

О связи крутизны фронта зондирующего электромагнитного импульса в среде с поглощением и дисперсией и эффективности обнаружения аномалий диэлектрической проницаемости

*В.В. Варенков¹, Л.Б. Волкомирская¹, О.А. Гулевич¹, Н.В. Кривошеев²,
А.Е. Резников¹, В.И. Сахтеров¹*

¹*Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук им. Н.В. Пушкова.*

²*Донской государственной технической университет*

Аннотация: Рассматривается связь крутизны фронта зондирующего импульса с обнаружением малых по сравнению с длиной несущей волны неоднородностей в средах с дисперсией. Совместный анализ экспериментальных данных эффективной полосы пропускания при односкачковом распространении дециметровых волн на трассе Москва-Екатеринбург и результатов сверхширокополосного георадиолокационного зондирования на десятках и сотнях мегагерц природных сред с сильной дисперсией создаёт предпосылки для проведения натуральных экспериментов по поверхностному, вертикальному и возвратно-наклонному зондированию.

Ключевые слова: электромагнитное зондирование, дециметровые волны, электромагнитные импульсы, малые неоднородности, диэлектрическая проницаемость, георадиолокационное зондирование, дисперсия, природная среда, вертикальное зондирование, спектральная форма, ионосфера.

В решении обратных задач электромагнитного зондирования доминируют два подхода. В одном предполагается, что процесс генерации и распространения зондирующего сигнала можно описывать в квазимонохроматическом приближении. Другой подход предполагает, что в основе процесса зондирования лежат представления о нестационарных переходных процессах в среде, а экспериментальные результаты получаются в результате использования импульсных сигналов, к которым квазимонохроматическое приближение из-за неприемлемо больших погрешностей применять не стоит.

При взаимодействии электромагнитного сигнала со сложной по составу поглощающей средой с дисперсией формируются прошедший и отражённый сигналы. При большой длительности падающего сигнала время установления

стационарного процесса в такой среде пренебрежимо мало по сравнению с длительностью сигнала, поэтому влияние нестационарного процесса на формирование отраженного и прошедшего сигналов не рассматривается. Для коротких импульсов длительность переходного процесса может стать сравнимой с длительностью сигнала, поэтому учет влияния нестационарного процесса на формирование отраженного и прошедшего сигналов становится необходимым.

Изучение и использование явления нестационарного прохождения и отражения представляет как фундаментальный, так и практический интерес. В частности, данное явление может быть эффективно использовано для решения целого ряда прикладных задач диагностики и управления импульсными процессами в радиофизике и геофизике.

Еще в 1976 году Л.А. Вайнштейном [1] была опубликована фундаментальная работа посвященная исследованию распространения импульсов электромагнитного поля в различных приложениях.

К системам поверхностного и возвратно-наклонного зондирования ионосферы, в которой любой импульс подвергается сильным дисперсионным искажениям и затуханию, основные соображения Л.А. Вайнштейна применимы в полной мере. Это даёт основания рассматривать возможность использования импульса без несущей в качестве носителя информации для таких систем.

Целесообразность использования импульса без несущей в качестве носителя информации определяется многими факторами, в том числе пропускной способностью широкополосного радиоканала в декаметровом диапазоне длин волн. В 1999-2006 г.г. было проведено экспериментальное исследование характеристик радиоканала для широкополосного импульсно-кодо манипулированного сигнала, на трассе Москва-Екатеринбург, длиной 1500 км [2]. Эксперименты проводились в диапазоне частот 6-24 МГц при

мощности передатчика 10-200 Вт при ширине полосы приёмника 20 - 600 кГц. Было показано, что широкополосный импульсный сигнал на исследуемой трассе вполне может быть использован в качестве носителя информации, в том числе, для исследования неоднородностей ионосферы километрового масштаба.

Использование импульса без несущей, с резким передним фронтом, имеет преимущества перед широкополосным импульсом с несущей. Это технологическая возможность генерировать наносекундные импульсы большой амплитуды мощностью в единицы-десятки мегаватт используя сравнительно простые и недорогие газоразрядные и полупроводниковые генераторы, и возможность синхронизовать такие импульсы с точностью до десятка пикосекунд различными способами. Такое время синхронизации обеспечивает пространственный интервал рассогласования для всех элементов фазированной антенны менее 0,1 м и позволяет формировать фазированной антенной волновой фронт с пространственной глубиной меньше 1 метра. Для радиолокации на поверхностной волне или пассивной радиолокации с использованием сторонней «подсветки» это важная характеристика для обнаружения малоразмерных объектов с высокой разрешающей способностью. Для эффективного управления фронтом от нескольких генераторов импульсов без несущей, возможно как использование традиционных схем, так и создание специальных конструктивно простых оптоэлектронных коммутаторов [3]. Это позволит формировать импульсы напряжения от единиц до десятков киловольт с фронтом от десятка пикосекунд на 50-омной активной нагрузке. Для эффективного управления коммутатором и фронтом зондирующего сигнала можно использовать импульсы света с длительностью порядка десятков пикосекунд и энергией, примерно в 1000 раз меньше, чем:

а) излучается многими современными пикосекундными Nd:YAG лазерами с длиной волны 1.064 мкм, подходящей для кремниевых фотодиодов и
б) необходимо для работы коммутаторов на основе фотосопротивлений использованных при создании сверхширокополосного радара [4], в СВЧ диапазоне.

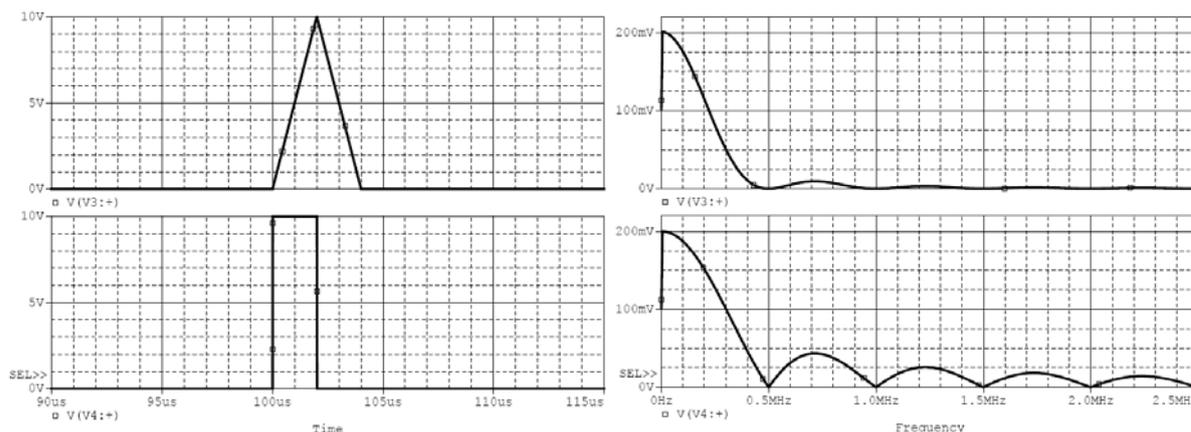


Рис. 1. Спектральная форма представления импульса

Привычной формой представления импульсного сигнала является спектральная форма, или разложение сигнала на спектр гармонических составляющих схематически показанных на рис.1 в графической форме. Ширина спектра и уровень амплитуды высших гармоник напрямую зависит от крутизны фронта и спада и от длительности импульса. Спектр сигнала вычисляется с помощью прямого преобразования Фурье, а исходный сигнал может быть восстановлен из спектра обратным преобразованием Фурье: Одиночные импульсы имеют непрерывный (сплошной) спектр, а периодический импульсный сигнал имеет дискретный набор гармоник.

Примеры одиночных сигналов и их спектров:

1. δ -функция, одиночный прямоугольный импульс.

Одиночный бесконечно короткий импульс имеет сплошной спектр, и по мере «уширения» импульса, его спектр приобретает вид (на рис. 1 нижний график), с огибающей вида $1/f$. В пределе, при бесконечной длительности

импульса (постоянный ток), спектр вырождается в одну гармонику с нулевой частотой.

2. Треугольный импульс

Из-за более пологого нарастания и спада импульса затухание высших гармоник в спектре происходит быстрее – как $1/f^2$ (на рис. 1 верхний график).

Приведенные выше рассуждения показывают, что для зондирования на дальние расстояния с высоким разрешением при ограничении по мощности излучаемого импульса выбор оптимальной формы импульса существенно влияет на характеристики системы в целом.

В [1] отмечается, что импульс с широкой полосой должен затухать в среде с дисперсией и поглощением меньше, чем синусоидальный сигнал со средней частотой такой полосы. Это подтверждается экспериментами в георадиолокации где глубина зондирования в сильно поглощающей дисперсной среде является критически важным параметром [5-12].

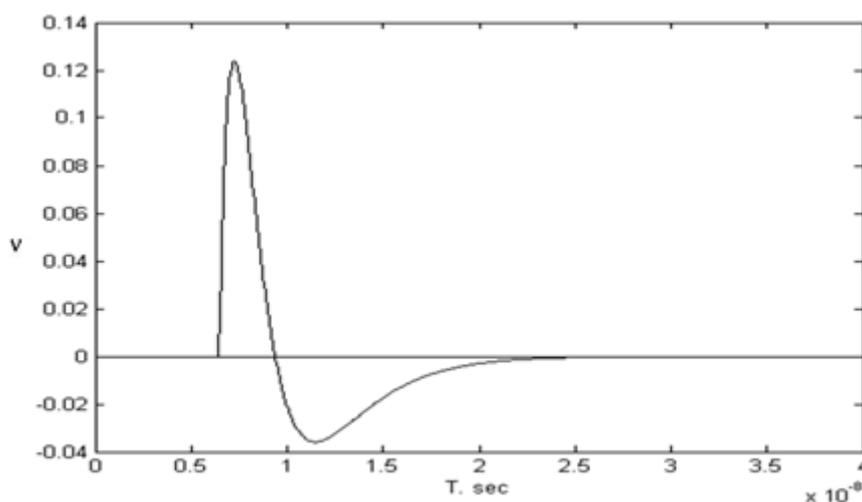


Рис. 2. Форма зондирующего импульса сверхширокополосного георадара.

В настоящее время максимальную глубину зондирования обеспечивают георадары модельного ряда «ГРОТ» в которых используются сверхширокополосные высоковольтные импульсы без несущей.

Форма такого импульса представлена на рис 2.

Крутизна переднего фронта, в зависимости от конструкции передатчика и стоящих задач может варьировать от сотен пикосекунд до десятков наносекунд.

При электромагнитном зондировании природных сред надо принимать во внимание, что основные механизмы формирования их диэлектрической проницаемости варьируют в пределах от 10^{-9} до единиц секунд включительно. Только электронная дипольная поляризация имеет характерное время формирования порядка 10^{-15} сек.

Как показано в [7], чем круче фронт, тем проще обнаруживать слабоконтрастные аномалии диэлектрической проницаемости во вмещающей среде. На рис.3 и 4 демонстрируется процесс профилирования вдоль стен штрека калийной шахты георадаром с наносекундным фронтом зондирующего импульса. В результате проведенных работ, как следует из первичных радарограмм удаётся обнаруживать на удалениях до 100 метров отражения от выработок диаметром 3 м, а скважины диаметром 10см на удалении до 30 метров.

Работы выполнены одним прибором, но поскольку в спектре зондирующего импульса содержатся и высокие и низкие частоты, несмотря на большое затухание и дисперсию удаётся получить настолько качественные радарограммы, что они практически не нуждаются в дополнительной обработке.

Шахта: обнаружение буровых скважин Солггорск Республика Беларусь



Скважина диаметром менее 0,1 м обнаруживается до глубин 30 метров с точностью 1%

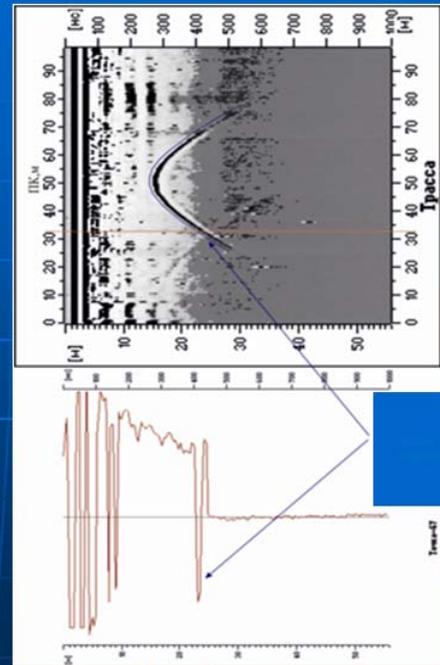


Рис.3. Локализация скважины из штрека калийной шахты, с использованием георадара ГРОТ-12.

Очевидно, что использование сверхширокополосных электромагнитных импульсов для зондирования природных сред, в том числе, такой среды как ионосфера, для которой характерны сильная дисперсия и затухание, является перспективным направлением развития технологий зондирования. Поскольку процесс теоретического и численного моделирования взаимодействия таких импульсов с природными средами дело непростое [1,7], предлагается сразу перейти к экспериментальной проверке утверждений сформулированных выше. Основные объективные предпосылки для успешной постановки таких экспериментов присутствуют.

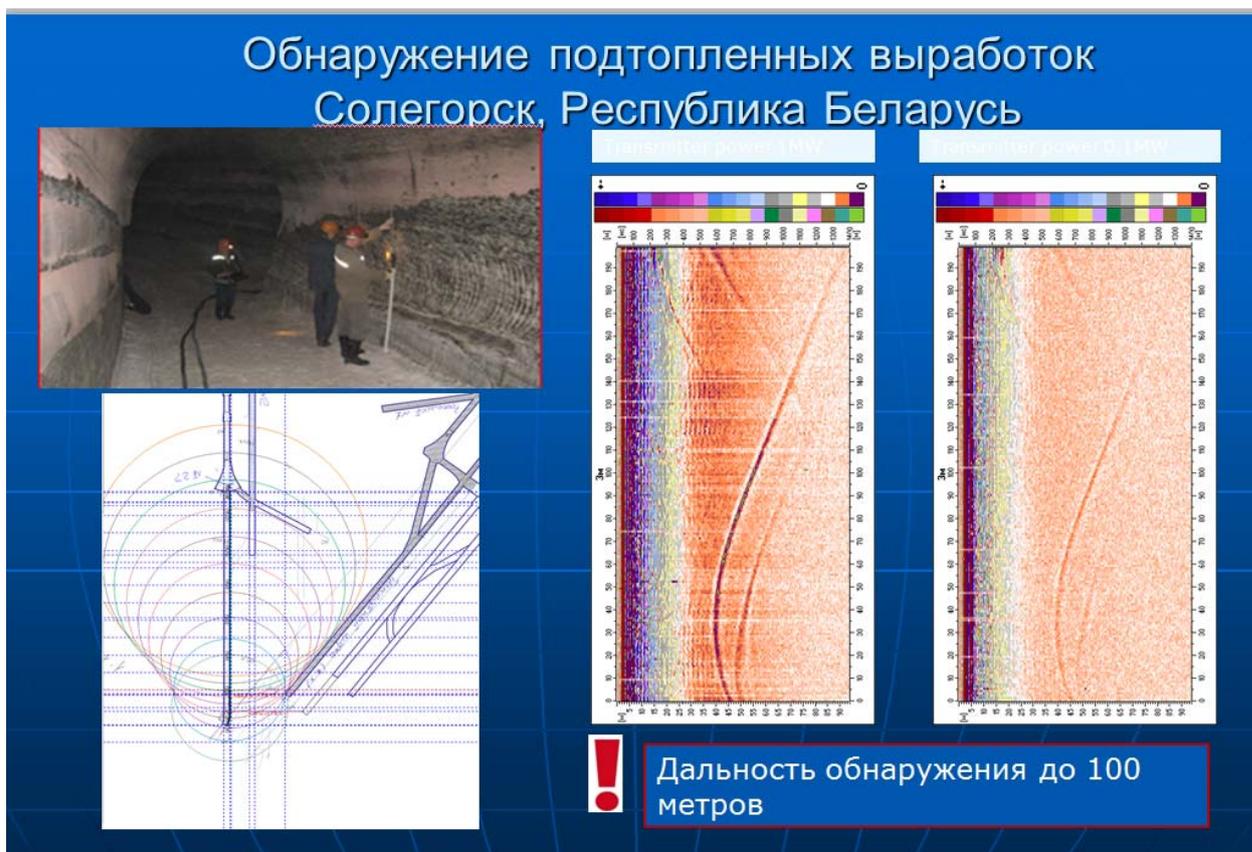


Рис.4. Обнаружение подтопленных выработок в калийных шахтах.

Есть энергоэффективные и компактные технологии формирования сверхширокополосных электромагнитных импульсов мегаваттной мощности с длительностью фронтов не более 1 нс и технологии их объединения с антеннами в том числе с фазированной решёткой [3]. Есть системы исследования параметров ионосферы с высокой точностью. И ясно, что природный радиоканал ионосферы обладает пропускной способностью достаточной для распространения сверхширокополосного импульса и сохранения им даже при малых мощностях достаточной энергии при однокачковом распространении. Создание экспериментального стенда для проверки вышеизложенных соображений представляется своевременной и актуальной задачей.

Литература

1. Вайнштейн Л.А. Распространение импульсов. // УФН 1976 г., т.18, вып.2, 339 с.
 2. Сахтеров В.И., Писарев Р.В., Лобзин В.В., Копейкин В.В., Резников А.Е., Железняков В.И., Щвец Д.П. Коротковолновая широкополосная радиостанция «Ангара-5М» // Радиотехника и электроника. – 2002, т. 47, №9, 1149 с.
 3. Кюрегян А.С. Пикосекундное переключение высоковольтных обратносмещенных p^+-n-n^+ -структур в проводящее состояние при импульсном освещении // Физика и техника полупроводников - 2014, т. 48, вып. 12, 1686 с.
 4. Lalande M., Diot J.C., Vauchamp S., Andrieu J. Progr. In Electromagnetics Res. B, 11, p. 205 (2009).
 5. Volkomirskaya L.B., Varenkov V.V., Lyakhov G.A., Musalev D.N., Reznikov A.E., Rudenchik E.A., Sakhterov V.I. // Numerical and Natural Experiment on Georadiolocation: Prospects of Applications for Lunar Soil Sensing. Physics of Wave Phenomena, 2013, Vol. 21, No. 3, pp. 1-17.
 6. Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Musalev D.N. // The potentialities of ground-penetrating radar in the engineering geology using the radars GROT-12 and GROT-12E Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013-1669, 2013, EGU General Assembly 2013, p. 251.
 7. Волкомирская Л., Гулевич О., Руденчик Е. Георадиолокация в средах с дисперсией. Зависимость амплитуды и формы импульса георадара от дисперсии среды. Из-во LAP (Lambert Academic Publishing) 2013, ISBN 978-3-659-35367-3, 81с.
 8. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Лиманский А.В., Резников А.Е. Метод пространственной локализации очагов горения углепородных отвалов (Терриконов). // Экологические системы и приборы, 2014, №11, 40 с.
-

9. Balabin R.V., Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Krivosheev N.V., Lyakhov G.A., Musalev D.N., Reznikov A.E., Safieva R.Z., Semyonov S.N. Georadar Sensing from Terrestrial Surface and Shafts: Approaches to Evaluation of Rock Fracturing. // *Physics of Wave Phenomena*, 2015, Vol. 23, No. 2, p. 143.
10. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А. Исследование состояния водных ресурсов с помощью дистанционного метода сверхширокополосной георадиолокации. // *Экологические системы и приборы*, 2015, №6, 16 с.
11. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Кривошеев Н.В., Ларина Т.Н., Резников А.Е., Экба Я.А. Пространственное исследование формирования поверхности скольжения оползня методом сверхширокополосной радиолокации и оценка объема перекрывающей толщи пород. // *Инженерный вестник Дона*, 2016, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3567
12. Гридневский А.В. Оценка геологических опасностей и рисков Восточно-Донбасской агломерации // *Инженерный вестник Дона*, 2013, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1947/.

References

1. Vajnshtejn L.A. *UFN* 1976 g, v.18, vyp.2, 339 p.
 2. Sahterov V.I., Pisarev R.V., Lobzin V.V., Kopejkin V.V., Reznikov A.E., ZHeleznyakov V.I., SHCHvec D.P. *Radiotekhnika i ehlektronika*. 2002, v. 47, № 9, 1149 p.
 3. Kyuregyan A.S. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2014, v. 48, vyp. 12, 1686 p.
 4. Lalande M., Diot J.C., Vauchamp S., Andrieu J. *Progr. In Electromagnetics Res.* B, 11, p. 205 (2009).
 5. Volkomirskaya L.B., Varenkov V.V., Lyakhov G.A., Musalev D.N., Reznikov A.E., Rudenchik E.A., Sakhterov V.I. *Physics of Wave Phenomena*, 2013, Vol. 21, No. 3, pp. 1-17.
-



6. Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Musalev D.N. GROT-12 and GROT-12E Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013-1669, 2013, EGU General Assembly 2013, p. 251.
7. Volkomirskaya L., Gulevich O., Rudenchik E. Georadiolokaciya v sredah s dispersiej. Zavisimost' amplitudy i formy impul'sa georadara ot dispersii sredy. [GPR in dispersion environments. Dependence of the amplitude and shape of the GPR pulse on the dispersion of the medium]. Iz-vo LAP (Lambert Academic Publishing) 2013, ISBN 978-3-659-35367-3, 81 p.
8. Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Limanskij A.V., Reznikov A.E. EHkologicheskie sistemy i pribory, 2014, №11, 40 p.
9. Balabin R.V., Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Krivosheev N.V., Lyakhov G.A., Musalev D.N., Reznikov A.E., Safieva R.Z., Semyonov S.N. Physics of Wave Phenomena, 2015, Vol. 23, № 2, p. 143.
10. Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A. Ekologicheskie sistemy i pribory, 2015, №6, 16 p.
11. Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Krivosheev N.V., Larina T.N., Reznikov A.E., EHkba YA.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3567
12. Gridnevskij A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1947/.