

## **К расчету антенн импульсного георадара**

В.И. Сахтеров, А.А. Аверин, А.В. Попов, И.В. Прокопович

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова  
108840, Москва, г.Троицк, Калужское ш., д. 4.  
E-mail: sakhterov@mail.ru*

*Проведен сравнительный анализ антенн георадаров, предложен новый тип антенн для мощных импульсных геозондов, высказано предположение о природе дисперсионных искажений отраженных сигналов.*

*Ключевые слова: георадар, диаграмма направленности, дипольная антенна, импульсное излучение*

## **The investigation of pulsed GPR antennas**

V.I. Sakhterov, A.A. Averin, A.V. Popov, I.V. Prokopovich

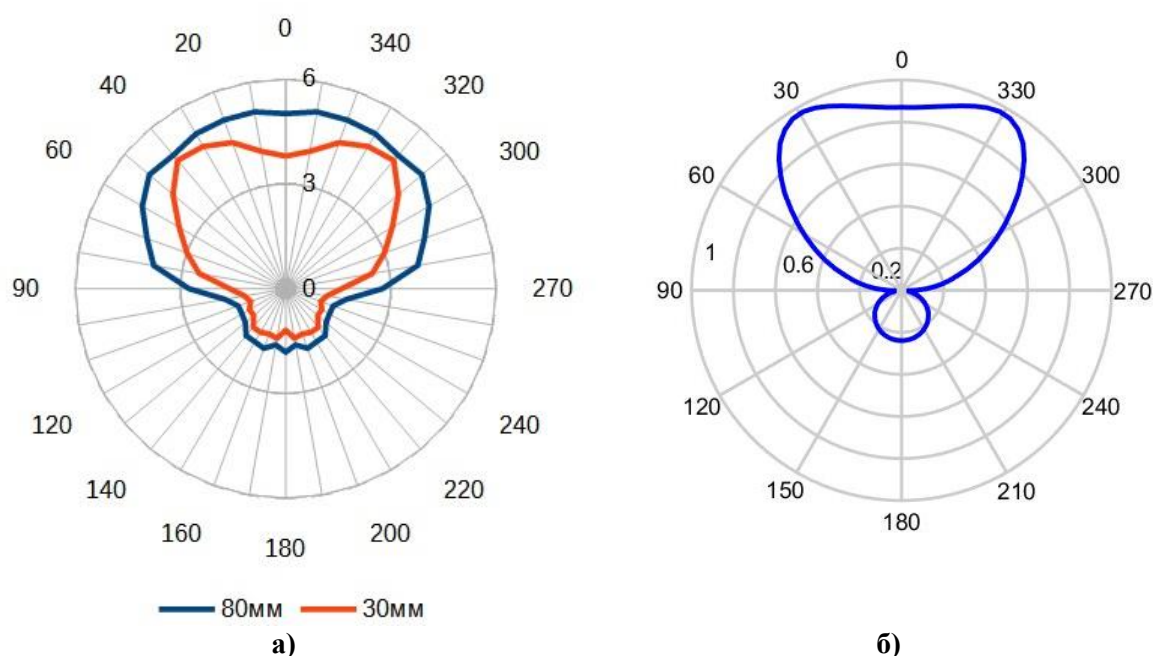
*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation.*

*A comparison of some dipole GPR antennas is carried out. A new type of antennas for high-power pulsed GPR is proposed. An assumption on the occurrence of dispersion distortions of reflected signals is discussed.*

*Keywords: GPR, radiation pattern, dipole antenna, pulsed EM radiation*

В настоящее время используются два типа георадаров, «классический» и импульсный. В классической схеме используется приемник со стробоскопическим преобразованием сигнала и передатчик с пиковой амплитудой 200–600 В. Передатчик импульсного георадара генерирует видеосигнал с амплитудой свыше 5 кВ [1]. В дискуссии на XXVII конференции по распространению радиоволн 2021 года проходившей в Калининграде был поднят вопрос об эффективности георадарных антенн и в качестве оптимального решения предлагалась «bowtie» антенна, известная также как «бабочка Чубинского». Такая антенна эффективна для классических георадаров с частотным преобразованием и небольшим динамическим диапазоном. Для таких георадаров необходимы антенны с высоким коэффициентом усиления для обеспечения максимального уровня излучаемого сигнала и высокой чувствительности приемного тракта. Вследствие повышенной чувствительности система становится неустойчивой – возможны паразитные возбуждения и регистрация переотраженных сигналов (так называемый «матрас»). В георадарах с передатчиком повышенной мощности проблема возникновения паразитных колебаний в антеннах устраняется применением резистивно-нагруженных диполей. Антенно-фидерные устройства в этих георадарах, в основном, – диполи различных форм. Диаграмма направленности резистивно-нагруженных антенн зависит от формы диполей, к примеру плоские антенны длиной один метр и шириной около 30 мм имеют провал в центре диаграммы и максимальное усиление в боковых лепестках под углом к вертикали порядка 30°-60°, см. рис. 1. Ранние версии георадара «Грот» были рассчитаны на небольшие глубины. Ширина антенного полотна подбиралась по результатам натурных измерений и сопоставления экспериментальных радарограмм. Длина антенн и расстояние между ними составляли порядка 1 метра, такая конфигурация антенн данного прибора обеспечивала наилучшую эффективность экспериментальной съемки [2]. При дальнейшем развитии

происходило увеличение размеров антенн, как в длину (вплоть до 50 метров), так и в ширину – до 300 мм [3]. При этом менялась конфигурация измерительного комплекса – вместо стандартного параллельного расположения антенн, фиксируемого с помощью рамки, применялась последовательное расположение (жаргонный термин «паровоз»). Измерения показали изменение диаграммы направленности в зависимости от ширины диполя – при ширине свыше 80 мм диаграмма направленности становится практически круговой, см. рис.1а. Дальнейшее уширение добавляет некоторое усиление, но утяжеляет конструкцию антенны и ухудшает пользовательские характеристики. Применение антенн с узким диполем упрощает работу пользователя, но приводит к ошибкам по глубине – обычно требуется сопровождения работ скважинными данными, что связано это с особенностями диаграммы направленности. Как уже упоминалось в зависимости от ширины диполя возможно получение более сильного сигнала от боковых отражений, неопытный пользователь предполагает, что источник отраженного сигнала находится прямо под ним, но в реальности сигнал может приходить от локализованного объекта или границы сред под углом  $60^\circ$ . Ниже приводятся результаты измерения диаграммы направленности антенн георадара, выполненные на компактном экспериментальном полуцилиндрическом стенде, сооруженном на территории ИЗМИРАН. Хотя путь распространения георадарного импульса в этом эксперименте довольно короткий – можно сказать, что видим сигналы ближней зоны, до образования бегущей волны, но такова специфика работы георадара. По поводу образования боковых лепестков можно напомнить характеристики антенн декаметрового диапазона, сильно зависящие от высоты подвеса диполя – это хорошо описано и проиллюстрировано в монографии [4]. По аналогии можно сказать, что здесь диаграмма также зависит от емкостной связи антенны с грунтом и может иметь множество боковых лепестков, хотя, естественно, необходимы дополнительные исследования.



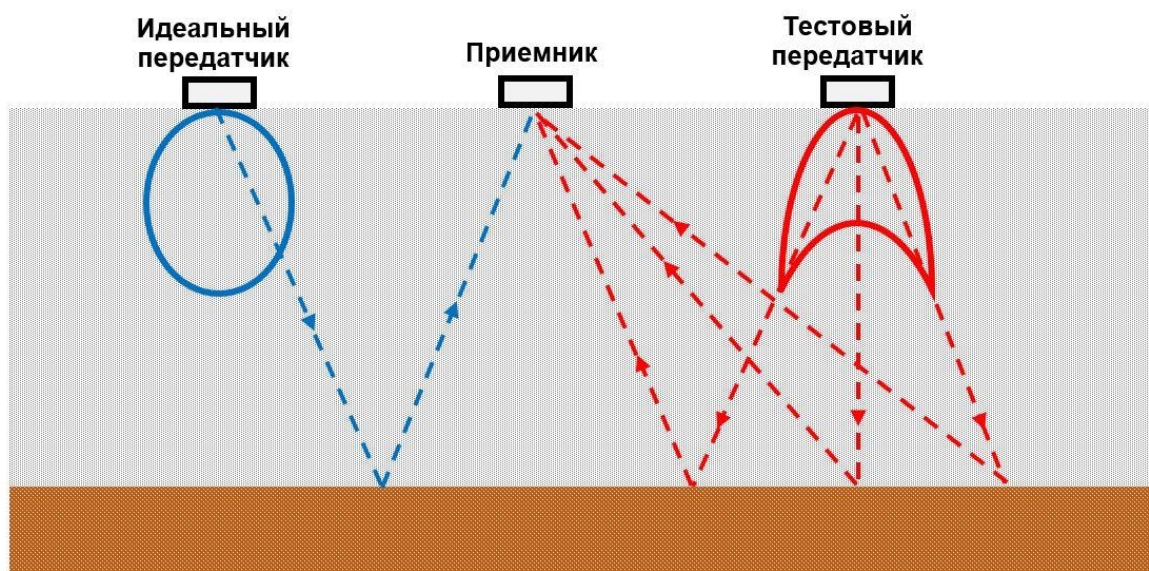
**Рис. 1. Диаграмма направленности диполей длиной 0,5 м на поверхности земли: а) экспериментальные измерения для диполей шириной 30 и 80 мм; б) численное моделирование.**

Для детального изучения диаграммы направленности излучения дипольной антенны, лежащей на поверхности земли, также было проведено численное

моделирование в grMax – программе с открытым исходным кодом для расчета распространения электромагнитных волн, нашедшей широкое применение в задачах георадиолокации. В пакете grMax применяется алгоритм FDTD для решения уравнений Максвелла в трехмерном пространстве методом конечных разностей во временной области. Моделирование проводилось с параметрами, приближенными к экспериментальным измерениям: диполь в виде тонкой идеально проводящей металлической полосы длиной 0,5 м располагался на однородном полупространстве, характеризующемся диэлектрической проницаемостью  $\epsilon=16$ . В качестве источника в центральном разрыве диполя использовался определенный в программе элемент «передающая линия» (#transmission\_line) с волновым сопротивлением 150 Ом и заданным импульсом тока в виде гауссовой функции. Измерение поля проводилось по максимуму волновой формы электромагнитного импульса в продольной поляризации на сфере радиусом 1,5 м. Модельная диаграмма направленности, рис. 1б, отражает основные особенности излучения в подповерхностную среду, наблюдаемые экспериментально: наибольшая мощность излучения диполя направлена в более плотную среду; воздушный лепесток диаграммы направленности по амплитуде составляет примерно 20% от величины подземного лепестка, проявляющего выраженную «рогатость» под углом полного внутреннего отражения для данной среды. К сожалению, численное моделирование пока не позволяет выявить заметное влияние ширины диполя на диаграмму направленности, этот вопрос требует дальнейшего исследования.

В качестве диполей мы использовали прямоугольные полосы фольгированного стеклотекстолита. Проведенные на стенде эксперименты, с некоторыми допущениями, позволили получить сравнительные диаграммы направленности диполей различных форм и провести анализ их рабочих характеристик. В отличие от экспериментов прошлых лет, где антенны тестировались на основе результатов, полученных при отражении излученного сигнала от границы раздела сред при подповерхностном зондировании, прямые измерения излучаемого сигнала позволяют лучше понять характеристики антенн, увидеть недостатки и другие характеристики проектируемой антенны. В результате недавних экспериментов предложена конструкция излучающей антенны георадара, по форме напоминающей лодочку; она также может применяться для излучения с воздушного носителя. Обычно в резистивно-нагруженных антеннах для подавления паразитных отражений используется экспоненциальное возрастание сопротивления к концам антенны. В нашей антенне, кроме резистивного, используется и конструктивное поглощение за счет сужения проводника, что дополнительно способствует быстрому затуханию импульса [5]. Возможно применение различных законов затухания для излучающей и приемной антенн, при этом нужно учитывать конфигурацию использования антенн. Так, при последовательной схеме измерения суммарное сопротивление в антенне может быть значительно ниже, чем при параллельном расположении излучающего и приемного диполя. Также при конструировании геозонда необходимо учитывать характеристики грунта – прежде всего, декремент ослабления сигнала. Так если первые 10 метров грунтов Подмосковья обычно влажная глина, то в других районах довольно часто это скальные породы и сланцевые породы, вследствие чего импульсные георадары позволяют исследовать глубины в сотни метров [1, 3]. Поскольку основной проблемой георадиолокации остается решение обратной задачи, прямое измерение характеристик антенн позволяет более точно описывать распространение радиосигналов в подповерхностной среде и корректно объяснять полученные результаты. К примеру, дисперсионные искажения отраженного сигнала могут возникать не только за счет характеристик изучаемого грунта, но иметь аппаратное происхождение. Далее, при практических расчетах обычно

рассматривается однолучевой сигнал. Однако, если диаграмма направленности антенны имеет провал главного лепестка (как, например, антенна шириной 30 мм на рис. 1а) и более высокий уровень боковых лепестков, при измерении получаем многолучевой или диспергированный отраженный сигнал, как это схематически показано на рис 2.



**Рис. 2. Диаграмма направленности в различных условиях и возникновение дисперсионных искажений.**

Таким образом, характеристики применяемых антенн зависят от типа георадара. Так, пользователь классического георадара с его аппаратными ограничениями не может применять антенны импульсного георадара, где производится демпфирование мощного импульса, но высокий динамический диапазон (свыше 140 дБ) позволяет получать результаты зондирования на глубинах свыше 100-ни метров. И наоборот, использование традиционных антенн типа «бабочка» в глубинных георадарах привело бы к неприемлемому удлинению импульса за счет паразитного «звона» антенны.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-12-00083.*

### **Литература**

1. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Ляхов Г.А., Резников А.Е. Георадиолокация больших глубин // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2019. № 4.
2. Варенков В.В., Волкомирская Л.Б., Резников А.Е., Руденчик Е.А., Сахтеров В.И. Георадар «Грот-12». Результаты глубинного зондирования. Сборник докладов четвертой Всероссийской научной школы и конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром, 30-июня – 3 июля 2009 г. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2009. С. 153-157. (электронный ресурс).
3. Попов А.В., Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Морозов П.А., Беркут А.И. Глубинный георадар: принципы и применение // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 4. С. 28-36.
4. Rothammel K., Antennenbuch – Berlin: Militärverl, 1989. P. 56-57
5. Сахтеров В.И. Характеристики резистивно-нагруженных антенн георадара в зависимости от формы диполя. Национальная ассоциация ученых (НАУ) – Екатеринбург: Изд. Национальная ассоциация ученых. 2020. №35(62). Том 1. С.42-45.