

Поляризационная обработка сигналов радиолокатора подповерхностного зондирования

Г.В. Анцев, А.В. Кочетов, К.Г. Лукашов, П.С. Панфилов.

ОАО «НПП «Радар ммс»

Санкт-Петербург, Новосельковская, 37, radar@radar-mms.com.

Рассмотрены вопросы поляризационной обработки сигналов радиолокатора подповерхностного зондирования с использованием сверхкороткоимпульсных антенн круговой поляризации. Использование на прием двух идентичных СКИ антенн круговой поляризации, расположенных относительно друга под углом 90° , позволяет применить взаимное преобразование Гильберта сигналов приемных антенн. По результатам электромагнитного моделирования показано, что применение трех взаимно-ортогональных СКИ антенн круговой поляризации позволяет рассчитать характеристики пространственно-временной радарограммы в радиолокаторах подповерхностного зондирования.

В современных радиолокаторах подповерхностного зондирования в качестве излучающих и приемных антенн на практике используются антенны линейной поляризации. Антенны круговой поляризации для излучения и приема сверхкоротких импульсов в радиолокаторах подповерхностного зондирования, как правило, не применялись, ввиду сложностей формирования сверхширокополосных сигналов круговой поляризации электромагнитных волн при возбуждении антенн сверхкороткими импульсами (СКИ).

В [1] приведено описание плоской антенны, которая при ее возбуждении СКИ формирует короткоимпульсную электромагнитную волну круговой поляризации левого или правого вращения. Показано, что направление вращения вектора напряженности электромагнитного поля зависит от направления “закрутки” и ориентации антенны в пространстве. Таким образом, с одной стороны в направлении нормали к плоскости антенны излучается электромагнитная волна круговой поляризации левого вращения, а в противоположном направлении – электромагнитная волна круговой поляризации правого вращения.

Для использования преимуществ поляризационной обработки сигналов [2] в радиолокаторах подповерхностного зондирования следует использовать три антенны круговой поляризации для излучения и приема СКИ (рис.1). Антенна 1 является излучающей (или приемной), антенны 2 и 3 являются приемными (или излучающими).

На рис. 1. Показана схема проведения расчетного эксперимента, полученного посредством электродинамического моделирования в среде XFDTD. В качестве цели выбран радиолокационный отражатель типа диск.

Известно [2], что для достижения максимального сигнала на выходе антенн 2 и 3 антенна 1 должна быть согласована по поляризационному базису антеннам 2 и 3 с учетом характеристик цели. Например, для отражателя типа диск, если антенна 1 излучает электромагнитную волну круговой поляризации левого вращения, то антенны 2 и 3 должны быть настроены на прием электромагнитной волны правого вращения.



Рис. 1. Схема проведения расчетного эксперимента с применением антенн круговой поляризации.

На рис. 1. показано, что антенны 2 и 3 развернуты относительно друг друга на 90° . Для монохроматического сигнала разворот антенн круговой поляризации на некоторый угол в пространстве приводит к изменению на тот же угол взаимного фазового сдвига принимаемых или излучаемых сигналов.

При развороте в пространстве двух СКИ антенн круговой поляризации на 90° сигналы на выходе антенн взаимно связаны, с точностью до знака, преобразованием Гильберта. Сигнал на выходе антенны 3 соответствует преобразованию Гильберта от сигнала антенны 2 и наоборот. Для антенн, формирующих круговую поляризацию электромагнитного поля при возбуждении СКИ, разворот в пространстве относительно оси линии визирования цели приводит к соответствующему фазовому сдвигу спектральных компонент принимаемого или излучаемого сигналов. При этом полоса спектра частот, занимаемая СКИ сигналом, определяется сквозной частотной характеристикой радиолокационного канала: передающая антенна СКИ – среда распространения радиоволн – цель – среда распространения радиоволн – приемная антенна СКИ.

Блок-схема обработки сигналов приемных антенн 2 и 3 приведена на рис. 2. Сигналы с выходов антенн 2 и 3 поступают на один из входов смесителей $Cm1 - Cm4$. На второй вход смесителей поступают сигналы с выходов антенн 2 и 3 прошедших через схему преобразования Гильберта, которая, в частности, может быть реализована математически в процессе постобработки принятых сигналов. Выходы смесителей нагружены на суммарно-разностную схему $A1$ и $A2$, на выходе которой получают сигналы суммы или разности сигналов смесителей $Cm1 - Cm4$.

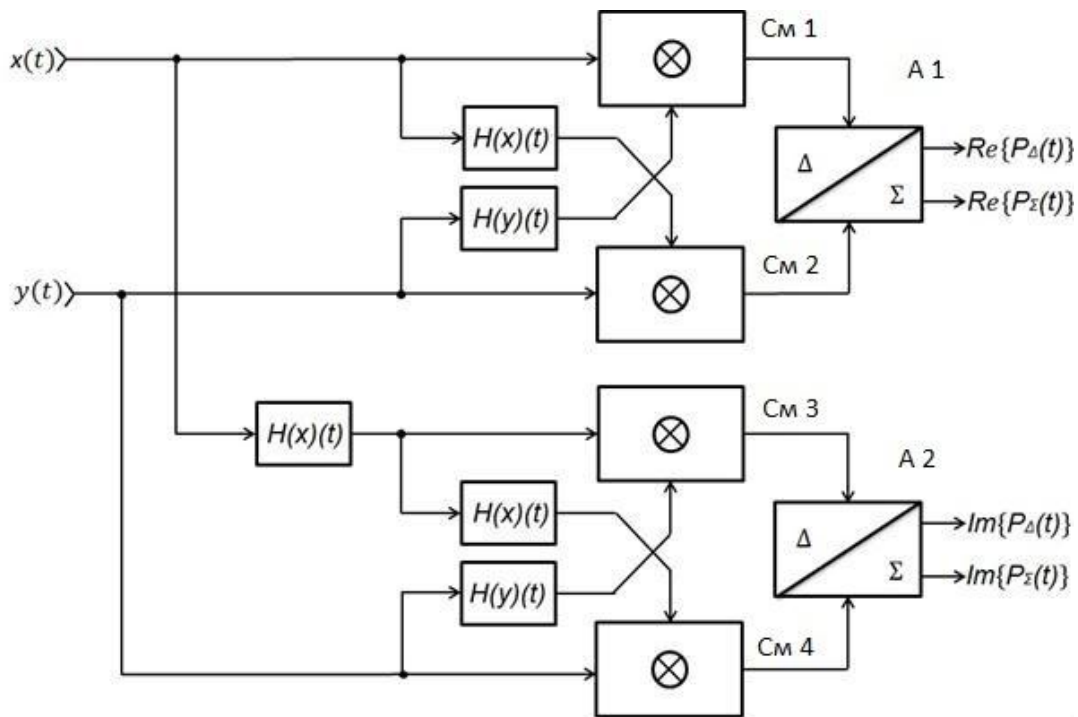


Рис. 2. Блок-схема квадратурной поляризационной обработки сигналов подповерхностного радиолокатора.

Такая схема обработки сигналов представляет собой идеальный квадратурный смеситель, в котором вместо квадратурного сдвига на монохромной частоте гетеродина, производится квадратурный сдвиг всех спектральных компонент сигналов, поступающих с выходов поляризованных антенн. При этом на выходе разностного канала появляется сигнал видеочастоты, спектр которого располагается вблизи нулевой частоты. На выходе же суммарного канала появляется сигнал радиочастоты, спектр которого располагается вблизи второй гармоники радиочастот сигналов, поступающих с выходов антенн.

Как видим из схемы на рис. 2 на верхней части схемы формируется действительная компонента преобразованного сигнала, а на нижней части схемы – мнимая компонента преобразованного сигнала, причем последняя получается предварительным преобразованием Гильберта (квадратурным сдвигом) сигнала с выхода от одной из антенн.

Антенны круговой поляризации, показанные на рис. 1 не являются идеальными. В области нижних и верхних частот спектра сигналов напряженности электрического поля, формируемого антеннами в дальней зоне, преобладает линейная поляризация вектора напряженности поля, круговая поляризация формируется в области средних частот излучаемого сигнала. Линейная поляризация является паразитной и ее желательно подавить соответствующей обработкой сигналов приемных антенн.

С учетом свойств преобразования Гильберта комплексный сигнал на выходе схемы поляризационной обработки подповерхностного радиолокатора можно записать в следующем виде.

Действительная компонента:

$$\text{Re}\{P\Delta(t)\} = y(t) \cdot H(x)(t) - x(t) \cdot H(y)(t) \quad (1)$$

$$\text{Re}\{P\Sigma(t)\} = y(t) \cdot H(x)(t) + x(t) \cdot H(y)(t) \quad (2)$$

мнимая компонента:

$$\text{Im}\{\rho\Delta(t)\} = -H(y)(t) \cdot x(t) + H(x)(t) \cdot y(t) \quad (3)$$

$$\text{Re}\{\rho\Sigma(t)\} = y(t) \cdot H(x)(t) + x(t) \cdot H(y)(t) , \quad (4)$$

где: $x(t)$ – сигнал на выходе 2-й антенны;
 $y(t)$ – сигнал на выходе 3-й антенны.

Исследуя выражение (1), можно показать, что если спектральные компоненты сигналов на выходе антенн 2 и 3 связаны между собой преобразованием Гильберта, то мощность сигнала на выходе схемы поляризационной обработки возрастает и соответствует значению мощности сигнала принимаемого по двум взаимно-ортогональным каналам. В частности, для монохроматического сигнала при идентичности антенн 2 и 3 выражение (1) равно значению мощности принимаемого сигнала. Если СКИ сигналы на выходе антенн 2 и 3 приходят в разные моменты времени, или в одном из каналов присутствует помеха, или сигналы в ортогональных каналах не связаны преобразованием Гильберта, то сигнал на выходе схемы поляризационной обработки уменьшается или полностью отсутствует. Это свойство выражения (1) можно использовать в целях пространственно-временной фильтрации СКИ сигналов подповерхностного радиолокатора.

Сигналы суммарного и разностного каналов на выходе смесителя (рис. 2) могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Отрицательное значение говорит о том, что сигналы антенн 2 и 3 поступают на вход схемы поляризационной обработки с временным сдвигом в “противофазе” (по аналогии с гармоническим сигналом). Если сигналы антенн 2 и 3 поступают на вход в “квадратуре” – выражение (1) обращается в нуль. Таким образом, сигналы на выходе схемы соответствуют одной из компонент квадратурной обработки сигналов по Гильберту. Для получения второй компоненты квадратурной обработки необходимо произвести предварительно преобразование Гильберта над одним из сигналов, например, $x(t)$.

На рис. 3. и рис. 4. приведены радарограммы радиолокатора подповерхностного зондирования, посредством обработки сигналов сканирования цели в среде MathCad. Радарограммы получены при математическом моделировании возбуждения, распространения и приема электромагнитных волн в среде XFDTD. Передающая антенна возбуждалась биполярным гауссовым импульсом длительностью 1 нс. Размеры передающей и приемных антенн были идентичными и составляли величину 400x500 мм. Расстояние между антеннами – 500 мм. Радиолокационный отражатель типа диск перемещался перед антеннами на расстоянии 1500 мм. Шаг перемещения составлял 50 мм.

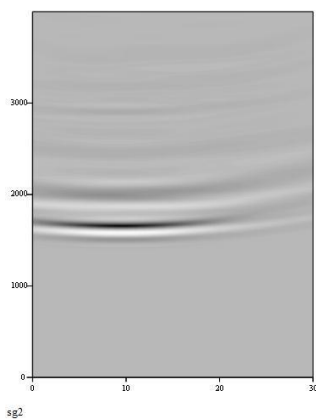


Рис. 3. Радарограмма сигналов снимаемых с антенны 2.

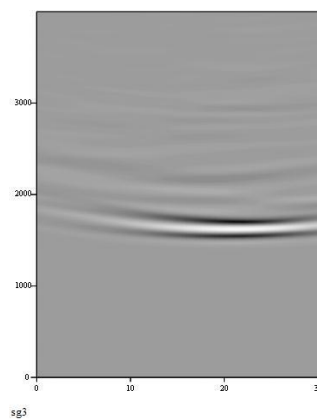


Рис. 4. Радарограмма сигналов снимаемых с антенны 3.

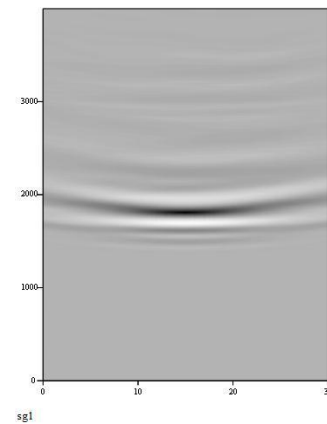


Рис. 5. Радарограмма сигналов, снимаемых с антенны 1.

Как видно на рис. 3 и рис.4 наблюдается временной квадратурный сдвиг СКИ сигналов, принимаемых антеннами 2 и 3.

Для сравнения на рис.5 приведена радарограмма сигнала с выхода антенны 1, которая ортогональна поляризации базису антенн 2 и 3. Видно, что сначала наблюдается поляризационное подавление сигнала от поверхности диска, однако затем следует сильный сигнал, обусловленный различными факторами взаимодействия падающей СКИ электромагнитной волны с элементарным отражателем. Этими факторами могут быть резонансные явления, паразитные составляющие поляризации падающей волны и др.

На рис. 6 приведена радарограмма сигнала $\text{Re}\{P(t)\}$ на выходе схемы поляризационной обработки в соответствии с (1) и (2), а на рис. 7 приведена радарограмма сигнала $\text{Im}\{P(t)\}$ в соответствии с выражением (3) и (4). Сигнал с выхода схемы поляризационной обработки получается не смещенным, четко локализованным, с существенным превышением уровня сигнала, отраженного целью, над фоновым сигналом помех. Функции $\text{Re}\{P(t)\}$ и $\text{Im}\{P(t)\}$ имеют лепестковый характер, положение “нулей” которой зависит от расстояния между приемными антеннами 2 и 3. Однако, там, где функция $\text{Re}\{P(t)\}$ имеет максимум, другая функция $\text{Im}\{P(t)\}$ имеет минимум и наоборот.

На рис. 8 приведена радарограмма модуля сигнала с выхода поляризационной схемы обработки, где

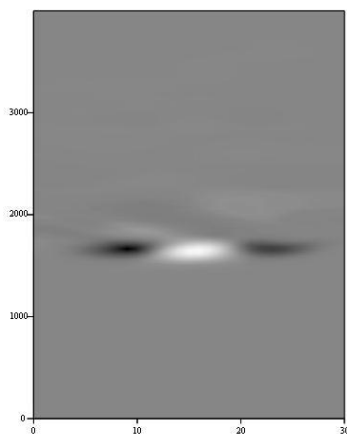


Рис. 6. Радарограмма сигнала $\text{Re}\{P(t)\}$.

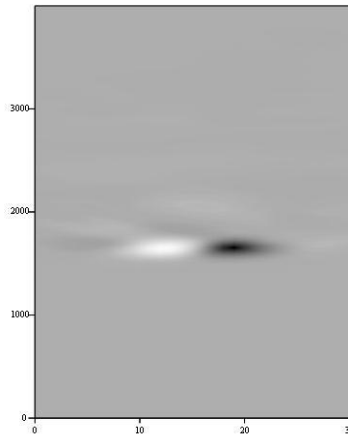


Рис. 7. Радарограмма сигнала $\text{Im}\{P(t)\}$.

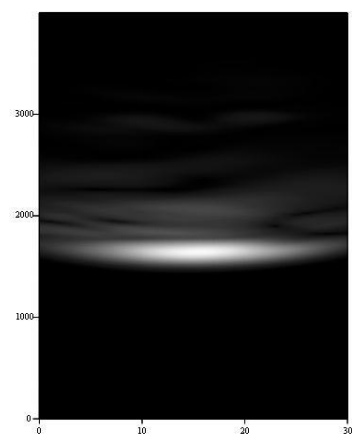


Рис. 8. Радарограмма сигнала $M\{P(t)\}$.

На рис. 9. и рис. 10. приведены графики изменения модуля сигнала с выхода схемы поляризационной обработки и фазы сигнала, рассчитанной как отношение мнимой части комплексного сигнала к его действительной части формула

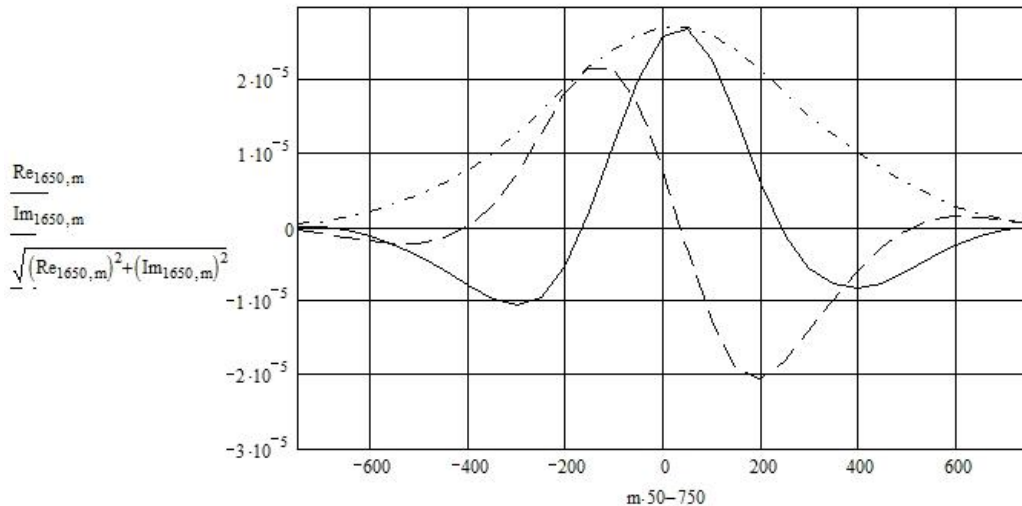


Рис.9. Сигналы с выхода схемы поляризационной обработки

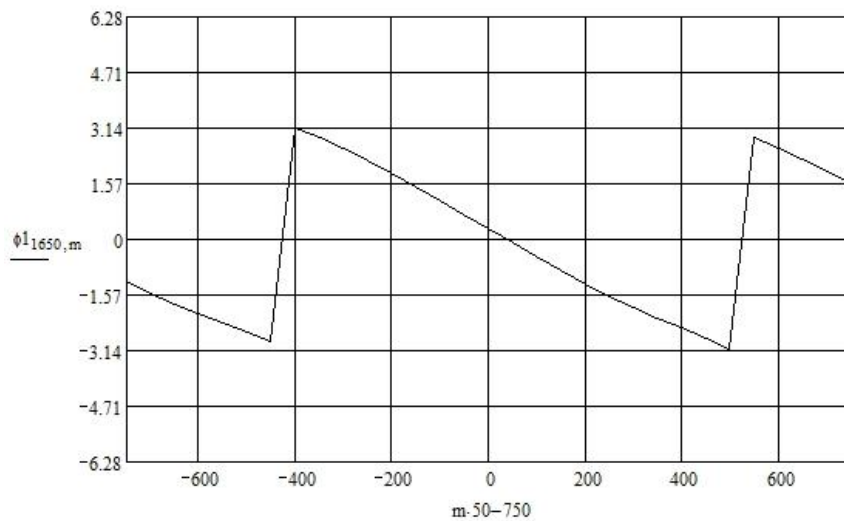


Рис.10. Фаза сигналов с выхода схемы поляризационной обработки

Таким образом, применение поляризованных антенн с использованием поляризационной схемы обработки СКИ сигналов позволяет существенно повысить отношение сигнал/помеха, произвести локализацию отраженных целью сигналов и построить качественную радарограмму сигналов радиолокатора подповерхностного зондирования. По значению фазы сигналов на выходе поляризационной схемы обработки можно указать точное угловое местоположение радиолокационной цели в пространстве относительно приемно-передающих антенн.

Литература

1. Кочетов А.В. Антенна круговой поляризации для излучения и приема сверхкоротких импульсов. (В настоящем сборнике)
2. Поляризация радиоволн. Поляризационная структура радиолокационных сигналов. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. - М.: Радиотехника, 2005. – 704с.