

Полнополяриметрическая обработка радиолокационных сигналов в сверхкороткоимпульсной РЛС

В.Е. Туров, А.Н. Кренев, Д.С. Погребной, Д.Ю. Вишняков

Рассмотрена реализация полнополяриметрической обработки радиолокационных сигналов в макете сверхкороткоимпульсной РЛС. Показана возможность повышения информативности РЛС в поляриметрическом режиме.

Ключевые слова: полнополяриметрическая обработка, сверхкороткоимпульсная РЛС, диаграмма обратного вторичного излучения.

Перспективное направление развития радиолокационной техники связано с применением процедур извлечения и использования некоординатной информации о радиолокационных объектах (РЛО), к которой относятся тип радиолокационной цели, принадлежность её к определённому классу, геометрия и размеры. Задача реконструкции параметров трёхмерных объектов по измерениям поля в радиодиапазоне [1] связана с классической задачей электродинамики – обратной задачей дифракции.

Для корректного решения обратной задачи рассеяния требуется большое количество приёмных пунктов, разнесённых в пространстве, и применение сверхширокополосных (СШП) зондирующих сигналов, близких по форме к дельта-функции.

На практике такие условия выполнить трудно. При решении указанной задачи можно опираться на тот факт, что изменение частоты зондирующего сигнала, вида поляризации облучающей РЛО волны и направления приёма отражённого сигнала меняет в пространстве наблюдаемое положение фазового центра сложного РЛО. Кроме того, целесообразно применить СШП зондирующий сигнал, в качестве которого можно взять сверхкороткий радиоимпульс.

Для получения дополнительной информации об РЛО предлагается использовать многоканальный полнополяриметрический радар с наносекундным зондирующим радиоимпульсом (РИ) [4]. Это позволит в каждом j -ом канале приёма получить набор дальностных радиолокационных портретов РЛО $x_{ij}(\tau)$ на i -ых частотах, составляющих спектр зондирующего РИ, отличающихся от портретов остальных каналов приёма параметрами, определяемыми пространственным разномом (базой) этих каналов. В результате совместной обработки всех $M = i \cdot j$ портретов получается результирующая (сглаженная) импульсная характеристика (РИХ) РЛО $Z(\varphi)$ с плотной областью определения в фазовом пространстве $\Delta\varphi$.

Для обеспечения полной поляриметрии в радиолокационной станции целесообразно использовать независимые антенны с ортогональными линейными поляризациями [4]. Использование двух антенн с разными поляризациями позволяет выяснить поляризационную структуру принимаемого сигнала и тем самым получить больше информации об импульсной характеристике цели. Для решения этих задач необходима информация о матрице рассеяния цели.

В рамках теории, описывающей матрицы рассеяния как матрицы отображения из одного линейного пространства векторов Джонса в другое, известны соотношения, позволяющие

оценить характеристики оператора рассеяния по данным поляризметрического радиолокатора с произвольными поляризациями антенн [5].

Основными геометрическими свойствами типовых целей РЛС, влияющими на поляризационные характеристики рассеяния, являются наличие или отсутствие осевой симметрии, а также наличие или отсутствие изломов поверхности [3].

Наиболее информативным (в смысле внутренней информативности) параметром при различении типовых целей РЛС является степень поляризационной анизотропии. Остальные поляризметрические параметры могут быть информативны при различении некоторых классов целей (со сложной и простой геометрией, с наличием и отсутствием осевой симметрии) при условии, что погрешности их измерения достаточно малы по сравнению с их средним значением.

Одно из преимуществ поляризметрической обработки заключается в том, что цель может быть обнаружена даже в сложной помеховой обстановке за счёт разницы поляризметрических свойств мешающих отражений и цели [2].

Рассмотренные положения позволили разработать и реализовать метод полнополяризметрической обработки радиолокационных сигналов в сверхкороткоимпульсной РЛС [4].

Полнополяризметрическая обработка радиолокационных сигналов в сверхкороткоимпульсной РЛС основана на возможности формирования когерентного сигнала длительностью несколько наносекунд, его излучения и приёма антеннами в ортогональных плоскостях поляризации. Реализована обработка на базе двухканальной РЛС, структурная схема которой представлена на рис. 1. В схеме приняты следующие обозначения:

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;

ПФ – полосовой фильтр;

ФНЧ – фильтр низких частот;

Р – разветвитель;

Σ – сумматор;

СЧ – синтезатор частот;

ОКГ – опорный кварцевый генератор.

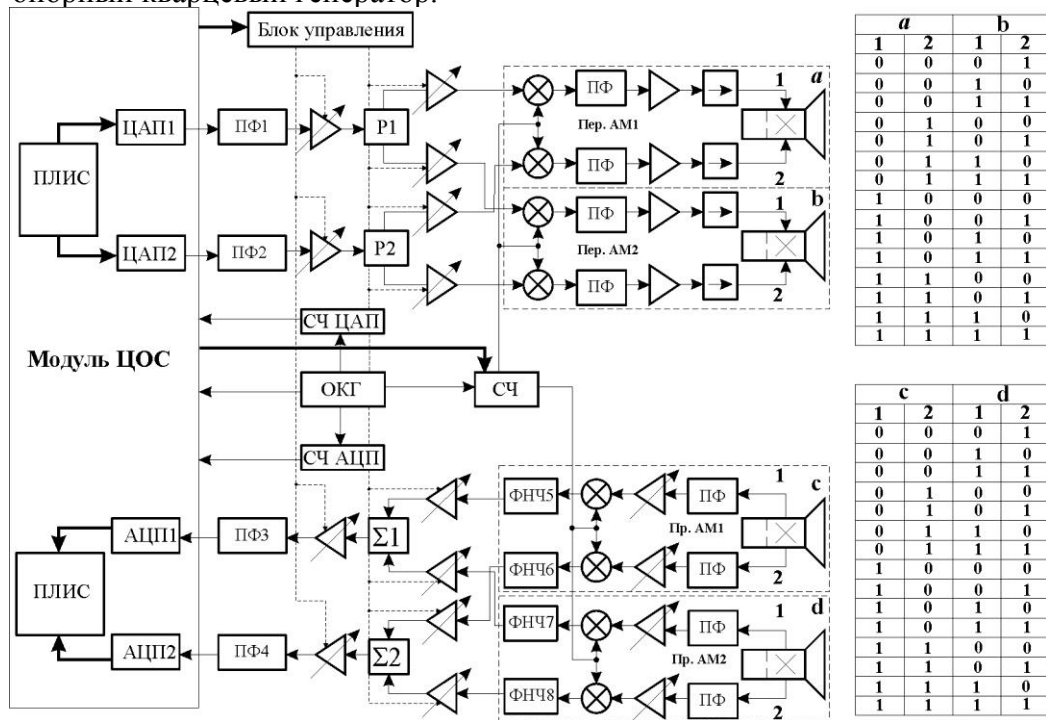


Рис. 1. Структурная схема аппаратной реализации двухканальной РЛС

Синтез и обработка радиосигналов осуществляется модулем цифровой обработки сигналов (ЦОС), состоящим из двух ПЛИС, двух АЦП и двух ЦАП. Путём коммутации ключей в

каждом из каналов РЛС имеется возможность выбора линейной вертикальной или линейной горизонтальной поляризации. Передающие и приёмные антенные модули совмещают функцию преобразования несущих частот, фильтрацию, усиления и приём/излучение радиосигналов. Формирование тактовых сигналов для модуля ЦОС, сигналов гетеродинов для передающих и приёмных антенных модулей от одного генератора (ОКГ) позволяет достичь высокой когерентности излучаемого и принимаемого сигналов.

Двухканальная РЛС (рис. 1) может работать в режиме формирования/обработки радиосигналов с линейной горизонтальной и вертикальной поляризацией. В таблицах (рис. 1) показаны варианты подключения антенн а, б, с, д в режимах вертикальной (1) и горизонтальной (2) поляризации. Формирование/обработка радиосигналов с линейной поляризацией осуществляется во второй зоне Найквиста. Сигналы ЦАП представимы в виде:

$$S_{\theta}(t) = P(\theta) \cdot A_{\theta} \cdot [\sigma(t - kT_u) - \sigma(t - kT_u - \tau_u)] \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_{\theta}^{uu}(t))$$

$$P(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

где:

- $P(\theta)$ – коммутационный множитель, определяет пространственное положение вектора поляризации ($\theta = 0$ – соответствует сигналу с линейной горизонтальной плоскостью поляризации, формируется 1-ым ЦАП);
- $\theta = \frac{\pi}{2}$ – соответствует сигналу с линейной вертикальной плоскостью поляризации, формируется 2-ым ЦАП);
- T_u, τ_u – период и длительность радиоимпульса;
- $\varphi_{\theta}^{uu}(t)$ – фазовый шум сигналов первого и второго ЦАП, определяет нестабильность фазы формируемых сигналов.

На рис. 2 изображён спектр сигнала одной из поляризационных компонент. В качестве примера использовались следующие значения: несущая частота сигнала 740 МГц, длительность импульса 3 нс.

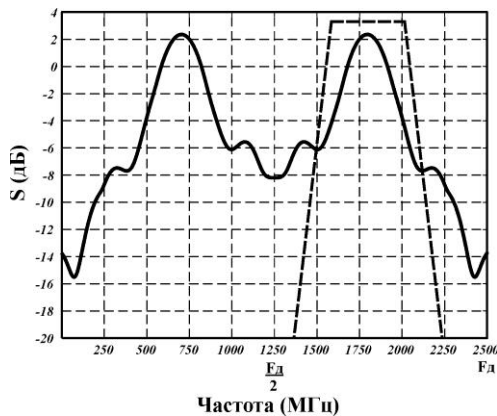


Рис.2. Спектр сигнала $S_0(t)$

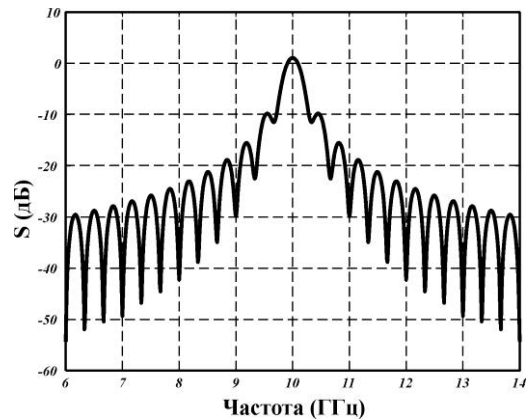


Рис.3. Спектр сигнала $\hat{S}_0(t)$

После преобразования и фильтрации сигналы двух поляризационных компонент имеют вид:

$$\hat{S}_{\theta}(t) \approx P(\theta) \cdot \hat{A}_{\theta} \cdot [\sigma(t - kT_u) - \sigma(t - kT_u - \tau_u)] \cdot \sin((\omega_0 + \omega_2) \cdot t + \varphi_{\theta}^{uu}(t) + \varphi_2^{uu}(t)), \quad (2)$$

где ω_2 – частота гетеродина (синтезатора частот), $\varphi_2^{uu}(t)$ – фазовый шум сигнала синтезатора частот, определяет нестабильность фазы сигнала гетеродина.

На рис. 3 изображён спектр сигнала одной из поляризационных компонент на несущей частоте 10 ГГц, длительность импульса 3 нс.

Применение сформированных сигналов в сверхкороткоимпульсной РЛС при ортогональных линейных режимах поляризации позволило получить снижение зависимости интенсивности эхо-сигнала объекта радиолокационного наблюдения от его ракурса при совместной обработке отражённых сигналов с различными поляризациями, что повышает информативность РЛС. На рис. 4 показана схема эксперимента по снятию диаграммы обратного вторичного излучения (ДОВИ) цилиндра (длина – 65 см, радиус – 16 см), выполненного из металлической сетки. На растровом изображении эхо-сигналов вращающегося цилиндра (рис. 5) в координатах дальность – угол поворота, показан строб дальности, выделяющий сигналы цилиндра, и построены ДОВИ при вертикальной, горизонтальной и ортогональной поляризации излучающих и принимающих антенн (рис. 6–8).

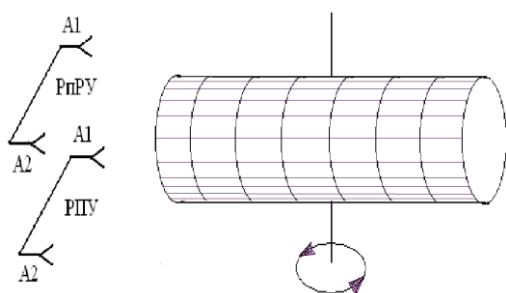


Рис.4. Расположение антенн и вращающегося цилиндра в ходе эксперимента

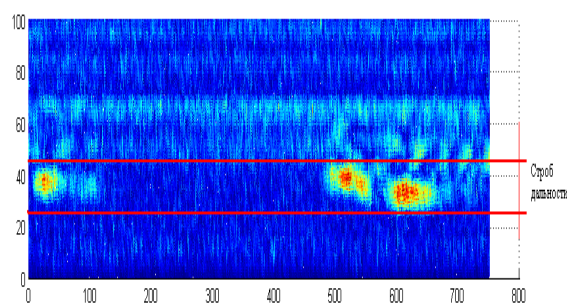


Рис.5. Растровое изображение эхо-сигналов вращающегося цилиндра

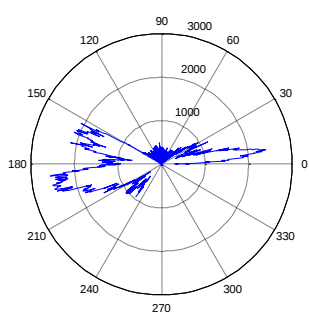


Рис.6. Диаграмма обратного вторичного излучения вращающегося цилиндра при вертикальной поляризации

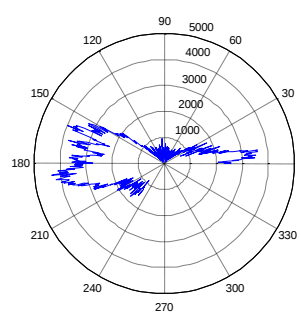


Рис.7. Диаграмма обратного вторичного излучения вращающегося цилиндра при горизонтальной поляризации

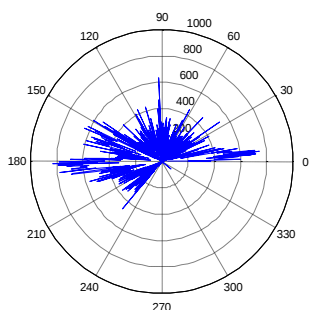


Рис.8. Диаграмма обратного вторичного излучения вращающегося цилиндра при ортогональной поляризации

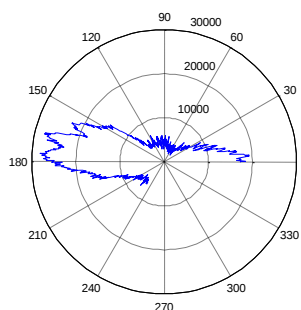


Рис.9. Результирующая диаграмма обратного вторичного излучения вращающегося цилиндра

Результирующая диаграмма обратного вторичного излучения вращающегося цилиндра (рис. 9), полученная на основе весовой обработки эхо-сигналов в полнополяризационном режиме, имеет заметно меньшую изрезанность (на 30 – 50 %).

Заключение

Разработанные метод и алгоритмы формирования и обработки когерентных сверхширокополосных сигналов реализованы в макете РЛС на базе современных цифровых технологий, что обеспечивает повышение информативности и помехозащищённости РЛС в поляриметрическом режиме.

Наличие в приёмопередающих системах общего высокостабильного задающего генератора и гетеродина обеспечивает «привязку» начальной фазы элементов поляризационного вектора рассеяния и когерентность обработки сигналов.

В результирующей ДОВИ наблюдается снижение изрезанности исходных ДОВИ на 30 – 50 %, что может обеспечить повышение устойчивости обнаружения и сопровождения маневрирующих радиолокационных объектов.

Макет РЛС обеспечивает возможность определения степени поляризационной анизотропии, что можно применить в алгоритмах обнаружения и распознавания целей с использованием поляриметрических данных РЛС.

Литература

1. *Зиновьев И.С.* Проблема реконструкции параметров трёхмерных объектов по радиолокационным измерениям. Электронный ресурс. Режим доступа <http://bsfp.media-security.ru/school9/22.htm>
2. Алгоритм обработки сигналов в антенной решётке. Э. В. Амнинов, Д. А. Хомяков, Р. Н. Акиншин // Журнал радиоэлектроники [Электронный ресурс]. – 2013. – № 4. – <http://jre.cplire.ru/alt/apr13/11/text.html#lit>
3. *Олюнин Н. Н.* Использование поляриметрических данных радиолокационных станций дальнего обнаружения для распознавания целей. Дисс. кандидат физ.-мат. наук, г. Москва, 2011.
4. *Кабачев Д.С., Погребной Д.С., Фасоляк Е.А., Туров В.Е., Зюзин А.В., Кренев А.Н.* Физическая модель широкополосной полнополяризметрической моноимпульсной радиолокационной станции с нефиксированной конфигурацией // Патент России № 139876. 2014. Патент России № 2122745.1998. Бюл. № 12.
5. *Jones, R.C.* A new calculus for the treatment of optical systems. IV. Experimental determination of the matrix / R.C. Jones // JOSA. – 1947. – V.37. – P.110-112.

Статья поступила в редакцию 23.03.2015

Туров Виктор Евгеньевич

д.т.н., профессор кафедры радиотехнических систем ЯрГУ, ведущий инженер научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150050, Ярославль, ул. Яковлевская, д. 14, кв. 20),
тел. 8(4852)72-51-53, e-mail: victorturov@gmail.com

Крнев Александр Николаевич

к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем ЯрГУ, ведущий научный сотрудник научной лаборатории ИТТ ЯрГУ, (150023, Ярославль, ул. Курчатова, д. 7, кв. 48),
тел. 8(4852)72-51-53, e-mail: krenev@uniyar.ac.ru

Погребной Дмитрий Сергеевич

младший научный сотрудник научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150010, Ярославль, ул. Звёздная, д. 9, кв. 12), тел. 8(4852)72-51-53, e-mail: dmitry.pogrebnoy@gmail.com

Вишняков Денис Юрьевич

к.т.н., инженер I категории научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150030, г. Ярославль, ул. Гоголя, д. 9, кв. 52), тел. 8(4852)72-51-53, e-mail: vishnyakovdenisu@yandex.ru

Full-polarimetric processing of signals in a supershort-pulse radar

Victor E. Turov, Alexander N. Krenev, Dmitry S. Pogrebnoy, Denis Yu. Vishnyakov

In this paper, advanced processing method of fully polarimetric radar signals is described. The method is implemented in supershort-pulse radar model. Possibility of increasing radar informativity is also shown.

Keywords: fully polarimetric processing, super-short-pulse radar, scattering pattern.