

ОБНАРУЖЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА ФОНЕ АППАРАТУРНЫХ ШУМОВ

А. Г. Горшков, О. И. Хромов

Рассмотрен метод оптимальной фильтрации и его реализация в режиме реального времени для обнаружения источников космического радиоизлучения в обзоре, проводимом на РАТАН-600. Приведены оценки точности координат и потоков обнаруживаемых источников. Исследована также полнота проводимого обзора.

A method of optimal filtering and the way it is realized in the real time regime for detection of cosmic radio sources in the survey made with the radio telescope RATAN-600 are considered. The estimates of the accuracy of coordinates and fluxes of the sources detected are presented. The survey efficiency is also studied.

С марта 1979 г. на южном секторе РАТАН-600 проводится обзор неба на частотах 8.87 и 14.1 ГГц. Для этой задачи в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга разработана и изготовлена приемная и регистрирующая аппаратура. Комплекс размещен в облучателе № 3 и включает в себя радиометры (их конструкция и технические характеристики приведены в [1]), систему сбора информации [2] и ЭВМ М-400.

Система сбора информации предназначена для хранения в двоичном коде выходных сигналов радиометров, текущего звездного времени и для передачи этой информации в ЭВМ. В ЭВМ поступающая информация обрабатывается в режиме реального времени и записывается на цифровой магнитофон (НМЛ).

В статье рассмотрен метод обработки поступающей информации и его реализации в режиме реального времени, а также дальнейшая обработка в режиме разделенного времени.

Обзоры проводятся для обнаружения в заданной области небесной сферы всех источников радиоизлучения с плотностью потока больше некоторой величины S_0 . Значение S_0 определяет полноту обзора и, в свою очередь, определяется параметрами радиотелескопа и методиками наблюдений и обработки.

РАТАН-600 — меридианный инструмент, и это определяет методику проведения обзора: диаграмма направленности радиотелескопа наводится на заданную высоту, и за сутки через нее проходят все источники, локализованные на этой высоте. Затем диаграмма смещается на угол, не больший, чем полуширина диаграммы в вертикальном сечении.

Ясно, что отклик от точечного источника на выходе радиометра повторяет форму диаграммы направленности. Кроме того, известно, что аппаратный шум является стационарным случайным процессом.

Из теории обнаружения следует, что в этом случае метод оптимальной фильтрации позволяет извлечь из исходных данных (в нашем случае из выходных шумов радиометра) всю доступную информацию о сигнале [3].

Метод оптимальной фильтрации в радиоастрономической практике впервые был применен Девисом при проведении обзора на 1.4 ГГц [4].

I. Оптимальное обнаружение сигнала заданной формы на фоне случайных шумов. Методы оптимальной фильтрации в настоящее время хорошо разработаны, поэтому будут приведены лишь основные положения

теории (с использованием подхода и формул, полученных в [3]), необходимые для получения вероятностных оценок, использующих в качестве параметров только характеристики радиотелескопа.

В качестве критерия обнаружения примем отношение правдоподобия $\Lambda = P(J/S)/P(J/O)$, где $P(J/S)$ и $P(J/O)$ — вероятность получения шумовой реализации $J(t)$ при наличии и отсутствии сигнала. При малых априорных вероятностях появления сигнала в $J(t)$ апостериорная вероятность пропорциональна Λ , поэтому Λ действительно является критерием обнаружения. Будем считать, что сигнал $S(t)$ присутствует в $J(t)$, если значение Λ больше некоторого Λ_n , в противном случае принимаем, что $J(t)$ — чисто шумовая реализация.

При переходе к плотности вероятности и аддитивности аппаратного шума и сигнала отношение правдоподобия приобретает вид

$$\Lambda = \frac{w_N(J-S)}{w_N(J)},$$

где $w_N(J-S) = w_N(J/S)$ (следствие аддитивности) и $w_N(J)$; N — мерное распределение плотности вероятности реализации.

Выходные шумы радиометров распределены по нормальному закону [5] и $w_N(J)$ описывается хорошо известным соотношением

$$w_N(J) = (2^N \pi^N [K])^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{g=1}^N \sum_{h=1}^N Q_{gh} J_g J_h \right\}.$$

Теперь Λ приобретает вид

$$\Lambda = \exp \left\{ \varphi - \frac{1}{2} \mu \right\}, \quad (1)$$

где $\varphi = \sum_{g=1}^N \sum_{h=1}^N Q_{gh} J_h S_g$ и $\mu = \sum_{g=1}^N \sum_{h=1}^N Q_{gh} S_g S_h$.

Если шум имеет ограниченный плоский спектр, то

$$\varphi = \frac{1}{\sigma_m^2} \sum_{g=1}^N J_g S_g \quad \text{и} \quad \mu = \frac{1}{\sigma_m^2} \sum_{g=1}^N S_g^2,$$

где σ_m^2 — дисперсия процесса $J(t)$.

Из (1) следует, что отношение правдоподобия — функция двух величин, причем μ зависит только от свойства шума (сигнал S всюду единичный), не зависит от конкретной реализации $J(t)$, может быть рассчитана заранее и является дисперсией процесса $\varphi(t)$. Следовательно, процесс $\varphi(t)$, являющийся функцией текущей реализации $J(t)$, отличается от Λ только на константу и может служить эквивалентным Λ критерием обнаружения.

Процедура обнаружения сигнала, таким образом, заключается в вычислении в каждый момент времени свертки выходного шума $J(t)$ с единичным откликом от сигнала $S(t)$, нормированной на дисперсию процесса $J(t)$:

$$\varphi(t) = \sigma_m^{-2} J S. \quad (2)$$

Если источник проходит через диаграмму, начиная с момента t_0 , в течение ΔT и если максимум $\varphi(t)$, достигаемый при $t_m = t_0 + \Delta T$, превышает некоторое наперед заданное значение φ_n , то сигнал считается обнаруженным. Значение $\varphi(t_m)$ определяет амплитуду сигнала и вероятность его присутствия в реализации $J(t)$, исчерпывая тем самым всю информацию о сигнале, заключенную в шумовой реализации. Поэтому ни один другой метод не может быть более мощным. То же самое относится и к другим критериям обнаружения, в частности к широко используемому критерию, основанному на вычислении суммы квадратов остаточных отклонений в ок-

рестности обнаруженного сигнала. В [6] показано, что указанный критерий не является более мощным и отказ от него позволяет упростить процедуру обнаружения.

Для обнаружения протяженных источников, отклик от которых сильно отличается от формы диаграммы, метод не является оптимальным. В таких случаях лучшие результаты могут быть получены при использовании методов, не требующих знания априорной информации о сигнале, например дисперсионного анализа. В проводимом обзоре ожидается, что подавляющее большинство источников будет иметь угловые размеры намного меньше, чем полуширина диаграммы в горизонтальном сечении. Следовательно, применение описанной методики обнаружения вполне оправдано для оперативной обработки результатов обзора.

Вероятность пропуска сигнала и ложного обнаружения. Значение φ_n однозначно определяет вероятность пропуска сигнала и ложного обнаружения, поэтому выбор φ_n зависит от целей эксперимента.

Условная вероятность пропуска сигнала есть

$$P_{\text{пр}} = P(\varphi < \varphi_n / S) = \int_{-\infty}^{\varphi_n} w_{\varphi}(\varphi / S) d\varphi,$$

а условная вероятность ложного обнаружения

$$P_{\text{л}} = P(\varphi > \varphi_n / 0) = \int_{\varphi_n}^{\infty} w_{\varphi}(\varphi / 0) d\varphi,$$

где $w_{\varphi}(\varphi / S)$ и $W_{\varphi}(\varphi / 0)$ — условные плотности вероятности значения φ при наличии и отсутствии сигнала в реализации $J(t)$. Поскольку (2) — линейное преобразование, то и реализация $\varphi(t)$ распределена по нормальному закону. В этом случае

$$P_{\text{пр}} = \frac{1}{2} [1 - \Phi(U)], \quad (3)$$

где $\Phi(U)$ — интеграл ошибок; $U = (\varphi_n - \mu) / (2\mu)^{1/2}$ [3].

Вероятность пропуска, определенная соотношением (3), может быть завышена, поскольку при ее выводе рассматривались значения φ только в точке локализации максимума сигнала. Шумы могут сдвинуть максимум в другую точку и, хотя $\varphi > \varphi_n$ будет достигаться в ней, сигнал считается, согласно (3), пропущенным. В [6] получена формула, точнее определяющая вероятность пропуска сигнала:

$$P_{\text{пр}}^* = 2P_{\text{пр}}(1 - P_{\text{м0}}) + P_{\text{пр}}P_{\text{м0}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{м0}}$ — вероятность достижения сигналом максимума именно в точке его локализации.

Вероятность $P_{\text{пр}}$ не зависит от вида аппаратной функции (формы диаграммы направленности) и определяется только амплитудой сигнала и значением φ_n . Вероятность ложного обнаружения зависит еще и от вида аппаратной функции и определяется, согласно [3], следующим образом:

$$P_{\text{л}} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\mu''(0)}{\mu} \right)^{1/2} \exp(-\varphi_n^2 / 2\mu),$$

где $\mu''(0)$ — вторая производная от автокорреляционной функции свертки $K_{\varphi}(\tau)$ при $\tau=0$. Поэтому при работе с поворотными антеннами можно найти оптимальный режим работы, минимизирующий $P_{\text{л}}$ при заданном времени наблюдений.

При проведении поисковых обзоров естественно выбирать φ_n , задаваясь количеством ложных обнаружений в заданный интервал времени (или интервалом между ними T_x). Тогда

$$\varphi_n = \left\{ -2\mu \ln \left[2\pi T_x^{-1/2} \left(-\frac{\mu}{\mu''(0)} \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

Для практических целей функция $\varphi(t)$ неудобна, поскольку дает значение принятой энергии сигнала, нормированное на σ_m^2 на выходе RC -фильтра радиометра. Поэтому введем функцию

$$F(t) = \varphi(t) / \sigma_m \mu, \quad (6)$$

которая является амплитудой сигнала, нормированной на σ_m . Дисперсией процесса $F(t)$ является

$$\sigma_F^2 = \sigma_m^{-2} \mu^{-1}.$$

При обработке данных используется именно $F(t)$, а величины F_n , T_x , P_{np} выражены через параметры радиотелескопа.

Для диаграмм вида $\exp(-k^2 t^2)$ и при использовании диаграммной модуляции для интервала между ложными обнаружениями получаем

$$\ln T_x = F_n^2 \left(\frac{\pi}{2} \right)^{1/2} K^{-1} - \ln(K/2\pi)$$

и для аргумента функции ошибок

$$U = 2^{-1/2} K^{-1} (2\pi)^{1/4} (F_n - F_0),$$

где F_0 — амплитуда сигнала, вероятность пропуска которого определяется.

В случае дискретного задания реализации, когда отсчеты сняты, в соответствии с теоремой Котельникова, через интервалы 2τ , где τ — постоянная RC -фильтра, можно записать:

$$F_i = \left(\sum_{j=1}^L J_{i-j} S_j \right) / \left(\sigma_m \sum_{j=1}^L S_j^2 \right); \quad (7)$$

$$\sigma_F^2 = \left(\sum_{j=1}^L S_j^2 \right)^{-1}; \quad U = 2^{-1/2} \sum_{j=1}^L S_j^2 (F_n - F_0); \quad (8)$$

$$\ln T_x = 2^{-1} F_n^2 \sum_{j=1}^L S_j^2 + \ln(\sqrt{2\pi} \sum_{j=1}^L S_j^2), \quad (9)$$

где L — число точек в диаграмме направленности; J_i — текущая точка реализации.

Соотношение (9) позволяет определить F_n , нормированное на σ_m , по заданному T_x .

Следует обратить внимание, что σ_m^2 , фигурирующая во всех формулах, является среднеквадратичным отклонением для генеральной совокупности. В действительности мы используем при оценках выборочное σ_{m*}^2 , которое тем больше может отличаться от σ_m^2 , чем больше априорная вероятность появления сигнала, чем больше его энергия и чем короче длина N используемой выборки. Ясно, что F_n , нормированное на σ_{m*} , будет поэтому отличаться от величины, определяемой соотношением (9), при заданном T_x . Новое пороговое значение можно определить, считая, что

$$\sigma_{m*}^2 \approx \sigma_m^2 + \sigma_{ист}^2,$$

где

$$\sigma_{ист}^2 = F_{ист} \sum_{j=1}^L S_j^2 N^{-1}, \quad (10)$$

а $F_{\text{ист}}$ — амплитуда источника, нормированная на $\sigma_{\text{ш}}^2$. Поэтому амплитуда этого же сигнала, нормированная на $\sigma_{\text{ш}^*}^2$, равна

$$F_{\text{обн}} = F_{\text{ист}} (1 + \sigma_{\text{ш}^*}^2)^{-1/2}, \quad (11)$$

т. е. амплитуда обнаруженного сигнала уменьшается и при $F_{\text{ист}} \rightarrow \infty$

$$F_{\text{обн}} \rightarrow (N / \sum S_j^2)^{1/2}.$$

Тем не менее использование выборочной дисперсии, определенной по короткому отрезку реализации, не уменьшает мощность метода, поскольку и для ложных сигналов появляется зависимость между F и $\sigma_{\text{ш}^*}^2$, приводящая к уменьшению амплитуды ложного сигнала. Таким образом, для практических целей используется величина F_n , определенная из соотношения (9) и пересчитанная по формулам (10), (11).

II. Реализация алгоритма в режиме реального времени. Обработка в режиме реального времени предполагает, что вычисления должны быть выполнены в интервале между поступлениями очередной информации. В нашем случае режим реального времени необходим для вычисления дисперсии процесса, свертки $F(t)$, поиска максимума $F(t)$, сравнения его с пороговым значением F_n и записи на НМЛ накопленной информации.

Для остальных операций, таких как печать данных об обнаруженном сигнале, вычисление амплитуды калибровочного сигнала, перевода координат с эпохи наблюдений на эпоху 1950.0, необходимо лишь, чтобы среднее время между обнаружениями сигнала превышало время, необходимое для их выполнения.

Алгоритм обнаружения определяется структурой приема информации и схематически изображен на рисунке.

Одновременная обработка и прием информации осуществляются при помощи приоритетных прерываний.

Через каждые 320 мс звездного времени с выхода системы сбора поступает информация в ЭВМ. Информация содержит данные о текущем коде звездного времени и шумах на выходах радиометров. Прием информации имеет наибольший приоритет, поэтому при поступлении сигнала готовности из системы сбора ЭВМ прекращает выполнение всех действий, не связанных с приемом и дешифрацией информации.

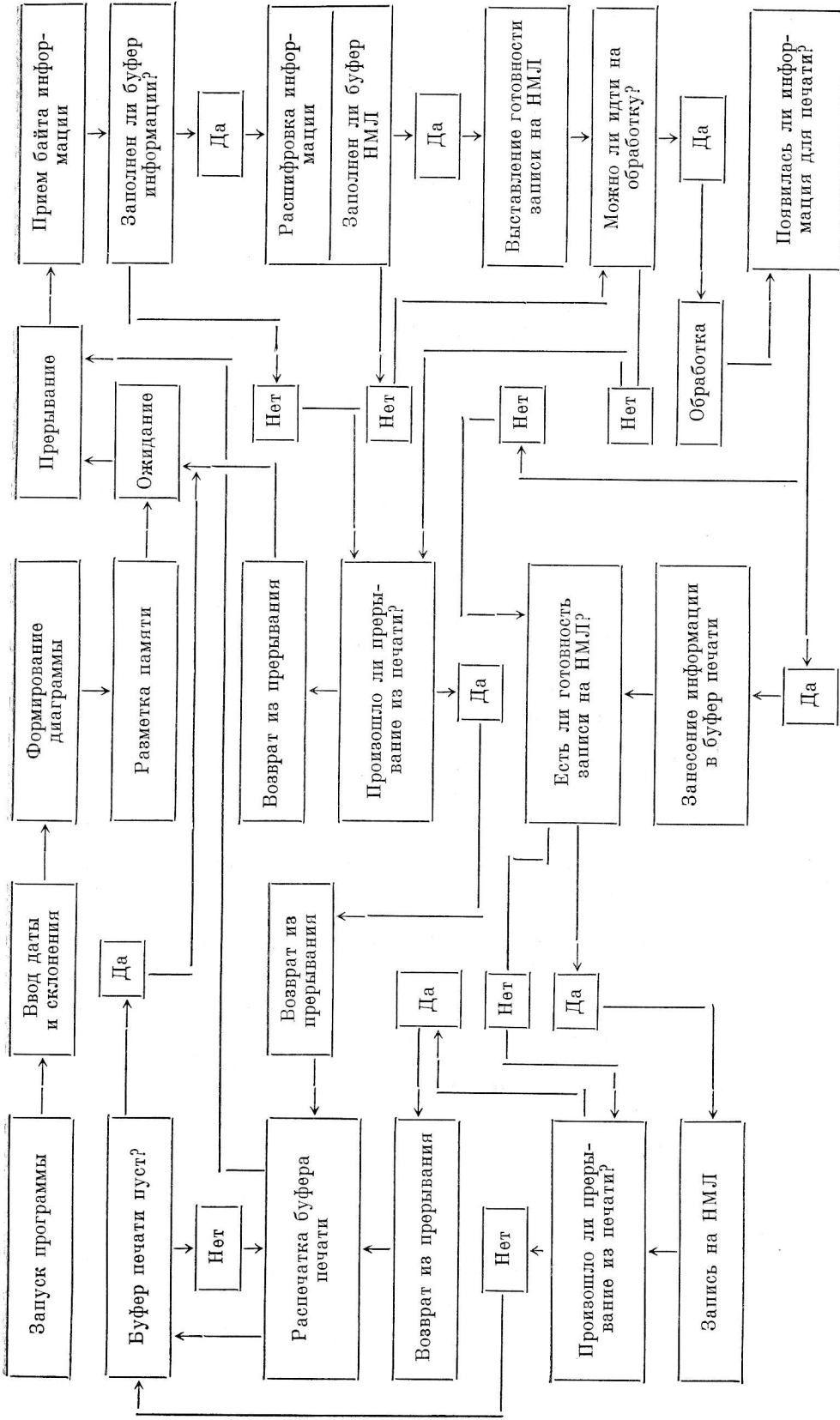
Следующий приоритет имеет подпрограмма оптимального фильтра, которая вычисляет $F(t)$ и $\sigma_{\text{ш}^*}^2$, ищет максимум $F(t)$, сравнивает его с F_n и в случае обнаружения источника заносит в буфер печати необходимую информацию.

Низший приоритет имеет программа обслуживания, которая вычисляет координаты обнаруженного источника, печатает его параметры и записывает накопленную информацию на НМЛ.

После запуска программа требует ввести с клавиатуры печатающего устройства дату наблюдения и склонения на эпоху наблюдения. Затем осуществляется поиск первой свободной зоны на НМЛ для записи получаемой информации. Последующие примерно 50 с производится заполнение информационных буферов памяти, с которыми в дальнейшем будет работать программа оптимального фильтра.

Ввод информации в ЭВМ производится побайтно. Для ввода очередного байта система сбора через каждые 10 мс после начала цикла передачи информации инициирует прерывание ЭВМ. За цикл вводится следующая информация: четыре байта звездного времени и по два байта с выхода каждого радиометра. Передача байта в ЭВМ занимает около 0.1 мс, т. е. общее время приема информации мало по сравнению с длиной цикла. Для опознания начала цикла при запуске программы и для контроля функционирования комплекса первый байт каждого цикла помечен «1» в старшем разряде, в остальных байтах цикла старший разряд содержит «0».

После заполнения буферов начинает работать программа оптимального фильтра. Поскольку в ней вычисляется свертка $F(t)$, то основное время



уходит на умножение чисел. ЭВМ М-400 не имеет блока расширенной арифметики, поэтому умножение осуществляется программным путем. Знание формата поступающей информации позволило написать специальную программу умножения целых чисел, которая работает в два раза быстрее стандартной. В результате информация с одного радиометра пропускается через фильтр за время, не превышающее 40 мс.

После перехода к программе обслуживания производится одно из следующих действий: а) запись на НМЛ; б) подготовка информации для печати; в) печать сообщения.

Для того чтобы информация об обнаруженных источниках обрабатывалась и печаталась подпрограммами обслуживания в порядке поступления, организуются буфера очереди. Вновь поступающая информация заносится в конец очереди. Такой буфер организуется для каждой подпрограммы обслуживания, за исключением подпрограммы записи на НМЛ, которая не обменивается информацией ни с одной другой подпрограммой. Как только буфер записи заполнится, произойдет запись буфера на НМЛ.

Сами подпрограммы обслуживания тоже выстроены в порядке очереди (имеют различный приоритет). Обрабатываемая информация по мере работы подпрограммы перемещается из начала ее очереди в конец очереди с более низким приоритетом. Подпрограмма с более высоким приоритетом продолжает работу до тех пор, пока не исчезнет ее буфер очереди. В конце концов информация попадает в буфер очереди подпрограммы печати, которая имеет самый низкий приоритет.

Как только будет распечатана вся информация из буфера очереди подпрограммы печати, ЭВМ перейдет в состояние ожидания, из которого ее выводит запрос, поступающий из системы сбора информации.

Из сказанного ясно, что буфера очереди в отдельные моменты могут расти, но если среднее время обнаружения больше времени, необходимого для обработки одного источника, то в конце концов все буфера исчезнут и затем, по мере поступления новой информации, опять будут заполняться. Тем самым никогда не произойдет нарушения режима реального времени.

Принцип построения программы обнаружения позволяет увеличивать количество обрабатываемых каналов путем добавления в каждую подпрограмму блока, аналогичного уже существующему, без изменения структуры алгоритма в целом.

III. Полнота обзора. В проводимом обзоре каждое склонение просматривается не менее трех раз. Ограниченные память и быстродействие ЭВМ М-400 не позволяют проводить в режиме реального времени обработку усредненных сканов с одним или близкими склонениями, поэтому приходится проводить поиск источника только на текущем скане. Обнаруженный сигнал считается реальным радиостанцией, если он обнаружен не менее двух раз на одном или соседних склонениях, причем прямое восхождение лежит в пределах ошибок. Принятый критерий реальности позволяет увеличить число ложных обнаружений на каждом скане, т. е. понизить F_n . Понижение F_n , в свою очередь, уменьшает предельно обнаружимый поток и увеличивает полноту обзора в целом.

Величина F_n выбрана таким образом, что на соседних склонениях в полосе, охватывающей два градуса по склонению, может быть не более одного совпадения координат от ложных открытий. В настоящем обзоре $\Sigma S^2 = 4.8$ и $F_n = 1.78$, нормированные на σ_m , удовлетворяют предъявленным требованиям. Кроме того, несмотря на значительное количество ложных обнаружений в течение суток (примерно 12), все совпадающие на одной высоте сигналы можно считать реальными радиостанциями. Для принятого критерия реальности дифференциальная полнота обзора может быть оценена в

$$P_D = (1 - P_{np})^2 (1 + 2P_{np}),$$

где P_{np} определено соотношением (3) или (4).

Интегральная полнота P_n определяется как отношение числа обнаруженных радиосточников к реально существующим с потоками больше заданного. Для статистики радиосточников вида

$$N(S > S_0) = K S_0^{-\alpha}$$

интегральная полнота определяется как

$$P_I = \alpha \Delta S S^\alpha \sum_{S=\infty}^{S_0} S^{-(\alpha+1)} (1 - P_D).$$

Интервал ΔS выбран таким образом, чтобы внутри интервала P_D мало менялось.

ТАБЛИЦА 1

Поток, мян	750	650	550	450	350	250
» , %	100	100	95	63	16	2
» , %	100	99.9	99	98	82	52
Теория	17	4	5.5	5.5	2.4	0.3
Обнаружено	19	5	5	4	3	0

В табл. 1 приведены интегральная и дифференциальная теоретическая полнота обзора для $F_n = 1.78$, а также ожидаемое число обнаруженных источников для области 0.16 стер при принятой плотности источников (60) с потоками больше ян. Там же приведены и реально обнаруженные в обзоре источники. Как и следует из теории, обзор полон для источников с потоками, не меньшими чем 0.45 ян.

IV. Ошибки определения потоков и координат радиосточников. Среднеквадратичная ошибка определения потока ΔS однократно обнаруженного источника определяется дисперсиями свертки и нестабильности калибровочного сигнала. Легко показать, используя правило переноса ошибок, что

$$\Delta S = n^{-1} \left(S_k^2 / \sum_j S_j^2 + 3S \sigma_k^2 / \sigma_m^2 \right), \quad (12)$$

где S и S_k — потоки обнаруженного радиосточника и калибровочного сигнала соответственно; n — амплитуда калибровочного сигнала, нормированная на σ_m^2 и σ_k^2 — дисперсия калибровки.

При многократных наблюдениях на одном склонении сигнал может быть обнаружен не на всех сканах. Тем не менее при определении потока нужно учитывать все проведенные наблюдения, иначе поток будет завышен. Следует отметить, что обнаружение сигнала по превышению F_n позволяет обнаруживать сигналы и с потоками ниже F_n . Оценка потоков основана на знании зависимости размаха выборки от числа испытаний. При этом поток оценивается как среднее по измеренным и рассчитанным данным.

Ошибка определения прямого восхождения при однократном прохождении источника через диаграмму вида $\exp(-k^2 t)$ и диаграммой модуляции равна [3]

$$\sigma_\alpha = 2^{-1/2} K^{-2} \left(\sum_{j=-L/2}^{L/2} j^2 t^{-2k^2 j^2} \right) F^{-1} \Delta T_D,$$

где ΔT_D — период дискретизации съема информации.

Дискретизация вносит дополнительную ошибку в определение положения. Для случайно расположенного во времени сигнала эта ошибка распределена равномерно внутри интервала ΔT_D , следовательно, ее дисперсия

$$\sigma_D^2 = (\Delta T_D)^2 / 12$$

ТАБЛИЦА 2

Поток, мян	750	650	550	450	350	250
» , мян	90	90	90	100	120	120
» , мс	100	120	140	180	340	450
» , мин дуги	1	1	2.5	3	6	6

и суммарная ошибка определения прямого восхождения равна

$$\Delta\alpha = (\sigma_a^2 + \sigma_b^2)^{1/2}.$$

При многократных наблюдениях одного и того же источника ошибка, вызываемая шумами, будет уменьшаться как $N^{-1/2}$, а σ_D будет оставаться постоянной.

Если источник обнаружен на двух и более склонениях, то его истинное склонение можно определить, проводя свертку измеренных потоков с сечениями диаграммы направленности в вертикальном сечении, и, перемещая максимум диаграммы по δ , минимизировать сумму квадратов остаточных уклонений. Аналогично можно полностью устранить влияние дискретизации и по прямому восхождению.

Ошибка определения склонения оценивается по формуле (12), где $\sigma_{ш}^2$ заменяется на $\overline{\Delta S^2}$, определяемую для данного источника.

Программа для определения потоков и координат источников по данным, полученным в результате обработки в режиме реального времени, реализована на языке АЛГОЛ-60.

В табл. 2 приведены ошибки измерения потоков, прямого восхождения и склонения радиоисточников, обнаруживаемых в настоящем обзоре на частоте 8.87 ГГц.

Список литературы

1. Амирханян В. Р., Конникова В. К., Лазуткин А. Н. Приемная аппаратура для проведения обзора неба на РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне длин волн. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1980, 12.
2. Ларионов М. Г., Никаноров А. С., Капусткин А. А., Хромов О. И. Система сбора и обработки радиообзоров на РАТАН-600. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1980, 12.
3. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М., «Сов. радио», 1962.
4. Davis M. M., A. J. 417 MHz search for radio sources having a flux excess at short wavelength. — VAN, 1967, 19, p. 201.
5. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М., «Наука», 1973.
6. Горшков А. Г. Кандидатская диссертация. 1977.