

УДК 621.396.96

В.А. Громов

## Поляризационные искажения сигналов бокового излучения наземной РЛС X-диапазона при приеме на космическом аппарате

Выполнен анализ факторов и поляризационных искажений сигналов бокового излучения наземной РЛС X-диапазона для трассы «Земля–космос». Приведены результаты численного моделирования и выполнен анализ поляризационной диаграммы параболической зеркальной антенны наземной РЛС. Результаты могут быть использованы при разработке современных пассивных систем радиомониторинга космического базирования.

**Ключевые слова:** поляризация радиолокационного сигнала, РЛС, поляризационная диаграмма направленности, угол эллиптичности, численное моделирование.

В современном мире необходимость контроля излучений радиосредств различного назначения связана с их широким распространением. Современные разрабатываемые пассивные системы радиомониторинга космического базирования способны обеспечить получение оперативной и достоверной информации о местоположении и параметрах радиосигналов источников радиоизлучения, расположенных в любой точке на Земле и вблизи ее поверхности [1–3]. Разработка и создание пассивных систем радиомониторинга требуют решения широкого круга проблем. Одной из ключевых является проблема обнаружения и селекции источников радиоизлучения. Информация о состоянии поляризации принимаемых электромагнитных волн может быть использована для обнаружения и селекции радиосигналов по поляризационным признакам [4]. В статье выполнен анализ факторов и поляризационных искажений сигналов бокового излучения наземной радиолокационной станции (РЛС) X-диапазона при приеме на космическом аппарате. Результаты могут быть использованы при разработке современных пассивных систем радиомониторинга космического базирования.

**Постановка задачи.** При распространении радиоволн (РВ) на трассе «Земля – космос» радиосигнал, излученный РЛС, может достигать космического аппарата (КА) несколькими путями. Основными трассами РВ для данного случая являются:

1. Первый вариант трассы РВ – КА регистрирует сигнал бокового лепестка диаграммы направленности (ДН) антенны РЛС. Например, наземные РЛС кругового обзора имеют антенную систему, производящую сканирование пространства вдоль поверхности Земли либо с некоторым углом места. Главный лепесток ДН направлен вдоль земной поверхности, а в сторону КА (вверх) направлены боковые лепестки ДН. В результате КА регистрирует радиосигнал бокового лепестка ДН, который прошел через атмосферу Земли.

2. Второй вариант – КА регистрирует отраженный радиосигнал главного лепестка ДН. Регистрируется радиосигнал, который прошел путь от РЛС до наземного предмета, переотразился от него и прошел через атмосферу Земли.

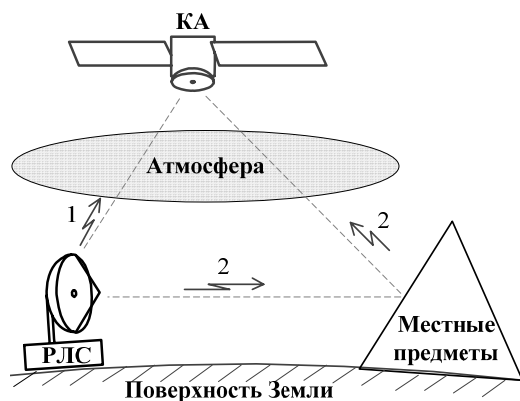


Рис. 1. Варианты РВ для трассы «РЛС – космический аппарат»

Схематично варианты трасс РВ «Земля – космос» показаны на рис. 1. В данной статье предполагается, что КА расположен на низкой круговой орбите и при движении пролетает над РЛС или в ее окрестности.

Из предложенной на рис. 1 схемы следует, что на поляризационную структуру радиосигнала могут оказывать влияние следующие факторы:

- 1) Антенная система РЛС.
- 2) Атмосфера Земли.
- 3) Местные предметы и подстилающая поверхность.

Далее будет рассмотрен первый вариант трассы РВ и проведен анализ влияния первого фактора для

антенной системы РЛС X-диапазона на основе параболической зеркальной антенны. Цель статьи – выполнить оценку и анализ поляризационных искажений сигналов бокового излучения наземной РЛС при приеме на космическом аппарате.

Для описания состояния поляризации электромагнитной волны могут быть использованы энергетические параметры полностью поляризованного сигнала – угол ориентации  $\theta$  и угол эллиптичности  $\varepsilon$ , связанные с ортогональными составляющими вектора Джонса известными выражениями [5, 6]:

$$\theta = 0,5 \arctg \left[ \frac{2E_x E_y \cos(\delta)}{E_x^2 - E_y^2} \right], \quad (1)$$

$$\varepsilon = 0,5 \arcsin \left[ \frac{2E_x E_y \sin(\delta)}{E_x^2 + E_y^2} \right], \quad (2)$$

где  $E_x$ ,  $E_y$  и  $\delta = \varphi_x - \varphi_y$  – соответственно ортогонально поляризованные составляющие волны и их разность фаз в линейном (декартовом) поляризационном базисе. На рис. 2 изображен поляризационный эллипс и показаны углы ориентации и эллиптичности.

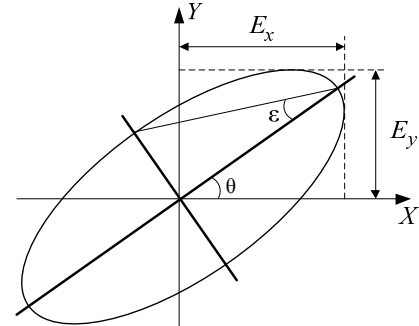


Рис. 2. Углы ориентации и эллиптичности

Угол эллиптичности является поляризационным инвариантом относительно системы координат [7]. 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. Угол эллиптичности может принимать значения от  $-45^\circ$  до  $45^\circ$ . При значении  $0^\circ$  считают, что поляризация волны линейная, при  $\pm 45^\circ$  – круговая, при остальных – эллиптическая.

**Антенная система РЛС.** Для первого варианта трассы РРВ одним из факторов, влияющих на поляризационную структуру сигнала регистрируемого на борту КА, является антенная система РЛС как источник радиоволны, при помощи которой передается сигнал. Регистрация сигнала РЛС производится по боковому лепестку ДН антенны (лепестки ДН антенны, которые направлены в сторону КА). Известно, что поляризационные характеристики ДН антенны основного лепестка отличаются от характеристик бокового [8, 9].

Одним из распространенных типов наземных антенных систем РЛС являются системы на основе параболической зеркальной антенны [10]. Для определения поляризационных характеристик параболической зеркальной антенны воспользуемся программным продуктом для численного электромагнитного моделирования ФЕКО [11, 12]. Произведем расчет ДН параболической зеркальной антенны, излучающей волну линейной поляризации на центральной частоте 12,5 ГГц. Антенна имеет следующие геометрические характеристики: радиус рефлектора равен 43 см, фокусное расстояние – 60 см. Для расчета ДН в программе ФЕКО использован метод моментов (Method of Moments, МоМ) [13]. На рис. 3 приведен общий вид моделируемой антенны и показан сектор, равный четверти сферы (условно – правый сектор). Расчет ДН выполнен с шагом  $0,2^\circ$  по азимуту и углу места. На рис. 3 дугами схематично показан фрагмент расчетной сетки ДН.

Результатом моделирования является трехмерная векторная ДН антенны. Напряженность электрического поля в каждой точке диаграммы представлена вектором Джонса [14]:

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x \exp(j\varphi_x) \\ E_y \exp(j\varphi_y) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $E_x$  – основная составляющая волны сигнала;  
 $E_y$  – кроссовая составляющая.

Поскольку моделируемая антенна является симметричной относительно плоскости  $XOY$ , то ДН тоже симметрична. Поэтому моделирование выполнили для сектора по азимуту и углу места, который образует полусферу [8]. Файл данных с расчетом ДН содержит информацию о величине ортогонально поляризованных составляющих

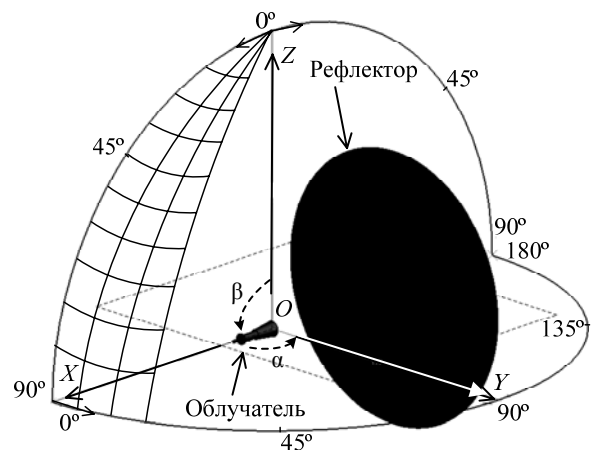


Рис. 3. Общий вид антенны

( $E_x$ ,  $E_y$ ) и их фазах ( $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$ ) для каждой точки полусферы по азимуту ( $\alpha$ ) и углу места ( $\beta$ ) в дальней зоне антенны. На рис. 4 приведены ДН антенны для основной и кроссовой поляризации в сечении плоскостью  $XOZ$  при  $\alpha=0^\circ$  и  $\beta$  от  $0$  до  $90^\circ$  в сторону облучателя.

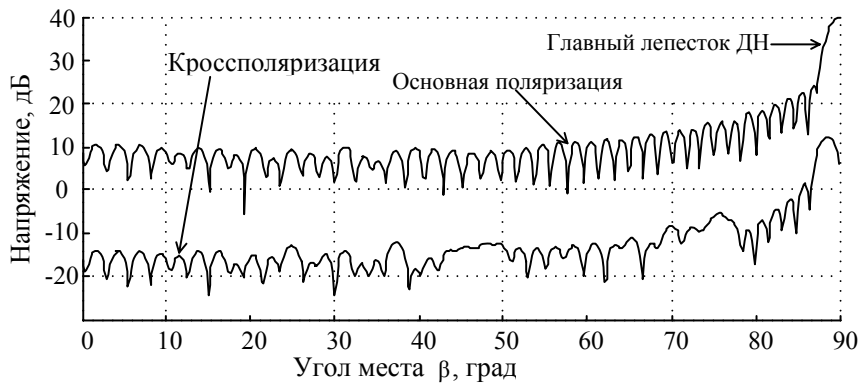


Рис. 4. ДН для основной и для кроссовой поляризации

На рис. 5. приведена трехмерная ДН антенны, полученная в программе FEKO. На рис. 6 изображена ДН антенны на плоскости, построенная в программе MATLAB. ДН состоит из двух секторов левый и правый, каждый из них равен четверти сферы. ДН вычислена по формуле

$$E = \sqrt{(|E_x \exp(j\varphi_x)|)^2 + (|E_y \exp(j\varphi_y)|)^2}. \quad (4)$$

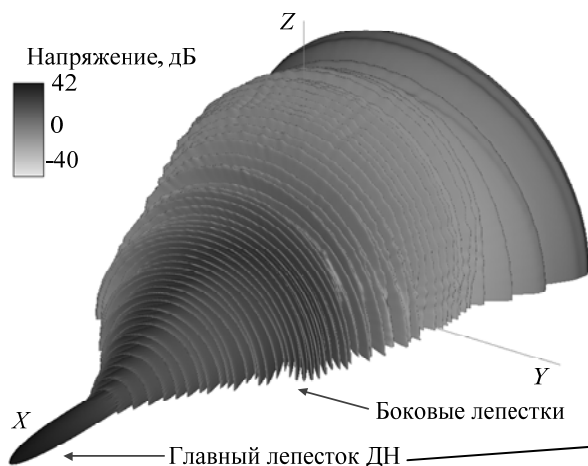


Рис. 5. ДН антенны в программе FEKO

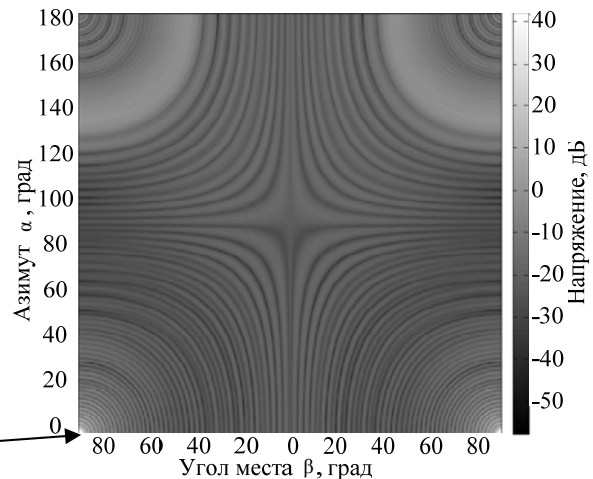


Рис. 6. ДН антенны

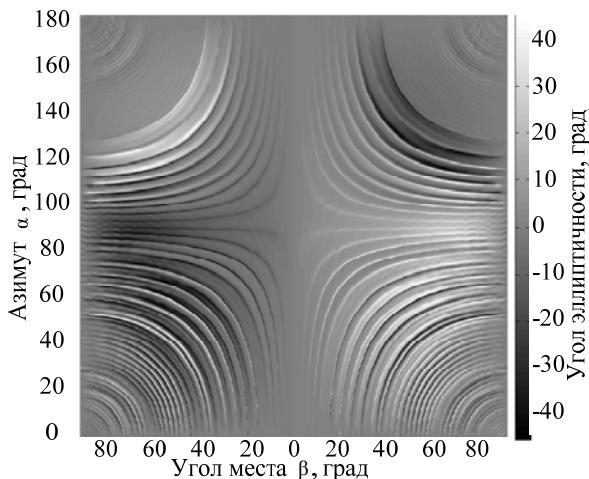


Рис. 7. Поляризационная ДН антенны

Используя результаты расчета векторной ДН антенны, по формуле (2) вычислен угол эллиптичности  $\epsilon$  для каждой точки ДН антенны. На рис. 7 приведен график значений углов эллиптичности ДН. В литературе данную зависимость называют поляризационной ДН антенны [8].

Результаты расчета показывают (рис. 7), что значения углов эллиптичности ДН параболической зеркальной антенны периодически изменяются по азимуту и углу места. Значения углов эллиптичности в пределах основного лепестка ДН (сектор углов  $\beta$  от  $88$  до  $90^\circ$  и  $\alpha$  от  $0$  до  $2^\circ$  на рис. 7) равны нулю, что соответствует линейной поляризации.

На рис. 8 приведена гистограмма углов эллиптичности поляризационной диаграммы (рис. 7).

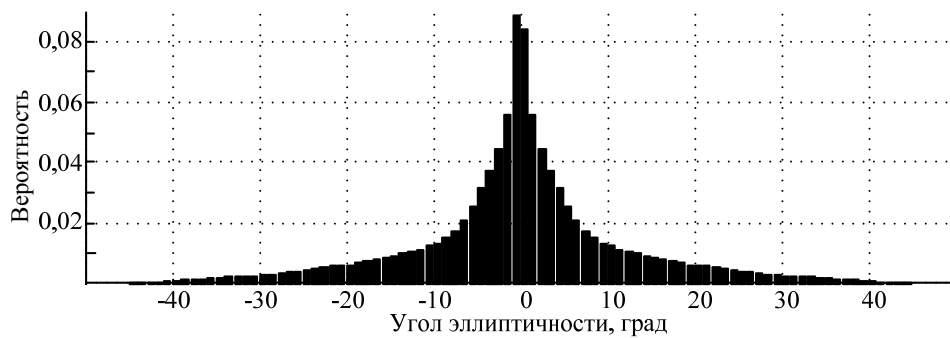


Рис. 8. Гистограмма углов эллиптичности

Максимум гистограммы расположен в области нулевых значений, что соответствует линейной поляризации. Высота столбцов гистограммы вычислена по формуле:  $n_i/(nb)$ , где  $n_i$  – число значений, которые попали в  $i$ -столбец,  $n$  – число столбцов,  $b$  – ширина столбца. Кривая, проведенная через вершины столбцов гистограммы, будет являться оценкой функции плотности распределения вероятности углов эллиптичности.

Углы эллиптичности боковых лепестков ДН периодически изменяются. Рассмотрим периодические изменения углов эллиптичности и ДН антенны. Для этого построим график, на котором будут изображены кривые ДН для основной поляризации и углов эллиптичности антенны для всех значений по азимуту и для заданного сечения по углу места. На рис. 8 изображен график поляризационной диаграммы и ДН для сечения по углу места  $88^\circ$ , на рис. 10 – по углу места  $20^\circ$ . На рисунках вертикальными пунктирными линиями обозначены несколько участков, в которых ДН принимает минимальные значения (участки между лепестками ДН). Для аналогичных участков поляризационной диаграммы значения углов эллиптичности имеют отклонения от среднего значения. На уровне не ниже  $-3$  дБ от максимума бокового лепестка ДН значения углов эллиптичности находятся в интервале  $[-5, 5]$  градусов, что позволяет отнести состояние поляризации к линейной. Изменения состояния поляризации носят периодический характер, зависящий от азимута и угла места.

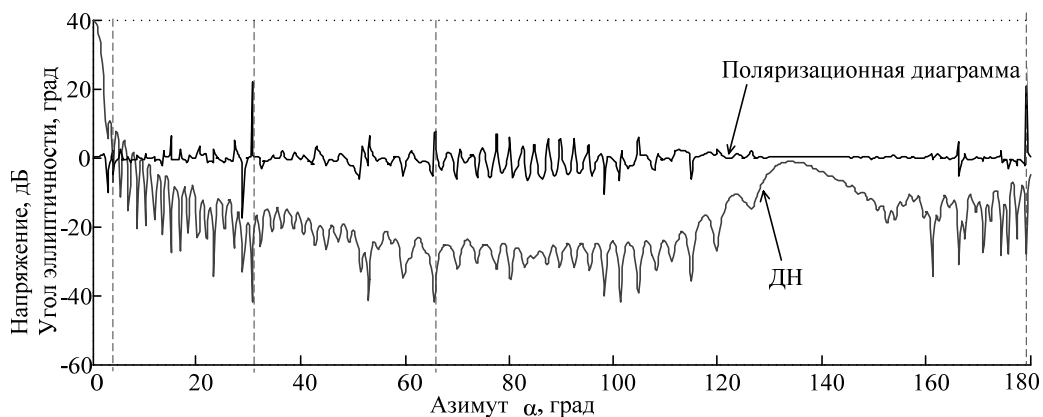


Рис. 9. Поляризационная диаграмма и ДН ( $88^\circ$ )

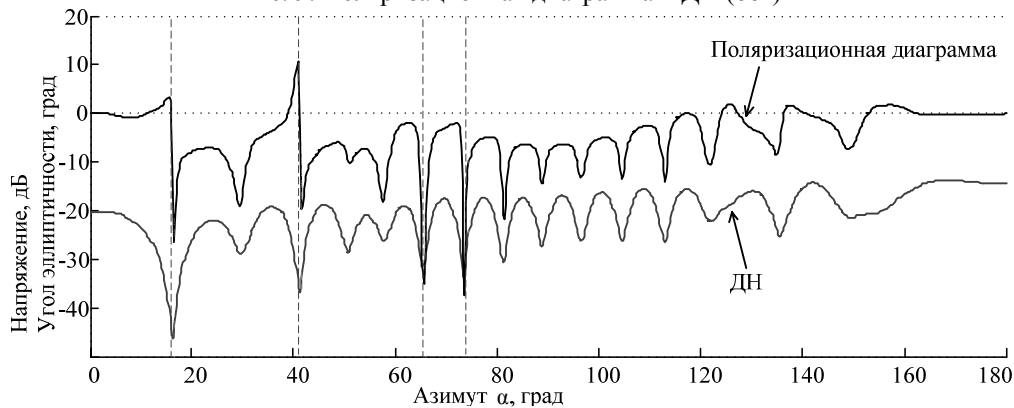


Рис. 10. Поляризационная диаграмма и ДН ( $20^\circ$ )

Так как сигнал РЛС регистрируют на КА по боковому лепестку ДН, то предполагаемый боковой лепесток должен находиться в определенном угловом секторе ДН, который направлен в сторону КА (рис. 11). Для ДН, приведенной на рис. 5, считается, что ось координат  $X$  для антенны направлена вдоль поверхности Земли, а ось  $Z$  – в сторону КА.

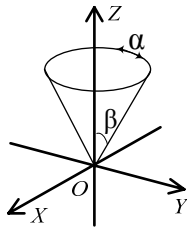


Рис. 11. Система координат ДН антенны

Построим гистограмму углов эллиптичности поляризационной диаграммы для всех значений по азимуту ( $\alpha$ ) и по углу места ( $\beta$ ) от 0 до 20 град. На рис. 12 обозначен выбранный сектор значений углов эллиптичности. На рис. 13 приведена гистограмма углов эллиптичности. Используя данные гистограммы, определим вероятность попадания заданного угла эллиптичности (интервала углов) в выбранный сектор углов диаграммы. Аналогичным образом могут быть получены гистограммы для других угловых секторов ДН.

В таблице приведены значения вероятности попадания углов эллиптичности в зависимости от выбранного интервала значений углов эллиптичности для разных угловых секторов поляризационной диаграммы. При увеличении ширины сектора ДН для заданного интервала углов эллиптичности вероятность попадания в сектор уменьшается. Это связано с тем, что расширяется диапазон значений углов эллиптичности, которые попадают в исследуемый сектор ДН.

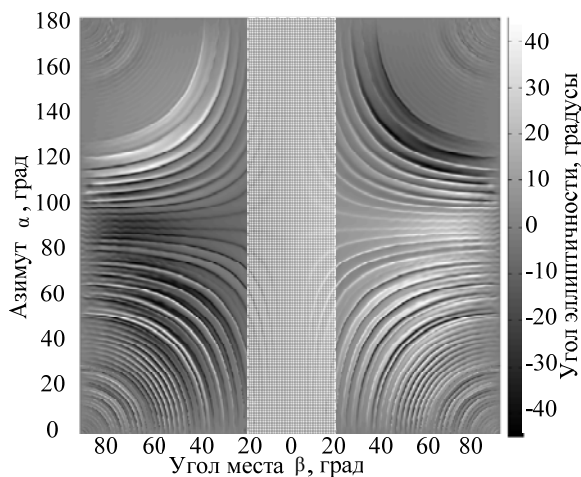


Рис. 12. Пример углового сектора [0, 20] поляризационной ДН антенны

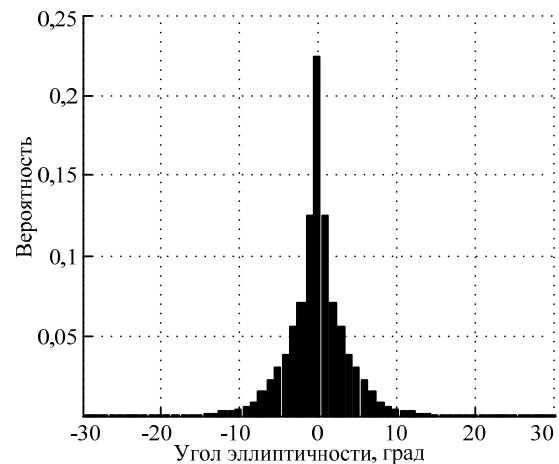


Рис. 13. Гистограмма углов эллиптичности для сектора [0, 20]

#### Вероятность попадания углов эллиптичности в интервал

Сектор боковых лепестков ДН, град		Интервал углов эллиптичности, град		
		[-2, 2]	[-5, 5]	[-10, 10]
Угол места		Вероятность попадания в интервал		
1	[0, 10]	0,84	0,98	1
2	[0, 20]	0,64	0,87	0,98
3	[0, 30]	0,52	0,76	0,93
4	[0, 40]	0,43	0,66	0,86
5	[0, 50]	0,4	0,6	0,8
6	[0, 60]	0,36	0,56	0,75

Численное моделирование проводится в идеальных условиях и позволяет получить общие характеристики и зависимости. Используемые на практике параболические зеркальные антенны (точнее антенные системы) имеют в своем составе кроме рефлектора и облучателя дополнительные элементы конструкции, которые оказывают влияние на результирующие характеристики ДН антенны и ее поляризационные характеристики. Также при математическом моделировании антенн не учитывается ряд эффектов [15], расчет которых в численном виде затруднен. Для получения более достоверных результатов необходимо проводить экспериментальные исследования.

**Атмосфера Земли.** Атмосферу можно разделить на две области: тропосферу и ионосферу. Особенностью нижней части атмосферы – тропосферы – является наличие в ней гидрометеоров в жидком и твердом состояниях – капелек воды и снежинок [16, 17]. Атмосфера на высотах свыше 60 км ионизована, она образует ионосферу.

В ионосфере существенную роль играет ионизация воздуха, обусловленная главным образом действием ультрафиолетового излучения Солнца. Влияние ионосферы приводит к вращению плоскости поляризации радиоволны. Этот эффект носит название «эффект Фарадея». Полученные формулы в [16] показывают, что значение угла поворота плоскости поляризации электромагнитной волны зависит от большого числа параметров. Оценка максимальной величины угла поворота плоскости поляризации показывает, что на частотах радиоволн, равных 4 ГГц, угол поворота плоскости поляризации составляет единицы градусов и уменьшается при увеличении частоты. На участке квазипоперечного распространения линейнополяризованная волна становится эллиптически поляризованной – эффект Коттона–Мутона [17]. Оценка величины деполяризации волны, произведенная в [17], показывает, что уже на частотах 300 МГц деполяризация волны достаточно мала и данный эффект можно не учитывать.

Для тропосферы, как и для ионосферы, присущи поляризационные эффекты, которые были упомянуты выше. Ионизация воздуха тропосферы в десятки раз меньше, поэтому влиянию эффектов Фарадея, Коттона–Мутона электромагнитная волна подвергается меньше, и ими пренебрегают [17].

Сложная, непрерывно изменяющаяся турбулентная и слоистая структура тропосферы является одной из причин случайного характера различных параметров сигналов в точке приема. При этом на трассах «Земля–космос» уровни случайных компонентов сигналов составляют обычно лишь незначительную долю от уровня регулярного. Поляризационные изменения сигналов, обусловленные турбулентным характером тропосферы, для таких трасс оказываются незначительными. Расчеты показывают [18], что уровни кроссполяризованных компонентов в них ничтожно малы.

#### **Заключение**

1. Исследование поляризационной диаграммы параболической зеркальной антенны показали, что номинальная линейная поляризация сохраняется в главном лепестке ДН (см. рис. 7), угол эллиптичности равен 0 град. В области боковых лепестков ДН состояние поляризации отличается от линейной. На уровне не ниже –3 дБ от максимума бокового лепестка ДН значения углов эллиптичности находятся в интервале [–5, 5] градусов, что позволяет отнести состояние поляризации к линейной. Изменения состояния поляризации носят периодический характер, зависящий от азимута и угла места. Данное изменение вызвано особенностями распределения амплитудных и фазовых диаграмм, которые в свою очередь зависят от токов, наводимых на рефлекторе антенны. Сравнение ДН и поляризационной диаграммы показывает, что для заданных сечений угла места или азимута максимальное отклонение угла эллиптичности от номинального (равного 0°) находятся в области минимумов ДН антенны. Если предположить, что чувствительность приемной аппаратуры КА не сможет обеспечить необходимого отношения сигнал/шум принимаемого сигнала для данных секторов ДН передающей антенны, то их можно не учитывать при анализе.

2. Анализ влияния атмосферы Земли на поляризационную структуру радиосигнала в X-диапазоне показал, что такие основные эффекты, как эффект Фарадея и Коттона–Мутона, вносят искажения в состояние поляризации волны, не превышающие заданного значения угла эллиптичности на ±5 град. Ряд других эффектов оказывают еще меньшее влияние на состояние поляризации, и их влиянием пренебрегают.

Проведенный анализ поляризационных искажений показал, что состояние поляризации для трассы РРВ «Земля – космос» в точке приема можно отнести к номинальной линейной излученной поляризации.

Полученные в статье результаты могут быть использованы при проектировании антенных элементов систем радиомониторинга и разработки алгоритмов обнаружения сигналов.

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 // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48, № 6. – С. 26–31.

2. Кураков В.А. Космическая система мониторинга наземных источников излучения // Матер. XIII Междунар. науч. конф. «Решетневские чтения» (Красноярск). – 2009. – Ч. 1. – С. 150–151.
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. 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.
5. 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.
6. Lee J.S. Polarimetric Radar Imaging // From Basics to Applications. – Washington: CRC Press, 2009. – 422 p.
7. Поляризационные инварианты матрицы рассеяния невзаимного радиолокационного объекта / В.И. Карнышев, Л.П. Литхарт, В.А. Хлусов, Г.С. Шарыгин // Матер. докладов VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж). – 2002. – Т. 3. – С. 1648–1654.
8. Нарбут В.Н. Поляризация излучения зеркальных антенн / В.Н. Нарбут, В.Х. Хмель. – Киев: Вища школа, 1978. – 279 с.
9. 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. Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарёв. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
11. Сайт программы FEKO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.feko.info>, свободный (дата обращения: 05.06.2013).
12. Банков С.Е. Практикум проектирования СВЧ-структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. – 200 с.
13. Метод моментов (МоМ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rodnik.ru/product/sapr/sapr\\_svch/EM\\_Software\\_Systems/feko/mom](http://www.rodnik.ru/product/sapr/sapr_svch/EM_Software_Systems/feko/mom), свободный (дата обращения: 05.06.2013).
14. Татаринцов В.Н. Поляризация плоских электромагнитных волн и ее преобразования / В.Н. Татаринцов, С.В. Татаринцов, Л.П. Лигтхарт. – Томск: Изд-во Том- ун-та, 2006. – 379 с.
15. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. – М.: Связь, 1977. – Ч. 2. – 288 с.
16. Колосов М.А. Распространение радиоволн при космической связи / М.А. Колосов, Н.А. Арманд, О.И. Яковлев. – М.: Связь, 1969. – 155 с.
17. Кравцов Ю.А. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли / Ю.А. Кравцов, З.И. Фейзулин, А.Г. Виноградов. – М.: Радио и связь, 1983. – 224 с.
18. Родимов А.П. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех в линиях связи. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.

---

**Громов Вячеслав Александрович**  
Мл. науч. сотр. НИИ РТС ТУСУРа  
Тел.: 8-(382-2) 41-36-70  
Эл. почта: [gromov.tusur@gmail.com](mailto:gromov.tusur@gmail.com)

Gromov V.A.

#### **Polarization distortions of the terrestrial X-band radar side lobe signals received by satellite equipment**

The article gives an analysis of the polarization distortions of the side lobe signal of the X-band radar for the «Earth-satellite» path. The numerical simulation results and the analysis of polarization diagram of a parabolic reflector antenna of the terrestrial radar are given. The influence of the Earth atmosphere on the signal polarization is considered. The results can be used to develop passive space-based radio-monitoring systems.

**Keywords:** polarization of radar signal, ground-based radar, polarization pattern, ellipticity angle, numerical simulation.