

УДК 523.164

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИДЕАЛЬНОГО ИНТЕГРАТОРА В РАДИОМЕТРЕ

Г. Г. Айвазян, А. М. Асланян, А. Г. Гулян

Рассмотрены особенности использования идеального интегратора в качестве интегрирующего устройства радиометра, приведены примеры реализаций идеальных интеграторов, выведены условия выбора периода интегрирования для типовых форм радиометрических сигналов.

Радиометры, предназначенные для приема и измерения теплового радиозлучения наземных и космических объектов, завоевывают все большее число областей применения. Значительный рост объема обрабатываемых при измерениях данных требует использования в радиометрических системах вычислительной техники и ставит задачу согласования выхода радиометра с ЭВМ. При этом возникает ряд неудобств, связанных с использованием в качестве интегрирующего устройства радиометра фильтра нижних частот на основе  $RC$ -цепочки. Как известно, размах шумовых флуктуаций на выходе  $RC$ -цепочки в несколько раз превышает значение чувствительности радиометра [1]. Поэтому для выделения полезного сигнала радиометра (его постоянной составляющей) требуется применение статистических методов обработки информации [2].

В этой связи представляется целесообразным рассмотрение вопросов реального использования в радиометре идеального интегратора, который ранее рассматривался только как математическая модель. При этом чувствительность радиометра оценивалась как ошибка измерения среднего значения независимых отсчетов шума в тракте радиометра [3]:

$$\Delta T = T_{ш} / \sqrt{\Delta f \Delta t}, \quad (1)$$

где  $T_{ш}$  — амплитуда шумов радиометра;  $\Delta f$  — полоса частот радиометра,  $\Delta t$  — период интегрирования идеального интегратора. Формула (1) позволяет получить выражения для чувствительностей радиометров со всеми типами выходных интеграторов при подстановке вместо  $\Delta t$  эквивалентного времени идеального интегрирования каждого из них.

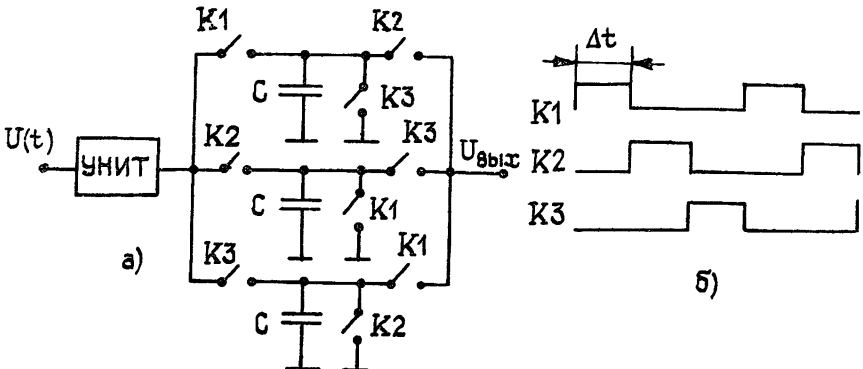


Рис. 1.

Реализация идеального интегратора основана на задании интегрирующему конденсатору зарядного тока, пропорционального входному сигналу, что позволяет интегрировать входной сигнал по времени [4]. Схемотехнически идеальный интегратор для радиометра выполняется на основе интегрирующего устройства выборки и запоминания [5], длительность такта работы которого определяет период интегрирования. Устройство (рис. 1а) содержит управляемый напряжением источник тока (УНИТ) и три интегрирующих конденсатора  $C$ , каждый из которых управляется, согласно диаграмме на рис. 1б, тремя ключами  $K_1, K_2, K_3$ , с последовательным выполнением операций интегрирования, запоминания с выдачей на выход и разряда с установкой в начальное состояние. При этом выходное напряжение на каждом отрезке  $\Delta t$  равно

$$U_{\text{вых}} = \frac{k}{C} \int_0^{\Delta t} u(t) dt = U_{\text{ср}} \frac{k \Delta t}{C}, \quad (2)$$

где  $C$  — емкость интегрирующего конденсатора,  $U_{\text{ср}}$  — среднее значение входного сигнала на интервале  $\Delta t$ ,  $k$  — коэффициент преобразования входного сигнала  $u(t)$  в зарядный ток.

Таким образом, шумовой сигнал преобразуется на выходе идеального интегратора в дискретную последовательность результатов интегрирования на примыкающих интервалах  $\Delta t$ , каждый из которых представлен постоянным напряжением  $U_{\text{вых}}$ . Причем напряжения на отдельных интервалах имеют статистический разброс, определяемый ошибкой измерения среднего значения независимых отсчетов шума.

В [6] показано, что минимально возможное значение нормированной среднеквадратичной ошибки при измерении среднего квадрата путем  $RC$ -усреднения равно ошибке, получаемой при определении искомой характеристики путем идеального интегрирования.

Следовательно, учитывая, что радиометр производит именно выделение среднего квадрата напряжения высокочастотных шумов и что нормированное в градусах среднеквадратичное значение выходных флуктуаций радиометра с  $RC$ -интегратором определяет значение чувствительности  $\Delta T$ , получаем, что статистический разброс значений  $U_{\text{вых}}$  от интервала к интервалу лежит в пределах чувствительности радиометра, определяемой по (1).

Таким образом, выходной сигнал идеального интегратора представляет собой непосредственно постоянную составляющую сигнала радиометра, которая вычислена математической операцией интегрирования, выполняемой в идеальном интеграторе [7]. Поэтому для его согласования с ЭВМ допустимо использование произвольного типа АЦП, который должен производить всего один отсчет на интервале  $\Delta t$ , без необходимости усреднения отсчетов в ЭВМ и учета статистических свойств сигнала на входе АЦП, как это имеет место при использовании в радиометре  $RC$ -интегратора.

Другая особенность идеального интегратора, вытекающая из (2), заключается в том, что он не только выделяет, но и усиливает среднее значение входного сигнала во времени  $\Delta t$  в отличие от  $RC$ -интегратора, у которого средние значения входного и выходного сигналов равны. Эта особенность позволяет синтезировать низкочастотный тракт радиометра без предварительного усилителя низкой частоты, совмещающая в идеальном интеграторе функции усиления и усреднения.

При использовании идеального интегратора в радиометре проявляется еще одна его особенность, основанная на его высоком быстродействии [5]. Известно, что увеличение  $\tau$   $RC$ -интегратора, обеспечивающее увеличение чувствительности радиометра, приводит к искажениям формы постоянной составляющей полезного сигнала [8] из-за инерционности  $RC$ -цепочки. Соответственно дискретизация сигнала при идеальном интегрировании также искажает форму постоянной составляющей и накладывает ограничение на увеличение интервала  $\Delta t$ .

Поэтому для реального использования идеального интегратора необходимо рассмотреть методику определения  $\Delta t$  для типовых форм радиометрических сигналов.

1) Для синусоидальной формы постоянной составляющей коэффициент передачи  $K_{\Pi}$  идеального интегратора определяется функцией  $\sin x/x$  при  $x=2\pi f\Delta t$ .

Для случаев  $K_{\Pi}=0,9$  и  $K_{\Pi}=0,99$  находим значения  $x$  по табулированным значениям функции  $\sin x/x$ , откуда получаем  $\Delta t_{0,9}=0,13 t_c$ ,  $\Delta t_{0,99}=0,04 t_c$ , где  $t_c$  — период синусоиды ( $1/f$ ).

2) При прохождении диаграммы направленности антенны через точечный радиисточник постоянная составляющая сигнала радиометра описывается гауссовой кривой [8].

Так как идеальный интегратор производит вычисление площади, заключенной в интервалах интегрирования, то условия выбора  $\Delta t$  выводятся из табулированных значений нормированной плотности и ординаты гауссова распределения:  $\Delta t_{0,9}=0,34\rho_{0,5}$ ,  $\Delta t_{0,99}=0,11\rho_{0,5}$ , где  $\rho_{0,5}$  — время прохождения источником диаграммы направленности по уровню 0,5. Этот метод может быть расширен до интегрирования в пределах  $\Delta t$  произвольной сигнальной функции.

3) Протяженный радиисточник формирует на выходе радиометра импульс столообразной формы, передний и задний фронты которого описываются, соответственно, восходящей и спадающей ветвями гауссова распределения. Поэтому за его характеристику принимаем длительность фронта  $t_{\Phi}=0,72\rho_{0,5}$  гауссова импульса при возрастании ординаты от 0,1 до 0,9 максимального значения. Отсюда условия гауссова импульса пересчитываем для столообразного импульса  $\Delta t_{0,9}=0,48 t_{\Phi}$ ,  $\Delta t_{0,99}=0,15 t_{\Phi}$ .

4) Для измерения амплитуды прямоугольного импульса на выходе радиометра необходимо обеспечить его совпадение по времени с периодом интегрирования, что достигается при  $\Delta t=0,5t_{\Pi}$ , где  $t_{\Pi}$  — длительность прямоугольного импульса.

Вывод аналогичных соотношений для  $RC$ -интегратора [8,9] показывает, что равенство коэффициентов передачи обоих интеграторов имеет место при  $\Delta t \approx 5\tau$ , т. е., как и показывает эксперимент, идеальный интегратор с  $\Delta t=5$  с подключение калибровочного сигнала к входу радиометра обрабатывает за такое же время, порядка 10 с, что и  $RC$ -интегратор с  $\tau=1$  с. Отсюда, используя связь постоянной времени  $\tau$   $RC$ -цепочки с ее эквивалентным временем идеального интегрирования [6]  $\Delta t_0=2\tau$ , получаем, что идеальный интегратор позволяет при измерениях без ухудшения коэффициента передачи выбирать эквивалентное время идеального интегрирования в 2,5 раза большее, чем у  $RC$ -интегратора. Следовательно, согласно (1), скоростные качества идеального интегратора позволяют проводить равнозначные с  $RC$ -интегратором измерения при повышении чувствительности радиометра в 1,6 раза.

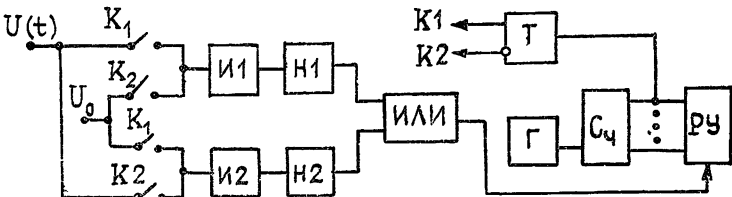


Рис. 2.

Следует отметить, что в радиометрах модуляционного типа идеальный интегратор используется как после синхронного детектора, так и до него, производя интегрирование в каждом периоде модуляции.

Наиболее целесообразным совмещением идеального интегратора с системой цифровой обработки является использование АЦП двойного интегрирования, в котором идеальное интегрирование производится

в процессе преобразования [9]. Однако известные АЦП двойного интегрирования не позволяют непрерывно интегрировать входной сигнал на примыкающих интервалах, так как интегратор АЦП часть времени подключен к источнику опорного напряжения. Поэтому в настоящей работе предложен метод двухканальной реализации АЦП двойного интегрирования (рис. 2). Счетчик Сч, непрерывно заполняемый импульсами генератора Г, циклически считает до максимального числа  $n$ , определяя временем своего заполнения период интегрирования  $\Delta t$ . Триггер Т, управляемый с выхода переполнения счетчика, производит противофазное управление ключами К1 и К2. При этом входной сигнал непрерывно подключен к одному или другому интегратору (И1, И2), а режим интегрирования входного сигнала на одном интеграторе совпадает по времени с режимом разряда опорным напряжением  $U_0$  и отсчета результата на другом. Каждый интегратор, разряжаясь до нуля, через соответствующий нуль-орган (Н1 или Н2) и элемент ИЛИ дает сигнал считывания кода счетчика в регистрирующее устройство РУ. Результатом каждого цикла работы является число

$$N = \frac{\int_0^{\Delta t} u(t) dt}{U_0} n = U_{\text{ср}} \frac{n}{U_0}, \quad (3)$$

которое непосредственно выдается в ЭВМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973. С. 269, 332.
2. Гитис Э. И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. — М.: Энергия, 1975. С. 52, 54, 56, 73—77, 134, 355—362.
3. Краус Джон Д. Радиоастрономия. — М.: Сов. радио, 1973. С. 230.
4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. — М.: Мир, 1983. Т. 1. С. 45, 207.
5. Бахтияров Г. Д. // Зарубежная радиоэлектроника. 1978. № 10. С. 71.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. — М.: Радио и связь, Мир, 1971. С. 263.
7. Мирский Г. Я. Электронные измерения. — М.: Радио и связь, 1986. С. 270.
8. Кузьмин А. Д., Соломонович А. Е. Радиоастрономические методы измерения параметров антенн. — М.: Сов. радио, 1964. С. 100.
9. Гитце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. — М.: Мир, 1983. С. 14, 462.

Институт радиофизики и электроники  
АН АрмССР

Поступила в редакцию  
20 октября 1986 г.

#### ON UTILIZATION OF IDEAL INTEGRATOR IN A RADIOMETER

*G. G. Aivazyan, A. M. Aslanyan, A. G. Gulyan*

Ideal integrator characteristics are considered, when it is used as integrating device in the radiometer. Ideal integrator realization examples are given, and for the typical form of radiometric signals integration periods are found.