

Программная модель цифрового слеящего измерителя дальности импульсной радиолокационной системы

В. С. Бахолдин, Д. А. Леконцев

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
vka@mil.ru

Аннотация. Рассмотрены принципы построения и обобщенная структурная схема цифрового слеящего измерителя дальности, используемого в импульсных радиолокационных системах. Представлена программная модель цифрового слеящего измерителя дальности, реализованная в среде Matlab и рассмотрены возможности ее применения. Описан функционал модели и порядок исследования влияния различных параметров модели на характеристики слеящего измерителя.

Ключевые слова: цифровой слеящий измеритель дальности; импульсная радиолокационная система; дискриминационная характеристика

I. ВВЕДЕНИЕ

В первых радиолокационных системах (РЛС) требуемая точность определения координат цели определялась расстоянием визуальной видимости до цели. Темп выдачи отсчетов дальности был невысокий и при флюктуациях сигнала, вызванных шумами и другими факторами, наблюдалось пропадание отметки от цели и отсчетов дальности соответственно. Появление реактивных самолетов, ракет перехватчиков и космических ракет потребовало создания новых типов измерителей – слеящих измерителей дальности.

Следующий шаг в построении слеящих измерителей был вызван бурным развитием цифровой техники. Переход от аналоговых устройств к цифровым позволил повысить характеристики слеящих систем, стабильность их параметров и надежность, а также уменьшить массогабаритные показатели аппаратуры. Цифровые слеящие системы существенно упрощают процессы настройки и регулировки, а также позволяют реализовать в сложные алгоритмы обработки сигналов. Перечисленные достоинства предопределили широкое применение в современных РЛС цифровых слеящих измерителей дальности (ЦСИД).

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СЛЕЯЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ДАЛЬНОСТИ

Перемещение цели вызывает изменение текущего навигационного параметра – дальности и соответствующие ему измеряемого параметра сигнала. Наличие шумов приводит к тому, что измеряемые

процессы являются случайными. Таким образом, задача измерителя процесса $v(t) = v_s(t) + v_n(t)$ состоит в формировании оценки $\hat{v}(t)$, которая в соответствии заданным критерием соответствует действительному закону измерения параметра сигнала $v_s(t)$, искаженного шумом $v_n(t)$. То есть, измеритель выполняет функцию сглаживающего фильтра процесса $v_s(t)$, заключенного во входном сигнале. Задачей синтеза измерителя является отыскание оптимальной структуры и функции передаточного фильтра, обеспечивающего наилучшее сглаживание шумовой составляющей $v_n(t)$.

На практике вместо строгого решения задачи синтеза слеящего измерителя используют приближенное решение – линеаризацию. Линеаризация заключается в том, что из входного процесса формируется функция малых отклонений текущего значения параметра входного сигнала v относительно опорного значения v_0 , при этом предполагается, что опорное значение достаточно близко к истинному значению параметра. При любой форме сигнала $S(t, v(t))$ и любой связи между сигналом и отслеживаемым параметром $v(t)$ для достаточно малой разности $v - v_0$ можно обеспечить линейность характеристики дискриминатора, вырабатывающего сигнал, пропорциональный разности между принимаемым и опорным сигналами. Если измеряемый параметр $v(t)$ в течение заданного времени не выходит за пределы линейного участка характеристики дискриминатора, то на выходе можно поставить линейный сглаживающий фильтр. Таким образом, структура измерителя процесса, состоит из оптимальных дискриминатора и сглаживающего фильтра (рис. 1).

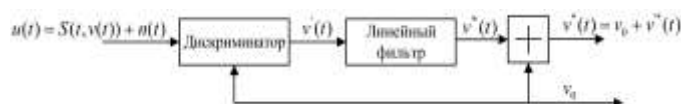


Рис. 1. Линеаризованный измеритель

Структурная схема слеящего измерителя (рис. 2) содержит две ветви: замкнутое слеящее кольцо, включающее дискриминатор, экстраполятор и синтезатор,

и схему поиска и захвата (СПЗ). Следящий измеритель работает в двух основных режимах – поиска и слежения.

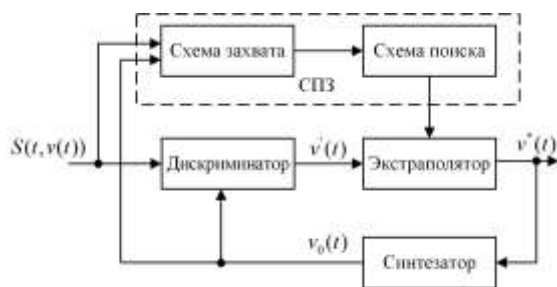


Рис. 2. Структурная схема следящего измерителя

Инженер-конструктор при проектировании должен выполнить оценку соответствия достигнутых характеристик ЦСИД заданным при использовании выбранной элементной базы и конкретных схемотехнических решений.

III. ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО СЛЕДЯЩЕГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ДАЛЬНОСТИ

Для оценки характеристик и отладки алгоритмов функционирования отдельных узлов разработана программная модель ЦСИД, функциональная схема которой изображена на рис. 3 и включает в себя синтезатор частот, имитатор ответного сигнала и следящую систему.

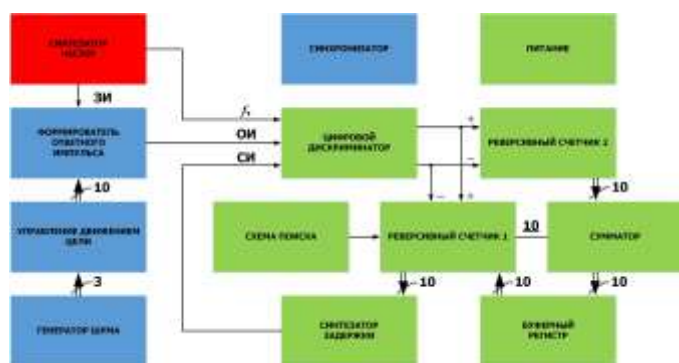


Рис. 3. Функциональная схема программной модели ЦСИД

В программной модели реализованы различные цифровые устройства – компараторы, счетчики, регистры, сумматоры, мультиплексоры и т. д., реализующие функции дискриминатора, интегратора, цифрового фильтра, синтезатора задержки и другие. В импульсных СИД в качестве опорного сигнала используется последовательность из двух следящих импульсов (СИ) с регулируемой временной задержкой. В модели для формирования дискриминационной характеристики используют схемы формирования корреляционных интегралов с задержками на $\tau - (\Delta\tau / 2)$ и $\tau + (\Delta\tau / 2)$.

Основным элементом синтезатора ЦСИД является преобразователь код-временная задержка, преобразующий число N_R , которое поступает с выхода сглаживающих с цепей, во временной сдвиг формируемой

последовательности импульсов. В модели преобразователи код-временная задержка реализованы с использованием двоичных реверсивных счетчиков с предварительной установкой.

Синтезатор частот обеспечивает работу всех элементов схемы и формирует четыре последовательности синхроимпульсов и три последовательности тактовых импульсов. Тактовые импульсы следуют с частотами $F_1 = 1 \text{ МГц}$, $F_2 = 0,5 \text{ МГц}$, $F_3 = 0,25 \text{ МГц}$. Период следования синхроимпульсов $T = 2,4 \text{ мс}$. Четвертый синхроимпульс является запросным импульсом дальности (ЗИ). Временной интервал между ЗИ называется циклом работы ЦСИД.

Имитатор ответного сигнала состоит из блока формирования ответного импульса, блока управления движением цели и блока генератора. Блок управления движением цели выполнен на основе двоичного реверсивного счетчика и логических схем. Число, находящееся в счетчике, определяет время задержки ответного импульса (ОИ) с дискретностью 2 мкс и может изменяться в ручном или автоматическом режимах. В ручном режиме это число изменяется с помощью кнопок ВЛЕВО на -1 , ВПРАВО на $+1$. В автоматическом режиме оно изменяется в интервале от 0 до 1000 и обратно со скоростью, задаваемой тумблерами V1 и V2. При включении одного из тумблеров число изменяется на одну единицу за цикл работы, а при включении двух тумблеров – на две единицы. Таким образом, задаются две скорости перемещения цели.

Блок формирования ОИ состоит из двоичного счетчика с предварительной установкой, программного одновибратора и схемы управления. Двоичное число из блока управления движением цели записывается синхроимпульсом в счетчик. ЗИ разрешает прохождение на счетчик тактовых импульсов с частотой 0,5 МГц и число в счетчике начинает уменьшаться до 0. Сигнал переполнения со счетчика прекращает поступление тактовых импульсов и запускает одновибратор, который формирует ОИ длительностью 28 мкс. Таким образом, временное положение ОИ относительно ЗИ зависит от числа, записываемого в счетчик, и изменяется по линейному закону.

Программная модель разработана в среде Matlab с использованием конструктора приложений App Designer в виде исполняемого приложения и представлена на рис. 4. Разработанная модель импульсного ЦСИД включает в себя кольцо слежения, состоящее из временного дискриминатора (ВД), сглаживающих цепей, выполняющих также функцию экстраполятора и синтезатора задержки (СЗ), а также схемы поиска (СП). Для функционирования модели необходима версия Matlab не ниже R2020b. Отображение запросного, ответного и следящих импульсов на панели осциллографа реализуется функциями *addpoints*, *animatedline* и *drawnow*, а движение импульсов – функцией *circshift*.

Наличие шумов в принимаемом сигнале моделируется путем задания временного интервала дрожания фронтов ОИ, вызывающего изменение положения СИ. Блок генератора шума выполнен на основе функций *randi*, моделирующей четырехразрядный сдвиговой регистр, и

функции *xor*, реализующей сумматоров по модулю два. Изменение состояния регистра происходит один раз за цикл работы ЦСИД. Двоичные числа с трех разрядов регистра поразрядно суммируются по модулю два с младшими разрядами числа из блока управления движением цели и поступают на блок формирования ОИ. Количество задействованных разрядов и их вес определяют уровень фазового шума ОИ.



Рис. 4. Вид программной модели ЦСИД

В состав сглаживающих цепей ЦСИД входят два двоичных 12 разрядных реверсивных счетчика с предварительной установкой, полный параллельный двоичный сумматор и буферный регистр. В режиме 1 реверсивный счетчик 2 определяет величину ошибки на данном цикле работы ЦСИД и сбрасывается синхроимпульсом в 0 в конце каждого цикла, а реверсивный счетчик 1 выполняет функцию цифрового интегратора. На синтезатор задержки подаются только 10 старших разрядов с реверсивного счетчика 1. За счет этого выполняется деление числа, поступающего на синтезатор задержки на 4. При переходе в режим 2 реверсивный счетчик 2 не сбрасывается в 0 и вместе с сумматором выполняет функцию второго интегрирующего звена. При этом 10 старших разрядов счетчика 1 и 10 старших разрядов счетчика 2 суммируются и первым синхроимпульсом записываются в буферный регистр. Вторым синхроимпульсом происходит запись суммы из регистра в счетчик 1. Третий синхроимпульс записывает число из счетчика 1 в синтезатор задержки.

Если ответные импульсы на входе дискриминатора пропадут, то показания реверсивных не будут изменяться. Таким образом, следящий измеритель сохраняет последнее значение измеряемой дальности и следовательно, обладает «памятью по положению импульса» (по дальности). Время, в течении которого значение отсчета дальности остается неизменным должно быть ограничено, как объект за это время может значительно переместиться. Поэтому в модели предусмотрено, что если ответный импульс отсутствует в течении нескольких подряд следующих периодов, то схема захвата вырабатывает сигнал сброса показаний всех счетчиков и переводит ЦСИД в режим поиска сигнала.

Максимальная скорость объекта, при которой еще возможно сопровождение его по дальности, должна быть такой, чтобы динамическая ошибка не превышала полосу удержания следящей системы. Уменьшить динамическую

ошибку можно путем включения в состав измерителя дополнительного интегратора. Такие СИД используются на практике, обладая при этом большей сложностью, обусловленной необходимостью включением в контур дополнительных корректирующих цепей, обеспечивающих устойчивости системы. Информация о дальности, измеренной следящим измерителем, снимается в виде двоичного кода с реверсивного счетчика 1. Дискретность отсчета, обуславливающая погрешность квантования по времени, определяется тактовой частотой и максимальное значение шага $\Delta R_{\text{кв}} = cT_{\text{сч}} / 16$.

Необходимый астатизм сглаживающих цепей обеспечивается выбором числа интегрирующих звеньев (изменением режима работы реверсивного счетчика 1). Увеличение коэффициента передачи сглаживающих цепей приводит к уменьшению динамической ошибки слежения, что обусловлено расширением полосы пропускания. Однако это также приводит к увеличению шумовой (случайной) ошибки слежения. Оптимальный коэффициент передачи должен обеспечить минимум суммарной ошибки слежения. Изменение параметров дискриминационной характеристики, осуществляется за счет изменения тактовой частоты счетных импульсов, поступающих на цифровой дискриминатор и длительности СИ.

В качестве основных пунктов исследования ЦСИД с использованием разработанной модели следует отметить:

- построение статической дискриминационной характеристики;
- исследование полосы захвата и полосы удержания;
- исследование влияние шумов на работу ЦСИД;
- исследование динамических ошибок ЦСИД;
- исследование памяти цифровой следящей системы.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программная модель ЦСИД позволяет исследовать влияние различных параметров на точностные характеристики разрабатываемых систем. Она может быть использована в учебном процессе при изучении принципов построения следящих измерителей при изучении теоретических основ радиолокации и радионавигации, а также при выполнении курсовых проектов и работ по дисциплинам «Основы проектирования и конструирования радиоэлектронных устройств».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Колесников Б.Г., Маслов М.М. Основы теории радиотехнических методов измерения параметров движения: Уч. пособие. / МО СССР, 1984 г. 424 с.
- [2] Основы радионавигационных измерений / В.А. Губин, Н.Ф. Клюев А.А. Костылев, Б.Г. Мельников М.Г. Степанов Е.А. Ткачев / Под ред. Н.Ф. Клюева – МО СССР, 1987. 429 с.
- [3] Цифровые радиоприемные системы: Справочник / М.И. Жодзишский, Р.Б. Мазепа, Е.П. Овсянников и др. / Под ред. М.И. Жодзишского // М.: Радио и связь, 1990. 208 с.
- [4] Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 1104 с.