

УДК 621.396.969

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПРОСВЕТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ

Дугин Николай Александрович^{1,2}, доктор физико-математических наук, профессор кафедры

e-mail: ndugin@yandex.ru

Панков Евгений Андреевич¹, аспирант

e-mail: pankevg98@yandex.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Проведено математическое моделирование эффекта просветной локации для реального эксперимента, где в качестве источников широкополосных сигналов использовались навигационные спутники систем GPS, Galileo и Beidou, а в качестве приёмного устройства использовался радиотелескоп РТ-15 пункта РСДБ НИРФИ ННГУ «Зимёнки».

Ключевые слова: локация на просвет, радиоинтерферометрия, задержка прохождения сигнала.

MATHEMATICAL MODELING OF THE FORWARD SCATTER EFFECT USING BROADCAST PROBING SIGNALS

Dugin Nikolai Aleksandrovich^{1,2}, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor at the Department

e-mail: ndugin@yandex.ru

Pankov Evgenii Andreevich¹, Doctoral Student

e-mail: pankevg98@yandex.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

² Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Mathematical modeling of the effect of forward scatter radiolocation was carried out for a real experiment, where navigation satellites of the GPS, Galileo and Beidou systems were used as sources of broadband signals, and the RT-15 radio telescope of the VLBI station NIRFI UNN «Zimenki» was used as a receiving device.

Keywords: forward scatter radiolocation, radio interferometry, signal transmission delay.

Введение

Радиолокация была и остаётся одной из важных областей науки, без которой невозможно представить эффективное функционирование множества как гражданских, так и оборонных систем. На протяжении своей более чем столетней истории эта сфера деятельности претерпела значительные изменения в связи с появлением новых технологий и необходимости адаптироваться к изменяющейся реальности. На текущий момент активно изучаются возможные альтернативы традиционным радиолокационным системам. Одной из них является просветная радиолокация, известная достаточно давно, а сейчас переживающая второе рождение благодаря применению новых технологий и принципов.

Просветная радиолокация является частным случаем бистатической локации: схемы построения радиолокационной станции (РЛС), при которой приёмник и передатчик разнесены друг от друга в пространстве. Угол между передатчиком, приёмником и целью называется бистатическим углом. При просветной радиолокации данный угол максимально приближен к 180 градусам, вследствие чего обнаружение целей происходит на линии между передатчиком и приёмником. Подобная геометрия построения системы изменяет сам принцип обнаружения цели: если в моностатической локации приёмная система принимает рассеянную от цели энергию (отраженный сигнал), то в просветной локации имеет место так называемый «просветный эффект» [1]. Его суть заключается в рассеивании сигнала от цели в направлении, совпадающим с направлением облучения. Основной особенностью такого рассеивания является увеличение рассеиваемой вперёд энергии на два-три порядка в сравнении с другими направлениями рассеивания. При этом эффективная площадь рассеивания цели (ЭПР) зависит только от теневого контура объекта и не зависит от его формы и материала конструкции [2]. Максимальная ЭПР при прямом рассеивании сигнала «вперёд» определяется следующей формулой:

$$\sigma = 4\pi(S/\lambda)^2 \quad (1)$$

где λ – длина волны;

S – геометрическая площадь объекта.

Таким образом, просветная радиолокация дает возможность обнаруживать объекты, трудно определяемые с помощью традиционных методов радиолокации.

В нижегородском научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ) при университете им. Н.И.Лобачевского (ННГУ) проводятся исследования возможности использования широкополосных (квазишумовых) сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) глобальных спутниковых систем (СРНС) для обнаружения объектов в ближнем космосе и воздушном пространстве. В рамках этих исследований отрабатывается методика локации с использованием принципов радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), т.е. с использованием корреляционной обработки двух принятых сигналов – прямого от НКА и рассеянного объектом. Были проведены несколько серий экспериментов [3, 4], однако, не было создано теоретической расчётной базы для данных опытов. Наличие теоретической базы позволит корректно интерпретировать получаемые результаты и модернизировать процедуру обработки данных.

Целью данной работы является математический расчёт пространственной задержки между опорным и рассеянным сигналами при одновременном движении в пространстве как передающего устройства, так и исследуемого объекта.

Алгоритм расчета

На рисунке 1 приведена схема взаимного положения передатчика зондирующего сигнала, приемной антенны и исследуемого объекта с указанием расстояний между ними. В качестве передатчиков взяты НКА на высокоэллиптических орбитах, объекты – крупные

фрагменты космического мусора (каталогизированные), приемная антенна – на поверхности Земли.

Расчёт изменения задержки сигнала ΔT производится по следующей формуле:

$$\Delta T = \frac{1}{c} * (r_0 - (r_1 + r_2)), \quad (2)$$

где c – скорость света;

r_0 – расстояние от приёмной антенны до спутника;

r_1 – расстояние от приёмной антенны до наблюдаемого объекта;

r_2 – расстояние от наблюдаемого объекта до спутника.

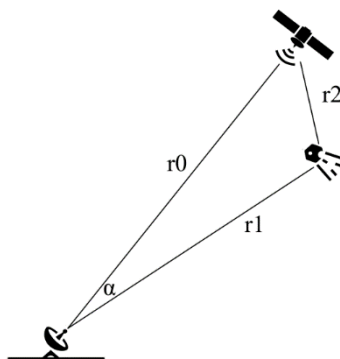


Рисунок 1 – Взаимное расположение пункта приёма, объекта и излучателя

Большая часть необходимых параметров может быть получена из баз данных общего доступа в сети Интернет. Переменная r_0 рассчитывается с помощью информации из свободно распространяемых альманахов спутников. Данные по переменной r_1 в конкретный момент времени также могут быть получены путём использования специальных каталогов космического мусора. Основная сложность заключается в нахождении переменной r_2 . На рис.1 не учитывается важное условие: и передатчик, и фрагмент космического мусора движутся в трёхмерном пространстве по криволинейным траекториям. Соответственно, расстояние между этими объектами изменяется нелинейно и сильно зависит от особенностей траектории. Оно может быть найдено с помощью угла между r_0 и r_1 , но поскольку объекты движутся в трёхмерном пространстве, изменение угла также нелинейно.

Для того чтобы корректно найти данный угол и, в конечном итоге, расстояние r_2 , предложено представлять линии расстояния от приёмной станции до каждого из объектов как векторы в системе координат с нулём в точке, соответствующей приёмной станции. Ноль системы координат выбирается так, потому что расчёты всех параметров объектов производятся именно относительно пункта приёма. Таким образом, из баз данных у нас имеется расстояние до объекта, его угол места и азимут. Такая комбинация параметров полностью соответствует сферической трёхмерной системе координат, которая использует радиальное расстояние r , зенитный и азимутальный углы θ и φ для описания точек в пространстве. Косинус угла между двумя векторами a и b с координатами (a_1, a_2, a_3) и (b_1, b_2, b_3) соответственно может быть найден по формуле:

$$\cos(a, b) = \frac{a_1 * b_1 + a_2 * b_2 + a_3 * b_3}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} * \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2}} \quad (3)$$

Здесь векторами a и b являются линии расстояния от приёмной станции до спутника и исследуемого объекта, а три их координаты – это радиальное расстояние r , зенитный и азимутальный углы θ и φ соответственно.

Как следствие, искомое неизвестное расстояние r_2 может быть найдено по следующей формуле:

$$r_2 = \sqrt{r_0^2 + r_1^2 - 2r_1r_2 \cos \alpha}, \quad (4)$$

где $\cos \alpha$ – найденный ранее угол между векторами.

Таким образом, имеются все переменные для нахождения задержки сигнала. При наличии исходных данных по координатам объектов в сферической системе координат на протяжении определённого периода времени, можно рассчитать задержку в соответствии с приведёнными выше формулами в зависимости от времени. В идеальном случае графики изменения задержки должны представляться параболой с нулём в момент пересечения траекторий. Под пересечением траекторий в данном контексте подразумевается момент, при котором бистатический угол в системе будет равен 180 градусам, т.е. спутник, исследуемый объект и приёмная станция находятся на одной линии.

Математический расчёт задержки в соответствии с приведённой выше теоретической методикой был произведён по четырём парам объектов в соответствии с реальным экспериментом, проведённом 22 ноября 2023 г на РСДБ НИРФИ ННГУ РТ-15 «Зимёнки» – РТ-2 «ННГУ».

Необходимые для расчётов данные по спутникам были получены с помощью программы HeavenSat для каждого НКА. Были построены траектории движения каждого НКА в обозначенный временной промежуток, после чего получены сведения о координатах спутника в каждую секунду периода наблюдения относительно приёмного пункта «Зимёнки». Аналогичным образом были получены ежесекундные координаты фрагментов космического мусора с использованием специальных каталогов космических объектов. Полученные данные были сохранены в формате текстовых файлов для дальнейшей обработки.

Для решения этой задачи была написана программа на языке программирования Python. Решалось несколько последовательных задач:

1. Считывание данных по координатам объектов из текстовых файлов в соответствии с заранее заданным форматированием.
2. Расчёт косинуса угла между двумя объектами в соответствии с формулой (3).
3. Расчёт расстояния между спутником и исследуемым объектом в соответствии с формулой (4).
4. Расчёт задержки сигнала на основе формулы (2).
5. Построение графиков зависимости задержки от времени и угла между объектами для иллюстрации исследуемых процессов.

На рисунке 2 представлена зависимость задержки сигнала от времени. По оси ординат откладывается задержка в секундах, по оси абсцисс – время в формате GMT+3, пометка «22» – даты наблюдений. Как видно из представленных графиков, характер изменения задержки значительно варьируется между парами объектов. Ожидаемый график - парабола с плавным уменьшением задержки по мере подхода к линии наблюдения и плавным же её возрастанием. Однако, в то время как для спутника с номером 35752 и объекта 23561 график приближен к идеальному, для спутника 44865 и соответствующего ему объекта 28647 наблюдается очень резкое и нетипичное изменение задержки.



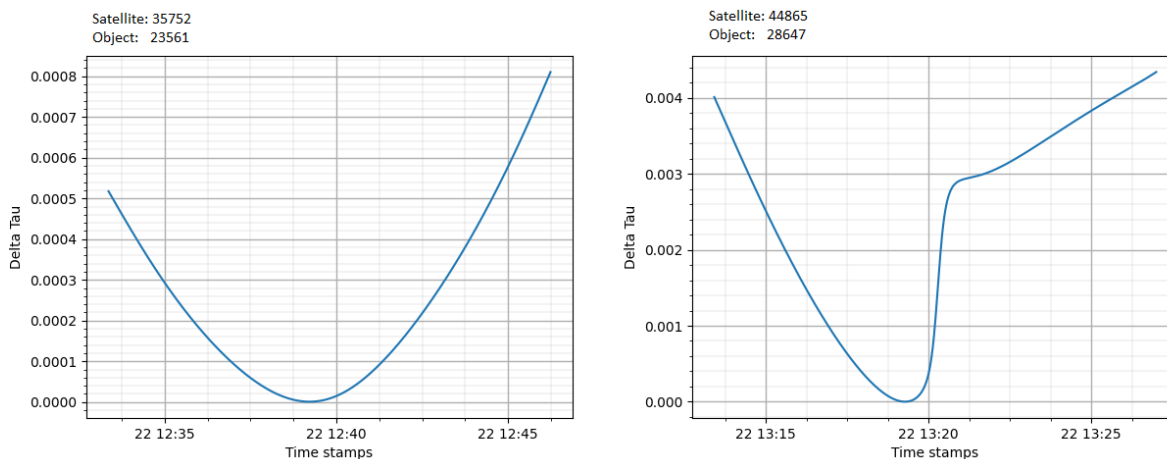


Рисунок 2 – Зависимость задержки сигнала от времени

Причину этого явления можно понять, исследовав зависимость между задержкой и углом между объектами, представленными на рисунке 3. Аналогично рисунку 2, по оси ординат откладывается задержка в секундах, а по оси абсцисс – угол между объектами в градусах. На данных графиках видно, что для первой исследуемой пары изменение угла между объектами происходит с квадратичной зависимостью, что совпадает с традиционным пониманием данного процесса. Одновременно с этим для пары спутник-объект 44865-28647 явно наблюдается отклонение графика от стандартного вида. Изучая эту зависимость, можно заключить, что траектория движения объекта проходит таким образом, что после момента пролёта вместо того, чтобы постепенно удаляться от спутника, исследуемый объект вновь начинает приближаться к нему, что и формирует подобный характер изменения задержки.

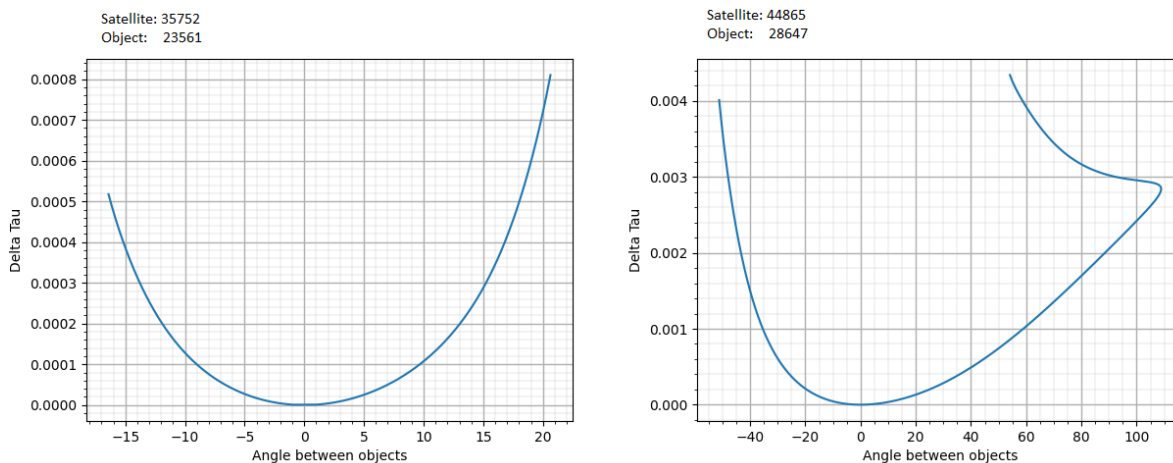


Рисунок 3 – Зависимость задержки сигнала от угла между объектами

Заключение

При просветной бистатической радиолокации (рассеяние «вперед» на теневом контуре объекта) сигнал от объекта, находящегося близко к линии «передатчик-приемник», на два-три порядка, больше рассеянного назад. Рассматриваемое в данной работе использование широкополосных (квазишумовых) зондирующих сигналов навигационных космических аппаратов (КА) в диапазоне 1,6 ГГц подразумевает корреляционную обработку данных в отличие от монохроматических зондирующих сигналов. Такая методология отработана в радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами (РСДБ). Основная измеряемая величина

— пространственная задержка между опорным сигналом от КА и сигналом, рассеянным объектом. Из-за близкого расстояния от линии «передатчик-приемник» задержка может быть близка к нулю, что затруднит обработку. Проведено математическое моделирование задачи оценки задержки прохождения сигнала, отражённого от фрагментов космического мусора на околоземной орбите. Изучен характер изменения задержки сигнала при одновременном сложном криволинейном движении как источника сигнала, так и облучаемого объекта в трёхмерном пространстве.

Показало, что в большинстве случаев характер изменения задержки далёк от идеального. Причиной тому является изменение траектории движения объекта относительно спутника, например, его повторное приближение к нему. Таким образом, учёт возможности подобных изменений в дальнейших экспериментах позволит более корректно трактовать получаемые результаты и даст возможность улучшить планирование экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки: госзадание FSWR-2023-0038.

Список литературы:

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. Москва: Радио и связь, 1993.
2. Дугин Н.А., Тихомиров Ю.В., Антипенко А.А., Чагунин А.К., Нечаева М.Б. // II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2018» (в рамках «VIII Всероссийских Армандовских чтений»). 2018. Муром. Труд. (электр.). С.463-468.
3. Дугин Н.А. Возможности бистатических радиолокационных систем в решении задачи обнаружения потенциально опасных небесных тел / Дугин Н.А., Нечаева М.Б., Безруков В.В. // Известия вузов. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 12. – С. 994–1003.
4. Кирюшкин В. В. Бистатическая локация воздушных целей сигналами спутниковых радионавигационных систем / В.В. Кирюшкин, Д.А. Черепанов. – Текст: электронный // Вестник ВГУТ. – 2010. – №11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bistaticheskaya-lokatsiya-vozdushnyh-tseley-signalami-sputnikovyh-radionavigatsionnyh-sistem> (дата обращения: 30.10.2023).

