

УДК 621.396.96

Отражения от водной поверхности при использовании сверхкороткоимпульсного зондирующего сигнала

Исаков М.В.^{1*}, Нуждин В.М.^{2}, Соколов П.В.^{2**},
Усачев В.А.^{3***}, Шнайдер В.Б.^{2****}**

¹*Научно-производственное объединение "Салют",*

Плеханова, 6, Москва, 111123, Россия

²*Московский авиационный институт*

(национальный исследовательский университет),

МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

³*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(МГТУ им. Баумана), 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия*

**e-mail: isakov_mv@smp-salyut.ru*

***e-mail: kaf407@mai.ru*

****e-mail: usachev_va@mail.ru*

*****e-mail: vschndr@gmail.com*

Аннотация

Экспериментально получены радиолокационные изображения водной поверхности при различном волнении, с использованием сверхкороткоимпульсного сигнала при настильных углах визирования. Полученные радиолокационные изображения характеризуются высоким пространственным разрешением, отличающим их от аналогов. На полученных при высоком пространственном разрешении изображениях,

наблюдаются отражения от отдельных гребней волн. Приведено сравнение полученных изображений и измеренных по ним параметров отражений при различных длительностях зондирующего сигнала. Показана возможность обеспечивать при определённых условиях характеристики обнаружения характерные для свободного пространства в непосредственном присутствии подстилающей поверхности.

Ключевые слова: радиолокационная станция малой дальности, сверхкороткоимпульсный зондирующий сигнал, отражения от водной поверхности.

Одной из перспективных радиолокационных технологий последних лет является технология сверхкороткоимпульсной (СКИ) радиолокации [1, 2, 3]. Актуальным вопросом внедрения этой технологии в радиолокационной станции (РЛС) малой дальности является реализация и отработка специфических алгоритмов обработки радиолокационных данных. В целях обеспечения отработки и оценки эффективности новых алгоритмов обнаружения на фоне отражений от подстилающей водной поверхности на комплексном моделирующем стенде необходимо получение достаточно представительных выборок записанного реального радиолокационного сигнала. Для получения таких массивов реальных радиолокационных эхосигналов была проведена экспериментальная регистрация в полигонных

условиях радиолокационных фоновых отражений от водной поверхности (различной степени волнения) в режиме излучения сверхкороткоимпульсного (СКИ) сигнала.

Актуальность данных работ определяется необходимостью получения реальных массивов записанного отражённого радиолокационного сигнала, рассеянного водной поверхностью с различной степенью волнения. Такие результаты получены неоднократно для узкополосных зондирующих сигналов (ЗС) низкого пространственного разрешения. Расширение полосы частот и использование сверхкороткоимпульсного сигнала требует вернуться к этому вопросу для отработки алгоритмов обработки СКИ сигналов на комплексном имитационном стенде с использованием реально записанных радиолокационных сигналов.

На рис. 1 приведена карта района проведения экспериментальных работ. При выборе места проведения работ одним из основных критериев было наличие значительного участка открытой водной поверхности, обеспечивающего достаточный нагон волны.

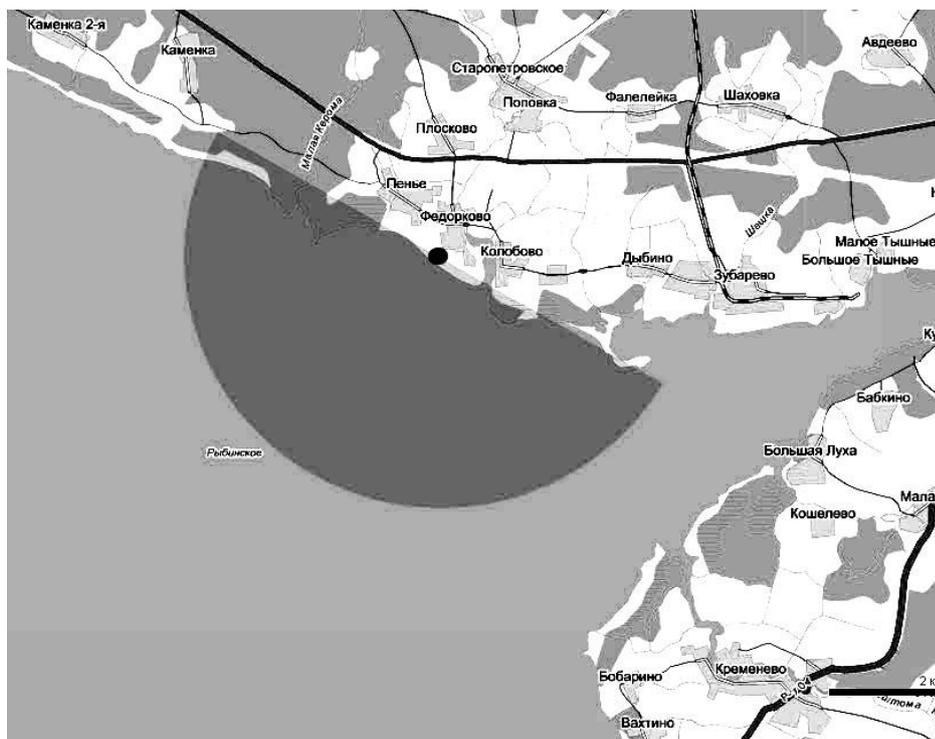


Рис. 1. Место проведения экспериментальных работ в акватории Рыбинского в/х. Показано положение СКИ РЛС и центральное направление зондирования. Прямая видимость водной поверхности более 25 км.

Измерения проводились 10 октября, в акватории Рыбинского водохранилища. Место расположения РЛС с координатами: $58^{\circ}29,505'$ ш; $38^{\circ}53,746'$ д, показано на рис.4.3, дер. Федорково, Пошехонский р-н.

Температура $5-8^{\circ}\text{C}$, влажность 93% , морозящий дождь, скорость ветра 2-4 м/сек в первой половине дня (10-13 ч.) и увеличение скорости до 6-7 м/сек. во второй половине дня (с 14-18 ч.). Направление ветра – северо-западное и соответствует азимутальному углу 135° (в координатах РЛС).

В соответствии с программой и методикой проведения экспериментальных исследований, объектом экспериментальных исследований является взволнованная водная поверхность различной степени волнения. Экспериментальные исследования проводятся методом радиолокационного зондирования при настильных углах по водной поверхности при различной степени волнения. Кроме водной поверхности в зоне обзора РЛС должна находиться реперная цель.

Проведению регистрации фоновых отражений предшествовала проверка работоспособности аппаратуры путём контроля длительности и формы излучаемого ЗС. Контроль осуществлялся осциллографом на выходе амплитудного детектора, куда сигнал поступает с направленного ответвителя в радиолокационном тракте. Длительность ЗС не превышала 10 нс, при длительности фронтов не более 3 нс. Поляризация – вертикальная или горизонтальная, сигнал – радиоимпульс длительностью 10 нс с ВЧ заполнением, обзор – круговой, с темпом 1 секунда. Для сравнения полученных результатов и выявления тенденций изменения мощности отражений от водной поверхности так же проводилось зондирование с большими длительностями сигнала.

Геометрия визирования определяется высотой подъёма фазового центра антенны. В ходе экспериментов СКИ РЛС располагалась непосредственно возле уреза воды. Таким образом, наблюдение проводилось при скользких углах облучения в диапазоне 0-3 градуса.

Водная поверхность в условиях проводимых измерений характеризуется анизотропностью волнения, короткие волны - в направлении движения (3 – 7 м) и достаточно длинные – в поперечном (10 – 20 м). Направление движения волн совпадает с направлением ветра, высота ветровых волн в прибрежной зоне 0,3 - 0,4 м в первой половине дня; 0,5 – 0,8 м во второй половине. Из-за малой глубины прибрежного участка наблюдается обрушение волн.

Зеркальная антенна размещалась над крышей автомобиля на опорно-поворотном устройстве. Высота подъема фазового центра над поверхностью земли, определяется вертикальным габаритом автомобиля, составляет – 3 м. Фазовый центр антенной системы, с учетом возвышения площадки над уровнем водной поверхности, находился на высоте 8 м.

Эффективная ширина азимутального луча антенны во всех экспериментах оставалась постоянной и равной $\Theta_{аз} = 0,7^\circ$.

Для калибровки РЛС в экспериментах использовался уголкового отражатель (УО) с гранью 160 мм. Уголкового отражатель располагался на дальности порядка 200 метров на водной поверхности вблизи берега. Угол азимута УО $21,7^\circ$ (246 отсчет) относительно нулевого азимута – соответствующего началу сектора обзора.

Обработка массивов экспериментальных данных состояла из следующих процедур:

1. оценки среднего значения квадратурных компонент принятых сигналов и компенсации смещений, вызванных уходом нулей квадратурных демодуляторов,
2. вычисления средних значений и среднеквадратических отклонений (СКО) принятых сигналов,
3. оценка средней амплитуды сигнала отраженного от УО,
4. нахождение средней эффективной площади рассеяния (ЭПР), как функции трех параметров: длительности ЗС, угла азимута и дальности,
5. нахождение средней удельной ЭПР (УЭПР),
6. расчет среднего квадратического отклонения ЭПР.

Среднее значение ЭПР рассчитывается по формуле:

$$S_{OTR}(\tau_{И}, \Theta, R) = \frac{A_{ИЗМ}^2(\tau_{И}, \Theta, R)}{A_{УО}^2} \cdot S_{УО} \cdot \frac{K_{УО}}{K_{ИЗМ}} \cdot \left(\frac{R_{ИЗМ}}{R_{УО}} \right)^4 \quad (1)$$

где :

$A_{ИЗМ}^2(\tau_{И}, \Theta, R)$ – среднее значение квадрата амплитуд отражений от водной поверхности,

$A_{УО}^2$ – среднее значение квадрата амплитуды отражения от УО,

$S_{УО}$ – ЭПР УО,

$K_{\text{изм}}$ – коэффициент ослабления аттенюаторами в текущем эксперименте,

$R_{\text{изм}}$ – дальность до центра области отражения,

$R_{\text{во}}$ – дальность до уголкового отражателя.

На рис. 2, в качестве примера приведены радиолокационные изображения (РЛИ) отражений от водной поверхности, полученные при длительности сигнала 10нс. Области, в которых формируются оценки средних интенсивностей, выделены инверсным отображением интенсивностей. Усреднение проводится внутри выделенных областей размером 80x80 отсчетов и не менее чем по 60 кадрам.

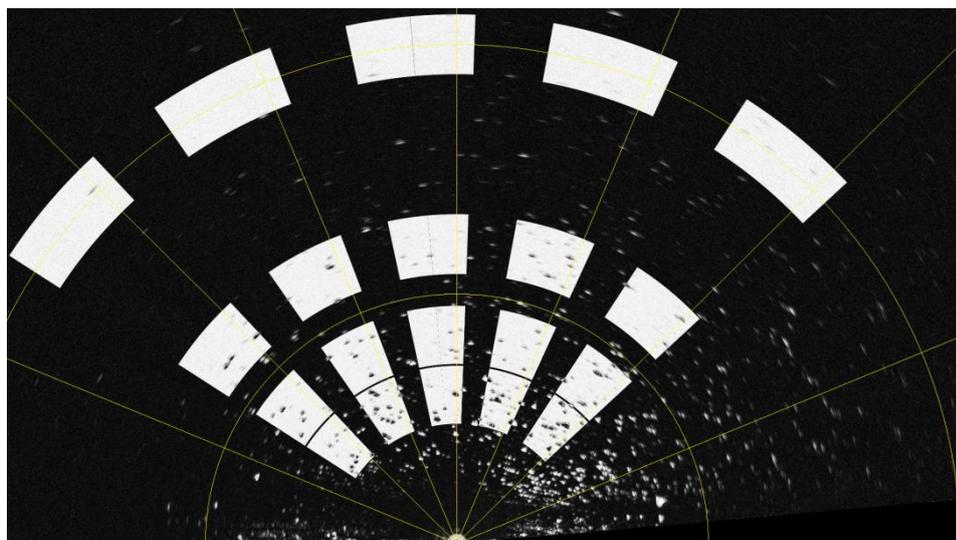


Рис. 2. Зоны анализа на РЛИ для 10 нс ЗИ

На рис. 3 приведено оптическое изображение водной поверхности соответствующей времени проведения рассмотренных экспериментов, полученное с системы синхронной видеофиксации.



Рис. 3. Оптическое изображение водной поверхности

Зависимости интенсивности отражения от угла азимута и длительности зондирующего импульса приведены на рис. с 4 по 5 для дальности 208 и 500 м.

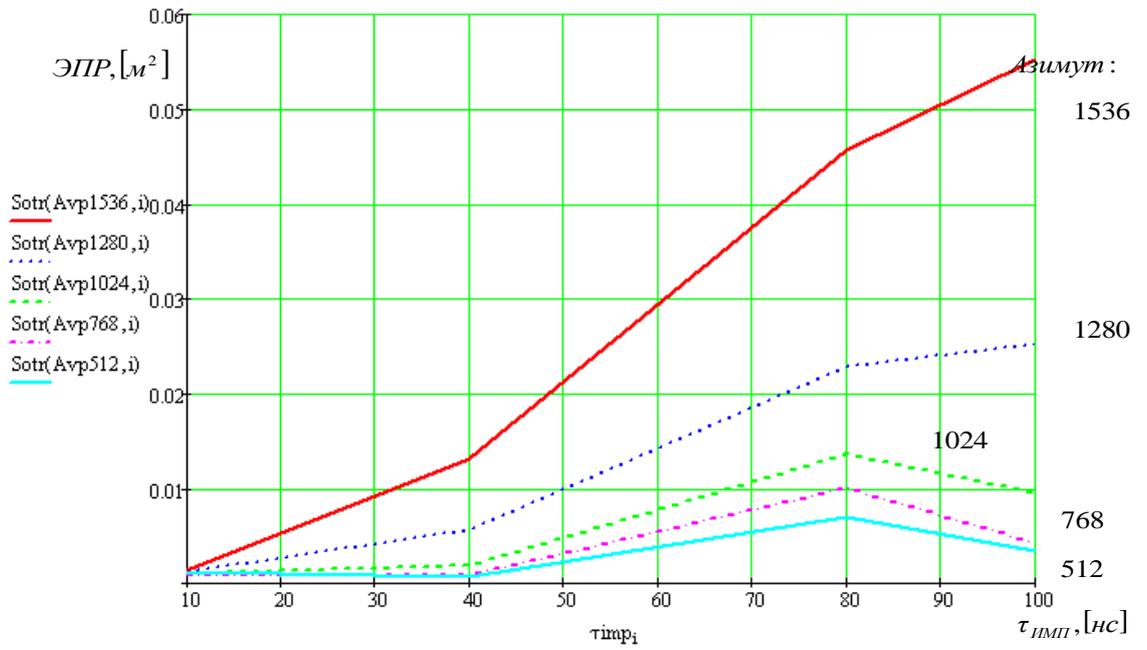


Рис. 4. Зависимость ЭПР от длительности импульса (R=208 метров)

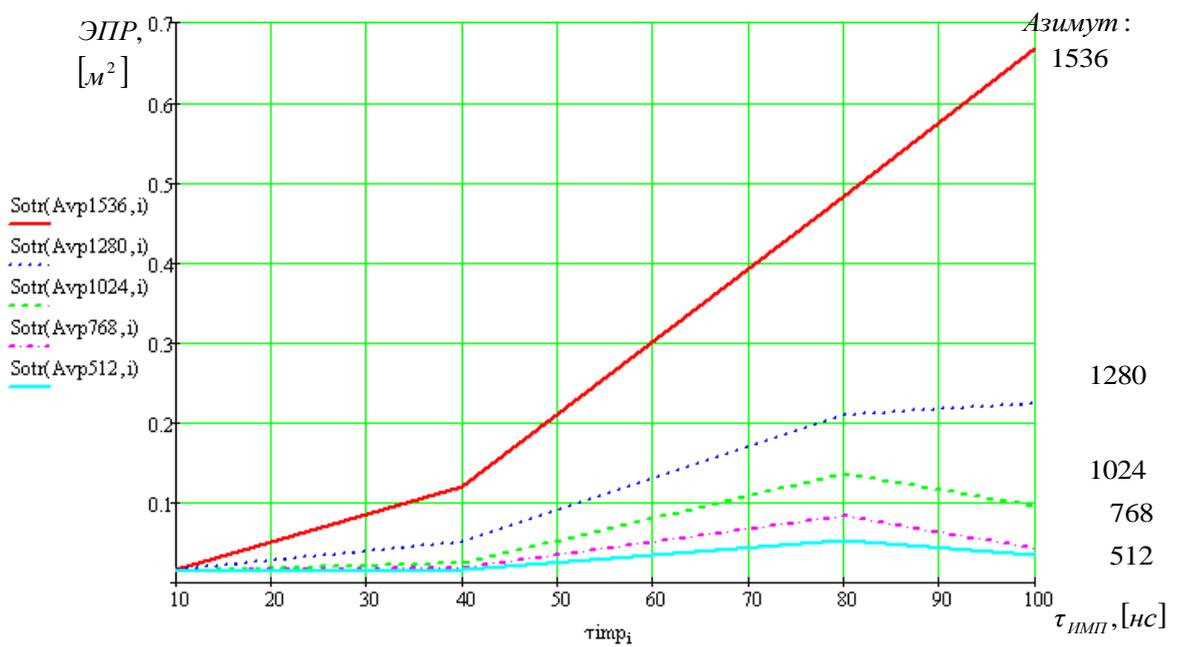


Рис. 5. Зависимость ЭПР от длительности импульса (R=500 метров)

Увеличение длительности ЗИ и дальности, как ожидалось, приводит к увеличению интенсивности отражения от анализируемого участка водной поверхности. Анализ представленных результатов показывает анизотропность поля интенсивностей отражений. Максимальные отражения наблюдаются при нормальном облучении волнения – кривые показанные красным цветом (азимутальный угол 135° или 1536 отсчет – в направлении движения волн) и минимальные – кривые синего цвета, соответствуют облучению вдоль волны (азимутальный угол 45° или 512 отсчет). На всех представленных графиках подтверждается тенденция увеличения интенсивности отражений от водной поверхности при увеличении длительности зондирующего сигнала. На рисунках 6-9 приведены примеры радиолокационных изображений для длительности зондирующего сигнала 10 нс и сравнительные изображения для больших длительностей.

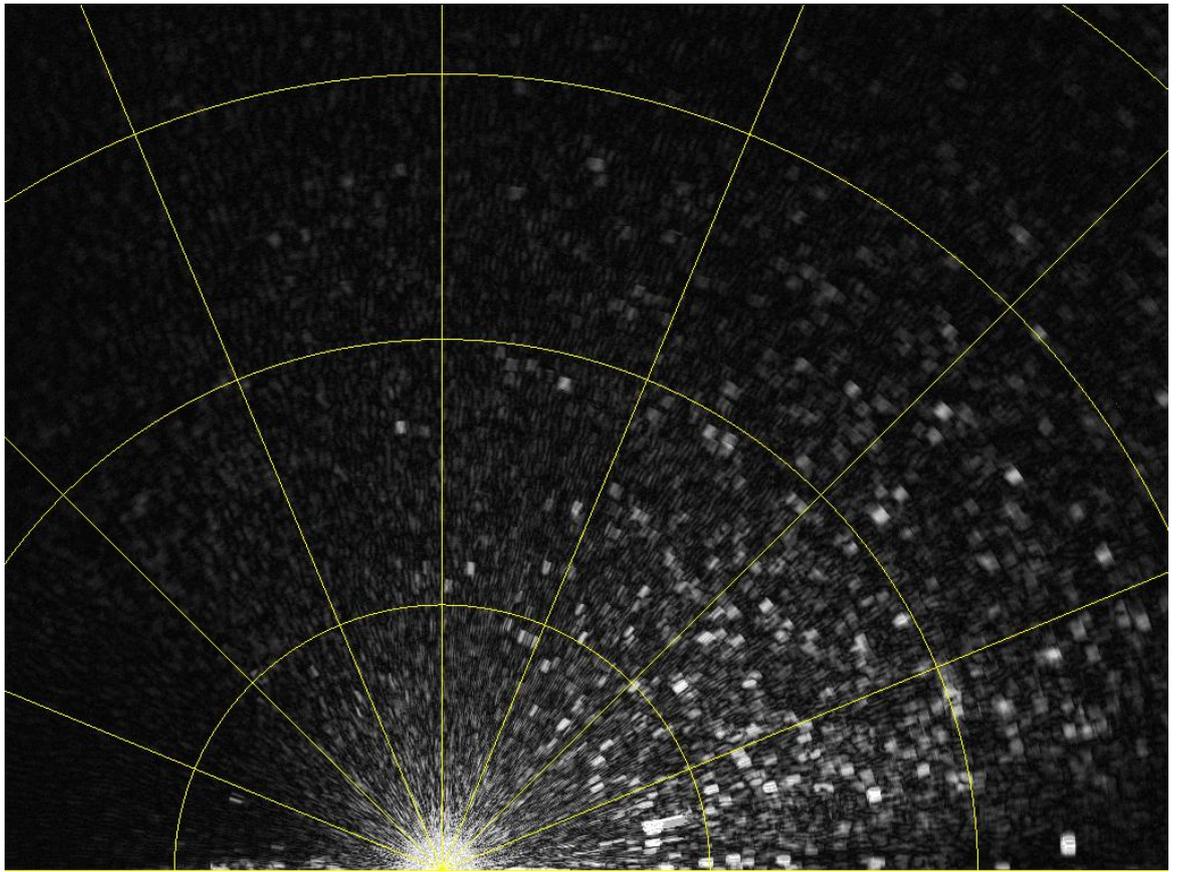


Рис. 6. Горизонтальная поляризация длительность импульса 80 нс

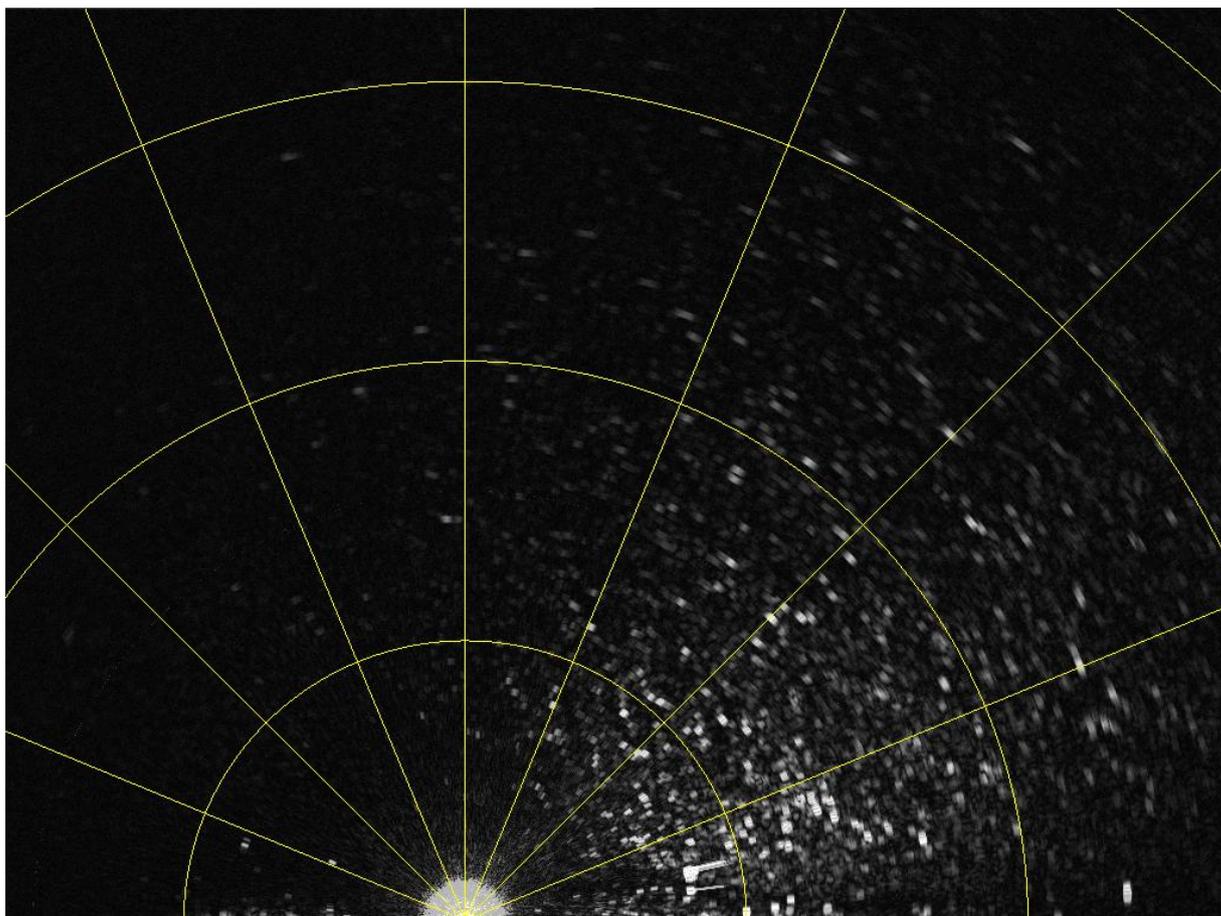


Рис. 7. Горизонтальная поляризация, длительность импульса 40 нс

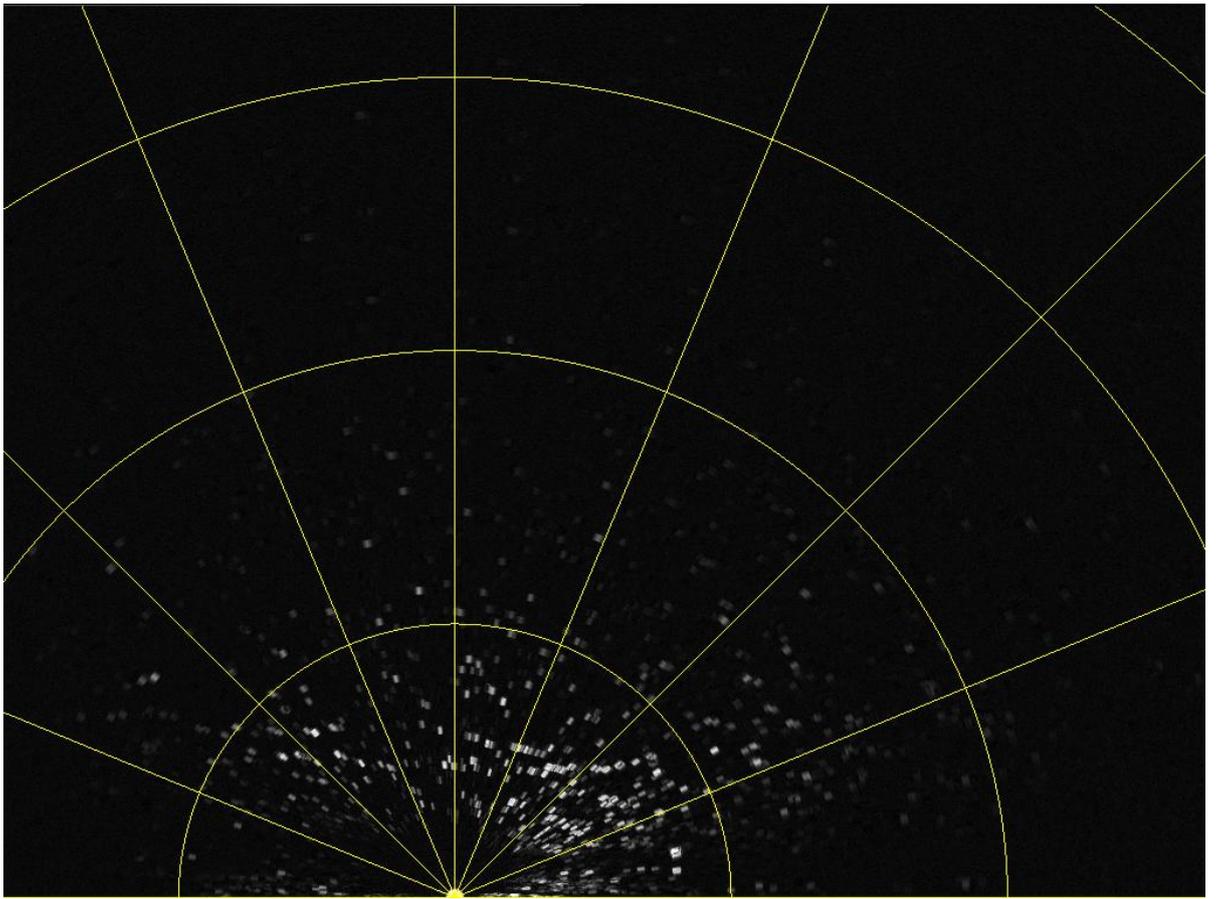


Рис. 8. Горизонтальная поляризация, длительность импульса 20нс

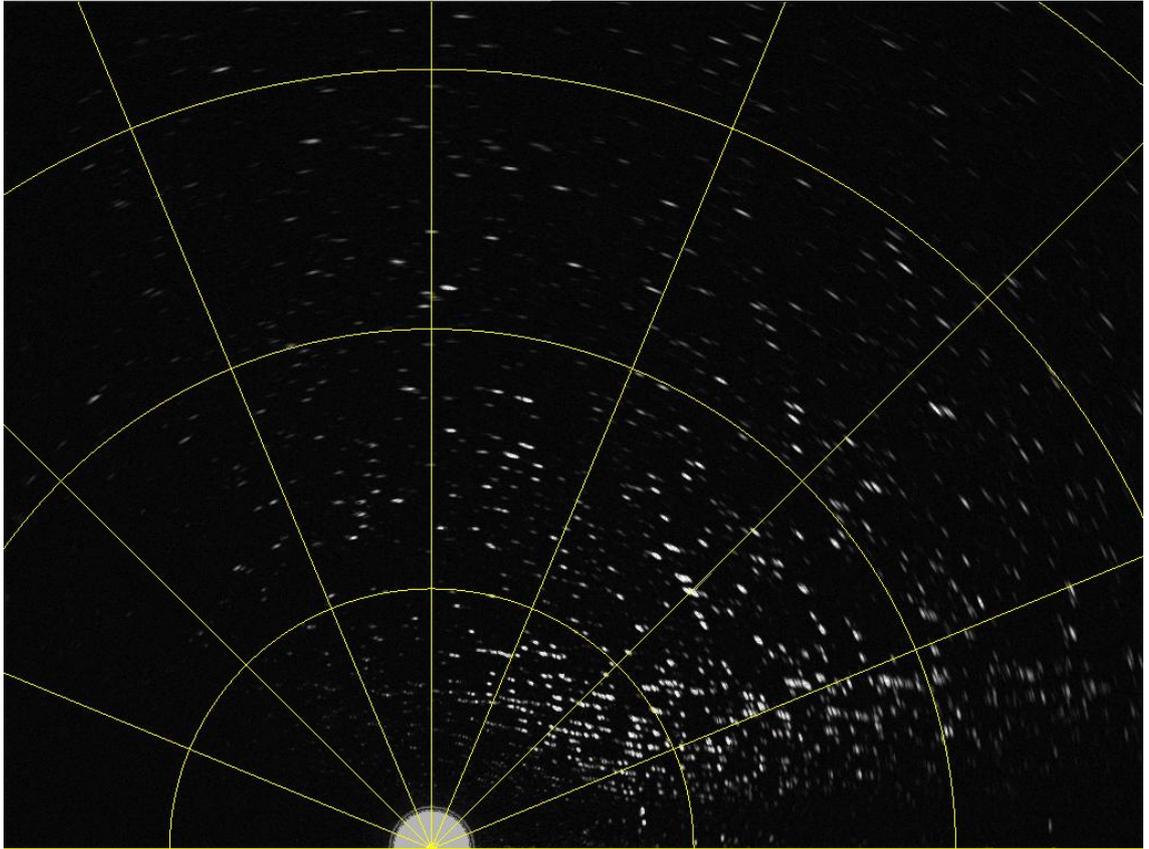


Рис. 9. Горизонтальная поляризация, длительность импульса 10 нс

На рис. 9 в первом кольце дальности хорошо просматриваются отдельные волны и свободные от пассивной помехи интервалы между ними.

На рис. 10 представлена зависимость оценки УЭПР поверхности от длительности ЗС и ракурса облучения волн. Оценка УЭПР практически не зависит от длительности ЗС для ракурсов отличных от визирования ортогонально фронту волнения.

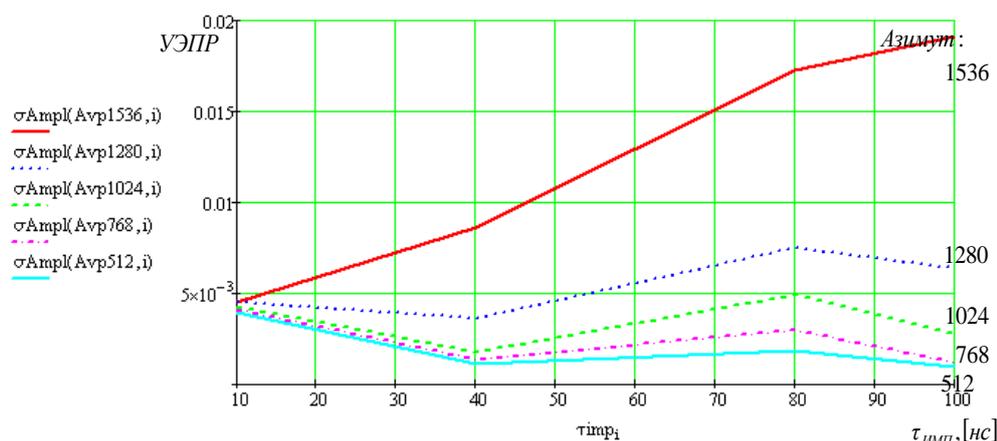


Рис. 10. Зависимость УЭПР от длительности импульса (R=500 метров)

Выводы:

1. Зарегистрированы файлы экспериментально полученных массивов данных отражений радиолокационного СКИ сигнала, в X-диапазоне длин волн, от водной поверхности. Объем полученных выборок сигналов достаточен для верификации результатов моделирования и обработки алгоритмов обработки СКИ сигналов.
2. В ходе экспериментальной регистрации не получены данные по сильному волнению, сопровождающемуся обрушением гребней волн и формированием отражений от капельно-брызговой фракции (взвеси). В связи с этим целесообразно продолжить экспериментальные работы, расширив их географию.
3. Полученные с помощью СКИРЛ радиолокационные изображения водной поверхности характеризуются высоким пространственным разрешением, отличающим их от аналогов. На полученных РЛИ,

наблюдаются отражения от отдельных гребней волн. В промежутках между ними уровень отражений определяется уровнем внутренних шумов приёмного устройства СКИ РЛС. Таким образом, показано неизвестное ранее свойство технологии СКИ радиолокации – обеспечивать при определённых условиях характеристики обнаружения характерные для свободного пространства в непосредственном присутствии подстилающей поверхности.

Библиографический список

1. Скосырев В.Н., Слукин Г.П., Усачев В.А., Ананенков А.Е., Коновальцев А.В., Нуждин В.М., Соколов П.В. «Многофункциональный аэродромный радиолокатор по технологии сверхкороткоимпульсной радиолокации», Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2007. №4, стр.120 – 122.
2. Скосырев В.Н., Ананенков А.Е., Коновальцев А.В., Нуждин В.М., Соколов П.В. «Перспективы создания информационных сетей для радиолокационного обеспечения задач навигации и судовождения» Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2009, специальный выпуск «Радиолокация, спутниковая навигация и связь, радиоастрономия», стр. 53-59.

3. Ананенков А.Е., Исаков М.В., Скосырев В.Н., Смоляков А.А., Усачев В.А. «Перспективная двухдиапазонная корабельная РЛС» Успехи современной радиоэлектроники. 2014 №1. Стр. 50 - 53