

## Радиофизическое обеспечение систем сверхкороткоимпульсной радиолокации

Г.В. Анцев, А.В. Бондаренко, М.В. Головачев, А.В. Кочетов, К.Г. Лукашов, О.С. Миронов, П.С. Панфилов, В.А. Парусов, В.Л. Райский, В.А. Сарычев

*АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург, Новосельковская, 37, [radar@radar-mms.com](mailto:radar@radar-mms.com).*

*Рассматриваются аспекты применения сверхкороткоимпульсной (СКИ) радиолокации для зондирования природных сред. Разработана конструкция СКИ РЛС с электрическим движением луча. Получены радиолокационные изображения местности в дециметровом диапазоне длин волн и проведена практическая оценка характеристик СКИ РЛС.*

### Типы сигналов СКИ радиолокации

Сверхкороткоимпульсная (СКИ) радиолокация относительно новое направление развития радиолокационных систем и комплексов по обнаружению радиолокационно-контрастных объектов сверхширокополосными сигналами и сигналами без несущей [1].

В отличие от традиционной радиолокации, в основе которой используются монохромные сигналы, вырабатываемые когерентным опорным генератором, в СКИ радиолокации используются сверхширокополосные сигналы на основе сверхкоротких импульсных сигналов. Такие сигналы вырабатываются специальными генераторами, - генераторами сверхкоротких импульсов.

Вид радиолокационных импульсов, подводимых к антенне СКИ РЛС, существенно отличается от зондирующих радиоимпульсов традиционных РЛС. Зондирующий импульс, используемый в традиционных РЛС представляет собой радиоимпульс, заполненный некоторой несущей частотой. Длительность радиоимпульса определяется возможностями систем модуляции РЛС: это может быть длинный радиоимпульс, короткий, фазоманипулированный, с внутриимпульсной модуляцией, и пр. На практике длительность элементарного простого радиоимпульса составляет не менее 10 нс.

Зондирующий импульс СКИ РЛС представляет собой видеоимпульс, который подводится к антенной системе РЛС. Это перепад напряжения или тока, с фронтом, длительность которого составляет 1 нс и менее. Спектр частот видеоимпульса достаточно широкий, перекрывает по ширине спектра 2-3 октавы и более.

Схематически процесс обнаружения радиолокационно-контрастной цели СКИ РЛС приведен на рис. 1. Как правило, СКИ РЛС содержит две антенны: передающую и приемную. В рабочей полосе частот РЛС практически невозможно обеспечить эффективную защиту приемника от мощного импульса передатчика, поэтому желательна дополнительная развязка между антеннами, передатчиком и приемником.

Видеоимпульс, вырабатываемый генератором СКИ, подводится к передающей антенне РЛС. Антенна возбуждается и излучает в свободное пространство тот спектр частот видеоимпульса, которых находится в ее рабочей полосе. Постоянная составляющая, если она присутствует в спектре частот видеоимпульса, не излучается. Не излучается спектр частот видеоимпульса, который находится ниже рабочих частот антенны РЛС, - антенна РЛС излучает в свободное пространство электромагнитный импульс, напряженность электрического поля которого пропорциональна производной от импульса напряжения (тока) на входе антенны.

Импульс электромагнитной волны, возбужденный антенной в свободном пространстве, падает на отражатель. Это может быть, например, параболический отражатель зеркальной антенны. На поверхности отражателя индуцируются поверхностные токи, в результате чего, в свободное пространство в направлении радиолокационной цели излучается импульс электромагнитной волны. Форма импульса электромагнитной волны, излучаемая антенной СКИ РЛС пропорциональна уже второй производной от импульса напряжения на входе антенны РЛС.

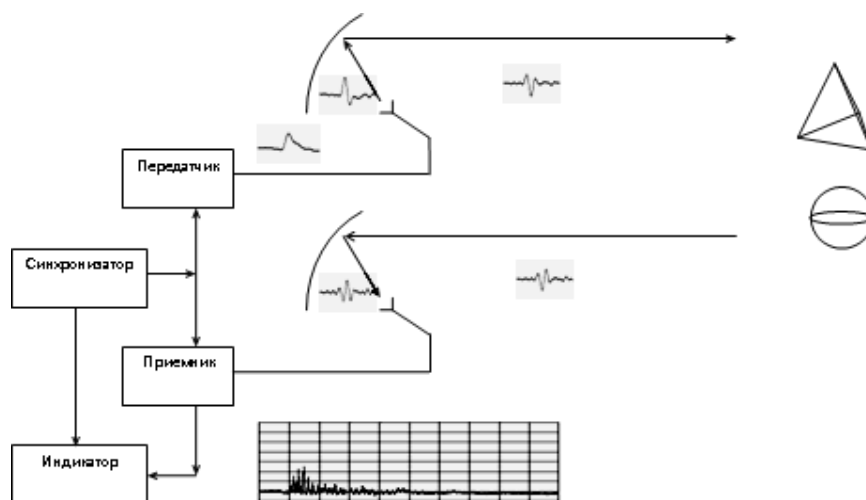


Рис. 1. Особенности функционирования СКИ РЛС

Если проследить путь распространения импульса электромагнитной волны далее, то окажется, что на входе приемного устройства возникает импульс напряжения как отклик от цели, а форма импульса пропорциональна  $n$ -й производной от импульса напряжения, вырабатываемого генератором СКИ.

Типовая форма импульса, вырабатываемая генератором СКИ, приведена на рис. 2.

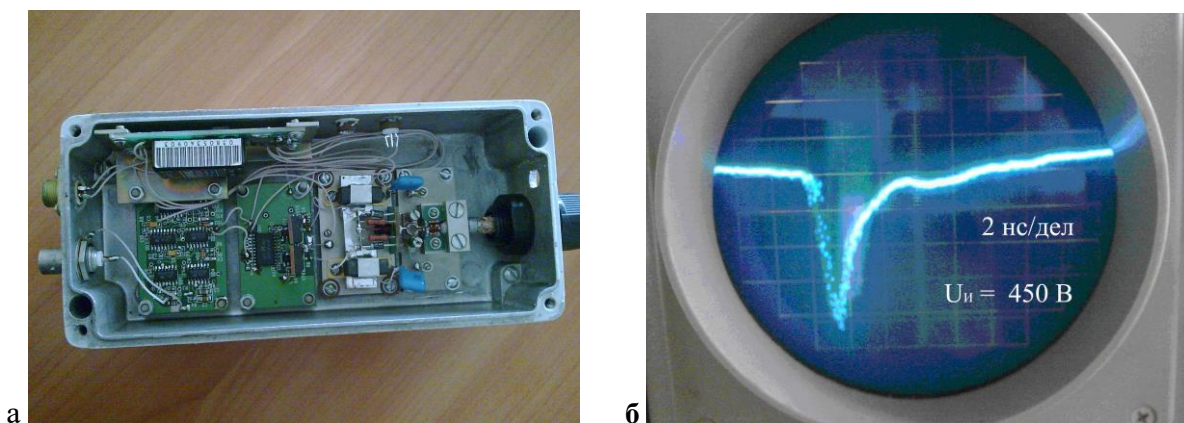


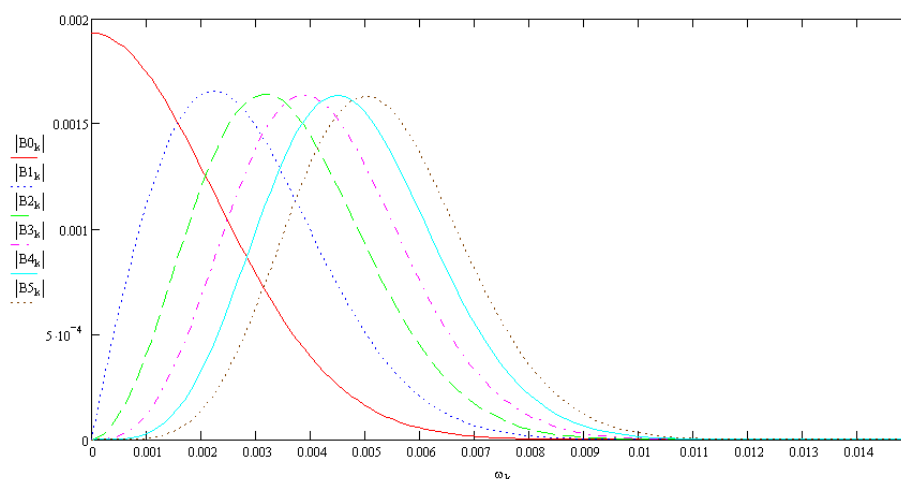
Рис. 2. Конструкция и форма импульса, вырабатываемая генератором СКИ

Длительность переднего фронта видеоимпульса составляет величину 0.6 нс. Задний фронт видеоимпульса более пологий, его длительность может превышать величину 2 нс. Спектр частот видеоимпульса охватывает диапазон до 800 МГц. Поэтому для эффективного излучения электромагнитного импульса можно выбрать диапазон дециметровых волн, например, в спектре частот излучения электромагнитного импульса 400-800 МГц. Таким образом, СКИ РЛС относятся к сверхширокополосным системам, использующие сигналы, для которых мера широкополосности находится в пределах  $0,25 \leq \beta \leq 1$ .

$$\beta = \frac{(f_{\max} - f_{\min})}{(f_{\max} + f_{\min})} \quad (1)$$

По мере распространения электромагнитного импульса в свободном пространстве и его отражения, как от цели, так и от элементов конструкции отражателей передающей и приемной антенн, импульс электромагнитного поля смещается в область высоких частот (рис. 3). Смещение спектра частот в высокочастотную область позволяет выбрать приемные антенны несколько уменьшенных размеров, что дает возможность уменьшить шаг

расположения приемных элементов антенной решетки СКИ и уменьшить уровень дифракционных лепестков.



**Рис.3. Производные моноимпульса Гаусса**

### **Антенная система СКИ РЛС.**

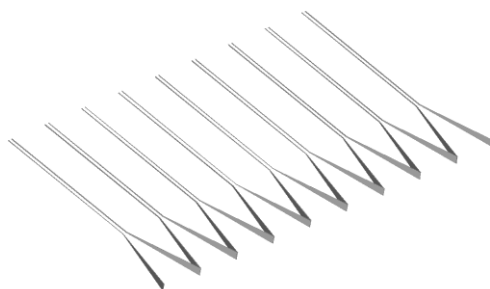
Антенная система СКИ РЛС может быть выполнена как в виде одиночных сверхширокополосных излучателей [2], зеркальных параболических антенн со сверхширокополосными облучателями, так и в виде антенных решеток.

Антенные решетки сверхширокополосных излучателей – наиболее перспективный вид антенных систем СКИ РЛС. Они позволяют сформировать достаточно узкие диаграммы направленности антенны, как на излучение, так и на прием. Для электронного сканирования диаграммой направленности антенной решетки достаточно ввести прогрессивную задержку запуска генераторов СКИ, подключенных каждый к своему излучателю. Возможно электронное сканирование диаграммой направленности антенной решетки на прием.

Для СКИ РЛС важна пространственная и временная локализация излучаемых антенной сигналов, для чего при расчете диаграмм направленности антенн следует использовать ее пространственно-временные характеристики.

На рис. 4 приведена модель 9-элементной антенной решетки, составленной из ТЕМ рупоров.

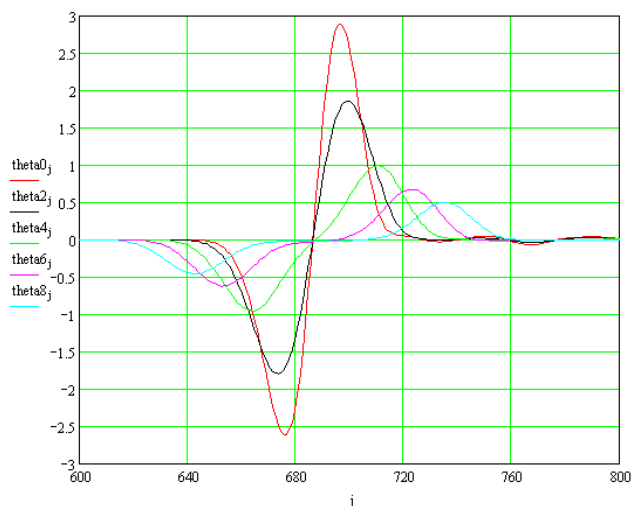
Расчет характеристик излучения такой антенной решетки производился с помощью пакета программ XFDTD v.6.0. Предполагалось, что каждый элемент антенной решетки возбуждался униполярным гауссовым импульсом длительностью 100 нс. Размер раскрыва одиночного элемента составляет 170 мм, размер раскрыва 9-элементной антенной решетки – 1530 мм.



**Рис.4. Модель импульсной 9-элементной антенной решетки**

На рис. 5 представлена форма импульсов, излучаемых антенной решеткой, в зависимости от угла наблюдения  $\theta$ .

При  $\theta = 0$  наблюдается максимум излученного антенной поля. Форма импульса поля соответствует первой производной от возбуждающего гауссова импульса. При отклонении угла наблюдения от нормали к поверхности антенной решетки амплитуда поля быстро уменьшается, появляются два локальных максимума.



**Рис. 5. Импульс напряженности электрического поля, создаваемого антенной решеткой при  $\theta = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$**

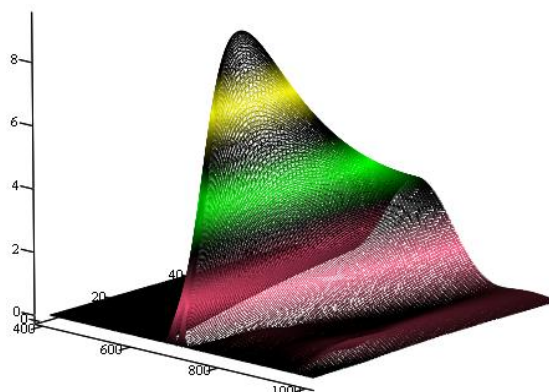
Для анализа направленных свойств антенной решетки, возбуждаемой СКИ, в качестве модели излучаемого сигнала целесообразно использовать вейвлет Морле.

$$I(t) = I_0 e^{i\omega t} e^{-\frac{t^2}{2p^2}},$$

где  $\omega$  - частота заполнения,

$p$  - коэффициент, задающий длительность огибающей.

Форма импульса напряженности электрического поля, излучаемого антенной решеткой, может быть аппроксимирована вейвлетом Морле. Анализ направленных свойств импульсной антенной решетки сопровождается дискретным вейвлет-преобразованием импульсов напряженности электрического поля, излучаемых антенной в некотором секторе углов наблюдения.



**Рис. 6. Модуль пространственно-временного вейвлет-спектра импульсного сигнала, излучаемого антенной решеткой в направлении  $\theta = 0^\circ$**

На рис. 6 представлен модуль пространственно-временного вейвлет-спектра импульсного сигнала, излучаемого антенной решеткой в направлении  $\theta = 0^\circ$ . Этот модуль вычислен для материнского вейвлета Морле вида:

$$Wavelet_{j,s} = \frac{1}{\sqrt{d \cdot s}} \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \exp\left[i \frac{2(j-N)}{d \cdot s}\right] \exp\left[-\frac{(j-N)^2}{2(d \cdot s)^2}\right] \quad (1)$$

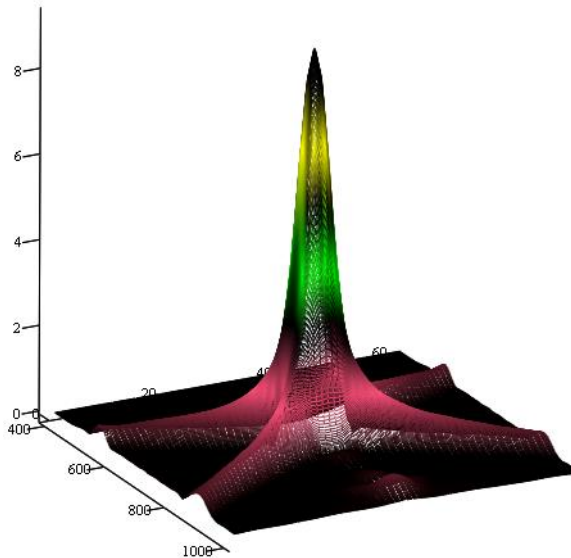
где  $j$  – индекс времени,

$s$  – индекс масштаба,

$d$  – масштабный коэффициент ( $d = 1$ ),

$N$  – половина объема входного вектора.

Вейвлет-спектр импульса напряженности электрического поля, излучаемого антенной решеткой в направлении  $\theta = 0^\circ$ , имеет максимальное значение при некотором индексе масштаба ( $s = 20$ ). На рис. 7 для этого индекса масштаба  $s = 20$  приведена пространственно-временная диаграмма направленности антенной решетки



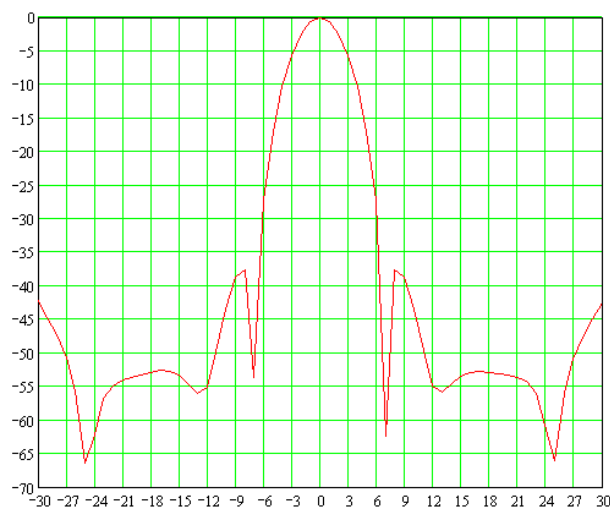
**Рис.7. Пространственно-временная диаграмма направленности антенной решетки**

Как следует из рис. 7, антенная решетка обладает ярко выраженными направленными свойствами. Импульс напряженности поля, формируемого антенной решеткой, имеет максимум в направлении  $\theta = 0^\circ$  и этот максимум существует только тогда, когда существует сам импульс. При отклонении точки наблюдения от нормали на диаграмме направленности наблюдаются пространственно-временные образования – «усы», обусловленные локальными максимумами.

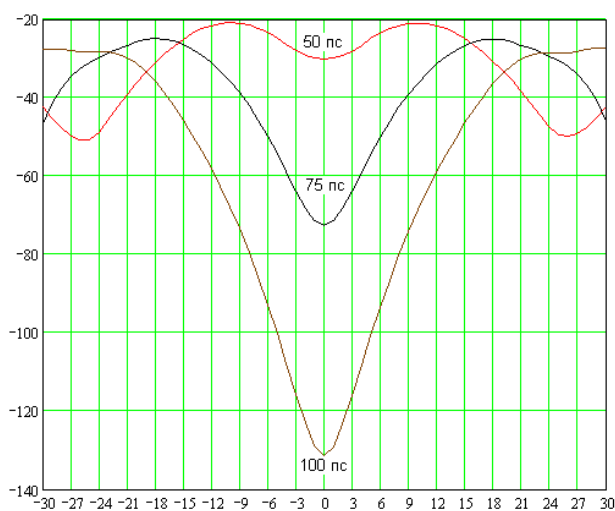
На рис. 8 представлены сечения пространственно-временной диаграммы направленности для индекса времени  $j = 686$  и индекса масштаба  $s = 20$ . На рисунке хорошо видны боковые лепестки антенной решетки на уровне  $-37$  дБ. Ширина ДН импульсной антенной решетки составляет  $2\Delta\theta_{0.5} = 6^\circ$ .

Однако, на рис. 8 можно увидеть лишь уровень боковых лепестков в момент максимума диаграммы направленности. Если сместиться по временной шкале, можно увидеть уровень усов в различные моменты времени (рис. 9). Их уровень значительно превышает тот, который приведен на рис. 8. Таким образом, уровень усов может достигать значения в  $-20$  дБ.

Для снижения уровня усов, можно применить традиционный способ аподизации поля по краям раскрыва, например, косинус на пьедестале.



**Рис.8. Сечение пространственно-временной ДН антенной решетки во временной момент максимума**



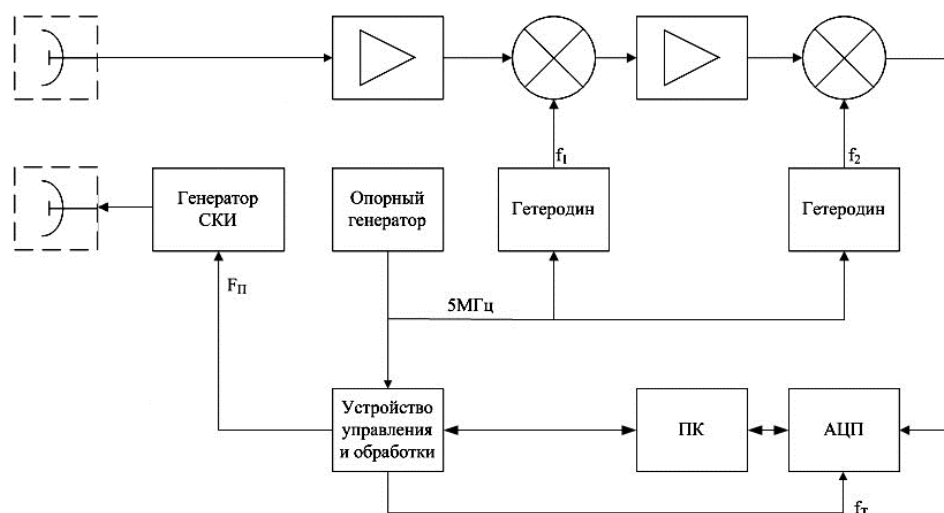
**Рис. 9. Сечение пространственно-временной ДН антенной решетки со сдвигом по времени от максимума на 50, 75 и 100 нс**

### **Архитектура тракта приемного устройства СКИ РЛС.**

Особенности архитектуры тракта приемного устройства СКИ РЛС заключаются в малом уровне амплитуд и широкой полосе спектра частот отраженных сигналов, поступающих на вход приемника. Широкополосный усилитель с большим коэффициентом усиления для приема отраженных сигналов может быть склонен к самовозбуждению. Низкий коэффициент усиления приемника повлечет за собой увеличение амплитуды зондирующего сигнала передатчика, увеличение средней мощности излучения и пр. Поэтому представляется целесообразным распределить усиление по промежуточным частотам приемного тракта:

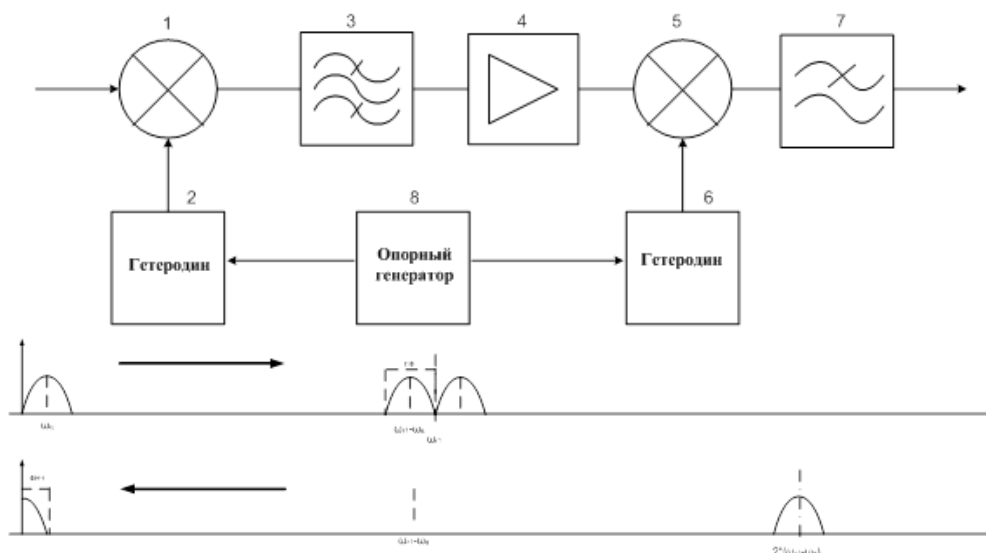
- предварительное усиление маломощными усилителями первого каскада;
- основное усиление на 1-й ПЧ, которая лежит в области высоких частот там, где приемный сигнал СКИ становится просто широкополосным;
- квадратурная обработка и нормирование сигнала для аналого-цифровых преобразований на 2-й ПЧ.

На рис.10 приведена структурная схема СКИ РЛС с инфрадинным приемником для усиления сверхширокополосного сигнала [3].



**Рис. 10. Структурная схема инфраинного тракта СКИ РЛС**

Схема инфраинного преобразования СКИ сигнала в приемном устройстве приведена на рис. 11. в приемном устройстве СКИ РЛС.



**Рис. 11. Перенос спектров частот при инфраинном преобразовании**

В приемном устройстве СШП сигнал, принимаемый антенной, предварительно усиливается в рабочей полосе частот и затем поступает на первый смеситель 1, на второй вход которого поступает сигнал первого гетеродина 2. Первый смеситель переносит спектр частот отраженного сигнала в область частотного диапазона, где сигнал по определению является просто широкополосным. ШП сигнал усиливается усилителем промежуточной частоты 4, ограничивается одной боковой полосой частот и поступает на вход второго смесителя 5. На второй вход смесителя 5 подается сигнал второго гетеродина 6. Обратный перенос частот спектра производится на частоте гетеродина соответствующей центральной частоте спектра принимаемого сигнала. Таким образом, частоты гетеродинов 2 и 6 не совпадают, а отличаются на некоторую величину, соответствующую максимуму частотного спектра, отраженного СШП сигнала. На выходе второго смесителя включен фильтр, ограничивающий полосу частот сигнала, поступающего на выход.

При инфраинном преобразовании СКИ сигналов важно обеспечить обратный перенос спектра сигнала СКИ в нуль частот. Для этого частота второго гетеродина выбирается не

равной частоте первого. В результате на выходе приемного устройства появится видеоимпульсный сигнал. Видеоимпульсный сигнал с выхода приемника получается знакопеременным и соответствует одной из квадратур комплексного сигнала, отраженного целью. Для получения второй квадратуры фаза сигнала второго гетеродина может быть сдвинута на угол  $\pi/2$ .

Собственно, вторая квадратура может быть получена в одноканальном приемнике, как сдвигом фазы второго гетеродина, так и сдвигом фазы первого, а также может быть получена временным сдвигом момента запуска генератора СКИ на величину  $\Delta t$ .

В СКИ РЛС возможно выполнить как с параллельную квадратурную обработку сигналов, так и последовательную. Параллельная квадратурная обработка сигналов с одной стороны увеличивает быстродействие, но с другой – ведет к усложнению приемного тракта СКИ РЛС, квадратурные каналы которого должны быть идентичными и иметь стабильные во времени характеристики. Не менее сложно выполнить калибровку квадратурных каналов и периодический контроль параметров в процессе эксплуатации. Последовательный прием квадратурных составляющих позволяет ограничиться одним приемным каналом.

Возможность последовательного приема квадратурных компонент зондирующих сигналов СКИ РЛС заложена в механизме формирования и излучения антенной СКИ сигнала, взаимная фаза спектральных компонент которого не меняется от момента формирования, а меняется только их начальная фаза. В схеме последовательного излучения СКИ момент формирования и излучения управляется прецизионным устройством регулируемой временной задержки, которым определяется точность формирования квадратурных компонент сигнала на прием.

Другой способ приема квадратурных компонент сигнала заключается в специальном выборе частот первого и второго гетеродинов, тактовой частоты АЦП и частоты повторения зондирующих импульсов. При правильном выборе указанных частот после каждого излучения зондирующего импульса в буферную память АЦП последовательно записываются квадратурные компоненты сигналов. Причем записываются полные квадратурные компоненты:  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ . При последующей обработке производится череспериодное вычитание квадратурных компонент с противоположным знаком, вычисляется модуль и фаза принятого сигнала.

Инфраничное преобразование принимаемых сигналов СКИ РЛС в квадратурных каналах приемного устройства непосредственно в область нулевых частот сохраняет возможность при необходимости восстановить исходный сигнал, поступающий на вход приемника РЛС.

### **Постобработка и отображение информации в СКИ РЛС.**

Наличие квадратурных компонент на выходе приемника предоставляет возможности гибкой и разнообразной постобработки радиолокационных данных СКИ РЛС.

Программное обеспечение дает возможность отдельным модулям построить архитектуру канала обработки информации. К квадратурным каналам модуля АЦП возможно подключение модулей накопления информации строки дальности, модуля вычисления огибающей сигнала, распределения/деления сигналов между модулями отображения индикатора типа А или индикатора типа В (рис 12).



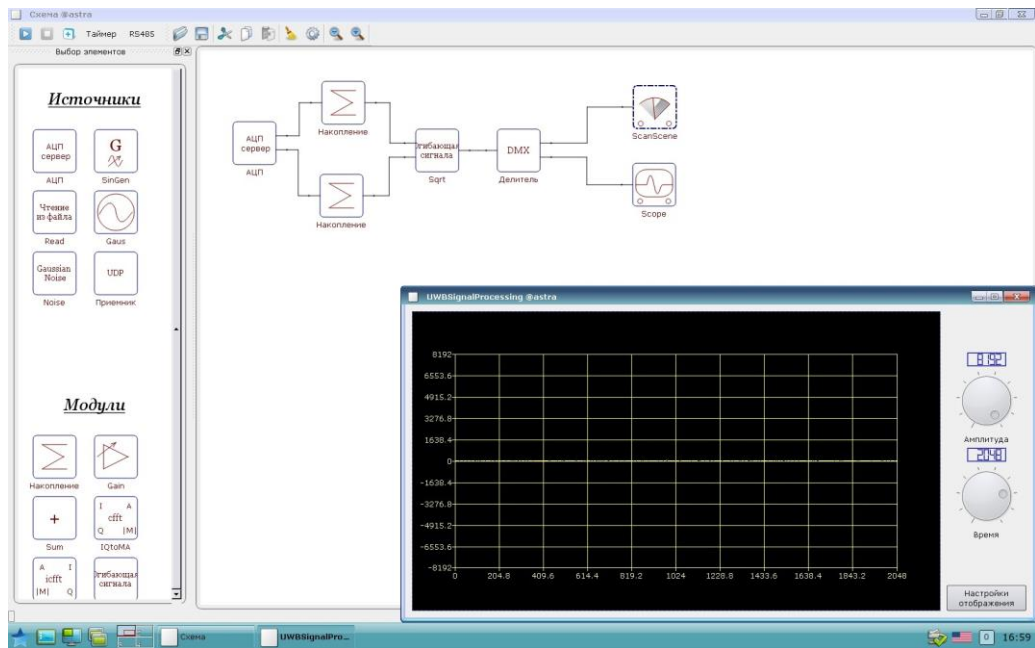


Рис. 12. Вид экрана отображения информации устройства обработки СКИ РЛС

Перечень модулей для подключения в тракт обработки включает:

- модуль накопления информации по квадратурным каналам АЦП;
- модуль дополнительного усиления в канале обработки;
- модуль вычисления огибающей сигнала;
- модуль квадратичного детектора (возведение в квадрат);
- модуль спектральной обработки;
- модуль восстановления исходного сигнала;
- и другие.

### Экспериментальные исследования характеристик СКИ РЛС.

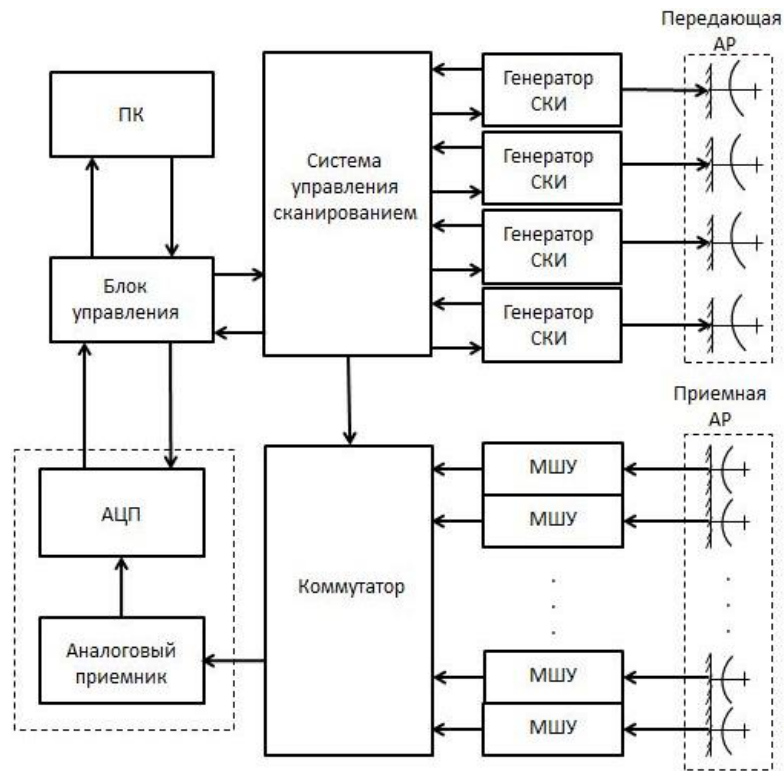
Схема СКИ РЛС с электрическим сканированием луча представлена на рис. 13 [4].

Антенная система СКИ РЛС представлена 4-х элементной передающей антенной решеткой и 8-ти элементной приемной антенной решеткой. В качестве элементов антенной решетки выбраны СКИ излучатели линейной вертикальной поляризации [1].

Излучатели передающей антенной решетки подключены к выходам генераторов СКИ. Вход генераторов СКИ подключен к системе управления сканированием и задержки запуска генератора СКИ. Генератор СКИ имеет выход обратной связи для контроля момента формирования СКИ на выходе генератора.

Электрическое сканирование диаграммы направленности передающей и приемной антенной решетки осуществляется во временной области. В этом случае каждый излучающий элемент передающей антенной решетки возбуждается своим генератором СКИ, а перемещение луча передающей антенной решетки в свободном пространстве производится посредством введения прогрессивной временной задержки запуска генераторов СКИ.

Система управления сканированием обеспечивает шаг временной задержки запуска генераторов СКИ 25 пс. Элементы антенной решетки размещены на расстоянии 600 мм, шаг электронного перемещения луча в свободном пространстве  $1.43^\circ$ .



**Рис. 13. Блок-схема СКИ РЛС с электрическим сканированием луча**

На рис. 14 приведена фотография мобильной экспериментальной лаборатории (МЭЛ) с размещенной на ней аппаратуры СКИ РЛС.

Антенная система МЭЛ СКИ представлена передающими и приемными антеннами для излучения сверхкоротких импульсов.

Передающие и приемные антенны обеспечивают режим электронного сканирования луча и установлены на поворотной мачте с механическим вращением. Механическим вращением всей антенной системы выбирается сектор для электронного сканирования СКИ РЛС.



**Рис. 14. Мобильная экспериментальная лаборатория СКИ РЛС**

## Напряженность электрического поля зондирующего электромагнитного импульса.

На рис. 15 приведена установка для измерения характеристик электромагнитного поля и импульс напряженности электромагнитного поля, возбуждаемый передающей 4-х элементной антенной решеткой.

В состав установки для измерения характеристик входят: датчик напряженности электрического поля ИППЛ-Л-Н41, измерительный осциллограф, лазерный дальномер. Датчик напряженности электрического поля ИППЛ-Л-Н41 разработки ВНИИОФИ аттестован и имеет временное окно для проведения измерений величиной 9 нс.

Полоса частот, занимаемая радиоимпульсом напряженности электрического поля, составляет величину от 200 до 600 МГц. Таким образом, отношение верхней и нижней границы частот спектра радиоимпульса составляет величину, полностью соответствующей критерию СШП сигнала:

$$\frac{f_B - f_H}{f_B + f_H} = \frac{1}{2}$$

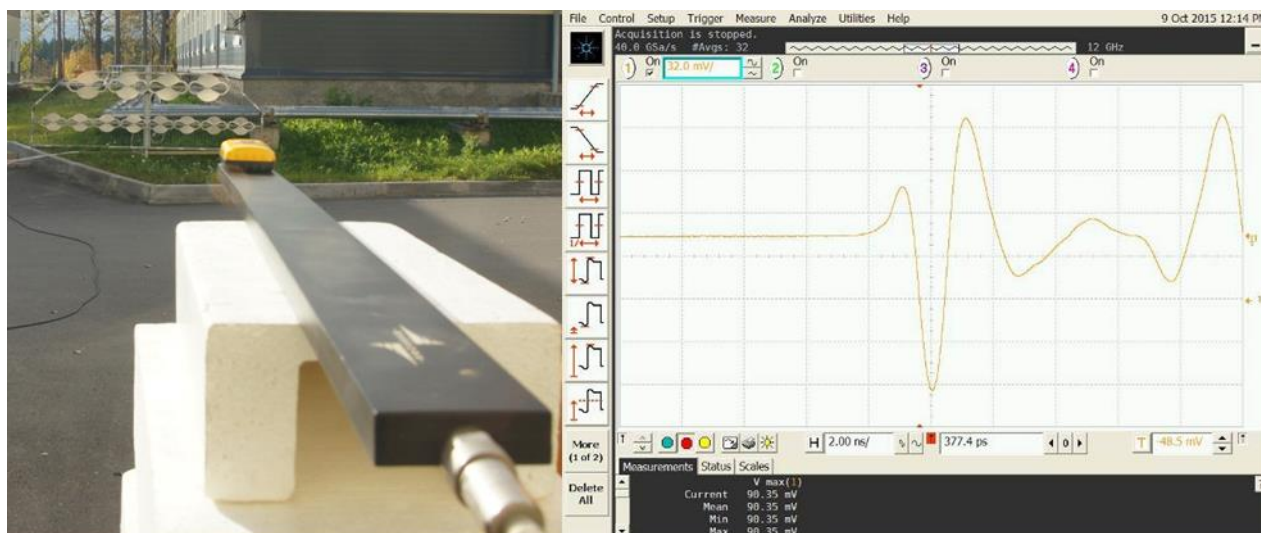


Рис. 15. Измерение параметров зондирующего электромагнитного сигнала

Электрическое сканирование луча в приемной антенной решетке поясняется на рис. 16.

Положение коммутатора синхронизировано с начальной задержкой фронта волны излучения передающей антенной решеткой таким образом, что радиолокационные сигналы поступают в переключаемые приемные элементы с заданного направления синхронно.

Аналоговый приемник СКИ РЛС построен по схеме, предложенной в [2], и подключен к приемной антенной решетке через коммутатор. Квадратурный выход аналогового приемника подключен к двухканальному аналого-цифровому преобразователю (АЦП). Частота дискретизации АЦП составляет величину 500 МГц.

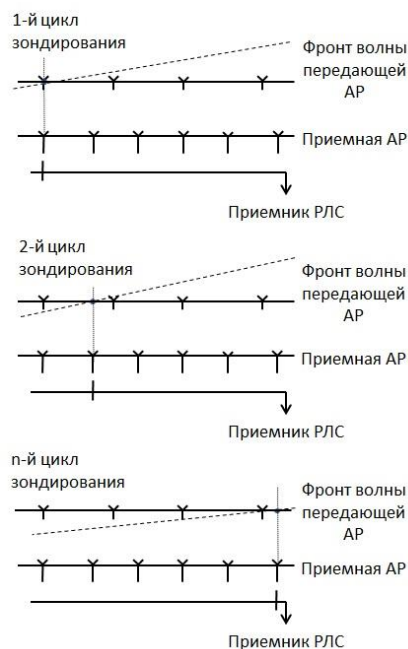
Из АЦП цифровой поток данных радиолокационного зондирования поступает через блок управления на персональный компьютер (ПК).

Программа управления и обработки данных выставляет фронт волны излучения передающей антенной решеткой на заданный угол, формирует электрическую задержку фронта волны передающей антенной решеткой относительно положения коммутатора приемной антенной решетки, производит накопление радиолокационной информации и синтезирование апертуры приемной антенной решетки в заданном направлении.

Коммутатор поочередно подключает приемные элементы антенной решетки к приемнику РЛС. В ПК производится накопление и запоминание зондирующих радиолокационных сигналов. По окончании цикла коммутации в ПК производится

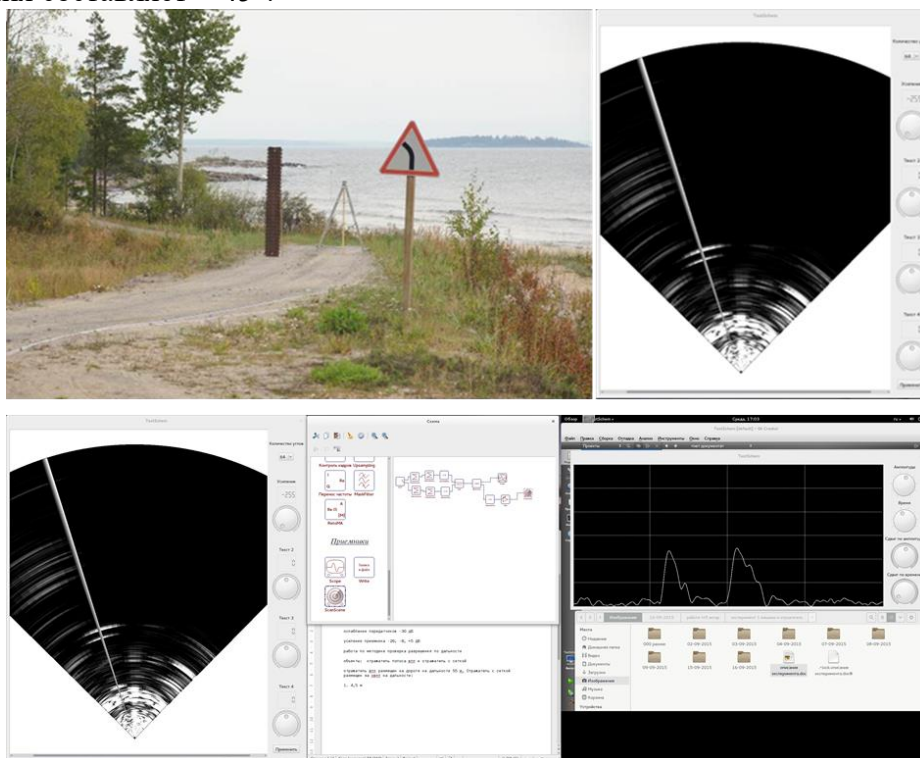
суммирование запомненных отсчетов и отображение радиолокационной информации с заданного направления.

Обработка информации СКИ РЛС производится в ОС Linux. Программное обеспечение ведет прием радиолокационной информации от АЦП по Ethernet-каналу, производит математическую обработку квадратурных каналов приемного устройства, выдает необходимую информацию для отображения на дисплее оператора.



**Рис. 16. Электрическое сканирование луча в приемной антенной решетке**

На рис. 17 и рис. 18 приведено радиолокационное изображение местности, полученное при электрическом сканировании луча передающей антенной решеткой. Сектор сканирования составляет  $\pm 45^\circ$ .



**Рис. 17. Радиолокационное изображение контрольной мишенной обстановки. (масштаб развертки радиолокационного изображения 150 м)**

На рис. 18 отчетливо видны отражения от контрольной мишенной обстановки и отражения радиолокационного сигнала, обусловленные рассеянием электромагнитных волн на одиночных стволах деревьев и рельефа местности.

Контрольная мишенная обстановка представлена знаком, установленным на металлическом столбе высотой 2 м, металлической полосой размером 0.6 х 3.0 м., и сетчатым отражателем, установленным на треноге. Все три элемента уверенно различаются: до знака – 30 м, до полосы – 53 м, до сетчатого отражателя – 57 м. На экране отчетливо видны отметки от полосы и сетчатого отражателя, расстояние между которыми составляет 4 м.

Уровень отражений от стволов деревьев при вертикальной поляризации излучения и приема СКИ сигналов практически сопоставим с отражениями от металлических отражателей.

На рис. 18 приведено радиолокационное изображение местности при работе по острову, находящемуся в озере на удалении около 2 км. Поверхность острова – гранит, покрыт растительностью – лес смешанного типа с преобладанием хвойных пород. Обозначены контуры острова и небольшого залива на нем.

Угловое разрешение СКИ РЛС недостаточно для детализации центров рассеяния мишенной обстановки, расположенной на большом удалении.



**Рис.18. Радиолокационное изображение местности СКИ РЛС: острова.  
(масштаб развертки радиолокационного изображения 600 м)**

### **Экспериментальные исследования водной поверхности**

Подводная радиолокация – это относительно новое направление радиолокации, имеющей целью обнаружить объекты, которые способны рассеивать радиоволны в среде с высоким значением диэлектрической проницаемости и проводимости. Несмотря на небольшую дальность действия при работе под водой, такие системы могут иметь практическое применение при обследовании неглубоких водоемов и акваторий. Радиоволны, сформированные СКИ генераторами способны проникать на небольшую глубину водоемов и отражаться от находящихся на глубине предметов

Для натурального эксперимента по обнаружению металлического отражателя в воде выбран регион Ладожского озера. На берегу имеется деревянный пирс длиной 15 м. На краю пирса расстояние от поверхности воды до дна составляет 3 м. В качестве металлического отражателя использовалась сварная алюминиевая рама, на которую закреплена металлическая сварная сетка с ячейей 50 х 50 мм. Размеры отражателя: 0.8 х 1.55 м.

Схема натурального эксперимента с использованием СКИ РЛС приведена на рис. 19.

В соответствии с условиями эксперимента на поверхности воды располагаются передающая и приемная антенны СКИ, которые подключены кабелем L1 и L2 к приемно-передающей аппаратуре СКИ РЛС.

По условиям натурального эксперимента передатчик связан с антенной достаточно длинным кабелем ( $L1 = 100\text{м.}$ ). Кабелем такой же длины связана с комплексом СКИ РЛС и приемная антенна ( $L2 = 100\text{м.}$ ). Суммарные потери на кабеле связи составили 29 дБ.

Кроме того, существенные потери имели место из-за рассогласования антенн, находящихся в воде с высоким значением диэлектрической проницаемости, так как каких-либо специальных мер по согласованию передающей и приемной антенн и изоляции от воды точек питания антенн не предпринималось и оценка потерь из-за рассогласования антенн, находящихся в воде, не производилась.

На рис. 20 приведены фотографии антенн и отражателя перед погружением на дно.

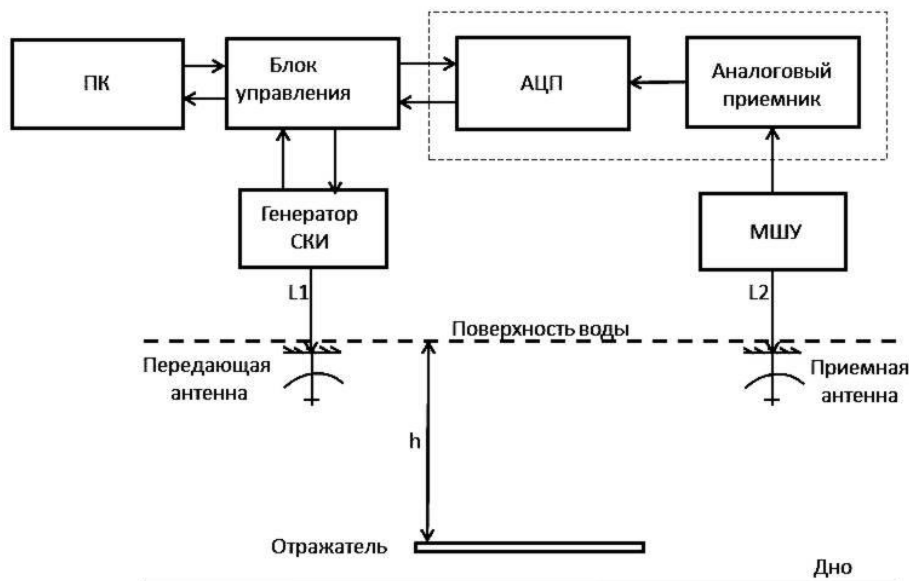


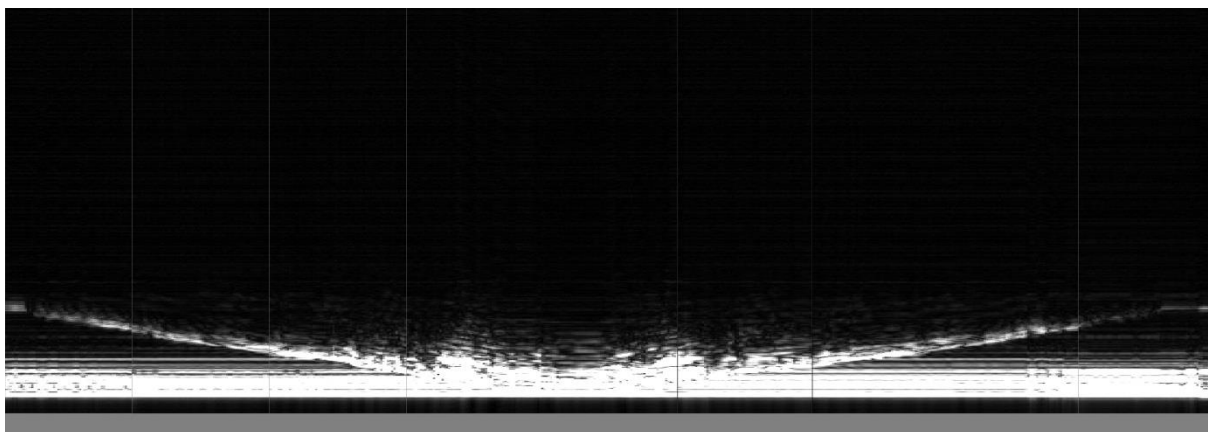
Рис. 19. Схема натурального эксперимента радиолокационного зондирования



Рис. 20. Антенны СКИ РЛС и отражатель в воде

В процессе эксперимента отражатель плавно опускался в глубину на дно водоема, а затем плавно поднимался. Результаты радиолокационного зондирования отображались на экране дисплея.

На рис. 21 показаны результаты радиолокационного зондирования СКИ РЛС. Металлический отражатель уверенно обнаруживается на глубине 3-х метров.



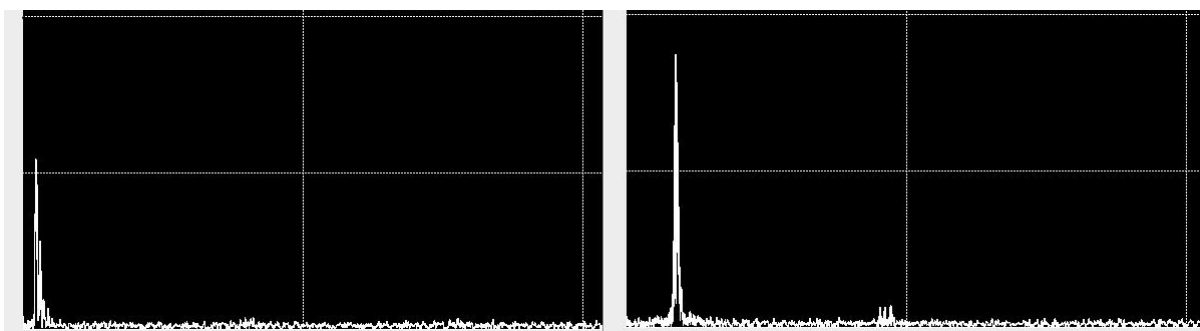
**Рис. 20. Результаты радиолокационного зондирования в воде**

При перемещении отражателя из глубины к поверхности воды (середина графика рис. 3) наблюдаются сильные переотражения импульсов электромагнитной волны от границы раздела вода-воздух и собственно металлическим отражателем.

На рис. 21 показаны осциллограммы электромагнитного импульса, когда антенны находятся в воздухе и в воде. Расстояние между антеннами 5 м.

На рис. 22 показаны условия эксперимента по определению времени задержки прихода радиоимпульса, когда антенны СКИ находятся в воде и в воздухе.

Как видно из рис. 21 электромагнитный импульс после прохождения в воде не разрушается. Более того, его амплитуда несколько увеличивается за счет лучшего согласования малых антенн, находящихся в среде с высокой диэлектрической проницаемостью.



**Рис. 21. Прохождение электромагнитного импульса в воздухе и в воде**

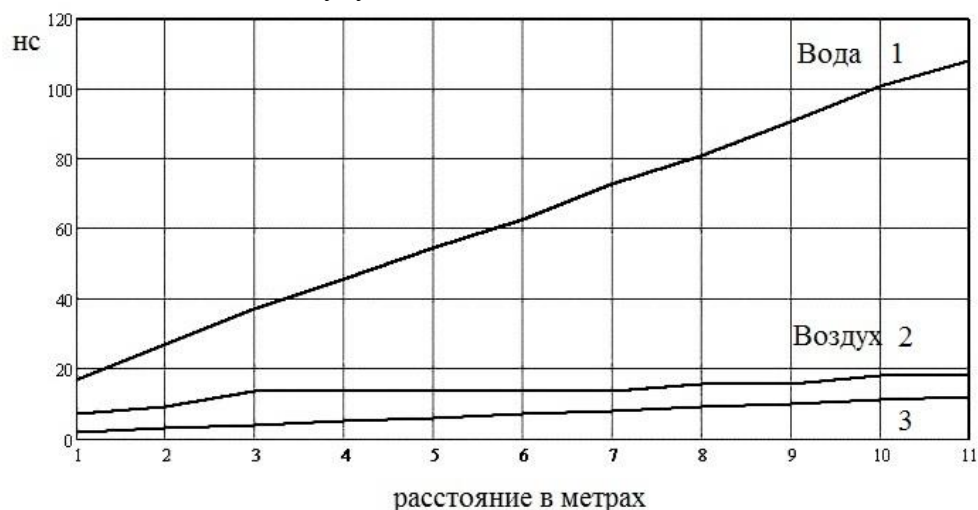


**Рис. 22. Определение задержки времени прихода электромагнитного импульса**

На рис. 23 приведены результаты измерений задержки прохождения радиоимпульса в воде и воздухе. По мере увеличения расстояния между передающей и приемной антеннами СКИ в воде существенно увеличивается задержка времени прихода радиоимпульса (1).

Задержка времени прихода радиоимпульса в воздухе показана (2), линия (3) показывает теоретическую задержку времени прихода радиоимпульса в воздухе без учета начального сдвига.

Для каждого значения расстояния между передающей и приемной антеннами СКИ производилось измерение времени прихода электромагнитного импульса как перед погружением антенн СКИ в воздух, так и в воду при их погружении. При известной теоретической задержке сигнала СКИ в воздухе и при известном расстоянии между антеннами производилось вычисление коэффициента замедления прохождения сигнала СКИ в воде по отношению к воздуху.



**Рис. 23. Задержка прохождения радиоимпульса в воде (1) и воздухе (2,3) в зависимости от расстояния между передающей и приемной антеннами СКИ РЛС**

Коэффициент замедления времени прохождения радиоимпульса от передающей антенны к приемной оказался равным 9.094. Это соответствует значению диэлектрической проницаемости среды (вода, пресная) равному 82,7.

Экспериментальные исследования по радиолокационному зондированию природных сред и водной среды в частности показали интересные результаты по формированию и распространению электромагнитной волны в водной среде.

Практическая СКИ радиолокация природных сред показывает возможность обнаружения радиолокационно-контрастных предметов во всем диапазоне дальностей от малого радиуса действия и далее.

Экспериментальные данные подтверждают возможность СКИ 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. Антенные системы для подводной радиолокации должны учитывать особенности распространения электромагнитных волн как в электрически плотной среде, так и на границе раздела.

### Литература

1. Справочник по радиолокации/ Под ред. М.И. Сколника. Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Книга 2. – М.: Техносфера. 2014
2. Кочетов А.В. Антенна для излучения сверхкоротких импульсов // Труды российского научно-технического общества электроники и связи имени А. С. Попова. Серия: акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. Выпуск VI. - М.: 2013. С. 151-153.



3. Патент РФ, Н03F3/189. Устройство для усиления сверхширокополосного сигнала./ В.А. Сарычев, И.М. Хомяков, И.Г. Анцев, Г.В. Анцев, М.В. Головачев, А.В. Кочетов, П.С. Панфилов, О.С. Миронов. - № 2497270; Заявлено 05.05.2012; Опублик. 27.10.2013.
4. Анцев Г.В., Бондаренко А.В., Головачев М.В., Кочетов А.В., Лукашов К.Г., Миронов О.С., Панфилов П.С., Парусов В.А., Райский В.Л., Сарычев В.А. Экспериментальные исследования характеристик СКИ РЛС // VI Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. – Муром: Изд.- полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016.
5. 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.