



Омский
государственный
университет
им. Ф.М. Достоевского

Изучение влияния радиофизических характеристик подстилающей поверхности на диаграмму направленности вертикального полуволнового вибратора

Авторы

М.н.с. ИРФЭ ОНЦ СО РАН

Никифорова Алёна Олеговна

Студент ОмГУ им Ф.М. Достоевского

Рычков Роман Алексеевич



На направленные характеристики антенн влияет множество параметров. Подстилающая поверхность оказывает большое влияние на направленные характеристики излучателей ДКМВ диапазона. Под направленными характеристиками подразумевается диаграмма направленности (ДН) — графическое представление интенсивности излучения антенной в различных направлениях. Подстилающая поверхность характеризуется радиофизическими параметрами, к их числу относится комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) — комплексная величина, описывающая взаимодействие диэлектрика с переменным электрическим полем.



Цель работы: Изучить влияние радиофизических характеристик подстилающей поверхности на диаграмму направленности вертикального полуволнового вибратора

Задачи:

- 1) Изучить методы измерения КДП
- 2) Измерить КДП предоставленного образца
- 3) Выбрать ПО для моделирования ДН вертикального полуволнового вибратора
- 4) Проанализировать полученные модели ДН и определить зависимость между радиофизическими характеристиками подстилающей поверхности и направленными характеристиками антенны



Методы измерения КДП

1. Низкие частоты (100 Гц — 1 МГц) — конденсаторные методы [1]

- Измерительный конденсатор с плоскими пластинами
- Плоский конденсатор с частичным заполнением
- Цилиндрический и сферический конденсаторы

2. Высокие частоты, СВЧ — резонансные методы

- Метод замещения
- Метод расстройки контуров
- Измерения с помощью куметра
- Метод биений
- Радиоинтерференционный метод

3. СВЧ (>50-100 МГц) — волноводные методы [2]

- Первый метод Друде
- Использование коаксиальных линий



Омский
государственный
университет
им. Ф.М. Достоевского

Широкополосный метод

Измерение комплексного коэффициента передачи

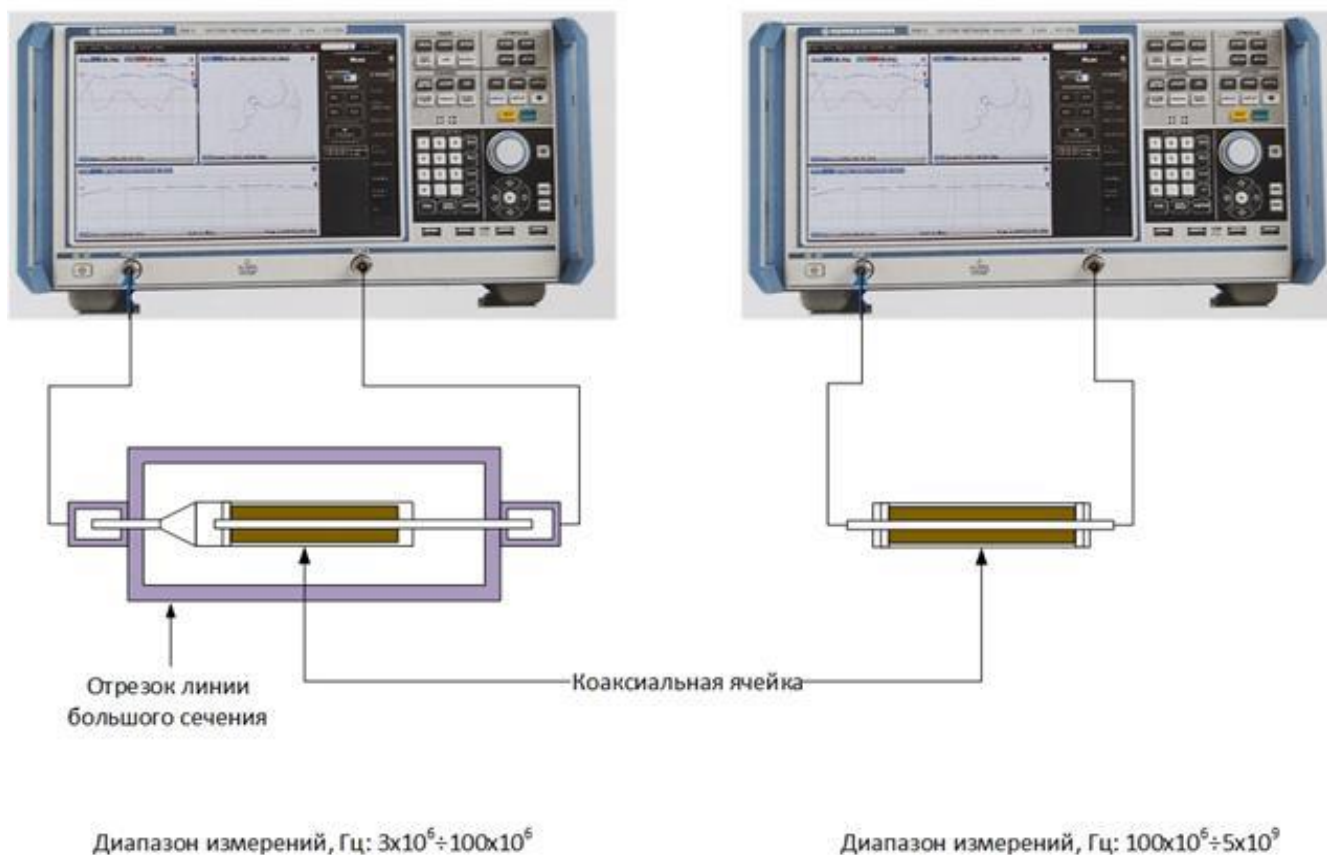


Рисунок 1. Схематическое изображение широкополосного метода



Широкополосный метод

Исследуемое вещество помещают в коаксиальную ячейку между двумя фторопластовыми шайбами, представляющую собой отрезок коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 Ом. Коаксиальная ячейка подключается к векторному анализатору цепей, который измеряет коэффициенты матрицы рассеяния (для определения КДП достаточно знать комплексный коэффициент передачи - параметр S_{12}). Для восстановления значения КДП используются математические методы поиска минимума целевой функции [2].



Широкополосный метод

Для восстановления КДП используется точная формула для расчёта параметра S_{12} слоистой структуры и модифицированная для случая сред с потерями:

$$\frac{1}{S_{12}} = \prod_{n=0}^{n=3} \frac{Z_n + Z_{ex(n+1)}}{Z_{(n+1)} + Z_{ex(n+1)}} e^{-ik_n d_n}, \quad (1)$$

где Z_{vx1} , Z_{vx2} и Z_{vx3} — комплексные входные сопротивления, определяемые по формуле:

$$Z_{exn} = \frac{Z_{ex(n+1)} + Z_n th(ik_n d_n)}{Z_n + Z_{ex(n+1)} th(ik_n d_n)} Z_n, \quad (2)$$

Где $n=1,2,3$ — индекс слоя; $Z_{vx4}=Z_4=Z_0$ — волновое сопротивление линии (50 Ом); i — мнимая единица; $k_n = k_0 \cdot n_n$ — комплексное волновое число i -го слоя; d_n — толщина n -го слоя [2].



Широкополосный метод

На частотах ниже 100 МГц коаксиальная ячейка начинает оказывать влияние на амплитуду и фазу проходящей через неё и образец электромагнитной волны, что повышает погрешность метода. С целью повышения точности определения КДП исходная ячейка помещается в отрезок коаксиальной ячейки большего поперечного сечения, где исходная ячейка выполняет роль центрального проводника [3].



Подготовка образца

- 1) Высушивание в печке
- 2) Измельчение для удаления ненужных примесей (корни, большие частицы, другие органические остатки)
- 3) Увлажнение (используется дистиллированная вода)
- 4) За сутки до измерений образец помещается в соответствующую по влажности ячейку



Определение влажности образца

Влажность образца определяется термостатно-весовым методом, который является наиболее точным. Для этого после измерений образец помещается в бюкс (металлическую баночку) с известной массой, взвешивается для получения массы влажного образца вместе с известной массой бюкса, и выдерживается сутки в печи при температуре 105°C . После повторного взвешивания аналогичным образом определяется масса сухого образца, и на основе разницы масс влажного и сухого образца определяется влажность [2].



Образец почвы

Образец почвы отобран в районе Новотроицкого сельского поселения на левом берегу реки Иртыш в пределах почвенного горизонта 20-30 см. Образец не засолен, относится к рыхлым песчаноглинистым осадочным горным породам (супесь). Механический (содержание фракций) и катионно-анионный состав образцов почв определялся в Омском филиале ФГБУ «РосАгрохимслужба».



Результаты измерений КДП

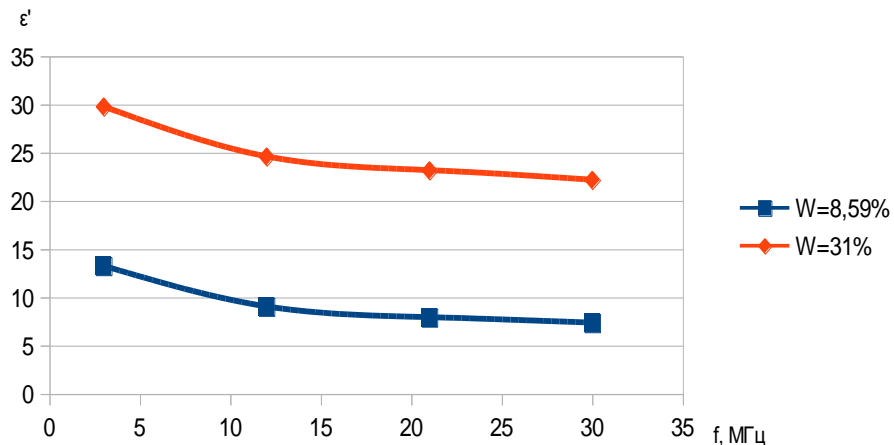
Супесь					
Влажность, %			Влажность, %		
8,59			31		
МГц	ϵ'	ϵ''	МГц	ϵ'	ϵ''
3	13,25	41,32	3	29,77	177,36
12	9,04	12,69	12	24,59	47,47
21	7,92	8,10	21	23,16	28,79
30	7,35	6,20	30	22,17	21,49

Таблица 1. Полученные значения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости



Зависимость КДП от частоты

$\varepsilon'(f)$



$\varepsilon''(f)$

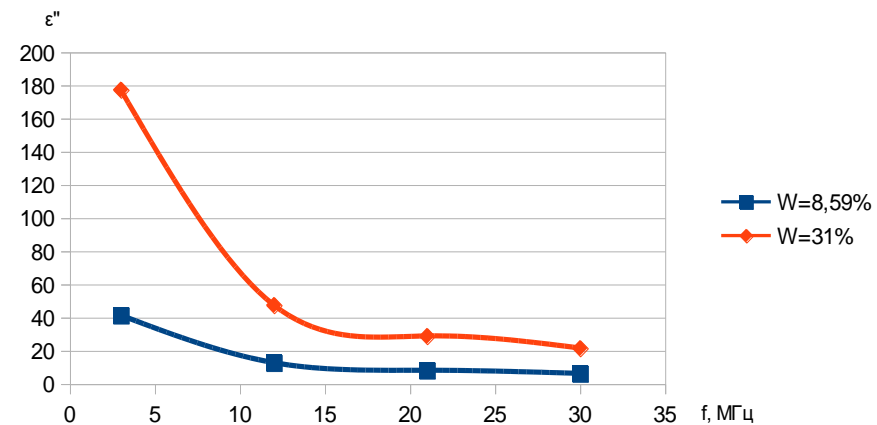


Рисунок 2. Зависимость действительной и мнимой частей КДП от частоты при двух значениях влажности



Направленные свойства

Диаграмма направленности излучателя характеризует интенсивность излучения в различных направлениях в пространстве. Для передающей антенны используют ДН по напряженности поля в электрической составляющей электромагнитного поля или по уровню его мощности. Диаграмма направленности описывает, каким образом антенна излучает или принимает электромагнитные волны в разных направлениях. Может быть представлена в виде графика в прямоугольных или полярных координатах, где радиус вектора указывает на мощность или уровень сигнала в определённом направлении [4].



Программы для моделирования диаграмм направленностей

- ANSYS HFSS
- Altair FEKO
- MATLAB Antenna Toolbox
- Antenna Pattern Editor
- MMANA-GAL



Полуволновой вертикальный вибратор

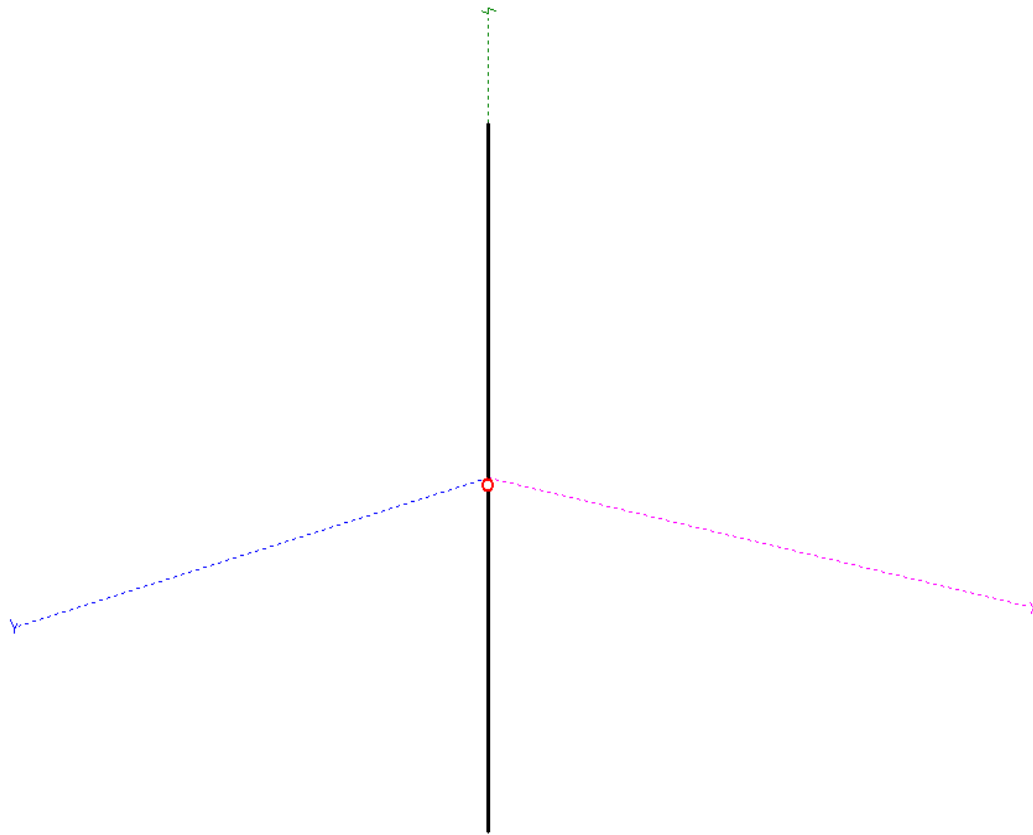


Рисунок 3. Модель антенны в MMANA-GAL BASIC



Моделирование ДН

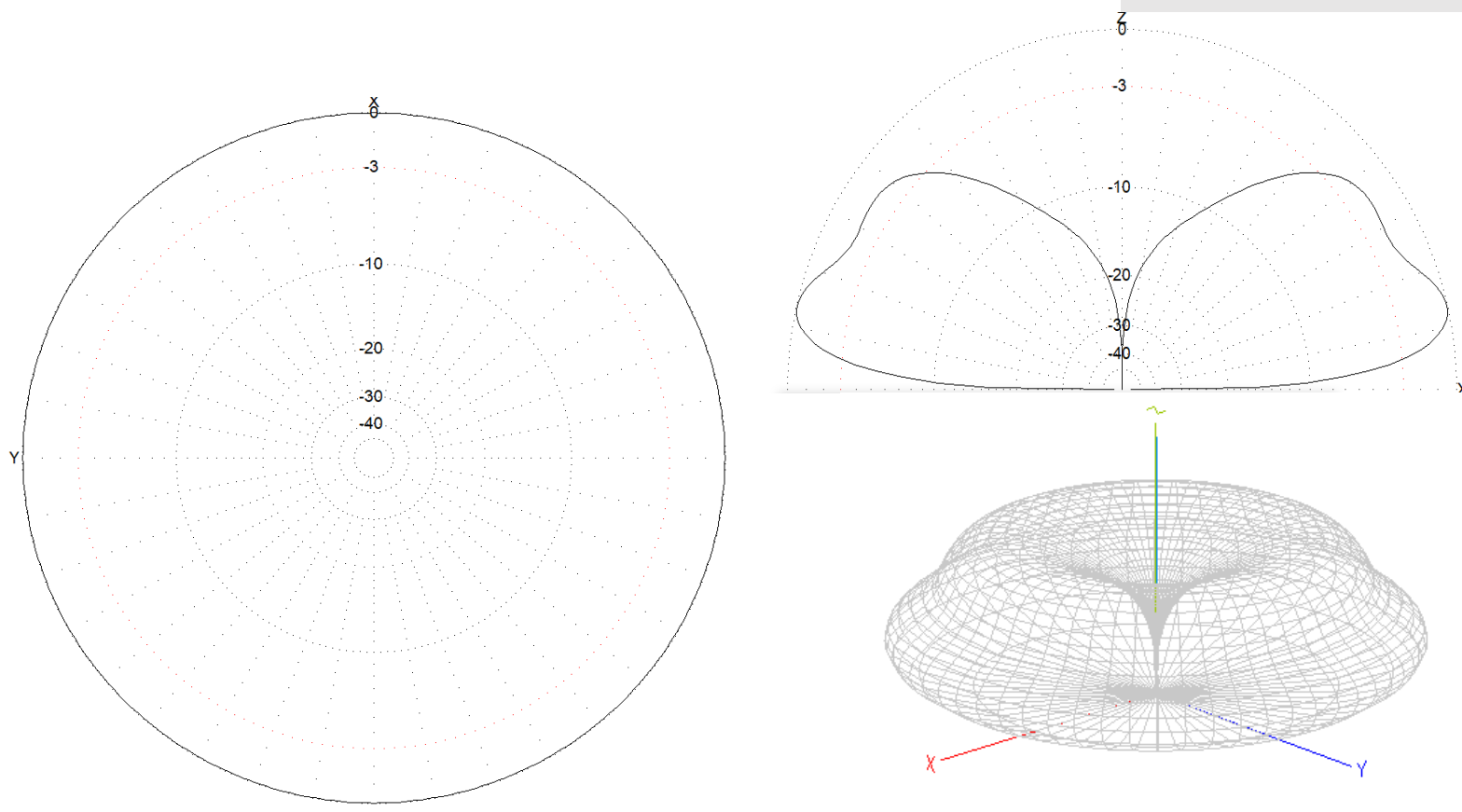


Рисунок 4. ДН вертикального полуволнового вибратора над песчаной почвой в H -плоскости, E -плоскости и 3D модель при $f = 30$ МГц, $W = 7,72\%$



Моделирование ДН

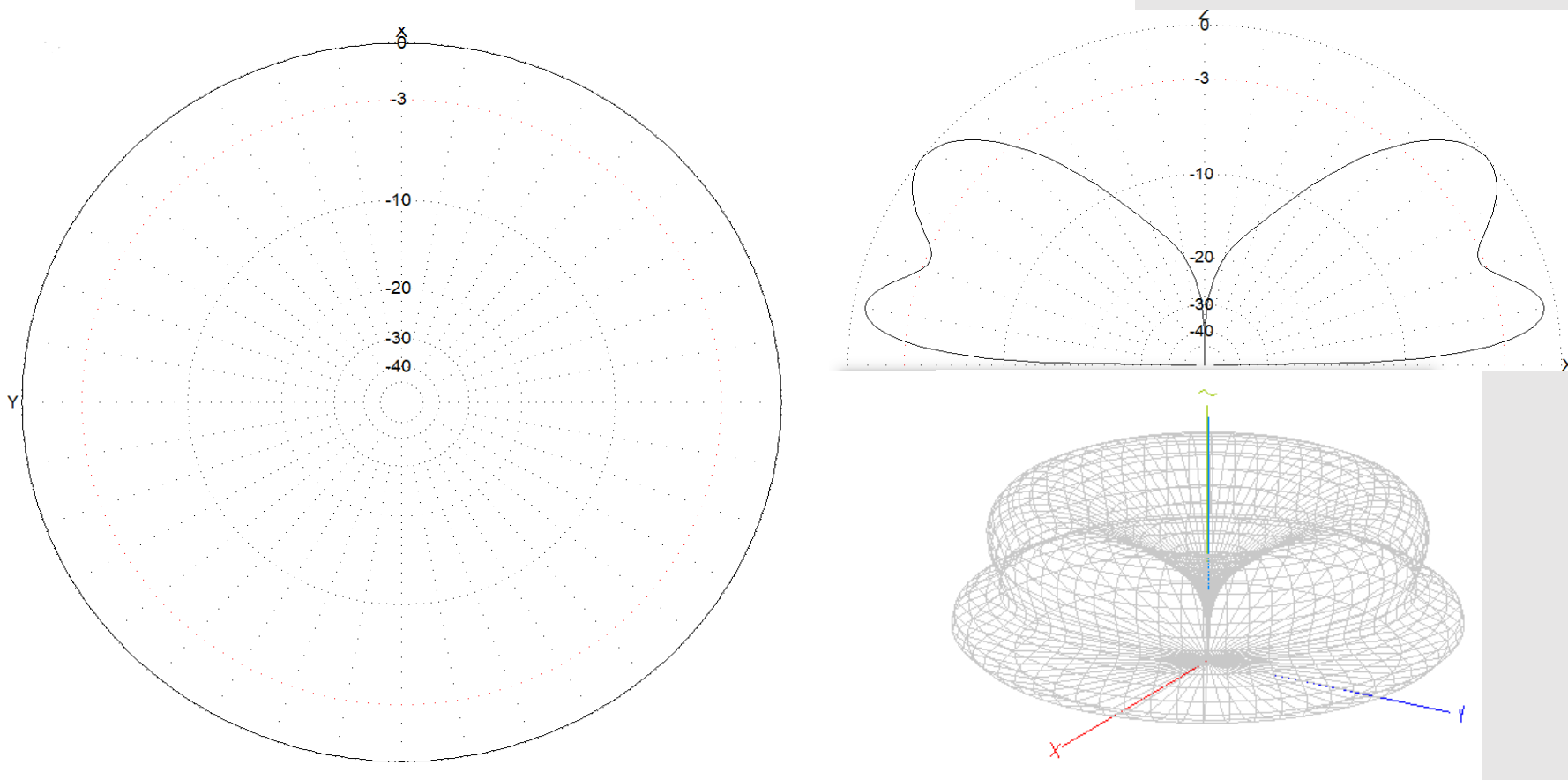
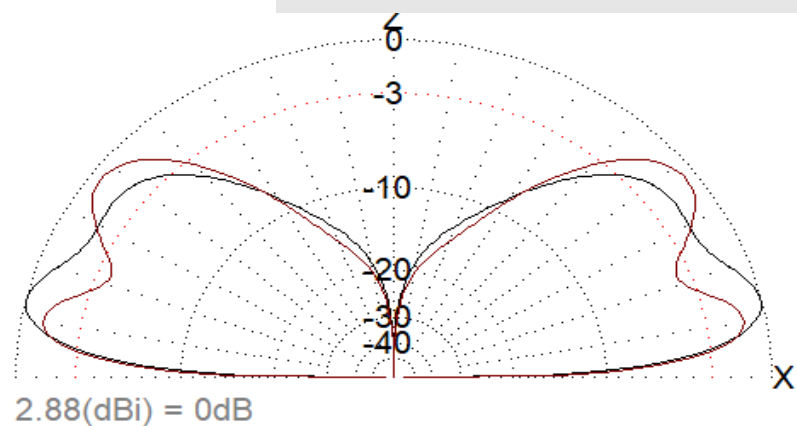
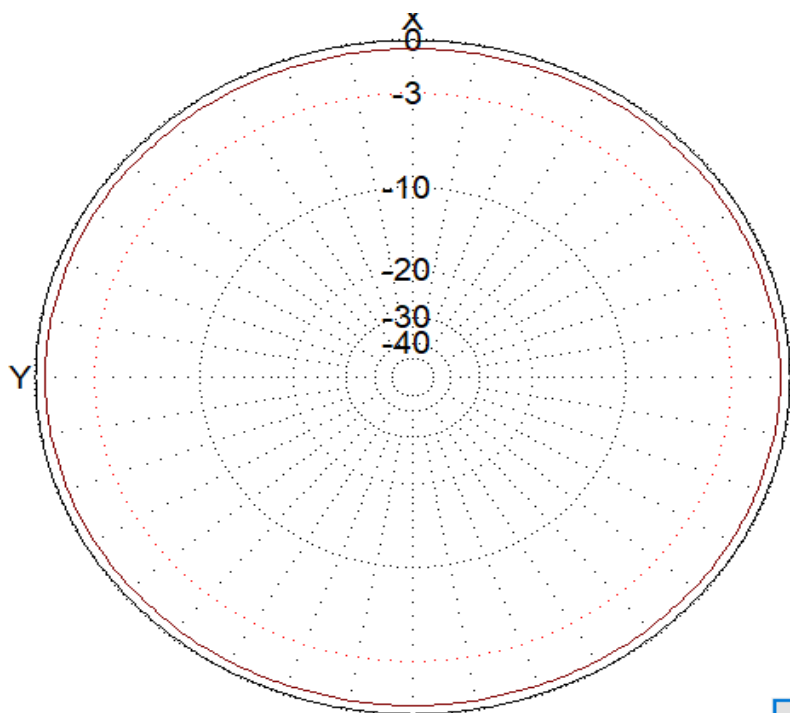


Рисунок 5. ДН вертикального полуволнового вибратора над песчаной почвой в H -плоскости, E -плоскости и 3D модель при $f = 30$ МГц, $W = 30,29\%$



Сравнение ДН



Показать ДН для поляризации

V H Total V+H

Открыть *.mav файл

Очистить

Цвет

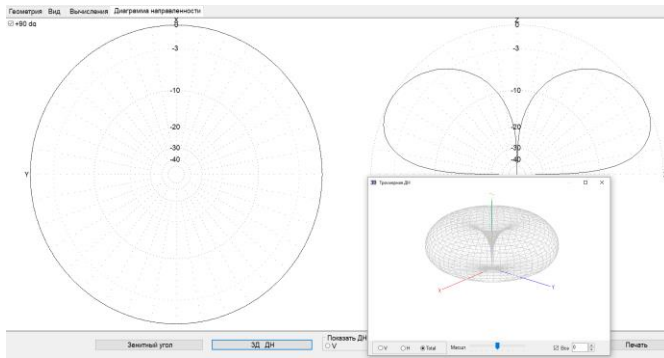
Возврат

Рисунок 6. Сравнение ДН в E- и H-плоскостях (чёрный цвет: $W=7,72\%$, красный цвет: $W=30,29\%$)

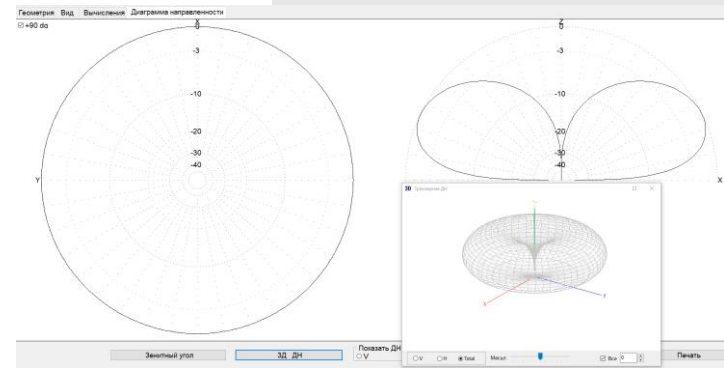


**Омский
государственный
университет**
им. Ф.М. Достоевского

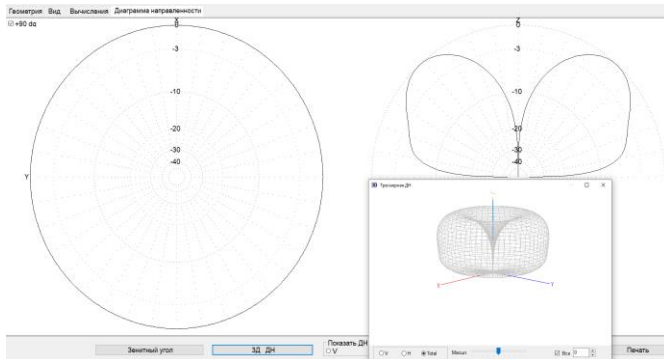
ДН вертикального полуволнового вибратора. Песчаная почва, $W = 7,72\%$



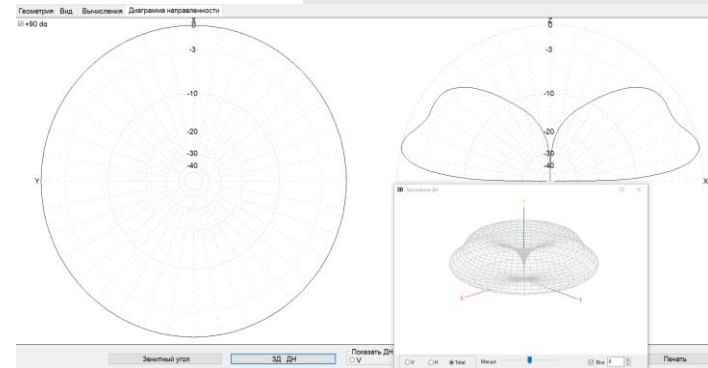
$f = 3 \text{ МГц}$



$f = 12 \text{ МГц}$



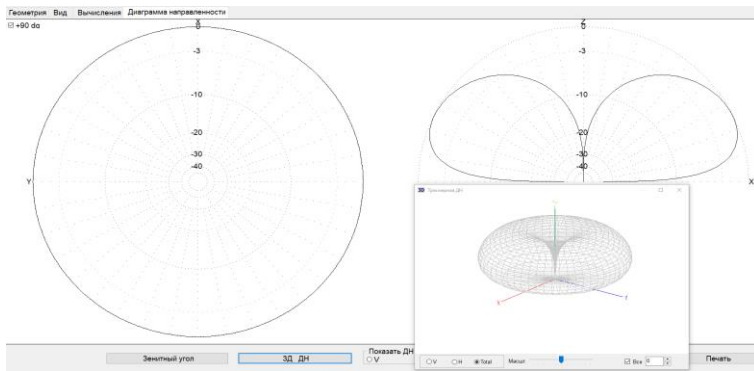
$f = 21 \text{ МГц}$



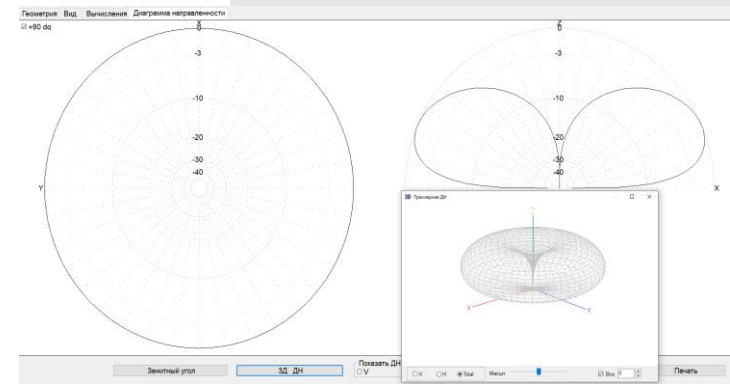
$f = 30 \text{ МГц}$



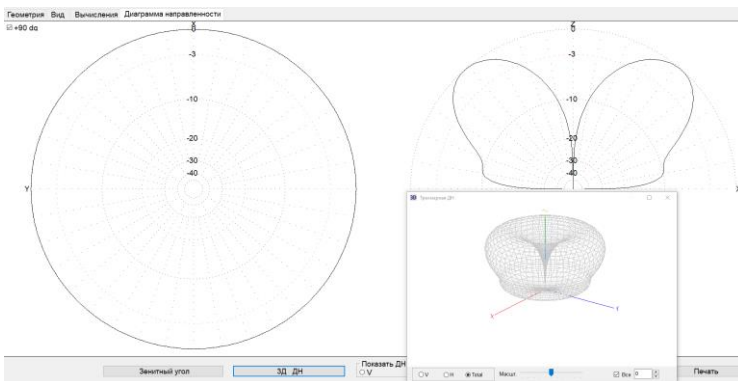
ДН вертикального полуволнового вибратора. Песчаная почва, $W = 30,29\%$



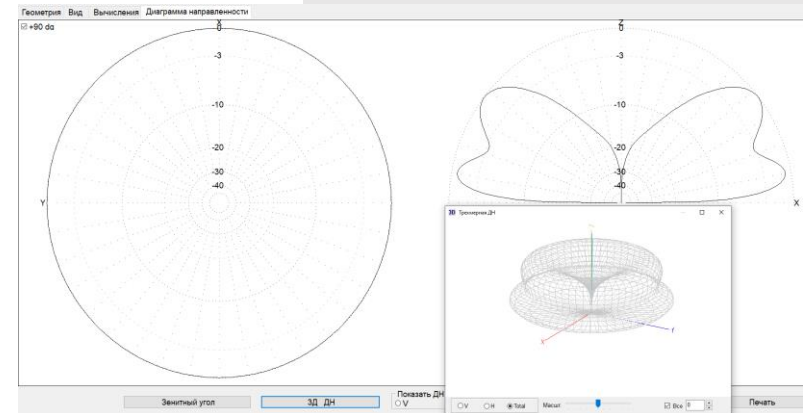
$f = 3$ МГц



$f = 12$ МГц



$f = 21$ МГц

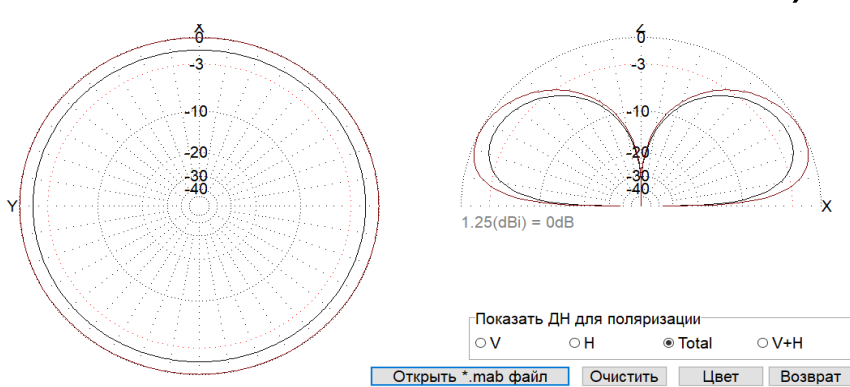


$f = 30$ МГц

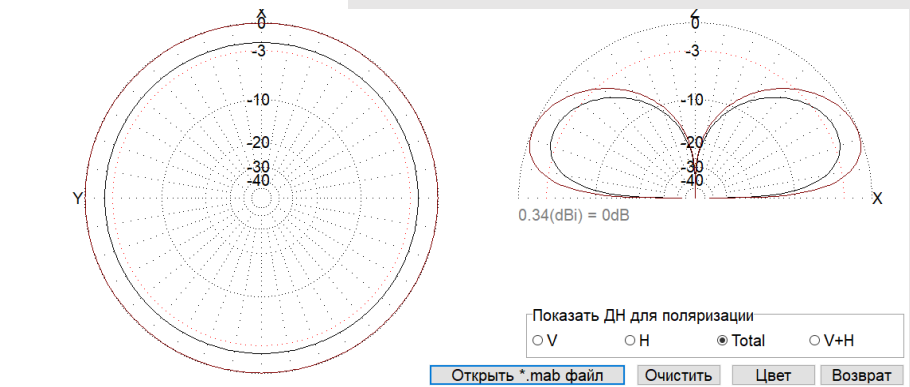


Омский
государственный
университет
им. Ф.М. Достоевского

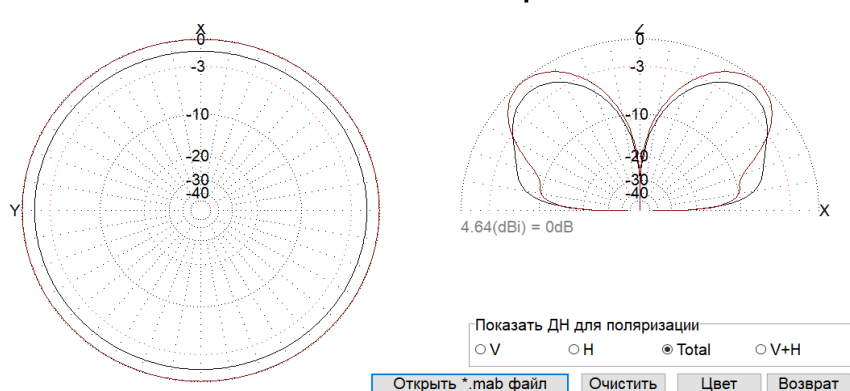
Сравнение ДН вертикального полуволнового вибратора при двух значениях влажности (чёрный цвет: $W=7,72\%$, красный цвет: $W=30,29\%$). Песчаная почва



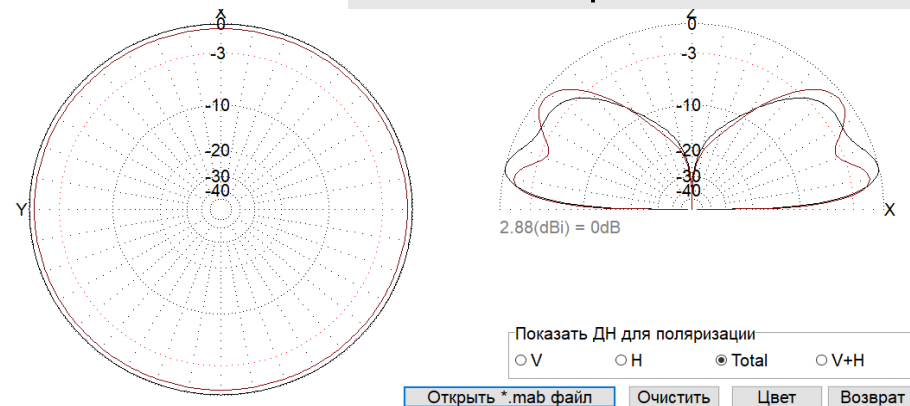
$f = 3$ МГц



$f = 12$ МГц



$f = 21$ МГц



$f = 30$ МГц



Анализ результатов

Песчаная почва

Влажность, %

Влажность, %

7,72

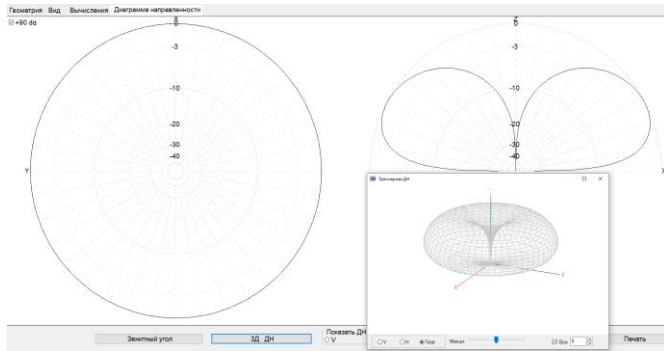
30,29

МГц	ϵ'	ϵ''	Максимальное излучение и его направление	ϵ'	ϵ''	Максимальное излучение и его направление
3	7,14	12,78	0,07 dBi (29,2°)	21,46	33,36	1,25 dBi (25,9°)
12	5,73	3,93	-1,34 dBi (25,7°)	20,95	8,75	0,34 dBi (23,1°)
21	5,38	2,46	3,4 dBi (47,4°)	20,72	5,21	4,64 dBi (48,5°)
30	5,24	1,79	2,88 dBi (13,5°)	20,57	3,74	2,43 dBi (37,3°)

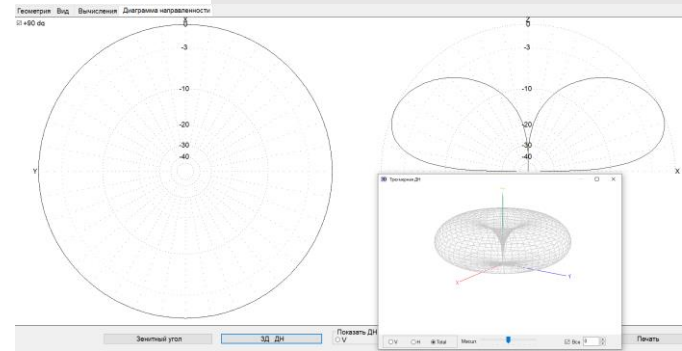
Таблица 2. Значения действительной и мнимой части КДП для песчаной почвы, определённые по ДН значения максимального излучения (в dBi) и угол максимального излучения (в градусах)



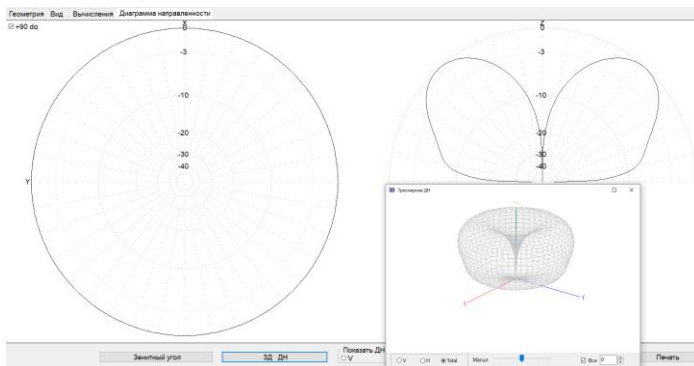
ДН вертикального полуволнового вибратора. Незасоленная суглинистая почва, $W = 7,99\%$



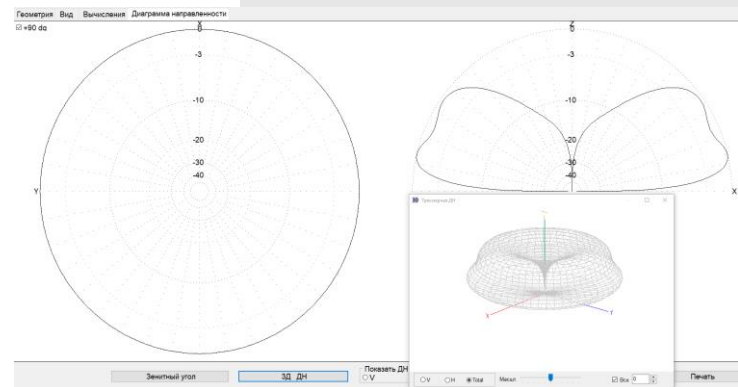
$f = 3$ МГц



$f = 12$ МГц



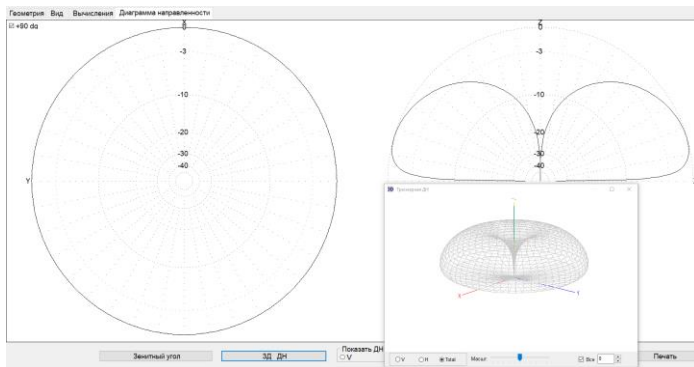
$f = 21$ МГц



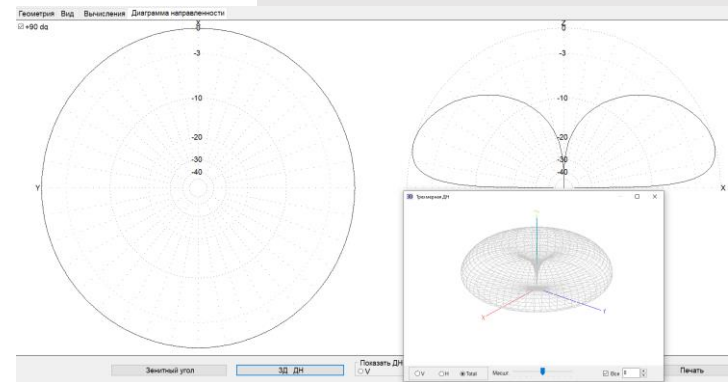
$f = 30$ МГц



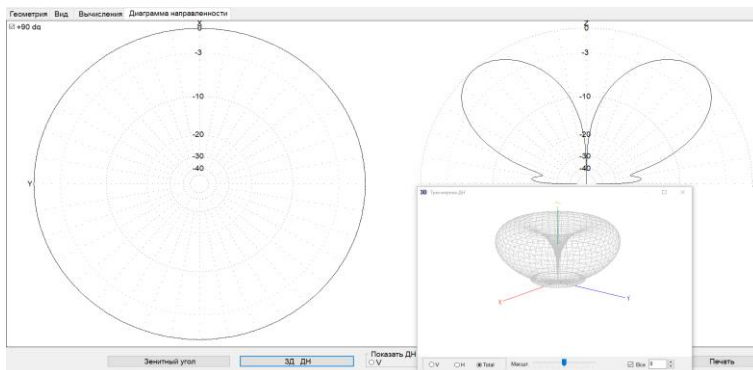
ДН вертикального полуволнового вибратора. Незасоленная суглинистая почва, $W = 30,69\%$



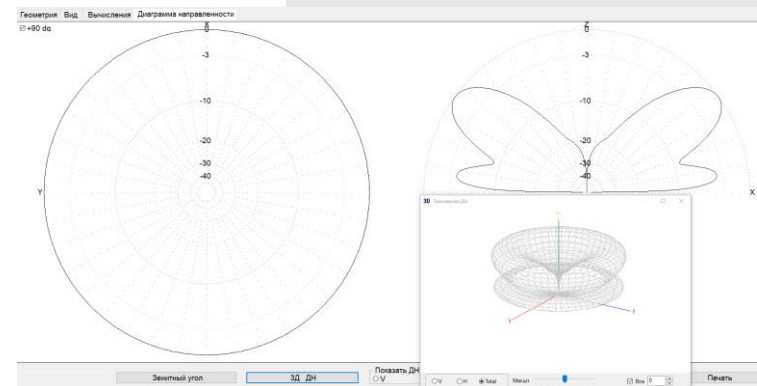
$f = 3$ МГц



$f = 12$ МГц



$f = 21$ МГц

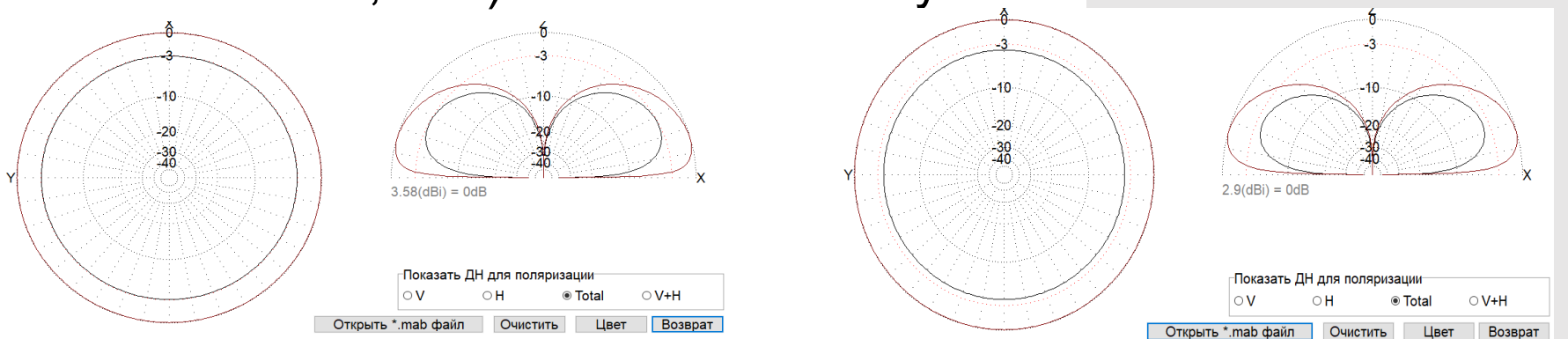


$f = 30$ МГц



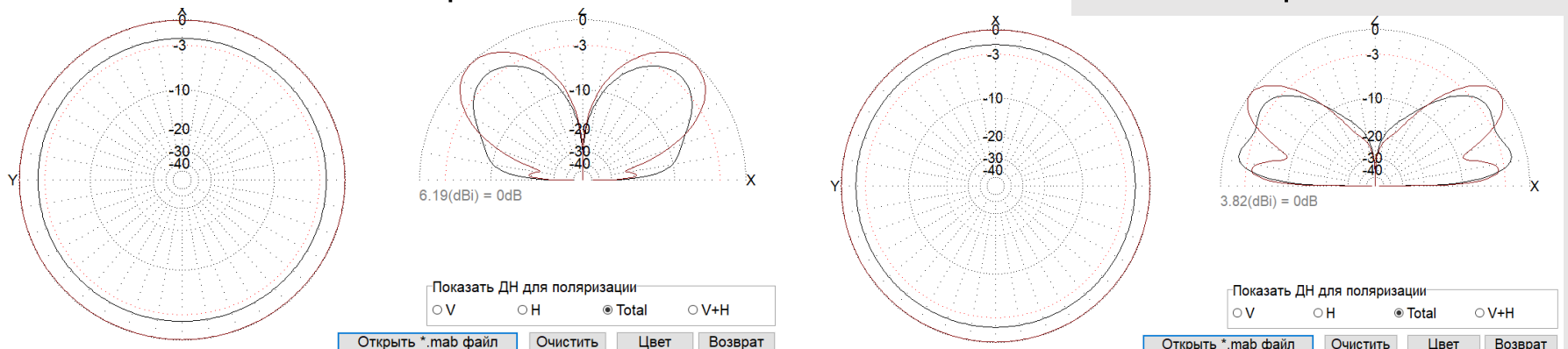
Омский
государственный
университет
им. Ф.М. Достоевского

Сравнение ДН вертикального полуволнового вибратора при двух значениях влажности (чёрный цвет: $W=7,99\%$, красный цвет: $W=30,69\%$). Незасоленная суглинистая почва



$f = 3$ МГц

$f = 12$ МГц



$f = 21$ МГц

$f = 30$ МГц



Анализ результатов

Незасоленная суглинистая почва

Влажность, %

Влажность, %

7,99

30,69

МГц	ϵ'	ϵ''	Максимальное излучение и его направление	ϵ'	ϵ''	Максимальное излучение и его направление
3	14,19	18,17	0,56 dBi (27,8°)	55,9	738,53	3,58 dBi (16,4 °)
12	9,35	7,26	-0,86 dBi (24,8°)	35,27	194,31	2,9 dBi (16,7 °)
21	8,01	5,26	4,09 dBi (47,4 °)	30,77	115,38	6,19 dBi (47,0 °)
30	7,29	4,38	2,1 dBi (13,2 °)	28,28	83,62	3,82 dBi (36,0 °)

Таблица 3. Значения действительной и мнимой части КДП для незасоленной суглинистой почвы, определённые по ДН значения максимального излучения (в dBi) и угол максимального излучения (в градусах)



Наибольшее и наименьшее влияние

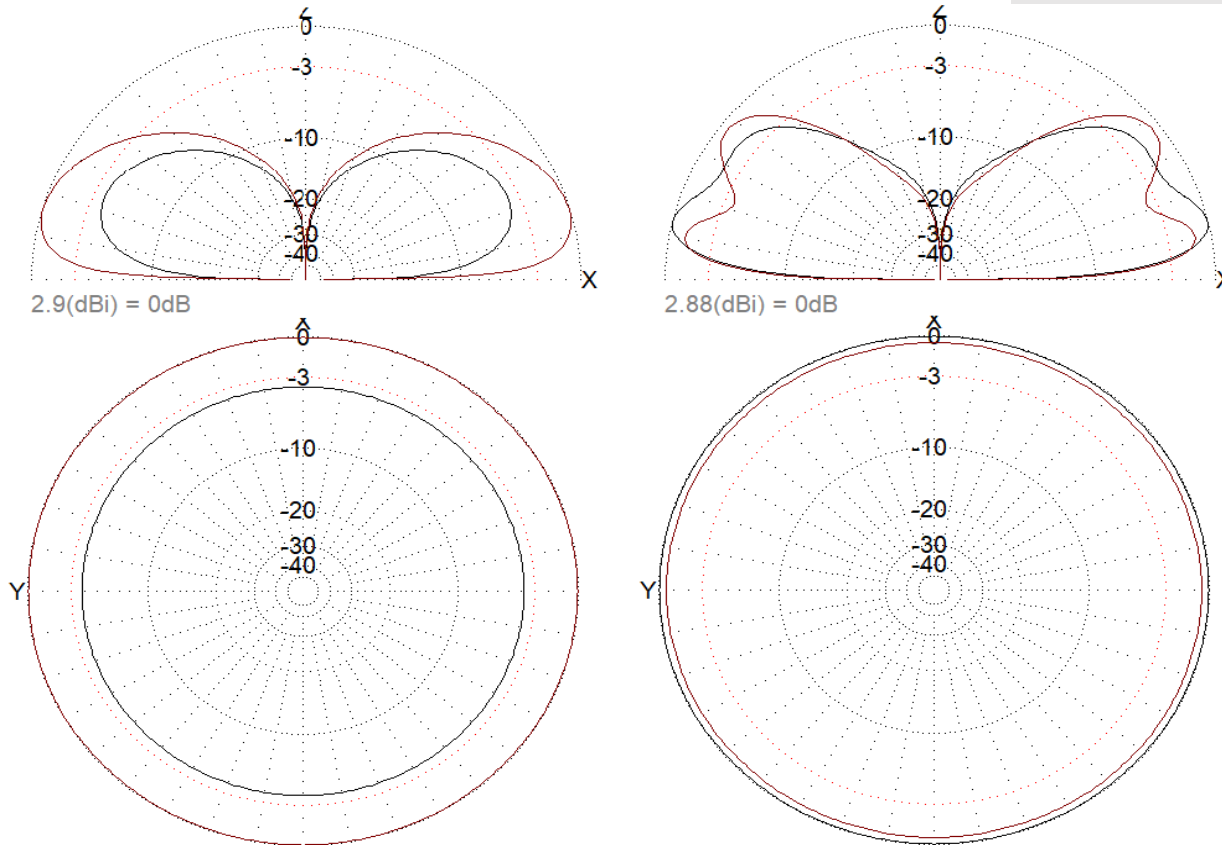


Рисунок 7. Наибольшее влияние: незасоленная суглинистая почва, частота 12 МГц — увеличение на 3,76 dBi (слева). Наименьшее влияние: песчаная почва, частота 30 МГц — уменьшение на 0,45 dBi (справа)



Заключение

В результате можно увидеть, что при увеличении влажности почвы в ДН антенны на частотах 3, 12, 21 МГц произошло расширение и удлинение главных лепестков ДН. Наибольшее влияние оказано на 12 МГц.

Таким образом, в результате проделанной работы были изучены методы измерения КДП, были получены значения КДП образца, на основе измеренных значений были смоделированы ДН вертикального полуволнового вибратора и определено влияние радиофизических характеристик подстилающей поверхности на ДН данной антенны.



Список литературы

1. Репин, А. В. Методы измерения диэлектрической проницаемости различных форм почвенной влаги и нефтесодержащих пород : специальность 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики» : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Репин Андрей Владимирович. - Барнаул, 2010. - 149 с.
2. Родионова, О. В. Метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов в широкой полосе частот: специальность 01.04.03 «Радиофизика» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Родионова Ольга Васильевна. - Томск, 2016. - 22 с.
3. Bobrov, P. P. Wideband frequency domain method of soil dielectric property measurements / P. P. Bobrov, A. V. Repin, O. V. Rodionova \\\ IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. - 2015. - Vol. 53, No. 5. - P. 2366-2372. - DOI 10.1109/TGRS.2014.2359092.
4. Зайцев А. В. Исследование электромагнитных полей во временной области. Сборник «Антенны». 2001, №6.
5. Гончаренко И. В. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA. - М.: ИП РадиоСофт, Журнал «Радио». 2002 — 80 с.: ил. ISBN 5930370923
6. Варнаков С. А., Яценко А. С., Кривальцевич С. В., Никифорова А. О. Влияние гранулометрического состава и солёности на вид диэлектрических спектров грунтов // Журнал радиоэлектроники. 2023. - №. 11. С. 6-10
7. Варнаков С. А., Яценко А. С., Кривальцевич С. В., Клименко Т. Б., Никифорова А. О. Вариации диэлектрических характеристик разных типов почв лесостепной зоны юга Западной Сибири // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7-8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 157-159.



**Омский
государственный
университет**
им. Ф.М. Достоевского

Спасибо за внимание!