Секция С. Диагностика естественных неоднородных сред и математическое моделирование. БШФФ-2026. С. 460–461.

УДК: 621.396.96
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-460
ORCID: 0009-0007-4503-6321

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, РАССЕЯННЫХ КОСМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ, В БИСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Е.А. Романова[1], В.П. Лебедев[2]

[1]Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия,
eva.rmnv@mail.ru
[2]Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

RESEARCH ON POLARIZATION CHARACTERISTICS OF RADAR SIGNALS SCATTERED BY SPACE OBJECTS IN BISTATIC RADAR SYSTEM

E.A. Romanova[1], V.P. Lebedev[2]

[1]Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, eva.rmnv@mail.ru
[2]Institute of Solar-Terrestrial Physics, SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Проведено исследование поляризационных характеристик радиолокационных сигналов, рассеянных космическими объектами (КО) в бистатической системе. Разработана математическая модель с произвольно ориентированными фазированными антенными решетками на основе крестовых вибраторов. Выполнено численное моделирование полного радиолокационного тракта матричными методами.

Ключевые слова: бистатическая радиолокация, поляризация, космические объекты, антенная решетка.

Abstract. The polarization characteristics of radar signals scattered by space objects in a bistatic radar system have been investigated. A mathematical model of a bistatic system with arbitrarily oriented phased antenna arrays based on cross dipoles has been developed. Numerical simulation of the complete radar path using matrix methods has been performed.

Keywords: bistatic radar, polarization, space objects, antenna array.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы обусловлена ростом количества КО и необходимостью их эффективного мониторинга. Бистатическая радиолокация с разнесенными передающей и приемной позициями позволяет получать дополнительную информацию о целях с помощью наблюдения под различными углами рассеяния [Мериани и др., 1988].

Поляризация электромагнитной волны несет информацию об электрофизических свойствах поверхности объекта, его ориентации и геометрии [Золотаев, Астапов, 1984]. Цель настоящей работы — исследование поляризационных характеристик сигналов в бистатической системе с использованием матричных методов описания поляризационных преобразований.

БИСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Рассматривается система из двух разнесенных фазированных антенных решеток (АР) (1АР и 2АР, рис. 1, 2), каждая содержит 16×16 крестовых вибраторов. Расстояние между фазовыми центрами составляет 1 000 м. КО моделировался идеально проводящей пластиной, расположенной в дальней зоне обеих антенн, а также смоделирована траектория передвижения КО на высоте 10000 км со скоростью 7.8 км/с.

В качестве источника задана левая круговая поляризация (LHCP) с фазовым сдвигом +90° между ортогональными диполями на 1АР, рассмотрим поляризационную характеристику принятого сигнала на 2АР после отражения от КО.

Полный тракт распространения рассматривался в виде последовательного преобразования

$$\vec{S}_{rx} = M_{down} M_{scatter} M_{up} \vec{S}_{tx}, \qquad (1)$$

где $\vec{S}_{tx}$ — исходный вектор Стокса, M_{up} и M_{down} — матрицы распространения, $M_{scatter}$ — матрица рассеяния КО.

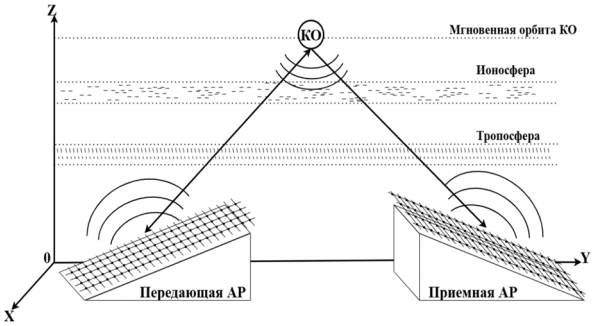

Рис. 1. Бистатическая радиолокационная система и КО

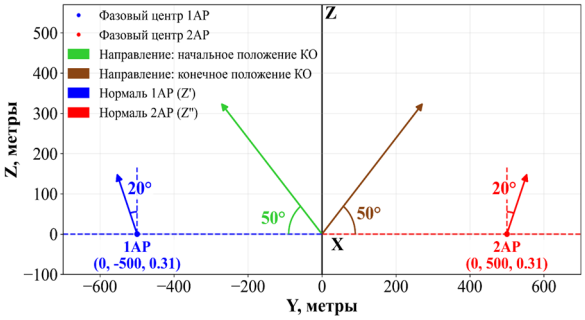

Рис. 2. Смоделированная геометрия системы по заданным параметрам

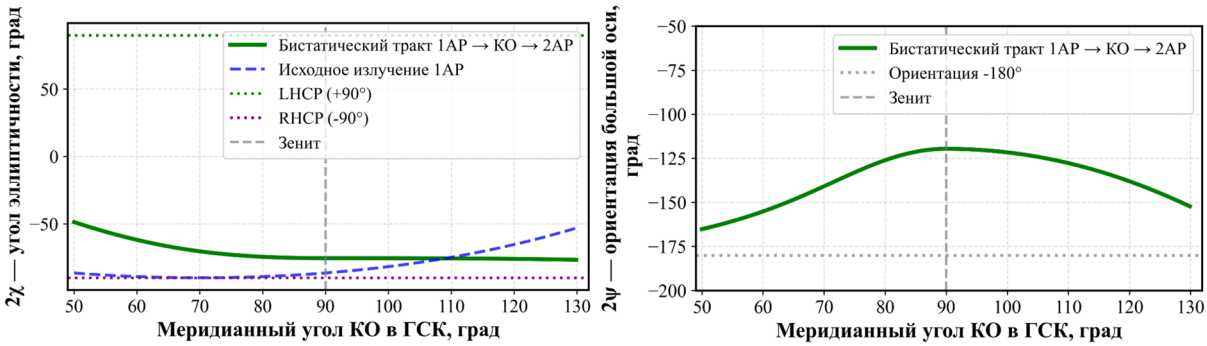

Рис. 3. Графики углов сферы Пуанкаре принятого сигнала на 2АР

Учет произвольной ориентации АР осуществляется через матрицы вращения базиса поляризации, что позволяет корректно моделировать несовпадение систем координат излучателя, цели и приемника.

Смоделирован частный случай бистатического распространения сигнала, при котором излучение осуществляется антенной решеткой 1АР, отражается от КО и принимается антенной решеткой 2АР.

Данная конфигурация представляет особый интерес, поскольку

— передающая и приемная АР имеют различную ориентацию относительно траектории КО;

— угол падения сигнала на КО отличается от угла рассеяния;

— проявляются эффекты, связанные с геометрией бистатической системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

После отражения от RJ и приема на 2АР происходит трансформация поляризационного состояния сигнала.

Углами, определяющими поляризацию принятого сигнала на сфере Пуанкаре, можно наглядно представить, как изменяется поляризационная характеристика в зависимости от направления траектории движения КО.

На рис. 3 показано следующее.

— Трансформация угла эллиптичности принятого сигнала. В отличие от моностатического случая, где происходит полная инверсия хиральности, в бистатическом тракте наблюдается частичная трансформация с сохранением значительной круговой компоненты.

— Динамика азимутального угла (ориентации большой оси) принятого сигнала. Характерной особенностью является отсутствие резких скачков при прохождении зенита.

Полученные зависимости показывают, что бистатическая геометрия приводит к непрерывному изменению эллиптичности поляризации без резкой смены хиральности, характерной для моностатического отражения. В бистатическом тракте наблюдается частичная трансформация с сохранением значительной круговой компоненты. Плавный характер изменения поляризационных параметров (без резких скачков при прохождении зенита) является важным преимуществом бистатической конфигурации для задач непрерывного мониторинга КО. Это позволяет избежать потерь информации в критической точке траектории. Различие между углами падения и рассеяния приводит к тому, что матрица рассеяния КО действует по-разному на ортогональные компоненты поля, что проявляется в ненулевых значениях S_1 и S_2. Этот эффект может быть использован для получения дополнительной информации о свойствах поверхности объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель бистатической радиолокационной системы с произвольно ориентированными антенными решетками. Показана частичная трансформация левой круговой поляризации в эллиптическую с положительной круговой компонентой в бистатическом тракте 1АР → КО → 2АР. В отличие от моностатического тракта, бистатическая конфигурация обеспечивает плавное изменение поляризационных параметров при прохождении зенита, что важно для непрерывного наблюдения. Полученные результаты подтверждают перспективность бистатических систем для получения дополнительной поляризационной информации о КО.

Бистатическая схема позволяет наблюдать цели, находящиеся в тени относительно моностатической радиолокационной станции, за счет разделения позиций излучения и приема. Поляризационные параметры при этом сохраняют информативность даже при низких значениях эффективной площади рассеяния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Мериани Н.П., Титов Г.В., Лобанов Ю.И. Бистатическая радиолокация. М.: Радио и связь, 1988. 328 с.

Золотаев В.Н., Астапов П.А. Поляризационная радиолокация. М.: Радио и связь, 1984. 240 с.

Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.

Born M., Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 952 p.