

АНТЕННЫ, ВОЛНОВОДНАЯ И КВАЗИОПТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.396.677.494:
621.372.852.2

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

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

ДИАГРАММООБРАЗУЮЩИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ СЕКЦИИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ РАДИОТЕЛЕСКОПА ГУРТ ДЕКАМЕТРОВОГО И МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ ВОЛН

Представлено диаграммообразующее устройство для 5×5 -элементной секции приемной фазированной антенной решетки нового радиотелескопа ГУРТ, предназначенного для работы в диапазоне частот $10 \div 70$ МГц. Устройство состоит из шести идентичных модулей, каждый из которых содержит равноплечий сумматор $5:1$ с подключенными к его входам дискретными фазовращателями на переключаемых линиях временной задержки. Пять таких модулей суммируют сигналы элементов внутри рядов секции фазированной антенной решетки, а шестой собирает суммированные сигналы рядов. Описан принцип работы диаграммообразующего модуля, приведены результаты его компьютерного моделирования и измерения основных его характеристик. Проведена оценка влияния погрешностей изготовления отрезков линий задержки на энергетические параметры секции и определены допуски на их длины.

Ключевые слова: фазовращатель, диаграммообразующее устройство, фазированная антенная решетка, радиотелескоп

1. Введение

Современный этап развития радиотехнических систем характеризуется использованием широкополосных и сверхширокополосных сигналов, что позволяет существенно улучшить показатели качества систем. Такие тенденции не обошли и радиоастрономию, где увеличение полосы принимаемого радиотелескопом сигнала внеземного источника радиоизлучения позволяет заметно повысить информативность исследований [1]. В особой мере это касается наблюдений транзитных явлений в космосе, таких как излучение пульсаров, вспышек на Солнце, декаметрового излучения Юпитера, грозových разрядов на Сатурне [2] и т. д. Поэтому в настоящее время в мире проектируются и сооружаются несколько сверхширокополосных радиотелескопов нового поколения, среди которых самые известные проекты LOFAR [3], LWA [4], LSS [5], SKA [6]

и ГУРТ [7]. В качестве приемных антенн в них используются активные фазированные антенные решетки (ФАР), предназначенные для работы в широком диапазоне частот с коэффициентом перекрытия $5 \div 8$. Эти решетки обычно формируются из отдельных секций, число элементов в которых для разных радиотелескопов колеблется от 19 до 96. На частотах до 100 МГц элементами решеток этих радиотелескопов обычно служат симметричные вибраторы различных модификаций с малошумящими антенными усилителями. Формирование диаграмм направленности (ДН) в таких ФАР может выполняться с использованием либо целиком цифровой технологии [3, 4], либо смешанной – аналого-цифровой [5, 7]. В первом случае сигнал оцифровывается на выходе каждого элемента решетки и подается в многоканальный цифровой приемник, представляющий собой, по сути, специализированный процессор для цифровой обработки сигналов. Во втором случае сигналы от элементов в каждой секции фазированы и суммируются

© С. Н. Ерин, П. Л. Токарский, А. А. Гридин, И. Н. Бубнов,
А. А. Коноваленко, И. С. Фалькович, А. П. Резник, 2014

аналоговым способом, а уже на выходах секций они оцифровываются и передаются в цифровой приемник, где подвергаются окончательной обработке.

ФАР строящегося в настоящее время радиотелескопа ГУРТ, предназначенного для работы в декаметровом и метровом диапазонах волн с коэффициентом перекрытия 7:1 (от 10 до 70 МГц), состоит из отдельных идентичных секций. Для формирования ДН ФАР здесь применяется аналого-цифровая технология. Внутри секции фазирование и суммирование сигналов осуществляется с помощью аналогового диаграммообразующего устройства (ДОУ). Похожее устройство применяется в ФАР радиотелескопа УТР-2 [8, 9], однако использовать его в радиотелескопе ГУРТ невозможно, поскольку диапазон его работы ограничен частотами 10 ÷ 30 МГц. В настоящей статье приводятся описание, результаты разработки и исследования многоканального фазовращателя-сумматора, выполненного в виде отдельного модуля, который является основным функциональным блоком ДОУ для секции ФАР радиотелескопа ГУРТ.

2. Описание диаграммообразующего модуля

Секция ФАР радиотелескопа ГУРТ представляет собой регулярную плоскую ФАР из 5×5 элементов, расположенных в узлах квадратной сетки с шагом $d = 3.75$ м на высоте $h = 1.6$ м от поверхности земли. Каждый элемент решетки состоит из двух взаимно перпендикулярных симметричных вибраторов сложной формы [7] и подключенных к их входам двух малошумящих высоколинейных усилителей [10]. Управление фазами элементов секции осуществляется по строчно-столбцовому принципу, при этом ее ДН для волн двух поляризаций формируются двумя одинаковыми ДОУ. Каждое ДОУ состоит из шести идентичных диаграммообразующих модулей (ДМ), пять из которых фазировать и суммируют сигналы внутри рядов секции (по одному модулю на каждый ряд), а шестой выполняет те же операции с сигналами, поступающими с выходов первых пяти модулей. ДМ предназначен для применения в трактах с волновым сопротивлением 50 Ом.

Схема высокочастотного тракта ДМ представлена на рис. 1. Прототипом при его разработке

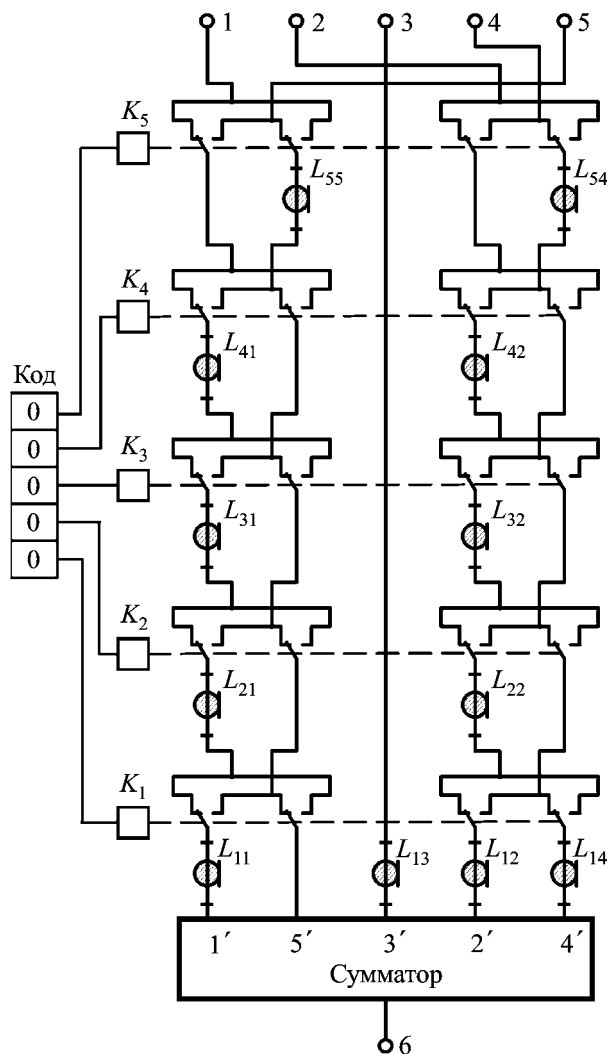


Рис. 1. Схема высокочастотного тракта ДМ

послужило упомянутое выше устройство [9], применяемое в радиотелескопе УТР-2. Новый модуль, как и его прототип, состоит из равноплечего сумматора 5:1 и пятиканального дискретного пятиразрядного фазовращателя (ФВ) на переключаемых отрезках линий временной задержки, применение которых в качестве фазосдвигающих элементов позволяет обеспечить независимость направления главного луча ДН решетки от частоты [11]. Линии задержки выполнены из коаксиального кабеля RG58U с волновым сопротивлением 50 Ом, достаточно низким погонным затуханием ($\alpha \approx 0.1$ дБ/м на частоте 50 МГц) и эффективной относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon'_e = 2.3$ (коэффициент укорочения длины волны $k_\lambda = 1.517$). Переключение ФВ осуществляется путем подачи токов на об-

мотки $K_1 - K_5$ пяти реле OMRON® G6K(U)-2F [12] с двумя группами переключающих контактов. Токи в обмотках формируются управляющей схемой на основе 5-битного кода управления. В исходном состоянии (отсутствие токов в обмотках всех реле – все разряды управляющего кода “0”) временные задержки во всех каналах ФВ одинаковы, при этом он формирует главный луч ДН решетки в направлении нормали к ее плоскости. Суммирование сигналов осуществляется делителем/сумматором мощности SCP-5-1 [13] в микромодульном исполнении, производимым фирмой Mini-Circuits®.

Рассмотрим принцип работы ДМ, собирающего сигналы одного ряда секции (рис. 1). В схеме ДМ можно выделить пять отдельных каналов, осуществляющих передачу сигналов от входов 1, 2, ..., 5 ДМ к входам 1', 2', ..., 5' сумматора. Пронумеруем входы ДМ и соответствующие им каналы таким образом, чтобы их порядковый номер совпадал с позиционным номером элемента решетки в пределах ряда. На схеме видно, что третий (средний) канал ДМ состоит из отрезка линии задержки фиксированной длины. Он является опорным и относительно него отсчитываются временные (и фазовые) задержки сигналов в остальных каналах. Все остальные каналы ДМ представляют собой линии временной задержки переменной длины, коммутируемые переключателями, поэтому являются, по сути, дискретными пятиразрядными ФВ. С целью минимизации числа линий задержки каналы ДМ, подключенные к элементам ряда секции, симметрично отстоящим от ее центра, сгруппированы попарно – первый с пятым и второй с четвертым. Каждая пара каналов в одном разряде ФВ имеет общее реле, которое переключает совместно используемые отрезки кабеля из одного канала в другой. Отрезки линии задержки, переключаемые в паре каналов (1, 5), имеют вдвое большую длину, чем в паре (2, 4), поэтому при синхронной работе обоих реле в любом разряде ФВ в каналах 1, 2, ..., 5 создается линейное распределение временных задержек. При таких переключениях положение

фазового центра ряда решетки всегда совпадает с фазовым центром его среднего элемента, поскольку фаза его возбуждения остается неизменной.

В табл. 1 приведены расчетные длины L_{mn} отрезков кабеля, выполняющие функции линий задержки, включенных в m -й разряд n -го канала ДМ (рис. 1). Номер канала, указанный в таблице, соответствует состоянию реле при коде 00000.

Наименьшую длину имеет отрезок кабеля $L_{22} = 0.3$ м, который определяет минимальный дискрет временной задержки всего ФВ $\tau_{\min} = 1.518$ нс. На частоте 18.3 МГц, которая при настройке ФВ была выбрана в качестве опорной, значение τ_{\min} соответствует фазовому сдвигу 10° , т. е. отрезок кабеля длиной 3 см вносит фазовый сдвиг 1° . При таком дискрете τ_{\min} данный ФВ способен формировать 17 независимых линейных распределений временных задержек сигнала на входах элементов линейной решетки, каждое из которых характеризуется временным сдвигом между сигналами на входах соседних элементов $\Delta\tau_i = i\tau_{\min}$, где i – номер распределения, который изменяется от -8 до 8 . Каждое i -е распределение временных задержек в каналах ДМ обеспечивает синфазное сложение в сумматоре сигналов, наводимых в элементах решетки электромагнитной волной, приходящей из направления $\theta_{0i} = \arcsin(\Delta\tau_i c/d)$, где $c = 2.997925 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме. Это направление, часто называемое направлением фазирования антенной решетки, совпадает с главным максимумом множителя ее ДН. При изготовлении и настройке ДМ реальные длины линий временной задержки были (незначительно) подкорректированы для компенсации паразитных набегов фаз в остальных элементах трактов сигналов. В табл. 2 приведены все 17 направлений фазирования исследуемой секции решетки, которые может обеспечить данный ДМ. Здесь же приведены двоичные коды управления ФВ, соответствующие каждому из лучей решетки, а также разница в длине кабелей, подключенных к выходам соседних элементов решетки $\Delta L_i = \Delta\tau_i c/\sqrt{\epsilon_r}$.

Таблица 1. Расчетные длины отрезков кабеля линий задержки ДМ

mn	11	12	13	14	21	22	31	32	41	42	54	55
L_{mn} , м	0.6	2.7	4.8	2.4	0.6	0.3	1.2	0.6	2.4	1.2	4.8	2.4

Таблица 2. Направления фазирования антенной решетки, обеспечиваемые ДМ, и соответствующие им управляющие коды

i	0	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6	± 7	± 8
θ_{0i}	0°	$\pm 7^\circ$	$\pm 14^\circ$	$\pm 21.3^\circ$	$\pm 29^\circ$	$\pm 37.4^\circ$	$\pm 46.7^\circ$	$\pm 58.2^\circ$	$\pm 76.1^\circ$
Коды управления	00000	00001 10011	00010 10110	00111 10101	00100 11100	01101 11111	01010 11110	01001 11001	01000 11000
$\Delta L_i, \text{ м}$	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4

Таким образом, управляя состояниями реле в соответствии с приведенными в табл. 2 кодами, можно дискретно изменять направление главного лепестка множителя ряда решетки в секторе $\pm 76.3^\circ$ относительно направления зенита. Если учесть, что шестой модуль управляет фазами сигналов с выходов ДМ рядов секции, также создавая 17 прогрессивных фазовых распределений, нетрудно рассчитать, что все ДОУ способно создать 289 двумерных линейных фазовых распределений. Однако только 213 из них формируют такие ДН, у которых максимумы главных лепестков ($\theta_{0p}, \varphi_{0q}$) множителя решетки лежат в области реальных углов:

$$\theta_{0pq} = \arcsin\left(\tau_{\min} c \sqrt{p^2 + q^2} / d\right) \text{ при}$$

$$\tau_{\min} c \sqrt{p^2 + q^2} / d < 1;$$

$$\varphi_{0pq} = \arctg(q/p), \quad p, q = -8, -7, \dots, 8.$$

На рис. 2 показано расположение всех направлений фазирования секции решетки ($\theta_{0p}, \varphi_{0q}$) на плоскости θ, φ .

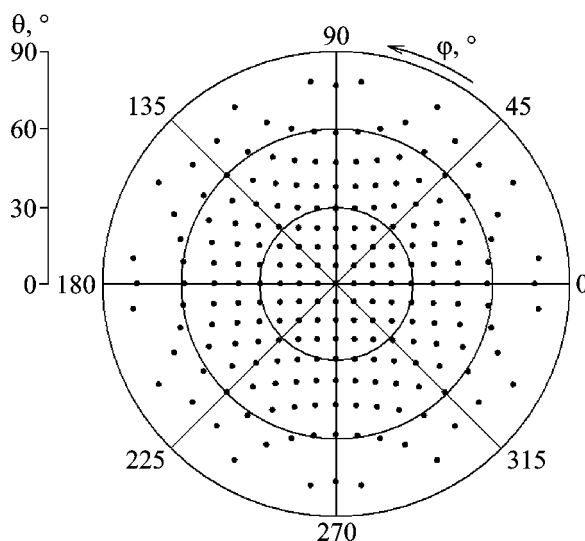


Рис. 2. Направления фазирования секции ФАР ГУРТ

3. Допуски на изготовление линий задержки

Отрезки линий задержки являются теми элементами конструкции ДМ, погрешности изготовления которых могут наиболее сильно влиять на фазовое распределение суммируемых сигналов и тем самым искажать ДН секции ФАР и снижать ее коэффициент направленного действия (КНД). Очевидно, что ФАР радиотелескопа имеет намного большую направленность, чем отдельная ее секция, поэтому искажения формы ДН секции, вызванные наличием небольших фазовых ошибок в ее элементах, не могут заметно ухудшить направленные свойства всей решетки. Куда более сильное влияние эти ошибки могут оказать на энергетические параметры секции, а значит и всей ФАР. К ним относятся коэффициент усиления, КНД и эффективная поверхность секции. Для оценки влияния погрешностей изготовления отрезков линий задержки на параметры секции можно выбрать любой из них, поскольку все они пропорциональны друг другу. В литературе по статистической теории антенных решеток чаще рассматривается КНД, что определило и наш выбор. Однако, тщательно проанализировав соотношения для оценки статистических характеристик КНД антенных решеток, приведенные в литературе [14–18], мы вынуждены были отказаться от их применения, поскольку все они получены с использованием множества упрощений и допущений, затрудняющих их применение в нашем случае. Поэтому для исследований статистических характеристик КНД мы выбрали метод Монте-Карло, который дает наиболее точные результаты при достаточно большом числе испытаний. Для упрощения расчетов будем считать, что элементами исследуемой секции решетки являются изотропные излучатели, расположенные над идеально проводящим экраном. Будем полагать также, что полная длина линии передачи между i -м излуча-

телем и соответствующим входом сумматора является суммой двух величин: $L_i = L_{0i} + \ell_i$, где L_{0i} – регулярная составляющая, зависящая от заданного направления фазирования (θ_0, φ_0) решетки, а ℓ_i – случайная составляющая, равномерно распределенная на интервале $[-\Delta_L, \Delta_L]$. Считая амплитудное распределение токов возбуждения элементов секции решетки равномерным ($I_i = 1$), запишем выражение для случайной ДН –

$$f(\theta, \varphi) = 2 \sin(k_0 h \cos \theta) \sum_{i=1}^N e^{j\Psi_{0i} + j\phi_i}, \quad (1)$$

а также для случайного КНД в направлении фазирования –

$$D(\theta_0, \varphi_0) = \frac{4\pi |f(\theta_0, \varphi_0)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} |f(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi}, \quad (2)$$

где $\Psi_{0i} = k_0 \sin \theta (x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi) - k_\lambda k_0 L_{0i}$, k_0 – волновое число свободного пространства, (x_i, y_i) – координаты i -го элемента решетки; $L_{0i} = \sin \theta_0 (x_i \cos \varphi_0 + y_i \sin \varphi_0)$; $\phi_i = k_\lambda k_0 \ell_i$ – случайная составляющая фазы тока i -го элемента решетки.

Анализ статистических характеристик КНД был выполнен в полосе частот $f = 10 \div 70$ МГц для различных значений длины интервала $2\Delta_L$. Для этого с помощью генератора случайных чисел на различных частотах рабочего диапазона для разных значений Δ_L создавалась выборка из $M = 1000$ реализаций фазового распределения токов возбуждения элементов решетки, которая с помощью формул (1), (2) преобразовывалась в последовательность M случайных значений КНД. Затем с помощью стандартных методов математической статистики рассчитывались гистограмма, математическое ожидание \bar{D} и среднеквадратическое отклонение σ_D случайного КНД для принятой модели секции решетки. Анализ гистограмм распределения плотности вероятности КНД показал, что при достаточно большом числе испытаний ($M \geq 500$) они хорошо аппроксимируются нормальным законом распределения. Результаты анализа показали также заметное падение относительного значения среднего КНД \bar{D}/D_0 с увеличением частоты, что было прогнозируемо. Таким образом, наибольшее снижение среднего КНД секции наблюдается на верхней частоте

рабочего диапазона $f = 70$ МГц. На рис. 3 сплошной линией показана зависимость нормированного среднего КНД \bar{D}/D_0 синфазно возбуждаемой секции на этой частоте в направлении зенита от предельного отклонения длины отрезка кабеля Δ_L , а пунктирной линией – аналогичная зависимость нормированного среднеквадратического отклонения КНД σ_D/D_0 .

Из рис. 3 следует, что в случае разброса длин кабелей в пределах $\Delta_L = \pm 0.1$ м средний КНД падает по отношению к номинальному не больше чем на 0.223 дБ ($\bar{D}/D_0 \geq 95\%$), а в случае $\Delta_L = \pm 0.14$ м – меньше чем на 0.4 дБ ($\bar{D}/D_0 > 90\%$). При этом относительное среднеквадратическое отклонение для этих интервалов разброса не будет превышать 1 и 2 % соответственно. Это вполне достижимые значения допусков, которые нетрудно выдержать при серийном изготовлении ДМ.

4. Результаты моделирования и эксперимента

Параметры созданного ДМ исследовались с помощью методов компьютерного моделирования и лабораторного эксперимента. Для построения компьютерной модели ДМ использовалась его схема (рис. 1), дополненная конструктивными и паразитными элементами, присутствующими в реальном устройстве. На рис. 4 показана типичная схема двух соседних каналов для одного разряда ФВ, дополненная отрезками несимметричной полосковой линии на плате ДМ L_S , а также паразитными емкостями $C, C1, C2$ между контактами реле и его корпусом. Параметры сумматора были взяты из технических данных изделия, опубликованных производителем [13].

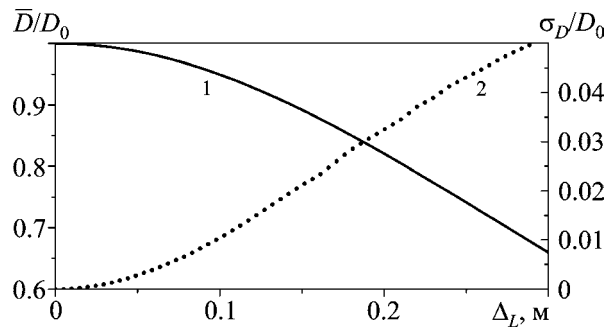


Рис. 3. Зависимости нормированных среднего КНД (кривая 1) и среднеквадратического отклонения КНД (кривая 2) секции ФАР на частоте 70 МГц от предельного отклонения длины отрезка кабеля

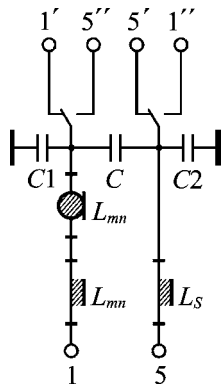


Рис. 4. Схема одного разряда ФВ, дополненная конструктивными и паразитными элементами

В основе разработанной математической модели лежит метод анализа СВЧ многополюсников [19], позволяющий найти матрицу рассеяния всего устройства по известным матрицам рассеяния его компонентов. В результате компьютерного моделирования были проанализированы частотные зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) на всех входах ДМ и коэффициентов передачи между ними при различных управляющих кодах.

Экспериментальные исследования проводились в условиях лаборатории с помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения “Обзор-103”. Для получения достоверных результатов испытаниям подвергался не единственный образец ДМ, а партия из 10 экземпляров. Исследовались те же параметры ДМ, что и в численном эксперименте, однако ввиду большой трудоемкости процесса измерений количество вариантов переключений управляющих кодов пришлось уменьшить.

На рис. 5 сплошными линиями показаны результаты измерений модуля коэффициента передачи от входа 1 на выход 6 S_{16} при кодах управления 11000, 00000, 01000. Указанные коды управления позволяют оценить разброс значений модуля коэффициента передачи в двух крайних и среднем положениях главного лепестка множителя ряда решетки. Для крайних положений максимума главного луча ДН характерны самые неравномерные характеристики и наихудшие значения параметров, поэтому далее все характеристики ДМ будут приводиться именно для кодов 11000 и 01000. Значения коэффициента передачи усреднены для партии из 10 образцов. Разброс

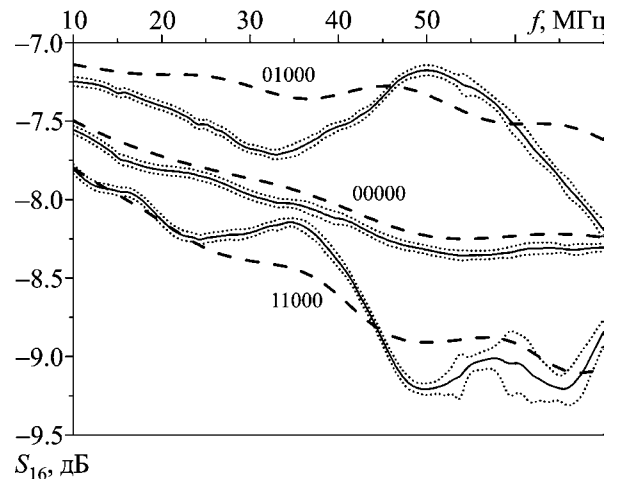


Рис. 5. Частотная зависимость модуля коэффициента передачи первого канала ДМ при различных кодах управления: сплошные линии – результаты измерений, штриховые линии – результаты моделирования

результатов измерений в 1σ обозначен пунктирными линиями. Штриховыми линиями показаны результаты моделирования модулей коэффициентов передачи, которые отличаются от результатов измерений в худшем случае на 0.5 дБ. Следует иметь в виду, что на графиках рис. 5 затухание в 7 дБ вызвано делением сигнала в пятиходовом сумматоре, а значения, превышающие этот уровень, определяются потерями в ДМ. С ростом частоты потери в трактах ДМ увеличиваются. Из приведенных на рис. 5 зависимостей видно, что за счет переключения кодов управления (и, соответственно, изменения суммарной длины линий задержки) изменение модуля коэффициента передачи канала не превышает 2 дБ. Для фиксированного управляющего кода амплитудное распределение на входах имеет вид линейной зависимости с ростом в 0.5 дБ между соседними входами в наихудшем случае, а при коде 00000 амплитудное распределение становится равномерным.

На рис. 6 приведены результаты моделирования частотной зависимости развязки S_{15} , S_{24} между парами каналов (1, 5) и (2, 4) с общими переключающими реле при управляющем коде 11000. Для остальных сочетаний каналов развязка определяется только характеристиками сумматора, для которого, согласно техническим характеристикам [13], наихудшая развязка между парой входов составляет 29.48 дБ на частоте 60 МГц. При проектировании платы ДМ

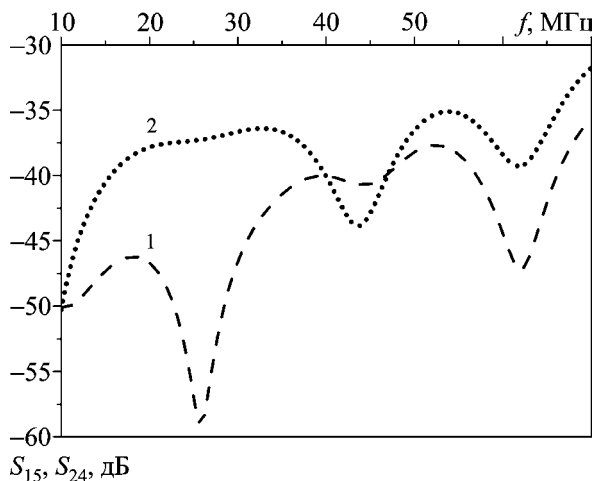


Рис. 6. Частотная зависимость развязки пар каналов ДМ с общими переключающими реле: кривая 1 – каналы (1, 5), кривая 2 – каналы (2, 4)

каналы с общими реле подключались к парам входов сумматора с наилучшей развязкой. Таким образом, значение развязки между каналами ДМ оказалась не хуже 29 дБ в рабочей полосе частот.

При формировании фазового распределения на входах антенной решетки важно контролировать не набег фаз в каждом канале, а разность между ними. Разность фаз удобно отсчитывать от фазы третьего канала, так как он имеет фиксированную длину линии задержки. На рис. 7 приведены графики частотной зависимости отклонения измеренной (реальной) разности фаз между третьим и остальными каналами от требуемой разности фаз для заданного направления главного максимума ДН (управляющий код 11000). На рисунке показано среднее для выборки из 10 образцов ДМ отклонение в фазовом распределении. Среднеквадратическое отклонение результатов измерений набег фаз составило меньше 0.8° на наивысшей частоте рабочего диапазона.

Из рис. 7 видно, что максимальное отклонение в фазовом распределении, равное 7° , на частоте 43 МГц имеет разность фаз первого и третьего каналов. Так как эти каналы расположены через один, то отклонение разности фаз между соседними каналами будет составлять половину этого значения. Следовательно, отличие разности фаз для соседних каналов от номинальных значений не превышает 4° на частоте 43 МГц, что попа-

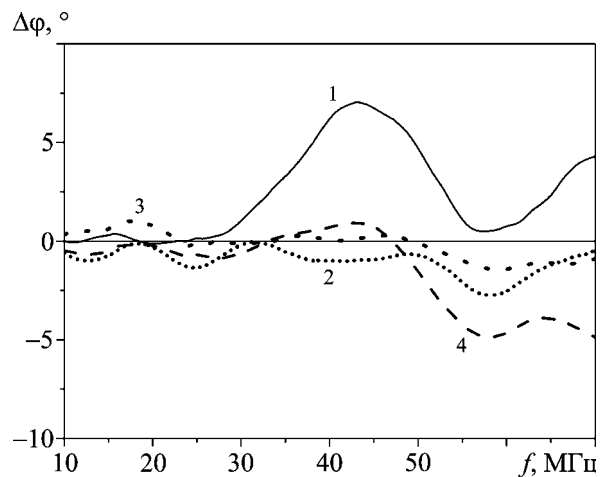


Рис. 7. Частотная зависимость отклонения измеренного фазового распределения от расчетного: кривая 1 – канал 1, кривая 2 – канал 2, кривая 3 – канал 4, кривая 4 – канал 5

дает в допустимый интервал погрешностей изготовления линий задержки $\Delta_L \leq 0.1$ м.

На рис. 8 приведены результаты моделирования частотной зависимости КСВН на входах 1, 2, ..., 5 и выходе 6 для кода управления 11000. Наихудшие значения КСВН проявляются на высоких частотах в пятом канале, где при данном коде отсутствуют линии задержки.

5. Выводы

Разработан ДМ, который применяется для фазирования элементов секций ФАР нового низкочастотного радиотелескопа ГУРТ. Создана модель

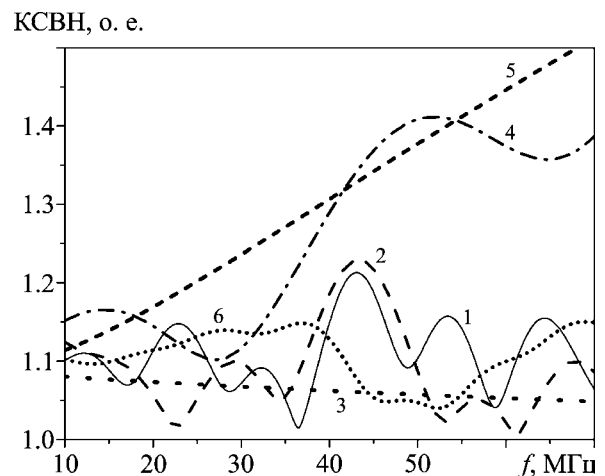


Рис. 8. Частотная зависимость КСВН на входах ДМ для кода управления 11000: кривые 1, 2, ..., 6 соответствуют входам 1, 2, ..., 5 и выходу 6

этого устройства. Характеристики устройства были получены в ходе лабораторных измерений и компьютерного моделирования, результаты которых хорошо согласуются между собой. Результаты измерений параметров ДМ показали хорошую повторяемость характеристик всех экземпляров изготовленной партии и позволили оценить вносимые модулем ошибки в фазовое и амплитудное распределения на входах антенной решетки. Проанализировано влияние допусков при изготовлении кабелей линий временной задержки, которые применяются для фазирования секции низкочастотного радиотелескопа, на КНД секции. Показано, что необходимые допуски являются вполне реализуемыми при серийном изготовлении кабелей линий задержки. Результаты работы могут быть полезны для инженеров, занимающихся проектированием широкополосных ФАР в декаметровом и метровом диапазонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коноваленко А. А. Перспективы низкочастотной радиоастрономии // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т.10, спец.выпуск. – С. S86–S114.
2. Милостная К. Ю., Захаренко В. В. Поиск и исследование грозовой активности на Сатурне и других планетах Солнечной системы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 12–25.
3. De Vos M., Gunst A. W., and Nijboer R. The LOFAR Telescope: System Architecture and Signal Processing // IEEE Proc. – 2009. – Vol. 97, Is. 8. – P. 1421–1430.
4. Ellingson S. W., Clarke T. E., Cohen A., Craig J., Kasim N. E., Pihlstrom Y., Rickard L. J., and Taylor G. B. The Long Wavelength Array // IEEE Proc. – 2009. – Vol. 97, Is. 8. – P. 1431–1437.
5. Girard J. N., Zarka P., Tagger M., Denis L., Charrier D., Konovalenko A. A., and Boone F. Antenna design and distribution of the LOFAR super station // Comptes Rendus Physique. – 2012. – Vol. 13, Is. 1. – P. 33–37.
6. Dewdney P. E., Hall P. J., Schilizzi R. T., and Lazio T. J. L. W. The Square Kilometre Array // IEEE Proc. – 2009. – Vol. 97, Is. 8. – P. 1482–1496.
7. 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 VI-th Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'12). – Sevastopol (Ukraine). – 2012. – P. 39–43.
8. Брук Ю. М., Инютин Г. А. Двоично-дискретные линии задержки (фазовращатели) для широкополосных электрически управляемых антенн // Антенны. – М.: Связь. – 1978. – № 26. – С. 107–121.
9. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. – М.: Связь. – 1978. – № 26. – С. 3–14.
10. Falkovich I. S., Konovalenko A. A., Gridin A. A., Sodin L. G., Bubnov I. N., Kalinichenko N. N., Rashkovskii S. L., Mukha D. V., and Tokarsky P. L. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy // Exp. Astron. – Vol. 32, Is. 2. – P. 127–145.
11. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Д. И. Воскресенский, В. И. Степаненко, В. С. Филиппов и др. / Под ред. Д. И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2003. – 632 с.
12. Surface-mounting, 1-GHz-Band / 3-GHz-Band, Miniature, DPDT, High-frequency Relay datasheet. Available from: www.omron.com/ecb/products/pdf/en-g6k_2f_rf.pdf.
13. Surface Mount Power Splitter/Combiner SCP-5-1 datasheet. Available from: www.minicircuits.com/pdfs/SCP-5-1.pdf.
14. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. – М.: Сов. радио, 1970. – 384 с.
15. Инденбом М. В. Флуктуации диаграммы направленности антенной решетки по мощности // Антенны. – 2008. – № 4. – С. 40–46.
16. Меркулов В. В. К оценке КНД системы излучателей при наличии фазовых и амплитудных искажений // Радиотехника и электроника. – 1966. – Т. 11, № 11. – С. 2066–2069.
17. Стеблин В. И., Класен В. И. Метод анализа статистических характеристик КНД фазированной антенной решетки при случайных амплитудах, фазах и расположении излучателей // Радиотехника и электроника. – 1981. – Т. 26, № 3. – С. 524–531.
18. Шифрин Я. С., Корниенко Л. Г. Статистика поля антенных решеток // Антенны. – 2000. – № 1. – С. 3–26.
19. Саонов Д. М., Гридин А. Н., Мишустин Б. А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981. – 295 с.

С. М. Єрін, П. Л. Токарський, А. О. Грідін, І. М. Бубнов,
О. О. Коноваленко, І. С. Фалькович, О. П. Рєзнік

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

ДІАГРАМОУТВОРЮЮЧИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ СЕКЦІЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ РАДІОТЕЛЕСКОПУ ГУРТ ДЕКАМЕТРОВОГО І МЕТРОВОГО ДІАПАЗОНІВ ХВИЛЬ

Наводиться діаграмоутворюючий пристрій для 5×5 -елементної секції приймальної фазованої антеної решітки нового радіотелескопу ГУРТ, призначеного для роботи в діапазоні частот 10 ÷ 70 МГц. Пристрій складається з шести ідентичних модулів, кожен з яких містить рівнобічний суматор 5 : 1 із підключеними до його входів дискретними фазообертачами на комутованих лініях часової затримки. П'ять таких модулів сумують сигнали елементів у середині рядів секції фазованої антеної решітки, а шостий збирає вже сумовані сигнали рядів. Описано принцип роботи діаграмоутворюючого модуля, наведено результати його комп'ютерного моделювання та вимірювання основних його характеристик. Виконано оцінку впливу похибок виготовлення відрізків ліній затримки на енергетичні параметри секції та визначено допуски на їх довжини.

*S. N. Yerin, P. L. Tokarsky, A. A. Gridin, I. N. Bubnov,
A. A. Konovalenko, I. S. Falkovych, and A. P. Reznik*

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

BEAMFORMING UNIT FOR SUB-ARRAY
OF DECAMETER AND METER WAVE
RADIO TELESCOPE GURT

A beamforming device for a 5×5 -element subarray of receiving phased antenna array of new GURT radio telescope designed to operate within 10–70 MHz is presented.

The device is composed of six identical units. Each unit contains equal-arm 5:1 combiner with connected to its arms discrete phase shifters based on time delay lines switching principle. Five of these units combine the signals of array elements inside rows of the subarray, whereas the sixth one assembles the combined signals of subarray rows. Operation principle of beamforming unit is described, the results of its computer modeling and performance measurement results are given. The time-delay lines manufacturing errors influence on subarray power parameters is estimated, as well as their fabrication tolerance found.

Статья поступила в редакцию 24.04.2014