Влияние и учет неустановленных элементов главного зеркала антенны РАТАН-600 при определении плотностей потоков дискретных радиоисточников

А.М.Боташев, Г.В.Жеканис, Е.К.Майорова, М.Г.Мингалиев

В данной работе описывается архив нового поколения *АСУ* антенной *РАТАН-600* и методика учета неустановленных элементов с использованием данных из файла результатов установки антенны. Рассмотрены примеры пересчета антенных температур некоторых радиоисточников с учетом невыставленных элементов Северного сектора антенны.

Расчеты показывают что, учет таких элементов повышает точность определения плотностей потоков исследуемых объектов.

1. Введение

Естественным желанием любого экспериментатора является получение значений измеряемых величин как можно с большей точностью. Повышение точности определения плотностей потоков в радиоастрономии кроме повышения точности определения физических параметров исследуемых объектов позволяет ставить новые типы задач, например, таких как исследование переменности на разных временны́х масштабах. Напомним вкратце основные факторы, ограничивающие точность определения плотностей потоков:

- точность установки элементов главного зеркала антенны;
- точность установки вторичного зеркала в расчетный фокус;
- отношение "сигнал/шум";
- стабильность приемной системы (усиление приемников, калибровочных сигналов и т.д.);

- точность методов обработки наблюдений, к примеру, в нашем случае - точность выделения уровня "нуля" и аппроксимация кривой прохождения гауссианой;
- поглощение в атмосфере;
- внешние помехи.

Чаще всего бывает очень трудно или практически невозможно разделить вклад каждого из вышеуказанных факторов. Их вклад в разных частотных диапазонах обычно неодинаков, поэтому выписанная здесь очередность не отражает степени их важности. Однако, как бы не было трудно разделить вклад разных факторов, уменьшение влияния любого из них приводит к улучшению результирующей точности. Проблемам исследования влияния установки главного зеркала радиотелескопа *РАТАН-600* и посвящена настоящая работа.

Модернизация в 1988−1994 годах автоматизированной системы управления *(АСУ)* главным отражателем радиотелескопа *РАТАН-600*, появление в обсерватории вычислительной техники с достаточно высоким объемом и скоростью работы носителей информации, создание развитой локальной вычислительной сети позволили решить проблему сбора и архивизации расписаний наблюдений и результатов установки антенны, а также достаточно быстрого и независимого использования данных, поступающих от *АСУ* антенной радиотелескопа широким кругом пользователей обсерватории [1].

На сегодня сформировались три крупные области использования архива *АСУ* антенной:

- повышение достоверности проводимых на радиотелескопе научных экспериментов, за счет учета ошибок обусловленных установкой главного зеркала;
- анализ технического состояния радиотелескопа в разнообразных направлениях: от организационных до тонких технических структур.
- совершенствование эргономики инструмента по отношению ко всем его пользователям и службам.

2. Архив АСУ антенной

В данный момент архив расписаний наблюдений (использующих модернизированную *АСУ* антенной) и архив результатов выполнения этих расписаний располагаются на сервере *"ns.ratan.sao.ru"* в справочнике *"/users/ant/List"* и *"/users/ant/Result"* соответственно.

Файлы расписаний и результатов хранятся в текстовом формате. Для каждого "сета" наблюдений они имеют одинаковые базовые имена, формируемые согласно следующему правилу: первый символ - младшая цифра года; второй символ - месяц (от 1 до c - по шестнадцатеричной системе); два символа - день месяца начала сета наблюдений; от одного до трех авторских символов идентификации расписания, необходимых для исключения перекрытия по именам файлов при одновременной постановке двух и более расписаний. Имя файла расписания имеет расширение *".lst"*, а файла результата *".res"*.

По истечению каждого квартала для экономии дискового пространства указанные файлы переписываются в компрессированные *"tar"*- архивы с именами включающими четырех - символьное значение года и номер квартала.

Внутреннее устройства файла расписания предельно просто. Он содержит в себе набор таблиц, разбитых по датам, и информацию о: именах наблюдаемых источников; декретном и звездном времени наблюдения; высоте источника над горизонтом и фокусе вторичного зеркала; имя файла установки антенны и декретное время начала установки. Этот файл пригоден для просмотра на терминале и для его вывода на принтер.

Файл результатов установки антенны имеет более сложную форму, модифицируемую относительно отдельных установок антенны в зависимости от возникающих в процессе управления ситуаций. Однако он также пригоден для просмотра, вывода на печать и для дальнейшей, возможно весьма сложной обработки.

В качестве примера, ниже приводиться выдержка из реального существующего файла *"6c21a.res"*, отражающая основную структуру любого файла результатов:

======= Файл результата C210602.A
Комментарий .... 1147 + 245 Botashev
.... $h = 70:29:17$ $s = 11:50:10$ $f = 13046/3$

Режимы управления .... $posit1/SPOS/1/ERR/$узлы :$3, 4, 5$
Плановое начало установки ... 05 : 53 : 32 96.12.21
Последний запуск / запусков . 05 : 53 : 36/1
Завершение установки .... 05 : 58 : 48
Начало / конец наблюдения ... 06 : 01 : 55/06 : 07 : 54
Длительность установки ...... 0 : 08 : 23 / 0 : 05 : 29 / 0 : 05 : 12
Число элементов / отказов ... 225 / 2 / 0.9%
Отказавшие элементы 678 696a

$4a$	Причины ОТКАЗа	Уставка	Положение	Разница
$678R$	согл, полож.	36.2 225.2	340.04.6	+2167.8?
$678U$	нетДв.	143.6 135.4	120.8 34.2	+821.2
$678A$	ревДв.	87.4 271.8	87.4269.2	+2.6
$5a$	Причины ОТКАЗа	Уставка	Положение	Разница
$696A$	ревДв.	89.4 339.0	89.4 341.8	−2.8

======= Файл задания C221916.A
Комментарий .... 0108 + 388 Botashev
.... $h = 85 : 15 : 54$ $s = 01 : 11 : 28$ $f = 18725/0$
Режимы управления .... $posit1/SPOS/1/ERR/$узлы : $3, 4, 5$
Плановое начало установки ... 19 : 02 : 12 96.12.22
Начало / конец наблюдения ... 19 : 16 : 06 / 19 : 23 : 04
Длительность установки ...... 0 : 13 : 54 / 0 : 08 : 03
Число элементов 225
Глобальная ошибка .... установка не выполнялась !

Информация файла результата разбита на текстовые блоки. Каждый отдельный блок начинается одним из трех полей:
====== Файл задания",
====== Файл результата",
====== Файл предрезультата"
(последнего в примере нет). Данные поля указывают имя файла отдельной установки. Если установка не выполнялась или была сорвана по какой либо причине (погода, ремонтно- профилактические работы, прерывание), то файл будет озаглавлен как *====== Файл задания"* или *====== Файл предрезультата"* (в случае запуска установки, но неполучения действительного результата), а последнее поле блока - *"Глобальная ошибка"* будет содержать причину не установки антенны (по умолчанию *"установка не выполнялась !"*).

Поле *"Комментарий"* содержит краткую информацию о имени источника, имени наблюдателя, высоте и звездном времени прохождения расчетной координаты неба (источника) через диаграмму, фокус облучателя.

Поле *"Режимы управления"* содержит служебную информацию системы управления.

Ряд полей отведен под параметры *"времени/даты"*.

Поле *"Плановое начало установки"* содержит информацию о времени и дате планового запуска установки антенны.

Поле *"Последний запуск / запусков"*, имеется только в блоке полного результата или предрезультата и содержит информацию о действительном времени (возможно дате) последнего запуска антенны и общее число запусков на данную установку.

Поле *"Завершение установки"*, имеется только в блоке полного результата и содержит информацию о времени (возможно дате) завершения установки антенны.

Поле *"Начало / конец наблюдения"* содержит информацию о декретном времени начала и конца наблюдения (возможно даты).

Поле *"Длительность установки"* содержит информацию о двух-трех интервалах времени: первый - интервал времени выделенный на установку антенны, второй - расчетный интервал времени, третий - реальное время установки.

Поле *"Число элементов"* для блока невыполненной установки содержит информацию о числе используемых в установке элементов антенны, а поле *"Число элементов / отказов"* выполненного задания содержит дополнительную информацию о числе отказавших элементов при установке и процент отказов.

Поле *"Отказавшие элементы"* содержит список отказавших элементов, возможно с буквенным обозначением отказавших координат *(rua)*. Данное поле и следующая за ним табличная информация, детализирующая причину отказа по каждой отдельно взятой координате будет отсутствовать в случае отсутствия каких-либо отказов в отдельной установке.

3. Наблюдения и обработка.

Для исследования влияния невыставленных щитов на антенную температуру наблюдаемых источников было выбрано несколько мощных не переменных, точечных радиоисточников из двух сетов наблюдении.

Наблюдения проводились на шести длинах волн в диапазоне 31, 13, 7.6, 3.9, 2.7 и 1.38 см на Северном секторе радиотелескопа *РАТАН-600* в период с 15 по 27 сентября (1-ый сет) и с 6 по 30 декабря (2-ой сет) 1996 года. Использовался комплекс широкополосных радиометров сплошного спектра [2], установленный на первом Облучателе. Горизонтальное размещение входных рупоров вдоль фокальной линии вторичного зеркала и наблюдения в меридиане позволяют получить отклик на прохождение источника на всех волнах за несколько минут благодаря вращению Земли при неподвижной диаграмме направленности антенны.

Обработка проводилась в пакете программ *fgr - версия 2.3* в оболочке X-window под ОС UNIX [3]. Анализ параметров источников проводился с помощью Гаусс-анализа [4]. Статистические расчеты проведены с помощью математического пакета программ *MicroCal Origin* версия 3.0 под операционной системой *Windows 95.*

В настоящей работе приведены расчеты только для двух длин волн 2.7 и 7.6 см. Выбор именно этих длин волн обусловлен тем, что на этих длинах волн наилучшее отношение *"сигнал/шум"*, а также эти каналы менее подвержены внешним помехам (автомобильные, индустральные и др.).

4. Методика учета выпавших элементов главного зеркала антенны.

Как известно, уравнение антенного сглаживания, связывающее антенную и яркостную температуру источника в случае, когда угловые размеры источника много меньше ширины диаграммы направленности антенны приводит к следующему соотношению антенной температуры T_a и плотности потока P наблюдаемого источника [5]:

$$T_a = \frac{P S_{\text{эфф}}}{2k} \quad ,$$

где

$S_{\text{эфф}}$ - эффективная площадь антенны.

Эффективная площадь антенны в свою очередь связана с телесным углом антенны Ω_a известным соотношением

$$S_{\text{эфф}} = \frac{\lambda^2}{\Omega_a} = \frac{\lambda^2}{\int\limits_{4\pi} A \, d\Omega} \quad ,$$

где

A - диаграмма направленности антенны *(ДН).*

Следствием невыставления отдельных щитов будет изменение формы *ДН*, приводящее к увеличению ее боковых лепестков и снижению максимума, а также энергетические потери, связанные с рассеиванием энергии на невыставленных щитах.

Для оценки снижения T_a наблюдаемого источника при невыставлении отдельных щитов в заданное положение применялся энергетический подход.

Оценивалось изменение эффективной площади, которую можно представить в следующем виде [6]:

$$S_{\text{эфф}} = S_r \cdot \eta_n \cdot \eta_a \quad ,$$

где

S_r - геометрическая площадь раскрыва апертуры антенны,

η_n - коэффициент перископической системы антенны,

η_a - апертурный коэффициент использования.

Коэффициенты η_n и η_a определяются из следующих соотношении:

$$\eta_n = \frac{\int\limits_{S_a} \left| E_a \right|^2 dS_a}{\int\limits_{S_b} \left| E_b \right|^2 dS_b} \quad ,$$

$$\eta_a = \frac{\left| \int\limits_{S_a} E_a \, dS_a \right|^2}{S_r \cdot \int\limits_{S_a} \left| E_a \right|^2 dS_a} \quad .$$

где

E_a - распределение поля на раскрыве главного зеркала.

E_b - распределение поля на раскрыве вторичного зеркала.

Расчитывался коэффициент K_{cor}, учитывающий изменения эффективной площади при невыставлении отдельных щитов

$$K_{cor} = \frac{S_{\text{эфф}}}{S^*_{\text{эфф}}} \quad ,$$

где

$S_{\text{эфф}}$ - эффективная площадь антенны с невыставленными щитами,

$S^*_{\text{эфф}}$ - эффективная площадь антенны, когда все щиты выставленны в заданное положение.

5. Результаты.

С введением в эсплуатацию нового поколения *АСУ РАТАН-600* (и новой программы регистрации наблюдений [7]) реализована точность единичного измерения плотности потока наблюдаемых объектов на коротких волнах, например на 2.7см, порядка $1.5-2\%$, что является улучшением точности таких измерений примерно в два раза.

Достижение такой высокой точности измерения плотностей потоков позволяет реализовывать на радиотелескопе задачи определения мгновенных спектров точечных объектов на новом качественном уровне [8]:

- исследование долговременной переменности радиоисточников;
- исследование кратковременной переменности радиоисточников (на масштабах дней).

Практика работы с описанным форматом данных файла результата показывает, что он удовлетворительно подходит для хранения, представления и дальнейшей его обработки.

Как показали расчеты коэффициент K_{cor} практический не зависит от длины волны для нашей антенной системы.

Для каждого источника из архива *АСУ* антенной берутся номера не установленных элементов главного зеркала. Номер элемента указывает его положение на раскрыве антенны. Далее по методике, описанной в предыдущем разделе, рассчитается K_{cor} и, умножая K_{cor} на антенную температуру источника T_a, получаем исправленную антенную температуру T_a^* источника. В таблице 1 приведен пример для источника *0149+218*.

Таблица 1.

Дата	отказавшие элементы	$K_{cor.}$	T_a(mK) $\lambda = 2.7$см	T^*_a(mK) $\lambda = 2.7$см	T_a(mK) $\lambda = 7.6$см	T^*_a(mK) $\lambda = 7.6$см
15.09.96	624a,597r,700u	0,969	426,74	440,39	476,64	491,89
16.09.96	624a,597r,700u	0,969	403,06	415,96	480,84	496,22
17.09.96	700u	0,995	-	-	490,28	492,74
18.09.96	700u	0,995	423,35	425,48	490,72	493,19
19.09.96	0	1	436,86	436,86	487,37	487,37
20.09.96	549u,626	0,978	428,66	438,30	486,92	497,87
21.09.96	493a,626	0,983	430,55	438,00	471,16	479,31
23.09.96	626	0,988	432,01	437,26	477,79	483,59
24.09.96	497,501u,626	0,978	427,29	436,90	455,85	466,10
25.09.96	497,626	0,983	429,35	436,78	471,08	479,23
26.09.96	497,624u,626	0,971	413,67	426,03	458,25	471,94
27.09.96	497,626	0,983	422,24	429,54	447,52	455,26
$\bar{T}_a$(mK)	-	-	424,89	432,86	474,54	482,89
σ(mK)	-	-	9,39	7,60	14,30	13,14
$\sigma_{\bar{T}_a}$(mK)	-	-	9,39	7,60	14,30	13,14
$\Delta\sigma_{\bar{T}_a}$(%)	-	-	0,67	0,53	0,87	0,79

Основной результат данной работы представлен в таблицах 2 и 3. В этих таблицах: *первая колонка* — название источника; *вторая колонка* — длина волны (длина волны, помеченная звездочкой, соответствует строке с исправленными значениями параметров); *третья колонка* — антенная температура на соответствующей длине волны; *четвертая*

Таблица 2.

Источник	λ(см)	$\bar{T}_a(mK)$	$\sigma(mK)$	$\sigma_{\bar{T}_a}(mK)$	$\Delta\sigma_{\bar{T}_a}(\%)$	N
0134+328	2.7	796,32	12,99	3,92	0,49	11
	2.7*	809,08	12,52	3,78	0,47	11
	7.6	3005,79	58,10	18,37	0,61	10
	7.6*	3058,72	54,06	17,09	0,56	10
0149+218	2.7	424,89	9,39	2,83	0,67	11
	2.7*	432,86	7,60	2,29	0,53	11
	7.6	474,54	14,30	4,13	0,87	12
	7.6*	482,89	13,14	3,79	0,79	12
0333+321	2.7	460,48	15,94	6,02	1,31	7
	2.7*	470,35	14,96	5,65	1,20	7
	7.6	794,99	14,31	4,31	0,54	11
	7.6*	808,77	13,76	4,15	0,51	11
0518+165	2.7	635,22	13,56	5,13	0,81	7
	2.7*	645,55	10,85	4,10	0,64	7
	7.6	1387,15	34,75	14,19	1,02	6
	7.6*	1406,17	33,13	13,52	0,96	6
0923+392	2.7	4355,20	157,20	49,71	1,14	10
	2.7*	4420,16	149,60	47,31	1,07	10
	7.6	3934,00	84,85	28,28	0,72	9
	7.6*	3989,47	83,01	27,67	0,69	9
1308+326	2.7	1053,09	32,17	10,17	0,97	10
	2.7*	1068,38	26,90	8,51	0,80	10
	7.6	1325,17	46,78	14,79	1,12	10
	7.6*	1344,33	38,43	12,15	0,90	10
1611+343	2.7	1371,39	36,09	11,41	0,83	10
	2.7*	1387,69	31,53	9,97	0,72	10
	7.6	1574,56	37,26	11,78	0,75	10
	7.6*	1593,34	34,40	10,88	0,68	10
2105+420	2.7	1998,04	35,32	10,20	0,51	12
	2.7*	2029,72	27,22	7,86	0,39	12
	7.6	2231,91	62,89	18,15	0,81	12
	7.6*	2267,18	53,54	15,45	0,68	12

Таблица 3.

Источник	λ(см)	$\bar{T}_a(mK)$	$\sigma(mK)$	$\sigma_{\bar{T}_a}(mK)$	$\Delta\sigma_{\bar{T}_a}(\%)$	N
0134+328	2.7	822,53	29,29	6,55	0,80	20
	2.7*	834,07	22,90	5,12	0,61	20
	7.6	2940,12	92,77	21,87	0,74	18
	7.6*	2975,89	82,70	19,49	0,65	18
0149+218	2.7	422,97	17,02	3,90	0,92	19
	2.7*	428,77	15,47	3,55	0,83	19
	7.6	448,78	11,62	2,74	0,61	18
	7.6*	453,85	9,93	2,34	0,52	18
0218+357	2.7	445,10	12,96	4,32	0,97	9
	2.7*	449,84	9,58	3,19	0,71	9
	7.6	614,71	8,90	2,81	0,46	10
	7.6*	620,68	8,39	2,65	0,43	10
0518+165	2.7	671,93	18,37	4,91	0,73	14
	2.7*	676,80	17,07	4,56	0,67	14
	7.6	1295,32	45,30	12,11	0,93	14
	7.6*	1304,74	44,38	11,86	0,91	14
1308+326	2.7	1000,73	39,82	9,96	0,99	16
	2.7*	1020,71	38,39	9,60	0,94	16
	7.6	1299,94	37,86	9,47	0,73	16
	7.6*	1321,70	34,06	8,51	0,64	16

колонка — средне квадратичная ошибка σ единичного измерения, определенная по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N}(T_{a_k} - \bar{T}_a)^2}{N-1}};$$

пятая колонка — среднеквадратичная ошибка среднего арифметического $\sigma_{\bar{T}_a}$ определяемая как

$$\sigma_{\bar{T}_a} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}};$$

шестая колонка— нормированная среднеквадратичная ошибка среднего арифметического $\sigma_{\bar{T}_a}$, выраженная в процентах т.е.

$$\Delta\sigma_{\bar{T}_a} = \frac{\sigma_{\bar{T}_a}}{\bar{T}_a} * 100\%;$$

седьмая колонка — количество наблюдений N данного источника.

Анализ Таблиц 2 и 3 показывает, что в каждом случае (для каждого наблюдавшегося объекта и на обоих длинах волн) происходит повышение точности измерений, т.е. происходит уменьшение как абсолютного значения ошибки единичного измерения $\sigma_{\bar{T}_a}$, так и его нормированного значения $\sigma_{\bar{T}_a}$. Следует отметить, что в рассмотренных здесь примерах наблюдений обычно количество отказов (не установленных элементов) было не более трех элементов. Естественно, можно ожидать, что описанный метод будет еще более эфективным при большем количестве не установленных элементов. К сожалению, такая ситуация, например, может иметь место при резких перепадах температуры окружающей среды. В настоящее время (в программах прецизионных измерений) обычно наблюдения, проведенные при количестве отказов более 5-7 элементов, просто не используются при анализе материала.

Таким образом, наличие обратной связи в новой $ACУ$, а именно информации о положении не установленных в расчетное положение элементов главного отражателя и их учет, позволяет уже на этапе обработки наблюдений уменьшить вклад ошибок измерения плотностей потоков, обусловленных установкой главного зеркала [8].

В дальнейшем планируется автоматизация этого процесса, т.е. написание программ выполняющих автоматическую выборку нужных параметров антенны из архива АСУ антенной, расчет K_{cor} и подключение их к служебным параметрам, хранимым в архиве совместно с исходными файлами наблюдений.

Приведенные в настоящей работе примеры наблюдений объектов взяты из программы исследования переменности внегалактических радиоисточников, которая проводится при частичной поддержке INTAS Grant No и NWO Grant No

Литература

1. Голубчин Г.С., Жеканис Г.В., Фурса В.И. Система управления главным отражателем радиотелескопа *РАТАН-600* третьего поколения. Тезисы докладов $XXVI$ радиоастрономической конференции, г. С.-Петербург, 1995, с.$402 - 403$.

2. Нижельский Н.А. Отчет САО – 1995. с.57-59. – САО, 1996.

3. Верходанов О.В. Итерактивная первичная графическая обработка одномерных векторов данных в оболочке X-window под ОС UNIX на *РАТАН-600*. Препринт *САО РАН* 106, с. 1-57, Н.-Архыз, 1995.

4. Иванов Л.Н. Алгоритм оптимального автоматического гаусс-анализа наблюдательных данных. Л., "Наука", 1979. Известия *САО* (Астрофиз. иссл.), 11, с.213 – 219.

5. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиометры и радиотелескопы. - "Наука", 1973.

6. Майорова Е.К. Кандидатская диссертация. - Ст. Зеленчукская, 1985.

7. Черненков В.Н. Кандидатская диссертация. - Н.-Архыз, 1996.

8. Жеканис Г.В., Боташев А.М., Мингалиев М.Г. Первый опыт эксплуатации нового поколения *АСУ РАТАН-600*. Тезисы докладов *XXVI* радиоастрономической конференции, г. С.-Петербург, 1995, с.374 – 375.