

УДК 681.511

А.Р. САРАМОЛКИ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЗКОПОЛОСНОГО СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ**

Разработан и исследован метод частотно-временной дискретизации, состоящий в формировании отчетов частоты по непрерывному потоку нулевых переходов смеси гармонического сигнала узкополосного нормального шума. В качестве оценки эффективности информационного преобразования используются величина дисперсии флуктуации между соседними «нулями» частотно-временной выборки. Приведены расчетные соотношения. Исследована задача оценки информационной эффективности узкополосного случайного процесса при частотно-временной дискретизации и модернизации используемых частотно-фазовых измерителей различного назначения в том числе и метрологических измерителях.

Ключевые слова: метод, шум, частота, сигнал, фаза, измеритель, поток.

Введение

Существующие в настоящее время для практического применения приборы и методы измерения частоты и сдвига по фазе в основном предназначены для метрологических измерений.

В большинстве метрологических приборов, используемых, при частотно-фазовых измерениях применяются цифровые методы преобразования полезной информации и соответственно цифровые устройства их реализации [1, 2].

Наряду с метрологическим направлением развития и совершенствования электронных приборов для частотно-фазовых измерений, имеет место научное и техническое направление, связанное с частотно-фазовыми измерениями, применяемыми в радиотехнических измерительных системах [3 – 5].

Оба направления тесно соприкасаются при решении задачи преобразования входного процесса в цифровую форму с минимальными потерями полезной информации о частоте и начальной фазе. Как правило, при статическом способе, определения точности измерений частоты и фазы оцениваются случайные и систематические погрешности, обусловленные наличием помех различной физической природы их возникновения [6]. Оценки информационных потерь при знаковом преобразовании узкополосного случайного процесса и оптимальной обработки последнего приведены в [7].

Полученные результаты в очередной раз подтверждают тот очевидный факт, известный в практических приложениях, особенно при метрологических измерениях частоты, когда амплитуда сигнала не учитывается, а сама частота измеряется с помощью частотомера. В этом случае обрабатываемая

сигнала не учитывается, а сама частота измеряется с помощью частотомера. В этом случае обрабатываемая сигнальная выборка представляет собой непрерывный поток нулевых переходов, наблюдаемых на фиксированном интервале времени.

Такой же способ частотных измерений используется и в реально существующих радиотехнических устройствах и системах, например частотных измерителях малых расстояний доплеровских измерителях скорости движения объектов [8, 9]. В данном случае мы имеем дело с гармоническим сигналом с изменяющейся частотой, зашумленным узкополосным квазигармоническим шумом, формируемым резонансным трактом радиотехнической системы. Кроме того частота полезного сигнала может не совпадать с центральной частотой настройки резонансного тракта.

Перечисленные выше обстоятельства должны учитываться при формировании дискретной выборки отчетов узкополосного процесса, используемых для дальнейшей обработки с цифровой оценкой частоты или фазы.

При этом необходимо обеспечить минимальные информационные потери.

Цель приведенных в статье исследований состоит в разработке и исследовании эффективной дискретизации узкополосного случайного процесса, основанной на формировании выборки дискретных отчетов частоты процесса по потоку нулевых переходов смеси полезного сигнала и шума.

Основное содержание статьи

Сформируем основные признаки дискретизации, которую в дальнейшем будем называть эффек-

тивной, при этом будем считать, что исходный поток нулевых переходов является непрерывным процессом, т.е. учитываются все соседние положительные или отрицательные нулевые переходы, наблюдаемые на фиксированном интервале наблюдения.

1. Дискретизованный процесс должен представлять поток случайных чисел – дискретных отсчетов частоты, сформированных по потоку непрерывных нулевых переходов.

2. Минимальное количество дискретных отсчетов выборки частоты должно удовлетворять основным параметрам состоятельной статистической выборки независимых случайных чисел.

3. Минимальный временной интервал между соседними отсчетами выборки, определяется параметрами резонансной фильтрующей системы, предшествующей устройству формирования потока нулевых переходов.

4. Формирователь дискретизованных отсчетов частоты должен обладать требуемой точностью и простотой технической реализация при минимальных информационных потерях.

На чисто формальном уровне описанная процедура эффективной дискретизации выглядит следующим образом.

Формируется непрерывный поток нулевых переходов узкополосного квазигармонического процесса:

$$U(f) = V(t) \cos \Phi(t), \quad (1)$$

где $V(t)$ – огибающая сигнала (процесса);

$\Phi(t) = \omega_c t + \varphi_c + \xi(t)$ – полная фаза сигнала;

ω_c – частота;

φ_c – начальная фаза;

$\xi(t)$ – случайная добавка, обусловленная действием шума.

Осуществив операцию двухстороннего ограничения и дифференцирования имеем поток $\overline{t^+}$ нулевых переходов в положительном направлении

$$\overline{t^+} = t_0, t_1, \dots, t_{N-1}, t_N, \quad (2)$$

где N – полное число нулевых переходов $\overline{t^+}$ на интервале наблюдения T ;

$t_N - t_{N-1} = 2\pi/\omega_c$ – временной интервал между соседними нулевыми переходами.

Формируется выборка отсчетов частоты по потоку нулевых переходов $\overline{t^+}$, при известных или заданных параметрах фильтрующего тракта, а именно, центральной частоте настройки ω_0 равной ω_c полосе пропускания $\Delta\omega$ на требуемом уровне и форме амплитудно-частотной характеристики.

$$\overline{f} = f_0, f_1, \dots, f_{K-1}, f_K, \quad (3)$$

где K – полное число отсчетов частоты на интервале наблюдения T ;

$t_K - t_{K-1} = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$ – временной интервал между

соседними отсчетами частоты.

При формировании выборки \overline{f} из выборки $\overline{t^+}$ необходимо осуществить преобразование вида

$$\overline{f}_i = A(t^+), \quad (4)$$

где A – оператор, выполняющий преобразование на временном интервале $\Delta t = 2\pi/\Delta\omega$ потока нулевых переходов $\overline{t^+}(\Delta t)$ в отсчет частоты f_i .

Статистически состоятельное преобразование должно соответствовать условию минимума среднеквадратного отклонения оценки f_i^* от математического ожидания, равного центральной частоте резонансного тракта $F_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$.

$$(f_i^* - F_0)^2 = \min, \quad (5)$$

Или наперед заданной величине ξ которая может быть рассчитана при известном отношении сигнал/шум $q = \frac{V^2(t) \cdot T}{N_0}$, N_0 – спектральная плотность мощности шума, с учетом формы амплитудно-частотной характеристики фильтрующего тракта, что эффективно определению функции корреляции узкополосного случайного процесса.

Из соотношения (5) следует, что на интервале Δt мы должны обработать поток нулей образом, чтобы получить наилучшую оценку f_i^* , удовлетворяющую введенным признакам частотно-временной дискретизации.

Будем считать наилучшей оценкой f_i^* , удовлетворяющей введенным признакам эффективности дискретизации оценки, частотомером

$$f_i^* = \frac{(M_j)}{\Delta t}, \quad (6)$$

где M_j – количество нулевых переходов потока $\overline{t^+}$ на мерном интервале Δt .

Если теперь к сформированной выборке f_i^* применить статистическую методику оценки параметров случайного процесса \overline{f}_i^* , то наилучшей оценкой частоты на интервале наблюдения T будет

$$\overline{\langle f_i^* \rangle} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K f_i^*, \quad (7)$$

где K – общее количество сформированных оценок.

Подставив (7) в (6) получим

$$\langle f_i^* \rangle = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^K \langle M_j \rangle_i. \quad (8)$$

Ошибка дискретности счета $\delta(N_j)$ будет равна ± 1 (один нулевой переход). Следовательно

$$\langle f_i^* \rangle = \frac{1}{T} M_0 K,$$

где $M_0 = \langle M_j \rangle_i$, $T = \Delta t \cdot K$.

Тогда

$$\langle f_i^* \rangle = \frac{M_0}{\Delta t} = F_0. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что среднее значение оценки частоты при $f_c = F_0$ является состоятельной, т.е. несмещенной оценкой при больших отношениях сигнал/шум [10].

Дисперсия оценки частоты (9) может быть найдена через дисперсию флуктуаций эквивалентного временного интервала $\tau_0 = 1/F_0$. Воспользовались результатами оценки $\tau_0 = \langle \tau_i \rangle$ и дисперсия случайной величины τ , полученными в [10] приведем расчетное соотношение

$$\sigma_{\tau_g}^2 = \frac{2}{\alpha^2 \omega^2} \left[1 + R\left(\frac{\pi}{\omega_0}\right) \right], \quad (10)$$

где $\alpha^2 = \frac{v_m^2}{\sigma_{ш}^2}$ – отношение сигнал/шум по мощности;

$\sigma_{ш}^2$ – дисперсия нейтрального шума;

$R\left(\frac{\pi}{\omega_0}\right)$ – функция корреляции огибающей

входного сигнала;

ω_0 – частота;

v_m^2 – квадрат амплитуды наблюдаемого узкополосного процесса.

Таким образом, количественной мерой информационной эффективности выборки $\overline{\langle f_i^* \rangle}$ можно считать величину σ_{τ}^2 , которая по формальным признакам, сформированным ранее является наиболее объективной при заданном алгоритме (7) оценивание средней частоты $\langle f_i^* \rangle$ на наблюдаемом временном интервале.

Расстройка частоты гармонического сигнала ω_0 относительно центральной частоты настройки

фильтрующей системы F_0 увеличивает дисперсию σ_{τ}^2 примерно на 20%.

При достаточно высоком отношении сигнал/шум ($\alpha \gg 1$) $R\left(\frac{\pi}{\omega_0}\right) \approx 1$.

Тогда при $\omega_0 = F_0$

$$\Delta \alpha \langle F_0 \sigma_{\tau}^2 = 4(\alpha \omega_0)^{-2}. \quad (11)$$

Для подтверждения, полученных в изложенном выше аналитическом материале были выполнены на основе компьютерного моделирования экспериментальные исследования эффективности предложенного метода дискретизации в сравнении с методом счета числа нулей (метод частотомера) [1] и методом алгоритмического периодомера [11].

Моделирование выполнялось в вычислительной среде MATLAB при следующих исходных данных: частота полезного сигнала $f_c = f_0 = 1000$ Гц, $f_c \neq f_0 = 1002$ Гц; полоса пропускания формирующего узкополосного фильтра составляла $\Delta f_1 = 10$ Гц и $\Delta f_2 = 5$ Гц; отношение сигнал/шум по мощности α^2 варьировалось в пределах $(0 \div 20)$ дБ $(0 \div 10)$ раз; число моделируемых выборок $N = 50$ при длине временного интервала единичной выборки составляла $T = 1$ с.

В качестве меры информационной эффективности различных методов дискретизации, эквивалентной σ_{τ}^2 была выбрана дисперсия оценки частоты σ_f^2 полезного гармонического сигнала, маскируемого нормальным шумом.

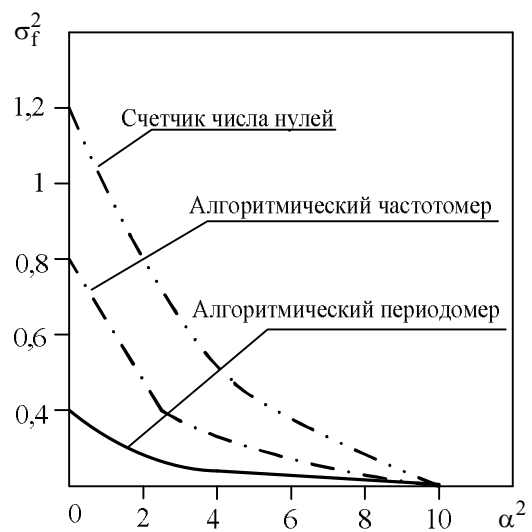


Рис 1. Зависимость дисперсии σ_f^2 при $f_c = f_0$, $\Delta f = 5$ Гц

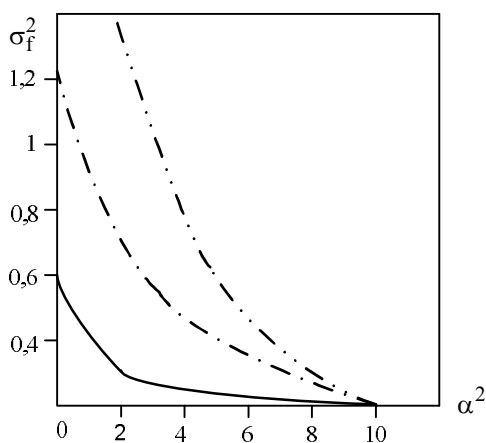


Рис 2. Зависимость дисперсии σ_f^2 от полосы $\Delta f = 10\text{ГГц}$ при $f_c = f_0$

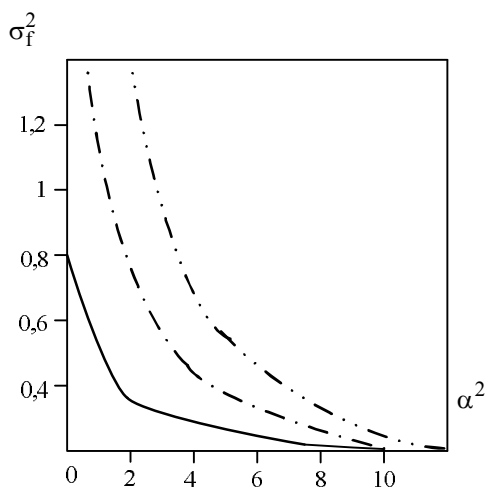


Рис 3. Зависимость дисперсии σ_f^2 при $f_c = 1,002\text{ГГц}$, $\Delta f = 5\text{ГГц}$

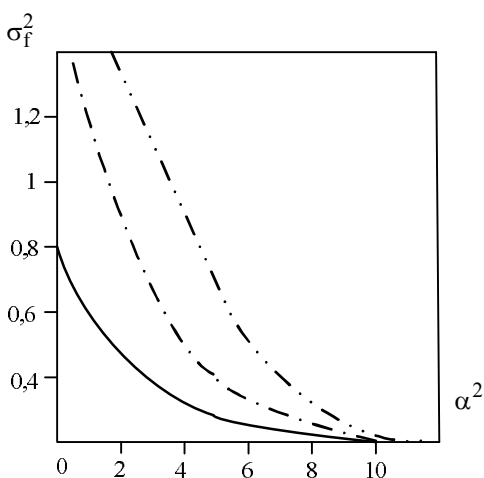


Рис 4. Зависимость дисперсии σ_f^2 от расстройки $f_c = 1,002\text{ГГц}$, при $\Delta f = 10\text{ГГц}$

Зависимости дисперсии оценки частоты σ_f^2 от отношения сигнал/шум a^2 для счетчика числа нулей, алгоритмического частотомера и периодомера при $\omega_c = \omega_0$, $\Delta f = 5\text{ГГц}$, $T = 1\text{с}$, $N = 50$ (число выборок).

Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 1 – 4.

Анализ графических зависимостей показывает, что наилучшими информационными свойствами обладает алгоритмический частотомер. Исследованный в работе алгоритмический частотомер занимает промежуточное положение, его основным преимуществом является простота формирования частотной выборки по потоку нулевых переходов в сравнении с алгоритмическим периодомером суть работы которого состоит в формировании выборки отчетов частоты на интервале наблюдения T по набору независимых временных интервалов τ_i между парой смежных нулевых переходов из общего потока \bar{t} с дальнейшим пересчетом в выборку отчетов частоты $f_i = 1/\tau_i$.

Из графических зависимостей, приведенных на рис. 1 следует вывод о том, что при $a^2 \geq 20\text{дБ}$ эквивалентная информационная эффективность счета нулевых переходов, алгоритмического частотомера алгоритмического периодомера одинакова. Однако при $a^2 \leq 20\text{дБ}$ т.е., по мере уменьшения отношения сигнал/шум выигрыш алгоритмических методик и алгоритмов может достигать в области пороговых отношений сигнал/шум (3 ÷ 5) дБ (2 ÷ 3) раза может достигать по σ_f^2 до 4 раз при $\Delta f = 5\text{ГГц}$ и $f_0 = f_c$, а приведенного в работе метода до 2 раз. При расстройке $f_c \neq f_0$ в пределах $\Delta f/2$ (рис. 2 ÷ 4) выигрыш по сравнению с частотомером может достигать (4 ÷ 6) раз при $a^2 = (3 \div 5)\text{дБ}$.

Заключение

В настоящей статье исследована задача оценки информационной эффективности узкополосного случайного процесса при частотно-временной дискретизации.

Сформированная цель исследований полностью достигнута.

На основе выполненного анализа эквивалентной эффективности различных методов дискретизации показано, что рассмотренный в работе метод может быть использован в различных устройствах и системах измерения частоты и фазы сигналов и в

частности, в доплеровских системах, фазовых системах определения местоположения объектов, при модернизации используемых частотно-фазовых измерителей различного назначения в том числе и метрологических измерителях.

Литература

1. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: учебн. пособие для студентов ВТУЗов / Э.Г. Атамалян. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1989. – 384 с.
2. Мирский Г.Я. Микропроцессоры в измерительных приборах / Г.Я. Мирский. – М.: Радио и связь, 1984. – 160 с.
3. Винницкий А.С. Автономные радиосистемы: учеб. пособие для вузов / А.С. Винницкий. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.
4. Кинсультан И.Е. Фазовый метод определения координат / И.Е. Кинсультан, В.Д. Рубцов, М.А. Фабрик. – М.: Сов. радио, 1979. – 280 с.
5. Тузов Г.И. Выделение и обработка информации в доплеровских системах / Г.И. Тузов. – М.: Сов. радио, 1967. – 255 с.

6. Фалькович С.Е. Основы статистической теории радиотехнических систем: учебн. пособие / С.Е. Фалькович, П.Ю. Костенко. – Х.: ХАИ, 2005. – 389 с.

7. Фалькович С.Е. Эффективность обработки знаковой функции узкополосного сигнала при частотно-фазовых измерениях / С.Е. Фалькович, М.М. Бендерський, Б.Ф. Горбуненко // Системы управления летательных аппаратов: темат. сб. науч. тр-ов. – Вып. 2. – Х., 1974. – С. 3-9.

8. Сосновский А.А. Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов: справ. / А.А. Сосновский, И.А. Хаймович. – М.: Транспорт, 1987. – 256 с.

9. Авиационная радионавигация: справ. / А.А. Сосновский, И.А. Хаймович и др.; под ред. А.А. Сосновского. – М.: Транспорт, 1990. – 264 с.

10. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов / В.И. Тихонов. – М.: Наука, 1970. – 392 с.

11. Печенин В.В. Эффективные методы дискретизации сигнала и нормального шума при частотных измерениях / В.В. Печенин, А.Р. Сарамолки, А.В. Якушин // Системы управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2009. – Вып. 4 (12). – С. 47-50.

Поступила в редакцию 1.03.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Проектирование радиоэлектронных систем летательных аппаратов» И.В. Барышев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ОЦІНКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВУЗЬКОСМУГОВОГО ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ ПРИ ЧАСТОТНО-ЧАСОВІЙ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ

А.Р. Сарамолки

Розроблено та досліджено метод частотно-часової дискретизації, що складається у формуванні звітів частоти з безперервного потоку нульових переходів суміші гармонійного сигналу вузькополосного нормального шуму. В якості оцінки ефективності інформаційного перетворення використовуються величина дисперсії флуктуації між сусідніми «нулями» частотно-часової вибірки. Наведено розрахункові співвідношення. Досліджено завдання оцінки ефективності інформаційного вузькосмугового випадкового процесу при частотно-часовій дискретизації та модернізації використовуваних частотно-фазових вимірників різного призначення у тому числі і метрологічних вимірників.

Ключові слова: метод, шум, частота, сигнал, фаза, вимірник, потік.

EVOLUTION OF THE EFFECTIVENESS OF INFORMATION NARROWBAND RANDOM PROCESS WITH TIME-FREQUENCY SAMPLING

A.R. Saramolki

Developed and explored method of frequency-temporal diskretizatsii, consisting of forming of reports of frequency on the continuous stream of zero transitions of mixture of harmonic signal of uzkopolosogo of normal noise. As an estimation of efficiency of informative transformation used size of dispersion of fluctuation between the nearby «zeros» of frequency-temporal selection. Correlations of calculations are resulted. In the real article the task of estimation of informative efficiency of uzkopolosnogo casual process is explored during frequency-temporal diskretizatsii and modernization of the used measuring devices of frequency-phases of the different setting including metrologicheskikh measuring devices.

Key words: method, noise, frequency, signal, phase, measuring device, stream.

Сарамолки Амир Рузбех – аспірант каф. «Проектирование радиоэлектронных систем летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.