

УДК 621.396.96

В.А. Громов, А.С. Аникин

Оценка мгновенного угла эллиптичности сигналов РЛС кругового обзора на закрытой наземной трассе в X-диапазоне

Выполнен анализ мгновенных значений угла эллиптичности радиосигналов наземной РЛС кругового обзора, регистрируемых в наземном приемном пункте закрытой трассы. Приведены зависимости мгновенных значений угла эллиптичности от углового (азимутального) положения антенны РЛС и времени наблюдения. Построены плотности распределений углов эллиптичности для радиосигналов, излученных по основному и боковым лепесткам диаграммы направленности РЛС, а также для переотраженных сигналов. Результаты анализа могут быть применены при разработке способов и алгоритмов обнаружения, селекции радиосигналов по углу эллиптичности наземных РЛС кругового обзора, используемых при создании современных пассивных систем радиомониторинга и радиотехнической разведки.

Ключевые слова: поляризация радиолокационного сигнала, радиоимпульсный сигнал, РЛС кругового обзора, угол эллиптичности.

Современные разрабатываемые пассивные системы радиомониторинга способны обеспечить получение оперативной и достоверной информации о местоположении и параметрах радиосигналов источников радиоизлучения [1–3]. Среди широкого круга проблем, возникающих при разработке и создании пассивных систем радиомониторинга, ключевой является проблема обнаружения и селекции местоположения источников радиоизлучения. Обеспечение национальной безопасности страны во многом связано с наличием эффективных пассивных радиоэлектронных систем, именно поэтому улучшение их тактико-технических характеристик является актуальной проблемой. Современные пассивные системы радиомониторинга требуют применения антенн, способных вести прием сигнала любой поляризации [4]. В этих условиях особое значение приобретает решение задачи использования информации о состоянии поляризации принимаемых электромагнитных волн при оптимальной обработке векторных сигналов с неизвестной поляризацией для обнаружения и селекции радиосигналов. В статье выполнен анализ поляризационных искажений радиолокационных сигналов наземной РЛС кругового обзора, регистрируемых в приемном наземном пункте закрытой трассы протяженностью 19 км. Результаты могут быть применены при разработке способов и алгоритмов обнаружения, селекции радиосигналов по углу эллиптичности, используемых при создании современных систем радиомониторинга и радиотехнической разведки.

Постановка задачи. В плоской электромагнитной волне векторы электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей в каждый момент времени определенным образом ориентированы в пространстве. Кривые, описываемые с течением времени концами векторов полей в фиксированной точке пространства, могут иметь произвольный вид. Поляризация электромагнитной волны является ее пространственно-временной характеристикой и определяется видом траектории, описываемой концом вектора электрического \vec{E} или магнитного \vec{H} поля в фиксированной точке пространства [5].

Вектор электрического поля \vec{E} может быть разложен на горизонтальную и вертикальную компоненты E_x и E_y по ортогональным осям x и y , перпендикулярным направлению распространения электромагнитной волны. Для любой точки E_x и E_y меняются со временем. Например, для синусоидальной волны с частотой ω , $E_x = A \sin(\omega t)$ и $E_y = B \sin(\omega t + \delta)$, где t – время, δ – разность фаз, A и B – амплитуды E_x и E_y компонент. Когда компоненты E_x и E_y имеют разность фаз, равную 0, электрическое поле поляризовано линейно. Если компоненты E_x и E_y имеют одинаковые амплитуды A, B и разность фаз, равную 90 или 270°, говорят, что волна имеет круговую поляризацию. Если вектор \vec{E} обходит поляризационный эллипс по часовой стрелке (разность фаз положительная), то волна называется правополяризованной, если против часовой стрелки (разность фаз

отрицательная) – левополяризованной [5]. В общем случае $A \neq B$ и $\delta \neq 0$ волна имеет эллиптическую поляризацию (рис. 1).

Неэнергетическими параметрами полностью поляризованного сигнала являются угол ориентации θ и угол эллиптичности ε , связанные с ортогональными составляющими известными выражениями [6, 7]:

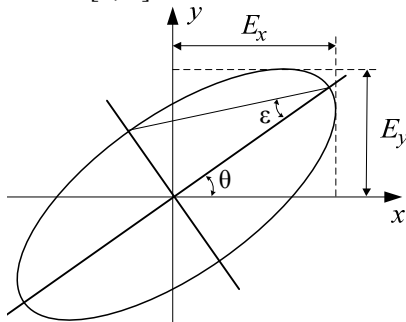


Рис. 1. Углы ориентации и эллиптичности

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2E_x E_y \cos(\delta)}{E_x^2 - E_y^2} \right), \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{2E_x E_y \sin(\delta)}{E_x^2 + E_y^2} \right), \quad (2)$$

где E_x , E_y и $\delta = \varphi_x - \varphi_y$ – соответственно ортогонально поляризованные компоненты и их разность фаз в линейном (декартовом) поляризационном базисе. На рис. 1 изображен поляризационный эллипс и показаны угол ориентации и эллиптичности.

Угол эллиптичности является поляризационным инвариантом относительно системы координат [8]. Он не зависит от ориентации системы координат передатчика по отношению к приемнику. По этой причине угол эллиптичности может быть использован для описания состояния поляризации радиоволны сигнала. Известно [9], что в реальных условиях значение угла эллиптичности радиосигнала зависит от ряда факторов, например, взаимного углового положения антенн источника и приемника, переотражений от местности. Таким образом, для разработки способов и алгоритмов обработки сигналов с заданными характеристиками необходимо знать, как изменяется угол эллиптичности радиосигнала в реальных условиях. Поэтому целью статьи являются оценка и анализ мгновенных углов эллиптичности, полученных из экспериментальных данных.

Описание эксперимента и аппаратуры. Антенная система РЛС содержит параболическую зеркальную антенну типа Кассегрена диаметром 1,1 м, с облучателем в виде прямоугольного волновода, излучающего линейно поляризованную волну (основная поляризация, условно назовем вертикальной). Ширина диаграммы направленности (ДН) по азимуту – 3° . Скорость сканирования по азимуту – 1 оборот антенны за 51 с (10^5 импульсов). Угловое разрешение сканирования – $0,0036^\circ$. РЛС излучает прямоугольный радиоимпульс длительностью – 300 нс, на несущей частоте – 9,2 ГГц, мощностью – 150 кВт, с периодом повторения – 500 мкс.

Антенная система приемника содержит две прямоугольные рупорные антенны, расположенные одна под другой; одна регистрирует сигнал вертикальной поляризации, вторая – горизонтальной (кррсовая поляризация). Ширина ДН по азимуту – 20° . Используется приемник с двойным переносом частот, первая промежуточная частота составляет 450 МГц, вторая – 0 МГц. Сигналы оцифровывают с частотой 92 МГц. Приемное устройство содержит квадратурный расщепитель. Для исключения превышения динамического диапазона аналого-цифрового преобразователя (АЦП) применяют устройство автоматической регулировки усиления. Ширина полосы пропускания приемника – 25 МГц. Длительность регистрируемого сигнала – 0,7 и 5,6 мкс (или 64 и 512 тактов АЦП). Сигналы с разной длительностью регистрации получают с интервалом времени между записями, поэтому значения величин для одинаковых угловых положений антенны и номеров отсчетов будут иметь различия. Результаты измерений записывались в память ЭВМ.

Эксперимент проводился летом на закрытой трассе протяженностью 19 км. Основные препятствия – лес и селения. Передающая позиция (РЛС) была расположена в открытой местности, поросшей луговой травой высотой до 0,25 м. Лес и редколесье (высотой до 27 м) относительно РЛС расположены: в направлении на приемник на удалении 400–1000 м, по обе стороны от направления на приемник в 100 м, сзади в 100–400 м. Препятствия на пути прямого распространения радиоволн представляют собой отдельные лесные массивы.

В процессе обработки результатов измерений по квадратурным составляющим восстанавливают огибающие, фазы и разность фаз сигналов. На рис. 2 приведены огибающие сигналов, зарегистрированные ортогональными по поляризации антеннами приемника для нулевого отворота антенны РЛС (далее – антенна), относительно приемника. Также показан идеальный импульс длительностью 300 нс.

Мгновенный угол эллиптичности по экспериментальным данным может быть вычислен по формуле (2) с учетом того, что

$$E_x = \sqrt{(E_{x\cos})^2 + (E_{x\sin})^2}, E_y = \sqrt{(E_{y\cos})^2 + (E_{y\sin})^2},$$

$$\sin(\delta) = \sin(\varphi_x - \varphi_y) = \sin(\arctg(E_{x\sin}/E_{x\cos}) - \arctg(E_{y\sin}/E_{y\cos})), \quad (3)$$

где E_{\cos} и E_{\sin} – квадратуры сигналов ортогональных компонент.

Результаты обработки экспериментальных данных. На рис. 3 приведен график мгновенных значений углов эллиптичности, вычисленных по отсчетам сигналов, изображенных на рис. 2. Экспериментальное оборудование позволяет на 1 импульс сигнала получать 30 отсчетов, т.е. позволяет получить внутреннюю структуру импульса. На рис. 3 углы эллиптичности импульса ограничены вертикальными пунктирными линиями. Вне регистрируемого импульса уровень сигнала низкий (особенно для кроссовой поляризации), поэтому динамический диапазон АЦП не позволяет выполнить квантование сигнала по уровню с высокой точностью. Данное обстоятельство приводит к тому, что углы эллиптичности, вычисленные вне импульса, будут иметь низкую точность, а их распределение будет отличаться от приведенного в статье [10]. В статье углы эллиптичности, вычисленные вне импульса (когда нет полезного сигнала), названы углами эллиптичности шума. Данное понятие условно, авторы не претендуют на точность понятия и понимают, что шум не имеет поляризации.

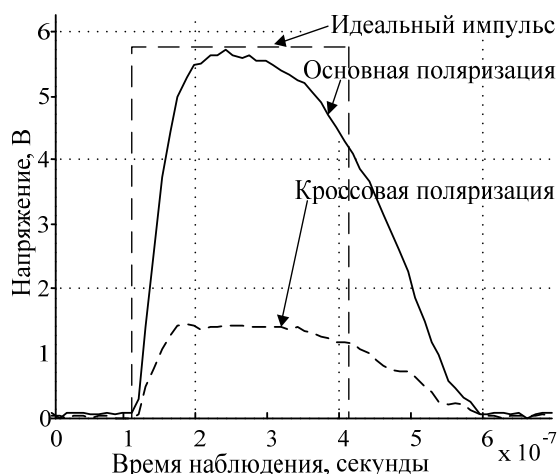


Рис. 2. Огибающие сигналов

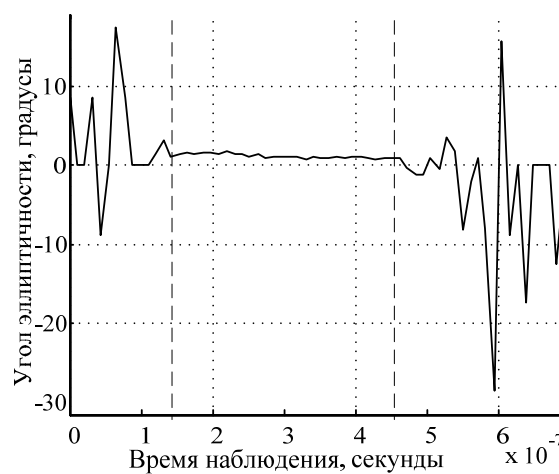


Рис. 3. Мгновенный угол эллиптичности

Трасса в эксперименте закрытая. Известно [11], что при рассеянии вперед (бистатический угол – 180°) радиоволна сохраняет свою номинальную поляризацию [12]. Антенна излучает линейнополяризованную волну, поэтому значения углов эллиптичности в пределах импульса должны быть равны 0° . Изображенные на графике значения находятся в интервале от 1 до $1,5^\circ$. Данное отклонение может быть отнесено к погрешности измерений.

На рис. 4 изображен набор огибающих сигналов длительностью 0,7 мкс основной поляризации за 1 оборот антенны. На рис. 5 изображен набор огибающих сигналов длительностью 5,6 мкс основной поляризации за 1 оборот антенны. На графиках показана зависимость уровня сигнала в дБ/мВ от углового положения РЛС. На рис. 5 кроме прямого сигнала (нулевой угол отворота) можно видеть переотраженные (задержанные по времени) импульсы сигналов.

По зарегистрированным сигналам РЛС возможно построить измеренную ДН антенны для основной и кроссовой поляризации, а также оценить угол эллиптичности. На рис. 6 приведены графики измеренных ДН антенны на основной и кроссовой поляризации (ось значений ординат слева), в секторе углов $\pm 10^\circ$. ДН построены по максимальным значениям напряжения в пределах длительности импульса. Также на рис. 6 приведен график измеренных углов эллиптичности для соответствующих значений ДН (ось значений ординат справа). На графике углов эллиптичности показано, что при отвороте антенны передатчика от нулевого положения (бистатический угол – 180°) угол эллиптичности отличен от 0° и медленно изменяет свои значения в пределах области определения. Отличие от 0° углов эллиптичности связано с тем, что при отвороте антенны бистатический угол

отличен от 180° . Таким образом, происходит фазовый набег, что приводит к изменению измеренного состояния поляризации радиоволны в точке приема [11]. Также отклонение углов эллиптичности для главного лепестка ДН объясняется тем, что при отвороте антенны в точке приема регистрируют импульс сигнала, который состоит из суммы импульсов прямого (бистатический угол – 180 градусов) и переотраженного.

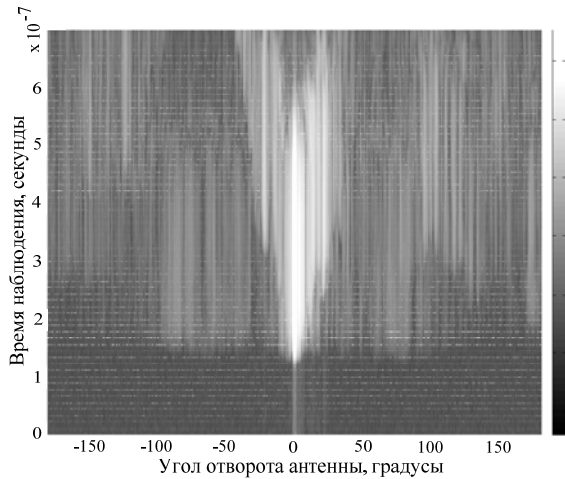


Рис. 4. Огибающие регистрируемых сигналов за 1 оборот антенны РЛС

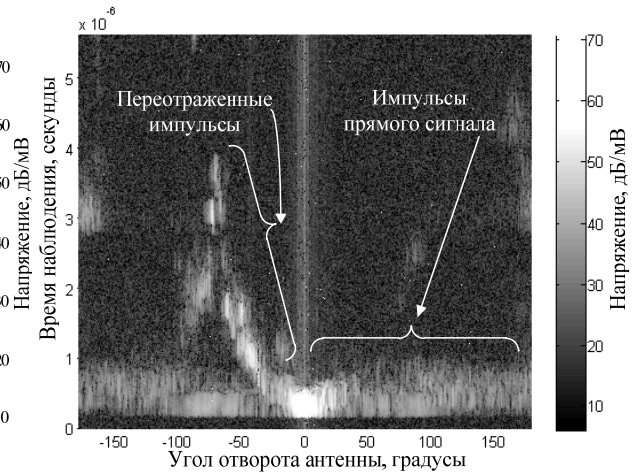


Рис. 5. Огибающие сигналов за 1 оборот антенны РЛС



Рис. 6. ДН антенны и угол эллиптичности

На рис. 7 приведен график мгновенных углов эллиптичности сигналов РЛС, зарегистрированных за один оборот антенны (длительность одной реализации $0,7$ мкс, показаны с $0,1$ по $0,7$ мкс). На рис. 8 приведен график мгновенных углов эллиптичности сигналов РЛС, зарегистрированных за один оборот антенны (длительность одной реализации $5,6$ мкс, показаны с $0,1$ по $4,3$ мкс). На рис. 7 и 8 показано изменение значений углов эллиптичности в зависимости от углового положения антенны и от времени наблюдения. Значения углов эллиптичности импульса сигнала изменяются в зависимости от отворота антенны (см. рис. 6). Значения углов эллиптичности в пределах импульса сигнала не изменяются или изменяются в пределах нескольких градусов.

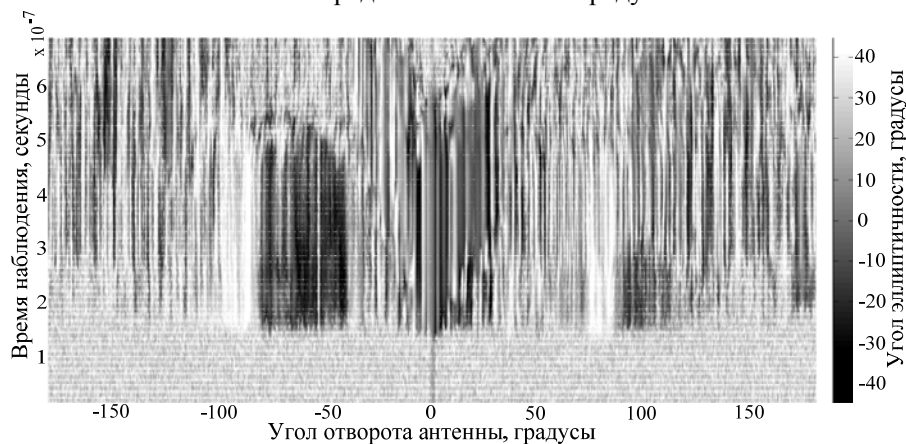


Рис. 7. Мгновенный угол эллиптичности за 1 оборот антенны

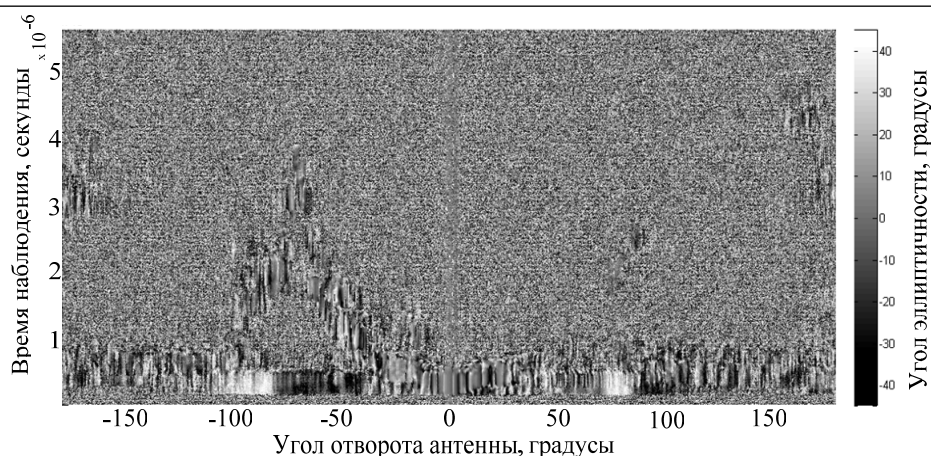


Рис. 8. Мгновенный угол эллиптичности за 1 оборот антенны

Чтобы получить наглядное представление о полученных мгновенных значениях углов эллиптичности импульсов сигнала для различных углов отворота антенны, изобразим оценки плотности распределения вероятности углов эллиптичности. На рис. 9 приведены следующие оценки плотности распределения вероятности углов эллиптичности:

1. Главный лепесток ДН. Значения углов эллиптичности выбраны по углу отворота антенны из области главного лепестка, где сектор углов и время наблюдения определялись по уровню сигнала 0,9 от максимального значения для основной поляризации. Уровень 0,9 выбран для того, чтобы исключить (уменьшить) влияние переходных процессов измерительной аппаратуры. Выборка объемом 468 значений.

2. 1-й боковой лепесток ДН. Значения углов эллиптичности выбраны по углу отворота антенны из области 1-го бокового лепестка, где сектор углов и время наблюдения определялись по уровню сигнала 0,9 от максимального значения для основной поляризации. Выборка объемом 2412 значений.

3. 2-й боковой лепесток ДН. Значения углов эллиптичности выбраны по углу отворота антенны из области 2-го бокового лепестка, где сектор углов и время наблюдения определялись по уровню сигнала 0,9 от максимального значения для основной поляризации. Выборка объемом 912 значений.

4. За 1 оборот антенны. Значения углов эллиптичности выбраны за 1 оборот антенны передатчика в пределах длительности импульса сигнала, где пределы определялись по уровню сигнала 0,9 от максимального значения для основной поляризации. Выборка объемом 25896 значений.

5. Значения углов эллиптичности сигнала вне импульсов (шумовые значения). Используются значения углов эллиптичности за 1 оборот антенны, которые вычислены до начала прихода импульса (интервал времени наблюдения от 0 до 0,14 мкс по рис. 7). Выборка объемом 25897 значений.

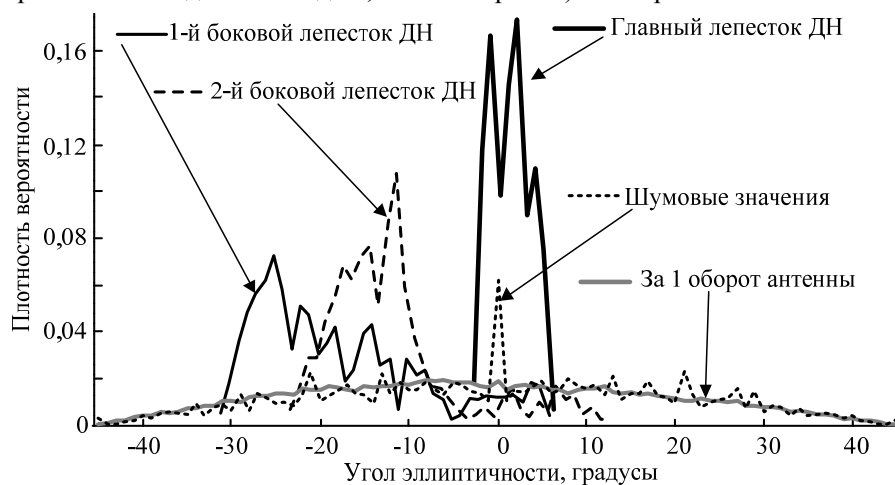


Рис. 9. Плотности распределения вероятности углов эллиптичности

Углы эллиптичности главного лепестка ДН (см. рис. 9) распределены в интервале от -3 до 6° . Углы эллиптичности 1-го бокового лепестка распределены в интервале от -31 до 6° . Значения по уровню 0,5 распределения от максимума находятся в интервале от -29 до -14° . Углы эллиптичности

2-го бокового лепестка распределены в интервале от -23 до 12° . Значения по уровню 0,5 распределения от максимума находятся в интервале от -18 до -10° . Значения углов эллиптичности сигнала вне импульсов (шумовые значения) распределены в интервале определения угла эллиптичности от -45 до 45° . Пик в распределении обусловлен тем, что для некоторых отсчетов регистрируемого сигнала значения ортогонально поляризованных компонент равны нулю (либо для основной поляризации, либо для кроссполяризации). Это вызвано тем, что уровень компонент мал и АЦП присваивает им нулевые значения. При таких условиях из формулы (2) следует, что нулевые значения компонент приводят к нулевому значению угла эллиптичности шума. Углы эллиптичности импульсов сигнала за 1 оборот антенны распределены в интервале определения угла эллиптичности от -45 до 45° . Интервал таких значений обусловлен:

1. Поляризационными характеристиками антенны передатчика. Известно [13], что состояние поляризации зеркальных антенн имеет периодическую зависимость по азимуту и углу места.
2. Особенности трассы распространения радиоволн.

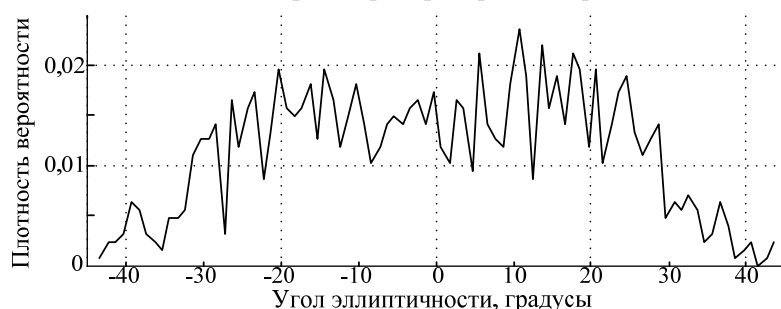


Рис. 10. Плотность распределения вероятности углов эллиптичности

На рис. 10 приведена оценка плотности распределения вероятности углов эллиптичности переотраженных импульсов сигнала. Переотраженные импульсы – импульсы, которые задержаны по времени прихода на интервал времени, больший длительности первого импульса. Наличие переотраженных импульсов сигнала обусловлено препятствиями на трассе распространения радиоволны. Для построения плотности распределения использованы значения углов эллиптичности импульсов сигнала, уровень которых в 3–5 раз выше уровня шума. Значения углов эллиптичности в пределах длительности импульсов сигнала определялись по уровню сигнала 0,9 от максимального значения переотраженного импульса для основной поляризации. Выборка объемом 501 значение. Основная область переотраженных импульсов (обозначена на рис. 5) расположена в секторе углов отворота антенны от -40 до -100° и времени наблюдения от 1 до 4 мкс. Углы эллиптичности переотраженных импульсов распределены в интервале определения угла эллиптичности от -45 до 45° .

Заключение. Результаты исследования поляризационного параметра электромагнитного поля радиоимпульсного сигнала РЛС – угла эллиптичности, показали следующее.

1. В пределах длительности импульса сигнала углы эллиптичности имеют постоянное значение.
2. При отвороте антенны передатчика на угол 0° значения углов эллиптичности импульсов сигнала главного лепестка ДН равны 0° , что соответствует линейной поляризации излучения и номинальной поляризации антенны.
3. Значения углов эллиптичности импульсов сигнала главного лепестка ДН заключены в интервале от -3 до 6° , что позволяет отнести их к линейной поляризации.
4. Значения углов эллиптичности импульсов сигнала для всех азимутов ДН заключены в пределах области определения от -45 до 45° . Функция плотности распределения вероятности имеет вид параболы, ветви которой направлены вниз, с максимальными значениями в области углов эллиптичности 0° и минимальными значениями в области углов $\pm 45^\circ$.
5. Значения углов эллиптичности переотраженных импульсов сигнала также заключены в пределах области определения от $\pm 45^\circ$. Функция плотности распределения вероятности имеет максимумы значений в области углов эллиптичности 11 и -18° и минимумы значений в области углов $\pm 45^\circ$ (двухмодальное распределение).

Таким образом, обнаружение радиоимпульсного сигнала РЛС с заданными поляризационными свойствами в главном лепестке может быть основано на устойчивости значений углов эллиптичности в пределах длительности импульсного сигнала, что позволяет проводить обнаружение по n отсчетам подряд, которые имеют одинаковые значения или заключены в узком интервале значений.

Авторы выражают благодарность коллективу НИИ радиотехнических систем ТУСУРа за предоставленные экспериментальные материалы.

Статья подготовлена при выполнении проекта РФФИ № 12-08-31364.

Литература

1. Вознюк В.В. Космическая система радиотехнического мониторинга на основе группировки низкоорбитальных малогабаритных космических аппаратов / В.В. Вознюк, С.А. Зайцев // Известия вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48, № 6. – С. 26–31.
2. Шумский П.О. Пассивное синтезирование апертуры антенн для спутниковых систем / П.О. Шумский, Г.С. Шарыгин, А.А. Мещеряков // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 34–38.
3. Mironov M.V. The multiposition passive satellite system for the terrestrial radiation sources monitoring / M.V. Mironov, E.P. Voroshilin, G.S. Sharygin // Microwave radar and wireless communications conference (Vilnius). – 2010. – P. 1–4.
4. Радзиевский В.Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки / В.Г. Радзиевский, А.А. Сирота. – М.: Радиотехника, 2004. – 432 с.
5. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин. – М.: Сов.радио, 1966. – 440 с.
6. Kostinski A.B. On foundations of radar polarimetry / A.B. Kostinski, W-M. Boerner // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1986. – Vol. 34, № 12. – P. 1395–1404.
7. Шарыгин Г.С. Физико-статистическая модель векторного поля при однократном рассеянии случайными неоднородностями канала распространения // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 5–14.
8. Поляризационные инварианты матрицы рассеяния невзаимного радиолокационного объекта / В.И. Карнышев, Л.П. Литхарт, В.А. Хлусов, Г.С. Шарыгин // Материалы докладов VIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж). – 2002. – Т. 3. – С. 1648–1654.
9. Денисов В.П. Экспериментальные исследования поляризационной структуры заднего бокового излучения сканирующей РЛС / В.П. Денисов, М.В. Крутиков, А.А. Мещеряков, М.В. Осипов // Доклады Сибирского поляризационного семинара «СибПол-2004» (Сургут). – 2004. – С.103–110.
10. Громов В.А. Угол эллиптичности электромагнитных сигналов и его использование для неэнергетического обнаружения, оптимального по критерию Неймана–Пирсона / В.А. Громов, Г.С. Шарыгин, М.В. Миронов // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 15–21.
11. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
12. Шарыгин Г.С. Численное моделирование дифракции Фраунгофера в приближении Гюйгенса-Френеля и индикатрисы прямого рассеяния самолетов / Г.С. Шарыгин, В.А. Громов, М.В. Крутиков // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 21–27.
13. Нарбут В.Н. Поляризация излучения зеркальных антенн / В.Н. Нарбут, В.Х. Хмель. – Киев: Вища школа, 1978. – 279 с.

Громов Вячеслав Александрович

Мл. науч. сотрудник НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: 8-(382-2) 41-36-70

Эл. почта: gromov.tusur@gmail.com

Аникин Алексей Сергеевич

Мл. науч. сотрудник НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: 8-(382-2) 41-36-70

Эл. почта: rbk@sibmail.com

Gromov V.A., Anikin A.S.

The estimation of the instantaneous ellipticity angle of all-round-looking radar signals in X-band

The instantaneous ellipticity angle of all-round-looking radar signals is investigated based on the experimental data. The dependences of the ellipticity angle from the antenna radar angle and observation period are presented. The density distributions of the ellipticity angles for different antenna pattern sectors are shown.

Keywords: polarization of radar signal, radio-frequency pulse, all-round-looking radar, ellipticity angle.