

Антенная решетка из активных элементов для радиоастрономии

А. А. Коноваленко, И. С. Фалькович, Н. Н. Калиниченко, А. А. Гридин,
И. Н. Бубнов, А. Лекашо¹, К. Розолен¹, Х. О. Рюкер²

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4
E-mail: akonov@ira.kharkov.ua, falk@ira.kharkov.ua, kalinich@ira.kharkov.ua*

*¹Парижская обсерватория, Медон, Франция
E-mail: alain.lecacheux@obspm.fr*

*²Институт космических исследований, Грац, Австрия
E-mail: helmut.rucker@oeaw.ac.at*

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2003 г.

Описаны результаты разработки эффективного широкополосного (10÷60 МГц) активного антенного элемента и антенной решетки из 30 таких элементов. Расчетным путем и экспериментально показано, что верхняя граничная рабочая частота активного элемента – не менее 60 МГц, динамический диапазон – 90 дБ, вклад собственного шума усилителя в антенную температуру галактического фона – около 10 %. Стоимость короткого (3 м) и тонкого диполя вместе со встроенным усилителем и металлоконструкцией не превышает 45 евро. Проведены испытания активного диполя в составе 30-элементной антенной решетки, имеющей конфигурацию, совпадающую с секцией радиотелескопа УТР-2, в котором применены пассивные диполи длиной 8.6 м и диаметром 1.8 м. Наблюдения спектра ионосферных мерцаний радиисточника ЗС461 показали близость чувствительности и помехоустойчивости обеих антенн, что доказывает перспективность использования короткого и дешевого активного диполя при разработке гигантского низкочастотного радиотелескопа нового поколения.

Описано результати розробки ефективного широкополосного (10÷60 МГц) активного антенного елемента і антенної решітки з 30 таких елементів. Розрахунки та експеримент показали, що верхня гранична робоча частота активного елемента – не менша ніж 60 МГц, динамічний діапазон – 90 дБ, внесок власного шуму підсилювача в антенну температуру галактичного фону – близько 10 %. Вартість короткого (3 м) та тонкого диполя разом з вмонтованим підсилювачем та металоконструкцією не перевищує 45 євро. Проведено випробування активного диполя у складі 30-елементної антенної решітки з конфігурацією, що збігається з секцією радіотелескопа УТР-2, в якому застосовано пасивні диполі довжиною 8.5 м і діаметром 1.8 м. Спостереження спектра іоносферних мерехтінгів радіоджерела ЗС461 показали близькі чутливість і перешкодостійкість обох антенн, що підтверджує перспективність використання короткого і дешевого активного диполя у розробці гігантського низькочастотного радіотелескопу нового покоління.

Введение

В последние годы интерес к низкочастотной радиоастрономии заметно вырос, в частности, в связи с планами создания гигантского радиотелескопа, предназначенного для работы на частотах ниже 200 МГц (проект LOFAR [1-4]). Концепция построения низкочастотных инструментов нового поколения широко обсуждалась во многих странах, рассматривались варианты разработки антенн как наземного, так и космического базирования. Одна из возможных реализаций этой концепции заключается в строительстве антенной решетки с рекордно большой эффективной площадью – более одного млн квадратных метров.

Для проверки путей построения подобного радиотелескопа в 2000 г. была разработана и сооружена новая широкополосная антенная решетка небольших размеров. Работа выполнена международным коллективом исследователей в рамках проекта INTAS 97-1964 “New frontiers in decameter radio astronomy”. Для удешевления конструкции в качестве элементов решетки было предложено использовать тонкие активные диполи длиной 3 м со встроенными усилителями.

Разработка и расчет малогабаритного активного диполя

Появление в 70-х годах прошлого века малошумящих транзисторов нового поколения стимулировало интенсивное развитие теории и практики малогабаритных активных антенн декаметрового и метрового диапазонов длин волн (см., например, [5-8]). Оказалось возможным существенно уменьшить размеры антенн при сохранении их высокой эффективности, которая, применительно к задачам радиосвязи, характеризовалась увеличением напряжения на входе низкоомного приемника по сравнению со случаем использования пассивных антенных элементов. Однако это еще не является свидетельством увеличения эффек-

тивности приемной системы, так как единственно верным в энергетическом смысле критерием является отношение сигнал/шум на выходе антенного усилителя.

В активных диполях собственные шумы усилителя в декаметровом диапазоне могут быть соизмеримы с внешними шумами (радиоизлучение Галактики). Это связано как с низким сопротивлением излучения электрически короткого диполя, так и с рассогласованием усилителя и диполя. Последнее приводит к сильной зависимости шумовой температуры усилителя T_{am} от частоты f при работе диполя в широком диапазоне частот, когда его выходной импеданс меняется от чисто емкостного до индуктивного с высоким значением активной составляющей.

При использовании короткого активного диполя в радиоастрономических целях его эффективность определяется прежде всего вкладом T_{am} в шумовую температуру системы $T_s = T_A + T_{am}$, ограничивающую максимально достижимую чувствительность при заданной антенной температуре T_A галактического фона. В случае идеального (нешумящего) усилителя $T_s = T_A$, поэтому хорошим результатом применения реального усилителя может считаться значение отношения $T_{am}/T_A \leq 0.1$, когда уменьшение T_s не превосходит 10 %. Второй существенный параметр, на который не всегда обращают внимание, – большой динамический диапазон усилителя, он необходим из-за высокого уровня помех искусственного происхождения на частотах ниже 100 МГц.

Таким образом, усилитель в составе активного диполя должен быть одновременно малошумящим, высоколинейным и обладать достаточно большим усилением, что плохо совместимо. Требование большого усиления означает пренебрежимо малый вклад в T_s шумов последующих устройств.

Еще одним элементом активного диполя является согласующий четырехполосник между диполем и усилителем. Полного согласования импедансов усилителя R_{am} и антенны Z_A в широкой полосе частот

добиться невозможно. Можно, однако, оптимизировать параметры согласующей цепи таким образом, чтобы с учетом известной частотной зависимости $T_A(f)$ и зависимости T_{am} от Z_A обеспечить значение $T_{am}/T_A \approx 0.1$ во всей рабочей полосе частот. Оптимизация заключается в преобразовании Z_A с помощью широкополосного трансформатора, к которому последовательно подключен фильтр нижних частот (ФНЧ), дополнительно трансформирующий Z_A и позволяющий уменьшить T_{am} в верхней половине частотного диапазона. Возможность уменьшения T_{am} связана с сильной зависимостью собственных шумов усилителя от импеданса источника сигнала: T_{am} меняется в несколько раз при переходе от режима холостого хода к короткому замыканию.

В описанных ниже расчетах и экспериментах для работы в диапазоне $10 \div 60$ МГц использован симметричный горизонтальный диполь длиной 3 м и диаметром 40 мм, размещенный на высоте $2.0 \div 3.5$ м над поверхностью земли с комплексной диэлектрической проницаемостью $\bar{\epsilon} = \epsilon - i60\sigma\lambda$, где ϵ и σ – диэлектрическая проницаемость и проводимость почвы, λ – длина волны. Параметры земли влияют на эффективность антенны, что определяет необходимость их контроля. В Радиоастрономическом институте НАН Украины (РИ НАНУ) разработана и внедрена методика [9] оперативного измерения ϵ и σ почвы, основанная на регистрации ослабления поля поверхностной волны на трех частотах в диапазоне $15 \div 50$ МГц. Возможно устранение (ослабление) влияния поверхности земли ее металлизацией или применением рефлекторов, однако это приводит к усложнению и удорожанию как отдельного элемента, так и антенной решетки в целом.

Принципиальная схема диполя с согласующим четырехполюсником приведена на рис. 1. Индуктивность $L \approx 4$ мкГн подбирается таким образом, чтобы на входе усилителя имел место режим холостого хода, который обеспечивает минимум T_{am} на частоте 15 МГц, где антенная температура

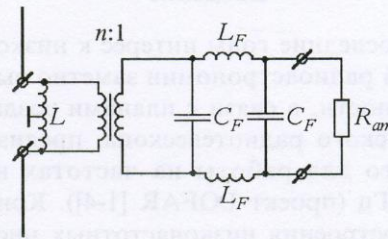


Рис. 1. Принципиальная схема диполя с согласующим четырехполюсником: $L = 4$ мкГн, $L_F = 0.06$ мкГн, $C_F = 12$ нФ, $R_{am} = 75$ Ом, $n = 4.5$

T_A резко уменьшается из-за уменьшения эффективности короткого диполя. Средняя точка индуктивности заземлена для обеспечения защиты от грозовых разрядов. Использование индуктивности L позволяет, как будет видно из результатов расчетов, дополнительно увеличить T_A в средней части диапазона. Между усилителем и диполем включены ФНЧ с частотой среза 75 МГц (характеристическое сопротивление 75 Ом) и трансформатор T_p с коэффициентом трансформации $n:1$ ($n = 4 \div 5$), функции которых описаны выше.

Усилитель выполнен по двухкаскадной двухтактной схеме, его принципиальная схема показана на рис. 2. Каждый каскад представляет собой схему с общей базой и бесшумной трансформаторной обратной связью. Принципы построения подобных усилителей описаны в [10]. В первом каскаде использован малошумящий транзистор с током коллектора $I_c = 10$ мА и шумовой температурой 100 К. Во втором каскаде для обеспечения высокого динамического диапазона по комбинациям третьего порядка (90 дБ относительно 1 мкВ) применен высоколинейный малошумящий транзистор с $I_c = 45$ мА. Двухтактное построение усилителя обеспечивает указанную величину динамического диапазона и по комбинациям второго порядка. Коэффициент передачи усилителя – 18 дБ, входное и выходное сопротивления – 75 Ом, КСВН входа

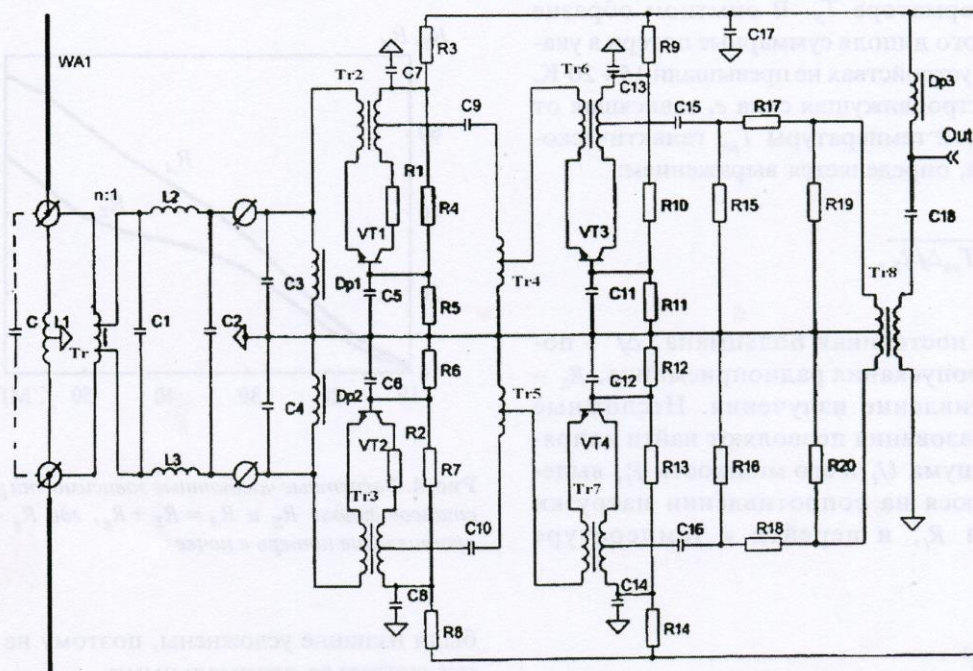


Рис. 2. Принципиальная схема антенного усилителя

и выхода – менее 1,3, рабочий диапазон частот – 3 ÷ 70 МГц.

Расчет антенной температуры галактического фона T_A на входе усилителя проводился применительно к схеме, изображенной на рис. 3. Для получения предварительных оценок величины T_A использовалась упрощенная эквивалентная схема

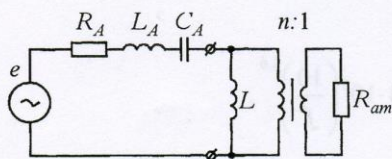


Рис. 3. Упрощенная эквивалентная схема диполя и согласующей цепи: $R_A = 3 \div 75$ Ом для $f = 10 \div 60$ МГц, $L_A = 0,8$ мкГн, $C_A = 15$ нФ, $L = 4$ мкГн, $R_{am} = 75$ Ом, $n = 4,5$

диполя, параметры которой L_A , C_A можно восстановить из измерений выходного импеданса диполя на нескольких частотах. Недостатком упрощенной схемы является заметная погрешность расчетов T_A в окрестности и выше частоты последовательного резонанса в эквивалентной цепи диполя. В свободном пространстве тонкий диполь длиной 3 м резонирует на частоте 50 МГц. В реальной конструкции частота резонанса понижается до 42 ÷ 43 МГц за счет влияния полупроводящей земли, величины зазора между плечами диполя и их конечной толщины. При необходимости можно использовать более точную эквивалентную схему диполя (см., например, [11]). Сопротивление нагрузки диполя составляло $R_l = nR_{am} = 300 \div 375$ Ом при $n = 4 \div 5$ и $R_{am} = 75$ Ом. Здесь учтено, что входное сопротивление согласованного ФНЧ равно $R_{am} = 75$ Ом. В расчетах предполагалось отсутствие потерь в ФНЧ и

трансформаторе T_p . В опытном образце активного диполя суммарные потери в указанных устройствах не превышали $15 \div 20$ К.

Электродвижущая сила e , зависящая от яркостной температуры T_{ph} галактического фона, определяется выражением:

$$e = \sqrt{4kT_{ph}\Delta f R_{\Sigma}},$$

где k – постоянная Больцмана, Δf – полоса пропускания радиоприемника, R_{Σ} – сопротивление излучения. Несложные преобразования позволяют найти напряжение шума U_l и его мощность P_l , выделяющуюся на сопротивлении нагрузки диполя R_l , и перейти к температуре шума:

$$P_l = \frac{|U_l|^2}{R_l} \equiv kT_A \Delta f,$$

где

$$T_A = \frac{4T_{ph}R_{\Sigma}R_l}{\left(\frac{R_A R_l}{\omega L} + \frac{1}{\omega C_A} - \omega L_A\right)^2 + R_l^2 \left(1 + \frac{R_A}{R_l} + \frac{L_A}{L} - \frac{1}{\omega^2 L C_A}\right)^2},$$

$$\omega = 2\pi f.$$

Формула (1) определяет интересующую нас величину T_A , которую следует сравнивать с собственным шумом усилителя.

Как было отмечено, реактивности диполя L_A , C_A можно найти экспериментально, тогда как R_{Σ} , R_A подлежат расчету. Методика расчетов параметров тонкого диполя произвольной длины над реальной землей разработана в [12]. Используемые обычно расчеты проводились приближенно или для ограниченного интервала изменения свойств почвы и высоты h подвеса диполя, а также

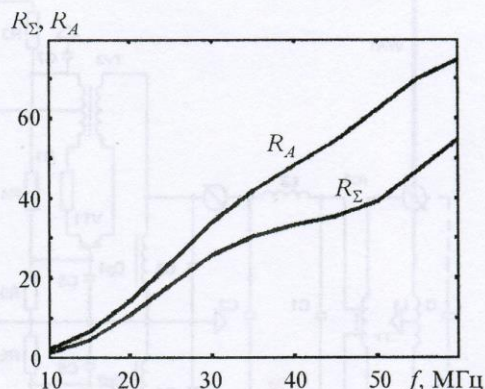


Рис. 4. Расчетные частотные зависимости резистансов диполя R_{Σ} и $R_A = R_{\Sigma} + R_g$, где R_g – сопротивление потерь в почве

были излишне усложнены, поэтому не могут считаться оптимальными.

Приведенные в [12] формулы позволяют с высокой точностью определять резистансы R_{Σ} , R_A , необходимые для расчета антенной температуры T_A из (1) в зависимости от высоты подвеса диполя h и параметров почвы ϵ , σ .

На рис. 4 показаны частотные зависимости $R_{\Sigma}(f)$ и $R_A(f)$, полученные с использованием результатов [12] при $h = 3.5$ м, $\epsilon = 10$, $\sigma = 0.03$ См/м. Значения ϵ и σ определены экспериментально по методике [9].

По формуле (1) с учетом данных рис. 4 были рассчитаны частотные зависимости $T_A(f)$ при разных значениях h , L и R_l (рис. 5-7). Яркостная температура, T_{ph} , К, галактического фона задавалась в виде:

$$T_{ph} = 4 \cdot 10^5 \left(\frac{10}{f}\right)^{2.6}.$$

Значения $C_A \approx 15$ пФ и $L_A \approx 0.8$ мкГн определены из описанных ниже измерений импедансов диполя на разных частотах.

Графики объясняют выбор параметров антенны: $h \approx 3.5$ м, $L \approx 4$ мкГн, $R_l = 300 \div 375$ Ом

($n = 4 \div 5$). Снижение высоты подвеса вибратора до 2 м уменьшает антенную температуру T_A на частотах ниже 30 МГц. Величина индуктивности $L \approx 3 \div 4$ мкГн является оптимальной как с точки зрения получения максимальных значений T_A во всем диапазоне частот, так и для реализации на частоте 15 МГц режима холостого хода на входе усилителя с целью минимизации его шумов.

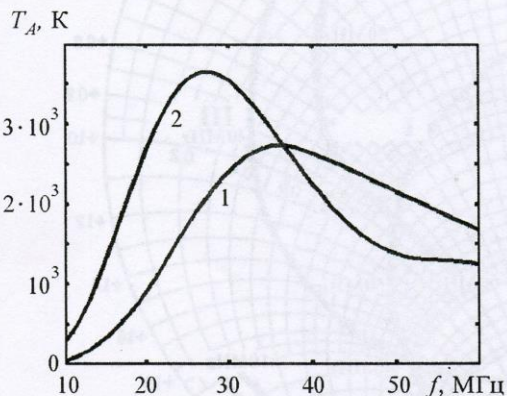


Рис. 5. Расчетные частотные зависимости антенной температуры галактического фона $T_A(f)$ для различных значений высот подвеса диполя над землей: 1 – $h = 2$ м, 2 – $h = 3.5$ м

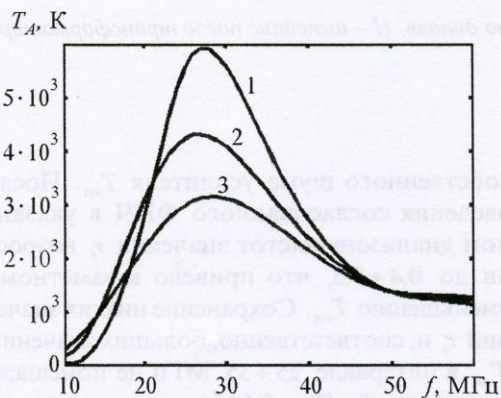


Рис. 6. Расчетные частотные зависимости антенной температуры галактического фона $T_A(f)$ для различных значений индуктивности: 1 – $L = 2$ мкГн, 2 – $L = 4$ мкГн, 3 – $L = 22$ мкГн

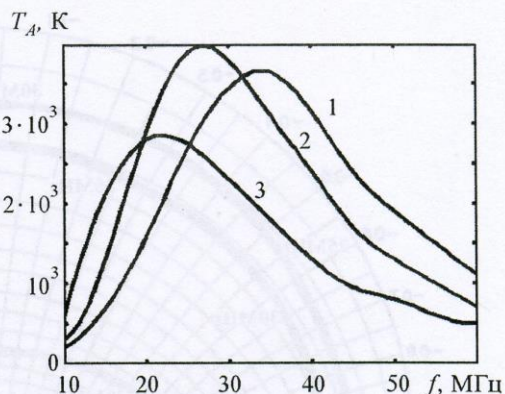


Рис. 7. Расчетные частотные зависимости антенной температуры галактического фона $T_A(f)$ для различных значений сопротивления нагрузки при $n = 2 \div 8$: 1 – $R_l = 150$ Ом, 2 – $R_l = 300$ Ом, 3 – $R_l = 600$ Ом

Заметно увеличить или уменьшить нагрузку диполя R_l относительно величины 300 Ом нельзя из-за проигрыша в T_A на краях рабочего диапазона. Кроме того, увеличение коэффициента трансформации выше значения $n=5$ технически трудно осуществимо из-за невозможности обеспечить широкополосность трансформатора.

Экспериментальные исследования малогабаритного активного диполя

Экспериментальные исследования активного антенного элемента заключались в определении четырех характеристик:

- импедансов антенного элемента над реальной землей в различных его сечениях: на выходе собственно диполя, на выходе трансформатора T_p с подключенной индуктивностью L и на выходе ФНЧ;
- интегрального уровня помех в рабочем диапазоне частот для оценки необходимой величины динамического диапазона усилителя;
- антенной температуры T_A галактического фона (с последующим сравнением ее с расчетной);

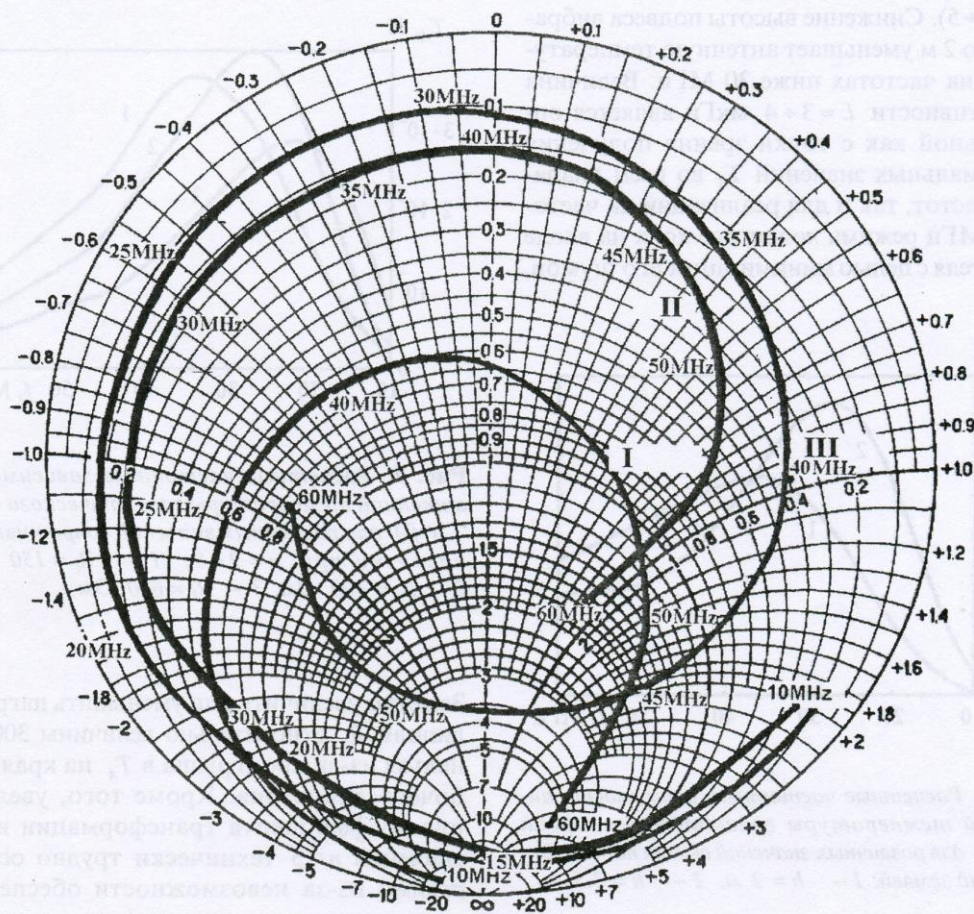


Рис. 8. Диаграмма импедансов: I – импеданс собственно диполя, II – импеданс после трансформатора ($n = 4$), III – импеданс на выходе ФНЧ

– собственных шумов T_{am} усилителя для оценки отношения T_{am}/T_A .

Зависимость от частоты импедансов антенного элемента изображена тремя кривыми на диаграмме импедансов (рис. 8): I – импеданс собственно диполя, II – импеданс после трансформатора T_p ($n = 4$), III – импеданс на выходе ФНЧ. Необходимость использования ФНЧ видна из сравнения кривых II и III: низкие значения активной составляющей нормированного на 75 Ом импеданса $r_s = R_s/75 < 0.4$ на частотах 40 ÷ 50 МГц (кривая II) определяют высокий уровень

собственного шума усилителя T_{am} . После введения согласованного ФНЧ в указанном диапазоне частот значения r_s возросли до 0.4 ÷ 3.5, что привело к заметному уменьшению T_{am} . Сохранение низких значений r_s и, соответственно, больших значений T_{am} в интервале 25 ÷ 35 МГц не помешало получить $T_{am}/T_A \approx 0.1$ благодаря присутствию максимума T_A в этой области частот.

Максимальный уровень радиовещательных и промышленных помех, зарегистрированный в обсерватории РИ НАНУ на выходе усилителя, составил 20 мВ, что

при коэффициенте усиления 18 дБ соответствует входному напряжению около 3 мВ (70 дБ относительно 1 мкВ). Антенный усилитель имеет динамический диапазон 90 дБ относительно 1 мкВ. Имеющийся запас 20 дБ гарантирует отсутствие интерференционных помех при проведении высокочувствительных радиоастрономических наблюдений.

Антенная температура галактического фона измерялась радиометром полной мощности с узкой полосой пропускания 20 кГц для уменьшения влияния помех. Измеренная на выходе радиометра величина T_A сравнивалась с величиной собственного шума T_{am} усилителя с согласованной нагрузкой $R_s = 75$ Ом на входе. Известное значение $T_{am}(R_s = 75 \text{ Ом}) \approx 140$ К позволило получить абсолютные значения T_A , К. Эксперимент по определению T_{am} проводился по стандартной методике путем охлаждения нагрузки $R_s = 75$ Ом в жидком азоте. На рис. 9 приведена расчетная кривая $T_A(f)$ для $L = 4$ мкГн. Точками нанесены экспериментальные значения антенной температуры и указаны погрешности измерения T_A на каждой час-

тоте, связанные с ошибками определения T_{am} и влиянием помех. В средней и нижней части частотного диапазона эксперимент хорошо согласуется с расчетом. Расхождения в области выше 45 МГц объясняются оговоренными обстоятельствами (упрощенная эквивалентная схема диполя, отличие его реальной конструкции от идеализированной).

На этом же рисунке показан результат измерения собственных шумов усилителя $T_{am}^{exp}(Z_s)$ с комплексным импедансом $Z_s = R_s + iX_s$ на входе, частотная зависимость которого приведена на рис. 8 (кривая III). Как и в случае измерения T_A^{exp} , отсчеты собственного шума усилителя с подключенным к его входу резистором R_s и реактивностью X_s сравнивались с $T_{am}(R_s = 75 \text{ Ом}) \approx 140$ К. Из полученного таким образом значения T_{am}^* вычитался вклад T_{R_s} шумящего резистора R_s : $T_{am}(Z_s) = T_{am}^*(Z_s) - T_{R_s}$. Нетрудно показать, что величина T_{R_s} определяется следующим выражением:

$$T_{R_s} = \frac{4 \frac{R_s}{R_{am}} T_o}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{am}}\right)^2 + \left(\frac{X}{R_{am}}\right)^2},$$

где $T_o \approx 290$ К – температура окружающей среды, $R_{am} = 75$ Ом – входное сопротивление усилителя. Точность измерения T_{am}^{exp} – около 25 %

В целом частотная зависимость $T_{am}^{exp}(f)$ подобна $T_A^{exp}(f)$. Минимальное значение $T_{am} \approx 100$ К достигается на частоте 15 МГц в режиме холостого хода, $Z_s \rightarrow \infty$, за счет выбора индуктивности L . На этой же частоте наблюдается и минимальное значение $T_A \approx 1000$ К. Снижение T_A на верхних частотах компенсируется уменьшением T_{am} за счет применения ФНЧ. Максимум $T_{am} \approx 360$ К соответствует интервалу $25 \div 30$ МГц, где максимальна и антенная температура, $T_A \approx 3700$ К.

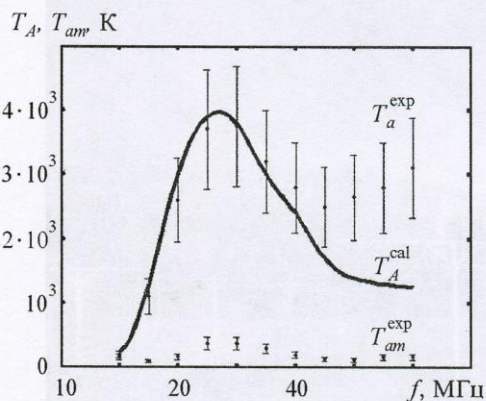


Рис. 9. Расчетная T_A^{cal} и экспериментальная T_A^{exp} частотные зависимости антенной температуры галактического фона и экспериментальные значения собственных шумов усилителя T_{am}^{exp}

Таким образом, во всем диапазоне частот реализуются достаточно низкие значения отношения $T_{am}/T_A = 0.06 \div 0.12$. Такой вклад антенного усилителя в шумовую температуру системы на практике считается несущественным. Вторая важная характеристика активного диполя – динамический диапазон – также выдержана с большим запасом относительно уровня помех (+20 дБ), на основании чего можно сделать окончательный вывод о перспективности использования разработанного активного диполя в составе низкочастотной антенной решетки с характеристиками, близкими к предельным.

Экспериментальные исследования антенной решетки из активных диполей

Внешний вид антенны, в которой использованы описанные выше активные приемные элементы, показан на рис. 10, а ее функциональная схема – на рис. 11. Решетка состоит из 30 элементов, 5 рядов, в каждом по 6 диполей. Ряды фазируются при помощи фазовращателей Φ_{6-4} , которые обеспечивают 4 положения луча и объединены с использованием фазовращателя Φ_{5-5}

(5 положений луча). Каждый диполь снабжен описанным выше высоколинейным малошумящим усилителем. Такие же усилители используются для компенсации потерь в фазовращателях и магистральных кабелях.

Основные параметры антенной решетки:

- частотный диапазон 10 ÷ 60 МГц;
- сектор электрического сканирования $\pm 70^\circ$ от зенита по обеим координатам;
- размеры решетки 45 × 30 м;
- эффективная площадь на частоте 20 МГц составляет 1500 м²;
- ширина диаграммы направленности на частоте 60 МГц – $6 \times 10^\circ$;
- превышение антенной температуры галактического фона над шумовой температурой антенного усилителя ≥ 8 ;
- динамический диапазон антенного усилителя – 90 дБ относительно 1 мкВ.

Результаты сравнения чувствительности новой антенной решетки и подсекции радиотелескопа УТР-2 [13], имеющей аналогичную площадь и конфигурацию элементов, показаны на рис. 12 (элементы УТР-2 имеют длину 8.6 м, диаметр 1.8 м и работоспособны в частотном диапазоне от 10 до 30 МГц). На рисунке приведены энер-

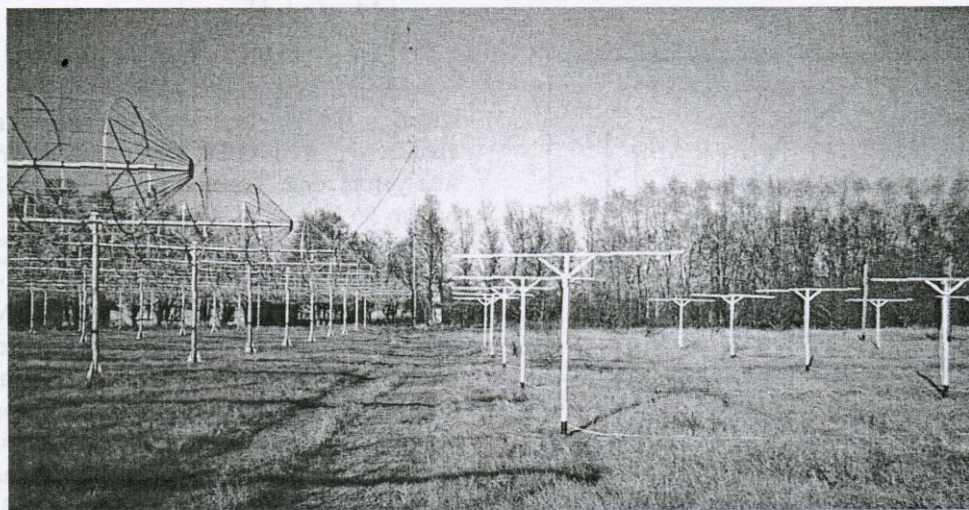


Рис. 10. Внешний вид решетки из 30 активных элементов (справа) и УТР-2 (слева)

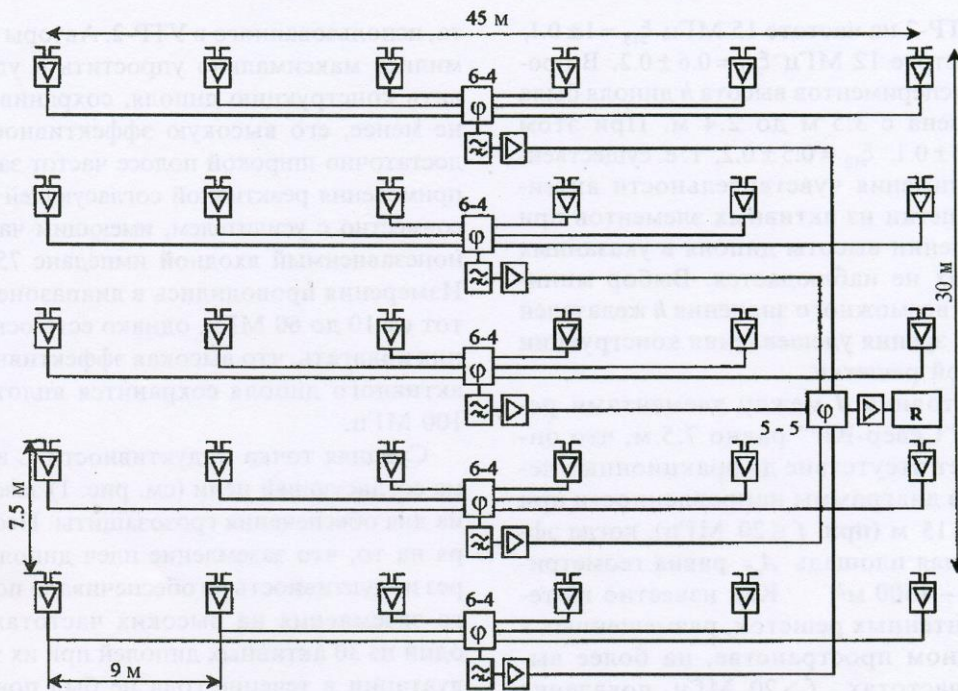


Рис. 11. Функциональная схема решетки из 30 активных элементов с фазовращателями ϕ_{6-4} и ϕ_{5-5} и усилителями

Энергетический спектр 3С461

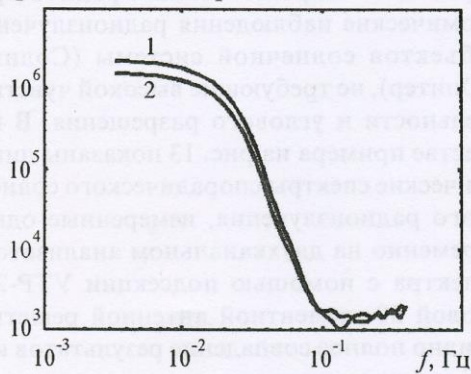


Рис. 12. Спектры мерцаний источника 3С461 на частоте 20 МГц: 1 – на выходе решетки из 30 активных элементов, 2 – на выходе подсекции (30 элементов) радиотелескопа УТР-2

гетические спектры ионосферных мерцаний радиоисточника 3С461 на выходе антенной решетки из активных элементов и подсекции УТР-2. Путем интегрирования по частоте спектра мерцаний и спектра аддитивных шумов, хорошо заметных на частотах выше 10^{-1} Гц, было определено отношение сигнал/шум. Для антенной решетки из активных элементов это отношение равно 12, а для подсекции УТР-2 – 10.4. Таким образом, чувствительность антенной решетки из активных элементов оказалась на 15 % выше, что объясняется влиянием усилителей (см. рис. 11), компенсирующих потери в магистральных кабелях и фазовращателях ϕ_{6-4} .

Как следует из результатов рис. 9, чувствительность активной антенной решетки на частотах ниже 15 МГц должна уменьшиться. Действительно, измеренное отношение чувствительности активной антен-

ны и УТР-2 на частоте 15 МГц $\xi_{15} = 1 \pm 0.1$, а на частоте 12 МГц $\xi_{12} = 0.6 \pm 0.2$. В процессе экспериментов высота h диполя была уменьшена с 3.5 м до 2.4 м. При этом $\xi_{15} = 0.8 \pm 0.1$, $\xi_{12} = 0.5 \pm 0.2$, т. е. существенного снижения чувствительности антенной решетки из активных элементов при уменьшении высоты диполя в указанных пределах не наблюдается. Выбор минимально возможного значения h желателен с точки зрения удешевления конструкции антенной решетки.

Расстояние d между элементами решетки "Север-Юг" равно 7.5 м, что определяет отсутствие дифракционных лепестков диаграммы направленности при $\lambda \geq 2d = 15$ м (при $f \leq 20$ МГц), когда эффективная площадь A_{eff} равна геометрической – 1500 м². Как известно из теории антенных решеток, размещенных в свободном пространстве, на более высоких частотах, $f > 20$ МГц, появление дифракционных лепестков должно приводить к уменьшению A_{eff} , пропорциональному λ^2 . Зависимость $A_{eff}(\lambda)$ была определена экспериментально при наблюдении радиосточника 3С461 с хорошо известной плотностью потока. На длинах волн 5, 5.6 и 7.5 м получены следующие значения эффективной площади: 200, 260 и 530 м². В диапазоне $\lambda = 5.6 \div 7.5$ м $A_{eff} \sim \lambda^{2.3}$, а в диапазоне $\lambda = 5.0 \div 7.5$ м $A_{eff} \sim \lambda^{2.4}$, т. е. на высоких частотах, 50 ÷ 60 МГц, A_{eff} убывает несколько быстрее, чем λ^2 . Это может быть связано с небольшой высотой подвеса $h = 3.5$ м активных антенных элементов, когда имеет место интерференция падающей и отраженной от земли волн, приводящая к дополнительному уменьшению A_{eff} .

Заключение

Стоимость разработанных диполя и усилителя при их изготовлении в Украине составляет 30 и 15 евро соответственно, что практически на порядок дешевле широкополосного пассивного антенного элемен-

та, использованного в УТР-2. Авторы стремились максимально упростить и удешевить конструкцию диполя, сохранив, тем не менее, его высокую эффективность в достаточно широкой полосе частот за счет применения реактивной согласующей цепи совместно с усилителем, имеющим частотно-независимый входной импеданс 75 Ом. Измерения проводились в диапазоне частот от 10 до 60 МГц, однако есть основания полагать, что высокая эффективность активного диполя сохранится вплоть до 100 МГц.

Средняя точка индуктивности L в схеме согласующей цепи (см. рис. 1) заземлена для обеспечения грозозащиты. Несмотря на то, что заземление плеч диполя через индуктивность не обеспечивало полного заземления на высоких частотах, ни один из 30 активных диполей при их эксплуатации в течение года не был поврежден, хотя в весенние и летние месяцы наблюдались интенсивные грозы.

Описанная в настоящей статье 30-элементная активная антенная решетка, являющаяся прототипом гигантского низкочастотного радиотелескопа, имеет небольшую эффективную площадь и сравнительно широкую диаграмму направленности. Тем не менее с ее помощью можно проводить широкополосные радиоастрономические наблюдения радиоизлучения объектов солнечной системы (Солнце, Юпитер), не требующие высокой чувствительности и углового разрешения. В качестве примера на рис. 13 показаны динамические спектры спорадического солнечного радиоизлучения, измеренные одновременно на двухканальном анализаторе спектра с помощью подсекции УТР-2 и новой 30-элементной антенной решетки. Видно полное совпадение результатов как по чувствительности, так и по помехозащищенности.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке проектов INTAS 97-1964 и INTAS Call 2003.

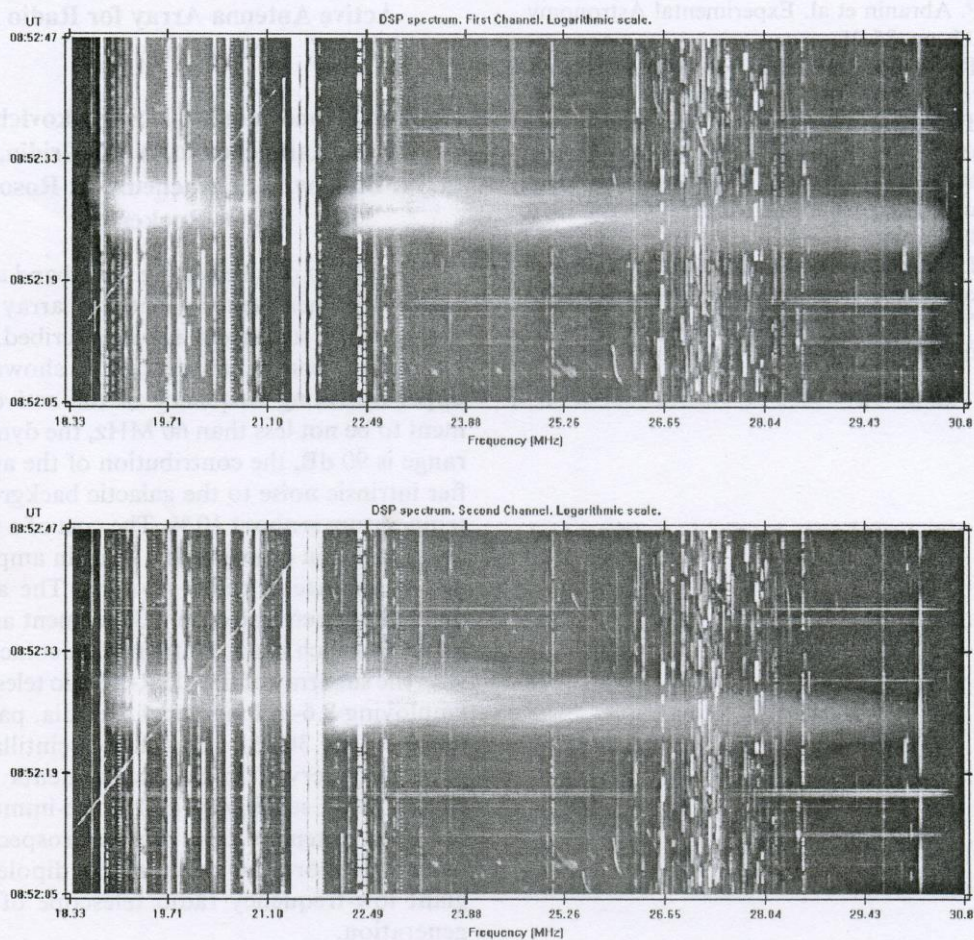


Рис. 13. Спектры спорадического радиоизлучения Солнца. Первый канал – решетка из 30 активных элементов, второй канал – подсекция (30 элементов) радиотелескопа УТР-2. Центральная частота – 25 МГц, временное разрешение – 100 мс. Событие 19 июня 2001 г.

Литература

1. N. Kassim and W. C. Erickson. Proc. SPIE. 1998, **3357**, pp. 740-754.
2. A. A. Konovalenko et al. Perspectives of Radio Astronomy – Technologies for Large Antenna Arrays. A. B. Smolders and M. P. Van Haarlem (eds), NFRA, 1999, pp. 115-122.
3. A. Van Ardenne et al. Low frequency option for SKA, in Prefeasibility Study Report. NFRA, Dwingeloo, 1999, pp. 1-39.
4. H. O. Rucker et al. New frontiers in decameter radio astronomy. Planetary Radio Emission V. H. O. Rucker, M. L. Kaiser, Y. Leblanc (eds.). Austrian Academy of Science Press. Vienna, 2001, pp. 51-62.
5. H. H. Meinke. Proc. ECOM-ARO Workshop on Electrically Small Antennas. Fort Monmouth. 1976, NJ, pp. 35-41.
6. E. H. Nordholt and D. Van Willigen. IEEE Trans. Antennas Propag. 1980, **AP-28**, No. 6, pp. 904-910.
7. R. A. Sainati and D. E. Fessenden. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 1981, **AES-17**, No. 1, pp. 88-92.
8. R. A. Sainati. IEEE Trans. Antennas Propag. 1982, **AP-30**, No. 6, pp. 1265-1267.
9. I. S. Falkovich et al. Proc. JINA-94. Nice, 1994, pp. 370-373.

10. E. P. Abranin et al. *Experimental Astronomy*. 2001, **11**, pp. 85-91.
11. K. Rambabu et al. *IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.* 1999, **146**, No. 6, pp. 345-349.
12. Л. Г. Содин. Параметры горизонтального вибратора, размещенного над полупроводящим полупространством. В сб. "Антенны". Под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Связь, 1976, с. 19-30.
13. С. Я. Брауде, А. В. Мень, Л. Г. Содин. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2. В сб. "Антенны". Под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Связь, 1978, с. 3-15.

Active Antenna Array for Radio Astronomy

**A. A. Konovalenko, I. S. Falkovich,
N. N. Kalinichenko, A. A. Gridin,
I. N. Bubnov, A. Lecacheux, C. Rosolen,
H. O. Rucker**

The design of an effective wide-band active antenna element and an antenna array consisting of 30 such elements is described. The calculation and experiment have shown the upper operating frequency of the active element to be not less than 60 MHz, the dynamic range is 90 dB, the contribution of the amplifier intrinsic noise to the galactic background temperature is about 10 %. The cost of a short (3 m) and thin dipole with a built-in amplifier and metalware is below 45 euro. The active dipole has been tested on a 30-element antenna array which has a configuration coinciding with the subarray of the UTR-2 radio telescope employing 8.6-m long and 1.8-m dia. passive dipoles. The 3C461 ionospheric scintillation spectra observed in the experiments have shown close sensitivity and noise-immunity for both antennas that proves prospects in using this short and cheap active dipole in a giant low-frequency radio telescope of new generation.