

## ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО И УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.396.96

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ

© 2022 г. Е. Л. Шошин<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> Сургутский государственный университет

Россия, Ханты-Мансийский автономный округ—Югра, 628400, Сургут, просп. Ленина, 1

\*e-mail: shoshin\_el@surgu.ru

Поступила в редакцию 30.12.2021 г.

После доработки 15.01.2022 г.

Принята к публикации 20.01.2022 г.

Рассмотрено применение антенны Вивальди в подповерхностной радиолокации. Выполнен анализ влияния дерновых почв на характеристики антенны антиподального типа. Получены оценки ширины главного лепестка диаграммы направленности, коэффициента направленного действия, уровня отношения Front-to-Back антенны в зависимости от влажности почв. Рассчитаны диаграммы направленности антенны при зондировании песка с влажностью 2, 8 и 22%. Рассмотрена установка для исследования характеристик антенн с использованием скалярного анализатора P2M-18. Выполнены измерения дисперсионных характеристик, диаграммы направленности и коэффициента усиления лабораторного образца антенны.

DOI: 10.31857/S0032816222030193

#### ВВЕДЕНИЕ

Антенны Вивальди способны работать в широком частотном диапазоне, что достигается благодаря расширяющейся щелевой линии передачи [1, 2]. Антенны Вивальди имеют симметричный главный лепесток, хорошее усиление и низкий уровень боковых лепестков. В отличие от спиральных, логопериодических антенн и антенн “бабочка”, излучатели Вивальди при парном соединении позволяют формировать излученные сигналы с линейной, круговой и эллиптической поляризацией и выполнять прием рассеянных сигналов [3, 4]. Антенны Вивальди получили широкое распространение при реализации беспроводных систем связи. Еще одной областью применения антенн Вивальди является подповерхностная радиолокация, в цели которой входят определение состояния почвогрунтов, обнаружение и реконструкция объектов, размещенных в подповерхностных средах [5]. Направленные свойства и дисперсионные характеристики излучателя Вивальди зависят от формы излучателя, а в случае подповерхностного радиолокационного зондирования на энергетические характеристики излучателя будут оказывать влияние почвогрунты. Зондируемые подповерхностные среды представляют собой сложные объекты, у которых комплексная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ , тангенс диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  и электропроводность  $\sigma$  зависят от материала среды, частоты электромагнитного поля, плотности, пористости, влажности и температуры [6].

Целью данной работы является разработка конструкции антенны Вивальди для подповерхностного радиолокационного зондирования, численный расчет параметров антенны в условиях различной влажности почвогрунтов и экспериментальное исследование характеристик лабораторного образца антенны.

#### КОНСТРУКЦИЯ АНТЕННЫ

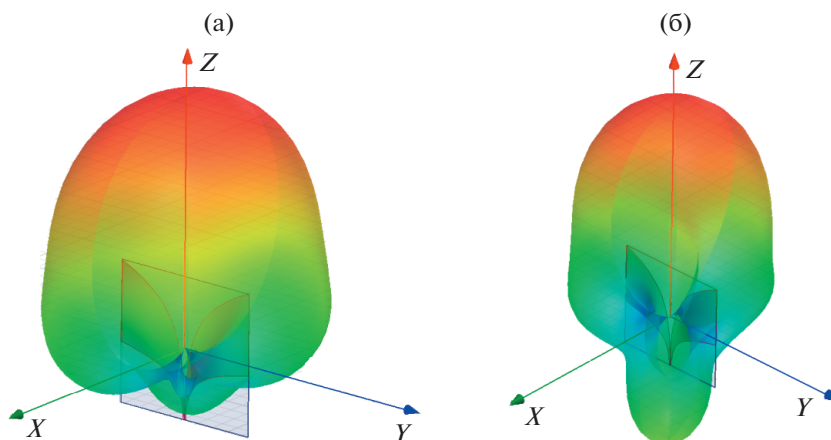
Излучатель Вивальди антиподального типа конструктивно представляет собой печатный излучатель, построенный на основе щели с экспоненциальным профилем [7]:

$$W(y) = W_S e^{ay}, \quad (1)$$

$$a = (1/L_S) \ln(W_{OUT}/W_{IN}), \quad (2)$$

где  $W_{IN}$  — ширина щелевой линии в области возбуждения,  $W_{OUT}$  — ширина щелевой линии на выходе антенны,  $L_S$  — длина нерегулярной щелевой линии.

Конструкцией георадаров предусматривается использование сменных антенных блоков, выполняющих подповерхностное радиолокационное зондирование в диапазоне частот от 25 до 1700 МГц [5]. Низкочастотные антенны используются при проведении инженерно-геологических работ и обследовании объектов на глубинах до 10–30 м с разрешением по глубине 0.5–2 м. Высокочастотные антенны позволяют проводить детальные исследования приповерхностных слоев с разреше-



**Рис. 1.** Трехмерная диаграмма направленности антенны Вивальди в ближнем поле излучения: **а** – в сухой песок; **б** – в умеренно-влажную глину.

нием по глубине 3–5 см, а также выявлять металлические включения при зондировании бетонных строительных конструкций. Подповерхностное радиолокационное зондирование на центральных частотах 400 и 700 МГц позволяет провести исследование инженерно-геологических элементов почвогрунтов, диагностику состояния находящихся в эксплуатации подземных сетей коммуникации и измерение длины железобетонных свай, установленных в грунт [4, 5].

Рассмотрим применение антенны Вивальди для работы в составе георадара в диапазоне частот 400–750 МГц. Обоснуем выбор толщины подложки. Согласно работе [8], требование к эффективной толщине  $t_{эф}$  подложки антенн с расширяющейся щелью определяется как

$$\frac{t_{эф}}{\lambda_0} = \frac{(\sqrt{\epsilon_r} - 1)t}{\lambda_0}, \quad (3)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве,  $t$  – толщина подложки, а  $\epsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость подложки.

Условие направленной передачи сигналов антеннами с расширяющейся щелью имеет вид

$$0.005 \leq \frac{t_{эф}}{\lambda_0} \leq 0.03. \quad (4)$$

Нижняя граница в формуле (4) связана с режим уменьшения коэффициента направленного действия антенны, а превышение верхней границы приводит к появлению нежелательных мод в подложке, которые способствуют увеличению боковых лепестков в диаграмме направленности антенны.

Для работы излучателя Вивальди в выбранном диапазоне частот в качестве материала подложки можно использовать стеклотекстолит толщиной 3 мм с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 5$ .

Выполним параметрический синтез топологии излучателя Вивальди, направленный на достижение минимальных значений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН < 2) с учетом требований по формированию направленных свойств излучателя в ближней зоне. В качестве подповерхностной среды выберем сухой песок ( $\epsilon = 4.6$  и  $\sigma = 0.002$  См/м). Ниже приведены результаты численного расчета параметров топологии излучателя:

Параметр	$L$	$L_S$	$W$	$W_S$
Величина, мм	400	230	430	5

#### ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВОГРУНТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ

Подповерхностная среда оказывает существенное влияние на характеристики антенны Вивальди. Частотные зависимости электрофизических параметров дерново-подзолистой почвы, песка и глины определяются содержанием влаги и наличием солей [6]. У сухих почвогрунтов частотная дисперсия параметров  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  в диапазоне частот 50–3.5 ГГц отсутствует.

На рис. 1 приведена рассчитанная 3D-диаграмма направленности антенны Вивальди при контактном излучении в песок ( $\epsilon = 4.5$ ,  $\text{tg}\delta = 0.065$ ) и умеренно влажную глину ( $\epsilon = 13$ ,  $\text{tg}\delta = 0.33$ ). Сравнение рис. 1а и рис. 1б демонстрирует деформацию главного лепестка диаграммы направленности, обусловленную значительной электропроводностью умеренно-влажной глины и возникающими при этом потерями электромагнитных волн.

Увеличение влажности дерновых почвогрунтов практически во всех случаях приводит к сужению главного лепестка диаграммы направленно-

сти излучателя Вивальди, одновременно с этим увеличивается коэффициент направленного действия, который учитывает степень рассогласования с линией питания. Результаты численного моделирования свидетельствуют, что при изменении влажности песка, дерна и глины от 2 до 30% главный лепесток диаграммы направленности излучателя на частоте 600 МГц в плоскости подложки антенны сужается до  $45^\circ$  (рис. 2а), коэффициент направленного действия увеличивается до 7.5–9 (рис. 2б), а коэффициент Front-to-Back уменьшается до 2–3 (рис. 2в).

Анализ характеристик антенны Вивальди при излучении в воду ( $\epsilon = 81$ ) показывает, что возникающая рассогласованность при излучении и значительная электропроводность морской воды являются основными причинами, затрудняющими глубоководное зондирование водоемов. При излучении в морскую воду уровень главного лепестка диаграммы направленности антенны оказывается меньше уровня обратного излучения, если конструкцией антенны не предусмотрен экран между излучателем и воздушной полусферой. В табл. 1 приведены результаты численного расчета влияния электропроводности воды на характеристики антенны Вивальди.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что дерновые почвогрунты и вода влияют практически на все характеристики излучателя Вивальди. Наиболее благоприятной средой для подповерхностного зондирования является песок, на рис. 3 для него приведены диаграммы направленности, рассчитанные для частоты 600 МГц в зависимости от влажности песка.

#### ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ

Установка предназначена для измерения дисперсионных и энергетических характеристик антенн в диапазоне частот от 10 МГц до 18 ГГц. В состав установки входит скалярный анализатор P2M-18 [9], который может работать в качестве индикатора мощности. Для управления P2M-18 и отображения результатов измерений используется программа P2M под управлением операционной системы Microsoft Windows.

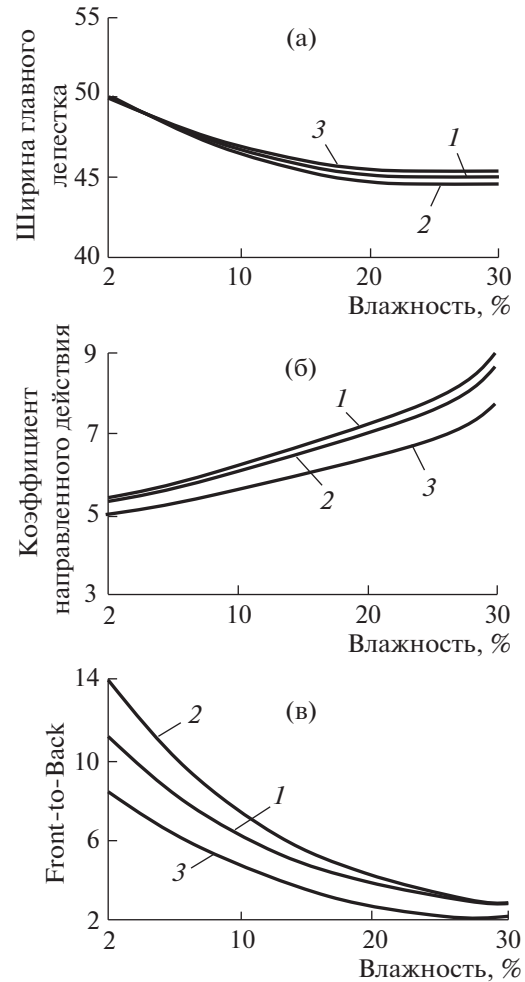


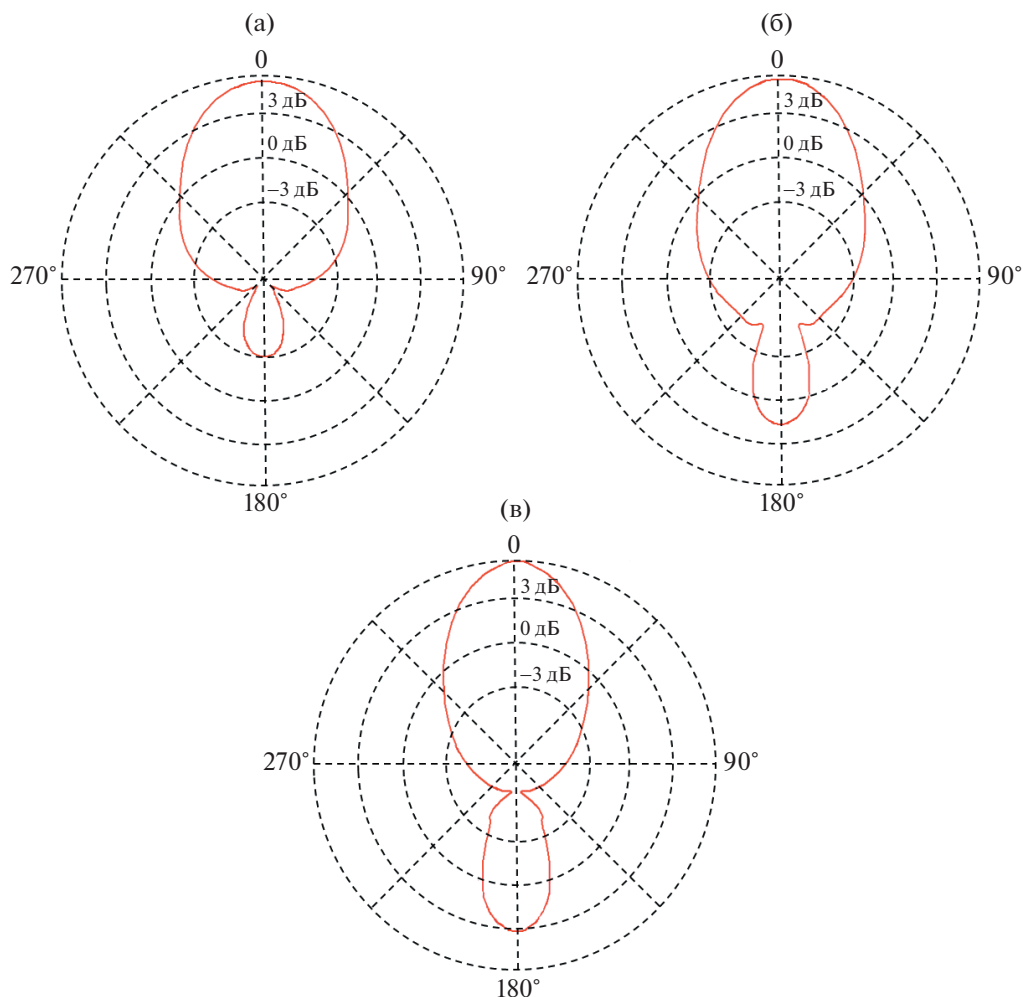
Рис. 2. Влияние влажности песка (1), дерна (2) и глины (3) на характеристики излучателя Вивальди: а – ширину главного лепестка диаграммы направленности; б – коэффициент направленного действия; в – коэффициент Front-to-Back.

P2M-18 имеет сверхвысокочастотные (с.в.ч.) входы и выход:

- вход “А” – (по умолчанию) для подключения датчика коэффициента стоячей волны (КСВ);
- вход “В” – (по умолчанию) для подключения детектора;

Таблица 1. Характеристики антенны Вивальди при излучении в воду

Вода	Наличие экрана	Ширина главного лепестка	Уровень боковых лепестков, дБ	Коэффициент направленного действия
Дистиллированная	нет	$45^\circ$	–6.4	7.0
Речная	нет	$45^\circ$	–3.2	3.6
Морская	есть	$42^\circ$	–3	8.8



**Рис. 3.** Диаграммы направленности излучателя Вивальди при зондировании: **а** – песка (влажность 2%); **б** – умеренно-влажного песка (8%); **в** – влажного песка (22%).

– вход “R” – (по умолчанию) для подключения детектора опорного сигнала в режимах измерений “A/R” и “B/R”;

– “СВЧ” – выходной разъем генерируемых с.в.ч.-колебаний.

#### Технические характеристики анализатора P2M-18:

– диапазон рабочих частот – от 10 МГц до 18 ГГц;

– полоса качания частоты – от 0.001 до 3990 МГц;

– уровень мощности на выходном разьеме “СВЧ” –  $\pm 10$  дБм;

– диапазон измерений КСВН – от 1.05 до 5.00;

– диапазон измерений модуля коэффициента передачи – не менее 50;

– пределы допускаемой погрешности измерения КСВН при  $K_{CT} \leq 2$  – не более  $\pm(3K_{CT} + 1)\%$ , где  $K_{CT}$  – измеряемое значение КСВН;

– пределы допускаемой погрешности измерения модуля коэффициента передачи – не более

$\pm(0.03A + 0.2)$  дБ, где  $A$  – измеряемое значение коэффициента передачи.

Фотография установки для измерения дисперсионных характеристик антенны Вивальди приведена на рис. 4.

#### Характеристики датчика $D_{КСВ}$ :

– максимальный уровень входной мощности – 500 мВт;

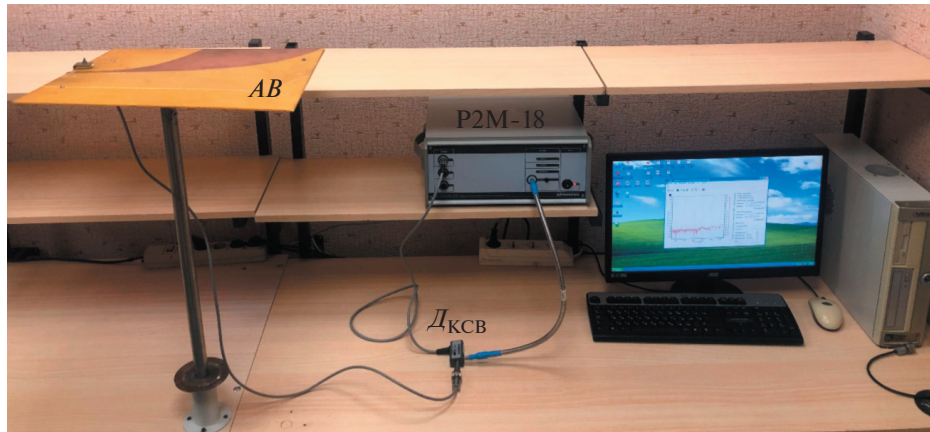
– вносимые потери – 6.5 дБ;

– направленность – 35 дБ;

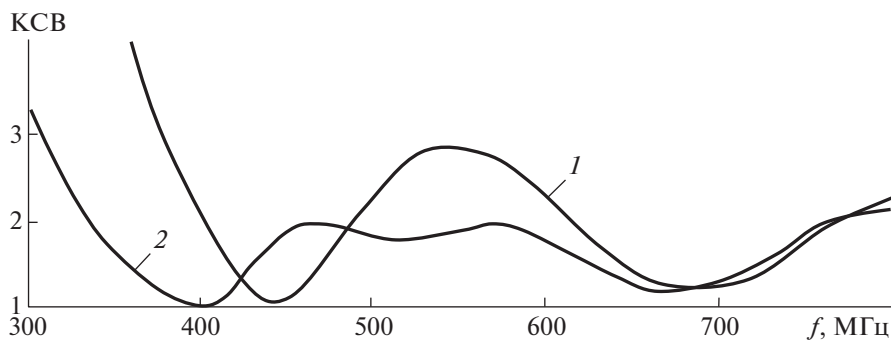
– КСВН измерительного входа – не хуже 1.2.

На рис. 5 приведены измеренные дисперсионные характеристики антенны Вивальди при зондировании в воздушную полусферу и песок.

Для измерения направленных свойств и коэффициента усиления исследуемой антенны традиционно применяют измерительную антенну. Последнюю при этом используют на излучение, а исследуемую антенну – на прием. Совокупность



**Рис. 4.** Схема лабораторной установки для измерения дисперсионных характеристик антенны. *AB* – антенна Вивальди; *ДКСВ* – выносной датчик для измерения отражений; P2M-18 – скалярный с.в.ч.-анализатор.



**Рис. 5.** Дисперсионные характеристики антенны Вивальди при зондировании в воздушную полусферу (1) и песок (2).

измерений уровней принятых сигналов, полученных при угловых перемещениях приемной антенны, позволяет построить диаграмму направленности. На основе абсолютных измерений уровней излученного и принятого сигналов можно определить коэффициент усиления испытываемой антенны. В случае исследования антенны Вивальди в силу ее широкой полосы рабочих частот можно провести измерение коэффициента усиления не на одной частоте, а на нескольких. Для этого измерительная антенна должна иметь узкий диапазон рабочих частот с возможностью перестройки центральной частоты.

Фотография лабораторной установки для исследования энергетических характеристик антенны Вивальди приведена на рис. 6.

#### Характеристики детекторной секции:

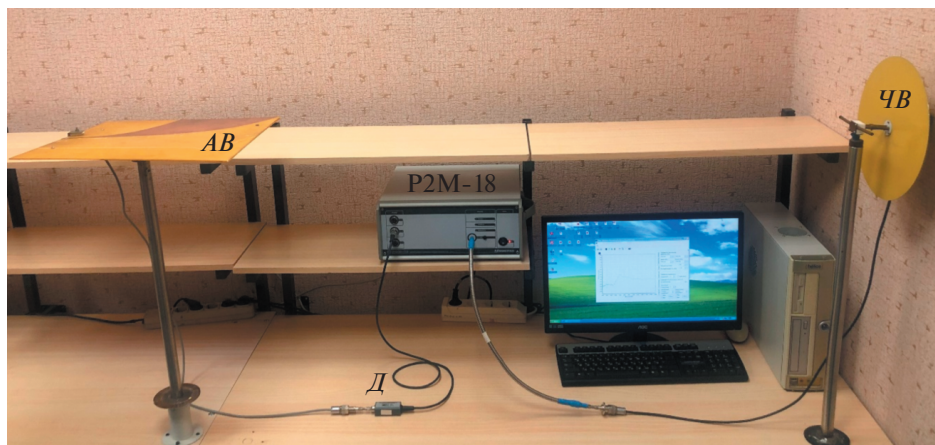
- максимальный уровень входной мощности – 100 мВт;
- динамический диапазон – от –50 до +16 дБм;
- неравномерность частотной характеристики – 1 дБ;
- КСВН измерительного входа – не хуже 1.15.

Излучающий четвертьволновый вибратор, оснащенный плоским контррефлектором и имеющий два плеча в форме медных круглых стержней с изменяемой длиной, устанавливается на неподвижном штативе и подключается к разъему “СВЧ” скалярного с.в.ч.-анализатора. Коэффициент усиления четвертьволнового вибратора составляет 2.2 дБ.

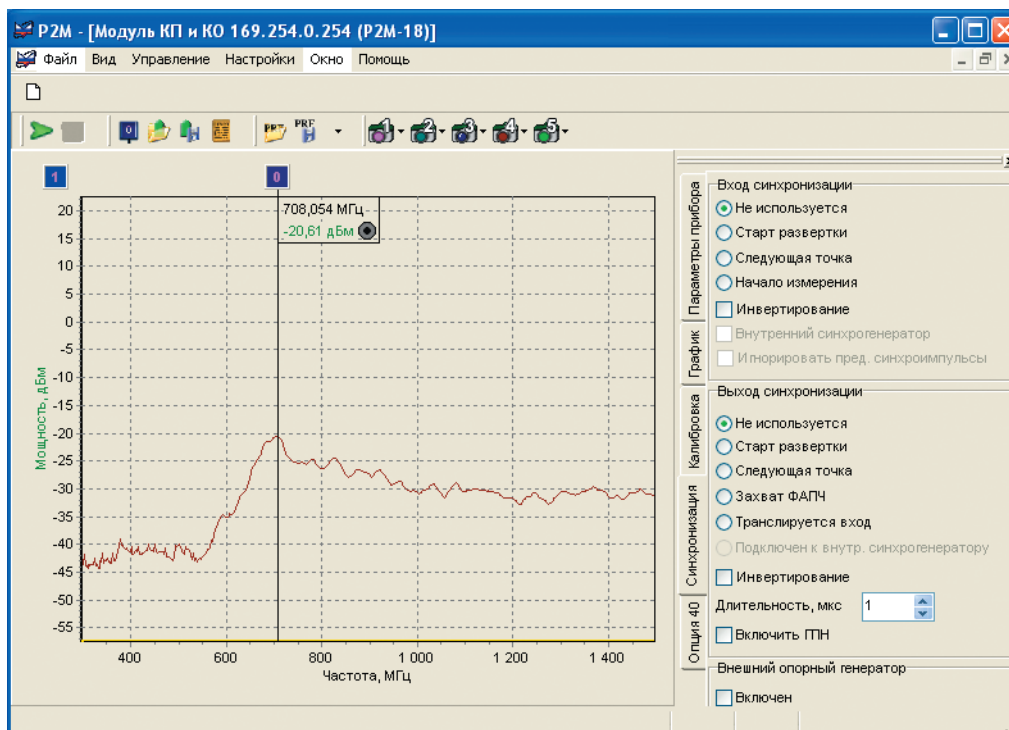
Приемная антенна Вивальди устанавливается на подвижном штативе и с помощью коаксиального кабеля подключается ко входу выносной детекторной секции. Для измерения диаграммы направленности антенна Вивальди поворачивается вокруг оси в плоскости подложки, что обеспечивает снятие зависимости мощности принятого сигнала от угла поворота.

При измерении коэффициента усиления антенны Вивальди ее необходимо установить в угловое положение, соответствующее максимуму уровня принятого сигнала мощностью  $P_{пр}$ , дБм. Расчет коэффициента усиления  $G_{AB}$ , дБ, антенны Вивальди выполняется по формуле

$$G_{AB} = P_{пр} - P_{изл} - G_{ЧВ} - (\eta_{AB} + \eta_{ЧВ}) - 2W,$$



**Рис. 6.** Схема установки для измерения диаграммы направленности и коэффициента усиления антенны Вивальди. ЧВ – четвертьволновый вибратор; АВ – антенна Вивальди; Д – детекторная секция; P2M-18 – скалярный с.в.ч.-анализатор.



**Рис. 7.** Окно программы P2M.

где  $P_{\text{изл}}$ , дБм – мощность сигнала с разъема “СВЧ”;  $G_{\text{ЧВ}}$ , дБ – коэффициент усиления четвертьволнового вибратора;  $(\eta_{\text{AB}} + \eta_{\text{ЧВ}})$ , дБ – потери в коаксиальных кабелях;  $2W$ , дБ – потери сигнала по радиоканалу:

$$2W = 10 \lg \left( \frac{\lambda^2}{16\pi^2 R^2} \right),$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $R = 1$  м – расстояние между излучающей и приемной антеннами.

На рис. 7 приведено окно программы P2M, с использованием которой выполнено измерение уровня принимаемого сигнала на частоте 708 МГц.

#### Характеристики антенны Вивальди:

– полоса рабочих частот – 320–760 МГц;

- ширина главного лепестка диаграммы направленности в плоскости подложки:
  - при излучении в песок –  $50^\circ$ ,
  - при атмосферном приеме –  $55^\circ$ ;
- коэффициент усиления:
  - при излучении в песок на частоте 600 МГц – 5.8 дБ,
  - при атмосферном приеме на частоте 520 МГц – 4.3 дБ;
  - при атмосферном приеме на частоте 610 МГц – 4.5 дБ;
  - при атмосферном приеме на частоте 708 МГц – 4.1 дБ;
- уровень боковых лепестков – 12 дБ;
- габариты –  $600 \times 600 \times 3$  мм.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергетические характеристики антенны Вивальди позволяют использовать ее в составе радиолокатора подповерхностного зондирования. При контактном излучении в сухой песок ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны антиподального типа в плоскости подложки достигает  $50^\circ$ , а уровень боковых лепестков составляет –12 дБ. При изменении влажности дерновых почв от 2 до 30% главный лепесток диаграммы направленности антенны на частоте 600 МГц в плоскости подложки сужается до  $45^\circ$ , коэффициент направленного действия увеличивается до 7.5–9. При излучении в речную воду уровень боковых лепестков антенны возрастает до –3.2 дБ.

Использование скалярного с.в.ч.-анализатора P2M-18 позволяет выполнить измерение дисперсионных и энергетических характеристик антенны Вивальди. Диапазон рабочих частот лабораторного образца антенны при излучении в песок составляет 320–760 МГц. Коэффициент усиления антенны при атмосферном приеме радиосигналов с частотами 520–708 МГц изменяется в пределах 4.1–4.5 дБ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Perdana M.Y., Hariyadi T., Wahyu Y.* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 180 (1). P. 012058. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/180/1/012058>
2. *Костиков Г.А.* Автореф. дисс.... канд-та техн. наук. СПб., 2007.
3. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Расчет антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS Ansoft. М.: ЗАО “НПП Родник”, 2009.
4. *Шошин Е.Л.* // Вестник кибернетики. 2020. № 3 (39). С. 62.
5. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2005.
6. *Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н.* Подповерхностная радиолокация. М.: Радио и связь, 1994.
7. *Gibson P.J.* // 9th European Microwave Conference Proceedings. Brighton, 17–20 September 1979. P. 101.
8. *Wood I.* Ph.D. dissertation. USA, University of Victoria, 2005.
9. Измеритель модуля коэффициента передачи и отражения P2M-18. Руководство по эксплуатации в двух частях. 2007.