

АНТЕНИ, ХВИЛЕВОДИ І КВАЗІОПТИЧНА ТЕХНІКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra23.01.043>

УДК 520.272.2:
621.396.677.494

П. Л. ТОКАРСКИЙ, А. А. КОНОВАЛЕНКО,
С. Н. ЕРИН, И. Н. БУБНОВ

PACS number: 95.55.Jz

Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Мистецтв, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: p.tokarsky@rian.kharkov.ua, s.yerin@rian.kharkov.ua

ШУМОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ РАДИОТЕЛЕСКОПА ГУРТ

Предмет и цель работы: теоретические и экспериментальные исследования шумовой температуры субрешетки активной фазированной антенной решетки (АФАР) низкочастотного радиотелескопа нового поколения ГУРТ.

Методы и методология: Разработана математическая модель АФАР в виде каскадного соединения двух шумящих многополюсников, один из которых поставлен в соответствие решетке диполей над реальной землей, а второй – диаграммообразующей схеме. Электрические параметры этих многополюсников описываются матрицами рассеяния, а шумовые – ковариационными матрицами спектральных плотностей шумовых волн. Получены расчетные соотношения, позволяющие выполнять анализ полной шумовой температуры субрешетки АФАР радиотелескопа ГУРТ с корректным учетом всех имеющихся в ней источников шума и их взаимной корреляции, обусловленной взаимодействием диполей в решетке.

Результаты: Выполнены численные и экспериментальные исследования шумовой температуры на выходе субрешетки АФАР радиотелескопа ГУРТ, которые позволили оценить соотношение между температурами внешних и внутренних шумов в рабочем диапазоне частот от 8 до 80 МГц при сканировании луча в верхней полусфере. Показано, что внешняя шумовая температура субрешетки более чем на 6 дБ превышает внутреннюю в полосе частот шириной примерно 65 МГц. Получено хорошее согласие результатов расчета и эксперимента, которое подтверждает корректность разработанной модели субрешетки и эффективность предложенной методики численного анализа ее параметров.

Закключение: Выполненные в работе исследования подтверждают возможность эффективного использования данной субрешетки как базовой ячейки АФАР низкочастотного радиотелескопа, а в случаях, когда радиоастрономические наблюдения не требуют высокого углового разрешения, в качестве самостоятельной антенны радиотелескопа. Результаты представленной работы могут быть полезны при разработке и исследованиях АФАР декаметрового и метрового диапазонов волн.

Ключевые слова: радиотелескоп, активная фазированная антенная решетка, сканирование луча, шумовая температура, матрица рассеяния, ковариационная матрица

1. Введение

ГУРТ (Гигантский Украинский РадиоТелескоп) – это радиоастрономический инструмент нового поколения [1, 2], предназначенный для работы в диапазоне частот 8 ÷ 80 МГц, который в последние годы строится рядом с известным радиотелескопом УТР-2 (36°56′30″ в. д., 49°38′40″ с. ш.) на территории Радиоастрономической обсерватории им. С. Я. Брауде вблизи г. Харькова (Украина). В состав ГУРТ входит активная фазированная антенная решетка (АФАР), составленная из от-

дельных 25-элементных секций (субрешеток), число которых увеличивается по мере строительства радиотелескопа и согласно намеченным планам должно достигнуть примерно 100. В данной АФАР применяется комбинированное формирование луча: внутри субрешетки – дискретное, а между субрешетками – цифровое. Каждая субрешетка является самостоятельной АФАР, луч которой может дискретно перемещаться во всей верхней полусфере, вследствие чего она может работать как автономно [2], так и в составе большой АФАР ГУРТ. Субрешетки являются основными структурными ячейками АФАР радиотелескопа, комбинируя которые можно создавать различные ее

© П. Л. Токарский, А. А. Коноваленко, С. Н. Ерин,
И. Н. Бубнов, 2018

конфигурации, удобные для проведения тех или иных радиоастрономических наблюдений в широком диапазоне частот. Поэтому исследование частотных зависимостей параметров субрешетки АФАР для различных направлений ее луча во всем секторе сканирования является важной задачей. С необходимостью проведения подобных исследований сталкивались разработчики и исследователи всех современных низкочастотных радиотелескопов нового поколения, таких как LOFAR [3], LWA [4] и SKA [5], однако для каждого из них эта задача решалась индивидуально ввиду заметных различий в структуре и методах построения этих инструментов. При совместных скоординированных наблюдениях, проводимых одновременно на нескольких радиотелескопах, эти различия могут играть положительную роль с точки зрения минимизации влияния на результаты измерений разнообразных мешающих факторов, действующих в данном диапазоне частот. Поскольку разные радиотелескопы по-разному реагируют на эти мешающие воздействия, значительную часть порожденных ими эффектов легко обнаружить и устранить, выполняя сравнительный анализ данных, полученных на разных инструментах.

Надо сказать, что теоретические и экспериментальные исследования субрешетки АФАР ГУРТ и ее элемента уже проводились и их результаты представлены в работах [1, 2, 6–8]. Так, в [6] описана структура субрешетки и геометрия ее элемента, приведены электрические схемы основных ее узлов, в [7] разработана математическая модель субрешетки, с помощью которой исследованы ее эффективная площадь и КПД, в [8] представлены методика и результаты исследований чувствительности элемента АФАР, а в [1, 2] продемонстрированы некоторые результаты радиоастрономических наблюдений, полученных с использованием субрешетки в качестве самостоятельной антенны радиотелескопа. Вместе с тем пока недостаточно полно изучены шумовые характеристики субрешетки АФАР ГУРТ, необходимые для оценки ее чувствительности, потому всестороннее их исследование является актуальной задачей. Настоящая работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям шумовых характеристик субрешетки АФАР ГУРТ, позволяющим оценить ее чувствительность.

2. Методика расчета шумовой температуры АФАР

В работе [7] разработана математическая модель субрешетки АФАР ГУРТ, которая базируется на матричной теории антенных решеток [9, 10], сочетающей в себе методы теории многополюсников СВЧ с методами прикладной электродинамики. Эта модель была успешно применена в [7] для анализа энергетических параметров субрешетки АФАР ГУРТ, в частности ее эффективной площади, КПД и коэффициента передачи, и показала достаточно высокую эффективность. Теперь мы распространим упомянутую модель на анализ шумовых параметров субрешетки, в частности ее системной шумовой температуры. Для этого предположим присутствие в АФАР источников флуктуационных шумов, в качестве которых могут выступать ее элементы с тепловыми потерями энергии, а также полупроводниковые усилители. Полагая, что N -элементная АФАР является линейным устройством, мы, следуя [7], поставим ей в соответствие проходной многополюсник МП (рис. 1) с N входами и одним выходом ($N + 1$). Входы МП, расположенные в сечении α , осуществляют связь антенной решетки с внешним пространством, представленным набором из независимых каналов [9, 10], а его выход (сечение γ) подключен к линии передачи с волновым сопротивлением Z_w , соединяющей АФАР с приемником.

Учитывая, что многополюсник МП содержит внутренние источники шума, запишем его уравнение в следующем виде:

$$\dot{u}_{\alpha r} = S_{\alpha\alpha} \dot{u}_{\alpha i} + S_{\alpha\gamma} \dot{u}_{\gamma i} + c_{\alpha},$$

$$\dot{u}_{\gamma r} = S_{\gamma\alpha} \dot{u}_{\alpha i} + S_{\gamma\gamma} \dot{u}_{\gamma i} + c_{\gamma},$$

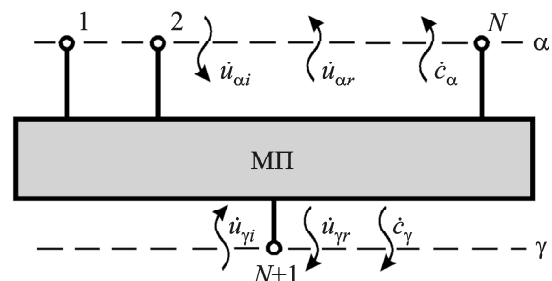


Рис. 1. Многополюсник, эквивалентный АФАР

где $S_{\alpha\alpha}$, $\langle S_{\gamma\alpha}$, $S_{\alpha\gamma} \rangle$ и $S_{\gamma\gamma}$ – блоки матрицы рассеяния МП; $\dot{u}_{\alpha i}$ и $\dot{u}_{\alpha r}$ – матрицы-столбцы нормированных амплитуд падающих и отраженных гармонических волн на входах МП соответственно; $\dot{u}_{\gamma i}$ и $\dot{u}_{\gamma r}$ – нормированные амплитуды падающей и отраженной гармонических волн на выходе МП; c_{α} и c_{γ} – нормированные амплитуды флуктуационных шумовых волн, исходящих из входов и выхода МП соответственно. Здесь, как и в [7, 9], для обозначения матриц используются следующие символы: \mathbf{B} – квадратная матрица, b – матрица-столбец, $\langle b$ – матрица-строка.

Будем считать, что амплитуды шумовых волн имеют нулевые средние значения ($\overline{c_{\alpha}} = 0$), ($\overline{c_{\gamma}} = 0$), а их энергетические параметры характеризуются ковариационной матрицей спектральных плотностей

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{\alpha\alpha} & \mathbf{C}_{\alpha\gamma} \\ \langle \mathbf{C}_{\gamma\alpha} & \mathbf{C}_{\gamma\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{c_{\alpha}\langle c_{\alpha}^*} & \overline{c_{\alpha}\langle c_{\gamma}^*} \\ c_{\gamma}\langle c_{\alpha}^*} & c_{\gamma}\langle c_{\gamma}^*} \end{pmatrix}.$$

В этой матрице нас будет интересовать элемент $\mathbf{C}_{\gamma\gamma}$, который характеризует мощность собственного шума АФАР на ее выходе, отдаваемую в согласованную линию передачи, идущую к приемнику

$$P_{\gamma int} = \Delta f C_{\gamma\gamma}, \quad (1)$$

где Δf – полоса частот приемника.

Для полного описания многополюсника МП (рис. 1), эквивалентного всей АФАР, необходимо знать обе его матрицы, \mathbf{S} и \mathbf{C} , первая из которых найдена ранее в [7], а вторую нам предстоит определить здесь. С этой целью по аналогии с [7] представим МП (рис. 1) в виде каскадного соединения двух многополюсников (рис. 2), первый из которых, МП-I, соответствует N -элементной антенной решетке, а второй, МП-II, – диаграммообразующей схеме (ДОС), которая содержит все малошумящие усилители (МШУ), дискретные фазовращатели и сумматор.

Будем полагать, что МП-I описывается матрицами \mathbf{S}' и \mathbf{C}' , а МП-II – матрицами \mathbf{S}'' и \mathbf{C}'' . Зная эти матрицы, нетрудно найти матрицы \mathbf{S} и \mathbf{C} объединенного многополюсника МП, воспользовавшись следующими формулами [11]:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha} & \mathbf{S}_{\alpha\gamma} \\ \mathbf{S}_{\gamma\alpha} & \mathbf{S}_{\gamma\gamma} \end{pmatrix} =$$

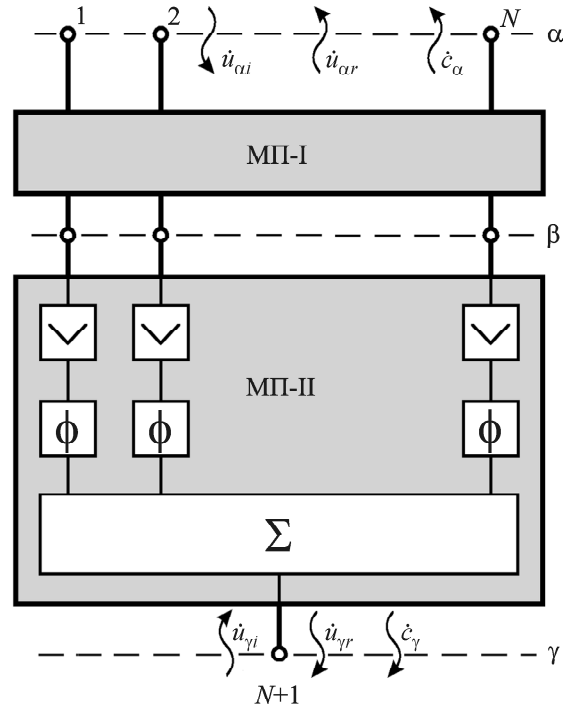


Рис. 2. Блок-схема АФАР в виде соединения двух многополюсников

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{S}'_{\alpha\alpha} + \mathbf{G}_{12} \mathbf{S}''_{\beta\beta} \mathbf{S}'_{\beta\alpha} & \mathbf{G}_{12} \mathbf{S}''_{\beta\gamma} \\ \mathbf{G}_{21} \mathbf{S}'_{\beta\alpha} & \mathbf{S}''_{\gamma\gamma} + \mathbf{G}_{21} \mathbf{S}'_{\beta\beta} \mathbf{S}'_{\beta\gamma} \end{pmatrix} \quad (2)$$

и

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{\alpha\alpha} & \mathbf{C}_{\alpha\gamma} \\ \mathbf{C}_{\gamma\alpha} & \mathbf{C}_{\gamma\gamma} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{C}_{\alpha\alpha} = \mathbf{C}'_{\alpha\alpha} + \mathbf{G}_{11} \mathbf{C}'_{\beta\alpha} + \mathbf{C}'_{\alpha\beta} \mathbf{G}^*_{11r} + \mathbf{G}_{11} \mathbf{C}'_{\beta\beta} \mathbf{G}^*_{11r} + \mathbf{G}_{12} \mathbf{C}''_{\beta\beta} \mathbf{G}^*_{12r},$$

$$\mathbf{C}_{\alpha\gamma} = \mathbf{G}_{12} \mathbf{C}''_{\beta\gamma} + \mathbf{C}'_{\alpha\beta} \mathbf{G}^*_{21r} + \mathbf{G}_{11} \mathbf{C}'_{\beta\beta} \mathbf{G}^*_{21r} + \mathbf{G}_{12} \mathbf{C}''_{\beta\beta} \mathbf{G}^*_{22r},$$

$$\mathbf{C}_{\gamma\alpha} = \mathbf{C}^*_{\alpha\gamma},$$

$$\mathbf{C}_{\gamma\gamma} =$$

$$= \mathbf{C}''_{\gamma\gamma} + \mathbf{G}_{22} \mathbf{C}''_{\beta\gamma} + \mathbf{C}''_{\gamma\beta} \mathbf{G}^*_{22r} + \mathbf{G}_{22} \mathbf{C}''_{\beta\beta} \mathbf{G}^*_{22r} + \mathbf{G}_{21} \mathbf{C}'_{\beta\beta} \mathbf{G}^*_{21r},$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{G}_{11} & \mathbf{G}_{12} \\ \mathbf{G}_{21} & \mathbf{G}_{21} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \mathbf{G}_{12} \mathbf{S}''_{\beta\beta} & \mathbf{S}'_{\alpha\beta} (\mathbf{E} - \mathbf{S}''_{\beta\beta} \mathbf{S}'_{\beta\beta})^{-1} \\ \mathbf{S}''_{\gamma\beta} (\mathbf{E} - \mathbf{S}'_{\beta\beta} \mathbf{S}''_{\beta\beta})^{-1} & \mathbf{G}_{21} \mathbf{S}'_{\beta\beta} \end{pmatrix}.$$

Вначале найдем матрицы S' и C' многополюсника МП-I, эквивалентного антенной решетке. Его матрица рассеяния может быть найдена как [7, 10]

$$S' = \begin{pmatrix} S'_{\alpha\alpha} & S'_{\alpha\beta} \\ S'_{\beta\alpha} & S'_{\beta\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -J^{-1}AJ_t^{-1} + J_t^*J_t^{-1} & J^{-1}A \\ AJ_t^{-1} & E - A \end{pmatrix},$$

где $A = 2(z + E)^{-1}$; z – нормированная матрица импедансов антенной решетки; E – единичная матрица N -го порядка; J – вспомогательная квадратная матрица N -го порядка, определяемая из матричного уравнения $J_t^* \cdot r_\Sigma \cdot J = E$; r_Σ – нормированная матрица сопротивлений излучения антенной решетки.

МП-I является пассивным многополюсником, поэтому для нахождения его матрицы C' можно применить теорему Босма [12], что и сделано в работе [13], где для ковариационной матрицы шумовых волн антенной решетки получено следующее выражение:

$$C' = \begin{pmatrix} C'_{\alpha\alpha} & C'_{\alpha\beta} \\ C'_{\beta\alpha} & C'_{\beta\beta} \end{pmatrix} = kT_0(E - S'S_t^*) = \\ = \begin{pmatrix} J^{-1}V(J_t^*)^{-1} & -J^{-1}V \\ -V(J_t^*)^{-1} & V \end{pmatrix},$$

где k – постоянная Больцмана; T_0 – температура окружающей среды; $V = kT_0Ar_dA_t^*$, $r_d = r - r_\Sigma$ – нормированная матрица сопротивлений потерь антенной решетки; t и $*$ – знаки транспонирования и комплексного сопряжения соответственно.

Перейдем теперь к МП-II, который является составным многополюсником, образованным соединением четырехполюсников, представляющих МШУ и фазовращатели, а также $(N + 1)$ -полюсника, представляющего сумматор с N развязанными входами и одним выходом. Рассмотрим по порядку все эти устройства.

МШУ представляет собой усилитель с большим динамическим диапазоном (коэффициент интермодуляционных искажений 3-го порядка $IP3 > 90$ дБ/мкВ [6]), поэтому ему можно поставить в соответствие линейный четырехполюсник, характеризуемый матрицей рассеяния S_y и ковариационной матрицей шумов C_y , которые мы запишем как

$$S_y = \begin{pmatrix} S_{y11} & S_{y12} \\ S_{y21} & S_{y22} \end{pmatrix}, \quad C_y = \begin{pmatrix} C_{y11} & C_{y12} \\ C_{y21} & C_{y22} \end{pmatrix}.$$

Поскольку принципиальная электрическая схема МШУ нам известна [6], обе эти матрицы нетрудно определить, используя хорошо зарекомендовавшие себя программы компьютерного моделирования [14], как это сделано в [8]. В субрешетке ГУРТ применяются фазовращатели на переключаемых отрезках линий передачи и равноплечий сумматор $N : 1$ с развязанными и согласованными входами, поэтому их матрицы рассеяния можно представить в следующем виде:

$$S_{\phi_n} = \begin{pmatrix} 0 & \Phi_n \\ \Phi_n & 0 \end{pmatrix} \text{ и } S_\Sigma = \sqrt{\frac{\eta_\Sigma}{N}} \begin{pmatrix} \mathbf{0} & 1 \\ \langle 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Первая матрица относится к фазовращателю, включенному в n -й канал ДОС, а вторая – к сумматору. При записи этих матриц использованы следующие обозначения: $\Phi_n = \sqrt{\eta_{\phi_n}} e^{-j\phi_n}$, ϕ_n – фазовый угол, вносимый фазовращателем в фидер, η_{ϕ_n} – КПД этого фазовращателя; η_Σ – КПД сумматора; $\mathbf{0}$ – нулевая матрица N -го порядка; 1 – матрица-столбец и $\langle 1$ – матрица строка, все элементы которых равны 1.

Фазовращатели и сумматоры являются пассивными устройствами, поэтому их ковариационные матрицы шумовых волн найдем из их матриц рассеяния, используя теорему Босма [12]. В результате имеем

$$C_{\phi_n} = kT_0 \begin{pmatrix} 1 - \eta_{\phi_n} & 0 \\ 0 & 1 - \eta_{\phi_n} \end{pmatrix}, \\ C_\Sigma = kT_0 \begin{pmatrix} E - \frac{\eta_\Sigma}{N} \cdot \mathbf{1} & 0 \\ \langle 0 & 1 - \eta_\Sigma \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{1}$ – квадратная матрица, все элементы которой равны 1.

Зная схему соединения устройств, входящих в ДОС [6], с помощью формул (2), (3) находим матрицы S'' и C'' всего МП-II, в результате чего имеем:

$$S'' = \begin{pmatrix} S''_{\beta\beta} & S''_{\beta\gamma} \\ \langle S''_{\gamma\beta} & S''_{\gamma\gamma} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} S_{y11} \mathbf{E} & S_{y12} \sqrt{\eta_\Sigma / N} \cdot \langle \Phi \rangle \\ \langle \Phi \cdot S_{y21} \sqrt{\eta_\Sigma / N} & S_{y22} \sum_{n=1}^N \Phi_n^2 \eta_\Sigma / N \end{pmatrix}$$

и

$$\mathbf{C}'' = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{\beta\beta}'' & \mathbf{C}_{\beta\gamma}'' \\ \langle \mathbf{C}_{\gamma\beta}'' & \mathbf{C}_{\gamma\gamma}'' \end{pmatrix},$$

где

$$\mathbf{C}_{\beta\beta}'' = C_{y11} \mathbf{E} + |S_{y12}|^2 \mathbf{H},$$

$$\langle \mathbf{C}_{\gamma\beta}'' = \langle \Phi (C_{y21} \mathbf{E} + S_{y12}^* S_{y22} \mathbf{H}) \sqrt{\frac{\eta_\Sigma}{N}},$$

$$\mathbf{C}_{\beta\gamma}'' = (\langle \mathbf{C}_{\gamma\beta}'')^*,$$

$$\mathbf{C}_{\gamma\gamma}'' = kT_0(1 - \eta_\Sigma \eta_\phi) + kT_0 |S_{y22}|^2 \eta_\Sigma \times$$

$$\times \left(\eta_\phi - \frac{\eta_\Sigma}{N^2} \left| \sum_{n=1}^N \Phi_n^2 \right|^2 \right) + C_{y22} \eta_\Sigma \eta_\phi,$$

$$\eta_\phi = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \eta_{\phi n},$$

$$H_{mn} = kT_0 \begin{cases} 1 - \frac{\eta_\Sigma \eta_{\phi n}}{N}, & m = n; \\ -\frac{\eta_\Sigma}{N} \sqrt{\eta_{\phi m} \eta_{\phi n}} e^{j(\phi_n - \phi_m)}, & m \neq n. \end{cases}$$

Теперь с помощью соотношений (3) находим элемент $C_{\gamma\gamma}$ шумовой матрицы многополюсника МП (рис. 1):

$$C_{\gamma\gamma} = C_{\gamma\gamma}'' + \langle G_{22} C_{\beta\gamma}'' \rangle + \langle C_{\gamma\beta}'' G_{22}^* \rangle + \langle G_{22} C_{\beta\beta}'' G_{22}^* \rangle + \langle G_{21} C_{\beta\beta}' G_{21}^* \rangle, \quad (4)$$

где

$$\langle G_{21} = \langle S_{\gamma\beta}'' (\mathbf{E} - \mathbf{S}'_{\beta\beta} \mathbf{S}''_{\beta\beta})^{-1}, \quad \langle G_{22} = \langle G_{21} \mathbf{S}'_{\beta\beta}.$$

Воспользовавшись (1), можно определить мощность собственного шума $P_{\gamma int}$ на выходе субрешетки АФАР, а также ассоциируемую с ней шумовую температуру

$$T_{\gamma int} = C_{\gamma\gamma} / k.$$

Известно, что на выходе субрешетки присутствует еще и шум, который она принимает из внешнего пространства. Будем считать, что источником этого шума служит фоновое галактическое излучение, которое является неполяризованным и характеризуется яркостной температурой [8, 15]

$$T_{sky} = 4 \cdot 10^5 (f \cdot 10^{-7})^{-2.56}, \quad (5)$$

равномерно распределенной по небесной сфере [16].

На это шумовое излучение любая антенна реагирует, как на внешний сигнал, поэтому, как показано в [8], для расчета мощности внешнего шума $P_{\gamma ext}$ на выходе субрешетки можно применить такую же формулу, как и для мощности полезного сигнала $P_{\gamma s}$:

$$P_{\gamma s} = \kappa P_{\alpha s},$$

$$P_{\gamma ext} = \kappa P_{sky},$$

где κ – коэффициент передачи субрешетки; $P_{\alpha s} = W^i A_{e\alpha}$ – мощность, отбираемая антенной у падающей плоской электромагнитной волны, несущей полезный сигнал, $A_{e\alpha} = D\lambda^2/4\pi$ – эффективная площадь субрешетки; D – ее КНД; W^i – плотность потока мощности падающей плоской волны; λ – длина волны; а $P_{sky} = k\Delta f T_{sky}$ – мощность, отбираемая у волны, несущей фоновое излучение.

Для определения коэффициента κ можно использовать следующую формулу [7]:

$$\kappa = \langle i_e^* \mathbf{r}_\Sigma i_e \rangle,$$

где $\langle i_e = -j \langle \Phi [\mathbf{E} - (\mathbf{E} - \mathbf{A}) S_{y11}]^{-1} \mathbf{A} S_{y21} / \sqrt{N} \rangle$ – эквивалентное распределение токов на клеммах диполей.

Мощности внешних шумов $P_{\gamma ext}$ на выходе субрешетки поставим в соответствие выходную температуру внешних шумов

$$T_{\gamma ext} = P_{\gamma ext} / k\Delta f = \kappa T_{sky}. \quad (6)$$

Зная температуры внутренних и внешних шумов субрешетки, можно рассчитать системную шумовую температуру на ее выходе:

$$T_{\gamma sys} = T_{\gamma int} + T_{\gamma ext} = C_{\gamma\gamma} / k + \kappa T_{sky}.$$

Для оценки шумовых свойств активных антенных решеток можно также применять эффективные шумовые температуры [17], пересчитанные с выхода АФАР к входам ее ДОС (сечение β на рис. 2) с помощью соотношения

$$T_{e_{sys,ext,int}} = T_{\gamma_{sys,ext,int}} / K_p^{BFN}, \quad (7)$$

где $K_p^{BFN} = K_{\gamma} \eta_{\phi} \eta_{\Sigma}$ и $K_{\gamma} = |S_{y21}|^2 / (1 - |S_{y11}|^2)$ – коэффициенты передачи по мощности ДОС и МШУ соответственно. Эффективные шумовые температуры не зависят от коэффициентов передачи ДОС, поэтому их удобно использовать для сравнения различных АФАР, ДОС которых могут заметно отличаться.

В радиоастрономии при оценках чувствительности приемной системы часто используется также параметр SND (Sky Noise Dominance [18]),

$$SND = \frac{T_{\gamma_{ext}}}{T_{\gamma_{int}}} = \frac{T_{e_{ext}}}{T_{e_{int}}}, \quad (8)$$

оценивающий превышение внешней температуры антенны над внутренней. Чем выше SND, тем ближе чувствительность данной антенны к предельной, определяемой исключительно внешними шумами. Добиться высокого SND можно только путем уменьшения внутренней шумовой температуры $T_{e_{int}}$ активной антенны, что, как правило, сопряжено с усложнением и/или заметным удорожанием применяемых в них МШУ. В [18, 19] показано, что компромиссным можно считать значение $SND = 6$ дБ, которое, с одной стороны, не требует чрезмерных затрат для его достижения и, с другой стороны, не приводит к заметной потере чувствительности низкочастотного радиотелескопа.

3. Численный анализ шумовой температуры субрешетки АФАР ГУРТ

Изложенная методика была использована для численных исследований внутренней и внешней температур шума субрешетки АФАР ГУРТ. В субрешетке АФАР ГУРТ совмещены две одинаковые 25-элементные АФАР [2, 7], каждая из которых принимает и автономно обрабатывает сигнал, переносимый электромагнитной волной одной из двух взаимно ортогональных линейных поляризаций. Поскольку эти АФАР идентичны по

структуре и имеют идентичные автономные ДОС, их параметры будут одинаковы, что дает нам право анализировать только одну из них и переносить затем полученные результаты на другую. Именно так сделано в работе [7], где исследовались энергетические параметры субрешетки АФАР ГУРТ. Поэтому все результаты исследований внутренней $T_{\gamma_{int}}$ и внешней $T_{\gamma_{ext}}$ шумовых температур, представленные ниже, будут относиться также к субрешетке АФАР ГУРТ, принимающей волны одной линейной поляризации. Все исходные данные для проведения расчетов, содержащие сведения о геометрии решетки и ее элементов, об электрофизических свойствах земли, а также о параметрах МШУ, брались из работ [7] и [8], чтобы соблюсти преемственность результатов исследований. Вычисления проводились в диапазоне частот $8 \div 80$ МГц для всех направлений фазирования луча, схематически показанных на рис. 3 точками $M_{p,q}$ на UV -плоскости ($U = \sin \theta \sin \phi$; $V = \sin \theta \cos \phi$; θ , ϕ – углы в сферической системе координат, задающие направление на точку наблюдения). Индексы p и q изменяются в пределах $[-8, 8]$ и определяют дискретные положения луча вдоль осей U и V соответственно. Светлый круг на рис. 3 ограничивает область “видимых” углов, которая содержит 213 направлений фазирования луча, соответствующих реальным зенитным углам $\theta_{p,q}$, для которых $\sin \theta_{p,q} = \sqrt{U_p^2 + V_q^2} \leq 1$.

На рис. 4 показаны частотные зависимости эффективной температуры внутреннего шума субрешетки $T_{e_{int}}$ (7) для нормального луча ($p = 0, q = 0$) и трех отклоненных лучей в плоскостях $E(5,5)$, $H(-5,5)$ и $X(0,7)$, а также ее одиночного элемента.

На этом рисунке видно, что в нижней половине диапазона частот АФАР все приведенные кривые $T_{e_{int}}(f)$ неразличимы, т. е. внутренняя шумовая температура субрешетки АФАР практически не зависит от направления луча и совпадает с внутренней шумовой температурой одиночного элемента. Однако выше $30 \div 40$ МГц кривые $T_{e_{int}}(f)$ начинают расходиться, и далее поведение каждой из них имеет индивидуальный характер, определяемый фазовым распределением на клеммах взаимосвязанных диполей.

Частотные зависимости внешней шумовой температуры субрешетки $T_{e_{ext}}(f)$ также можно рассчитывать, используя выражения (6) и (7), однако

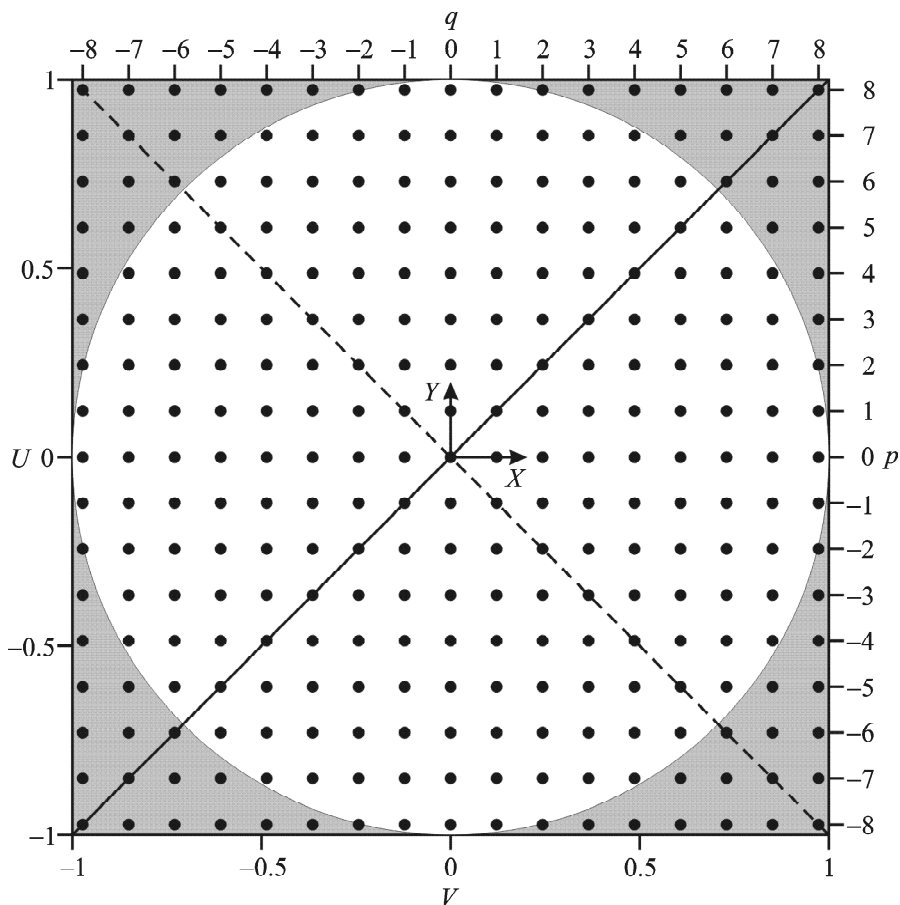


Рис. 3. Диаграмма направлений фазирования луча субрешетки АФАР ГУРТ

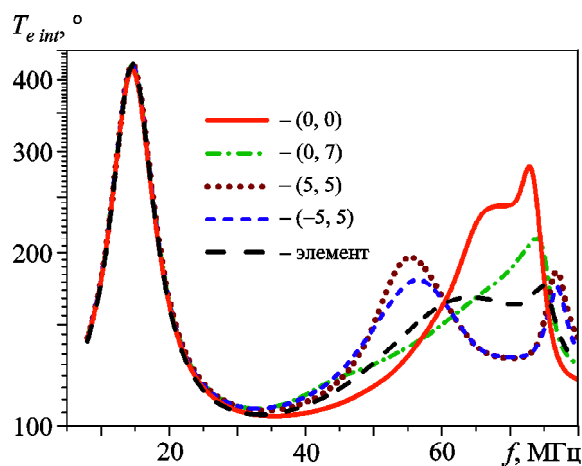


Рис. 4. Частотная зависимость эффективной внутренней температуры субрешетки АФАР ГУРТ для нескольких направлений луча

вместо них мы рассмотрим производный от T_{ext} параметр SND (8), который в совокупности с уже рассмотренной $T_{int}(f)$ не только дает полное о

ней представление, но и является более информативным с точки зрения оценки чувствительности АФАР радиотелескопа [18]. На рис. 5 приведены расчетные графики частотных зависимостей SND субрешетки АФАР ГУРТ для различных направлений луча.

На рис. 5, а приведено семейство кривых $SND(f)$ субрешетки для всех 213 возможных направлений ее луча в верхней полусфере (рис. 3), а рис. 5, б–г более подробно демонстрируют поведение $SND(f)$ при сканировании луча субрешетки в плоскостях E , H и X . На рис. 5, а все кривые сгруппированы в пучок, ширина которого изменяется от 3 дБ вблизи нижней границы данного диапазона частот до 5 дБ в центре. В нижней половине диапазона этот пучок структурирован так, что кривая, относящаяся к нормальному лучу, огибает его сверху, а кривые, относящиеся к наиболее наклоненным лучам (5,6), (4,7), замыкают его внизу. В верхней части час-

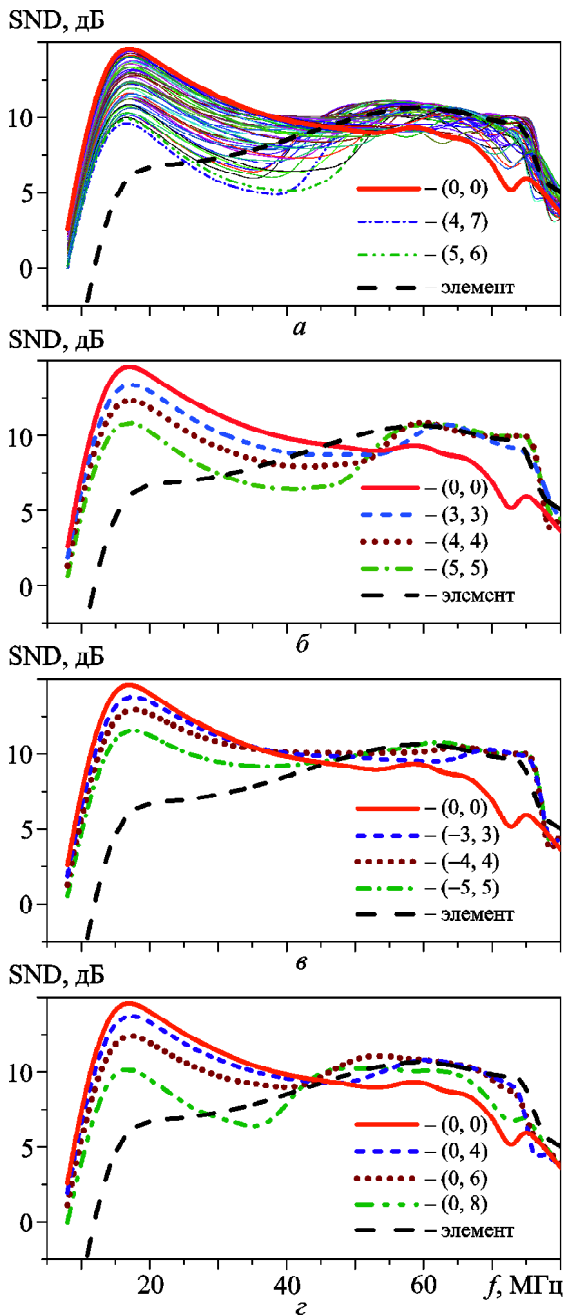


Рис. 5. Семейства частотных зависимостей SND АФАР ГУРТ для различных направлений ее луча при сканировании во всей верхней полусфере (а), а также в плоскостях E (б), H (в) и X (г)

тотного диапазона картина изменяется: сам пучок заметно сжимается, а кривая, относящаяся к нормальному лучу, опускается в самый его низ. Следует заметить, что локальный подъем внутренней шумовой температуры $T_{eint}(f)$ в окрестности 15 МГц, отчетливо заметный на рис. 4, обусловлен присутствием согласующей цепи на

входе МШУ [7, 13]. Еще в большей степени эта цепь повышает уровень принимаемого сигнала (и, следовательно, внешнего шума) на частотах ниже 15 МГц, поэтому вблизи пика $T_{eint}(f)$ значение SND субрешетки, как это следует из рис. 5, не только не уменьшается, но даже увеличивается.

Разброс кривых $SND(f)$ субрешетки для различных направлений луча объясняется влиянием межэлементных связей, ибо в предположении их отсутствия эта зависимость исчезает и $SND(f)$ субрешетки для всех лучей будет одинаковым, таким же, как у одиночного элемента (рис. 5, а). Это нетрудно показать, если в соответствующих расчетных формулах обнулить все недиагональные элементы матрицы собственных и взаимных сопротивлений Z , характеризующей взаимодействие элементов в субрешетке.

Обращает на себя внимание тот факт, что на частотах 8÷15 МГц наличие взаимных связей в субрешетке позволяет повысить ее SND на 5÷12 дБ (в зависимости от номера луча), что очень важно для улучшения ее чувствительности на этом участке диапазона, поскольку без них ее SND здесь был бы таким же низким, как у одиночного элемента. С увеличением частоты SND элемента растет и вблизи 40÷50 МГц он проходит через пучок кривых $SND(f)$ субрешетки. На рис. 5, г хорошо видно, как все кривые вблизи 44 МГц сходятся к одной точке, где SND элемента и всех лучей субрешетки практически совпадают. Выше 60 МГц SND субрешетки оказывается меньше, чем у элемента, но это не вызывает опасений, так как абсолютное его значение здесь достаточно велико. Полоса частот, в которой SND субрешетки не опускается ниже 6 дБ, в среднем составляет 65 МГц для всех лучей, кроме (5,6), (4,7), показанных на рис. 5, а прерывистыми линиями, и симметричных им, которые отклонены от нормали более чем на 70°. Она примерно на 8 МГц шире, чем аналогичная полоса частот у элемента АФАР.

4. Сравнение результатов расчета и эксперимента

Измерения шумовой температуры субрешетки АФАР ГУРТ проводились 21 мая 2015 г. на территории Радиоастрономической обсерватории им. С. Я. Брауде. Исследовалась одна из субрешеток

АФАР, работающая в режиме приема электромагнитных волн линейной поляризации. На рис. 6 приведена блок-схема измерительной установки, состоящая из исследуемой субрешетки, удаленного цифрового приемника ADR (Advanced Digital Receiver) [20] и фидера.

Фидер, соединяющий выход субрешетки (сечение γ) с входом ADR (сечение δ), выполняет не только свою основную функцию – канализацию принятого сигнала к удаленному приемнику, но еще функцию коррекции передаточной характеристики субрешетки для подавления внеполосных помех, а также функцию максимизации чувствительности и линейности цифрового приемника во всем рабочем диапазоне частот [2]. Поэтому в состав фидера, кроме отрезков коаксиального кабеля, входят также магистральные распределенные усилители, частотно-селективные устройства (фильтры) и частотно-зависимые аттенюаторы (эквалайзеры). Частотная характеристика нормированного коэффициента передачи фидера K_F показана на рис. 7.

Данная установка прошла испытания при исследованиях шумовой температуры элемента АФАР ГУРТ [7], показав при этом высокую степень пригодности для получения достоверных результатов измерений.

Сразу заметим, что цель экспериментальных исследований состояла не в измерении абсолютных шумовых температур субрешетки, а в определении соотношения между внешней и внутренней температурами шума на входе приемника.

В связи с этим измерения проводились в два этапа: на первом оценивалась внутренняя шумовая температура T_{int} субрешетки, а на втором – внешняя T_{ext} . Когда субрешетка работает в штатном режиме, на вход приемника поступает смесь внутренних и внешних шумов, характеризуемая системной шумовой температурой $T_{sys} = T_{int} + T_{ext}$, из которой выделить каждое слагаемое в чистом виде в процессе измерений практически невозможно. Поэтому на первом этапе вместо T_{int} измерялась температура шума T_{sc} субрешетки, у которой входные клеммы ДОС были отсоединены от клемм диполей и замкнуты накоротко. При исследовании элемента АФАР ГУРТ [7] было показано, что истинная температура его внутренних шумов T_{int} близка к шумовой температуре короткого замыкания T_{sc} и поэтому последняя может использоваться для достаточно точной ее оценки. Следует заметить, что расчетные значения T_{sc} субрешетки и ее элемента в точности совпадают, что нетрудно показать, заменив в (4) матрицу импедансов решетки диполей z матрицей импедансов короткозамыкателей $z_{sc} = -E$. На шумовую температуру T_{sc} не влияют ни состояние фазовращателей, задающих направления луча, ни взаимодействие диполей (поскольку они отключены), поэтому ее можно использовать в качестве опорной при сравнении результатов измерений.

На втором этапе измерялась системная шумовая температура субрешетки T_{sys} , которая совместно с уже найденной $T_{int} \approx T_{sc}$ позволяет

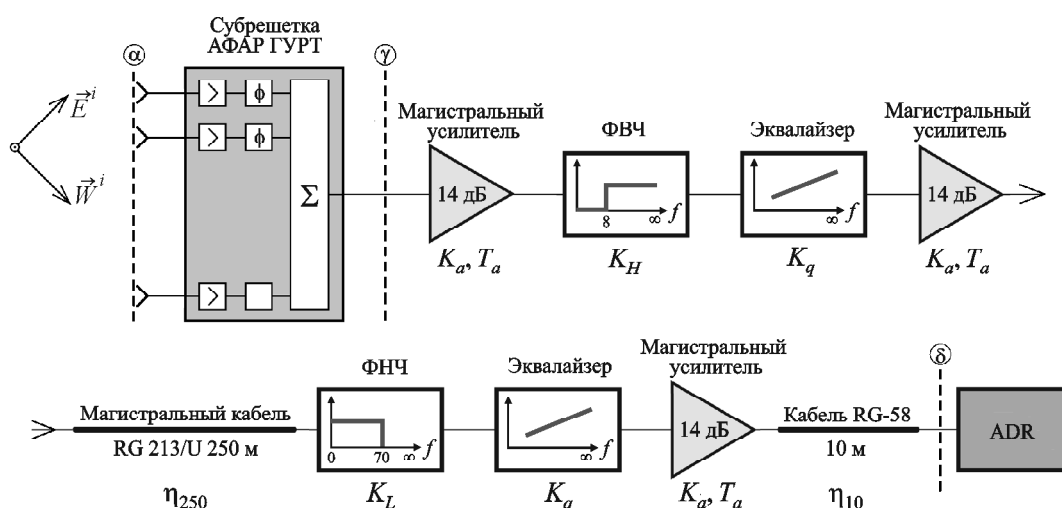


Рис. 6. Блок-схема измерительной установки

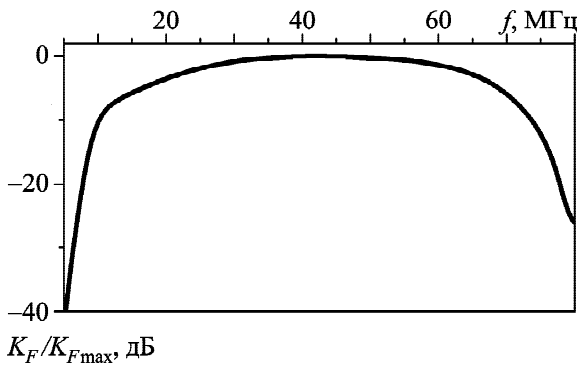


Рис. 7. Нормированный коэффициент передачи фидера

оценить температуру внешнего шума T_{ext} и параметр SND. Измерения T_{sys} выполнялись в диапазоне частот $8 \div 80$ МГц для всех направлений фазирования лучей субрешетки в плоскостях H , X и Y (рис. 3), в том числе и лучей, выходящих за пределы области видимости. Результаты измерений шумовых температур $T_{sys,sc}$ субрешетки АФАР ГУРТ на входе приемника представлены на рис. 8 (сплошные кривые) в нормированном виде. Для этих же положений луча была рассчитана системная шумовая температура T_{sys} субрешетки, а также шумовая температура короткого замыкания T_{sc} , которые затем были нормированы с помощью следующего соотношения:

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{sys,sc} &= 10 \log \left(\frac{T_{sys,sc} + T_{ADR}}{T_{norm}} \right) = \\ &= 10 \log \left(\frac{T_{sys,sc}}{T_{ADR}} + 1 \right) + \tilde{T}_{ADR}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $T_{ADR} = \tilde{T}_{ADR}/T_{norm}$, T_{ADR} и T_{norm} – температура шума приемника ADR и температура нормировки соответственно.

Значения T_{ADR} и T_{norm} выбирались так, чтобы нормированные расчетные значения температуры короткого замыкания \tilde{T}_{sc} субрешетки совпадали с ее экспериментальными значениями в двух точках – на частоте 80 МГц, где кривая $\tilde{T}_{sc}(f)$ опускается до минимума, и в середине диапазона на частоте 40 МГц. Результат совмещения этих кривых показан на рис. 8, а, где нижняя сплошная линия и пунктирная линия представляют экспериментальную и расчетную зависимости $\tilde{T}_{sc}(f)$ соответственно. Остальные кривые на всех панелях рис 8 демонстрируют экспери-

ментальные (сплошные линии) и расчетные (пунктирные линии) частотные зависимости нормированной системной шумовой температуры $\tilde{T}_{sys}(f)$ на выходе субрешетки, когда ее луч ориентирован в зенит (рис. 8, а), а также когда он занимает фиксированные положения при отклонении от зенита в плоскостях H (рис. 7, б, в, г) и X , Y (рис. 7, д, е, ж, з). При этом расчетные зависимости $\tilde{T}_{sys}(f)$ на каждом из этих рисунков представлены двумя кривыми, отличающимися значениями яркостной температуры фона T_{sky} . Для расчета верхней из них (штриховая линия) значения T_{sky} вычислялись по формуле (5), а для нижней (штрих-пунктирная линия) они брались вдвое меньшими с целью показать, как изменяются зависимости $\tilde{T}_{sys}(f)$ при суточных вариациях T_{sky} , размах которых, как показано в [15], составляет примерно 3 дБ при приеме фонового излучения на слабонаправленную антенну. Нормировка всех расчетных кривых $\tilde{T}_{sys}(f)$ выполнялась по формуле (9) с использованием найденных ранее значений T_{ADR} и T_{norm} .

На рис. 8, а наряду с упомянутыми выше графиками зависимости $\tilde{T}_{sc}(f)$ имеются еще две сплошные кривые, показывающие измеренные частотные зависимости системной шумовой температуры $\tilde{T}_{sys}^{(1)}(f)$ и $\tilde{T}_{sys}^{(2)}(f)$ субрешетки, луч которой ориентирован в зенит. Отличие $\tilde{T}_{sys}^{(1)}(f)$ от $\tilde{T}_{sys}^{(2)}(f)$ на рис. 8, а связано с тем, что их измерения выполнялись с разницей во времени в 12 ч, причем $\tilde{T}_{sys}^{(1)}(f)$ измерялась тогда, когда яркостная температура T_{sky} галактического фона была близка к максимальной, а $\tilde{T}_{sys}^{(2)}(f)$ – когда T_{sky} была близка к минимальной.

Как видно из рис. 8, расчетные и измеренные значения нормированных шумовых температур субрешетки, луч которой ориентирован в зенит, очень хорошо совпадают в большей части рабочего диапазона частот радиотелескопа. Заметные отличия между ними наблюдаются лишь на частотах $f < 20$ МГц, где имеются сильные сторонние помехи, принятая мощность которых создает добавку к галактическому фону. Эти помехи столь интенсивные, что проникают даже сквозь закороченные входы ДОС и, складываясь с собственным шумом субрешетки, несколько завышают показатели регистратора приемника при измерениях $\tilde{T}_{sc}(f)$ на нижних частотах.

На рис. 8 показаны также расчетные и экспериментальные частотные зависимости норми-

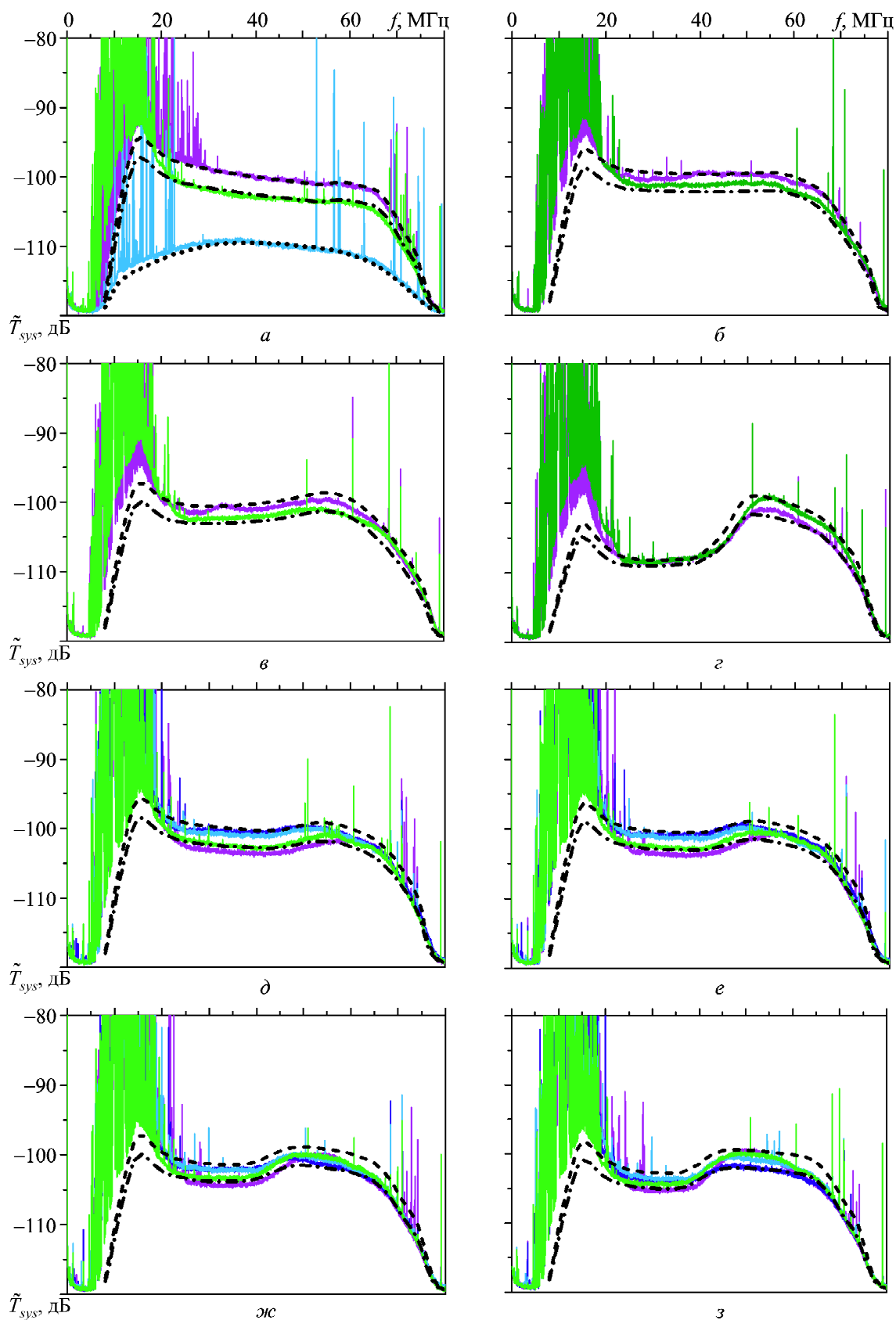


Рис. 8. Нормированная температура шума субрешетки АФАР ГУРТ на входе приемника при различных направлениях ее луча: *a* – (0,0); *б* – (–4,4); *в* – (–5,5); *г* – (–8,8); *д* – (0,5); *е* – (0,6); *ж* – (0,7); *з* – (0,8)

рованной системной шумовой температуры $\tilde{T}_{\text{sys}}(f)$ на выходе субрешетки для различных положений ее луча в плоскости H (рис. 8, б, в, г) и главных плоскостях X , Y (рис. 8, д, е, ж, з). При выборе графиков для иллюстрации мы отдавали предпочтение удаленным от нормали лучам, поскольку частотные зависимости шумовых температур субрешетки с близкими к нормали лучами мало отличаются от таковых для центрального луча. На каждую панель рис. 8 помещены две или четыре экспериментальные кривые (сплошные линии), соответствующие лучам в симметричных направлениях, для которых расчетные зависимости идентичны. В плоскости H (так же, как и в плоскости E) субрешетка имеет по два симметричных луча, поэтому на рис. 8, б показаны две кривые $\tilde{T}_{\text{sys}}(f)$, соответствующие лучам $(-4, 4)$ и $(4, -4)$, на рис. 8, в – лучам $(-5, 5)$ и $(5, -5)$, на рис. 8, г – лучам $(-8, 8)$ и $(8, -8)$. Все остальные лучи субрешетки имеют двойную симметрию относительно плоскостей E и H , поэтому на рис. 8, д, е, ж, з показаны по четыре экспериментальные кривые, соответствующие симметричным лучам, отклоненным в плоскостях X и Y . В частности, на рис. 8, д показаны две кривые $\tilde{T}_{\text{sys}}(f)$ для лучей $(0, 5)$, $(0, -5)$, $(5, 0)$ и $(-5, 0)$, на рис. 8, е – для лучей $(0, 6)$, $(0, -6)$, $(6, 0)$ и $(-6, 0)$, на рис. 8, ж – для лучей $(0, 7)$, $(0, -7)$, $(7, 0)$ и $(-7, 0)$, на рис. 8, з – для лучей $(0, 8)$, $(0, -8)$, $(8, 0)$ и $(-8, 0)$.

На панелях рис. 8 видны некоторые отличия экспериментальных кривых от расчетных, которые объясняются, прежде всего, отличием изотропной модели фонового излучения, принятой при расчетах, от реального распределения яркостной температуры галактического фона на небесной сфере. На самом деле фоновое излучение Галактики неоднородно, в ее полярных областях оно слабее, чем в изотропной модели, а в направлении диска сильнее. Поэтому при переключении луча реальная внешняя температура шума может заметно изменяться в зависимости от того, в какую область небесной сферы направлен луч. Этим же объясняется различие в экспериментальных зависимостях $\tilde{T}_{\text{sys}}(f)$ субрешетки для симметричных лучей, которые в случае изотропного фонового излучения должны совпадать.

Отдельно следует прокомментировать рис. 8, г, который построен для субрешетки, формирую-

щей лучи $(8, 8)$ и $(-8, -8)$, направления фазирования которых выходят далеко за область видимости (рис. 3). В этих случаях субрешетка принимает фоновое излучение в основном боковыми лепестками, конфигурация которых быстро изменяется с частотой. Хотя такой режим работы на практике не применяется, он интересен с точки зрения сравнения результатов расчета и измерений.

Исследуя приведенные графики, нетрудно установить, что все расчетные зависимости $\tilde{T}_{\text{sys}}(f)$ очень хорошо повторяют форму экспериментальных кривых, при этом их значения мало отличаются от измеренных в подавляющей части исследуемого диапазона частот, а заметные различия между ними в нижней части диапазона, скорее всего, связаны с влиянием интенсивных помех на результаты измерений. Это убедительно говорит о корректности разработанной теории и высоком качестве проведенных измерений.

5. Выводы

В работе проведены теоретические и экспериментальные исследования шумовых параметров субрешетки АФАР ГУРТ. Теоретические исследования выполнялись методом компьютерного моделирования с использованием ранее разработанной математической модели субрешетки [7], которая здесь была дополнена соотношениями, описывающими ее шумовые свойства. Усовершенствованная модель представляет собой каскадное соединение двух шумящих многополюсников, один из которых поставлен в соответствие решетке диполей, а второй – ДОС. Параметры решетки диполей, требуемые для построения ее модели, определялись с помощью компьютерного электродинамического моделирования, корректно учитывающего сложную форму диполей и взаимодействие их в решетке, а также присутствие подстилающей поверхности в виде частично проводящей земли, а параметры МШУ, входящих в состав ДОС, – с привлечением хорошо зарекомендовавших себя программ компьютерного схемотехнического моделирования. На базе этой модели разработана методика расчета внутренней и внешней шумовых температур субрешетки, необходимых для оценки ее чувствительности. С помощью этой методики выполнен численный анализ частотных зависимостей внутренней и

внешней шумовых температур субрешетки АФАР ГУРТ в диапазоне $8 \div 80$ МГц для всех возможных положений ее луча. В результате анализа установлено, что температура внешнего шума на выходе субрешетки заметно превышает температуру внутреннего шума во всем рабочем диапазоне частот, а ширина полосы частот, в которой значение этого превышения не опускается ниже 6 дБ, составляет примерно 65 МГц для всех лучей в конусе сканирования 140° . Для проверки результатов численных расчетов были проведены натурные измерения температур внутренних и внешних шумов субрешетки для различных положений ее луча в исследуемом диапазоне частот, которые полностью подтвердили результаты численных исследований и убедительно доказали, что данная субрешетка может эффективно использоваться для радиоастрономических наблюдений как в составе АФАР, так и в качестве самостоятельной антенной системы радиотелескопа ГУРТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Konvalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov N., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhok I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecaheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., and Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 42, Is. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
- Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н., Токарский П. Л., Захаренко В. В., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Степкин С. В., Гридин А. А., Квасов Г. В., Колядин В. Л., Мельник В. Н., Доровский В. В., Калинин Н. Н., Литвиненко Г. В., Зарка Ф., Денис Л., Жирар Ж., Рукер Х. О., Панченко М., Станиславский А. А., Христенко А. Д., Муха Д. В., Резниченко А. М., Лисаченко В. М., Борцов В. В., Браженко А. И., Васильева Я. Ю., Скорик А. А., Шевцова А. И., Милостная К. Ю. Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2016. Т. 21, № 2. С. 83–131. DOI: 10.15407/rpra21.02.083
- Van Haarlem M. P., Wise M. W., Gunst A. W., Heald G., McKean J. P., Hessels J. W. T., de Bruyn A. G., Nijboer R., Swinbank J., Fallows R., Brentjens M., Nelles A., Beck R., Falcke H., Fender R., Hörandel J., Koopmans L. V. E., Mann G., Miley G., Röttgering H., Stappers B. W., Wijers R. A. M. J., Zaroubi S., van den Akker M., Alexov A., Anderson J., Anderson K., van Ardenne A., Arts M., Asgekar A., Avruch I. M., Batejat F., Bähren L., Bell M. E., Bell M. R., van Bemmel I., Bennaema P., Bentum M. J., Bernardi G., Best P., Birzan L., Bonafede A., Boonstra A.-J., Braun R., Bregman J., Breitling F., van de Brink R. H., Broderick J., Broekema P. C., Brouw W. N., Brügger M., Butcher H. R., van Cappellen W., Ciardi B., Coenen T., Conway J., Coolen A., Corstanje A., Damstra S., Davies O., Deller A. T., Dettmar R.-J., van Diepen G., Dijkstra K., Donker P., Doorduyn A., Dromer J., Drost M., van Duin A., Eislöffel J., van Enst J., Ferrari C., Frieswijk W., Gankema H., Garrett M. A., de Gasperin F., Gerbers M., de Geus E., Griebmeier J.-M., Grit T., Gruppen P., Hamaker J. P., Hassall T., Hoefl M., Holties H. A., Horneffer A., van der Horst A., van Houwelingen A., Huijgen A., Iacobelli M., Intema H., Jackson N., Jelic V., de Jong A., Juette E., Kant D., Karastergiou A., Koers A., Kollen H., Kondratiev V. I., Kooistra E., Koopman Y., Koster A., Kuniyoshi M., Kramer M., Kuper G., Lambropoulos P., Law C., van Leeuwen J., Lemaitre J., Loose M., Maat P., Macario G., Markoff S., Masters J., McFadden R. A., McKay-Bukowski D., Meijering H., Meulman H., Mevius M., Middelberg E., Millenaar R., Miller-Jones J. C. A., Mohan R. N., Mol J. D., Morawietz J., Morganti R., Mulcahy D. D., Mulder E., Munk H., Nieuwenhuis L., van Nieuwpoort R., Noordam J. E., Norden M., Noutsos A., Offringa A. R., Olofsson H., Omar A., Orrú E., Overeem R., Paas H., Pandey-Pommier M., Pandey V. N., Pizzo R., Polatidis A., Rafferty D., Rawlings S., Reich W., de Reijer J.-P., Reitsma J., Renting G. A., Riemers P., Rol E., Romein J. W., Roosjen J., Ruiter M., Scaife A., van der Schaaf K., Scheers B., Schellart P., Schoenmakers A., Schoonderbeek G., Serylak M., Shulevski A., Sluman J., Smirnov O., Sobey C., Spreeuw H., Steinmetz M., Sterks C. G. M., Stiepel H.-J., Stuurwold K., Tagger M., Tang Y., Tasse C., Thomas I., Thoudam S., Toribio M. C., van der Tol B., Usov O., van Veelen M., van der Veen A.-J., ter Veen S., Verbiest J. P. W., Vermeulen R., Vermaas N., Vocks C., Vogt C., de Vos M., van der Wal E., van Weeren R., Weggemans H., Weltevred P., White S., Wijnholds S. J., Wilhelmsson T., Wucknitz O., Yatawatta S., Zarka P., Zensus A., and van Zwieten J. LOFAR: the low-frequency array. *Astron. Astrophys.* 2013. Vol. 556. id. A2. DOI: 10.1051/0004-6361/201220873
- Ellingson S. W., Taylor G. B., Craig J., Hartman J., Howell J., Wolfe C. N., Clarke T. E., Hicks B. C., Kassim N. E., Ray P. S., Rickard L. J., Schinzel F. K., and Weiler K. W. The LWA1 Radio Telescope. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2013. Vol. 61, No. 5. P. 2540–2549. DOI: 10.1109/TAP.2013.2242826
- Sutinjo A. T., Colegate T. M., Wayth R. B., Hall P. J., de Lera Acedo E., Booter T., Faulkner A. J., Feng L., Hur-

- ley-Walker N., Juswady B., Padhi S. K., Razavi-Ghods N., Sokolowski M., Tingay S. J., and Bij de Vaate J. G. Characterization of a Low-Frequency Radio Astronomy Prototype Array in Western Australia. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2015. Vol. 63, No. 12. P. 5433–5442. DOI: 10.1109/TAP.2015.2487504
6. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Gridin A. A., Tokarsky P. L., and Yerin S. N. UWB Active Antenna Array for Low Frequency Radio Astronomy. *Proc. of the VIth Intn. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'12)*, 17–21 Sept. 2012. Sevastopol, Ukraine. 2012. P. 39–43. DOI: 10.1109/UWBUSIS.2012.6379725
7. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., Ерин С. Н. Анализ параметров активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2015. Т. 20, № 2. С. 142–153. DOI: 10.15407/rpra20.02.142
8. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н. Чувствительность элемента активной ФАР радиотелескопа ГУРТ. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2016. Т. 21, № 1. С. 48–57. DOI: 10.15407/rpra21.01.048
9. Сазонов Д. М. *Многоэлементные антенные системы. Матричный подход*. Москва: Радиотехника, 2015. 144 с.
10. Токарский П. Л. Матричная модель диссипативной антенной решетки. *Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб.* Харьков: ХНУРЭ, 2006. Вып. 146. С. 156–170.
11. Бабак Л. И. Определение шумовых характеристик СВЧ-цепей. *Радиотехника и электроника*. 1980. Т. 25, №11. С. 2380–2384.
12. Bosma H. *On the Theory of Linear Noisy Systems*. Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven, 1967. 194 p. DOI: 10.6100/IR109175
13. Токарский П. Л. Применение волновых матриц для анализа шумов диссипативных антенных решеток. *Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб.* Харьков: ХНУРЭ, 2001. Вып. 122. С. 56–58.
14. Разевиг В. Д., Потапов Ю. В., Курушин А. А. *Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office*. Под ред. В. Д. Разевига. Москва: Солон-Пресс, 2003. 496 с.
15. Крымкин В. В. Спектр низкочастотного излучения фона. *Известия вузов. Радиофизика*. 1971. Т. 24, № 2. С. 199–203.
16. Warnick K. F., Ivashina M. V., Maaskant R., and Woestenburg B. Unified Definitions of Efficiencies and System Noise Temperature for Receiving Antenna Arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2010. Vol. 58, No. 6. P. 2121–2125. DOI: 10.1109/TAP.2010.2046859
17. Ivashina M. V., Maaskant R., and Woestenburg B. Equivalent System Representation to Model the Beam Sensitivity of Receiving Antenna Arrays. *IEEE Antenn. Wireless Propag. Lett.* 2008. Vol. 7. P. 733–737. DOI: 10.1109/LAWP.2008.2006917
18. Hicks B. C., Paravastu-Dalal N., Stewart K. P., Erickson W. C., Ray P. S., Kassim N. E., Burns S., Clarke T., Schmitt H., Craig J., Hartman J., and Weiler K. W. A Wide-Band, Active Antenna System for Long Wavelength Radio Astronomy. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2012. Vol. 124, No. 920. P. 1090–1104. DOI: 10.1086/668121
19. Erickson B. *Integration Times*. Long Wavelength Array (LWA) Memo Series. 2005. URL: <http://www.phys.unm.edu/~lwa/memos/memo/lwa0023.pdf> (дата обращения: 12.01.2018).
20. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovskyy V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., and Griebmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. Vol. 5, Is. 4. id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105

REFERENCES

- KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEP-KIN, S., TOKARSKY, P., MELNIK, V., KALINICHEN-KO, N., STANISLAVSKY, A., KOLIADIN, V., SHEPE-LEV, V., DOROVSKYY, V., RYABOV, V., KOVAL, A., BUBNOV, I., YERIN, S., GRIDIN, A., KULISHEN-KO, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHEN-KO, V., REZNIK, A., KVASOV, G., MUKHA, D., LIT-VINENKO, G., KHRISTENKO, A., SHEVCHENKO, V. V., SHEVCHENKO, V. A., BELOV, A., RUDAVIN, E., VA-SYLIEVA, I., MIROSHNICHENKO, A., VASILEN-KO, N., OLYAK, M., MYLOSTNA, K., SKORYK, A., SHEVTSOVA, A., PLAKHOV, M., KRAVTSOV, I., VOL-VACH, Y., LYTVINENKO, O., SHEVCHUK, N., ZHOUK, I., BOVKUN, V., ANTONOV, A., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BU-LAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., BRAZHEN-KO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHIN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEBMEIER, J.-M., TAG-GER, M., GIRARD, J., CHARRIER, D., BRIAND, C. and MANN, G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* vol. 42, is. 1, pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
- KONOVALENKO, A. A., YERIN, S. M., BUBNOV, I. N., TOKARSKY, P. L., ZAKHARENKO, V. V., ULYANOV, O. M., SIDORCHUK, M. A., STEP-KIN, S. V., GRIDIN, A. O., KVASOV, G. V., KOLIADIN, V. L., MELNIK, V. M., DOROVSKYY, V. V., KALINICHENKO, M. M., LITVINENKO, G. V., ZARKA, P., DENIS, L., GI-RARD, J., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., STA-NISLAVSKY, A. A., KHRISTENKO, A. D., MUKHA, D. V., REZNICHENKO, O. M., LISACHENKO, V. N., BOR-TSOV, V. V., BRAZHENKO, A. I., VASYLIEVA, I. Y., SKORYK, A. O., SHEVTSOVA, A. I. and MYLOST-NA, K. Y., 2016. Astrophysical studies with small low-

- frequency radio telescopes of new generation. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 21, no. 2, pp. 83–131 (in Russian). DOI: 10.15407/rpra21.02.083
3. VAN HAARLEM, M. P., WISE, M. W., GUNST, A. W., HEALD, G., MCKEAN, J. P., HESSELS, J. W. T., DE BRUYN, A. G., NIJBOER, R., SWINBANK, J., FALLOWS, R., BRENTJENS, M., NELLES, A., BECK, R., FALCKE, H., FENDER, R., HÖRANDEL, J., KOOPMANS, L. V. E., MANN, G., MILEY, G., RÖTTGERING, H., STAPPERS, B. W., WIJERS, R. A. M. J., ZAROUBI, S., VAN DEN AKKER, M., ALEXOV, A., ANDERSON, J., ANDERSON, K., VAN ARDENNE, A., ARTS, M., ASGEKAR, A., AVRUCH, I. M., BATEJAT, F., BÄHREN, L., BELL, M. E., BELL, M. R., VAN BEMMEL, I., BENNEMA, P., BENTUM, M. J., BERNARDI, G., BEST, P., BÍRZAN, L., BONAFEDDE, A., BOONSTRA, A.-J., BRAUN, R., BREGMAN, J., BREITLING, F., VAN DE BRINK, R. H., BRODERICK, J., BROEKEMA, P. C., BROUW, W. N., BRÜGGEN, M., BUTCHER, H. R., VAN CAPPELLEN, W., CIARDI, B., COENEN, T., CONWAY, J., COOLEN, A., CORSTANJE, A., DAMSTRA, S., DAVIES, O., DELLER, A. T., DETTMAR, R.-J., VAN DIEPEN, G., DIJKSTRA, K., DONKER, P., DOORDUIN, A., DROMER, J., DROST, M., VAN DUIN, A., EISLÖFFEL, J., VAN ENST, J., FERRARI, C., FRIESWIJK, W., GANKEMA, H., GARRETT, M. A., DE GASPERIN, F., GERBERS, M., DE GEUS, E., GRIEBMEIER, J.-M., GRIT, T., GRUPPEN, P., HAMAKER, J. P., HASSALL, T., HOEFT, M., HOLTIES, H. A., HORNEFFER, A., VAN DER HORST, A., VAN HOUWELINGEN, A., HUIJGEN, A., IACOBELLI, M., INTEMA, H., JACKSON, N., JELIC, V., DE JONG, A., JUETTE, E., KANT, D., KARASTERGIOU, A., KOERS, A., KOLLEN, H., KONDRATIEV, V. I., KOOISTRA, E., KOOPMAN, Y., KOSTER, A., KUNIYOSHI, M., KRAMER, M., KUPER, G., LAMBROPOULOS, P., LAW, C., VAN LEEUWEN, J., LEMAITRE, J., LOOSE, M., MAAT, P., MACARIO, G., MARKOFF, S., MASTERS, J., MCFADDEN, R. A., MCKAY-BUKOWSKI, D., MEIJERING, H., MEULMAN, H., MEVIUS, M., MIDDELBERG, E., MILLENAAR, R., MILLER-JONES, J. C. A., MOHAN, R. N., MOL, J. D., MORAWIETZ, J., MORGANTI, R., MULCAHY, D. D., MULDER, E., MUNK, H., NIEUWENHUIS, L., VAN NIEUWPOORT, R., NOORDAM, J. E., NORDEN, M., NOUTSOS, A., OFFRINGA, A. R., OLOFSSON, H., OMAR, A., ORRÚ, E., OVEREEM, R., PAAS, H., PANDEY-POMMIER, M., PANDEY, V. N., PIZZO, R., POLATIDIS, A., RAFFERTY, D., RAWLINGS, S., REICH, W., DE REIJER, J.-P., REITSMA, J., RENTING, G. A., RIEMERSV, P., ROL, E., ROMEIN, J. W., ROOSJEN, J., RUITER, M., SCAIFE, A., VAN DER SCHAAF, K., SCHEERS, B., SCHELLARTV, P., SCHOENMAKERS, A., SCHOONDERBEEK, G., SERYLAK, M., SHULEVSKI, A., SLUMAN, J., SMIRNOV, O., SOBEY, C., SPREEUW, H., STEINMETZ, M., STERKS, C. G. M., STIEPEL, H.-J., STUURWOLD, K., TAGGER, M., TANG, Y., TASSE, C., THOMAS, I., THOUDAM, S., TORIBIO, M. C., VAN DER TOL, B., USOV, O., VAN VEELLEN, M., VAN DER VEEN, A.-J., TER VEEN, S., VERBIEST, J. P. W., VERMEULEN, R., VERMAAS, N., VOCKS, C., VOGT, C., DE VOS, M., VAN DER WAL, E., VAN WEEREN, R., WEGGEMANS, H., WELTEVREDE, P., WHITE, S., WIJNHOLDS, S. J., WILHELMS-SON, T., WUCKNITZ, O., YATAWATTA, S., ZAR- KA, P., ZENSUS, A. and VAN ZWIETEN, J., 2013. LOFAR: the low-frequency array. *Astron. Astrophys.* vol. 556, id. A2. DOI:10.1051/0004-6361/201220873
 4. ELLINGSON, S. W., TAYLOR, G. B., CRAIG, J., HARTMAN, J., DOWELL, J., WOLFE, C. N., CLARKE, T. E., HICKS, B. C., KASSIM, N. E., RAY, P. S., RICKARD, L. J., SCHINZEL, F. K. and WEILER, K. W., 2013. The LWAI Radio Telescope. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 61, no. 5, pp. 2540–2549. DOI: 10.1109/TAP.2013.2242826
 5. SUTINJO, A. T., COLEGATE, T. M., WAYTH, R. B., HALL, P. J., DE LERA ACEDO, E., BOOLER, T., FAULKNER, A. J., FENG, L., HURLEY-WALKER, N., JUSWARDY, B., PADHI, S. K., RAZAVI-GHODS, N., SOKOLOWSKI, M., TINGAY, S. J. and BIJ DE VAA- TE, J. G., 2015. Characterization of a Low-Frequency Radio Astronomy Prototype Array in Western Australia. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 63, no. 12, pp. 5433–5442. DOI: 10.1109/TAP.2015.2487504
 6. KONOVALENKO, A. A., FALKOVICH, I. S., GRIDIN, A. A., TOKARSKY, P. L. and YERIN, S. N., 2012. UWB Active Antenna Array for Low Frequency Radio Astronomy. In: *6th Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'12) Conference Proceedings*. 17–21 Sept. 2012, Sevastopol, Ukraine, pp. 39–43. DOI: 10.1109/UWBUSIS.2012.6379725
 7. TOKARSKY, P. L., KONOVALENKO, A. A. and YE- RIN, S. N., 2015. Analysis of Active Phased Antenna Array Parameters for the GURT Radio Telescope. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 20, no. 2, pp. 142–153 (in Russian). DOI: 10.15407/rpra20.02.142
 8. TOKARSKY, P. L., KONOVALENKO, A. A., YERIN, S. M. and BUBNOV, I. N., 2016. Sensitivity of Active Phased Antenna Array Element of GURT Radio Telescope. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 21, no. 1, pp. 48–57 (in Russian). DOI: 10.15407/rpra21.01.048
 9. SAZONOV, D. M., 2015. *Multielement antenna systems. The matrix approach*. Moscow, Russia: Radiotekhnika Publ. (in Russian).
 10. TOKARSKY, P. L., 2007. Matrix Theory of Dissipative Antenna Arrays. In: *6th Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT'07) Conference Proceedings*. 17–21 Sept. 2007, Sevastopol, Ukraine, pp. 87–92. DOI: 10.1109/ICATT.2007.4425122
 11. BABAK, L. I., 1980. Determination of Microwave Cir- cuits Noise Characteristics. *Radiotekhnika i Elertronika*. vol. 25, no. 11, pp. 2380–2384 (in Russian).
 12. BOSMA, H., 1967. *On the Theory of Linear Noisy Sys- tems*. Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven. DOI: 10.6100/IR109175
 13. TOKARSKY, P. L., 2002. Wave Matrices in the Analysis of Noises of Dissipative Antenna Arrays. *Telecommun. Radio Eng.* vol. 57, no. 6-7, pp. 47–50. DOI: 10.1615/ TelecomRadEng.v57.i6-7.30
 14. RAZEVIK, V. D. (ed.), POTAPOV, Y. V. and KURU- SHIN, A. A., 2003. *Microwave devices design using Mi- crowave Office software*. Moscow, Russia: Solon-Press Publ. (in Russian).

15. KRYMKIN, V. V., 1971. The spectrum of background low frequency radio emission. *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 14, is. 2, pp. 161–164. DOI: 10.1007/BF01031395
16. WARNICK, K. F., IVASHINA, M. V., MAASKANT, R. and WOESTENBURG, B., 2010. Unified Definitions of Efficiencies and System Noise Temperature for Receiving Antenna Arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 58, no. 6, pp. 2121–2125. DOI: 10.1109/TAP.2010.2046859
17. IVASHINA, M. V., MAASKANT, R. and WOESTENBURG, B., 2008. Equivalent System Representation to Model the Beam Sensitivity of Receiving Antenna Arrays. *IEEE Antenn. Wireless Propag. Lett.* vol. 7, pp. 733–737. DOI: 10.1109/LAWP.2008.2006917
18. HICKS, B. C., PARAVASTU-DALAL, N., STEWART, K. P., ERICKSON, W. C., RAY, P. S., KASSIM, N. E., BURNS, S., CLARKE, T., SCHMITT, H., CRAIG, J., HARTMAN, J. and WEILER, K. W., 2012. A Wide-Band, Active Antenna System for Long Wavelength Radio Astronomy. *Publ. Astron. Soc. Pac.* vol. 124, no. 920, pp. 1090–1104. DOI: 10.1086/668121
19. ERICKSON, B., 2005. *Integration Times* [online]. Long Wavelength Array (LWA) Memo Series. [viewed 12 January 2018]. Available from: <http://www.phys.unm.edu/~lwa/memos/memo/lwa0023.pdf>
20. ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPIN, S., KO-LIADIN, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., DOROVSKYY, V., SHEPELEV, V., BUBNOV, I., YERIN, S., MELNIK, V., KOVAL, A., SHEVCHUK, N., VASYLIEVA, I., MYLOSTNA, K., SHEVTSOVA, A., SKORYK, A., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., PLAKHOV, M., VASILENKO, N., VASYLKIVSKYI, Y., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., RYABOV, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHYN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A. and GRIEBMEIER, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* vol. 5, is. 4, id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105

P. L. Tokarsky, A. A. Konovalenko, S. N. Yerin, and I. N. Bubnov

Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

NOISE TEMPERATURE OF THE ACTIVE PHASED ARRAY OF THE GURT RADIO TELESCOPE

Purpose: Theoretical and experimental investigations of noise temperature of a subarray being a part of the active phased array for the GURT – a low frequency radio telescope of new generation.

Design/methodology/approach: A mathematical model of the active phased array is developed in the form of a cascade connection of two noisy multiport networks, one of which is associated with the dipole array antenna placed over imperfect ground, and the other with the beam-forming network. The electrical parameters of these multiport networks are described by the scattering matrices, and the noise parameters – by the covariance matrix of the spectral densities of noise waves. The calculation expressions are obtained which allow analyzing the GURT subarray noise temperature with correct account for all internal noise sources and their mutual correlation which is caused by interaction of dipoles in the array.

Findings: Numerical and experimental studies of the noise temperature at the subarray output of the GURT active phased antenna array have been performed. These studies made it possible to estimate the relation between the external and internal noise temperatures in a wide frequency range from 8 to 80 MHz when scanning the subarray beam in the upper hemisphere. It is shown that the external noise temperature at the subarray output is more than 6 dB higher than the internal one in the bandwidth of about 65 MHz. Good agreement between the results of calculation and experiment is obtained, that validates the developed model of the GURT subarray and the effectiveness of the proposed technique for numerical analysis of its parameters.

Conclusions: The studies described here confirm the possibility of effective use of this subarray as the base cell of a large phased antenna array for the low frequency radio telescope, as well as the standalone antenna of the radio telescope when radio astronomical observations do not require high angular resolution. The results of this work can be useful in the development and studies of active phased antenna arrays for the decimeter and meter wave ranges.

Key words: radio telescope, active phased antenna array, subarray, beam scanning, noise temperature, scattering matrix, covariance matrix

П. Л. Токарський, О. О. Коноваленко, С. М. Єрін, І. М. Бубнов

Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

ШУМОВА ТЕМПЕРАТУРА АКТИВНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ РАДІОТЕЛЕСКОПА ГУРТ

Предмет і мета роботи: Теоретичні й експериментальні дослідження шумової температури субрешітки активної фазованої антенної решітки (АФАР) низькочастотного радіотелескопа нового покоління ГУРТ.

Методи та методологія: Розроблено математичну модель АФАР у вигляді каскадного з'єднання двох шумних багатополосників, один з яких поставлено у відповідність решітці диполів над реальним ґрунтом, а інший – діаграмоутворювальної схемі. Електричні параметри цих багатополосників описуються матрицями розсіяння, а шумові – коваріаційними матрицями спектральних густин шумових хвиль. Одержано розрахункові співвідношення, які дозволяють викону-

вати аналіз повної шумової температури субрешітки АФАР радіотелескопа ГУРТ із коректним урахуванням усіх наявних у ній джерел шуму та їх взаємної кореляції, зумовленої взаємодією диполів у решітці.

Результати: Виконано числові й експериментальні дослідження шумової температури на виході субрешітки АФАР радіотелескопа ГУРТ, які дозволили оцінити співвідношення між температурами зовнішніх і власних шумів у робочому діапазоні частот від 8 до 80 МГц при скануванні променя у верхній півсфері. Показано, що зовнішня шумова температура субрешітки перевищує на понад 6 дБ власну у смузі частот шириною близько 65 МГц. Отримано хороший збіг результатів розрахунків і експерименту, що підтверджує коректність розробленої моделі субрешітки й ефективності запропонованої методики числового аналізу її параметрів.

Висновок: Дослідження, виконані в роботі, підтверджують можливість ефективного використання даної субрешітки як базової комірки АФАР низькочастотного радіотелескопа, а у випадках, коли радіоастрономічні спостереження не потребують високого кутового розрізнення, як самостійної антени радіотелескопа. Результати цієї роботи можуть бути корисними у розробці й дослідженнях АФАР декаметрового та метрового діапазонів хвиль.

Ключові слова: радіотелескоп, активна фазована антенна решітка, сканування променя, шумова температура, матриця розсіяння, коваріаційна матриця

Статья поступила в редакцию 15.01.2018