

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Научно-исследовательский радиофизический институт  
(ФГБНУ НИРФИ)

Нечаева М.Б., Антипенко А.А., Тихомиров Ю.В.

Процедура корреляционной и спектральной обработки РСДБ-данных.

---

Подписано в печать г. Формат 60×90/16.  
Бумага писчая. Объем 1.9 усл.п.л.  
Тираж 50. Заказ 5617

---

Отпечатано в ФГБНУ НИРФИ  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, 25/12а

**ПРОЦЕДУРА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ  
И СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ  
РСДБ-ДАнных**

Нижний Новгород 2012

## Оглавление

1. Введение .....	3
2. Функциональная схема коррелятора .....	3
3. Структура программного обеспечения .....	5
3.1. Блок А. Ввод и переформатирование данных .....	6
3.2. Блок В. Цифровая фильтрация данных.....	7
3.2.1. Частотная фильтрация .....	7
3.2.2. Смещение частотной полосы .....	7
3.2.3. Временная фильтрация .....	8
3.3. Блок С. Коррекция задержки и частоты Допплера .....	8
3.3.1. Коррекция задержки .....	9
3.3.2. Коррекция частоты.....	10
3.4. Блок D. Корреляция и спектральный анализ .....	12
3.4.1. Субблок D1. Корреляция .....	13
3.4.2. Субблок D2. Спектральный анализ .....	14
3.5. Блок Е. Вывод результатов .....	14
3.6. Блок «Стратег».....	15
4. Описание форматов данных .....	16
4.1. Формат входных файлов .....	16
4.2. Формат данных коррелятора .....	16
4.2.1. Формат имени файла.....	17
4.2.2. Формат файлов сопровождающей информации .....	17
5. Алгоритмы расчетов исходных значений (задержки и частоты интерференции) для коррекции сигналов при первичной обработке РСДБ-данных .....	18
5.1. Алгоритмы расчетов параметров обработки при приеме сигналов удаленных космических радиисточников.....	18
5.1.1. Расчет задержки .....	18
5.1.2. Расчет частоты.....	20
5.2. Алгоритмы расчетов параметров обработки при приеме сигналов от космических объектов, находящихся в околоземном космическом пространстве .....	20
5.2.1. Расчет задержки .....	20
5.2.2. Расчет частоты.....	22
5.3. Алгоритм расчетов параметров обработки в экспериментах по локации.....	22
5.3.1. Расчет задержки .....	22
5.3.2. Расчет частоты.....	24
5.4. Исходные данные для коррекции потоков .....	25
5.4.1. Проекция базовой линии интерферометра .....	25
5.4.2. Список исходных параметров .....	25
5.4.3. Видимые координаты удалённого радиисточника .....	27
5.4.4. Гринвичское звёздное время на дату наблюдений .....	29
Приложение 1. Структура базы РСДБ-данных.....	30
П1.1. Структура папок .....	30
П1.2. Названия файлов с результатами обработки .....	31
Приложение 2. Формат файлов данных в отдельных блоках.....	32
Приложение 3. Список параметров таблиц сопровождающей информации .....	35
ПЗ.1. Параметры сеанса измерений .....	35
ПЗ.2. Параметры обработки сигналов .....	37
ПЗ.3. Результаты промежуточных расчетов.....	38
Литература.....	40

**Литература**

1. Нечаева М.Б. Анализ сигнала РСДБ-комплекса при приёме импульсного микроволнового радиоизлучения Солнца. // Препринт №526 – Нижний Новгород: ФГНУ НИРФИ. 2009 – 32 с.
2. Галактическая и внегалактическая радиоастрономия. /Под ред. Г.Л. Верскера, К.И. Келлермана. – М.: Мир, 1976. – 620 с.
3. Справочное руководство по небесной механике и астеродинамике. /Под ред. В.К. Абалкин, Е.П. Аксенов и др. 2-е изд. – М.: Наука, 1976. – 864 с.
4. Меёс Ж. Астрономические формулы для калькуляторов. – М.: Мир. 1988. – 168 с.
5. Даффет-Смит П. Практическая астрономия с калькулятором.: Пер. с англ. – М., Мир. 1982. – 176 с.

*Работа частично поддержана РФФИ (10-02-00875) и ЕСФ (№2009/0231/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/151).*

**Препринт №546**

**ПРОЦЕДУРА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ  
И СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ  
РСДБ-ДААННЫХ**

**Нечаева М.Б.  
Антипенко А.А.  
Тихомиров Ю.В.**

**Нижний Новгород 2012**

Нечаева М.Б., Антипенко А.А., Тихомиров Ю.В. Процедура корреляционной и спектральной обработки РСДБ-данных. //Препринт №.546. Нижний Новгород: ФГБНУ НИРФИ. 2012. - 32 с.

В последние годы РСДБ-лаборатория ФГБНУ НИРФИ проводит эксперименты на собственном инструменте и в составе международной РСДБ-сети по следующим задачам: исследования неоднородностей электронной концентрации плазмы солнечного ветра и ионосферы Земли, исследования компактных источников радиоизлучения Солнца, РСДБ-локация объектов в околоземном космическом пространстве и высокоточное определение положения навигационных космических аппаратов. Для успешного выполнения исследований возникла необходимость в разработке нового программного обеспечения обработки данных.

В работе описана процедура корреляционной обработки радиоинтерферометрических данных, в том числе:

- представлена структурная схема центра обработки;
- приведено описание основных функций коррелятора;
- выполнен аналитический расчет моделей временной зависимости задержки сигналов, приходящих в разнесённые пункты радиоинтерферометра, и модели временной зависимости фазы при различной постановке РСДБ-экспериментов;
- подготовлено описание исходных данных, необходимых для работы коррелятора.

Результаты работы являются основой для создания программного обеспечения корреляционной обработки НИРФИ-4.

4)  $\phi_{G0}$  – значение смещения частоты в начальный момент времени во втором потоке при наблюдении космических источников,  
 формат – значения с плавающей запятой;  
 источник – расчёт в п. 5.1.2.;  
*идентификатор – f*;  
 единицы измерения – Гц,  
 назначение – коррекция частоты.

5)  $\alpha$  и  $\delta$  – видимые координаты источника на дату наблюдений,  
 формат – значения с плавающей запятой;  
 источник – расчёт в п. 5.4.2.;  
*идентификатор – q*;  
 единицы измерения – радианы;  
 назначение – расчёт задержки, расчёт сдвига частоты.

6)  $S_0$  – гринвичское звёздное время на дату наблюдений,  
 формат – значения с плавающей запятой;  
 источник – расчёт в п. 5.4.3.;  
*идентификатор – u*;  
 единицы измерения – радианы,  
 назначение – расчёт задержки, расчёт сдвига частоты.

6)  $\Delta t_m$  – период временной фильтрации,  
формат – значение с плавающей запятой;  
источник – вводится оператором;  
*идентификатор* –  $x$ ;  
единицы измерения – с;  
назначение – временная фильтрация.

7)  $t_m$  – начальный момент временной фильтрации,  
формат – значение с плавающей запятой;  
источник – вводится оператором;  
*идентификатор* –  $y$ ;  
единицы измерения – с;  
назначение – временная фильтрация.

8)  $T_{pr}$  – **длительность временного интервала**, на котором выполняется спектральный анализ.  
формат – значение с плавающей запятой;  
источник – вводится оператором;  
*идентификатор* –  $t$ ;  
единицы измерения – с;  
назначение – спектральный анализ.

### П3.3. Результаты промежуточных расчетов

1)  $\tau_N$  – **задержка в начальный момент времени** второго пункта относительно первого (опорного);  
формат – значения с плавающей запятой;  
источник – расчёт по модели п. 5.1.1.;  
*идентификатор* –  $a$ ;  
единицы измерения – с;  
назначение – коррекция задержки.

2)  $B_X, B_Y, B_Z$  – **проекции вектора базы**;  
формат – значения с плавающей запятой;  
источник – расчёт в п. 5.4.1.;  
*идентификатор* –  $b$ ;  
единицы измерения – км,  
назначение – расчёт задержки, расчёт сдвига частоты гетеродина.

3)  $dt_s$  – **временной интервал для расчёта** коррекции задержки и частоты гетеродина,  
формат – значения с плавающей запятой;  
источник – расчёт в п.5.;  
*идентификатор* –  $u$ ;  
единицы измерения – мкс;  
назначение – расчёт задержки и сдвига частоты; выполнение коррекции.

## 1. Введение

Программа «Коррелятор данных РСДБ-экспериментов» (далее в тексте «коррелятор») предназначена для первичной и вторичной обработки данных, полученных в научных экспериментах, осуществляемых на радиоинтерферометрах со сверхдлинной базой (РСДБ).

Коррелятор может быть применен для решения различных задач радиоастрономии, астрофизики, астрометрии, выполняемых с помощью РСДБ, в том числе для:

- координатной поддержки полетов межпланетных космических аппаратов (КА) и искусственных спутников Земли (ИСЗ);
- мониторинга околоземного космического пространства методом радиолокационной длиннобазовой интерферометрии с целью определения и уточнения траекторий полета астероидов, потенциально опасных для Земли, и фрагментов "космического мусора";
- определения параметров вращения Земли;
- астрофизических исследований космических радиоисточников;
- исследований межпланетной, межзвездной среды, солнечного ветра методом радиопросвечивания;
- точного определения координат пунктов РСДБ и др.

## 2. Функциональная схема коррелятора

Общая структурная схема центра корреляционной обработки приведена на рис. 1. Данные, принятые в каждом приёмном пункте комплекса РСДБ, передаются выбранным способом на персональный компьютер (ПК), выполняющий функции терминала приёма данных.

Далее, информация поступает на коррелятор, где осуществляется синхронизация потоков данных по времени регистрации, а также прочие операции первичной обработки и, собственно, взаимная корреляция данных каждой пары потоков и спектральная обработка данных.

После коррелятора данные передаются на персональные компьютеры операторов (ПКО), для их анализа (наличия полезного сигнала, помех в каждой приёмной системе, контроля функционирования приёмных комплексов и т.д.) и выполнения процедур вторичной обработки в зависимости от решаемой задачи.

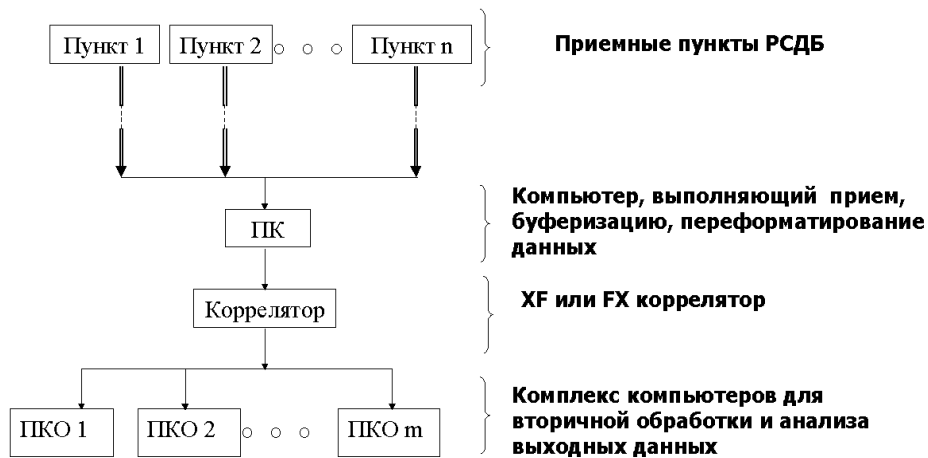


Рис. 1. Структурная схема центра корреляционной обработки

#### Функции коррелятора:

1. Сбор и преобразование входных данных, записанных на различных системах регистрации, к единому формату, используемому в корреляторе.
2. Подготовка данных различных пунктов к корреляционной обработке.
3. Корреляционная обработка данных, выполняющаяся в различных режимах.
4. Спектральная обработка коррелированного сигнала.
5. Вывод результатов корреляционной и спектральной обработки.
6. Архивирование данных.

#### Коррелятор должен иметь следующие характеристики:

1. Количество одновременно обрабатываемых потоков информации – 2 (в дальнейшем – 2..N: определяется количеством приёмных пунктов и количеством частотных каналов каждого пункта).
2. Метод синхронизации регистрируемых данных – сигналы стандартов частоты/времени, сверенные с помощью ГЛОНАСС/GPS.
3. Диапазон поиска по задержке – произвольный.
4. Диапазон поиска по частоте – определяется полосой регистрации.
5. Частотная полоса регистрации от 1 до 16 МГц с возможностью ее расширения; полоса регистрации определяется конвертером и системой регистрации в пунктах РСДБ.

формат – значения с плавающей запятой;  
 источник – вводится оператором;  
 идентификатор –  $p$ ;  
 единицы измерения – угловые секунды;  
 назначение – расчёт проекций базы интерферометра.

10)  $\Delta t_{on}$  (с) – дополнительный временной сдвиг, задаваемый оператором, в каждом приёмном пункте;  
 формат – значения с плавающей запятой;  
 источник – протокол РСДБ-пункта; вводится оператором;  
 идентификатор –  $c$ ;  
 единицы измерения – мкс;  
 назначение – расчёт задержки.

#### П3.2. Параметры обработки сигналов

- 1)  $f_{on}$  – постоянный сдвиг частоты, вводимый оператором при обработке;  
 формат – значения с плавающей запятой;  
 источник – вводится оператором;  
 идентификатор –  $h$ ;  
 единицы измерения – Гц;  
 назначение – расчёт сдвига частоты гетеродина.
- 2)  $t_u$  – время интегрирования,  
 формат – значения с плавающей запятой;  
 источник – вводится оператором;  
 идентификатор –  $T$ ;  
 единицы измерения – мкс,  
 назначение – интегрирование после перемножения потоков.
- 3)  $T_r$  – длительность временного интервала, на котором выполняется анализ.  
 формат – значение с плавающей запятой;  
 источник – вводится оператором;  
 идентификатор –  $v$ ;  
 единицы измерения – с;  
 назначение – корреляция и спектральный анализ.
- 4)  $J$  – число сдвигов по задержке;  
 формат – целочисленное значение;  
 источник – вводится оператором;  
 идентификатор –  $j$ ;  
 назначение – корреляция.
- 5)  $\Delta t_{m0}$  – длительность отрезка для временной фильтрации,  
 формат – значение с плавающей запятой;  
 источник – вводится оператором;  
 идентификатор –  $w$ ;  
 единицы измерения – с;  
 назначение – временная фильтрация.

идентификатор –  $t$ ;

назначение – расчёт задержки, сдвига частоты гетеродина.

**4) условные имена РСДБ-пунктов**, состоящие из одного символа – буквы или цифры, например v (Вентспилс) или l (Евпатория); первый указанный пункт является опорным;

формат – символьные значения;

источник – программа эксперимента и протокол РСДБ-пункта;

идентификатор –  $p$ ;

назначение – поиск координат пункта в каталоге ANTENNA.SCH для расчёта проекций базовой линии.

Условные обозначения РСДБ-пунктов приводятся в соответствии с каталогом антенн ANTENNA.SCH. В процессе работы коррелятора (при расчете проекции базы интерферометра) по имени пункта осуществляется поиск в файле ANTENNA.SCH строки, содержащей в начальной позиции тот же символ. Из найденной строки извлекаются координаты пункта  $X_0, Y_0, Z_0$ .

**5)  $F_{g_i}$  – частота гетеродина** ( $f_{sky}$  – нижняя частота полосы приёма) в первом

(опорном) и втором приёмных пунктах;

формат – значения с плавающей запятой;

источник – протокол РСДБ-пункта; вводится оператором;

идентификатор –  $f$ ;

единицы измерения – МГц;

назначение – расчёт сдвига частоты гетеродина.

**6)  $\Delta t$  – смещение шкалы времени в каждом приёмном пункте;**

формат – значения с плавающей запятой;

источник – программа эксперимента и протокол РСДБ-пункта; вводится оператором;

идентификатор –  $d$ ;

единицы измерения – мкс;

назначение – расчёт задержки.

**7)  $\gamma_1, \gamma_2$  – ход шкалы времени** в первом (опорном) и втором приёмном пунктах;

формат – значения с плавающей запятой;

источник – протокол РСДБ-пункта; вводится оператором;

идентификатор –  $g$ ;

единицы измерения – мкс/с;

назначение – расчёт задержки.

**8)  $\Delta_T$  (с) – поправка времени UT1-UTC** на дату скана;

формат – значения с плавающей запятой;

источник – служба частоты и времени (ГСВЧ); вводится оператором;

идентификатор –  $l$ ;

единицы измерения – мкс;

назначение – расчёт задержки.

**9)  $x, y$  – координаты полюса;**

6. Длительность обрабатываемой записи – до 1000 с (определяется стабильностью стандартов частоты и времени).

7. Тип квантования исходных данных – двухуровневое квантование (однобитовое) (в дальнейшем – многоуровневое квантование).

8. Частота выборки исходных данных 2-32 МГц.

### 3. Структура программного обеспечения

Структура коррелятора должна представлять из себя совокупность блоков, в которых последовательно выполняются основные операции коррелятора (рис. 2).

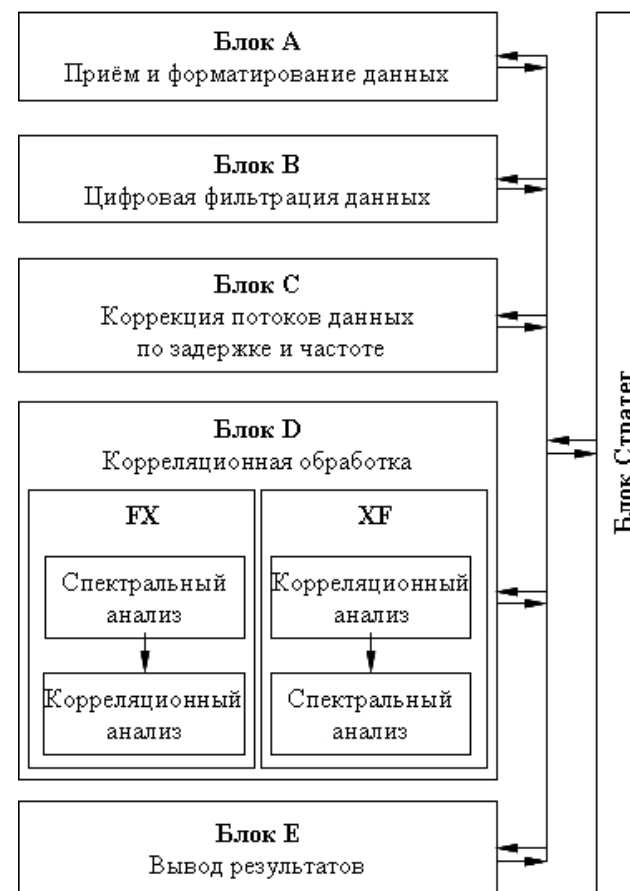


Рис. 2. Структура программного обеспечения

При разработке и развитии ПО предлагается соблюдать его «модульность», которая достигается за счет:

- 1) обеспечения независимой работы отдельных блоков программы;
- 2) обеспечения определённого формата файлов на входе каждого блока (см. п. 4.2);
- 3) обеспечения гибкости системы за счет выбора той или иной программы для данного этапа обработки внутри конкретного блока;
- 4) обеспечения закрытия открытых и временных файлов после окончания работы каждого блока;
- 5) обеспечения адаптации каждого блока к аппаратной и операционной среде компьютера (распределение объема оперативной памяти и объема дискового пространства, наличие одного или нескольких процессоров, субпроцессоров и т.д.).

Подобная структура позволит коррелятору работать в двух режимах:

– режим «ручной обработки», при котором пользователь осуществляет последовательный запуск каждого блока и имеет возможность редактировать управляющий файл;

– режим «автоматической обработки», при котором запуск программных блоков и создание/редактирование управляющего файла осуществляется внешним программным блоком «Стратег», определяющим режимы, установки и стратегию обработки информации.

### 3.1. Блок А. Ввод и переформатирование данных

В Блоке А осуществляется ввод файлов данных, зарегистрированных в приёмных РСДБ-пунктах, и преобразование данных к единому формату.

При загрузке исходной информации должна быть предусмотрена возможность соединения файлов, записанных в одном скане, для исключения разрывов и накопления информации при статистической обработке.

В том случае, если содержатся разрывы в потоке данных, во временные промежутки выполняется вставка массивов значений, соответствующих шумовому сигналу.

Программа Блока А может быть размещена на компьютере, выполняющем прием, переформатирование и буферизацию данных.

- длительность участка (либо разрешение по частоте),
- частота интерференции,
- задержка.

Кроме того, необходимо предусмотреть возможность записи в отдельные файлы графиков интервалов, выбранных пользователем (корреляционной функции и спектра мощности); имя файла должно содержать информацию об обработанном скане, например:

11581\_14nov2007\_184110\_klev\_df500.jpg,  
где 11581 – имя скана (или источника)  
14nov2007 – дата наблюдений,  
184110 – начало участка (часы, минуты, секунды),  
klev – имена пунктов (Калязин – Евпатория).  
XXX – модификатор (по выбору пользователя).

## Приложение 3. Список параметров таблиц сопровождающей информации

### П3.1. Параметры сеанса измерений

**1) имя радиостанции**, например, 3С273В;

формат – символьные значения;

источник – программа эксперимента и протокол РСДБ-пункта; вводится оператором;

*идентификатор – N*;

назначение – поиск экваториальных координат наблюдаемого источника на заданную эпоху в каталоге SOURCE.SCH и дальнейший расчет видимых координат.

По имени радиостанции в процессе работы коррелятора осуществляется поиск в каталоге строки, содержащей в столбце IAUNAME либо COMNAME указанное имя. Из найденной строки извлекаются координаты источника.

**2)  $y, m, d$  – дата обрабатываемого скана** (интервала наблюдений) – год, месяц, число, например 2003, 07, 31;

формат – целочисленные значения;

источник – программа эксперимента и протокол РСДБ-пункта; вводится оператором;

*идентификатор – D*;

назначение – расчёт видимых координат источника на дату, расчёт звёздного времени.

**3)  $t_0, t_k$  – начальный и конечный моменты** обрабатываемого участка записи, например, 12 03 10 12 06 00 (начало: 12 ч 3 мин 10 с, конец: 12 ч 6 мин 0 с);

формат – целочисленные значения;

источник – программа эксперимента и протокол РСДБ-пункта; вводится оператором;



«C(m)» – задержка при многоканальной записи,

«с(m)» – частота при многоканальной записи.

Содержимое строк: коэффициенты полинома 3-й степени для расчета компенсации задержки и частоты.

Данные коэффициенты должны быть независимы от интервалов выборки и частот сигнала, т.е. для программ Блока С значения представляются в отсчетах; значения коэффициентов и привязка к конкретным значениям частот и полосы приема определяется блоком Стратег при автоматической обработке или оператором в ручном режиме.

#### Уровень 4 (корреляция и спектральный анализ – выход Блока D)

Имеет 2 уровня. После каждого информация фиксируется в файл. Файлы 4-го уровня представляют собой двухмерный массив, который состоит из M файлов длиной N отсчетов каждый. Каждый отсчет – комплексный (действительная и мнимая части).

Вид слова:

1 – 1 целое число (16 бит) на один отсчет,

2 – 1 вещественное число (32 бит) один отсчет.

Число M для типа коррелятора XF – количество сдвигов (задержек), для типа коррелятора FX – количество гармоник (частот). Число N – количество отсчетов по времени в соответствии с выбранным интервалом интегрирования.

#### Уровень 5 (корреляция и спектральный анализ – выход Блока D)

Формат аналогичен формату файла 4-го уровня, но собраны в единый файл. Строка в файле сопровождающей информации:

Строки, управляющие корреляцией и Фурье анализатором:

«D| (количество блоков) (длительность блока) (отметка, нужен уровень 2 или нет) </p>

«d| (начальное значение задержки) (конечное значение задержки) (шаг задержки) </p>

«G| (начальная гармоника) (конечная гармоника) </p>

Строки управляющие цифровой фильтрацией:

«g| (смещение частоты) (интервал интегрирования) ..</p>/

#### Уровень 6 (визуализация и анализ – выход Блока E)

Результатом работы Блока E является выделение искомого интервала и регистрация данных в файл с целью передачи для вторичной обработки. Файл должен содержать:

- амплитуда спектра в зависимости от частоты,
- значения максимума спектра в зависимости от времени.

Имя файла или шапка файла должны содержать следующую информацию:

- имя скана,
- дата скана,
- момент начала участка,
- номера РСДБ-пунктов,
- частота регистрации (нижняя частота полосы приёма),
- введенный сдвиг частоты,

## 3.2. Блок В. Цифровая фильтрация данных

В Блоке В выполняется коррекция потока данных, а именно:

– частотная фильтрация данных (цифровая) с целью подавления помех;

– смещение частотной полосы сигнала в случае ошибок при установке частоты гетеродина на пунктах регистрации;

– временная фильтрация данных с целью подавления периодической помехи и при обработке информативных периодических сигналов, например сигналов пульсаров.

Выходные файлы Блока В должны иметь одинаковый формат независимо от выбранного режима работы.

Программа Блока В может быть размещена на компьютере, выполняющем прием, переформатирование и буферизацию данных.

### 3.2.1. Частотная фильтрация

Частотная фильтрация подразумевает усреднение данных на интервале  $T_{cp}$ , устанавливаемом при обработке, для устранения высокочастотных помех (в дальнейшем предполагается создание НЧ, ВЧ и полосовых фильтров). При этом время усреднения должно быть много меньше величины, обратной частоте интерференции:  $1/F_u$  (18), чтобы при усреднении не сглаживалось интерференционное колебание.

Информационная составляющая сигнала  $S(k)$  может быть выделена на фоне помехи методом фильтрации в форме дискретной свертки:

$$S(k) = \sum_{i=1}^L h(i) \cdot s(k-i), \quad (1)$$

где:  $s(k)$  – отсчеты сигнала, содержащие полезный сигнал и помеху,  $h(i)$  – значения весовой функции в точке с номером  $i$  из  $L$  значений интервала, задаваемого пользователем.

Шаг по  $k$  – от 1 дискрета до числа дискретов в окне и более.

Весовые функции создаются пользователем и заносятся в библиотеку функций пользователя.

### 3.2.2. Смещение частотной полосы

Смещение частотной полосы выполняется введением в сигнал фазового множителя

$$\phi_{sh} = 2\pi T f_{sh}, \quad (2)$$

где  $f_{sh}$  – частота смещения (от 0 до верхнего значения полосы пропускания),  $T$  – время от начала обрабатываемого участка.

Данная операция выполняется перемножением исходного сигнала  $S(T) = A(T)e^{-j\phi(T)}$  и сигнала гетеродина  $S_{sh} = A_{sh}e^{-j\phi_{sh}}$ :

$$S(T) \cdot S_{sh}^* = A(T)A_{sh}e^{-j(\phi(T)-\phi_{sh})}. \quad (3)$$

Перемножение информационного потока данных и сигнала гетеродина производится фазовращателем (см. п.3.3.2). После выполнения гетеродинирования, выходной сигнал становится комплексным. При этом, если смещение частотной полосы не выполнялось, мнимая часть вводится равной нулю.

### 3.2.3. Временная фильтрация

Временная фильтрация состоит в наложении маски на сигнал, что означает приравнивание нулю значений сигнала на отрезке длительностью  $\Delta t_{m0}$  с периодом  $\Delta t_m$ , начиная с начального момента  $t_m$  ( $t_m < \Delta t_m$ ). Значения  $\Delta t_{m0}$ ,  $\Delta t_m$  и  $t_m$  задаются пользователем.

### 3.3. Блок С. Коррекция задержки и частоты Доплера

Изменение пространственной разности хода сигналов от источника радиоизлучения до антенн интерферометра за счёт вращения Земли в течение скана вызывает зависящий от времени доплеровский сдвиг частот между принимаемыми сигналами, что приводит к двум эффектам:

- частота интерференционного отклика, пропорциональная средней частоте принимаемого сигнала, является функцией времени [1];

- временная задержка между сигналами также подвержена регулярному изменению, вследствие различия доплеровских смещений на различных частотах внутри полосы частот приема [1].

Для того чтобы сохранить накапливаемую в течение сеанса измерения полезную энергию сигнала, эти эффекты должны быть скомпенсированы.

В Блоке С выполняется коррекция геометрической задержки и частоты Доплера.

Коррекция проводится для обоих режимов работы коррелятора: FX и XF (см. п. 3.4) под управлением программ блока «Стратег».

Коррекция частоты и задержки может выполняться как в одном потоке (втором, если первый поток – опорный), так и в разных: коррекция частоты выполняется в первом потоке, коррекция задержки – во втором. В случае, если компенсация частотного сдвига не требуется (например при автокорреляции), должно выполняться преобразование потока данных в комплексный вид с мнимой частью, равной нулю.

1 – один бит информации при 2-х уровнях и 2 бита при 4-х уровнях представления на один отсчет;

2 – байт (8 бит) или целое слово (16 бит) на один отсчет.

Строка в файле сопровождающей информации:

«B| (вид выходной информации (1, 8, 16)) (комплексное или действительное представление) (наличие и вид синтеза полосы) (количество частотных каналов) (вид маски) (вид интегрирования) (наличие смещения частоты) (идентификатор версии программы фильтрации) </p>».

Параметр «наличие и вид синтеза»:

0 – нет синтеза, запись одноканальная;

1 – параллельный синтез, т.е. этот файл принадлежит одному из частотных каналов.

Параметр «количество частотных каналов»:

1 – при одноканальной записи,

N – номер частотного канала – при параллельном синтезе.

Параметр «вид маски»:

0 – нет маски,

1 – маска «выделения»,

2 – маска подавления,

Параметр «вид интегрирования»:

0 – нет интегрирования,

1 – «интервальное» интегрирование,

2 – «скользящее среднее»,

Строка в файле сопровождающей информации:

Если выбран режим интегрирования:

«T| (интервал интегрирования (в отсчетах)) (сдвиг 1-го интервала от начала записи (в отсчетах))</p>»

Если выбран режим маски:

«M| (интервал маскирования (в отсчетах)) (период маски) (сдвиг 1-го интервала от начала записи (в отсчетах)) (вид заполнения «пустых интервалов») </p>»

### Уровень 3 (коррекция частоты и задержки – выход Блока С)

Состоит из двух слов, следующих последовательно друг за другом (действительная и мнимая части), длиной N отсчетов (длительность записи).

Два вида слов:

1: один бит информации при 2-х уровнях и 2 бита при 3-х уровнях представления на один отсчет;

2: байт (8 бит) или целое слово (16 бит) на один отсчет.

Строка в файле сопровождающей информации:

2 строки для одноканальных записей или 2\*m строк при синтезе полосы (m – число каналов синтеза).

Идентификаторы:

«C|» – задержка,

«c|» – частота при одноканальной записи,

**Обозначения станций в названиях файлов:**

VN – Вентспилс (Ventspils)  
 UN – Университет (UNN)  
 RR – НИРФИ (RRI)  
 ZM – Зименки (Zimenki)  
 SP – Старая Пустынь (StPustyn)  
 MC – Медицина (Medicina)  
 SM – Симеиз (Simeiz)  
 UR – Урумчи (Urumqi)  
 EV – Евпатория (Evpatoria)  
 RD – ПЕРЕДАТЧИК (radar)

**Обозначения месяцев:**

Январь jan  
 Февраль feb  
 Март mar  
 Апрель apr  
 Май may  
 Июнь jun  
 Июль jul  
 Август aug  
 Сентябрь sep  
 Октябрь oct  
 Ноябрь nov  
 Декабрь dec

**Приложение 2. Формат файлов данных в отдельных блоках**

**Уровень 0 (ввод информации с терминалов)**

Поток 1 бит информации при 2-х уровнях и 2 бита при 3-х уровнях в представлении на один отсчет длиной N отсчетов (длительность записи). Строка в файле сопровождающей информации:

«0| (число уровней) (количество отсчетов) (период выборки) (идентификатор терминала)</p>».

**Уровень 1 (форматирование данных – выход Блока А)**

Поток 1 бит информации при 2-х уровнях и 2 бита при 4-х уровнях в представлении на один отсчет длиной N отсчетов (длительность записи). Строка в файле сопровождающей информации:

«A| (реальная длительность файла в отсчетах) (количество файлов) (идентификатор исходного формата) </p>».

Дополнительный параметр «количество файлов» требуется, если необходимо ввести ограничение на длину файла; тогда продолжение файла именовать по расширениям DA1, DA2, DA3 и т.д.

**Уровень 2 (фильтрация данных – выход Блока В)**

Состоит из потока информации в виде двух слов, следующих последовательно друг за другом, при выборе комплексного вида, или из одного слова при действительном представлении длиной N отсчетов.

Вид слова может быть двух видов:

Необходимо предусмотреть возможность выполнения операции временной фильтрации сигнала гетеродина («маскированного» гетеродина) аналогично операции, выполняемой в блоке В (например, если предварительно в блоке В выполнялось маскирование сигнала).

**3.3.1. Коррекция задержки**

Информативные сигналы, поступающие с двух РСДБ-пунктов в центр обработки, рассинхронизированы на величину

$$\tau(T) = \tau_0(T) + \Delta t, \quad (4)$$

где  $\tau_0$  – геометрическая пространственная задержка между принятыми сигналами источника радиоизлучения, которая предварительно рассчитывается по априорным данным,  $T$  – время, отсчитываемое от начального момента обрабатываемого участка  $t_0$ ,  $\Delta t = \Delta t_2 - \Delta t_1$  – рассинхронизация местных шкал времени в начальный момент обрабатываемого участка записи,  $\Delta t_1, \Delta t_2$  – смещение шкалы времени в первом (опорном) и втором приёмных пунктах; значение  $\Delta t$  берётся из протокола наблюдений.

Расчет задержки  $\tau$  для сеансов наблюдений удаленных космических радиоисточников и радиоисточников в околоземном космическом пространстве (спутников, объектов космического мусора) выполняется способами, описанными в п. 5.

Введение начального сдвига  $\tau_N = \tau[0]$  и переменной части задержки осуществляется одновременно. Компенсация переменной части задержки производится линейно-кусочным способом, процесс иллюстрируется условной схемой на рис. 3. Отслеживание закона изменения задержки  $\tau$  производится дискретными шагами  $\Delta \tau_s$  через фиксированные интервалы времени  $dt_s$ .

Пунктирной линией показана задержка, рассчитанная по соответствующей модели (см. п. 5.1), ступенчатой линией показана вводимая задержка.

Минимальный шаг изменения задержки равен  $\Delta \tau_s = 1/F_s$  (с), где  $F_s$  – частота дискретизации. Длина интервала  $dt_s$  в отсчетах не должна превышать половину интервала, на котором задержка изменяется на  $\Delta \tau_s$  (см. (16)). Производится расчёт значений задержки  $\tau_k$  на каждый интервал  $k$  длиной  $dt_s$ . Нужно учесть, что на первом интервале выполняется сравнение изменения задержки с величиной  $\Delta \tau_s / 2$ , чтобы в дальнейшем коррекция приходилась на середину каждого интервала.

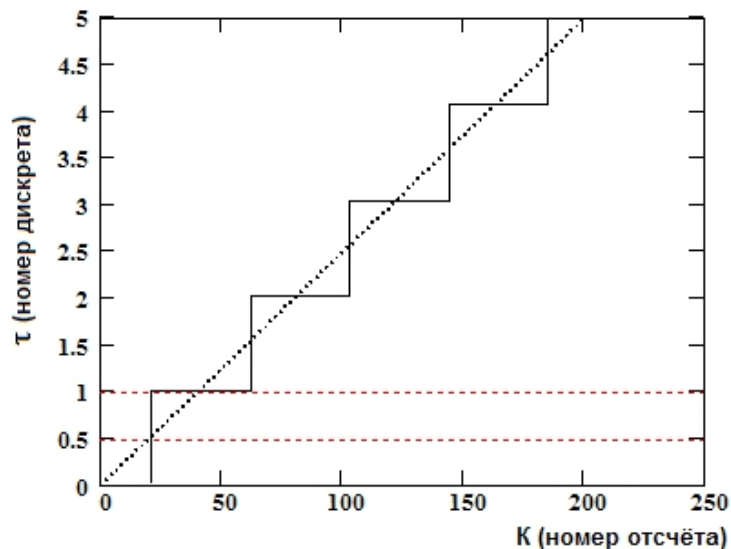


Рис. 3. Зависимость задержки от номера отсчета

Номера отсчётов, в которых задержка изменяется на один дискрет  $\Delta\tau_s$ , заносятся в отдельный массив значений.

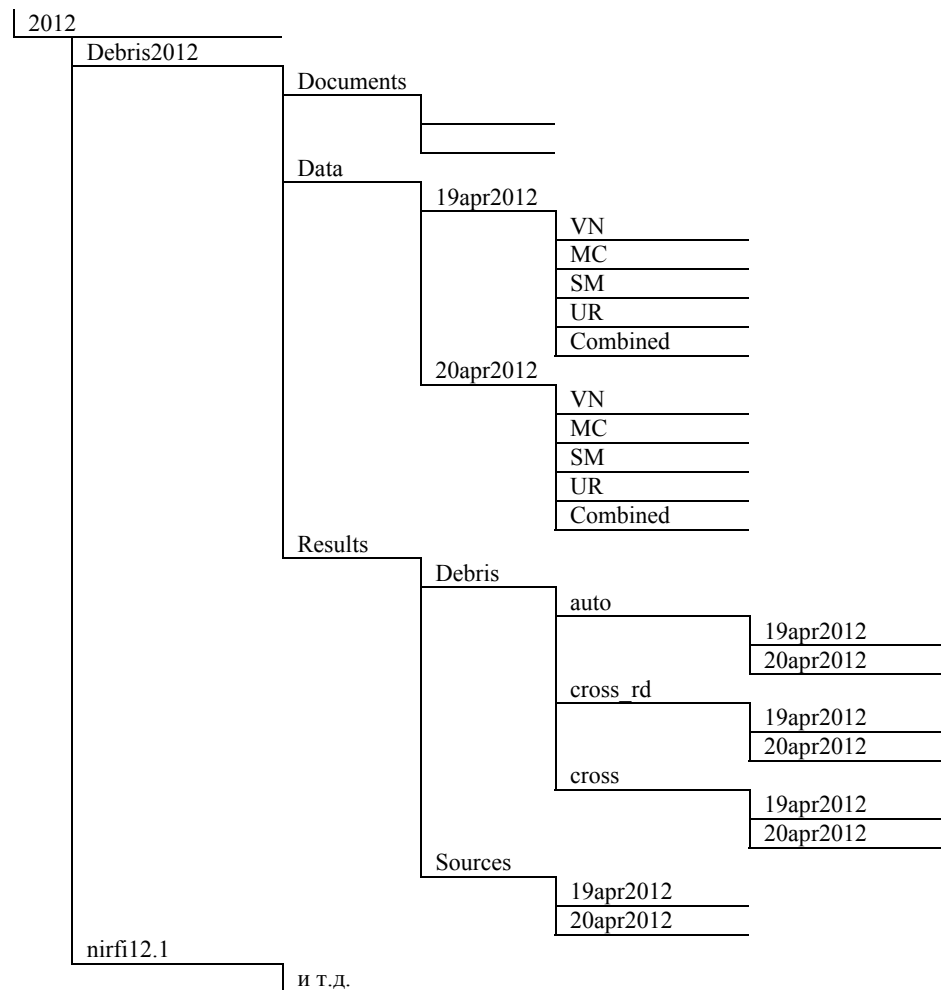
**Результатом расчета компенсационного сдвига** является массив значений номеров битов  $K_i$  ( $i = 0,1,2,\dots$ ), в которых требуется коррекция задержки (нужно учитывать, что номер бита может принимать большие значения, поэтому следует предусмотреть соответствующий формат переменной номера бита (64-х битное слово).

Далее выполняется компенсация задержки: если задержка положительная, значения корректируемого потока, номера отсчётов которых совпадают со значениями из массива  $K$ , исключаются из исходного массива и формируется новый массив данных. В том случае, если задержка отрицательная, в момент коррекции задержки вставляется элемент массива, значение которого равно предыдущему значению.

### 3.3.2. Коррекция частоты

В результате коррекции частоты формируется два потока – действительный и мнимый.

Например:



### П1.2. Названия файлов с результатами обработки

Объект\_дата\_время\_Станция1|Станция2\_процедура\_модификатор.расширение

**Дата:** день месяц

**Процедура:** auto – автокорреляция  
 cros – кросс-корреляция  
 crtd – корреляция с сигналом передатчика

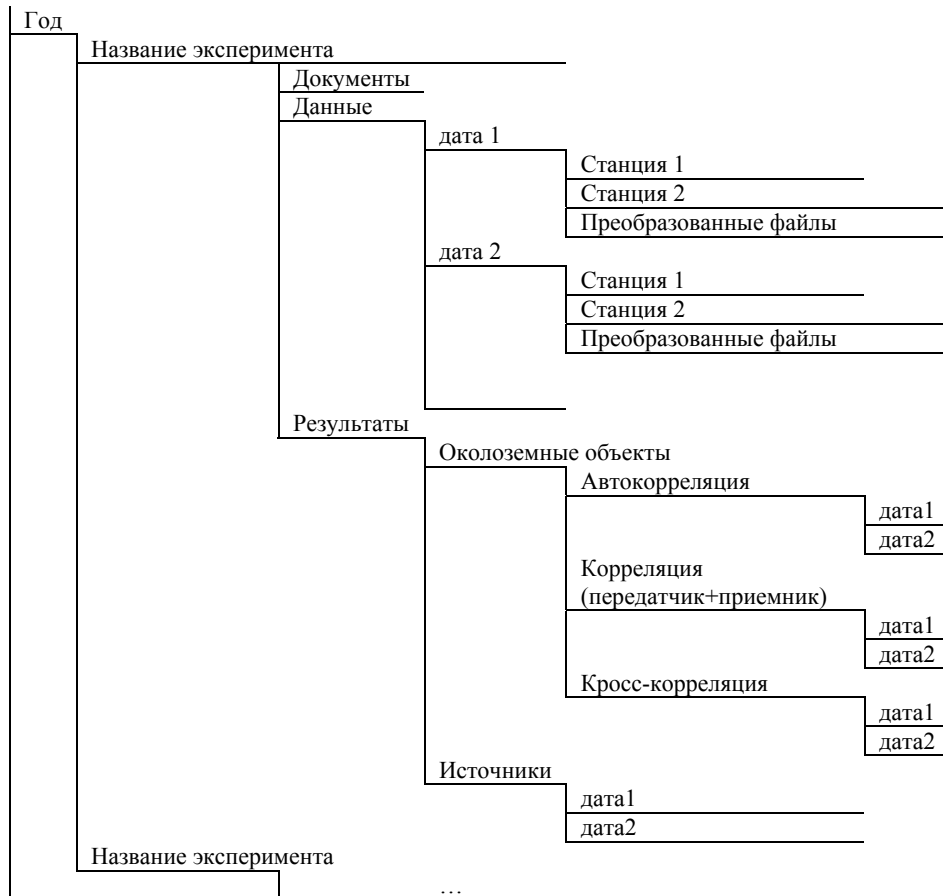
**Модификатор:** любой; указывается, если есть

Например:

22087\_19apr2012\_183510\_vn\_auto.jpg

# Приложение 1. Структура базы РСДБ-данных

## П1.1. Структура папок



Коррекция по частоте осуществляется введением в сигнал фазового множителя  $\phi_G(T)$ , зависящего от времени. Модель изменения фазового множителя в зависимости от времени приведена в п. 5.

Для бинарного сигнала изменение фазы существенно только при изменении на  $\pi/2$ . Результатом расчета частотного сдвига является набор номеров отсчетов (или моментов времени), когда происходит изменение фазы на  $\pi/2$ .

Компенсация постоянной части фазового сдвига  $\phi_{G0} = \phi_G(0)$  и переменной части осуществляется одновременно. Коррекция переменной части осуществляется введением или не введением инверсии сигнала в соответствии с номером квадранта. Именно в этот момент и происходит превращение входного потока из действительного в комплексный, но по прежнему битовый поток. Нужно учесть, что номер отсчетов может принимать большие значения, поэтому следует предусмотреть соответствующий формат переменной (64-х битные слова).

В случае однобитового сигнала номера квадранта (I, II, III, IV), в котором находится фазовый множитель, можно определить по формуле:

$$Q_{\phi_G} = INT\left(\frac{\text{mod}_{2\pi} \phi_G}{\pi/2}\right) + 1. \quad (5)$$

Коррекция выполняется следующим образом:

I квадрант: при  $0 < \phi_G \leq \frac{\pi}{2}$  исходные значения действительного и мнимого потока остаются без изменений.

II квадрант: при  $\frac{\pi}{2} < \phi_G \leq \pi$  значения действительного потока остаются без изменений, значения мнимого потока инвертируются.

III квадрант: при  $\pi < \phi_G \leq 3\frac{\pi}{2}$  значения и действительного, и мнимого потока инвертируются.

IV квадрант: при  $3\frac{\pi}{2} < \phi_G \leq 2\pi$  значения действительного потока инвертируются, значения мнимого потока остаются без изменений.

Процедуру коррекции можно записать другим способом: вещественная часть сигнала получается умножением исходного сигнала на функцию  $\text{sign} \sin \phi_G(t)$ ; а мнимая часть – умножением исходного сигнала на функцию  $\text{sign} \cos \phi_G(t)$ , где

$$\text{sign}(\sin \phi_G) = \begin{cases} 1, & 0 < \phi_G \leq \pi \\ -1, & \pi < \phi_G \leq 2\pi \end{cases}, \quad \text{sign}(\cos \phi_G) = \begin{cases} 1, & -\frac{\pi}{2} < \phi_G \leq \frac{\pi}{2} \\ -1, & \frac{\pi}{2} < \phi_G \leq \frac{3\pi}{2} \end{cases}. \quad (6)$$

Результатом коррекции второго потока по частоте является массив данных – комплексный битовый поток.

В случае если коррекция потоков по частоте и задержке не выполнялась, формируется второй (мнимый) поток, равный нулю.

### 3.4. Блок D. Корреляция и спектральный анализ

Блок D является основным блоком коррелятора. В нем выполняется корреляция с последующим интегрированием данных.

Блок D состоит из двух субблоков:

- субблока D1, в котором выполняется корреляция,
- субблока D2, в котором выполняется спектральный анализ.

Порядок запуска субблоков зависит от типа коррелятора: возможна реализация двух типов – XF (взаимнокорреляционная обработка выполняется до спектрального анализа) и FX (взаимнокорреляционная обработка выполняется после спектрального анализа).

Входными данными Блока D являются два потока данных. В зависимости от задачи обработки в качестве потока 1 и потока 2 могут выступать следующие сигналы.

1) Автокорреляция потока данных:

поток 1 – поток данных, записанный в одном из приёмных РСДБ-пунктов;

поток 2 – копия потока 1.

2) Взаимная корреляция опорного сигнала и эхо-сигнала от исследуемого объекта, записанного в одном из приёмных пунктов в экспериментах по радиолокации космических объектов:

поток 1 – записанный сигнал излучателя (используется редко) либо предварительно сформированный цифровой сигнал с соответствующим типом квантования и частотой выборки; сигнал может быть монохроматическим с частотой  $F_v$ , либо линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) (в зависимости от постановки эксперимента) с параметрами, задаваемыми оператором;

поток 2 – поток данных, записанный в одном из приёмных РСДБ-пунктов.

3) Взаимная корреляция потоков данных, записанных в двух (или более) приёмных пунктах:

$$\Theta = L + (1^\circ.919460 - 0^\circ.004789 \cdot T - 0^\circ.000014 \cdot T^2) \sin M + (0^\circ.020094 - 0^\circ.000100 \cdot T) \sin(2M) + 0^\circ.000293 \sin(3M), \quad (70)$$

Итогом вычислений являются видимые координаты источника на дату сеанса  $\alpha$  и  $\delta$ .

### 5.4.4. Гринвичское звёздное время на дату наблюдений

Вычисляется юлианская дата на  $0^h$ UTC заданной даты (см. (45)). Гринвичское среднее звёздное время на  $0^h$ UTC вычисляется следующим образом [4]:

$$S = 0.276919398 + 100.0021359 \cdot T + 0.000001075 \cdot T^2, \quad (\text{сутки}), \quad (71)$$

где:

$$T = \frac{JD - 2415020.0}{36525.0} \quad (72)$$

Умножив дробную часть (71) на 24, получим среднее звёздное время в часах:

$$S_{cp} = (S - INT(S)) \cdot 24, \quad (\text{ч}) \quad (73)$$

Истинное звёздное время рассчитывается по формуле:

$$S_0 = S_{cp} \cdot 3600 + \frac{\Delta\psi \cos \varepsilon}{15}, \quad (\text{с}) \quad (74)$$

где  $\Delta\psi$  и  $\varepsilon$  вычисляются по (62) и (63) соответственно.

где  $\alpha_0, \delta_0$  – экваториальные координаты наблюдаемого источника на заданную эпоху (из каталога источников – см. п.5.4.4.).

Угол  $\alpha_1$  определяется от 0 до  $2\pi$ , т.е.  $\arctan$  в (54) рассчитывается с учётом знаков  $F$  и  $G$ : при  $F > 0$  и  $G < 0$  – угол во втором квадранте, при  $F < 0$  и  $G < 0$  – в третьем квадранте.

4) Учёт влияния нутации на координаты источника:

$$\alpha_2 = \alpha_1 + (\cos \varepsilon + \sin \varepsilon \sin \alpha_1 \tan \delta_1) \Delta \psi - (\cos \alpha_1 \tan \delta_1) \Delta \varepsilon, \quad (58)$$

$$\delta_2 = \delta_1 + (\sin \varepsilon \cos \alpha_1) \Delta \psi + (\sin \alpha_1) \Delta \varepsilon. \quad (59)$$

Наклон эклиптики (средний):

$$\varepsilon = 23^\circ.452294 - 0^\circ.0130125 \cdot T - 0.00000164 \cdot T^2, \quad (60)$$

$$T = \frac{JD - 2415020.0}{36525}, \quad (61)$$

$T$  – вычисляется с точностью не хуже 7 десятичных знаков после точки.

Нутация в долготе и наклоне (приблизённо):

$$\begin{aligned} \Delta \psi = & -(17''.2327 + 0''.01737 \cdot T) \sin \Omega - \\ & -(1''.2729 + 0''.00013 \cdot T) \sin(2L) + \\ & + 0''.2088 \sin(2\Omega) - 0''.2037 \sin(2L') + \\ & + (0''.1261 - 0''.00031 \cdot T) \sin M, \end{aligned} \quad (62)$$

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon = & +(9''.2100 + 0''.00091 \cdot T) \cos \Omega + \\ & +(0''.5522 - 0''.00029 \cdot T) \cos(2L) - \\ & - 0''.0904 \cos(2\Omega) + 0''.0884 \cos(2L'), \end{aligned} \quad (63)$$

где долгота восходящего узла Луны:

$$\Omega = 259^\circ.1833 - 1934^\circ.1420 \cdot T + 0^\circ.002078 \cdot T^2, \quad (64)$$

средняя долгота Солнца:

$$L = 279^\circ.69668 + 36000^\circ.76892 \cdot T + 0^\circ.0003025 \cdot T^2 \quad (65)$$

средняя аномалия Солнца:

$$M = 358^\circ.47583 + 35999^\circ.04975 \cdot T - 0^\circ.000150 \cdot T^2 - 0^\circ.0000033 \cdot T^3 \quad (66)$$

средняя долгота Луны:

$$L' = 270^\circ.4342 + 481267^\circ.8831 \cdot T - 0^\circ.001133 \cdot T^2 \quad (67)$$

5) Учёт влияния годичной аберрации на координаты источника:

$$\alpha = \alpha_2 - 20''.49 \frac{\cos \alpha_2 \cos \Theta \cos \varepsilon + \sin \alpha_2 \sin \Theta}{\cos \delta_2}, \quad (68)$$

$$\delta = \delta_2 - 20''.49 [\cos \Theta \cos \varepsilon (\tan \varepsilon \cos \delta_2 - \sin \alpha_2 \sin \delta_2) + \cos \alpha_2 \sin \delta_2 \sin \Theta], \quad (69)$$

где истинная долгота Солнца равна:

поток 1 – поток данных, записанный в первом (опорном) приёмном РСДБ-пункте;

поток 2 – поток данных, записанный во втором (или последующих) приёмном РСДБ-пункте.

Входные потоки синхронизируются по меткам времени в заголовке файла. Каждый входной поток разбивается на временные интервалы длительностью  $T_{pr}(c)$ , задаваемой оператором.

**3.4.1. Субблок D1. Корреляция**

Выполняется корреляция соответствующих временных интервалов двух потоков данных.

Входной информацией субблока D1 являются два бинарных комплексных потока данных.

Процедура корреляции представляет собой умножение каждого значения одного потока на значение второго потока с таким же номером. Далее выполняется интегрирование полученного потока для каждого сдвига по задержке с временем интегрирования  $t_u$ . На этом этапе поток из битового преобразуется в поток целочисленных значений (либо значений с плавающей запятой). Время интегрирования должно быть таким, чтобы при усреднении не сглаживалось интерференционное колебание на выходе коррелятора, т.е.

$$t_u \ll 1/F_u, \quad (7)$$

где  $F_u$  – частота интерференции (см. (18)).

Однако при этом необходимо, чтобы время накопления было больше времени корреляции исходных шумовых сигналов:

$$t_u \gg 1/\Delta f, \quad (8)$$

где  $\Delta f$  – полоса регистрации.

Далее, исходный второй поток смещается на один отсчёт (либо  $n$  отсчётов) и перемножается на первый исходный поток. Операция перемножения и интегрирования повторяется в зависимости от числа сдвигов по задержке. Количество сдвигов определяется оператором.

**Результатом работы Субблока D1** для каждого временного интервала является двухмерный массив данных, содержащий зависимость амплитуды корреляционной функции от времени для каждого сдвига по задержке –

амплитуда корреляционной функции [время, задержка].

Единицы представления: амплитуда корреляционной функции – в условных единицах, время – в секундах, задержка – в дискретах  $\Delta \tau_s = 1/F_s$ . Полученные массивы данных сохраняются в файлы.

### 3.4.2. Субблок D2. Спектральный анализ

Выполняется спектральный анализ зависимости корреляционной функции от времени для каждой задержки и для каждого временного интервала  $T_{pr}$ .

Спектральный анализ с помощью преобразования Фурье должен быть реализован в двух вариантах:

1) на всей частотной полосе, которая обратно пропорциональна времени интегрирования;

2) на меньшем частотном интервале, заданном пользователем.

**Результатом работы Субблока D2** является набор массивов данных, содержащих зависимость амплитуды спектра от частоты и задержки для каждого интервала времени  $T_{pr}$  –

амплитуда спектра [частота, задержка, время].

Единицы представления: амплитуда спектра – в относительных единицах (в соотношении сигнал/шум, амплитуда спектра делится на дисперсию шума, которая рассчитывается на данном участке), задержка – в дискретах  $\Delta\tau_s = 1/F_s$ , частота – в Герцах, начало временного интервала – в секундах.

Полученные массивы данных записываются в файлы.

**Результатом работы Блока D** является набор двумерных массивов данных (целых либо с плавающей запятой), содержащих зависимость амплитуды спектра от частоты для каждого шага по задержке для каждого временного интервала  $T_{pr}$  с началом в момент  $t_m$  – амплитуда спектра: [частота, задержка, время].

Амплитуда спектра должна быть выражена в относительных единицах, частота – в Герцах, начальный момент интервала – в часах, минутах, секундах; задержка – в дискретах  $\Delta\tau_s = 1/F_s$ .

### 3.5. Блок E. Вывод результатов

Для анализа хода обработки должна быть реализована функция просмотра информации в графическом виде. Должны выводиться на экран (последовательно или выборочно) двумерные графики спектров мощности от частоты для каждой задержки или трёхмерный график зависимости амплитуды спектра от частоты и задержки в задаваемых оператором пределах для каждого временного интервала. Должна быть предусмотрена возможность как автоматического, так и ручного масштабирования изображения.

В Блоке E в каждом временном интервале выполняется автоматический поиск интерференционного сигнала (амплитуды

### 5.4.3. Видимые координаты удалённого радиосточника

#### 1) Определение юлианской даты:

а) Определение юлианской даты проведения сеанса на 0<sup>h</sup> UTC:

$$JD = INT(365.25 \cdot y) + INT(30.60001 \cdot (m+1)) + d + 1720994.5 + B, \quad (45)$$

где  $y, m, d$  – дата обрабатываемого скана (год, месяц, число) (из таблицы сопровождающей информации), если  $m=1$  либо 2, то нужно

заменить:  $y = y - 1, m = m + 12$ ;  $B = 2 - A + INT\left(\frac{A}{4}\right), A = INT\left(\frac{y}{100}\right)$ ,

Точность вычисления JD – тысячные доли.

б) Определение юлианской даты отсчётной эпохи:

$$1950.0: JD_0 = 2433282.313; \quad (46)$$

$$2000.0: JD_0 = 2451545.000 \quad (47)$$

Для промежуточной отсчётной эпохи:

$$JD_0 = INT(365.25y_0) + INT(30.60001(m_0+1)) + d_0 + 1720994.5 + B_0, \quad (48)$$

где:  $B_0 = 2 - A_0 + INT\left(\frac{A_0}{4}\right), A_0 = INT\left(\frac{y_0}{100}\right), y_0$  – год отсчётной эпохи,

$m_0 = INT(dy \cdot 12)$ , где  $dy = y_0 - INT(y_0), d_0 = (dy \cdot 12 - m_0) \cdot 30$ .

Если  $m_0=1$  либо 2, то нужно заменить:  $y_0 = y_0 - 1, m_0 = m_0 + 12$ .

#### 2) Определение углов Ньюкома на дату сеанса [4, 5]:

$$\xi = (2304".250 + 1".396 \cdot \tau_0)\tau + 0".302\tau^2 + 0".018\tau^3, \quad (49)$$

$$z = \xi + 0".791\tau^2 + 0".001\tau^3, \quad (50)$$

$$\theta = (2004".682 - 0".853\tau_0)\tau - 0".426\tau^2 - 0".042\tau^3, \quad (51)$$

где

$$\tau_0 = \frac{JD_0 - 2415020.313}{36524.2199}, \quad (52)$$

$$\tau = \frac{JD - JD_0}{36524.2199} \quad (53)$$

Точность вычисления  $\tau_0$  и  $\tau$  – 5 десятичных знаков после точки.

#### 3) Учёт влияния прецессии на координаты источника:

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{F}{G}\right) + z, \quad \delta_1 = \arcsin(H), \quad (54)$$

где:

$$F = \cos \delta_0 \sin(\alpha_0 + \xi), \quad (55)$$

$$G = \cos \theta \cos \delta_0 \cos(\alpha_0 + \xi) - \sin \theta \sin \delta_0, \quad (56)$$

$$H = \sin \theta \cos \delta_0 \cos(\alpha_0 + \xi) + \cos \theta \sin \delta_0, \quad (57)$$



+06 48 42.8233 – склонение  $\delta_0$  (знак, градусы, минуты, секунды, доли секунд),  
2000.0 – эпоха.

#### 5.4.2.2. Каталог радиотелескопов ANTENNA.SCH.

Каталог радиотелескопов содержит набор текстовых строк со следующей информацией: буквенное обозначение радиотелескопа, название РСДБ-пункта, декартовы координаты антенн  $X_0, Y_0, Z_0$  (в метрах), далее указан тип монтировки, поправки и скорость движения антенны по обеим координатам, а также пределы по азимуту и углу места, диаметр антенны.

Пример строк:

```
LTRCODE ANTENNA X(METERS) Y(METERS) Z(METERS)
AXIS OFFSET RATE1 CST1 LIM1 LIM2 RATE2 CST2 LIM3 LIM4
DIAM TERMID ALTNAME
v VENTSPLS 3183675.0000 1276930.0000 5359219.0000 AZEL
0.0000 10.0 0 -270.0 270.0 10.0 0 5.0 89.0 32.0 00 VS VENTSPLS
```

#### 5.4.2.3. Таблица сопровождающей информации.

Таблицы представляют собой текстовые файлы, которые оператор создает (либо редактирует) перед началом обработки.

В таблицы оператором вручную заносится информация об эксперименте на основе программы-расписания эксперимента и протоколов наблюдений каждого РСДБ-пункта. Устанавливаются параметры (режимы) работы коррелятора, а также параметры, рассчитанные в процессе работы программ центра обработки, необходимые для дальнейших этапов обработки. Эти параметры вводятся или оператором, или автоматически соответствующей программой.

Может быть принят следующий формат представления информации в таблицах:

в нулевой позиции содержится идентификатор параметра, далее символ «|», пробел (или несколько пробелов), значение параметра, пробел (или несколько пробелов), комментарии, символ перевода строки, например:

N| 3C273B \*Name of source.

Параметры сеанса измерений, включая параметры аппаратуры и сигналов, параметры обработки, а также список параметров промежуточных вычислений приведены в *Приложении 3*.

спектра, задержки, частоты) в полученном из Блока D массиве данных. Поиск выполняется по ряду критериев:

– значения отношения  $\sigma$ =сигнал/шум, которые превышают заданное оператором пороговое значение  $\sigma_{\text{пор}}$ ;

– амплитуда сигнала, превышающая заданное оператором значение  $A_{\text{пор}}$ ;

– локальные максимумы спектра.

Результатом работы Блока E является определение задержки и частоты максимума сигнала, а также выделение требуемых участков и регистрация данных в файл с целью передачи для вторичной обработки. Файл должен содержать:

амплитуда: [частота, задержка, время].

Границы участков по частоте, задержке и времени определяются оператором или задаются заранее в сопровождающем файле.

Имя файла или шапка файла должны содержать следующую информацию:

- имя скана,
- дата скана,
- момент начала участка,
- номера РСДБ-пунктов,
- частота регистрации (нижняя частота полосы приёма),
- введенный сдвиг частоты,
- длительность участка (либо разрешение по частоте),
- частота интерференции,
- задержка.

Кроме того, необходимо предусмотреть возможность записи в отдельные файлы графиков интервалов, выбранных пользователем (корреляционной функции и спектра мощности).

### 3.6. Блок «Стратег»

Блок «Стратег» выступает в качестве интерфейса программы и служит для координации обработки данных. Работа Блока «Стратег» должна быть организована в двух режимах – ручной обработки и автоматической. Блок «Стратег» использует готовые файлы сопровождающей информации, включающие информацию из протоколов эксперимента, необходимых каталогов, а также заданные режимы обработки (в том числе, тип коррелятора, необходимость выполнения фильтрации, коррекций частоты и задержки и т.д.).

При работе в автоматическом режиме Блок «Стратег», согласно с режимом обработки, последовательно вызывает на исполнение требуемые блоки, при необходимости изменяет управляющие файлы.

При работе в ручном режиме Блок «Стратег» позволяет пользователю выполнять обработку и предоставляет на редактирование управляющие файлы.

## 4. Описание форматов данных

### 4.1. Формат входных файлов

Информация на РСДБ пунктах записывается в файлы выбранной длины. Регистрация выполняется с частотой дискретизации  $F_s$  МГц. Длительность записи указывается в программе-расписании для системы регистрации в 32-битных словах. Длительность одного слова в секундах равна  $32/F_s$ . При составлении расписания работы терминала учитываются разрывы в записи, которые требуются для сохранения принятой информации на жесткий диск.

**Имя файла** содержит следующую информацию, например: IP\_256-160610\_X.dat, где IP – имя пункта, 256 – номер дня от начала года, 160610 – момент начала записи (16 ч 06 мин 10 с), \_X – модификатор (по выбору пользователя).

**Формат записи:** первые 60 байт – служебная информация, которая выдается программой регистрации, содержащая дату и время начала записи: например: 09/12/0816:06:100, что означает: сентябрь, 12, 2008 г., 16 ч 06 мин 10 с.

Далее следует информация в битовом представлении. Запись начинается по приходу переднего фронта импульса секунды “1PPS”.

### 4.2. Формат данных коррелятора

Модульность программы обеспечивается возможностью независимой работы каждого блока и определённым форматом файлов на входе и выходе каждого блока. В случае если блок не задействован, необходимо привести текущий файл к требуемому формату для использования его следующим блоком.

Файл данных, передаваемый к каждому следующему блоку от предыдущего, должен иметь:

- уникальное имя с расширением \*.dat;
- шапку-идентификатор;

$$S_{cor} = \exp\{-2\pi T \phi_G[T]\}, \quad (42)$$

на который умножается принятый сигнал. Далее выполняется процедура корреляции в зависимости от выбранного варианта обработки РСДБ-данных.

## 5.4. Исходные данные для коррекции потоков

### 5.4.1. Проекция базовой линии интерферометра

Имена РСДБ-пунктов, задействованных в скане, приводятся в таблице сопровождающей информации и указываются в буквенных (цифровых) кодах, например: 1 – Евпатория, v – Вентспилс, 9 – Зименки. Координаты радиотелескопов в декартовой системе координат  $X_0, Y_0, Z_0$  считываются из каталога ANTENNA.SCH (см. п. 5.4.2.3.). Координаты полюса  $x, y$  берутся из таблицы сопровождающей информации на дату скана.

Рассчитываются координаты пунктов с учетом поправки координат полюса:

$$\begin{aligned} X_i &= X_{0i} - x \cdot Z_{0i}, \\ Y_i &= Y_{0i} + y \cdot Z_{0i}, \\ Z_i &= Z_{0i} + x \cdot X_{0i} - y \cdot Y_{0i}. \end{aligned} \quad (43)$$

Здесь  $i$  – номер пункта,  $x, y$  – в радианах.

Рассчитываются проекции базовой линии:

$$\begin{aligned} B_X &= X_2 - X_1, \\ B_Y &= Y_2 - Y_1, \\ B_Z &= Z_2 - Z_1. \end{aligned} \quad (44)$$

### 5.4.2. Список исходных параметров

#### 5.4.2.1. Каталог источников SOURCE.SCH содержит:

$\alpha_0, \delta_0$  – экваториальные координаты источника (прямое восхождение и склонение) на заданную эпоху  $y_0$ ;

$y_0$  – эпоха (обычно 1950.0 либо 2000.0, но может быть и другая эпоха); эпоха задается в виде года с долями.

Пример строки файла каталога:

«0114+065 UVPSC 01 16 54.2816 +06 48 42.8233 2000.0»,  
где 0114+065 – имя источника (образовано от  $\alpha_0, \delta_0$ ),

UVPSC – имя источника (альтернативное),

16 54.2816 – прямое восхождение  $\alpha_0$  (часы, минуты, секунды, доли секунд),

$$\tau_i[t_j] = \frac{1}{c} \rho_i[t_j]. \quad (34)$$

Определяется задержка распространения сигнала  $\tau_{rj}$  от излучателя до КО (для сигнала, принятого в приёмном пункте в момент  $t_j$ ) путём решения последовательными приближениями следующего уравнения:

$$\tau_{rj}^{(k)} = \frac{1}{c} \rho_r[t_j - \tau_i + \tau_{rj}^{(k-1)}], \quad (35)$$

где  $k$  – номер шага вычислений.

На первом шаге ( $k=1$ ) принимается

$$\tau_{rj}^{(0)} = \frac{1}{c} \rho_r[t_j - \tau_i]. \quad (36)$$

Итерации производятся до выполнения условия:

$$|\tau_{rj}^{(k)} - \tau_{rj}^{(k-1)}| \leq \varepsilon. \quad (37)$$

В результате вычисляется набор искомых дискретных задержек для каждого момента времени  $t_j$  в интервале времени от  $t_0$  до  $t_k$ :

$$\tau = [\tau_i(t_j) + \tau_{rj}]. \quad (38)$$

Полученный ряд значений интерполируется полиномом 3-ей степени (11).

### 5.3.2. Расчет частоты

Коррекция по частоте осуществляется введением в принятый сигнал фазового множителя, зависящего от времени

$$\phi_G[T] = 2\pi T(f_{op} - F_d), \quad (39)$$

где  $F_{sf}$  – известная частота гетеродинов в приёмном пункте,  $T$  – время, отсчитываемое от начального момента обрабатываемого участка  $t_0$ ,  $f_{op}$  – постоянный сдвиг частоты, вводимый оператором,  $F_d$  – частота Допплера, обусловленная движением объекта относительно приёмного пункта, которая пропорциональна скорости изменения пространственной задержки:

$$F_d = F_0 \frac{\partial \tau}{\partial t}. \quad (40)$$

Используя коэффициенты полинома, полученные при расчёте задержки, запишем выражение для частоты Допплера:

$$F_d[T] = F_0(A_1 + 2A_2T + 3A_3T^2). \quad (41)$$

Для введения коррекции в принятый сигнал в центре обработки формируется дискретный цифровой сигнал вида

в) сопровождение управляющим файлом – файлом с именем, идентичным имени файла данных, но с расширением \*.sch, содержащий управляющую и дополнительную информацию.

Выходные данные коррелятора должны располагаться в базе данных. Предложения по организации базы данных описаны в **Приложении 1**.

#### 4.2.1. Формат имени файла

Имена файлов данных должны быть аналогичны формату имен входных файлов (см. п. 4.1.2.) и содержать следующую информацию, например:

IP\_DOY-ЧЧММСС\_X.DAT,

где IP – идентификатор РСДБ-пункта (см. п. 5.4); DOY – номер дня от начала года; ЧЧММСС – момент начала записи: соответственно часы, минуты и секунды;

Обозначение «\_X» может принимать следующие значения:

- «\_1» – файл является входной информацией с терминала.;
- «\_A» – файл выдан Блоком А;
- «\_B» – файл выдан Блоком В;
- «\_C» – файл выдан Блоком С;
- «\_D» – файл выдан Блоком D.

#### 4.2.2. Формат файлов сопровождающей информации

Файл сопровождающей информации имеет то же имя, что и файл информации, и является файлом, через который передаются необходимые параметры для следующего блока, и файлом, который управляют работой текущего блока.

Работа осуществляется следующим образом: вызывается программа Блока А, которая открывает файл с именем, идентичным имени входного файла, но с расширением SCH, извлекает из него необходимую информацию, выполняет свою функцию, добавляет (при необходимости) новую информацию, закрывает все файлы и покидает память. На выходе Блока А файл сопровождающей информации, изменённый Блоком А, переименовывается в файл с тем же именем, но с меткой \_A.SCH. После этого вызывается программа Блока В и т.д..

Файл сопровождающей информации представляет собой файл в ASCII кодах, который содержит строки следующего формата:

«0| T 10 20 P </p>»,

где 0| – идентификатор параметра (два первых символа строки и пробел),

T 10 20 P – значение параметра или нескольких параметров через пробел,

</p> – конец строки.

Формат файлов данных в отдельных блоках приведён в *Приложении 2*.

## 5. Алгоритмы расчетов исходных значений (задержки и частоты интерференции) для коррекции сигналов при первичной обработке РСДБ-данных

### 5.1. Алгоритмы расчетов параметров обработки при приеме сигналов удаленных космических радиисточников

#### 5.1.1. Расчет задержки

##### 1) Первый вариант

Зависимость задержки от времени  $T$ , отсчитываемого от начального момента обрабатываемого участка  $t_0$ , при наблюдении удаленного космического радиисточника двухэлементным интерферометром с базой  $\mathbf{B}$  задаётся следующей моделью (см. например [1, 2]):

$$\tau[T] = \frac{1}{c} (B_X \cos \delta \cos h[T] + B_Y \cos \delta \sin h[T] + B_Z \sin \delta) + \Delta t_{on} + \Delta t, \quad (9)$$

где часовой угол источника описывается выражением

$$h[T] = \alpha - S_0 - \Omega(t_0 + \Delta T + T), \quad (10)$$

$c = 2.99792458 \cdot 10^8$  (м/с) – скорость света,

$B_X, B_Y, B_Z$  (м) – проекции базовой линии в правой декартовой геоцентрической системе координат. Ось  $X$  лежит в плоскости экватора и направлена на меридиан Гринвича, ось  $Z$  направлена к северному полюсу мира, ось  $Y$  дополняет систему до правой [3];

$\alpha$  и  $\delta$  (рад) – экваториальные координаты космического источника на дату сеанса (подробный расчет приведен в [4]);

$S_0$  (рад) – истинное звездное время в  $0^h$  UTC даты наблюдений (подробный расчет приведен в [4]);

$\Omega = 7.292115 \cdot 10^{-5}$  (рад/с) – угловая скорость вращения Земли;

$t_0$  (с) – момент начала обрабатываемого участка записи;

$\Delta T$  (с) – поправка времени на дату скана, данное значение берется из таблицы сопровождающей информации;

$\Delta t_{on}$  (с) – дополнительный временной сдвиг, задаваемый оператором;

$\Delta t$  (с) – смещение шкалы времени в каждом приёмном пункте из таблицы сопровождающей информации.

Рассмотрим вариант обработки, при котором производится взаимная корреляция двух сигналов: сигнала, отражённого от КО и принятого в одном пункте РСДБ, и сигнала передатчика. Задержка включает в себя временные сдвиги, возникающие между излучённым и принятым сигналом на трассе "передатчик – КО – приёмник":

$$\tau = \tau_r + \tau_i, \quad (30)$$

где:

$$\tau_r = \frac{1}{c} \rho_r \quad (31)$$

– время распространения сигнала от передатчика до облучаемого КО,

$$\tau_i = \frac{1}{c} \rho_i \quad (32)$$

– время распространения сигнала от КО до  $i$ -го приёмного РСДБ-пункта.

В соотношениях (30)–(32)  $c$  – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме,  $\rho_r$  – расстояние от передающего пункта до центра КО,  $\rho_i$  – расстояние от  $i$ -го приёмного пункта до центра КО.

Исходными данными для расчёта являются следующие параметры:

$t_0, t_k$  – начальный и конечный моменты времени сеанса приёма отражённого излучения в данном приёмном пункте;

$\rho_r[t_j]$  – ряд значений видимого расстояния от передающего пункта до КО в дискретные моменты времени  $t_j$  (например, через 1 мин) на весь сеанс приёма ( $j$  – номер момента времени);

$\rho_i[t_j]$  – ряд значений видимого расстояния от приёмного пункта до КО в дискретные моменты времени.

Исходные ряды видимых расстояний  $\rho_r[t_j]$  и  $\rho_i[t_j]$  методом наименьших квадратов интерполируются полиномами третьей степени вида

$$P[T] = P_0 + P_1 T + P_2 T^2 + P_3 T^3. \quad (33)$$

Результатом интерполяции являются функции, описывающие изменение во времени расстояния от передающего пункта до КО и расстояния от КО до приёмных пунктов.

Для каждого дискретного момента времени  $t_j$  определяется задержка распространения сигнала от КО до  $i$ -го приёмного пункта:

где величина  $\varepsilon$  не должна превышать сотой доли дискрета, так при  $F_s = 4 \text{ МГц}$  величина  $\varepsilon = 10^{-9}$  с.

Задержка представляется в виде полинома третьей степени (11), коэффициенты которого  $A_0, A_1, A_2, A_3$  определяются путём интерполяции методом наименьших квадратов предварительно вычисленного ряда значений  $\tau_j$  в равноотстоящих моментах времени на всю длительность интервала обработки  $T$ .

### 5.2.2. Расчет частоты

Вращение Земли и движение космического аппарата относительно приёмных антенн интерферометра приводит к изменению частоты сигнала на трассах распространения излучения. Для компенсации изменения разности частотных сдвигов в один из сигналов вводится фазовый член, зависящий от времени

$$\phi_G[T] = 2\pi T(f_{op} - F_d), \quad (26)$$

где  $F_d$  – сдвиг частоты Доплера, который пропорционален скорости изменения пространственной задержки:

$$F_d = F_0 \frac{\partial \tau}{\partial t}, \quad (27)$$

$F_0$  – средняя частота полосы частот излучения, исходящего от космического объекта.

Используем коэффициенты полинома, полученные при расчёте задержки в п. 5.2.1. и запишем выражение для частоты Доплера:

$$F_d[T] = F_0(A_1 + 2A_2T + 3A_3T^2). \quad (28)$$

Для введения коррекции в принятый сигнал в центре обработки формируется дискретный цифровой сигнал вида

$$S_{cor} = \exp\{-2\pi T\phi_G[T]\}, \quad (29)$$

на который умножается принятый сигнал.

## 5.3. Алгоритм расчетов параметров обработки в экспериментах по локации

### 5.3.1. Расчет задержки

Рассмотрим модель задержки в эксперименте по локации космического объекта (КО) монохроматическим сигналом, полагая, что отражение происходит в одной точке, располагающейся в центре масс объекта, и можно пренебречь набегом фазы за счёт размера отражающей области.

Квадратными скобками в выражении (9) и далее обозначена зависимость величины от времени.

### 2) Второй вариант

Зависимость задержки от времени  $T$ , отсчитываемого от начального момента обрабатываемого участка  $t_0$ , при наблюдении радиоисточника двухэлементным интерферометром с базой  $B$  рассчитывается в форме полинома третьей степени:

$$\tau[T] = A_0 + A_1T + A_2T^2 + A_3T^3. \quad (11)$$

Коэффициенты полинома в (11) рассчитываются по специальным алгоритмам, выбор которых определяется предварительной моделью движения объекта. Ниже приведены выражения для коэффициентов полинома при наблюдении удалённого космического источника:

$$A_0 = \frac{1}{c}[B_X \cos \delta \cos h + B_Y \cos \delta \sin h + B_Z \sin \delta] + \Delta t_{on} + \Delta t, \quad (12)$$

$$A_1 = \frac{\Omega}{c} \cos \delta [B_X \sin h - B_Y \cos h] + \gamma_2 - \gamma_1, \quad (13)$$

$$A_2 = -\frac{\Omega^2}{c} \cos \delta [B_X \cos h + B_Y \sin h], \quad (14)$$

$$A_3 = \frac{\Omega^3}{c} \cos \delta [-B_X \sin h + B_Y \cos h], \quad (15)$$

где  $\gamma_1, \gamma_2$  (с/с) – скорость рассинхронизации шкалы времени в первом (опорном) и втором приёмных пунктах из таблицы сопровождающей информации.

Коэффициенты имеют следующие размерности:  $A_0$  [с],  $A_1$  [с/с],  $A_2$  [с/с<sup>2</sup>],  $A_3$  [с/с<sup>3</sup>]. Коэффициенты полинома являются основным результатом вычислений и передаются в коррелятор для выполнения частотной коррекции сигнала.

Обычно выделяют постоянную часть задержки  $\tau_N = \tau[0]$  и переменную часть, зависящую от времени. Одновременно выполняется сдвиг потока на постоянное значение задержки и коррекция потока на переменную часть задержки способом, описанным в п.3.3.1.

При поиске номеров отсчётов, в которых осуществляется коррекция значений потока, расчёт задержки  $\tau[T]$  осуществляется с шагом по времени, не превышающим половину интервала, на котором задержка изменяется на дискрет:

$$dt_s \leq \frac{1}{2A_1F_s}. \quad (16)$$

### 5.1.2. Расчет частоты

Коррекция по частоте направлена на компенсацию доплеровского сдвига, возникающего из-за вращения Земли (частоты интерференции). Коррекция осуществляется введением в сигнал фазового множителя

$$\phi_G [T] = 2\pi T (f_{op} - F_u), \quad (17)$$

где

$$F_u = \frac{\omega_u}{2\pi} = F_0 \left( \frac{\partial \tau}{\partial t} \Big|_{t_0} \right) \quad (18)$$

– частота интерференции,  $F_0$  – частота приёма, которая берётся из таблицы сопровождающей информации,  $f_{op}$  – постоянный сдвиг частоты, вводимый оператором для компенсации разности частот первого гетеродина в двух приёмных пунктах, указанный в протоколах измерений,  $\frac{\partial \tau}{\partial t} \Big|_{t_0}$  – скорость изменения задержки в начальный момент участка обработки.

Запишем фазовый множитель в виде

$$\begin{aligned} \phi_G [T] = & \frac{4\pi}{c} F_{g_1} \cos \delta \cdot \left( \frac{\Omega T}{2} \right) (B_X \sin h - B_Y \cos h) + \\ & + 2\pi f_{on} T + \frac{\pi}{2} \sum_k I[T - T_k] - 2\pi (F_{g_2} - F_{g_1}) T, \end{aligned} \quad (19)$$

где  $f_{on}$  – постоянный сдвиг частоты, вводимый оператором (см. 5.4.4.1);

$I[T - T_k]$  – ступенчатая функция вида

$$I[T - T_k] = \begin{cases} 1, & \text{если } T \geq T_k \\ 0, & \text{если } T < T_k \end{cases}, \quad (20)$$

где  $T_k$  – момент введения сдвига по задержке в один из сигналов. Слагаемое, содержащее ступенчатую функцию, вводится для того, чтобы учитывать, что при введении коррекции задержки, одновременно необходимо выполнять смещение частоты (полагая, что частота является производной от задержки по времени).

## 5.2. Алгоритмы расчетов параметров обработки при приеме сигналов от космических объектов, находящихся в околоземном космическом пространстве

### 5.2.1. Расчет задержки

При выполнении корреляционной обработки необходимо компенсировать разность времён распространения излучения от

космического объекта (КО) до приёмных пунктов интерферометра путем внесения задержки в один из сигналов. Для этого предварительно рассчитывается зависимость задержки от времени.

Информативные сигналы, поступающие на коррелятор, рассинхронизированы на величину

$$\tau_{cor} [T] = \tau [T] + \Delta t, \quad (21)$$

где  $\tau$  – геометрическая задержка между принятыми сигналами,  $T$  – время, отсчитываемое от начального момента обрабатываемого участка  $t_0$ ,  $\Delta t = \Delta t_2 - \Delta t_1 + \Delta t_{op}$  – рассинхронизация местных шкал времени в начальный момент обрабатываемого участка записи,  $\Delta t_1, \Delta t_2$  – смещение шкалы времени в первом (опорном) и втором приёмных пунктах,  $\Delta t_{op}$  – дополнительный временной сдвиг, задаваемый оператором.

Опишем порядок вычисления задержки, который может применяться в общем случае – как при приёме сигналов, излучаемых космическими аппаратами, так и сигналов, отраженных от объектов в ближнем космосе (объектов космического мусора, астероидов, планет земной группы).

В экспериментах по приёму сигналов двухэлементным интерферометром вычисление задержки выполняется из известных расстояний  $\rho_1$  и  $\rho_2$  до космического объекта (КО), заданных с точностью до 1 метра на каждую  $j$ -ую минуту интервала обработки.

Для каждой минуты скана вычисляется разность расстояний  $\Delta \rho = \rho_1 - \rho_2$  от КО до антенн. Полученный ряд методом наименьших квадратов интерполируется полиномом третьей степени вида

$$\Delta \rho [T] = P_0 + P_1 T + P_2 T^2 + P_3 T^3. \quad (22)$$

Определяется задержка распространения сигнала от КО до приёмного пункта путём решения последовательными приближениями следующего уравнения:

$$\tau_j^{(k)} = \frac{1}{c} \Delta \rho [t_j + \tau_j^{(k-1)}], \quad (23)$$

где  $k$  – номер шага вычислений.

На первом шаге ( $k = 1$ ) принимается

$$\tau_j^{(0)} = \frac{1}{c} \Delta \rho [t_j] \quad (24)$$

Итерации производятся до выполнения условия:

$$\left| \tau_{1j}^{(k)} - \tau_{1j}^{(k-1)} \right| \leq \varepsilon, \quad (25)$$