

## Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. III)\*. Методика и алгоритмы обработки результатов экспериментов

С. Л. Рашковский

Радиоастрономический институт НАН Украины  
Украина, 310002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4

Статья поступила в редакцию 14 января 1999 г., после переработки 19 марта 1999 г.

Статья является составной частью цикла работ, посвященного описанию радиоастрономической сети декаметровых интерферометров УРАН, расположенных на территории Украины. Большая часть операций, выполняемых в ходе наблюдений на этой системе и при обработке их результатов возложена на вычислительную технику. В статье описывается комплекс программ и алгоритмов, используемый при работе системы УРАН и являющийся одним из основных элементов, обеспечивающих работоспособность системы в целом.

Стаття є складовою частиною циклу робіт, присвячених опису радіоастрономічної мережі декаметрових інтерферометрів УРАН, розташованої на території України. Більша частина операцій, які виконуються у ході спостережень на цій системі та при обробці їх результатів покладена на обчислювальну техніку. У статті наводиться опис комплексу програм і алгоритмів, який використовується при роботі системи УРАН, і є одним з основних елементів, що забезпечують працездатність системи в цілому.

В предыдущих работах данного цикла [1,2] были описаны принципы построения антенных систем, общая структура системы интерферометров декаметрового диапазона УРАН, построение ее аппаратного комплекса и методы проведения экспериментов.

Однако на современном этапе развития техники общепринятой методологией проведения научных экспериментов является широкое использование средств вычислительной техники. При этом ПЭВМ выполняют как традиционные операции, связанные с управлением экспериментом и обработкой полученной информации, так и берут на себя часть функций, ранее выполняемых на аппаратном уровне. Не является исключением и система интерферометров декаметрового диапазона УРАН. В ней вычислительная техника заменяет часть аппаратуры, снижая стоимость, повышая гибкость и расширяя возможности системы, а почти все программное обеспечение системы неразрывно связано с используемой аппаратурой. Соответственно программный комплекс УРАН, кроме традиционных программ для обработки полученной информации, составляющих большую, и в идеологическом смысле более сложную, часть разработанного комплекса, содержит и ряд программ первичного сбора информации и управления экспериментом. Описанию положенных в основу этого комплекса принципов и разработанных программ посвящена настоящая статья.

Программный комплекс системы УРАН предназначен для работы на широко распространенных IBM/PC-совместимых вычислительных машинах и написан на алгоритмическом языке PASCAL. Он разбит на ряд взаимосвязанных программ, выполняемых последовательно на различных стадиях как эксперимента, так и обработки полученной информации.

В общем случае весь процесс проведения экспериментов на системе УРАН можно разделить на следующие этапы:

- регистрация низкочастотных сигналов модуляционных радиометров и сигналов промежуточной частоты (ПЧ) в процессе проведения эксперимента;
- получение интерференционных откликов в результате вычисления взаимных корреляционных функций сигналов ПЧ в пункте обработки (для телескопа УРАН-1, работающего в реальном времени, соответствующие сигналы получают аппаратным путем и регистрируются в том же формате, который используют программы корреляционной обработки);
- нормирование полученных корреляционных записей на параллельно регистрируемые на пунктах модуляционные сигналы и их усреднение – в результате получают средневзвешенные отсчеты значений функции видности в каждом скане;
- сопоставление полученных в последовательности сканов временных зависимостей с

\* Эта статья - третья из цикла, посвященного описанию системы декаметровых интерферометров УРАН.



теоретическими моделями распределения яркости исследуемого объекта.

В соответствии с таким подходом весь программный комплекс можно условно разделить на четыре части.

1. Программы управления телескопами и сбора первичной информации:

- управление телескопом и регистрация модуляционных сигналов (программа ZAP);
- регистрация сигналов ПЧ (REGBB).

2. Программы первичной обработки:

- получение интерференционных записей – реализаций кросс-корреляционных функций – (PRIST);

- приведение интерференционных записей, полученных на сетке фиксированных задержек, к оптимальной задержке (INTRPL);

- получение усредненного за скан значения функции видности (MB).

3. Набор программ для работы с модельными представлениями источника.

4. Набор вспомогательных программ:

- для проверки аппаратуры регистрации;
- отображения и редактирования полученных на разных этапах промежуточных результатов;
- моделирования сигналов на различных этапах обработки и т. п.

Рассмотрение комплекса начнем с программ реального времени.

Основная функция программы ZAP – регистрация модуляционных сигналов. Однако являясь частью аппаратного комплекса, она тесно связана со многими другими процессами, в том числе реализовавшимися ранее на схемном уровне. Программа рассчитана на работу с ПЭВМ “Поиск” и выполняет следующие операции: в начале каждого 20-минутного скана, за 10 минут до его середины (исходя из показаний системных часов), вычисляется положение луча с 10-минутным упреждением,

вычисляются соответствующие этому положению коды, которые через специальный блок сопряжения поступают на пульт управления телескопом. После этого программа переходит в режим сканирования выходов аналого-цифрового преобразователя. При этом один раз в секунду происходит съем одного восьмидесятибитного отсчета сигнала для каждого из аналоговых входов.

Программа ZAP универсальна для всех пунктов УРАН, однако количество опрашиваемых каналов и их назначение меняются в зависимости от радиотелескопа как показано в табл. 1. В ней через “si A”, “co A”, “si B” и “co B” обозначены сигналы с выходов соответствующих квадратурных каналов корреляторов реального времени поляризации A и B, используемых на УРАН-1; “MA” и “MB” – выходы модуляционных каналов поляризации A и B; “MG” – выход модуляционного канала УТР-2, транслируемый в пункт УРАН-1; “Лучи полного телескопа” – выходы полного телескопа УТР-2, работающего в режиме перемещения диаграмм антенн Север-Юг и Запад-Восток; “Север-Юг” – сигнал с выхода модуляционного канала антенны Север-Юг радиотелескопа УТР-2.

Параллельно с регистрацией сигналы выводятся на дисплей ПЭВМ, служащий в качестве устройства отображения. Пример соответствующего изображения (для телескопа УРАН-1) показан на рис. 1. Как видно из этого рисунка, кроме сигналов модуляционных каналов (6 окон в верхней части рисунка) и интерференционных окликов (4 нижних окна), на экран выводится ряд дополнительных параметров: время начала записи скана (tn), количество обнаруженных за скан ошибок (Oш), часовой угол середины данного скана (в данном случае равный –100 мин) и некоторая дополнительная служебная информация.

Таблица 1

Телескоп	Число каналов	Частота	№ канала – назначение
УТР-2	12	25 МГц	Лучи полного телескопа: 1 – 2 луч, 2 – 3 луч, 3 – 4 луч
			Север-Юг: 4 – 2 луч, 5 – 3 луч, 6 – 4 луч
	20 МГц	Лучи полного телескопа: 7 – 2 луч, 8 – 3 луч, 9 – 4 луч	
		Север-Юг: 10 – 2 луч, 11 – 3 луч, 12 – 4 луч	
УРАН-1	14	25 МГц	1 – si A, 2 – co A, 3 – si B, 4 – co B, 5 – MA, 6 – MB, 7 – MG
			8 – si A, 9 – co A, 10 – si B, 11 – co B, 12 – MA, 13 – MB, 14 – MG
	20 МГц	1 – MA, 2 – MB	
		3 – MA, 4 – MB	
УРАН-2, УРАН-3, УРАН-4	4	25 МГц	1 – MA, 2 – MB
		20 МГц	3 – MA, 4 – MB



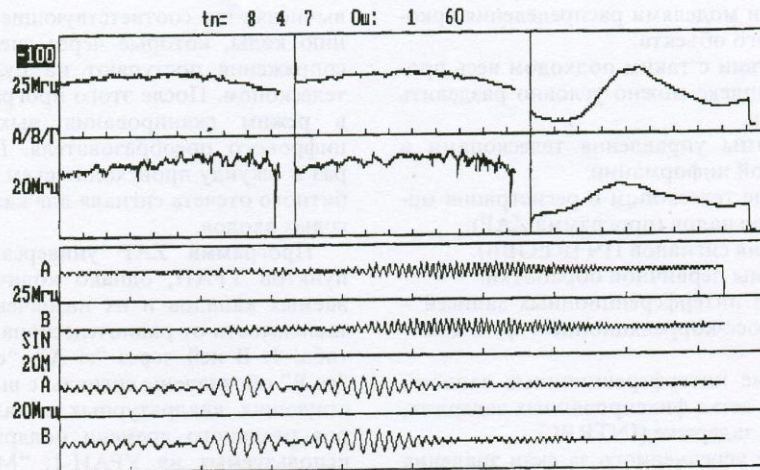


Рис. 1. Пример работы программы регистрации сигналов модуляционных каналов (ZAP) для телескопа УРАН-1

По окончании записи 20-минутного скана информация из оперативной памяти ПЭВМ переписывается на дискету в виде отдельного файла. Файл состоит из двоичных записей, каждая из которых содержит набор отсчетов, выполненных за одну секунду. Первая 12-битная запись является паспортной и содержит основную информацию о скане в целом – время начала и конца скана, наличие ошибок, номер объекта наблюдения и др.

После записи описанного файла программа переходит к следующему скану.

Программа регистрации сигналов ПЧ (REGVB) выполняется одновременно с программой ZAP, но из-за недопустимости пауз в ее работе, на другой, более мощной ПЭВМ.

Эта программа служит для регистрации сигналов ПЧ с выходов блоков преобразования частоты на устройство массовой памяти, выполненное на бытовом видеомагнитофоне формата VHS и устройстве сопряжения с ним – плате АРВИД1020. (Видеомагнитофон и АРВИД фактически выполняют роль стриммера, имеющего емкость одной ленты равную 2 Гб, но со значительно более дешевым носителем – последнее достаточно существенно, т. к. на лентах приходится накапливать объем информации, достигающий сотен гигабайт за сезон.)

Как описано в [2], входные сигналы промежуточной частоты ( $2 \div 42$  кГц) квантуются в 2-битное представление с периодом выборки 20 мкс (частота квантования 50 кГц) и вместе с сигналами временной синхронизации поступают в ПЭВМ через блок ввода. На телескопе УТР-2 для каждой из двух принимаемых частот регистрируются сигналы, расщепленные (как и сигналы модуляционных каналов, описанные выше) на два квадратурные канала (далее  $0^\circ$  – косинусный “С” и  $90^\circ$  – синусный “S”), а на телескопах УРАН для каждой частоты – нерасщепленные сигналы двух поляризаций А. и В. Таким образом, на всех пунктах регистрируются по четыре канала, один отсчет с которых кодируется в однобайтовое слово. Структура одного такого информационного байта показана в таблице 2, кодировка уровней в двоичное представление и присваиваемый им при обработке вес  $w$  – на рис. 2. Как следует из этого рисунка, код, присваиваемый значению сигнала, определяется его знаком и фактом превышения модулем сигнала некоторого опорного уровня  $U_{оп}$ , жестко фиксированного в аппаратуре. (Вопрос выбора  $w_0$  и  $U_{оп}$  будет обсуждаться ниже.) При упаковке двух байт в 16-разрядное машинное слово младший байт соответствует более раннему отсчету.

Таблица 2

Номер разряда в байте	7	6	5	4	3	2	1	0
Назначение (УРАН/УТР-2)	В/С		А/С		В/С		А/С	
Частота	20 МГц				25 МГц			



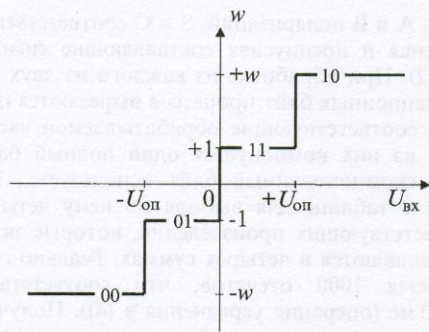


Рис. 2. Преобразование сигналов ПЧ в двоичное представление

При записи программа за 0.1 с опрашивает оба буфера устройства ввода сигналов ПЧ [2]. Каждый из них накапливает по 2500 байтовых отсчетов. Полученная за 0.1 с последовательность из 5000 байт снабжается заголовком из 4 байт, содержащим информацию о времени отсчета. Полученный таким образом кадр информации записывается на жесткий диск ПЭВМ. При приведенных скоростных параметрах поток информации составляет  $\sim 3$  Мб/мин.

Программой записывается участок сигнала, расположенный вблизи максимума прохождения источника через диаграмму направленности радиотелескопа. Длина этого участка составляет около 10 мин ( $\sim 50\%$  длины 20-минутного скана). По окончании регистрации 10-минутного участка записи на диске оказывается накоплено около 30 Мб информации. Время, оставшееся до начала регистрации следующего скана (около 10 мин) используется для перезаписи этого массива на магнитную ленту. Для этого автоматически запускается пакетная версия программного обеспечения АРВИД. Собственно запись на магнитную ленту продолжается около 6-9 мин. (Именно в силу специфики такой системы записи, не допускающей в этот период отвлечения машины на другие задачи, невозможно регистрацию ПЧ сигналов и сигналов модуляционных каналов выполнить на одной ПЭВМ.)

После перезаписи информации с диска на ленту дисковое пространство освобождается, и комплекс переходит к регистрации следующего 20-минутного скана.

Для удобства наблюдателей в процессе работы этой программы на экран выводится информация о записанных ранее сканах и калибровках, временных соотношениях и уровнях входного сигнала в каждом из четырех одновременно регистрируемых каналов.

Программа получения интерференционных сигналов (PRIST) предназначена для вычисле-

ния корреляционного отклика от выбранной пары телескопов, сигналы на которых записаны в приемных пунктах интерферометра программой REGVB. В современных РСДБ системах эта операция, как правило, выполняется аппаратным путем. Однако поток информации, регистрируемой на системе УРАН, из-за особенностей декаметрового диапазона, приводящих к сужению полос приема до величин  $\sim 20$  кГц, оказывается относительно небольшим. В результате, используя достаточно быстродействующие компьютеры, удалось перенести эту операцию, при приемлемых временах обработки, на программный уровень, и соответственно, отказаться от создания довольно сложной аппаратуры.

В программе реализован алгоритм, имитирующий работу коррелятора реального времени, используемого на интерферометре УРАН-1 [2,3]. В нем над данными, записанными системами регистрации сигналов ПЧ на пунктах интерферометра, выполняется операция вычисления комплексного корреляционного сигнала

$$\begin{aligned} \dot{P}_{\text{Корр}}(t, \tau) &= \overline{U_{A/B}(t) \cdot \dot{U}_{\text{УТР}}(t + \tau)} = \\ &= \overline{U_{A/B}(t) \cdot \text{Re}(U_{\text{УТР}}(t + \tau))} + \\ &+ i \overline{U_{A/B}(t) \cdot \text{Im}(U_{\text{УТР}}(t + \tau))}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U_{A/B}$  – сигнал (поляризации А или В соответственно) с пункта УРАН;  $\dot{U}_{\text{УТР}}$  – сигнал с пункта УТР-2, представленный двумя квадратурными компонентами: реальной (косинусный канал) и мнимой (синусный канал)\*;  $t$  – время;  $\tau$  – взаимная задержка сигналов. Черта над произведением обозначает усреднение за некоторый интервал времени  $T_0$ .

Как следует из (1), в перемножении сигналов используется реальный сигнал, зарегистрированный на пунктах УРАН и комплексный – на пункте УТР-2, т. е. мнимая (синусный канал) компонента сигнала  $\dot{U}_{A/B}$  не используется. Как уже отмечалось выше, при такой операции число сигналов, записываемых на всех пунктах, одинаково (на УТР-2 регистрируются две квадратурные компоненты, но нет двух поляризаций). Частотный спектр сигнала, образующегося при выполнении такой операции перемножения является сверткой спектров исходных сигналов, т. е. суммой двух треуголь-

\* Эти сигналы, образующиеся на выходах 0 и  $90^\circ$  фазорасщепляющей схемы, могут рассматриваться как компоненты аналитического сигнала, присутствующего только в области положительных частот. Отметим в этой связи, что сдвиг сигнала по фазе на  $90^\circ$  эквивалентен его преобразованию Гильберта.



ных спектров (при прямоугольной частотной характеристике ПЧ фильтра приемника с полосой  $\Delta f$ ), каждый шириной  $2\Delta f$ , разнесенных по частоте на  $2f_0$  ( $f_0$  – центральная частота сигнала последней ПЧ). При этом, если выполняется условие  $f_k > 2f_0 + \Delta f + f_u$  ( $f_k$  – частота квантования сигнала,  $f_u$  – частота полезного интерференционного сигнала,  $f_u \ll \Delta f$ ), то на частоте  $f_u$  не возникает спектральных компонент, обусловленных шумом, связанным с отсутствием мнимой компоненты сигнала  $\dot{U}_{AB}$ , т. е. отношение сигнал/шум из-за этого не ухудшается. Так как в описываемой системе  $f_k = 50$  кГц,  $f_0 = 12$  кГц и  $\Delta f = 20$  кГц,  $f_u < 5$  Гц, то условие  $f_k > 2f_0 + \Delta f + f_u$  выполнено, и нет необходимости регистрировать комплексный сигнал  $\dot{U}_{AB}$ .

Как уже отмечалось, каждый кадр сигнала при записи снабжается информацией о текущем времени. На основании этой информации необходимо совмещать записи по времени с точностью много лучшей, чем ширина автокорреляционной функции сигнала  $\Delta t = 1/\Delta f \approx 50$  мкс. Если часы на пунктах достаточно точно синхронизированы (а реально ошибки при использовании GPS приемников не превышают 2 мкс), то необходимо учитывать только постоянно меняющуюся из-за вращения Земли геометрическую задержку  $\tau_{расч}$  прихода одноименного фронта волны в два разных приемных пункта.

Ситуация несколько осложняется тем, что выборки сигнала осуществляются не в нужные для совмещения, а в фиксированные с шагом 20 мкс моменты времени. То есть принципиально невозможно совместить произвольные точки фронта падающей волны с точностью лучше половины интервала квантования, т. е. 10 мкс. Это обстоятельство учитывается интерполяцией на последующих этапах обработки в программе INRPL, а описываемая здесь программа PRIST для того, чтобы сделать возможной такую интерполяцию, параллельно вычисляет пять временных реализаций функции  $\dot{P}_{Корр}(t, \tau_i)$  соответственно для пяти значений задержки  $\tau_i$ :  $[\tau_{расч}]$ ,  $[\tau_{расч}] \pm 20$  мкс,  $[\tau_{расч}] \pm 40$  мкс (через  $[\tau_{расч}]$  обозначена расчетная геометрическая задержка, округленная до ближайшего значения, кратного 20 мкс; значениям  $\tau_i$  соответствуют номера  $i$ , равные соответственно 0,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ).

Перемножение нескольких сигналов, представленных в двух “перемножаемых” байтах, для ускорения процедуры выполняется для одной частоты всего одной операцией, с использованием табличного способа. Для этого предварительно, в начале работы программы, строится “таблица умножения” длиной  $256 \times 4$  ячейки. В каждой из ячеек содержится одно из произведений сигналов – AC, AS, BC или BS (A и B – от-

счеты A и B поляризаций, S и C соответственно синусная и косинусная составляющие сигнала УТР-2). При обработке из каждого из двух информационных байт процессов вырезаются по 4 бита, соответствующие обрабатываемой частоте, и из них компонуется один полный байт. Этот скомпонованный байт используется как адрес в таблице для выбора по нему четырех соответствующих произведений, которые затем накапливаются в четырех суммах. Реально суммируется 1000 отсчетов, что соответствует  $T_0 = 20$  мс (операция усреднения в (4)). Полученные суммы попарно трактуются как один отсчет комплексного корреляционного продукта для двух поляризаций.

Еще одной существенной особенностью системы регистрации УРАН является то, что используются не клипированное (т. е. знаковое), а двухбитное (четырёхуровневое) представление сигнала. Как известно, в этом случае не только несколько снижаются потери отношения сигнал/шум, но и, что более существенно, сохраняется информация об уровне сигнала. Для восстановления истинного уровня коррелированного сигнала необходимо выполнить две процедуры: определить уровни исходных сигналов в каждом из входных сигналов перемножителя и по ним и коэффициенту корреляции двухбитных представлений сигналов найти истинное значение коррелированной мощности. Обе эти задачи нелинейны, но если для первой из них можно написать соответствующее аналитическое выражение, то вторая не решается в замкнутом виде.

Уровень входного сигнала при нормальном законе распределения последнего можно определить из соотношения

$$n/N = 1 - \operatorname{erf}(U_{оп}/\sqrt{2}\sigma), \quad (2)$$

где  $N$  – общее число отсчетов сигнала за заданный интервал времени;  $n$  – число отсчетов сигнала, превышающих по модулю пороговый уровень  $U_{оп}$  (см. рис. 2);  $\sigma$  – подлежащая определению дисперсия сигнала на входе системы квантования;  $\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$  – интеграл вероятности.

Выражение (2) – это зависимость  $n=n(\sigma)$ . Требуется же найти обратное соотношение  $\sigma=\sigma(n)$ . Так как (2) существенно нелинейно и его нельзя обратить относительно  $\sigma$  в замкнутом виде, то для представления соответствующей обратной функции была использована ее аппроксимация полиномом Чебышева 6-го порядка. Конечное выражение для искомого  $\sigma$  имеет вид:



$$\sigma = U_{\text{оп}} / \sqrt{2} (0.47694 + q0.61804 + q^2 0.20554 - q^3 0.32988 - q^4 0.3376 + q^5 0.6588 + q^6 0.60661), \quad (3)$$

где  $q=1-2n/N$ .

Сложнее найти истинное значение коррелированной мощности. Можно показать, что для двух нормальных процессов с дисперсиями  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  прямое соотношение (т. е. зависимость коэффициента корреляции квантованных процессов  $B_{x,y}$  от коэффициента корреляции неквантованных процессов  $R_{x,y}$ ) имеет вид:

$$B_{x,y}(R_{x,y}) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{R_{x,y}^n}{n!} C_{n,x} C_{n,y}, \quad (4)$$

где

$$C_{n,x} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[ H_{n-1}(0) + (w_0 - 1) e^{-\frac{x^2}{2}} H_{n-1}(x) \right];$$

$$C_{n,y} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[ H_{n-1}(0) + (w_0 - 1) e^{-\frac{y^2}{2}} H_{n-1}(y) \right];$$

$H_n$  – полиномы Эрмита;  $x = U_{\text{оп}}/\sigma_x$ ;  $y = U_{\text{оп}}/\sigma_y$ .

(Выражение (4) получено с использованием разложения двумерной плотности вероятности по полиномам Эрмита с последующим привлечением метода производных [4]. Существуют и альтернативные выражения для зависимости  $B=B(R,x,y)$ , например в [5]. Однако несмотря на громоздкость, приведенное выражение (4) вычисляется проще.)

Для обращения соотношения (4) используется численное решение уравнения  $R=R(B,x,y)$  методом хорд. Так как зависимость  $B=B(R,x,y)$  слабо нелинейна, то при этом решение  $R=R(B,x,y)$  быстро сходится. Мощность коррелированного сигнала очевидно определяется как  $P_{\text{Корр}} = \sigma_x \sigma_y R$ .

Выбор величин порогового напряжения  $U_{\text{оп}}$  и веса  $w_0$ , введенных на рис. 2, достаточно произволен. Однако если учесть, что обращение как (2), так и (4) ведет к ухудшению отношения сигнал/шум, и в тоже время требуется обеспечить достаточно быстрое выполнение операции (4), то можно сформулировать требования к этим величинам. Так, в [6] показано, что оптимальными являются значения  $U_{\text{оп}}=0.995\sigma$  и  $w_0=3$ . В [5] рекомендуются  $U_{\text{оп}}=0.95\sigma$  и  $w_0=4$ . Однако в ходе эксперимента входной сигнал (и соответственно величина  $\sigma$ ) не является постоянным, а меняется во времени в пределах, зависящих от используемого радиотелескопа и интенсивности излучения исследуемого косми-

ческого объекта. Поэтому усиление приемной аппаратуры подбирается так, чтобы в процессе записи выполнялось только условие  $0.5\sigma < U_{\text{оп}} < 1.5\sigma$ . Такое отличие  $U_{\text{оп}}$  от оптимума слабо сказывается на шумовых параметрах системы. Что касается величины  $w_0$ , то ее изменения ведут к небольшим изменениям потерь в отношении сигнал/шум (особенно при отличии  $U_{\text{оп}}$  от оптимального), но с точки зрения программирования оказалось несколько удобней использовать величину  $w_0=3$ .

Как указывалось выше, комплексные отсчеты коррелированного сигнала следуют через 20 мс. Домножением  $P_{\text{Корр}}(t, \tau_i)$  на комплексную экспоненту  $e^{-2\pi i(f_{\text{уп}} - 0.1)t}$  (где  $f_{\text{уп}}$  – расчетная частота интерференции) производится однопольное гетеродинирование для переноса сигнала на частоту 0.1 Гц, и далее, используя алгоритм рекурсивных фильтров, имитируется последовательное пропускание сигнала через двухзвенный резонансный LC фильтр с частотами настройки контуров 0 Гц и +0.2 Гц и одинаковыми полосами равными 0.16 Гц и RC фильтр с частотой среза 0.4 Гц. Таким образом, после фильтрации сигнал располагается в полосе  $\pm 0.5$  Гц, что дает возможность квантовать его по времени с шагом 1 с.

Для оценки уровня шума в профильтрованном сигнале, вводится еще один канал обработки. Все операции в нем выполняются аналогично операциям с сигналом, но гетеродинирование производится с таким расчетом, чтобы выделить компоненты спектра вне частот полезного корреляционного продукта, т. е. оставить в этом канале только шум.

Результатом работы программы PRIST является файл, в котором для всего обрабатываемого участка длительностью до 10 мин содержится комплексные отсчеты сигналов, соответствующих пяти значениям задержек для обеих поляризаций сигнала. Кроме того, для каждого отсчета выводится его время, уровень шумов, а также уровни сигналов в каждом входном канале – А, В, S и С. Всего за одну минуту в файл помещается  $31 \times 60 = 1860$  б. Если сравнить эту цифру с объемом входной информации по двум телескопам на одной частоте ( $\sim 3$  Мб/мин), то получаем сокращение объема информации  $\sim 1600$  раз.

Одновременно на экран монитора (рис. 3) выводятся полученные корреляционные сигналы – 1, их спектры за каждые 64 с – 2, зависимости уровня коррелированного сигнала от задержки – 3, ряд дополнительных цифровых параметров – уровни входных и выходных сигналов (4 и 5 соответственно) при пяти различных сдвигах  $\tau_i$ , шум – 6 и некоторая другая



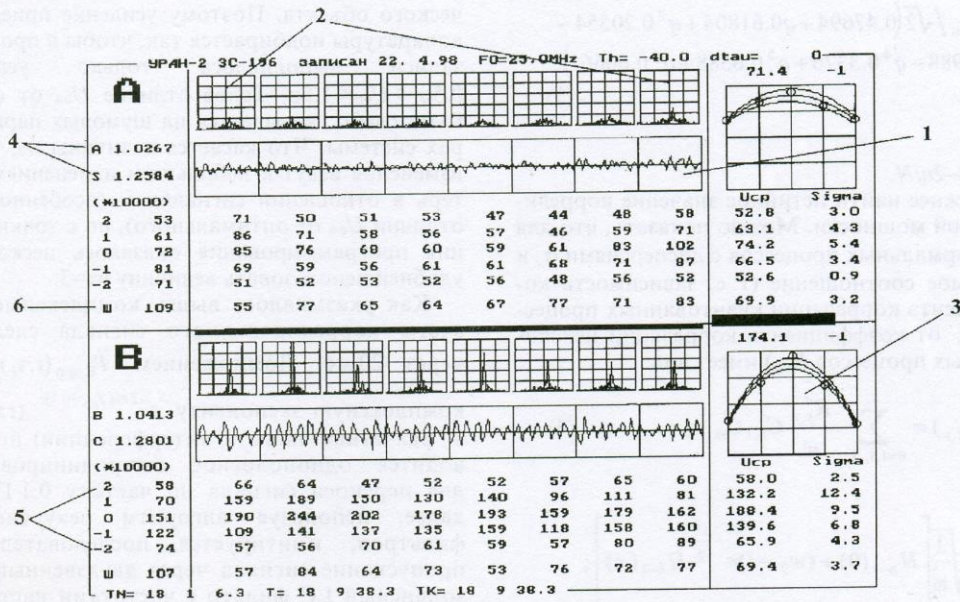


Рис. 3. Пример работы программы получения интерференционных сигналов (PRIST)

служебная информация. (Для упрощения выноски на рис. 3 показаны только для сигналов одной поляризации.)

Программа приведения сигналов к оптимальной задержке INTRPL также выполняет важную роль в комплексе обработки.

Так как из-за задержек в аппаратуре и, возможно, влияния ионосферы реальный оптимум отношения сигнал/шум может находиться несколько (на единицы микросекунд) в стороне от расчетной задержки, то, прежде всего, ищется эта оптимальная задержка  $\tau_0$ . Для этого, как и ранее, предполагается, что приемники имеют прямоугольные частотные характеристики и, соответственно, расчетная зависимость уровня выходного сигнала от задержки  $\tau$  (повторяющая автокорреляционную характеристику сигнала) имеет вид

$$R(\tau) = \frac{\sin(2\pi\Delta f(\tau - \tau_0))}{2\pi\Delta f(\tau - \tau_0)} \quad (5)$$

Тогда, аппроксимируя с учетом шума экспериментальную зависимость  $|\dot{P}_{\text{Корр}}|$  от  $\tau$  выражением

$$P_A(\tau) = U_N^2 + R^2(\tau)U_S^2, \quad (6)$$

(где  $U_N$  – шум, обусловленный космическим фоном и определенный по каналу шума;  $U_S$  – уровень полезного сигнала), можно по выданным программой PRIST значениям  $|\dot{P}_{\text{Корр}}(t, \tau_i)|$

методом наименьших квадратов найти оптимальные (в смысле приближения (6) к экспериментальным точкам) величины  $\tau_0$ ,  $U_N$  и  $U_S$ . При таком расчете значения  $U_N$  и  $U_S$  вычисляются аналитически, а по параметру  $\tau_0$  ведется численный перебор с шагом 1 мкс.

Величина  $\tau_0$  находится для обеих поляризаций А и В, и в дальнейшем используется та из них, при определении которой было получено наилучшее отношение сигнал/шум (т. е.  $U_S/U_N$ ). Комплексный сигнал для найденного  $\tau_0$  строится из набора сигналов на разных задержках при помощи соотношения

$$\dot{P}_{\text{Корр}}(t, \tau_0) = \frac{\sum_{i=-2}^2 W_i^2 e^{i2\pi f_0(\tau_i - \tau_0)} \dot{P}_{\text{Корр}}(t, \tau_i)}{\sum_{i=-2}^2 W_i^2}, \quad (7)$$

где множитель  $e^{i2\pi f_0(\tau_i - \tau_0)}$  компенсирует фазовые сдвиги сигналов при изменении задержек, а вес  $W_i$  принимается равным расчетному отклику  $R(\tau_0 - \tau_i)$ .



Кроме основной функции – приведения записей к оптимальной задержке, программа INTRPL выполняет ряд дополнительных операций по выборке из файлов данных, записанных на нескольких пунктах УРАН, одноименных отсчетов модуляционных каналов, совмещение их между собой и с приведенными к  $t_0$  данными программы PRIST. В результате формируются единые файлы для дальнейшей обработки каждого из записанных сканов. Причем для удобства дальнейшей обработки формат этих данных принят совпадающим с форматом, выдаваемым программой ZAP при ее работе на интерферометре реального времени УТР-2 – УРАН-1 (табл. 1).

**Программа получения усредненного значения функции видности за скан MB** – это одна из наиболее сложных программ комплекса. Ее основное назначение – получение набора значений функции видности, каждое из которых усреднено в пределах одного скана. Взаимодействие с программой ведется оператором через графический интерфейс в интерактивном режиме. На главном экране оператору предъявляется список имеющихся в наличии за данный день по данному объекту сканов и калибровок.

Сначала обрабатываются калибровки – вычисляются нули и уровни калибровочных сигналов перед началом и после конца записи данного источника. Оператор выбирает соответствующие участки записи, усредненные значения которых и есть уровни калибровочных сигналов.

Далее выбирается скан для обработки. Обработка каждого скана распадается на этапы:

1) Программой выводятся на экран записи всех сигналов по данному скану и дается возможность ручной корректировки записи для устранения пораженных помехами участков.

2) На экран поочередно выводятся записи модуляционных сигналов поляризаций А и В радиотелескопа УРАН и модуляционного сигнала УТР-2. Одновременно индицируются соответствующие расчетные прохождения источника. Последние генерируются исходя из измеренного ранее потока источника, рассчитываемого положения источника и интерполируемой таблицы эффективных площадей антенн радиотелескопов. У оператора имеется возможность задать выполнение оптимального вписывания расчетной диаграммы в экспериментальную запись. Это оптимальное вписывание осуществляется по методу наименьших квадратов, определяя такие параметры записи, как смещение нулей (из-за неполного подавления фона), смещение прохождения по времени (из-за рефракции в ионосфере) и амплитуду записи (значения нуля и амплитуды определяются из аналитических выражений, а по време-

ни проводится численный поиск оптимума). После вписывания оператор может вручную скорректировать полученные параметры.

В дальнейшей обработке можно использовать либо расчетное (если источник слишком слаб для модуляционного приема на УРАН), либо реальное прохождение источника со смещением нуля и смещением во времени, определенным методом оптимального вписывания. В первом случае реализуется описанная в [2] “модифицированная методика” измерений, в последнем – “абсолютная методика”.

3) Из 20-минутной записи выбирается  $2^{10}=1024$  центральных отсчета (т.е. около 17 мин) как по модуляционным, так и по интерференционным каналам и производится их перенос в частотную область с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье. Так как при записи сигнал предварительно был профильтрован и из-за этого несколько искажен, то производится коррекция записи с целью устранения влияния этих фильтров. В результате восстанавливаются исходный спектр сигнала и шумовые составляющие вне основной полосы сигнала. При частоте квантования комплексного интерференционного сигнала, равной 1 Гц, регистрируется полоса  $\pm 0.5$  Гц, достаточной считается точность восстановления в полосе  $\pm 0.3$  Гц, полезный сигнал как правило лежит в полосе  $0.05 \div 0.3$  Гц, его ширина не превышает  $\pm 0.06$  Гц, а область частот  $\pm 0.01$  Гц считается пораженной вариациями уровня аппаратного нуля.

Соответственно в полосе  $0.02 \div 0.3$  Гц ищется максимальная гармоника и ее частота считается частотой сигнала  $f_{\max}$ . В полосах  $(f_{\max} - 0.2) < f < (f_{\max} - 0.06)$  и  $(f_{\max} + 0.06) < f < (f_{\max} + 0.2)$  определяется шум, необходимый для оценки дисперсии получаемых данных. После этого, для проведения оптимальной фильтрации, по данным в полосе  $f_{\max} \pm 0.05$  Гц по методу минимальных квадратов производится вписывание гауссоиды – ею аппроксимируется спектр полезного сигнала, и ее параметры используются для задания оптимального фильтра. Так как сигнал может проходить преимущественно по одной из двух поляризаций, то более достоверными считаются параметры фильтра, отвечающие сигналу большей амплитуды. Такая сглаженная аппроксимация оптимального адаптивного фильтра представляется достаточно корректной, так как сам сигнал может быть сильно искажен шумом, а его отдельные спектральные составляющие определяются с существенными ошибками.

На экран выводятся спектры сигналов и аппроксимирующая гауссоида. Оператор может по своему усмотрению переместить фильтр по частоте и изменить его ширину. Кроме информации по интерференционному каналу на эк-



ране отображаются также спектры модуляционных сигналов.

После выбора параметров фильтра с его помощью производится фильтрация всех, как интерференционных, так и модуляционных сигналов. После этого сигналы преобразуются во временную область. Параллельно, полагая спектр шума равномерным во всей полосе  $\pm 0.3\text{Гц}$ , определяется, каким будет его вклад в профильтрованном продукте.

На этом этапе оператору предъявляются профильтрованные записи, и он получает возможность выбрать, какие именно их участки будут учтены при вычислении функции видности за скан в целом.

В каждой точке вычисляется мгновенное значение функции видности по формуле (1) из [2]. При этом каждая из входящих в нее величин нормируется на соответствующую калибровку и учитываются упомянутые при описании методики измерений диаграммные и другие поправки. Оценки мгновенных значений получаются как по каждой поляризации, так и для полного сигнала, приближенно как среднеквадратичные последних. Одновременно, исходя из шумов каждого из сигналов, вычисляется присваиваемый точке вес.

В пределах выбранных участков записи мгновенные значения функции видности усредняются с учетом весов и вычисляется ее окончательное значение за весь скан.

Как указывалось выше, на декаметровых волнах пока не удается получать фазы функций видности, что не позволяет проводить непосредственное восстановление распределения радиояркости объекта. Одновременно низкое отношение сигнал/шум и заметная нестационарность наблюдений (обусловленная влиянием среды, в которой распространяются сигналы, и в особенности ионосферы), делают неприменимыми методы аналитического продолжения, позволяющие восстанавливать изображение объекта, не прибегая для этого к фазовой информации.

Поэтому на системе УРАН, как правило, используются методы подбора моделей, и соответственно в системе обработки имеются заготовки программ, позволяющих сопоставлять полученные часовые и частотные зависимости функции видности с той или иной моделью распределения яркости исследуемого объекта и на этом основании подбирать параметры его наиболее вероятной модели.

Однако в силу использования разных моделей эти программы пока еще не имеют устойчивого характера, и для каждого космического объекта подбор параметров ведется полуэмпирическим путем, что делает их описание здесь нецелесообразным.

Таким образом, для системы УРАН разработан достаточно развитый программный комплекс, позволяющий эффективно производить управление проводимыми экспериментами, а также накапливать и обрабатывать получаемую информацию.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность академику НАН Украины С. Я. Брауде за научную и организационную помощь в настоящей работе и сотрудникам РИ НАН Украины А. В. Меню, В. А. Шепелеву, Г. А. Инютину и В. В. Шевченко за полезные обсуждения.

### Литература

1. А. В. Мень, С. Я. Брауде, С. Л. Рашковский и др. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, 2, №4, с. 385-401.
2. А. В. Мень, С. Л. Рашковский, В. А. Шепелев, А. С. Белов, В. В. Шевченко, Радиофизика и радиоастрономия. 1998, 3, №3, с.
3. А. В. Мень. Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1983, 26, №7, с. 775-785.
4. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. Москва, Сов. радио, 1974, 549 с.
5. J. B. Hagen, D. T. Farley. Radio Sci. 1973, 8, No. 8,9, pp. 775-784.
6. F. K. Bowers, D. A. White, T. J. Landecker et al. Proc. IEEE. 1973, 61, No. 9, pp. 1339-1343.

### URAN System of Decametric Interferometers (III). Technique and Algorithms for Processing Experimental Results

S. L. Rashkovskiy

The paper is a part of the cycle describing the URAN decameter wavelength VLBI network located in Ukraine. The major of operations in observation and processing their results is executed with computer facilities. The set of software and algorithms to support the URAN system are also described.