

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. А. АЛЕКСЕЕВ, М. А. АНТОНЕЦ, Ю. А. АНТОНЯН, Г. С. БАРСАМЯН,
Э. Д. ГАТЭЛЮК, Л. Ш. ЕГНАЗАРЯН, А. Е. КРЮКОВ, Б. П. ЛИПАТОВ,
С. М. МКРТЧЯН, В. А. САНАМЯН, Б. В. ШЕКOTOV.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОРРЕЛОМЕТР НА ОСНОВЕ ЭВМ «РАЗДАН-3»

В радиointерферометрах независимого приема [1, 2, 3] для вычисления результата интерференции применяются коррелометры, построенные или на основе ЭВМ [1, 3] или аналогового типа [2]. В любом случае исследуемые сигналы предварительно записываются в пунктах приема на магнитную ленту, а затем обрабатываются в вычислительном центре.

В данной работе рассматривается интерференционный коррелометр, построенный на основе ЭВМ «Раздан-3». Исследуемые сигналы преобразуются в двоичный цифровой код и записываются массивами по $2^9 - 2^1$ бит на магнитную ленту типа ИМЛ-4-2. Преобразование аналогового сигнала в двоичный код происходит по следующему правилу: положительному значению сигнала соответствует единица, а отрицательному значению — нуль. При этом тактовая частота преобразования (квантования) f_T составляет 166,666 кГц, т. е. коррелометр позволяет исследовать сигналы, лежащие в полосе частот 0—83,333 кГц. Если генераторы тактовой частоты в обоих пунктах достаточно стабильны, то такая система записи и машинная обработка результатов автоматически снимает все трудности, связанные с компенсацией нестабильности скорости движения магнитоносителя, присущие системам, рассмотренным в [1, 2].

Система записи выполнена, в основном, на унифицированных элементах машинной логики ЭВМ «Раздан-3». Блок-схема ее представлена на рис. 1.

Исследуемый сигнал, поступивший с приемника, усиливается, ограничивается и преобразуется в двоичный код в схеме квантования 1, состоящей из двух импульсно-потенциальных схем «ИЛН». Импульсы квантования частоты f_T вырабатываются из синусоидального опорного сигнала частоты $f_{оп} = 1$ МГц схемой формирования 6, состоящей из усилителя, ограничителя, делителя и импульсно-потенциальной схемы «ИЛН». Квантованный исследуемый сигнал подается в восьмиразрядный регистр сдвига 2, а затем в регистр записи 3, от-

куда поступает на 8 дорожек (каналов) записи ИМТ. На двух остальных дорожках записываются синхронимпульсы с частотой повторения $f_{\text{сн}} = 20,833 \text{ кГц}$, которые вырабатываются схемами формирования 5 и 8. Для последующего контроля качества записи в начале каждой секунды в исследуемый сигнал подмешивается контрольный сигнал,

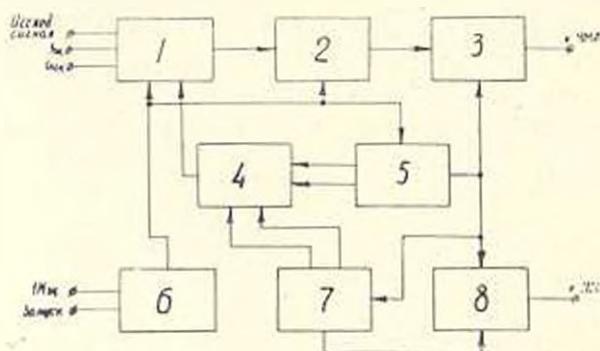


Рис. 1. Блок-схема системы записи: 1—схема квантования; 2—восьмиразрядный регистр сдвига; 3—регистр записи; 4—схема формирования контрольного сигнала; 5—схема формирования синхронимпульсов; 6—схема формирования импульсов квантования; 7—19-разрядный счетчик длины массива; 8—схема записи синхронимпульсов

состоящий из определенной последовательности нулей и единиц, которая вырабатывается схемой формирования 4 на трех потенциальных схемах «ИЛИ». Длительность контрольного сигнала составляет 1 мсек. Соответствующие управляющие напряжения частот 1 гц и 1 кГц поступают с электронных часов типа 46—37. Запись на ИМТ производится массивами (зонами) по 2^{10} — 2^{11} бит ($\sim 3,2 \text{ сек}$). Обычно промежуток между массивами, необходимый для остановки и разгона ИМТ, составляет 2^{11} бит ($\sim 0,1 \text{ сек}$). Управление длинами зоны и паузы осуществляется триггерным 19-разрядным счетчиком 7, который открывает и закрывает на соответствующие промежутки времени канал исследуемого сигнала и канал синхронимпульсов. Режим записи не соответствует принципу, принятому на ЭВМ «Раздан-3», но значительно упрощает схему коррелометра.

В ЭВМ «Раздан-3» для исправления ошибок в считанном с ИМТ сигнале используется код Хэмминга [4]. При этом каждая седьмая строка в записи занята под контрольное число. Так как для вычисления функции корреляции слабых сигналов приходится обрабатывать большой объем информации, и результаты обработки носят статистический характер, то отдельными ошибками в считанном с ИМТ сигнале можно пренебречь и отказаться, таким образом, от записи контрольного числа. В этом случае на каждую седьмую строку можно записывать информативный сигнал, что также значительно упрощает аппаратуру записи, но вызывает необходимость в некоторой доработке схемы управления накопителями на магнитных лентах [5].

В общем случае сигналы, подвергаемые корреляционной обработке, могут быть сдвинуты по частоте. Такой эффект наблюдается, например, за счет доплеровского смещения частот при разносении приеме сигналов от движущегося источника или при применении супергетеродинальных приемников со смещенным относительно друг друга

частотами гетеродинов. Поэтому в данной системе предусмотрена возможность выделения (с помощью Фурье анализа) результата интерференции и в том случае, когда корреляционная функция окажется перенесенной на разностную, заранее неизвестную, частоту $f_p = f_{Г1} - f_{Г2} \pm f_s$. Здесь $f_{Г1}$ и $f_{Г2}$ — частоты гетеродинов и f_s — частота доплеровского смещения.

Пусть $x_1(t)$ и $x_2(t)$ гауссовские стационарно-связанные процессы, функция взаимной корреляции $R_{x_1, x_2}(\tau)$ которых должна быть вычислена.

На выходе системы записи мы будем иметь отсчеты, взятые через равные промежутки времени $\Delta t = 1/f_p$.

$$y_{1i} = y_1(t_i) = \text{sign} [x_1(t_i)];$$

$$y_{2i} = y_2(t_i) = \text{sign} [x_2(t_i) \cos (2\pi f_p t_i)].$$

где $i = 1, 2, \dots, N$; $t_{i+1} - t_i = \Delta t$.

Если $f_p \neq 0$, то в качестве оценки $R_{x_1, x_2}(\tau)$ можно взять [6]:

$$R_{y_1, y_2}^N(\tau) = \sin \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{1i} y_{2i} \right). \quad (1)$$

Если различные отсчеты как $y_1(t_i)$, так и $y_2(t_i)$ слабо коррелированы, то можно с большой вероятностью считать, что $R_{y_1, y_2}^N(\tau)$ отличается от $R_{x_1, x_2}(\tau)$ не более, чем на $1/\sqrt{N}$ [7]. В общем случае, когда $f_p \neq 0$, можно получить функции взаимной корреляции процессов $z_1(t) = \text{sign} [x_1(t)]$ и $z_2(t) = \text{sign} [x_2(t)]$. Действительно,

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N y_{1i} y_{2, i+\tau} \text{sign} [\cos (2\pi f_p t_{i+\tau})] &= \sum_{i=1}^N \text{sign} [x_{1, i}] \text{sign} [x_{2, i+\tau}] = \\ &= NR_{z_1, z_2}^N(\tau). \end{aligned}$$

Легко видеть, что

$$R_{x_1, x_2}(\tau) = \sin \left[\frac{\pi}{2} R_{y_1, y_2}^N(\tau) \right]. \quad (2)$$

Для сокращения объема и времени вычислений можно провести предварительное усреднение произведения $y_{1i} y_{2, i+\tau}$ по группам из n отсчетов. При этом, если выполняется соотношение $n f_p \ll f_s$, то точность вычислений практически не уменьшается.

В рассматриваемом интерференционном коррелометре приближенно вычисляется величина $R_{y_1, y_2}^N(\tau)$. В виду того, что в реальных условиях точно не известны разностная частота f_p и временной аппаратный сдвиг сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$, приходится вычислять величины $R_{z_1, z_2}(\tau)$ для различных значений f_p и τ в интервалах их неопределенностей. Для уменьшения числа обращений к внешним запоминающим устройствам (ИМ.1) $R_{z_1, z_2}(\tau)$ вычисляется для нескольких

значений τ одновременно. Так как это приводит к увеличению времени непрерывной работы ЭВМ и, соответственно, к уменьшению надежности конечных результатов, то программа поделена на две части, работающие независимо и последовательно. Первая часть программы осуществляет вычисление произведений $y_{1,i} y_{2,i+\tau}$ для нескольких значений τ и производит предварительное усреднение по группам отсчетов заданной длины n . Результаты усреднения записываются на магнитную ленту и в дальнейшем используются в качестве информации для второй части программы. Объем этой информации существенно меньше первоначальной.

Во второй части программы вычисляется величина

$$\tilde{R}_{z_1, z_2}^N(\tau) = \frac{n}{N} \sum_{l=1}^{N/n} \langle (y_1 y_2)_e \rangle \cos(2\pi f_k l) \quad (3)$$

для $f_k = k/T$, где $k=0, 1, \dots, \left(\frac{N}{n} - 1\right)$, T — длительность записей сигналов, а символ $\langle \rangle$ означает усреднение.

Можно показать, что с большой точностью выполняется соотношение

$$R_{z_1, z_2}^N(\tau) \approx \tilde{R}_{z_1, z_2}^N(\tau) \quad (4)$$

или, учитывая (1),

$$R_{z_1, z_2}^N(\tau) = \sin \left[\frac{\pi}{2} \tilde{R}_{z_1, z_2}^N(\tau) \right]. \quad (5)$$

Для вычисления сумм вида (3) применен алгоритм быстрого преобразования Фурье [8].

Вследствие взаимной фазовой нестабильности гетеродинов нестационарность процессов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ не является чисто гармонической, т. е.

$$\begin{aligned} y_1(t) &= \text{sign} |x_1(t)|; \\ y_2(t) &= \text{sign} |x_2(t) \cos [2\pi f_p t - \varphi(t)]|, \end{aligned}$$

где $\varphi(t)$ есть некоторая неизвестная функция. Поэтому, с увеличением времени усреднения чувствительность системы возрастает медленно, а в некоторых случаях (когда дисперсия фазы значительна) даже уменьшается. Таким образом, при малых отношениях сигнал/шум на входе системы (в этом случае и необходимо большое время усреднения) отношение сигнал/шум на выходе системы уменьшается по сравнению со случаем $\varphi = \text{const}$.

Для увеличения чувствительности в случае, когда $\varphi = \text{const}$, но $\frac{d\varphi}{dt} \ll f_1$, применен метод временного разделения. По этому методу последовательность произведений отсчетов процессов $y_{1,i}$ и $y_{2,i}$ разбивается на две вспомогательные последовательности:

$$r_{1,q} = y_{1,2q-1} y_{2,2q-1};$$

$$r_{2,q} = y_{2,2q} y_{2,2q};$$

где $q=1, 2, \dots, N/2$. По участкам отсчетов такой длины M , на которой еще можно считать $\varphi(t) = \text{const}$, производится вычисление величин:

$$C_{1,l} = \sum_{j=1}^M r_{1,l+j} \cos [2\pi f_k j + \varphi(j)];$$

$$C_{2,l} = \sum_{j=1}^M r_{2,l+j} \cos [2\pi f_k j + \varphi(j)],$$

где $l = M(l-1)$.

Затем производится вычисление суммы

$$\sum_{l=1}^{N/2} \frac{2}{N} C_{1,l} C_{2,l}^* \quad (6)$$

Вычисленное среднее (6) при $f_k = f_p$ с большой точностью можно принять за оценку величины $R_{x,x}^2(\tau)$. Взаимные фазовые нестабильности гетеродинов компенсируются при образовании произведения $C_{1,l} C_{2,l}^*$. Чувствительность коррелометра при таком способе вычисления $R_{x,x}^2(\tau)$ меньше, чем для обычного усреднения в случае $\varphi = \text{const}$, но при достаточно больших флуктуациях $\varphi(t)$ этот способ становится выгодным.

Окончательные результаты вычислений выводятся в виде графика и десятичных чисел.

Рассмотренная система была собрана и проверена в ВЦ АН Арм. ССР. Результаты проверки показали удовлетворительное соответствие экспериментальных параметров коррелометра с теоретическими. На рис. 2 приведен график вычисленной функции корреляции для отношения сигнал/шум на входе, равного $\sim 0,66$ при времени усреднения коррелометра $T_{yc} = 3,03$ сек. На рис. 3 приведен график функции $R_{x,x}^2(f_k)$, соответствующий максимуму функции корреляции для этого же сигнала.

Экспериментальная проверка показала, что рассмотренная систе-

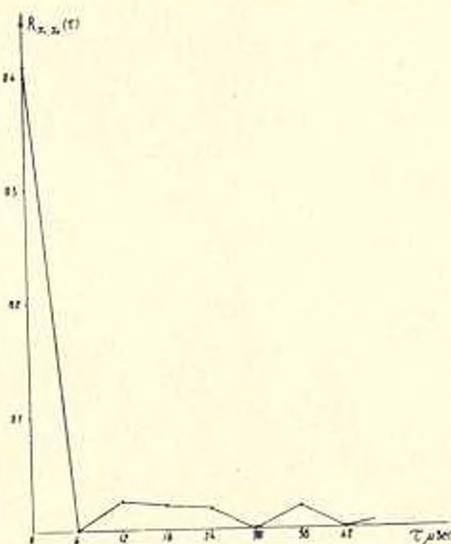


Рис. 2. Экспериментальная зависимость $K_{x,x}(\tau)$ от τ при отношении сигнал/шум на входе системы 0,66 и времени усреднения коррелометра 3,03 сек

ма позволяет достоверно обнаруживать и измерять корреляционную функцию сигнала, составляющего 1% от некоррелированных шумов при времени усреднения коррелометра порядка 10 сек. На рис. 4 приведен график $R_{z, z}(\tau)$ при $\tau=0$ для сигнала с двухпроцентной

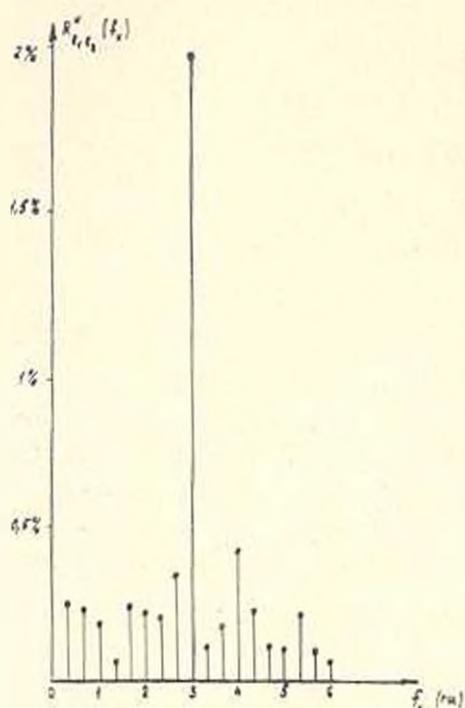


Рис. 3. Зависимость $R_{z, z}^N$ от f_k для максимального значения функции $R_{z, z}$

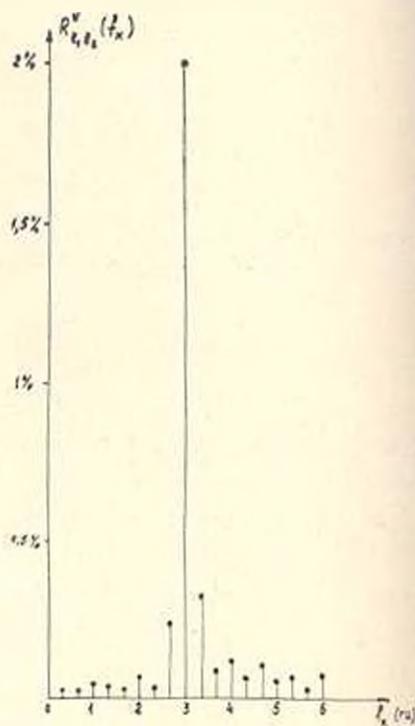


Рис. 4. Экспериментальная зависимость $R_{z, z}^N$ от f_k при отношении сигнал/шум на входе системы $\sim 0,02$ и времени усреднения коррелометра 10 сек

корреляцией. В обоих случаях была выбрана разностная частота $f_p = 3$ гц. Следует отметить, что данная система может найти применение не только в радиоастрономии, но и во многих других случаях — там, где необходим корреляционный и спектральный анализ процессов, представленных в виде электрических сигналов.

Горьковский научно-исследовательский радиофизический институт
 Ордена Ленина Бюраканская астрофизическая обсерватория АН Арм ССР
 Вычислительный центр АН Арм. ССР

Поступило 24.1.1972.

Վ. Ա. ԱՆՔՍԵՏՅԱՆ, Մ. Ա. ԱՆՏՈՆՅԱՆ, ՅՈՒ. Ա. ԱՆՏՈՆՅԱՆ, Գ. Ս. ԲԱՐՍԵՅԱՆ, Լ. Գ. ԳՈՍՏԵ-
ՅՈՒԿ, Լ. Շ. ԿՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ա. Ե. ԿՐՏՈՒԿՈՎ, Բ. Ն. ԼՐԳԱՏՅՈՎ, Ա. Մ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ,
Վ. Ա. ՍԱՆԱՄՅԱՆ, Բ. Վ. ՆՉԵՆՈՏՅՈՎ

ԿՈՌԵԼՅԱՑԻՈՆ ԻՆՏԵՐՍԵՐՏ «ՀՐԱԶԲԱՆ—3» ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ
ՀԱՇՎԻՉ ՄԵՔԵՆԱՅԻ ԹԱԶԱՅԻ ՎՐԱ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հարգածում քննարկվում են «Հրազդան—3» էլեկտրոնային հաշվիչ մեքե-
նայի քաղաչի վրա ինտերֆերենցիոն կոռելյումետրի ստեղծման հետ կապված
հարցերը: Տրվում է ալգորիթմ $R(\tau)$ կոռելյացիոն ֆունկցիայի և նրա սպեկտրի
որոշման համար: Բերվում են նաև կոռելյացիոն ֆունկցիայի հաշվման փորձ-
նական արդյունքները՝ սխառեմի մուտրում ազդանշանազմուխ հարարերու-
թյան և կոռելյումետրի ինտերգրման ժամանակի տարրեր արժեքների համար:

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковдин М., Джонси Д., Келлерман К., Кларк Б. УФН, 100, вып. 1, 1970.
2. Broten N. W., Zeig T. H., Zoek I. Z., Zeish C. W., Richards R. S., Chisholm R. M., Gash H. D., Yen I. Z., Gioll I. A. Science, 156, 23, 1967, p. 1592.
3. Алексеев В. А., Антопец М. А., Ваткевич В. В., Гателюк Э. Л., Жигора Н. С., Кро-
тиков В. Д., Крюков А. Е., Троицкий В. С., Чикин А. П., Шмагин В. А.,
Яковцов М. В., Фатеев Б. П. «Известия ВУЗ. Радиофизика», XIV, № 9, 1971.
4. Huring R. W. Bell Syst. Techn. J., 29, 1950, p. 147.
5. Универсальная цифровая вычислительная машина «Раздан-3». Техническое описание,
ч. 1, 1965.
6. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Теория распределений. Изд. «Наука», М., 1966.
7. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. Изд. «Мир», М.,
1971.
8. Proc. J. E. E. E., vol. 55, № 10, 1967.
9. Алексеев В. А., Антопец М. А., Гателюк Э. Л., Яковцов М. В. «Радиотехника и
электротехника», XVII, № 5, 1972.