Altimeter with Double Frequency Modulation]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2020, vol. 23, no. 3, pp. 5-11. DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2020.3.1>

6. Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G. *Missiya «Asteroid» vpolnima* [The Asteroid Mission Is Feasible]. *Fizika i astronomiya: Biblioteka RFFI*. URL: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_1959244

7. Zakharchenko V.D., Ryzhkov V.Yu. Fazochuvstvitelnyy rezhim raboty radioimpulsnogo preobrazovatelya stroboskopicheskoy RLS [Phase-Sensitive Mode of Operation of the Radio Pulse Converter of the Stroboscopic Radar]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2015, no. 3 (19), pp. 20-25.

8. Zakharchenko V.D., Khoperskov A.V. Osobennosti raboty skhemy radioimpulsnogo strobirvaniya v zadachakh radiolokatsionnykh izmereniy [Features of the Operation of the Radio Pulse Gating Scheme in Radar Measurement Tasks]. *SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii*, 2020, no. 1, pp. 404-405.

9. Klovskiy D.D. *Teoriya elektricheskoy svyazi* [Theory of Electrical Communication]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1998. 433 p.
10. Naydenov A.I. *Transformatsiya spektra nanosekundnykh impulsov* [Transformation of the Spectrum of Nanosecond Pulses]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1973. 180 p.
11. Ryabinin Yu.A. *Stroboskopicheskoe ostsillografirovanie* [Stroboscopic Oscillography]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972. 272 p.

ASSESSMENT OF POTENTIAL NOISE IMMUNITY OF STROBOSCOPIC CONVERTER OF PERIODIC PULSE SIGNALS BY NUMERICAL SIMULATIONS

Vladimir D. Zakharchenko

Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Department of Radiophysics,
Volgograd State University
zakharchenko_vd@mail.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Alexander A. Pisanko

Student, Department of Radiophysics,
Volgograd State University
alekspisanko@yandex.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. The paper considers a simplified linear mathematical model of a stroboscopic converter, which allows recording broadband signals and consists of a multiplicative element multiplying the input and strobing signals and a low-frequency filter that highlights one of the products of spectral conversion. Statistical calculations of the error in reproducing a pulse signal by stroboscopic converter under the action of normal noise (additive interference) and a violation synchronization of strobing pulses (multiplicative interference) were performed using numerical modeling methods. Rectangular, triangular and bipolar signals, as well as radio signals with rectangular and Gaussian envelopes, were selected as input signals. Low-frequency filtering of stroboscopic samples was carried out using the FFT algorithm. During stroboscopic processing of radio signals in the converter model, the low-pass filter (LPF) was replaced by a bandpass filter that highlights spectral components at the mixer output in the vicinity of the carrier frequency difference. As a result of numerical experiments conducted under conditions of additive and multiplicative interference, it is shown that a violation of synchronization of the studied and gating signals has a greater effect on the accuracy of reproduction of input signals compared with additive noise. Analysis of the effect of additive interference on video signals has shown that the error value weakly depends on their shape. The results obtained in the simulation process allow us to estimate the permissible level of interference during stroboscopic processing of broadband pulsed radio signals at the design stage of radio engineering systems.

Key words: stroboscopic conversion, broadband signals, potential noise immunity, numerical simulation, reproduction error.