

СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ДОПЛера НА ОСНОВЕ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ МАСШТАБА ВРЕМЕНИ

В статье представлено решение задачи по повышению разрешающей способности распознавания и измерения зарегистрированного доплеровского сигнала на основе целенаправленного спектрально-временного преобразования зашумленного доплеровского колебания. Приведены основные соотношения для определения интервальных выборок доплеровских частот и рекомендации по итерациям производных функции частоты Доплера.

Ключевые слова: спектр, спектральный метод, доплеровское колебание, разрешающая способность.

Повышение точности измерения радиальной скорости летательных объектов (ЛО) малых размеров непосредственно связано с повышением разрешающей способности по дальности и скорости соответствующих доплеровских информационно-измерительных систем (ДИИС). Эта связь обусловлена увеличением соотношения «шум/сигнал» отраженных сигналов от ЛО малых размеров при увеличении дальности их полета. Анализ современных ДИИС показывает, что лежащие в их основе спектральные методы обнаружения и выделения измерительной информации из доплеровских зашумленных сигналов используются на пределе своих возможностей и не имеют очевидной перспективы по увеличению точности определения параметров доплеровских колебаний. Так граница распознавания у подобных отечественных и зарубежных ДИИС находится при отношении «шум/сигнал» не более чем 30/1 даже при небольших ускорениях ЛО (на уровне 15-30 м/с).

В данной работе представлено решение задачи по повышению разрешающей способности распознавания и измерения зарегистрированного доплеровского сигнала на основе разработанного авторами спектрально-временного метода определения частоты доплеровского колебания с частотой $\Omega_{\delta}(t)$ с использованием целенаправленного изменения масштаба времени. Общие принципы, заложенные в этом методе, и их потенциальные возможности представлены в [1] и [2]. В качестве фрагмента доплеровского сигнала для исследования выбран его i -отрезок (далее – сечение) в виде радиоимпульса с частотной модуляцией (ЧМ), амплитудой U_m и длительностью $\tau \gg 2\pi/\Omega_{\delta \min}(t)$,

которые наилучшим образом, как показали предварительные исследования, отражают свойства функции скорости реальных ЛО:

$$u_i(t) = u_0 \cdot \cos \left[\int_0^{\tau} \Omega_i(t) dt \right],$$

$$\Omega_i(t) = (\omega_{oi} + \alpha_i \cdot t + \beta_i \cdot t^2),$$

$$\Delta \Omega_i(t) = \alpha_i \cdot t + \beta_i \cdot t^2, \quad (1)$$

где ω_{oi} – значение частоты несущей радиоимпульса в начале i -сечения;

α_i – первая производная частоты на i -сечении;

β_i – вторая производная частоты на i -сечении;

$\Delta \Omega_i(t)$ – девиация несущей частоты на i -сечении.

Ниже на рисунке 1 приведен анализ качества определения параметров доплеровского колебания спектральным методом на уровне минус 1,5 дБ от максимальных значений (погрешность метода определяется его разрешающей способностью, определяемой шириной полосы частот главного лепестка спектра на заданном уровне) двух сечений с одинаковым размером $\tau_i = 20 \text{ с}$, отличающихся только динамикой доплеровского колебания:

1) на сечении τ_1 ЛО движется равномерно: $\alpha_1 = 0; \beta_1 = 0; \Omega_{01} = 10 \text{ рад/с}$;

2) на сечении τ_2 ЛО движется ускоренно: $\alpha_2 = 0,1; \beta_2 = 0; \Omega_{02} = 10 \text{ рад/с}$.

Из рисунка 1 следует, что, несмотря на примерно одинаковую энергию сигналов на этих сечениях, точность определения среднего значения несущей частоты радиоимпульса спек-

ральным методом различная. На сечении τ_1 погрешность определения указанного значения составляет: $\Delta\omega_1 \approx 0,27 \text{ рад/с}$; на сечении τ_2 эта погрешность имеет гораздо большую величину: $\Delta\omega_2 \approx 1,6 \text{ рад/с}$. Кроме этого, из рисунка 1 следует, что для немодулированного радиоимпульса (сечение τ_1) его энергия в частотной области в связи с сужением главного лепестка спектральной характеристики перераспределяется в сторону увеличения его амплитуды. И в случае белого шума с уровнем спектра $S_{шум}$ (рис. 1), определяющим разрешающую способность распознавания колебания (1), доплеровское колебание на сечении τ_2 – в отличие от колебания на сечении τ_1 – не может быть распознано посредством спектрального метода. Дополнительным исследованием было установлено, что увеличение энергии ЧМ-радиоимпульса посредством увеличения размера τ_2 также не приводит к увеличению амплитуды спектральной характеристики, то есть не улучшает разрешающую способность по распознаванию доплеровского колебания, при этом существенно увеличивается значение $\Delta\omega_2$, что приводит к снижению точности его измерения спектральным методом.

Из приведенного выше анализа следует вывод: *уменьшение девиации несущей частоты в ЧМ-радиоимпульсе приводит к повышению разрешающей способности распознавания и точности измерения среднего значения несущей частоты радиоимпульса в условиях белого шума.*

Подобное преобразование *без потери информации о радиальной скорости ЛО* возможно при переносе сигнала (1) в *систему нелинейного времени* $t_{ni}(t)$ [1], масштаб которой на выбранном i -сечении формируется согласно следующему закону преобразования:

$$t_{ni}(t) = \frac{\Omega_{\partial i}(t)}{\omega_{0i}} \times t, \quad (2)$$

где $t_{ni}(t)$ – новая (преобразованная) ось времени;

ω_{0i} – несущая частота ЧМ-радиоимпульса в начале сечения;

$\Omega_{\partial i}(t)$ – фактическая функция частоты ЧМ-радиоимпульса на сечении.

С использованием в качестве функции частоты Доплера

модели (1): $\Omega_{\partial i}(t) = \omega_{0i} + \alpha_i \cdot t + \beta_i \cdot t^2$ – на основе (2) преобразование системы нелинейного масштабирования времени для ЧМ-радиоимпульса производится следующим образом:

$$t_{ni}(t) = \frac{\Omega_{\partial i}(t)}{\omega_{0i}} \times t = \left[1 + \frac{\alpha_i}{\omega_{0i}} \cdot t + \frac{\beta_i}{\omega_{0i}} \cdot t^2 \right] \times t = \left[1 + \alpha'_i \cdot t + \beta'_i \cdot t^2 \right] t = t + \Delta\Omega'_{\partial i}(t) \quad (3)$$

где $\alpha'_i = \frac{\alpha_i}{\omega_{0i}}$, $\beta'_i = \frac{\beta_i}{\omega_{0i}}$ – нормированные производные ЧМ-радиоимпульса;

$\Delta\Omega'_{\partial i}(t) = \alpha'_i \cdot t + \beta'_i \cdot t^2$ – нормированная функция девиации несущей частоты ЧМ-радиоимпульса.

Такой подход позволяет трансформировать ЧМ-радиоимпульс из одной системы временных координат в другую систему, не изменяя значения его огибающей, а лишь преобразуя (сжимая, растягивая) координатную ось времени таким образом, чтобы в новой системе времени t_H радиоимпульс не содержал частотной модуляции.

На практике можно лишь предполагать ожидаемые значения α'_i , β'_i и диапазон изменения $\Delta\Omega'_{\partial i}(t)$ на конкретном i -сечении. Следовательно, *методика устранения частотной модуляции радиоимпульса в системе времени с координатой t_H должна заключаться в подборе, например методом итераций, истинных (реальных) значений α'_i , β'_i* . При этом совсем не требуется подбирать истинное значение ω_{0i} , так как при отсутствии девиации частота ω_{max} максимума модуля спектральной характеристики будет соответствовать ω_{0i} (рис. 1): $\omega_{max} \approx \omega_{0i}$. Для использования спектрального метода измерения ω_{0i} по значению ω_{max} необходимо устано-

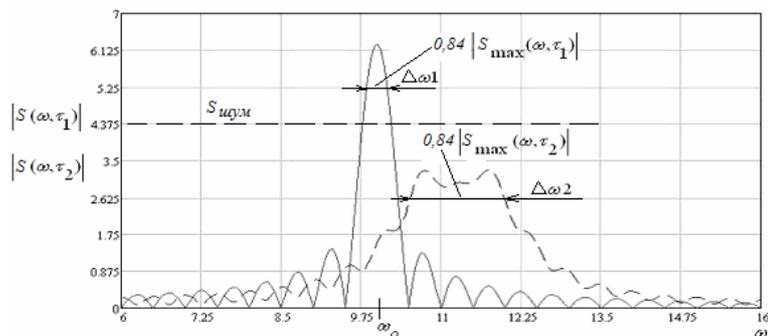


Рисунок 1. Графики модуля спектральных характеристик для сечений τ_1 и τ_2 ЧМ-радиоимпульса

вить погрешность этого метода (рис. 2), то есть границы справедливости равенства:

$$\omega_{0i} = \omega_{\max}. \quad (4)$$

В результате численных методов анализа зависимости $\Delta_{\omega_i} = \omega_{\max} - \omega_{0i}$ – отклонения максимума спектральной характеристики $|S_m(\omega)|$ радиоимпульса от его несущей ω_{0i} при различных $m = \tau_i \omega_{0i} / 2\pi$ была получена зависимость методической погрешности $\delta_s = |\Delta_{\omega}| / \omega_0$, график которой приведен на рисунке 3. Данная зависимость на всем интервале $m > 0,5$ была аппроксимирована с погрешностью не более 5% в виде (5):

$$\delta_s = e_{ogib}(m) \cdot e_{\cos}(m) \cdot e_{tg}(m), \quad (5)$$

где

$$e_{ogib}(m) = 1,5831 \cdot 0,0276^{0,4259 \cdot (2\pi m - 2,4262)^{0,3938}}$$

$$e_{\cos}(m) = \cos(4\pi m + 1) + 0,5$$

$$e_{tg}(m) = 0,38 \cdot tg(2\pi m + 1,0236) + 0,3$$

Для практической оценки указанной погрешности удобнее пользоваться асимптотической погрешностью $\delta_{s_{\max}}$, которая определяется огибающей функции погрешности (5):

$$\delta_{s_{\max}} = 1,5831 \cdot 0,0276^{0,4259 \cdot (2\pi m - 2,4262)^{0,3938}}. \quad (6)$$

И, наконец, для эскизной оценки величины $\delta_{s_{\max}}$ было получено выражение:

$$\delta_{s_{\max}} \leq 0,05\pi / m^2. \quad (7)$$

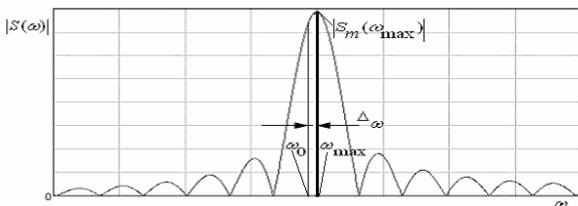


Рисунок 2. Определение погрешности спектрального метода определения несущей частоты радиоимпульса

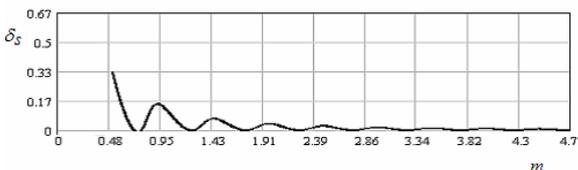


Рисунок 3. График зависимости методической погрешности определения ω_0 спектральным методом

Например, при $m=100$ (100 периодов колебаний на i -сечении) погрешность определения ω_{0i} по выражению (4) составит: $\delta_{s_{\max}} \leq 0,05\pi / 100^2 = 1,57 \cdot 10^{-6}$.

В целом, представленный в данной работе метод *спектрально-временного преобразования* (СВП) для определения функции частоты доплеровского колебания в составе шума применяется следующим образом. Зарегистрированный сигнал разбивается на k сечений одинакового размера. На каждом сечении τ_i осуществляется перенос зарегистрированного сигнала из системы времени t в систему t_u согласно (3) с учетом ожидаемых значений нормированных производных α_i, β_i . Затем подбором их значений достигается наибольшее значение максимума уровня модуля спектральной характеристики. После регистрации указанного максимума определяется значение ω_{\max} , и в соответствии с (4) с установленной методической погрешностью (6) регистрируется измеренное значение ω_{0i} – значение частоты в начале каждого i -сечения. Таким образом, создается k выборок мгновенных значений частоты ω_{0i} с интервалом τ_i , а также подобранных k значений нормированных производных α_i, β_i . В результате функцию частоты Доплера в зарегистрированном сигнале можно получить двумя способами:

1-й способ: получить функцию аппроксимацией (например, полиномиальной);

2-й способ: получить функцию с использованием подобранных значений α_i, β_i для каждого сечения:

$$\Omega_{\partial i}(t) = \omega_{0i} + \alpha_i \cdot \omega_{0i} \cdot t + \beta_i \cdot \omega_{0i} \cdot t^2, \quad (8)$$

а функцию частоты Доплера на всем интервале измерения составить аппроксимацией полученных для каждого из k сечений интервальных функций (8) (посредством их «склеивания»).

Необходимо отметить, что при использовании рассмотренного метода СВП производительность будет определяться процедурой подбора значений α_i, β_i . Простой перебор с определенным шагом может иметь два последствия: недопустимую погрешность определения частоты ω_{0i} при большом шаге итераций или приемлемую погрешность определения этой частоты при недопустимо большом времени обработки результатов измерения. Очевидно, что алгоритм оптимального перебора нормированных производных связан с характером поведения модуля спектраль-

ной функции на частоте ω_{\max} в зависимости от изменения девиации – вплоть до ее устранения.

Качественное поведение модуля спектральной характеристики на центральной частоте ω_{\max} характеризуется соотношением [1]:

$$|S(\omega_{\max})| \approx k_1 / \sqrt{\Delta\Omega} \leq U_m \tau / 2, \quad (9)$$

где k_1 – коэффициент масштаба, учитывающий влияние величины τ .

Максимум соотношения (9) достигается при отсутствии девиации несущей частоты ($\Delta\Omega = 0$) [2], при этом колебание (1) вырождается в немодулированный по частоте радиоимпульс с несущей частотой $\omega_0 = \omega_{\max}$. Модуль спектральной плотности радиоимпульса на центральной частоте определяется выражением $|S(\omega_{\max})| = U_m \tau / 2$. Следовательно, указанную выше зависимость нужно формировать также и от переменной τ , учитывая, что размер сечения должен быть достаточным, чтобы уровень максимума модуля спектральной характеристики преобладал над спектром $S_{шум}$ белого шума.

В качестве объекта для оценки зависимости (9) выбрана модель линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) радиоимпульса с единичной амплитудой и размером сечения t , как наиболее близкая математическая модель классу доплеровских колебаний, обозначенных в данной работе ДИИС:

$$e(t) = \cos\left(\int_0^t \omega(t) dt + \varphi\right) = \cos\left(\int_0^t \left(\omega_0 + \Delta\omega(t) \cdot t\right) dt + \varphi\right) = \cos\left[\left(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2\tau} \cdot t\right) \cdot t\right], \quad (10)$$

где ω_0 – начальная частота ЛЧМ-радиоимпульса;

$\Delta\omega$ – девиация частоты ЛЧМ-радиоимпульса на сечении t .

Центральная частота ЛЧМ-радиоимпульса:

$$\omega_y(\tau) = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} \omega(t) dt = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} \left(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2\tau} \cdot t\right) dt = \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}.$$

Для получения искомой функции используется модуль спектральной характеристики ЛЧМ-радиоимпульса на центральной частоте ω_y с единичной амплитудой и длительностью t , выражение которой определяется как:

$$S(\omega_y, \tau, \Delta\omega) = \int_0^{\tau} \cos\left[\left(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2\tau} \cdot t\right) \cdot t\right] \times e^{-j \cdot \omega_y \cdot t} dt. \quad (11)$$

Для придания универсального характера выражению (11) оно нормируется по следующим переменным и их соотношениям:

$$m = \frac{\tau}{2\pi/\omega_0}, \quad \Delta\Omega = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}, \quad \frac{\omega_y}{\omega_0} = 1 + \frac{\Delta\Omega}{2},$$

$$S(m, \Delta\Omega) = \frac{|S(\omega_y, \tau, \Delta\omega)|}{S(\omega_y, \tau, 0)}, \quad (12)$$

где $S(\omega_y, \tau, 0) = \pi \cdot m$, $m \neq 0$.

Если принять далее $\omega_0 = 1$, то с учетом (12) нормированная спектральная характеристика ЛЧМ-радиоимпульса на центральной частоте примет вид:

$$S(m, \Delta\Omega) = \frac{1}{\pi \cdot m} \int_0^m \cos\left(\left(1 + \frac{\Delta\Omega}{4\pi \cdot m} \cdot t\right) \cdot t\right) \times e^{-j \cdot \left(1 + \frac{\Delta\Omega}{2}\right) \cdot t} dt. \quad (13)$$

Функция (13) является функцией двух переменных $\Delta\Omega$ и m . В результате исследования зависимости (13) было установлено, что особенностью данной характеристики является ее зависимость от некоторого аргумента v , представленного произведением переменных $m, \Delta\Omega$: $v = m \times \Delta\Omega$. Таким образом, задача аппроксимации нормированной спектральной характеристики на центральной частоте ω_y решалась относительно переменной v , представленной выражением $v = m \times \Delta\Omega$.

Найденная функция (14) аппроксимирует нормированную спектральную характеристику (13) на центральной частоте ω_y с погрешностью не более 10%:

$$S_{ap}(v) = S_{ogib}(v) + S_{beat1}(v) + S_{beat2}(v), \quad (14)$$

$$S_{ogib}(v) = \left[\frac{1,072 \cdot e^{-0,808 \cdot \left(\frac{v}{300}\right)^{0,33}}}{\sqrt{523 \cdot v + 477}} + \frac{0,52}{300} \right];$$

$$S_{beat1}(v) = 0,01 \cdot e^{-0,548 \cdot v} \cdot \sin(3,2 \cdot v);$$

$$S_{beat2}(v) = 0,0023 \cdot e^{-0,05 \cdot v} \cdot \sin(0,373 \cdot v - 0,56).$$

На рисунке 4 изображен график зависимости модуля нормированной спектральной характеристики ЛЧМ-радиоимпульса на центральной частоте ω_y на интервале $v \leq 300$.

Данная зависимость позволяет спланировать закон итерации подбора α_i, β_i для каждого сечения τ_i изменением $\Delta\Omega = \nu / m$ для конкретного $m = \frac{\tau}{2\pi/\omega_c}$.

В частности, для обеспечения усредненно-линейного закона подбора значений α_i, β_i перебор $\Delta\Omega = \nu / m$ необходимо осуществлять по обратному к огибающей $S_{ogib}(\nu)$ закону.

Для перехода к абсолютным значениям по-

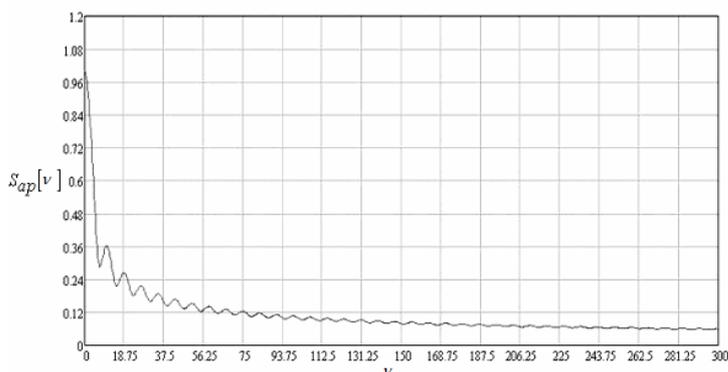


Рисунок 4. График зависимости модуля спектральной характеристики ЛЧМ-радиоимпульса от параметра ν

лучено соотношение зависимости модуля спектральной плотности на центральной частоте:

$$S(U_m, \tau, \Delta\omega) = \frac{U_m \pi m}{\omega_0} \times S(m, \Delta\Omega) = \frac{U_m \tau}{2} \times S\left(\frac{\tau}{2\pi/\omega_0}, \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right), (15)$$

где U_m – амплитуда колебаний ЛЧМ-радиоимпульса.

Таким образом, полученное выражение (15) позволяет корректно выбирать *минимальный* размер сечения τ ЛЧМ-радиоимпульса в зависимости от ожидаемого значения амплитуды U_m , девиации несущей частоты $\Delta\omega$ и уровня шума, достаточный, чтобы уровень максимума модуля спектральной характеристики на центральной частоте преобладал над спектром $S_{шум}$ шумовой помехи. С другой стороны, оно *предопределяет оптимальный закон итерации* подбора α_i, β_i для каждого сечения τ_i изменением $\Delta\omega$ до $\Delta\omega=0$.

11.11.2010 г.

Список использованной литературы:

1. Булатов В.Н., Дегтярев С.В. Метод выделения информативной части спектра зашумленных доплеровских сигналов с использованием нелинейной системы времени // Вестник ОГУ. – 2004. – №2. – С. 163-167.
2. Косарев Н.А., Булатов В.Н. Определение зависимости спектра ЛЧМ-радиоимпульса от его длительности и девиации на центральной частоте // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике: Материалы 7-й всероссийской научно-практической конф. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2008. – С. 256-259.

Сведения об авторах: **Косарев Никита Александрович**, преподаватель кафедры промышленной электроники и информационно-измерительной техники Оренбургского государственного университета. г. Оренбург, Шарлыкское шоссе, 5, корпус 15, к. 15237, тел. 89226214847, e-mail: nikita_kosarev@mail.ru; **Булатов Виталий Николаевич**, заведующий кафедрой промышленной электроники и информационно-измерительной техники Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор e-mail: bulat@com.osu.ru, тел. (3532) 222898; **Худорожков Олег Викторович**, доцент кафедры промышленной электроники и информационно-измерительной техники Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент

UDC 681.518.22

Kosarev N.A., Bulatov V.N., Hudorozhkov O.V.

SPECTRAL TIME METHOD OF DETERMINING THE DOPPLER FREQUENCY THROUGH TARGETED TIME CHANGE

The paper presents a solution to improve the recognition resolution and measurement of the recorded Doppler signal on the basis of targeted spectral and temporal transformation of the noisy fluctuations of the Doppler swing. It provides the basic relationships for determining the sampling interval of the Doppler frequencies and recommendations on the iterations of the derivatives of Doppler frequency

Keywords: spectrum, spectral method, the Doppler swing, resolution.

Bibliography:

1. Bulatov V.N., Degtyaryov S.V. Method of allocation of an informative part of a spectrum dirty Doppler-signals with use of nonlinear system of time // Vestnik OGU. – 2004. – №2. – S. 163-167.
2. Kosarev N.A., Bulatov V.N. Definition of dependence of a spectrum of the LCHM-RADIO IMPULSE from its duration and deviation on the central frequency // Modern information technologies in a science, formation and practice: Materials of 7th All-Russia scientifically-practical conference. – Orenburg: IPK OGU, 2008. – S. 256-259.