

УДК 621.396.9

ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ РАДИОИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СТРОБОСКОПИЧЕСКОЙ РЛС**Захарченко Владимир Дмитриевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Радиофизики
ФГАОУ ВПО «Волгоградский государственный университет».
E-mail: Zakharchenko_VD@mail.ru.

Рыжков Вячеслав Юрьевич

аспирант кафедры Радиофизики ФГАОУ ВПО «Волгоградский государственный университет».
E-mail: OZZY-74@mail.ru.
Адрес: 400062, г. Волгоград, ул. Богданова, 32.

Аннотация: Рассматривается схема радиоимпульсного стробирования, работающая в фазочувствительном режиме. При анализе используется линейная математическая модель стробоскопического преобразователя, представляющий собой коррелятор разностной частоты Ω входного и стробирующего радиосигналов СВЧ диапазона. В работе используется временной подход к анализу стробоскопических систем, в соответствии с которым результат получается путем линейных операций во временной области. Показано, что при достаточно коротком стробирующем радиоимпульсе выходной сигнал стробоскопического преобразователя в низкочастотной области спектра представляет собой суперпозицию радиосигналов с растянутой огибающей на частотах $\omega_i = 2\pi/T \pm \Omega$. Показано, что схему радиоимпульсного стробирования можно перевести в фазочувствительный режим, связав разностную частоту несущих Ω с периодом повторения сигнала T соотношением $\Omega T = 2\pi(p + 1/2)$, где $p = 0, 1, 2, \dots$. Такая связь позволяет преобразовать фазовую структуру радиосигнала в модуляцию огибающей без применения дополнительных фазочувствительных элементов. При этом спектральные компоненты преобразованного сигнала располагаются точно по середине между гармониками частоты повторения, что в ряде случаев позволяет снизить уровень аппаратных помех. Это дает возможность производить измерение фазовой структуры наносекундных радиоимпульсов, осуществляя основное усиление на низкой промежуточной частоте. Показана возможность проведения измерений фазовой структуры наносекундных радиоимпульсов в канале когерентного стробоскопического преобразователя с использованием квадратурного приема или компенсационным способом.

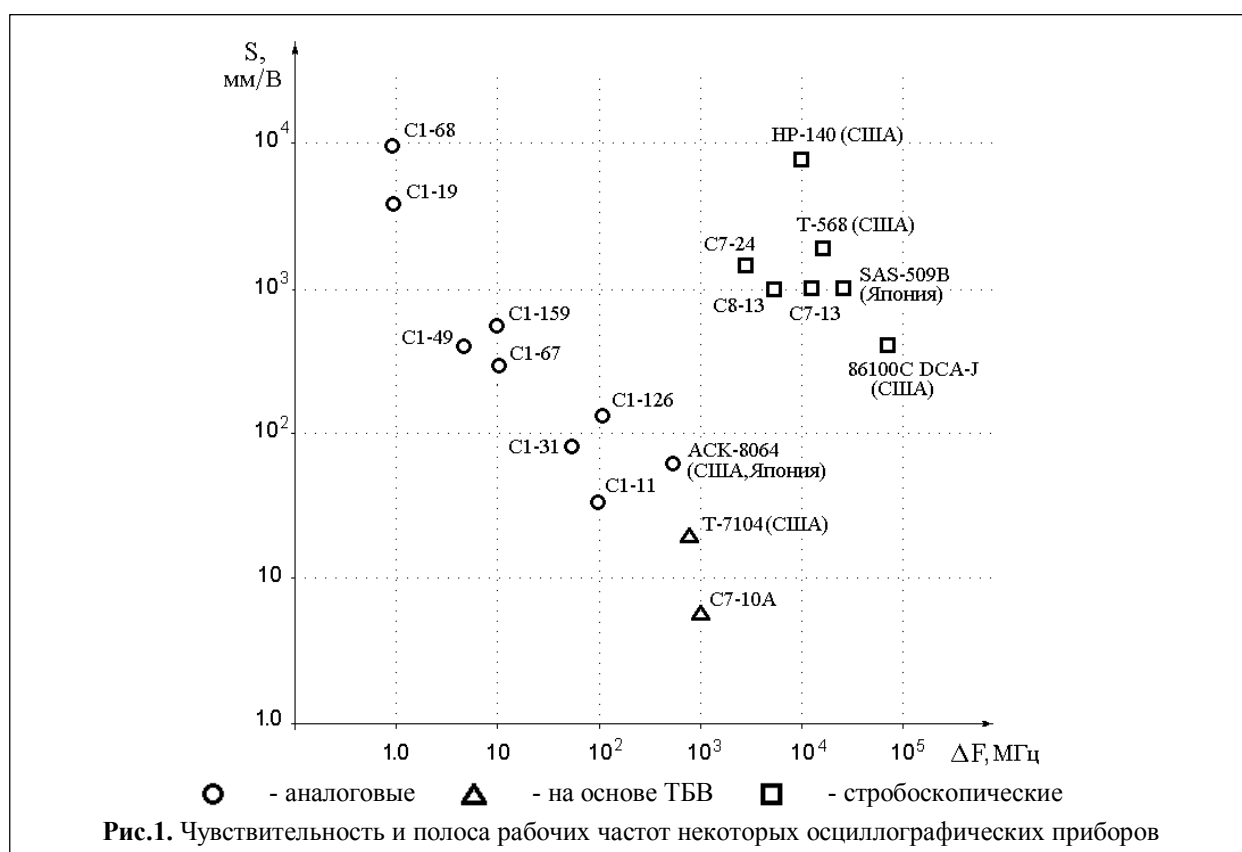
Ключевые слова: Стробоскопическая радиолокация, широкополосные радиосигналы, фазовая структура сигнала.

Вводные замечания

Высокие требования к разрешающей способности и точности функционирования современных радиотехнических систем и, прежде всего, систем радиолокации в значительной мере обусловили использование широкополосных сигналов со сложной временной структурой. Тенденция расширения области применения широкополосных сигналов, особенно в РЛС ближнего радиуса действия с высоким разрешением (бортовых, мобильных, переносных), определяет актуальность проблемы исследования методов обработки сигналов в каналах этих систем.

В задачах импульсной рефлектометрии и радиолокации возникает необходимость исследования как формы огибающей, так и фазовой структуры периодической последователь-

ности когерентных радиоимпульсов. Для этой цели используются стробоскопические методы трансформации временного масштаба, позволяющие согласовать частотный диапазон широкополосных радиосигналов с возможностями измерительной аппаратуры [1-3]. Основным ограничением использования этих методов является требование к периодичности исследуемых сигналов на интервале наблюдения, однако в большинстве практических задач выполнение этого условия не представляет сложности [4-6]. Временное квантование, присущее этим методам, хорошо сочетается с принципом цифровой фильтрации, что стимулирует использование стробоскопических методов в системах цифровой обработки широкополосных



сигналов [7-9]. Сочетание стробоскопической трансформации с обработкой информации на ЭВМ значительно расширяет области применения этих методов [9,10].

Потенциальные возможности методов стробоскопической трансформации наиболее полно реализуются в осциллографической технике. На рис.1 приведены параметры аналоговых и стробоскопических осциллографов некоторых отечественных и зарубежных фирм (Tektronix, Hewlett-Packard, Iwatsu). По осям отложены: Δf (МГц) - полоса пропускания; S (мм/В) - чувствительность по экрану. Как видно из рисунка, соответствующее произведение $S\Delta f$ у стробоскопических приборов в $10^2 - 10^4$ раза выше, чем у обычных аналоговых и с трубкой бегущей волны (ТБВ).

Схема радиоимпульсного стробирования

Для теоретического анализа работы стробоскопического преобразователя широко используется линейная математическая модель стробоскопического преобразователя [2, 6, 11, 12], состоящая из перемножителя входного и стро-

бирующего сигналов и узкополосного фильтра Φ , выделяющего одну из спектральных составляющих продуктов преобразования (рис. 2).

Для радиолокационной техники и рефлектометрии особый интерес представляет преобразование радиосигналов СВЧ диапазона наносекундной длительности вида $x(t) = A_0(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t)]$ в низкочастотный сигнал. Подобное преобразование можно осуществить с помощью когерентных стробирующих радиоимпульсов $a(t) = A_1(t) \cos[\omega_1 t + \varphi(t)]$, высокочастотное заполнение которых имеет несущую частоту $\omega_1 = \omega_0 - \Omega$. Необходимая периодичность преобразуемого сигнала сравнительно легко может быть обеспечена в РЛС малой дальности. При этом следует подчеркнуть, что «промежуточная» частота, в отличие от «обычных» супергетеродинных приемников РЛС, подразумевается низкой (порядка десятков и сотен кГц).

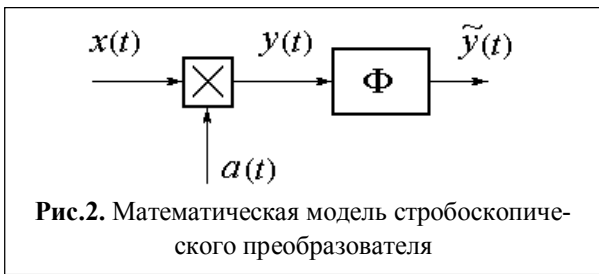


Рис.2. Математическая модель стробоскопического преобразователя

Рассмотрим возможности такого преобразования в модели стробоскопического преобразователя (рис.2), которая в этом случае выполняет функции коррелятора разностной частоты [13]. Для этого представим сигналы $x(t)$ и $a(t)$ в виде когерентных узкополосных процессов, периодических на интервале наблюдения $t \in (0, NT)$:

$$x(t) = \sum_{k=0}^N A_0(t - kT) \cos[\omega_0 t + \theta(t - kT)];$$

$$a(t) = \sum_{k=0}^N A_1(t - kT_1) \cos[\omega_1 t + \varphi(t - kT_1)],$$
(1)

где $A_0(t), A_1(t)$ - огибающие, $\omega_0 = \omega_1 + \Omega$ - несущая частота сигнала ($\Omega \ll \omega_0, \omega_1$); T - период повторения; $T_1 = T + \Delta T$; $\Delta T = T/N$ - шаг считывания; N - коэффициент спектральной трансформации ($N \gg 1$).

В соответствии с подходом, развитым в работах [11,12], спектр последовательности стробоскопических выборок $\dot{G}_y(\omega) = \mathbf{F}\{x(t)a(t)\}$ преобразуем к виду:

$$\dot{G}_y(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N e^{-j\omega kT} \int_{-\infty}^{\infty} A_0(\xi) A_1(\xi - k\Delta T) \times$$

$$\times \cos[\Omega(\xi + kT) + \theta(\xi) - \varphi(\xi - k\Delta T)] e^{-j\omega \xi} d\xi.$$
(2)

При достаточно коротком стробирующем радиоимпульсе $a(t)$ можно воспользоваться его фильтрующим свойством под интегралом и

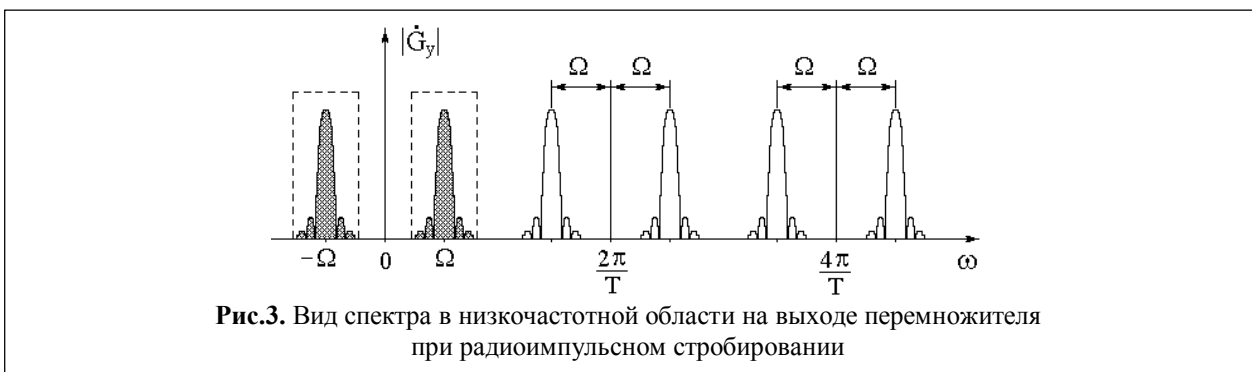


Рис.3. Вид спектра в низкочастотной области на выходе перемножителя при радиоимпульсном стробировании

упростить выражение (2) в низкочастотной области спектра:

$$\dot{G}_y(\omega) \approx \frac{\tilde{A}_1}{2} \sum_{k=0}^N e^{-j\omega kT_1} A_0(k\Delta T) \times$$

$$\times \cos[\Omega kT + \theta(k\Delta T) - \varphi_0],$$
(3)

где $\tilde{A}_1 = \int_{-\infty}^{\infty} A_1(t) dt$ - площадь огибающей,

φ_0 - усредненная по амплитуде средняя фаза стробирующего радиоимпульса [14].

Несложно показать, что при этих допущениях модуль спектральной плотности имеет периодический характер по частоте: $\dot{G}_y(\omega \pm \omega_n) = \dot{G}_y(\omega)$, где $\omega_n = 2\pi n/T_1$ - n -я гармоника частоты стробирования ($n = 0, 1, 2, \dots$). Спектр сигнала на выходе перемножителя

$$\dot{G}_y(\omega) = \sum_n \frac{\tilde{A}_1}{2} \sum_{k=0}^N e^{-j(\omega - \omega_n)kT_1} A_0(k\Delta T) \times$$

$$\times \cos[\Omega kT_1 + \theta(k\Delta T) - \varphi_0]$$
(4)

асимптотически (при $N \rightarrow \infty, T_1 \rightarrow T$) представляет собой интеграл Фурье на положительной полуоси частот для функции

$$y(t) \sim \frac{\tilde{A}_1}{2T} \sum_n A_0\left(\frac{t}{N}\right) \times$$

$$\times \left\{ \cos\left[(\omega_n + \Omega)t + \theta\left(\frac{t}{N}\right) - \varphi_0 \right] + \right.$$

$$\left. + \cos\left[(\omega_n - \Omega)t - \theta\left(\frac{t}{N}\right) + \varphi_0 \right] \right\}.$$
(5)

Вид модуля $\dot{G}_y(\omega)$ в низкочастотной области спектра для $\Omega < \pi/T$ и $N \gg T\Delta F$, где ΔF - ширина спектра сигнала $x(t)$, представлен на рис. 3.

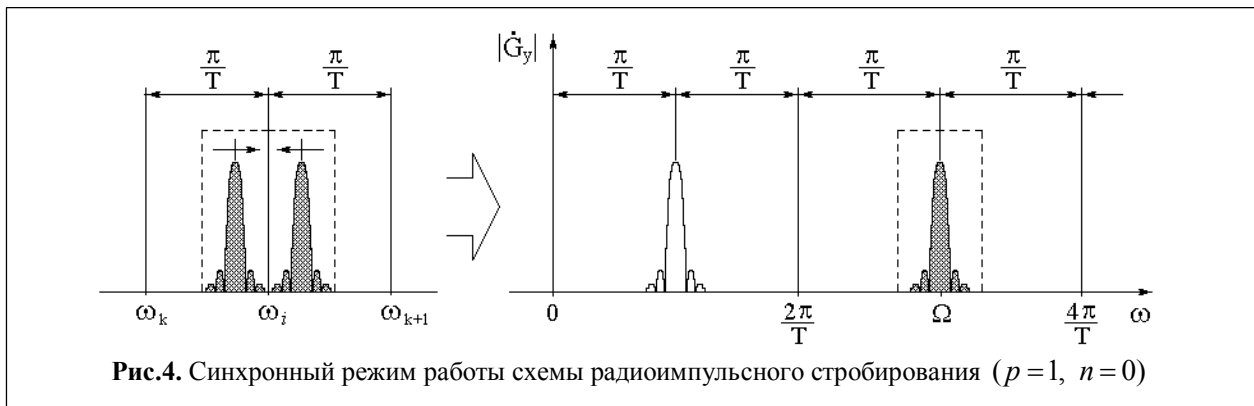


Рис.4. Синхронный режим работы схемы радиоимпульсного стробирования ($p=1, n=0$)

Фазочувствительный режим работы стробоскопической преобразователя

Преобразование фазовой структуры входного радиосигнала $x(t)$ в изменение амплитуды $\tilde{y}(t)$ при стробоскопической трансформации можно осуществить, связав (синхронизировав) разностную частоту несущих Ω с периодом повторения сигнала $x(t)$ соотношением

$$\Omega = \frac{2\pi}{T}(p + 1/2), \quad (6)$$

где $p = 0, 1, 2, \dots$. В этом режиме происходит попарная интерференция узкополосных составляющих сигнала (5) на частотах:

$$\omega_i = \omega_n + \Omega = \omega_m - \Omega = \frac{2\pi}{T}\left(n + p + \frac{1}{2}\right). \quad (7)$$

При этом составляющие спектра преобразованного сигнала располагаются точно посередине между гармониками частоты повторения (рис.4). Во многих случаях это позволяет снизить уровень аппаратных помех (например, при работе передатчика в импульсном режиме уровень наводок гармоник частоты повторения может оказаться недопустимо высоким на все цепи приемного тракта, и поэтому усиление сигнала на этих частотах нежелательно).

В результате взаимной интерференции спектральных составляющих сигнал на выходе фильтра схемы радиоимпульсного преобразователя, настроенного на частоту ω_i , будет иметь вид:

$$\tilde{y}(t) \sim \frac{\tilde{A}_1}{T} A_0 \left(\frac{t}{N}\right) \cos \left[\theta \left(\frac{t}{N}\right) - \varphi_0 \right] \cos(\omega_i t), \quad (8)$$

где $\omega_i = \frac{2\pi}{T}n + \Omega$; $\Omega = \frac{2\pi}{T}\left(p + \frac{1}{2}\right)$; $n, p = 0, 1, 2, 3, \dots$

Таким образом, использование «синхронного» режима работы стробоскопического преобразователя радиосигналов позволяет осуществлять измерения фазовой структуры радиосигналов на разностной частоте путем детектирования трансформированной во времени огибающей. Это можно реализовать, используя 2 квадратурных канала с амплитудным детектированием выходного сигнала (рис.5) и последующим расчетом

$$\theta(t/N) = \arctg \left(\frac{Y_1(t)}{Y_2(t)} \right) + \varphi_0, \quad (9)$$

или компенсационным методом, изменяя среднюю фазу φ_0 стробирующего радиоимпульса.

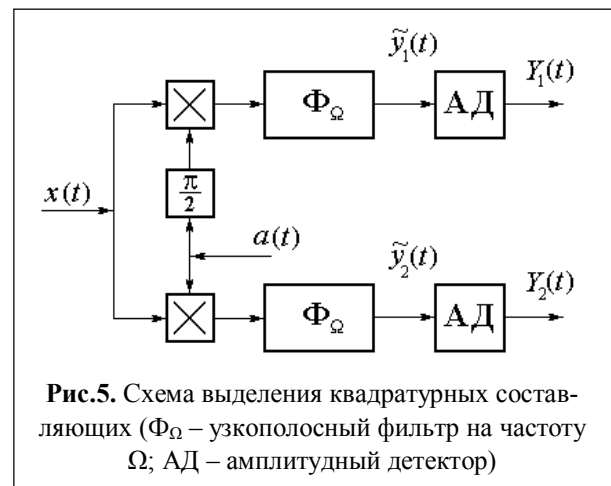


Рис.5. Схема выделения квадратурных составляющих (Φ_Ω – узкополосный фильтр на частоту Ω ; АД – амплитудный детектор)

Заключение

Сдвиг несущей частоты стробирующего радиоимпульса на величину, кратную нечетному числу первой субгармоники частоты повторения, позволяет преобразовать фазовую структуру радиосигнала в модуляцию огибающей без применения дополнительных фазочувствительных элементов. Это дает возможность

производить измерение фазовой структуры сигнала $\theta(t)$, осуществляя основное усиление на низкой промежуточной частоте. Кроме того, такой режим позволяет ослабить требования к экранировке цепей передатчика импульсных систем. Внутримпульсная фазовая модуляция сигнала $\theta(t)$ может быть измерена компенсационным методом, при котором огибающая $\tilde{y}(t)$ сводится к нулю в точке сигнала t_k , для которой $\theta(t_k/N) = \varphi_0 + \pi/2$. Производить компенсацию огибающей необходимо в канале несущей частоты стробирующего радиопульса (φ_0). Полученный сигнал (8) может быть использован для дальнейшего усиления и регистрации на частоте ω_i . Для восстановления огибающей и визуализации фазовой структуры схему необходимо дополнить квадратурным каналом, в котором $\varphi_{02} = \varphi_{01} + \pi/2$.

Литература

1. Рябинин Ю.А. Стробоскопическое осциллографирование. - М.: Сов. радио, 1972. – 272 с.
2. Найденов А.И. Трансформация спектра наносекундных импульсов. - М.: Сов. Радио, 1973 г., 180 с.
3. Черницер В.М., Кадук Б.Г. Преобразователи временного масштаба. - М: Сов. Радио, 1972. – 144 с.
4. Захарченко В.Д., Пак О.В., Максименко В.И., Васильев А.Ф. Формулировка принципа неопределенности при стробоскопической обработке сигналов. - Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2012. № 2. С. 43-46.
5. Захарченко В.Д., Верстаков Е.В., Толика О.М. Радиолокационное наблюдение за протяженными объектами с использованием стробоскопической РЛС. - Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т. 9. № 10 (137). С. 102-106.
6. Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G., Pak O.V. Estimate of sizes of small asteroids (cosmic bodies) by the method of stroboscopic radiolocation // Acta Astronautica. – 2015. - V.108. – P. 57-61; DOI:10.1016/j.actaastro.2014.12.006.
7. Херманис Э.Х., Карклиньш В.Г. Дискретные стробоскопические преобразователи. - Рига: Зинатне, 1977. - 162с
8. Захарченко В.Д., Коваленко И.Г. Способ предотвращения угрозы для планеты путем оценки размеров пассивных космических объектов. - Патент на изобретение (РФ) №2527252 от 07.06.2013. Оpubл. 27.08.2014 // Изобретения. Полезные модели. 2014, №24.
9. Захарченко В.Д., Баландин П.В. Способ радиолокационного контроля протяженного участка пространства. - Патент на изобретение (РФ) №2359286 от 04.10.2006. Оpubл. 20.06.2009. // Изобретения. Полезные модели [Электронный ресурс]. 2009, №17.
10. Рыжков В.Ю., Захарченко В.Д. Стробоскопическая обработка широкополосных радиосигналов в приемном тракте систем ближней локации // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвуз. сборник научных трудов/ под ред. Ю.Н. Паршина. – Рязань: РГРТУ, 2015. – С. 5-8.
11. Захарченко В.Д. Вопросы теории стробоскопического преобразования узкополосных периодических сигналов. – Изв. вузов СССР. Приборостроение, №10, 1976 г., с. 5-8.
12. Захарченко В.Д. Обработка сложных радиосигналов стробоскопическими методами. - АН СССР. Радиотехника и электроника, №10, 1980 г., С. 2099-2104.
13. Казаков В.А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. - М: Сов. радио, 1973 г., 232 с.
14. Захарченко В.Д. О начальной фазе сигнала при стробоскопическом преобразовании - Изв. ВУЗов СССР. Приборостроение. - 1980. - №1. - С. 74-76.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 15-47-02438-р_поволжье_a, 14-02-97001-р_поволжье_a).

Поступила 07 апреля 2015 г.

English

Phase-sensitive operating mode of the radio pulse converter of stroboscopic RS

Vladimir Dmitriyevich Zakharchenko – Doctor of Engineering, Professor, Professor of Department of Radiophysics "Volgograd State University".

E-mail: Zakharchenko_VD@mail.ru.

Vyacheslav Yuryevich Ryzhkov – Post-graduate student Department of Radiophysics "Volgograd State University".

E-mail: OZZY-74@mail.ru.

Address: 400062, Volgograd, Bogdanov St., 32.

Abstract: Problems of pulse reflectometry and radar-location necessitate the research of envelope shape and phase structure of periodic sequence of coherent radio pulses. Stroboscopic methods of time scale transformation are widely used for this purpose that enable to harmonize frequency range of broadband radio signals with metering equipment capabilities. Transformation of radio signals of microwave range of nanosecond duration to a low-frequency signal is of special interest for radar equipment. Such a transformation is made in the scheme of radio pulse strobing by means of coherent strobing radio pulses on differential frequency of carriers (intermediate frequency) which is taken low about tens and hundreds of kHz- unlike with ordinary radar superheterodyne receivers. Necessary interval of the transformed signal can be provided rather easily in short range radar. The paper examines possibilities of such transformation with the model of stroboscopic mixer representing the correlator of differential frequency on the basis of time approach. It is shown that transformation of radio signal's phase structure to change amplitude at stroboscopic transformation can be performed by intermediate frequency selection multiple of odd number of the first recurrence rate subharmonic. Intrapulse phase modulation can be measured in this mode without using additional phase-sensitive elements. Thus spectrum components of the transformed signal are located precisely in the middle between recurrence rate harmonics that in some cases makes it possible to reduce the level of hardware hindrances. Application of phase-sensitive operating mode of the stroboscopic converter enables to carry out measurements of phase structure of radio signals on differential frequency by detecting envelope curve transformed in time. It can be implemented via two quadrature channels with amplitude detection and the subsequent calculation or via compensation method changing initial phase of strobing radio pulse.

Key words: Stroboscopic radiolocation, broadband radio signals, signal's phase structure.

References

1. Ryabinin Yu.A. Stroboscopic oscillographic testing. - M.: Sov. radio, 1972. - 272p.
2. Naidyonov A.I. Transformation of millimicrosecond pulses spectrum. M.: Sov. Radio, 1973, 180 p.
3. Chernitser V.M., Kaduk B. G. Time scale converters of. - M: Sov. Radio, 1972. - 144p.
4. Zakharchenko V.D., Pak O.V., Maksimenko V.I., Vasilyev A.F. Formulation of the principle of uncertainty in stroboscopic signals processing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny Rossii. Radioelektronika.* 2012. No. 2. P. 43-46.
5. Zakharchenko V.D., Verstakov E.V., Tolika O.M. Radar monitoring over extended objects using stroboscopic radar. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2014. T. 9. No. 10 (137). P. 102-106.
6. Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G., Pak O.V. Estimate of sizes of small asteroids (cosmic bodies) of by the method of stroboscopic radiolocation//*Acta Astronautica.* - 2015. V.108. - P. 57-61; DOI:10.1016/j.actaastro.2014.12.006.
7. Hermanis E.Kh., Karklinsh V.G. Discrete stroboscopic converters. Riga: Zinatne, 1977. - 162p.
8. Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G. The way of averting threat for the planet by assessment extent of passive space objects size. Patent for the invention (Russian Federation) No. 2527252 dt. 07.06.2013. Printed 27.08.2014.- *Izobreteniya. Poleznye modeli.* 2014, No. 24.
9. Zakharchenko V.D., Balandin P.V. Way of radar control of space extended area. - Patent for the invention (Russian Federation) No. 2359286 dt. 04.10.2006. Printed 20.06.2009. - *Izobreteniya. Poleznye modeli [electronic resource].* 2009, No. 17.
10. Ryzhkov V. Yu., Zakharchenko V.D. Stroboscopic processing of broadband radio signals in receive path of short range location systems.- *Metody i ustroystva formirovaniya i obrabotki signalov v informatsionnykh sistemakh: mezhvuz. sbornik nauchnykh trudov / Ed. by Yu.N. Parshin.* - Ryazan: RGRTU, 2015. - P. 5-8.
11. Zakharchenko V.D. Problems of theory of stroboscopic transformation of narrowband periodic signals. - *Izv. vuzov SSSR. Priborostroyeniye*, No. 10, 1976, p. 5-8.
12. Zakharchenko V.D. Processing of complex radio signals by stroboscopic methods. AN SSSR. *Radiotekhnika i elektronika*, No. 10, 1980, p. 2099-2104.
13. Kazakov VA. Introduction to the theory of Markovian processes and some radio engineering tasks. M: Sov. radio, 1973, 232 p.
14. Zakharchenko V.D. On initial phase of the signal in stroboscopic transformation *Izv. VUZov SSSR. Priborostroyeniye.* - 1980. - No. 1. - P. 74-76.