

РАДІОАСТРОНОМІЯ І АСТРОФІЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra24.04.233>

УДК 520.272.2:
621.396.674

П. Л. ТОКАРСКИЙ, А. А. КОНОВАЛЕНКО,
Н. Н. КАЛИНИЧЕНКО, С. Н. ЕРИН

PACS numbers: 84.40.Ba

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

ВЛИЯНИЕ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТА НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭЛЕМЕНТА АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ РАДИОТЕЛЕСКОПА ГУРТ

*Светлой памяти профессора
Якова Соломоновича Шифрина,
нашего учителя и друга
посвящается*

Предмет и цель работы: Теоретические исследования изменений чувствительности элемента фазированной антенной решетки (ФАР) радиотелескопа нового поколения ГУРТ, обусловленных сезонными колебаниями параметров грунта. Методы и методология: Для исследования элемента ФАР ГУРТ, состоящего из диполя и малошумящего усилителя, использована математическая модель активной антенны в виде четырехполюсника, электрические параметры которого задаются матрицей рассеяния, а шумовые – ковариационной матрицей спектральных плотностей шумовых волн. Такая модель позволяет выполнять корректный анализ отношения сигнал/шум на выходе активной антенны с учетом внешних и внутренних источников шума.

Результаты: Выполнен численный анализ характеристик элемента активной ФАР радиотелескопа ГУРТ в широком диапазоне частот $8 \div 80$ МГц. Установлено, что сезонные колебания параметров грунта, диэлектрической проницаемости и удельной проводимости, составляющие около 8 и 6 дБ соответственно, оказывают наиболее заметное влияние на КПД диполя и коэффициент его согласования с малошумящим усилителем. Вариации обоих этих параметров достигают 3 дБ, однако они противоположны по знаку, поэтому их влияние на чувствительность активной антенны практически взаимно компенсируется. В результате показано, что сезонные изменения параметров грунта не приводят к существенным вариациям чувствительности активной антенны, размах которых в большей части диапазона частот составляет примерно 0.5 дБ и только с приближением к нижней его частоте возрастает примерно до 1.5 дБ.

Заключение: Проведенные в работе исследования показали, что сезонные колебания электрофизических параметров грунта приводят к небольшим вариациям чувствительности элемента ФАР ГУРТ, не превышающим ± 0.75 дБ, которые не могут заметно повлиять на качество радиоастрономических наблюдений. Результаты настоящей работы могут быть полезны при разработке и исследованиях приземных активных ФАР, предназначенных для работы в диапазонах метровых и дециметровых волн.

Ключевые слова: радиотелескоп, фазированная антенная решетка (ФАР), активная антенна, шумовая температура, чувствительность

1. Введение

Первой работой, в которой исследовалось влияние земли на параметры антенн, считается статья А. Зоммерфельда [1], со времени опубликования которой прошло 110 лет. Проблема, поднятая в этой работе, оказалась настолько многогранной и важной как с теоретической, так и практической точек зрения, что ее решению были посвяще-

ны тысячи статей и десятки монографий. Наиболее известные из них упомянуты в обзорной статье Дж. Уайта [2], в которой дана историческая ретроспектива возникновения и решения данной проблемы. К ним хотелось бы добавить еще несколько важных работ, подробно освещающих вопросы влияния параметров земли на импеданс и КПД приземных антенн, – работы Баньоса [3], Лаврова и Князева [4], П. Хансена [5],

а также работу Я. С. Шифрина [6], в которой он заметно опередил многих современников в исследованиях КПД дипольных антенн.

Несмотря на более чем вековую историю данной проблемы, и сейчас возникают связанные с ней новые задачи, требующие безотлагательного решения. Их появление вызвано, в основном, разработкой новых типов приземных антенн и новыми их приложениями, требующими оценки влияния земли на характеристики антенн. К таким приложениям относится низкочастотная радиоастрономия, исследующая радиоизлучение внеземных источников в диапазоне частот от 8 до 100 МГц, которая интенсивно развивается в течение последнего десятилетия. Преимущества низкочастотной радиоастрономии известны давно, однако ранее ее прогресс сдерживался большими финансовыми затратами, связанными с сооружением радиотелескопов с фазированными антенными решетками (ФАР) километровых размеров, ярким примером такого телескопа может служить УТР-2 (Радиоастрономический институт НАН Украины). Появление новых технологий в микроэлектронике и вычислительной технике дали возможность заметно удешевить строительство радиотелескопов за счет внедрения цифровых технологий и использования недорогих приемных активных антенн в качестве элементов ФАР. Многие параметры и характеристики таких антенн, в том числе их шумовые характеристики, определяющие чувствительность радиотелескопа, оказались малоизученными. В последние годы появились несколько публикаций [7–10], в которых исследовалась чувствительность элементов и субрешеток ФАР, сконструированных для ряда низкочастотных радиотелескопов нового поколения с учетом влияния реальной земли. Вместе с тем в литературе отсутствуют сведения о том, как будут изменяться характеристики активных элементов ФАР при изменении электрических параметров грунта, которые, как известно [11], зависят от погодных условий и времени года.

Целью настоящей статьи является исследование влияния вариаций параметров грунта на характеристики элемента ФАР радиотелескопа ГУРТ [12] с уделением главного внимания его чувствительности. Эта задача весьма актуальна, поскольку элементы ФАР ГУРТ расположены в непосредственной близости от поверхности

земли, сильно влияющей на их параметры. Наиболее ярко это влияние обнаруживается при сезонных вариациях параметров грунта, которые распространяются на достаточно большую глубину, заметно превышающую толщину скин-слоя. При решении этой задачи мы будем опираться на методику расчета параметров активного элемента ФАР ГУРТ, разработанную в [10], откуда по ходу изложения будем брать необходимые нам соотношения. Данные о сезонных изменениях параметров грунта на территории Радиоастрономической обсерватории им. С. Я. Брауде, в которой расположен радиотелескоп ГУРТ, приведены в [13].

2. Конструкция элемента ФАР ГУРТ

Элемент ФАР ГУРТ (рис. 1, а) представляет собой комбинацию двух независимых активных антенн в виде идентичных взаимно ортогональных симметричных диполей с наклонными плечами с встроенными малошумящими усилителями

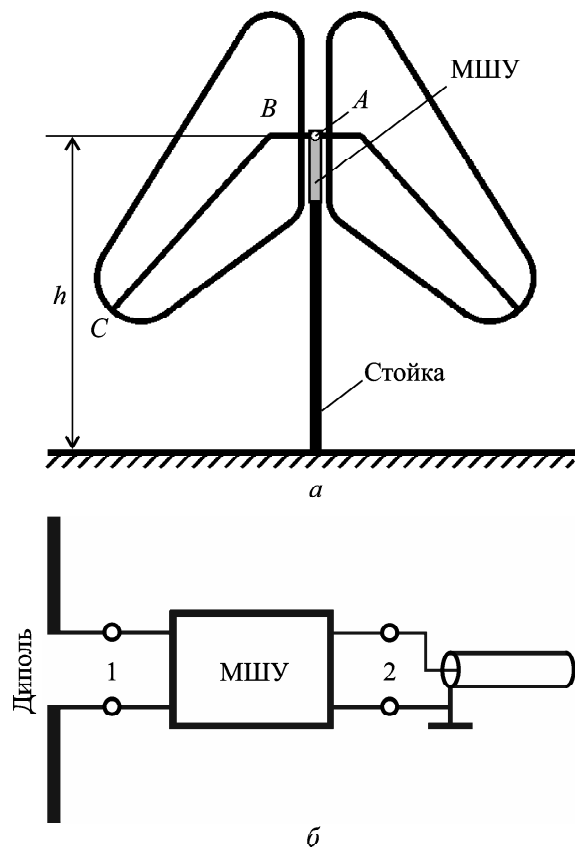


Рис. 1. Эскиз диполя ГУРТ (а) и его функциональная схема (б)

(МШУ). Каждый диполь сделан из тонкостенных медных трубок диаметром 12 мм, покрытых снаружи тонким слоем полиэтилена, защищающего диполь от воздействия окружающей среды. Общая длина плеча диполя вдоль средней трубки (линия ABC на рис. 1, а) составляет 1.4 м, угол наклона по отношению к плоскости земли – 45°. Клеммы диполя (точка А) расположены на высоте $h = 1.6$ м над поверхностью земли. Оба диполя закреплены на стойке, изготовленной из стальной трубы диаметром 60 мм, на верхнюю часть которой насажен отрезок пластиковой трубы, в котором размещены МШУ. МШУ, собранный по балансной схеме, имеет такие параметры: коэффициент усиления по мощности $G_{amp} \approx 23$ дБ, коэффициент шума $F_{amp} \approx 1.3$ дБ, коэффициент нелинейных искажений $IP3 \sim 30$ дБ. МШУ, кроме усиления сигнала, выполняет также функцию симметрирования, осуществляя корректный переход от симметричных клемм диполя к несимметричному коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением $Z_w = 50$ Ом.

3. Модель активной антенны

Функциональная схема одной активной антенны, где МШУ представлен линейным четырехполюсником, показана на рис. 1, б. Будем полагать, что нам известны следующие параметры диполя: Γ_A – входной коэффициент отражения; η_A – КПД, учитывающий потери в грунте; $F(\theta, \varphi)$ – нормированная диаграмма направленности; $A_e = 4\pi D_m / \lambda^2$ – эффективная площадь, где D_m – коэффициент направленного действия диполя в направлении максимума главного лепестка диаграммы направленности. Будем также считать, что электрические параметры МШУ заданы матрицей рассеяния \mathbf{S} , а шумовые параметры – ковариационной матрицей спектральных плотностей шумовых волн \mathbf{C} [10]:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Поскольку антенна радиотелескопа работает в приемном режиме, естественно предположить, что она возбуждается плоской электромагнитной волной с плотностью потока мощности $S^i(\theta, \varphi)$, приходящей из направления (θ, φ) . В таком случае мощность принимаемого сигнала на выходе активной антенны будет определяться как [10]

$$P_2 = S^i(\theta, \varphi) A_{e2} = S^i(\theta, \varphi) A_e \kappa. \quad (2)$$

Здесь A_{e2} – эффективная площадь активной антенны, приведенная к ее выходу:

$$A_{e2} = \kappa A_e, \quad (3)$$

где κ – коэффициент передачи активной антенны, определяемый произведением

$$\kappa = \eta_A \chi G_P, \quad (4)$$

$G_P = \frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2}$ – коэффициент усиления МШУ по мощности, χ – коэффициент импедансного согласования диполя с МШУ,

$$\chi = \frac{(1 - |\Gamma_A|^2)(1 - |S_{11}|^2)}{|1 - S_{11}\Gamma_A|^2}. \quad (5)$$

Для оценки чувствительности активной антенны нам понадобится полная (или системная) шумовая температура на ее выходе T_{2sys} , определяемая суммой

$$T_{2sys} = T_{2ext} + T_{2int}, \quad (6)$$

где T_{2ext} и T_{2int} – соответственно внешняя и внутренняя шумовые температуры на выходе активной антенны. Первая из них [10],

$$T_{2ext} = \kappa T_B, \quad (7)$$

обусловлена приемом антенной галактического и внегалактического излучения, характеризуемого яркостной температурой неба [14]

$$T_B \approx 4 \cdot 10^5 \left(\frac{10^7}{f} \right)^{2.56},$$

где f – частота, Гц.

Все выходные шумовые температуры можно привести к входу МШУ с помощью соотношения

$$T_{sys, ext, int} = \frac{T_{2sys, ext, int}}{G_P}.$$

Полученные таким образом эквивалентные шумовые температуры $T_{sys, ext, int}$ не зависят от коэффициента усиления МШУ, поэтому их удоб-

но использовать для сравнения различных активных антенн, а также для оценки вклада других источников шума в температуру T_{sys} на фоне шумов МШУ.

Эквивалентная внутренняя шумовая температура активной антенны может быть записана в виде суммы

$$T_{int} = T_{LNA} + T_A,$$

где T_{LNA} – эквивалентная шумовая температура МШУ, зависящая от его согласования с диполем и описываемая формулой [10]

$$T_{LNA} = \frac{1}{k_B} \frac{\chi}{1 - |\Gamma_A|^2} \left[|\Gamma_A|^2 C_{11} + 2 \operatorname{Re} \left(\frac{\Gamma_A C_{12}}{g^*} \right) + \frac{C_{22}}{|g|^2} \right], \quad (8)$$

$g = S_{21}/(1 - S_{11}\Gamma_A)$ – коэффициент усиления МШУ по напряжению; символ “*” означает комплексное сопряжение; $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $T_A = T_{dip} + T_{gnd}$ – составляющие эквивалентной шумовой температуры активной антенны, обусловленные наличием потерь в материале диполя T_{dip} и неидеальной земле T_{gnd} , которая также участвует в процессе приема электромагнитных волн,

$$T_{gnd} = T_0(1 - \eta_A)\chi. \quad (9)$$

Приведенные соотношения позволяют рассчитать все электрические и шумовые параметры активной антенны, необходимые нам для решения поставленной задачи.

4. Чувствительность активной антенны

Основным показателем качества радиотелескопа является его чувствительность, которая обычно оценивается по минимальной обнаружимой плотности потока мощности падающей электромагнитной волны ΔS_{min} . Если антенна радиотелескопа имеет одну поляризацию, то ΔS_{min} определяется как [15]

$$\Delta S_{min} = \frac{2k_B T_{2sys}}{A_e \sqrt{\Delta f \tau n}} = \frac{\text{SEFD}}{\sqrt{\Delta f \tau n}},$$

где Δf – полоса пропускания приемника; t – время интегрирования после детектора; n – число усредняемых записей; SEFD (System Equivalent Flux

Density) – системная эквивалентная плотность потока [16],

$$\text{SEFD} = \frac{2k_B T_{2sys}}{A_e}.$$

Подставляя (3) и (6) в (1) и (2), находим

$$\text{SEFD} = \frac{2k_B T_B}{A_e} \left(1 + \frac{1}{\text{SND}} \right) \quad (10)$$

и

$$\Delta S_{min} = \frac{2k_B T_B}{A_e \sqrt{\Delta f \tau n}} \left(1 + \frac{1}{\text{SND}} \right) = \frac{\text{SEFD}}{\sqrt{\Delta f \tau n}}. \quad (11)$$

Здесь SND (Sky Noise Dominance) – отношение, определяющее превышение внешней шумовой температуры над внутренней,

$$\text{SND} = \frac{T_{2ext}}{T_{2int}} = \frac{T_{ext}}{T_{int}}.$$

Если мощность внутреннего шума на выходе антенны пренебрежимо мала по сравнению с мощностью внешнего шума ($\text{SND} \gg 1$), то SEFD и ΔS_{min} в (10) и (11) будут определяться только эффективной площадью диполя и яркостной температурой неба:

$$\text{SEFD}^{sky} = \frac{2k_B T_B}{A_e} \quad \text{и} \quad \Delta S_{min}^{sky} = \frac{2k_B T_B}{A_e \sqrt{\Delta f \tau n}}, \quad (12)$$

а чувствительность данной антенны будет максимальной.

Строго говоря, величины SEFD^{sky} и ΔS_{min}^{sky} в (12) соответствуют бесконечно большому отношению SND, которое практически недостижимо. Компромиссным принято считать значение SND, удовлетворяющее условию $\text{SND} \geq 6$ дБ [17]. Полученное при этом значение ΔS_{min} несложно довести до значения ΔS_{min}^{sky} , увеличив время интегрирования τ не более чем на 57 % [18].

5. Численные исследования

Выполним численные исследования влияния параметров грунта на чувствительность элемента ФАР радиотелескопа ГУРТ. Из работы [13] следует, что электрические параметры грунта изменяются примерно в следующих пределах: от значений $\epsilon_r = 4$

и $\sigma = 0.0125$ Сим/м, которые наблюдаются зимой, когда грунт можно считать наиболее сухим, до значений $\epsilon_r = 25$ и $\sigma = 0.05$ Сим/м, которые наблюдаются ближе к середине весны, когда грунт становится наиболее влажным. Среднегодовые значения параметров грунта примерно такие: $\epsilon_r = 10$ и $\sigma = 0.025$ Сим/м, – их мы будем условно относить к нормальному грунту. Вычисления параметров диполя над реальной землей выполнялись в диапазоне частот $8 \div 80$ МГц с помощью программы 4nes2 [19], в которой для расчета проволочных антенн используется метод моментов [20]. Параметры МШУ определялись методом компьютерного моделирования с помощью программы NI AWR Design Environment v.11 [21].

На рис. 2 показаны частотные зависимости КПД диполя η_A для трех выбранных типов грунта. Разброс КПД диполя в большей части диапазона $f = 33 \div 80$ МГц не превышает 1 дБ, и только вблизи частоты 20 МГц он увеличивается до 1.2 дБ.

На рис. 3 приведены частотные характеристики коэффициента согласования χ (5), который во многом определяет параметры активной антенны (4), (8), (9). Из этого рисунка следует, что в верхней части частотного диапазона ($f > 44$ МГц) χ практически не зависит от параметров грунта, чего не скажешь о нижней его части. Влияние изменения параметров грунта на χ отчетливо проявляется в полосе частот $8 \div 25$ МГц. Сравнивая рис. 2 и рис. 3, нетрудно заметить, что КПД диполя η_A и коэффициент импедансного согласования его с МШУ χ с увеличением потерь энер-

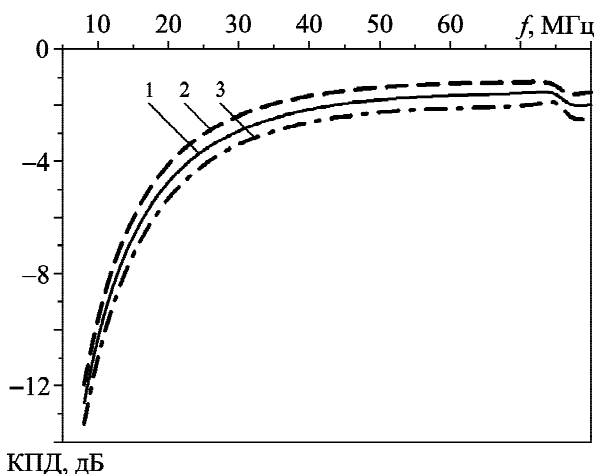


Рис. 2. Частотная зависимость КПД диполя η_A : кривая 1 – нормальный грунт, кривая 2 – мокрый грунт, кривая 3 – сухой грунт

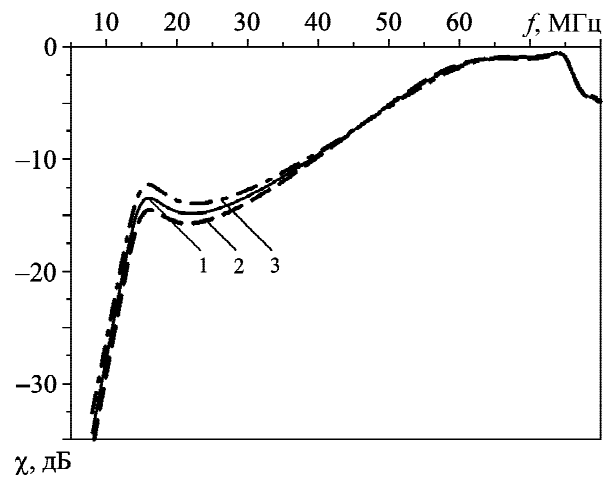


Рис. 3. Зависимость импедансного согласования χ диполя с МШУ от частоты: кривая 1 – нормальный грунт, кривая 2 – мокрый грунт, кривая 3 – сухой грунт

гии в грунте изменяются в противоположных направлениях – η_A уменьшается (рис. 2), а χ увеличивается (рис. 3).

На рис. 4 показаны частотные зависимости внутренней T_{int} и внешней T_{ext} эквивалентных шумовых температур активной антенны. У данной активной антенны имеются лишь два источника внутреннего шума – МШУ и неидеальная земля, поскольку диполь считается идеальнопроводящим и шум не создает. Вклад эквивалентной шумовой температуры МШУ T_{LNA} в температуру шума T_{int}

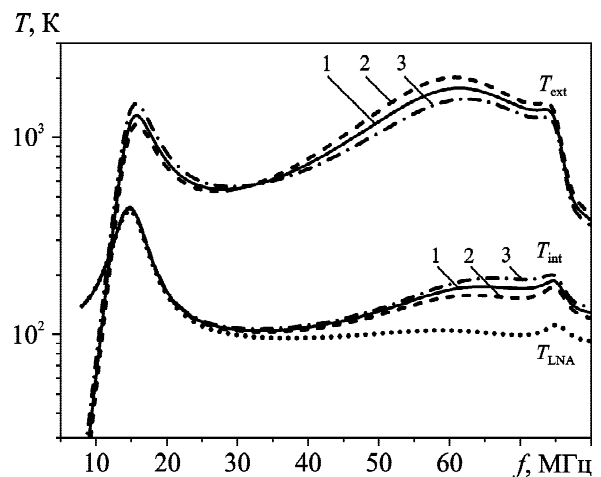


Рис. 4. Частотные зависимости эквивалентных внешней и внутренней шумовых температур T_{ext} и T_{int} активной антенны: кривая 1 – нормальный грунт, кривая 2 – мокрый грунт, кривая 3 – сухой грунт. Вклад эквивалентной шумовой температуры МШУ T_{LNA} в температуру шума T_{int} показан пунктирной линией

показан на рис. 4 пунктирной линией. Он практически не зависит от параметров грунта и заметно преобладает над T_{gnd} во всем рассматриваемом диапазоне частот. В нижней части диапазона ($f < 30$ МГц) эквивалентная шумовая температура T_{int} почти неотличима от T_{LNA} , так как мощность шума, создаваемая грунтом, практически не проходит от клемм диполя до входа МШУ из-за низкого коэффициента их согласования ($\chi < -13$ дБ) и, следовательно, вклад земли T_{gnd} в T_{int} оказывается очень малым. Шумовая температура T_{gnd} становится заметной лишь в верхней части диапазона ($f > 44$ МГц), она сильно зависит от параметров грунта, поскольку имеет однозначную связь с КПД диполя (9), который полностью определяется потерями в земле.

Прежде чем рассматривать частотные зависимости внешней эквивалентной шумовой температуры T_{ext} активной антенны, представим равенство (7) в следующем виде:

$$T_{ext} = \eta_A \chi T_B,$$

из которого следует, что T_{ext} прямо пропорциональна произведению $\eta_A \chi$. Теперь обратимся к рис. 4, на котором видно, что на частотах $f > 35$ МГц антенна над мокрым грунтом имеет большее значение T_{ext} , чем над сухим грунтом, поскольку в первом случае она имеет большее значение $\eta_A \chi$.

На рис. 5 приведены частотные зависимости SND активной антенны, которые полностью коррелируют с уже обсужденными зависимостями $T_{ext}(f)$. Видно, что максимальные вариации SND исследуемой антенны при изменении параметров грунта наблюдаются в полосе частот $50 \div 70$ МГц и составляют около 2 дБ. SND является одним из двух параметров активной антенны, определяющих ее чувствительность (10), (11). Вторым параметром, напрямую влияющим на SEFD, является эффективная площадь диполя A_e , которая определяется его размерами и также в определенной степени зависит от состояния грунта. Поскольку A_e и SEFD тесно взаимосвязаны, мы будем рассматривать их вместе.

На рис. 6 показаны частотные зависимости эффективной площади A_e диполя и SEFD активной антенны над нормальным грунтом в направлении максимума диаграммы направленности, а на рис. 7 – отклонения ΔA_e и $\Delta SEFD$ активной антенны при замене нормального грунта на

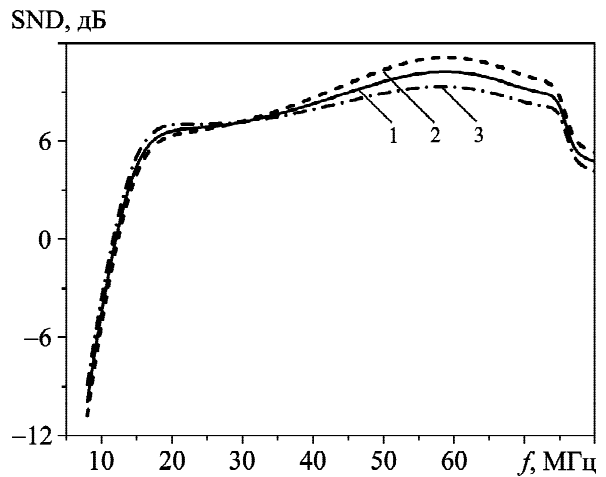


Рис. 5. Зависимости превышения внешней шумовой температуры активной антенны T_{ext} над внутренней T_{int} при разном состоянии грунта: кривая 1 – нормальный грунт, кривая 2 – мокрый грунт, кривая 3 – сухой грунт

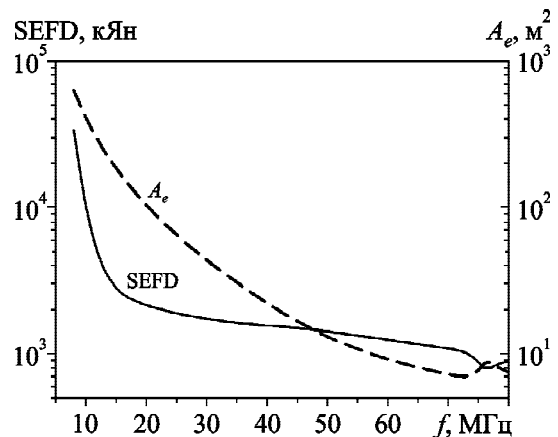


Рис. 6. Частотные зависимости эффективной площади A_e и SEFD антенны, расположенной над нормальным грунтом

сухой или влажный. Из рис. 7 следует, что в нижней части диапазона ($f < 52$ МГц) эффективная площадь антенны увеличивается при осушении почвы и уменьшается при ее увлажнении, в верхней части диапазона ($f > 52$ МГц) поведение A_e изменяется на противоположное – увлажнение почвы приводит к увеличению A_e , а осушение почвы – к уменьшению. При этом диапазон вариаций A_e на всех частотах не превышает 0.5 дБ. Поведение SEFD в большей части диапазона ($f = 14 \div 80$ МГц) при изменении параметров грунта определяется, в основном, влиянием A_e . Поскольку величина SEFD обратно пропорциональна A_e (10), их частотные зависимости прямо противоположны. Однако на частотах

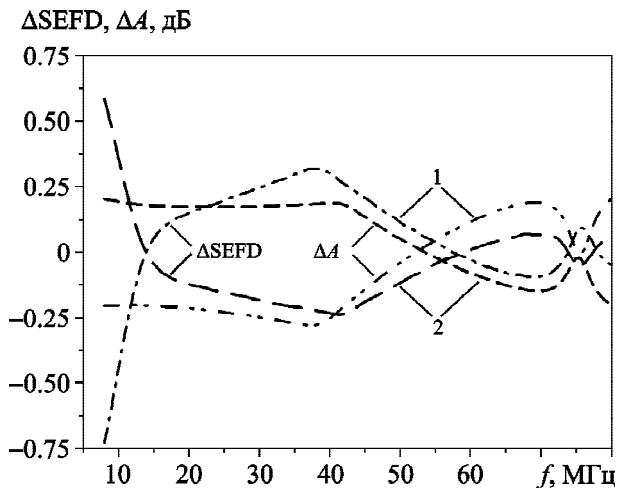


Рис. 7. Изменение эффективной площади и SEFD, ΔA и $\Delta SEFD$, активной антенны, расположенной над мокрым (кривые 1) и над сухим (кривые 2) грунтом, относительно этих же параметров активной антенны, расположенной над нормальным грунтом

$f = 8 \div 14$ МГц характер воздействия параметров грунта на SEFD заметно изменяется. В этой части диапазона существенно возрастает роль отношения SND в (10), которое с уменьшением частоты стремительно падает (рис. 5), приводя к резкому увеличению SEFD (рис. 6). Рис. 7 показывает, что вариации SEFD активной антенны при изменении параметров грунта не превышают ± 0.3 дБ почти во всем диапазоне частот ($f = 14 \div 80$ МГц), и только вблизи нижней границы диапазона они увеличиваются до ± 0.75 дБ. Такие изменения SEFD говорят о слабом влиянии сезонного изменения параметров почвы на чувствительность антенны.

6. Выводы

Исследовано влияние сезонных изменений электрофизических параметров грунта на чувствительность активной антенны, используемой в качестве элемента ФАР радиотелескопа ГУРТ, в широком диапазоне частот $8 \div 80$ МГц. Рассмотрены три состояния грунта – нормальный, влажный и сухой, которые соответствуют медианному и экстремальным значениям его параметров в месте расположения радиотелескопа ГУРТ, характерных для разных времен года. Численный анализ показал, что хотя вариации параметров грунта и влияют на различные параметры диполя, в большей степени на КПД η_A и коэффициент его со-

гласования с МШУ χ , а в меньшей степени на эффективную площадь A_e , однако это не приводит к существенным изменениям чувствительности исследуемого элемента ФАР радиотелескопа ГУРТ. Показано, что сезонные вариации параметров грунта приводят лишь к небольшим вариациям SEFD активной антенны, размах которых на частотах $10 \div 80$ МГц составляет всего около 0.5 дБ, и только вблизи нижней границы рассматриваемого диапазона частот размах вариаций SEFD несколько возрастает, примерно до 1.5 дБ. Такие вариации чувствительности не приводят к заметным ошибкам при проведении радиоастрономических наблюдений, однако могут быть учтены при выполнении прецизионных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sommerfeld A. Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie. *Ann. Phys.* 1909. Vol. 28, No. 4. P. 665–736. DOI: 10.1002/andp.19093330402
2. Wait J. R. The Ancient and Modern History of EM Ground-Wave Propagation. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 1998. Vol. 40, Is. 5. P. 7–24. DOI: 10.1109/74.735961
3. Baños A. *Dipole radiation in the presence of a conducting half-space*. New York, NY: Pergamon Press, 1966.
4. Лавров Г. А., Князев А. С. *Приземные и подземные антенны*. Москва: Сов. Радио, 1965.
5. Hansen P. M. The Radiation Efficiency of a Dipole Antenna Located Above an Imperfectly Conducting Ground. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1972. Vol. 20, Is. 6. P. 766–770. DOI: 10.1109/TAP.1972.1140312
6. Шифрин Я. С. О сопротивлении излучения вертикальной антенны с учетом влияния почвы. *Бюллетень АРТА*. Харьков: Из-во АРТА, 1948. № 3. С. 21–45.
7. Ellingson S. W. and Kramer T. C. Sensitivity and bandwidth of low-gain active antennas below 100 MHz. *Proceedings of the 2005 IEEE Int. APS Symp.* (3-8 July, 2005. Washington). Washington, DC, USA, 2005. Vol. 3A. P. 561–564. DOI: 10.1109/APS.2005.1552313
8. Ellingson S. W. Antennas for the next generation of low frequency radio telescopes. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2005. Vol. 53, No. 8. P. 2480–2489. DOI: 10.1109/TAP.2005.852281
9. Ellingson S. W. Sensitivity of antenna arrays for long-wavelength radio astronomy. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2011. Vol. 59, No. 6. P. 1855–1863. DOI: 10.1109/TAP.2011.2122230
10. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н. Чувствительность элемента активной ФАР радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2016. Т. 21, № 1. С. 48–57. DOI: 10.15407/rpra21.01.048
11. Справочник по распространению земных волн. *Международный союз электросвязи (ITU)*. 2014. URL: www/

- URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-59-2014-PDF-R.pdf (дата обращения: 10.09.2019).
12. Токарский П. Л., Коноваленко А. А., Ерин С. Н. Анализ параметров активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. Т. 20, № 2. С. 142–153. DOI: 10.15407/rpra20.02.142.
 13. Фалькович И. С., Содин Л. Г., Калиниченко Н. Н. Измерение параметров подстилающей поверхности для уточнения характеристик приземных антенн. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000. Т. 5, № 2. С. 195–205.
 14. Крымкин В. В. Спектр низкочастотного излучения фона. *Известия вузов. Радиофизика*. 1971. Т. 14, № 2. С. 199–203.
 15. Краус Дж. Д. *Радиоастрономия*. Пер. с англ. под ред. В. В. Железнякова. Москва: Сов. радио, 1973.
 16. Wrobel J. M. and Walker R. C. Sensitivity. In: G. B. Taylor, C. L. Carilli, and R. A. Perley, eds. *Synthesis Imaging in Radio Astronomy II. ASP Conference Series*. 1999. Vol. 180. P. 171–186.
 17. 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
 18. Erickson B. Integration Times. *Long Wavelength Array (LWA) Memo Series*. 2005. URL: <http://www.phys.unm.edu/~lwa/memos/memo/lwa0023.pdf> (дата обращения: 10.10.2019).
 19. Voors A. 4nec2 – NEC based antenna modeler and optimizer. URL: <http://www.qsl.net/4nec2/> (дата обращения: 10.09.2019).
 20. Harrington R. F. *Field Computation by Moment Methods*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1993.
 21. NI AWR. *NI AWR Design Environment*. URL: <https://www.awr.com/software/products/ni-awr-design-environment> (дата обращения: 10.09.2019).
 7. ELLINGSON, S. W. and KRAMER, T. C., 2005. Sensitivity and bandwidth of low-gain active antennas below 100 MHz. In: *IEEE Int. APS Symp. Proceedings*. Washington, DC, USA, July 3-8, 2005. Washington. vol. 3A, pp. 561–564. DOI: 10.1109/APS.2005.1552313
 8. ELLINGSON, S. W., 2005. Antennas for the next generation of low frequency radio telescopes. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 53, no. 8, pp. 2480–2489. DOI: 10.1109/TAP.2005.852281
 9. ELLINGSON, S. W., 2011. Sensitivity of Antenna Arrays for Long-Wavelength Radio Astronomy. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 59, no. 6, pp. 1855–1863. DOI: 10.1109/TAP.2011.2122230
 10. TOKARSKY, P. L., KONOVALENKO, A. A., YERIN, S. N. 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
 11. INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2014. *Handbook on Ground Wave Propagation* [online]. [viewed 10 September 2019]. Available from: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-59-2014-PDF-E.pdf
 12. TOKARSKY, P. L., KONOVALENKO, A. A. and YERIN, 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
 13. FALKOVICH, I. S., SODIN, L. G. and KALINICHENKO, N. N., 2000. Measurement of Substrate Parameters for Specification of Characteristics of Antennas Located Near the Earth's Surface. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 5, no. 2, pp. 195–205. (in Russian).
 14. 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
 15. KRAUS, J. D., 1966. *Radio Astronomy*. New York: McGraw-Hill.
 16. WROBEL, J. M. and WALKER, R. C., 1999. Sensitivity. In: G. B. TAYLOR, C. L. CARILLI, and R. A. PERLEY, eds. *Synthesis Imaging in Radio Astronomy II. ASP Conference Series*. vol. 180, pp. 171–186.
 17. 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
 18. ERICKSON, B., 2005. Integration Times. In: *Long Wavelength Array (LWA) Memo Series*. [online]. [viewed 10 October 2019]. Available from: <http://www.phys.unm.edu/~lwa/memos/memo/lwa0023.pdf>
 19. VOORS, A., 2019. 4nec2 – NEC based antenna modeler and optimizer. [online]. [viewed 10 October 2019]. Available from: [www/URL: http://www.qsl.net/4nec2/](http://www.qsl.net/4nec2/)
 20. HARRINGTON, R. F., 1993. *Field Computation by moment methods*. Piscataway, NJ: IEEE Press.
 21. NI AWR, 2019. *NI AWR Design Environment* [online]. [viewed 10 September 2019]. Available from: <https://www.awr.com/software/products/ni-awr-design-environment>

REFERENCES

1. SOMMERFELD, A., 1909. Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie. *Ann. Phys.* vol. 28, no. 4, pp. 665–736. DOI: 10.1002/andp.19093330402
2. WAIT, J. R., 1998. The Ancient and Modern History of EM Ground-Wave Propagation. *IEEE Antennas Propag. Mag.* vol. 40, is. 5, pp. 7–24. DOI: 10.1109/74.735961
3. BAÑOS, A., 1966. *Dipole radiation in the presence of a conducting half-space*. New York, NY: Pergamon Press.
4. LAVROV, G. A. and KNYAZEV, A. S., 1965. *Ground and underground antennas*. Moscow, Russia: Sovetskoe Radio. (in Russian).
5. HANSEN, P. M., 1972. The Radiation Efficiency of a Dipole Antenna Located Above an Imperfectly Conducting Ground. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 20, is. 6, pp. 766–770. DOI: 10.1109/TAP.1972.1140312
6. SHIFRIN, Ya. S., 1948. On the radiation resistance of a vertical antenna taking into account the ground effect. *Bulletin of the Artillery Radio Engineering Academy*. Kharkiv, Ukraine: AREA Publ. no. 3, pp. 21–45. (in Russian).

P. L. Tokarsky, A. A. Konovalenko, N. N. Kalinichenko,
and S. N. Yerin

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

EFFECT OF THE GROUND PARAMETER VARIATIONS
ON THE SENSITIVITY OF AN ACTIVE PHASED ARRAY
ANTENNA ELEMENT OF THE LOW-FREQUENCY
GURT RADIO TELESCOPE

Purpose: Theoretical studies of sensitivity fluctuations of a phased array antenna element for the GURT radio telescope of the new generation caused by seasonal changes of the ground parameters.

Design/methodology/approach: A mathematical model of an active antenna represented as a two-port network, whose electrical parameters are described with the scattering matrix and the noise parameters – with the covariation matrix of noise wave spectral densities was used for studying the GURT phased array antenna element composed of a dipole and a low-noise amplifier (LNA). Such a model allows a correct analysis of a signal-to-noise ratio at the active antenna output accounting for all internal and external noise sources.

Findings: A numerical analysis of the GURT radio telescope phased array antenna element characteristics was made in a wide frequency range of 8 to 80 MHz. It was found that the seasonal fluctuations of permittivity and conductivity of the ground, which make about 8 and 6 dB correspondingly, mostly affect the dipole efficiency and its impedance matching with the LNA. Variations of both parameters reach 3 dB but have the opposite sign, therefore their effect upon the active antenna sensitivity is mostly compensated. As a result, it is shown that the seasonal fluctuations of the ground parameters do not result in the substantial active antenna sensitivity variations, which lay in about the 0.5 dB range, and only at the lowest frequencies grow to about the 1.5 dB value.

Conclusions: The research efforts made have shown that the seasonal fluctuations of the ground electrophysical parameters result in small variations of the sensitivity of the GURT phased array antenna element, not exceeding ± 0.75 dB, which cannot affect the quality of radio-astronomy observations considerably. The results of this work can be useful in the development and researches of the ground active phased array antennas designed for operation in the meter and decameter wavelength ranges.

Keywords: radio telescope, phased array antenna, active antenna, noise temperature, sensitivity

П. Л. Токарський, О. О. Коноваленко,
М. М. Калініченко, С. М. Єрін

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

ВПЛИВ СЕЗОННИХ ВАРІАЦІЙ ПАРАМЕТРІВ
ГРУНТУ НА ЧУТЛИВІСТЬ ЕЛЕМЕНТА
АКТИВНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ
РАДІОТЕЛЕСКОПА ГУРТ

Предмет і мета роботи: Теоретичні дослідження змін чутливості елемента фазованої антенної решітки (ФАР) радіотелескопа нового покоління ГУРТ, спричинених сезонними коливаннями параметрів ґрунту.

Методи і методологія: Для дослідження елемента ФАР ГУРТ, що складається з диполя та малошумного підсилювача, використано математичну модель активної антени у вигляді чотириполосника, електричні параметри якого задаються матрицею розсіювання, а шумові – коваріаційною матрицею спектральних густин шумових хвиль. Така модель дозволяє виконувати коректний аналіз відношення сигнал/шум на виході активної антени з урахуванням зовнішніх та внутрішніх джерел шуму.

Результати: Виконано числовий аналіз характеристик елемента активної ФАР радіотелескопа ГУРТ у широкому діапазоні частот 8 ÷ 80 МГц. Встановлено, що сезонні коливання параметрів ґрунту, які складають близько 8 та 6 дБ за діелектричною проникністю та питомою провідністю відповідно, чинять найпомітніший вплив на ККД диполя та коефіцієнт його узгодження з малошумним підсилювачем. Варіації обох параметрів досягають 3 дБ, однак вони протилежні за знаком, тому їхній вплив на чутливість активної антени практично взаємно компенсується. У результаті показано, що сезонні зміни параметрів ґрунту не призводять до суттєвих варіацій чутливості активної антени, розмах яких у більшій частині діапазону частот складає близько 0.5 дБ і тільки з наближенням до нижньої його частоти зростає приблизно до 1.5 дБ.

Висновок: Виконані у роботі дослідження показали, що сезонні коливання електрофізичних параметрів ґрунту призводять до незначних варіацій чутливості елемента ФАР ГУРТ, що не перевищують ± 0.75 дБ, які не можуть помітно вплинути на якість радіоастрономічних спостережень. Результати цієї роботи можуть бути корисними у розробці та дослідженнях приземних активних ФАР, призначених для роботи в діапазонах метрових та декаметрових хвиль.

Ключові слова: радіотелескоп, фазована антенна решітка (ФАР), активна антенна, шумова температура, чутливість

Статья поступила в редакцию 15.10.2019