

УДК 621.396.673

*Е. В. БАЛЗОВСКИЙ, Ю. И. БУЯНОВ, М. Ю. ЗОРКАЛЬЦЕВА, В. И. КОШЕЛЕВ, Э. С. НЕКРАСОВ,**А. А. ПЕТКУН***СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ АНТЕННА С УВЕЛИЧЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИМПУЛЬСА ДЛЯ СКВАЖИННОГО РАДАРА¹**

Разработана и исследована новая приемо-передающая антенна для скважинного радара. Антенна выполнена на основе комбинации излучателей электрического и магнитного типов и предназначена для работы в среде с относительной диэлектрической проницаемостью 4. Проведено численное моделирование антенны с помощью разработанного компьютерного кода, реализующего метод конечных разностей во временной области. В результате оптимизации геометрии антенны удалось сдвинуть нижнюю частотную границу в сторону низких частот, что позволило увеличить длительность биполярного импульса напряжения на входе антенны от 2 до 3,5 нс и, соответственно, дальность зондирования неоднородностей среды. Приведены результаты расчетов и измерений параметров антенны.

Ключевые слова: *Сверхширокополосные импульсы, скважинный радар, комбинированная антенна.*

Введение

При горизонтальном бурении скважин в узком нефтеносном слое особую важность имеет задача контроля положения ствола скважины: на глубине нескольких километров расстояние до границ слоя не должно быть меньше единиц метров. Для решения этой задачи возможно применение импульсного сверхширокополосного (СШП) скважинного радара, приемная и передающая антенны которого полностью размещены в среде. Применение коротких СШП импульсов обеспечивает пространственное разрешение, а угловое разрешение должен обеспечивать набор антенн, каждая из которых обладает выраженными направленными свойствами и обслуживает свой угловой сектор.

Среда, в которой должны размещаться антенны радара, представляет собой насыщенный нефтью песчаник. В зависимости от содержания углеводородов и воды, относительная диэлектрическая проницаемость среды может принимать значения $\epsilon_r = 3-6$, а проводимость $\sigma = 0,01-0,3$ [1]. Поскольку с увеличением частоты растут потери в среде, то для достижения большей проникающей способности необходимо использовать СШП импульсы со смещенным в область низких частот спектром, то есть увеличивать длительность импульсов. Однако нижняя рабочая частота антенны определяется её размерами. Поперечный размер антенны ограничен диаметром скважины, который обычно не превышает 120 мм. Таким образом, необходимо разработать антенну цилиндрического сечения, полностью расположенную в среде, способную излучать и принимать СШП импульсы и обладать направленными свойствами.

Расширение полосы пропускания и уменьшение габаритов СШП антенн возможно с помощью комбинации излучателей электрического и магнитного типов с общим входом. Вариант цилиндрической комбинированной антенны, предназначенной для излучения и регистрации СШП импульсов в среде с $\epsilon_r = 4$, представлен в работе [2]. Указанная антенна имеет диаметр 120 мм и оптимизирована для возбуждения биполярными импульсами длительностью 2 нс. Для увеличения глубины зондирования необходимо расширить полосу пропускания антенны в сторону нижних частот и увеличить длительность биполярного импульса напряжения до 3,5 нс и уменьшить диаметр антенны до 115 мм.

Для расчета и оптимизации геометрии проводников антенны использована созданная авторами программа электродинамического моделирования [3] на основе метода конечных разностей во временной области. Для моделирования антенн в среде компьютерный код был модернизирован. Ниже представлены результаты расчета антенны скважинного радара, а также результаты натурных измерений макета антенны, проведенных с помощью стенда, заполненного средой – увлажненным песком.

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №13-08-98069 р_сибирь_a.

Численное моделирование антенны

В разработанном компьютерном коде используется расчетная область, представляющая собой заполненный однородной средой параллелепипед с заданными диэлектрической и магнитной проницаемостями. Внутри расчетного объема задается геометрия передающей антенны, которая окружается поверхностью Гюйгенса для пересчета полей в дальнюю зону, определяются граничные условия.

Для пересчета полей в дальнюю зону были разработаны два независимых алгоритма, основанных на принципе Гюйгенса. Первый подход основан на приближении $|\mathbf{r}'|/|\mathbf{r}| \ll 1$, где $\mathbf{r}'$ – радиус-вектор точки на поверхности Гюйгенса, $\mathbf{r}$ – радиус-вектор точки в дальней зоне. На поверхности Гюйгенса, окружающей излучатель, вычисляются электрический $\mathbf{J}_s(\mathbf{r}, t)$ и магнитный $\mathbf{M}_s(\mathbf{r}, t)$ токи. С учетом временной задержки $\tau_d = t - |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|/c$, определяются электромагнитные потенциалы $\mathbf{W}(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{U}(\mathbf{r}, t)$, из компонент которых в сферической системе координат вычисляются компоненты электрического поля в дальней зоне:

$$E_\theta(\mathbf{r}, t) = -\eta W_\theta(\mathbf{r}, t) - U_\phi(\mathbf{r}, t), \quad E_\phi(\mathbf{r}, t) = -\eta W_\phi(\mathbf{r}, t) + U_\theta(\mathbf{r}, t),$$

где η – волновое сопротивление свободного пространства.

Второй подход основан на интегральном представлении поля Кирхгофа, позволяющем по вычисленным значениям полей и их производных по времени и пространству на поверхности Гюйгенса, находить поля на заданном расстоянии. Интегральное представление Кирхгофа имеет следующий вид:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi} \oint_S \hat{n} \left[\frac{\nabla' \mathbf{E}(\mathbf{r}', \tau_d)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} - \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \mathbf{E}(\mathbf{r}', \tau_d) - \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{c|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}', \tau_d)}{\partial \tau_d} \right] ds',$$

где $\hat{n}$ – единичный вектор нормали к поверхности Гюйгенса, c – скорость света.

При расчете коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) была использована модель одномерной передающей линии с волновым сопротивлением 50 Ом. Линия подводилась к антенне в точке с индексами i_{src} , j_{src} , k_{src} , соответствующим положению источника в расчетной области. В этом подходе используются телеграфные уравнения, которые дискретизируются в пространстве и времени. Конечно-разностные уравнения имеют вид:

$$I^{n+0.5}(k'+0.5) = I^{n-0.5}(k'+0.5) - \left(\frac{1}{Z_0} \right) \left(\frac{v\Delta t}{\Delta z} \right) [V^n(k'+1) - V^n(k')],$$

$$V^{n+1}(k') = V^n(k') - Z_0 \left(\frac{v\Delta t}{\Delta z} \right) [I^{n+0.5}(k'+0.5) - I^{n+0.5}(k'-0.5)],$$

где Z_0 – волновое сопротивление, v – фазовая скорость для передающей линии, k' – индексы точек одномерной передающей линии. Обновление уравнения для напряжения в точке с индексом $k' = k'_{end}$, где k'_{end} – индекс ячейки, где одномерная линия стыкуется с антенной, использует значения тока, вычисленные следующим образом:

$$I^{n+0.5}(k'_{end} + 0.5) = \Delta x [H_x^{n+0.5}(i_{src}, j_{src} - 0.5, k_{src} + 0.5) - H_x^{n+0.5}(i_{src}, j_{src} + 0.5, k_{src} + 0.5)] +$$

$$+ \Delta y [H_y^{n+0.5}(i_{src} + 0.5, j_{src}, k_{src} + 0.5) - H_y^{n+0.5}(i_{src} - 0.5, j_{src}, k_{src} + 0.5)].$$

Падающий импульс напряжения задается в точке с индексом $k' = k'_{source}$ одномерной линии, уравнения для обновления тока и напряжения, задающие волну в направлении $+z$, имеют вид:

$$I^{n+0.5}(k'_{source} + 0.5) = I^{n-0.5}(k'_{source} + 0.5) - \left(\frac{1}{Z_0} \right) \left(\frac{v\Delta t}{\Delta z} \right) [V^n(k'_{source} + 1) - V^n(k'_{source})] + \left(\frac{1}{Z_0} \right) \left(\frac{v\Delta t}{\Delta z} \right) V_{inc}^n(k'_{source}),$$

$$V^{n+1}(k'_{source}) = V^n(k'_{source}) - Z_0 \left(\frac{v\Delta t}{\Delta z} \right) [I^{n+0.5}(k'_{source} + 0.5) - I^{n+0.5}(k'_{source} - 0.5)] + \left(\frac{v\Delta t}{\Delta z} \right) V_{inc}^{n+0.5}(k'_{source} + 0.5).$$

На границе одномерной линии при $k' = 0$, задаются поглощающие граничные условия в виде равенства. $V^{n+1}(0) = V^{n-1}(1)$ Используя модель одномерной передающей линии можно получить форму отраженного импульса напряжения $V_{ref}(t)$. Получив спектральное представление падающего импульса напряжения $V_{inc}(t) \leftrightarrow \hat{V}_{inc}(\omega)$ и отраженного импульса напряжения $V_{ref}(t) \leftrightarrow \hat{V}_{ref}(\omega)$, можно найти коэффициент отражения $\Gamma(\omega) = \hat{V}_{ref}(\omega) / \hat{V}_{inc}(\omega)$.

Моделирование характеристик антенны скважинного радара было проведено в среде с $\epsilon_r = 4$ и электрической проводимостью $\sigma = 0$. Металлические проводники антенны в виде комбинации излучателей электрического и магнитного типа были размещены на диэлектрических пластинах с $\epsilon_r = 4,5$. В качестве граничных условий был использован унисаксиальный согласованный поглощающий слой толщиной в 10 ячеек с полиномиальной градуировкой параметров. Пространственный шаг сетки расчетной области был выбран $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$ мм, временной дискрет равен $\Delta t = 1,5$ пс. При расчете характеристик излучения антенны использовался источник в виде разностной схемы. Выражение для напряженности электрического поля E_z в ячейке, представляющей источник, имеет вид:

$$E_z^n(i_{src}, j_{src}, k_{src} + 0.5) = \frac{\frac{\epsilon}{\Delta t} - \frac{\Delta z}{\Delta x \Delta y 2R}}{\frac{\epsilon}{\Delta t} + \frac{\Delta z}{\Delta x \Delta y 2R}} E_z^{n-1}(i_{src}, j_{src}, k_{src} + 0.5) + \frac{1}{\frac{\epsilon}{\Delta t} + \frac{\Delta z}{\Delta x \Delta y 2R}} \times$$

$$\times \left[\frac{H_y^{n-0.5}(i_{src} + 0.5, j_{src}, k_{src} + 0.5) - H_y^{n-0.5}(i_{src} - 0.5, j_{src}, k_{src} + 0.5)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n-0.5}(i_{src}, j_{src} + 0.5, k_{src} + 0.5) - H_x^{n-0.5}(i_{src}, j_{src} - 0.5, k_{src} + 0.5)}{\Delta y} - \frac{V^{n-0.5}(i_{src}, j_{src}, k_{src} + 0.5)}{\Delta x \Delta y R} \right],$$

где $V(t_{n-1/2})$ – временная форма воздействующего импульса напряжения, $R = 50$ Ом. Форма импульса соответствовала форме биполярного импульса, используемого в эксперименте.

Результаты расчетов и измерений

Выбор геометрии проводников антенны осуществлен в рамках комбинации излучателей электрического и магнитного типов, размещенных в безграничной среде с $\epsilon_r = 4$. Расчетная модель антенны приведена на рис. 1а. Оптимизации подлежала геометрия плоского элемента 1 – излучатель электрического типа, питаемого в точке 2 через трансформатор сопротивлений на неоднородной линии 3. Излучатель магнитного типа представляет собой рамку 4, ограниченную элементом 1 и рефлектором 5. Полые крышки 6 и 7 представляют собой короткозамкнутые отрезки круглого волновода и выполняют роль запирающих стаканов. Шунт 8 улучшает характеристики антенны в широком диапазоне частот. Внутреннее пространство антенны заполнено диэлектриком с $\epsilon_r \approx 3,5$, в качестве которого выступали гипсовые детали 9.

В результате моделирования найдена оптимальная форма проводников антенны, при которой нижняя частота согласования не превышает 140 МГц по уровню КСВН = 2. Расчетный КСВН антенны приведен на рис. 2 (кривая 1). Измерение характеристик антенны проводилось в стенде, представляющем собой деревянный ящик с размерами $2 \times 1,2 \times 1,2$ м³, заполненный увлажненным песком с $\epsilon_r = 3,9$. Антенна располагалась в пластиковой трубе, расположенной вдоль оси ящика, параллельной длинной стенке. Измеренный КСВН антенны представлен на рис. 2 (кривая 2).

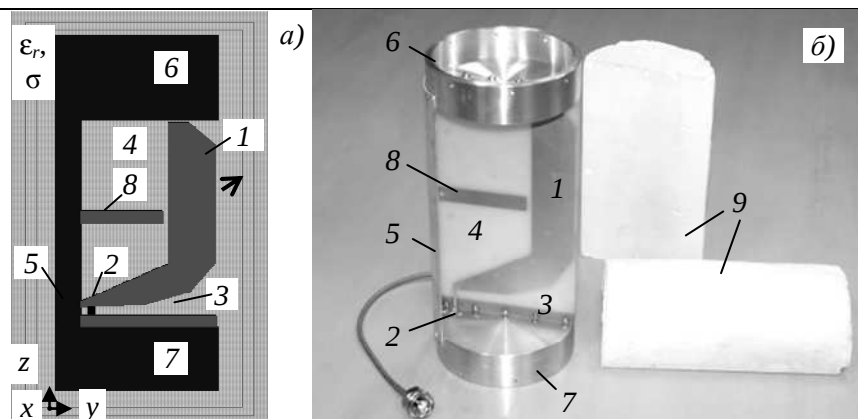


Рис. 1. Геометрия расчетной модели (а) и конструкция антенны (б)

Полоса согласования антенны позволяет возбуждать антенну биполярными импульсами длительностью 2-3,5 нс. Форма воздействующего на антенну импульса напряжения длительностью 3,5 нс приведена на рис. 3 (кривая 1). Расчетная временная зависимость E_0 компоненты поля в дальней зоне для главного направления излучения, полученная с помощью первого алгоритма, указанного выше, приведена на рис. 3 (кривая 2). Временная форма напряженности электрического поля, измеренная на поверхности среды с помощью дипольной антенны, приведена на рис. 3.

Для измерения диаграммы направленности в Н-плоскости разработанная антенна поворачивалась вокруг своей оси внутри измерительного стенда, приемный диполь располагался на поверхности песка. Для измерения угловой зависимости поля в Е-плоскости разработанная антенна располагалась неподвижно в центре измерительного стенда, а приемный диполь перемещался по поверхности песка вдоль большей оси верхней поверхности стенда. Диаграммы направленности по пиковой напряженности поля при подаче на вход антенны биполярного импульса напряжения длительностью 3,5 нс приведены на рис. 4.

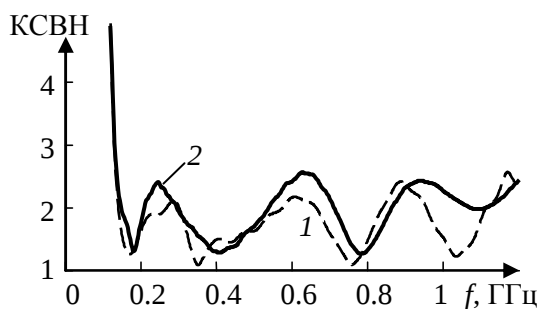


Рис. 2. КСВН антенны: 1 – расчет; 2 – измерения

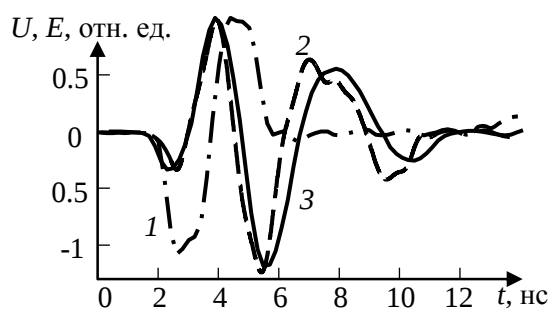


Рис. 3. Импульс генератора (1) и импульсы излучения (2 – расчет, 3 – измерения)

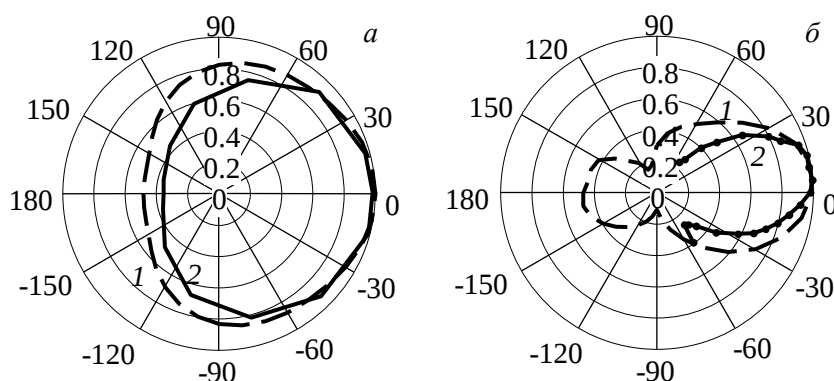


Рис. 4. Диаграммы направленности антенны в Н- (а) и Е-плоскости (б). 1 – расчет, 2 – измерения

Заключение

С помощью модифицированного компьютерного кода определена геометрия электродов антенны скважинного радара, позволившая сдвинуть нижнюю частотную границу в сторону низких частот и увеличить длительность биполярного импульса напряжения на входе антенны до 3,5 нс. Разработанная антенна обладает выраженными направленными свойствами в плоскостях Е и Н, что позволит определять направление на источник отраженных импульсов при зондировании пространства вблизи скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эпов М. И., Миронов В. Л., Бобров П. П., Савин И. В., Репин А. В. // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 5. – С. 613-618.
2. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И., Некрасов Э. С. Сверхширокополосная комбинированная антенна с направленными характеристиками излучения для скважинного радара // I Всероссийская Микроволновая конференция, Москва, 25-27 ноября 2013 г., (Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН). – 2013. – С. 312-316.
3. Zorkaltseva M. Yu., Koshelev V. I., Petkun A. A. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 12/2. – С. 87-90.

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия
E-mail: koshelev@lhfe.hcei.tsc.ru

Балзовский Евгений Владимирович, к.ф.-м.н., науч. сотр.;
Буянов Юрий Иннокентьевич, к.ф.-м.н., доцент, ведущ. инженер;
Зоркальцева Мария Юрьевна, инженер;
Кошелев Владимир Ильич, д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб.;
Некрасов Эдуард Сергеевич, инженер;
Петкун Андрей Антонович, науч. сотр.

E.V. BALZOVSKY, YU.I. BUYANOV, M.YU. ZORKALTSEVA, V. I. KOSHELEV, E.S. NEKRASOV, A.A. PETKUN

ULTRAWIDEBAND COMBINED ANTENNA WITH INCREASED PULSE DURATION FOR BOREHOLE RADAR

A new antenna for borehole radar has been developed and investigated. The antenna is based on a combination of electric and magnetic type radiators and designed to operate in an environment with a relative permittivity equal to 4. Numerical simulations of the antenna were made using the developed computer code based on FDTD. As a result of the antenna geometry optimization, the lower frequency boundary was moved downwards. The duration of the bipolar pulse exciting the antenna was increased from 2 to 3.5 ns. This enables to increase the range of sensing in the lossy medium. The results of the numerical calculations and measurements of the antenna parameters are presented.

Keywords: ultrawideband pulses, borehole radar, combined antenna.

REFERENCES

1. Epov M.I., Mironov V.L., Bobrov P.P., Savin I.V., Repin A.V. Dielectric Spectroscopy of Oil-Bearing Rocks at 0.05-16 GHz, *Geologiya i geofizika*, 2009, vol. 50, no. 5, pp.613-618. (In Russ.)
2. Balzovsky E.V., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I., Nekrasov E.S. Sverkhshirokopolosnaya kombinirovannaya antenna s napravlennymi kharakteristikami izlucheniya dlya skvazhinogo radara, *I Vserossiyskaya Mikrovolnovaya konferentsiya, Moscow, 25-27 Nov. 2013*, (Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS), 2013, C. 312-316. (In Russ.)
3. Zorkaltseva M. Yu., Koshelev V. I., Petkun A. A. Simulation of ultrawideband radiators in homogeneous lossy media, *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2014, vol. 57, no. 12/2, pp. 87-90.

Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (IHCE SB RAS), Tomsk, Russia
E-mail: koshelev@lhfe.hcei.tsc.ru

Balzovsky Evgeny Vladimirovich, Reseacher, PhD;
Buyanov Yury Innokentevich, Senior Engineer, Assoc. Prof., PhD;
Zorkaltseva Maria Yuryevna, Engineer;
Koshelev Vladimir Ilich, Head of Laboratory, Prof., Dr. Sc.
Nekrasov Eduard Sergeevich, Engineer;
Petkun Andrey Antonovich, Reseacher.