

Антенна на границе раздела двух сред

А.В. Кочетов, Г.В. Комаров

АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург, Новосельковская, 37, radar@radar-mms.com.

Приводится электродинамический расчет для антенн, находящихся на границе раздела водной среды и свободного пространства. Получены экспериментальные данные для приемопередающих антенн, расположенных на поверхности воды при радиолокационном зондировании водной среды сверхкороткими импульсами.

Экспериментальные исследования по радиолокационному зондированию водной среды [1] показали интересные результаты по формированию и распространению электромагнитной волны в водной среде.

Экспериментальные данные подтверждают возможность сверхкороткоимпульсной радиолокации водной среды на небольших глубинах и открывают практические перспективы по применению электромагнитных волн для обнаружения радиолокационно контрастных объектов под слоем воды, на небольших глубинах и высоким детальным разрешением, как по дальности, так и по поперечной координате.

Водная среда выступает с одной стороны, как среда с потерями, а с другой стороны, как электрически плотный материал с высоким значением диэлектрической проницаемости. Диэлектрическая проницаемость волной среды может достигать значений $\varepsilon = 81$, что приводит к уменьшению размеров антенных систем, существенному снижению скорости распространения электромагнитного импульса. Антенные системы для подводной радиолокации должны учитывать особенности распространения электромагнитных волн как в электрически плотной среде, так и на границе раздела.

Из электродинамики возбуждения и распространения электромагнитных волн известно поведение электромагнитной волны на границе раздела двух сред. В частности, при падении электромагнитной волны из первой среды на границу раздела появляется волна, прошедшая сквозь границу раздела во вторую среду и отраженная волна.

Если в качестве антенны выбрать широкополосный диполь, расположить его в свободном пространстве над поверхностью воды и возбудить его сверхкоротким импульсом, то в направлении нормали к поверхности воды в свободное пространство будет излучаться два импульса электромагнитной волны. Первый импульс электромагнитной волны распространяется непосредственно от антенны, второй импульс это импульс отраженный водной поверхностью. Поскольку второй импульс отражается от границы раздела при прохождении из электрически менее плотной среды в электрически более плотную среду, фаза отражения вектора напряженности электрического поля меняется на противоположную. В свободное пространство излучаются два импульса, следующие друг за другом, причем второй импульс находится в противофазе первому. Коэффициент отражения зависит от значения диэлектрической проницаемости второй среды относительно первой и при отсутствии потерь в диэлектрике определяется известной формулой [2]:

для горизонтальной поляризации

$$\rho = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon}}{1 + \sqrt{\varepsilon}} \quad (1)$$

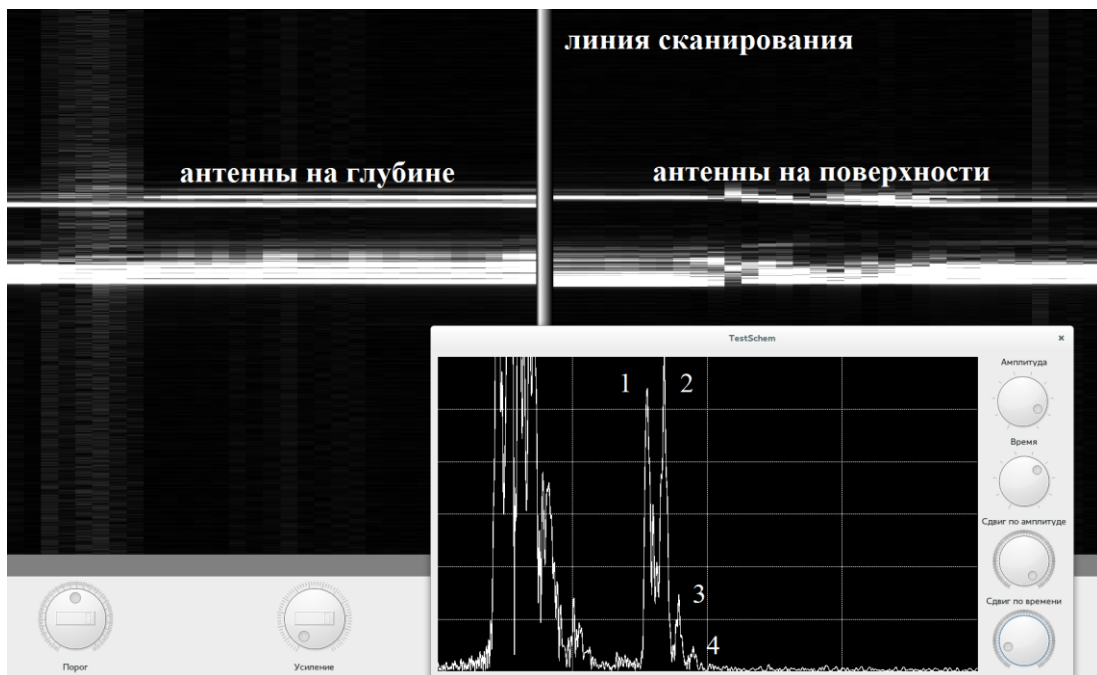
для вертикальной поляризации

$$\rho = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \quad (2)$$

Амплитуда импульса напряженности электрического поля электромагнитной волны отраженной от поверхности раздела водной среды и воздуха равна значению 0.8 от амплитуды импульса электромагнитной волны падающей на границу раздела. При уменьшении расстояния до границы раздела импульсы электромагнитной волны сближаются, перекрываются и взаимно компенсируются так, что при расположении антенны на границе раздела излучение электромагнитной волны в свободное пространство практически отсутствует.

С другой стороны, если широкополосный диполь, расположить под поверхностью воды и возбудить его сверхкоротким импульсом, то в направлении нормали в глубину от поверхности воды также будет излучаться два импульса электромагнитной волны. Однако, фаза отражения вектора напряженности электрического поля не меняется на противоположную, то есть импульсы электромагнитной волны следуют друг за другом синфазно.

На рис. 1 приведена радарограмма зондирования водной поверхности сверхкороткими импульсами антеннами, расположенными на небольшой глубине от границы раздела поверхности воды.



**Рис. 1. Радиолокационное зондирование отражателя в воде.
Приемная и передающая антенны находятся на глубине 40 см**

Радиолокационное зондирование цели проводилось по отражателю, находящемуся на дне водоема на глубине 3 м. На радарограмме слева антенны находятся на глубине 0.4 м, справа от линии сканирования антенны располагаются на поверхности раздела.

При размещении антенн на глубине появляются несколько отраженных импульсов, задержанных относительно друг друга. На рис. 2 показаны пути распространения импульсов:

1-й импульс - распространяется непосредственно от передающей антенны до отражателя и обратно до приемной антенны;

2-й импульс - представляет собой сумму двух импульсов, распространяющихся по одинаковым путям:

передающая антенна – отражатель – поверхность воды – приемная антенна;
 передающая антенна – поверхность воды – отражатель – приемная антенна.
 3-й импульс - распространяется по пути:
 передающая антенна – поверхность воды – отражатель – поверхность воды –
 приемная антенна.

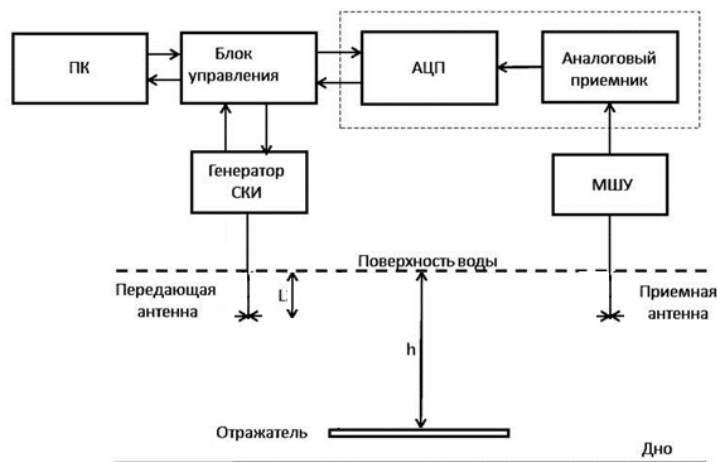


Рис. 2. Схема проведения эксперимента

На рис. 1 наблюдается 4-й импульс, который обусловлен дополнительными переотражениями от самих антенн и поверхности при прохождении импульсов отраженных от границы раздела.

С учетом того, что при отражении импульса электромагнитной волны от границы раздела при прохождении из электрически более плотной среды в электрически менее плотную, фаза отражения вектора напряженности электрического поля не меняется, импульсы 1, 2, 3 – синфазны.

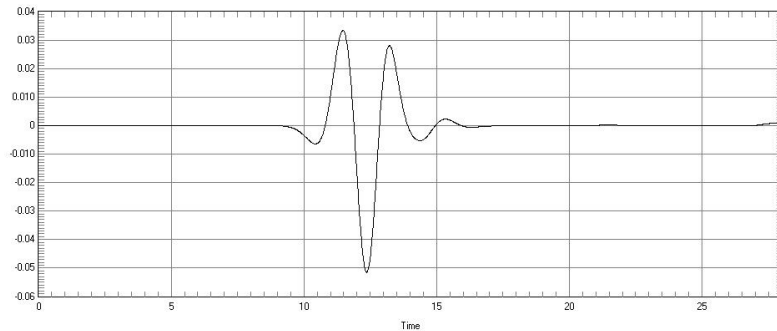
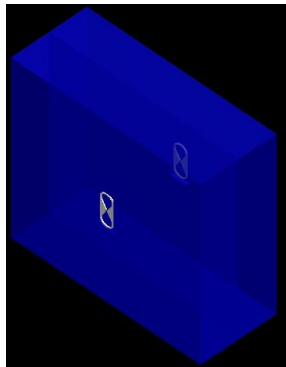
При уменьшении расстояния до границы раздела импульсы электромагнитной волны 1, 2, 3 сближаются, перекрываются и взаимно усиливаются при расположении антенны на границе раздела. Излучение электромагнитной волны, возбуждаемой широкополосным диполем, происходит от границы раздела в глубину электрически плотной среды.

Это свойство антенных систем можно использовать при их расположении на границе раздела поверхности воды с высоким значением диэлектрической проницаемости и свободного пространства и увеличить КНД приемной и передающей антенны. КНД антенны увеличивается на 5 дБ, а амплитуда сигнала от цели подповерхностной РЛС, антенны которой расположены на границе раздела водной поверхности, существенно увеличивается.

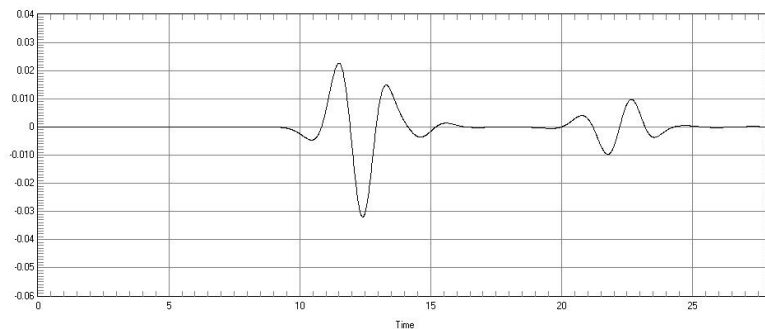
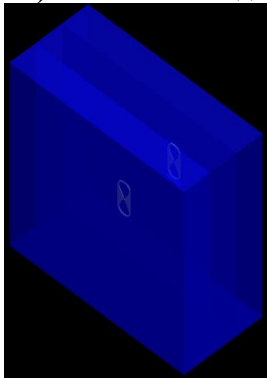
Для оценки увеличения потенциала подповерхностной РЛС, антенны которой расположены на границе раздела поверхности воды воздуха, проведено электродинамическое моделирование антенн, погруженных в среду с высокой диэлектрической проницаемостью. Потери в среде не учитывались, значение диэлектрической проницаемости среды $\epsilon = 81$.

Для согласования антенн, находящихся в среде с высокой диэлектрической проницаемостью, размеры этих антенн в 3 раза меньше, чем такие же антенны, предназначенные для работы в свободном пространстве. Импульс на выходе приемной антенны представлен на рис. 4. Как следует из рисунка прямой и отраженный от поверхности импульс передающей антенны являются синфазными. Амплитуда второго импульса (рис. 4б), отраженного от границы раздела несколько ниже расчетной, что

можно объяснить затенением передающей антенной электромагнитной волны отраженной от поверхности. Тем не менее, если передающая антенна расположена на границе раздела амплитуда импульса на выходе приемной антенны возрастает в 1.64 раза (+4.3 дБ).



а) антенны находятся на границе раздела диэлектрика и свободного пространства



б) передающая антенна находится в глубине диэлектрика, приемная антенна находится на границе раздела диэлектрика и свободного пространства

Рис. 4. Прохождение сверхкороткого импульса от передающей антенны к приемной антенне сквозь диэлектрик (вода без потерь)

К особенностям применения антенн для радиолокационного зондирования водной среды помимо уменьшения приблизительно в 3 раза линейных размеров, по сравнению с размерами антенн в воздухе, следует отнести то, что в электрически плотной среде практически не работают ТЕМ антенны типа биконического рупора, ТЕМ-рупора, антенн Вивальди. По всей видимости, это связано с существенным различием фазовых скоростей тока, протекающего по поверхности таких антенн, и скорости распространения электромагнитной волны в воде, которая уменьшается пропорционально $\sqrt{\epsilon}$. Этот факт необходимо учитывать при построении антенных решеток излучающих или приемных элементов. Шаг антенной решетки из-за увеличенных размеров элементов тоже физически увеличивается, что может привести к появлению дифракционных лепестков в диаграмме направленности антенной решетки.

Литература

1. Анцев Г.В., Анцев И.Г., Кочетов А.В., Райский В.Л. Радиолокация водной среды с использованием сверхкороткоимпульсной РЛС // VI Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. – Муром: Изд.- полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016.
2. Справочник по радиоэлектронике в трех томах. Под общей ред. А.А. Куликовского. Том 1. - М.: Энергия, 1967.