

УДК 621.396.984.2

В.В. ПЕЧЕНИН, В.И. БАРЫШЕВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***ЦИФРОВЫЕ АЛГОРИТМЫ УСРЕДНЁННОЙ ОЦЕНКИ ДОПЛЕРОВСКОЙ ЧАСТОТЫ ПРИ ПОЛИНОМИНАЛЬНОМ ЗАКОНЕ ЕЁ ИЗМЕНЕНИЯ**

Приведены методика и цифровые алгоритмы формирования усреднённой оценки доплеровской частоты в канале измерения скорости маневрирующей радиолокационной цели по потоку нулевых переходов аддитивной смеси сигнала и нормального шума.

алгоритм, доплеровская частота, дифференцирование, белый шум, импульс, отсчет

Введение

Дальнейшее совершенствование радиолокационных систем измерения параметров движения интенсивно маневрирующих воздушных целей связано с улучшением точности измерения доплеровской частоты отраженного от цели сигнала.

Увеличение длительности интервала измерения с целью получения более точной оценки частоты приводит к необходимости учёта нелинейного характера её изменения.

В общем случае можно считать, что наличие маневра цели приводит к полиномиальному закону изменения доплеровской частоты в пределах достаточно большого, но ограниченного в пределах выполнения манёвра временного интервала изменения.

Синтезированные к настоящему времени цифровые алгоритмы усреднённой оценки частоты для аппроксимации её изменения полиномом третьей степени приведены в работе [1]. Однако их техническая реализация и вычислительные процедуры достаточно сложны.

Целью настоящей работы является синтез упрощённых цифровых алгоритмов вычисления усреднённой оценки частоты при аппроксимации её изменения полиномом третьей степени за счёт использования нестандартной методики формирования выборки независимых отсчётов частоты на за-

данном интервале измерения, наблюдаемой на выходе узкополосной фильтрующей системы (следающего фильтра), или набора узкополосных доплеровских фильтров.

Изложение основного материала

Сигнал на выходе следающего фильтра доплеровской измерительной системы можно записать в следующем виде:

$$Y(t) = Amc \left(\omega t + \frac{1}{2!} \dot{\omega} t^2 + \frac{1}{3!} \ddot{\omega} t^3 + \dots + \frac{1}{M!} \omega^{(m-1)} t^m + \varphi_c \right) + N(t), \quad (1)$$

где Amc – амплитуда доплеровского сигнала;

$\omega, \dot{\omega}, \ddot{\omega}, \omega^{(m-1)}$ – доплеровская частота и её производные (точки сверху);

φ_c – начальная фаза;

$N(t)$ – нормальный, δ – коррелированный шум.

Схема формирования импульсов формирует серию импульсов положительной полярности, в точках перехода сигнала $y(t)$ через нулевой уровень, для которой справедлива запись

$$\varphi(t) = \varphi_c + \omega t + \frac{1}{2!} \dot{\omega} t^2 + \dots + \frac{1}{m!} \omega^{(m-1)} t^m + \varphi_h(t). \quad (2)$$

Если сигнал вида (2) можно назвать фазовым, то сигнал вида

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}(t) = \omega + \dot{\omega}t + \frac{1}{2!}t^2 + \dots + \\ + \frac{1}{(m-1)!}\omega^{(m-1)}t^{(m-1)} + \dot{\varphi}_N(t), \end{aligned} \quad (3)$$

полученный в результате дифференцирования по времени выражения (2), можно условно назвать частотным.

Очевидно, что слагаемые $\varphi_N(t)$ в (2) и $\dot{\varphi}_N(t)$ в (3) будут вызывать шумовые ошибки в измерениях частоты и фазы.

Аппроксимируем закон изменения частоты сигнала (3) на интервале измерения T полиномом третьей степени

$$X(T) = \dot{\varphi}(t) = a_1 + a_2t + a_3t^2 + a_4t^3 + \dot{\varphi}_N(t), \quad (4)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты полинома.

Рассмотрим усредненную оценку коэффициента a_1^* – доплеровской частоты на интервале T .

Искомую оценку a_1^* при усреднении (4) по методу наименьших квадратов (в случае, когда начало отсчета выбирается в середине интервала наблюдения T) будем определять формулой, которую нетрудно получить, используя последовательность коэффициентов полинома методом наименьших квадратов. Для дискретной некоррелированной последовательности X_i выборок частоты в моменты времени t_i ($i = \overline{1..n}$) при достаточно большом

$n = \frac{T}{\Delta T}$ (ΔT – интервал единичного измерения),

можно получить на выходе ЧД:

$$a_1^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \left[2,25 - t_i^2 \frac{15}{T^2} \right]. \quad (5)$$

Будем формировать единичные оценки частоты x_i в моменты времени t_i с помощью частотомера и периодомера следующим образом:

$$X_i = \frac{N_0}{\Delta T_i}, \quad (6)$$

где N_0 – фиксированное количество нулевых переходов входного сигнала на «плавающем» интервале

времени ΔT_i , равному временному расстоянию между первым и последним переходом через нуль фиксированного количества импульсов N_0 , которое измеряется периодомером.

Приближённо можно оценить величину ΔT_i и фиксированное число N_0 по величине полосы пропускания узкополосного фильтра или набора доплеровских фильтров [2]:

$$\langle \Delta T_i \rangle = \frac{1}{\Delta f_\Phi}. \quad (7)$$

Величина

$$N_0 \approx \langle \Delta T_i \rangle f_{ok}^*, \quad (8)$$

где f_{ok}^* – частота настройки фильтра;

k – номер настроенного фильтра.

Учитывая соотношения (7), (8), из выражения (5) получим:

$$a_{1\Phi}^* \approx N_0 \Delta f_\Phi \cdot 2,25 - \frac{N_0 \Delta f}{n} \sum_{i=1}^n t_i^2 \frac{15}{T^2} = \quad (9)$$

$$= N_0 \Delta f_\Phi \cdot 2,25 - \frac{15 N_0 \Delta f}{n T^2} \sum_{i=1}^n t_i^2;$$

$$a_{1k}^* \approx 2,25 f_{0k}^* - \frac{f_{0k}^*}{T^2} \sum_{i=1}^n t_i^2. \quad (10)$$

Проанализируем полученные выражения. Как видно из соотношения (9), точностные свойства оценки $a_{1\Phi}^*$ определяются полосой пропускания следящего фильтра Δf_Φ , которая, в свою очередь, определяется нулевой дисперсией частотной девиации σ_{uu}^2 и дисперсией остаточной расстройки фильтра σ_Φ^2 .

Приведём конечные результаты оценки указанных дисперсий, заимствованных из работы [3], для следящего фильтра, используемого в канале измерения скорости доплеровской РЛС [4]:

$$\sigma_{uu}^2 = \frac{\pi}{3} \frac{1}{q^2} \frac{\alpha^2}{\sqrt{\alpha T_\Sigma}}; \quad (11)$$

$$\sigma_\Phi^2 = \frac{\pi}{3} \frac{1}{q^2} \frac{\alpha^2}{\sqrt{\alpha T_\Sigma}}, \quad (12)$$

где $q^2 = \frac{P_c}{P_u}$ – отношение сигнал/шум на входе

фильтра;

α – полоса пропускания фильтра;

T_Σ – постоянная времени корректирующей цепи следящего фильтра.

Для неследящего фильтра исключается эффект срыва слежения за целью при совершении ею интенсивного маневра. Однако в этом случае

$$\sigma_{a_1 k} \cong \Delta f_{\phi k}, \quad (13)$$

что много больше, чем σ_ϕ для следящего фильтра.

Конкретная величина $\Delta f_{\phi k}$ зависит от диапазона изменения доплеровской частоты, количества фильтрующих схем и возможностей практической реализации необходимой добротности фильтров.

Отметим простоту реализации измерительных схем (9), (10) по сравнению с реализацией измерительной схемы, построенной по алгоритму (5).

При этом точностные свойства получаемых оценок полностью определяются резонансными свойствами фильтрующих схем, а в случае оценки по алгоритму (5):

$$\sigma_{a_1}^2 = 2,25 - \frac{\sigma_\omega^2}{n}, \quad (14)$$

где σ_ω^2 – дисперсия ошибки единичного измерения частоты в точках t_i .

Из соотношения (14) вывод о том, что $\sigma_{a_1}^2 \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$ некорректен из чисто практической ситуации.

В то же время алгоритм обработки, даже без учёта отсчётов x_i , остаётся весьма сложным, так как каждую оценку x_i необходимо умножать на весовой коэффициент $M_i = 2,25 - \frac{15}{T^2} t^2$, просуммировать результаты и разделить полученную сумму на число выборок x_i .

Заключение

В данной работе приведены методика формирования единичных отсчётов доплеровской частоты и разработанные на её основе цифровые алгоритмы усреднённой оценки частоты при полиномиальном законе её изменения на интервале измерения. Усреднённая оценка формируется по дискретным отсчётам частоты сигнала на выходе следящего фильтра и набору доплеровских фильтров с фиксированной настройкой.

Дисперсия усреднённых оценок частоты определяется резонансными свойствами фильтрующих схем, а именно, полосой пропускания и дискретной частотой настройки в случае дискретного набора фильтров. Отличительной особенностью разработанных алгоритмов является простота их технической реализации.

Разработанные технические алгоритмы могут быть рекомендованы для использования в доплеровских РЛС, а также при разработке радиотехнических систем различного назначения, предназначенных для частотных измерений.

Литература

1. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах / В.И. Меркулов, А.И. Канащенков, А.И. Петров и др. – М.: Радиотехника, 2004. – 312 с.
2. Меркулов В.И., Лепин В.Н. Радиоэлектронные системы самонаведения. – М. Радио и связь, 1997. – 388 с.
3. Максимов М.В., Меркулов В.И. Радиоэлектронные следящие системы. Синтез методами теории оптимального управления. – М. Радио и связь, 1990. – 280 с.

Поступила в редакцию 10.02.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.Ю. Костенко, Харьковский университет Воздушных Сил, Харьков.