



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2026.1.8>

УДК 520.874.3
ББК 22.63

Дата поступления статьи: 30.10.2025
Дата принятия статьи: 02.12.2025



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РАДАРНОЙ АСТРОНОМИИ¹

Владимир Дмитриевич Захарченко

Доктор технических наук, профессор кафедры радиофизики,
Волгоградский государственный университет
zakharchenko_vd@mail.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Илья Геннадьевич Коваленко

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры
теоретической физики и волновых процессов,
Волгоградский государственный университет
i.kovalenko@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1565-8940>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Цитирование: Захарченко В. Д., Коваленко И. Г. Перспективные методы и средства радарной астрономии // Математическая физика и компьютерное моделирование. 2026. Т. 29, № 1. С. 87–107.

DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2026.1.8>

Citation: Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G. Promising Methods and Tools of Radar Astronomy. *Mathematical Physics and Computer Simulation*, 2026, vol. 29, no. 1, pp. 87–107.

DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2026.1.8>

Аннотация. Представлен обзор современного состояния и перспектив развития радарной астрономии. Радиолокационные методы зондирования астероидов могут быть использованы при осуществлении мониторинга не только околоземного пространства (дистанции $\sim 10^6$ – 10^7 км), но потенциально и дальнего космоса с расстояниями на порядок большими. Рассматривается метод преобразования

временного масштаба сигнала, который позволяет получать детальный радиолокационный портрет астероида. Приведена оценка максимального разрешения скорости вращения астероида при использовании закрученных радиосигналов в том случае, когда вращение происходит в картинной плоскости и реализуется поперечный эффект Доплера. Показано, что выигрыш в точности измерения может составлять величину $\sim 10^4$ раз. Такой выигрыш в точности позволяет селектировать медленно вращающиеся астероиды с частотами вращения вплоть до величин $\sim 2.2 \text{ сутки}^{-1}$. При этом использование закрученных радиосигналов дает возможность измерять угловую скорость вращения астероида в режиме моноимпульсной локации в течение минут или десятков секунд без продолжительной регистрации его кривой блеска.

Ключевые слова: малые тела Солнечной системы, радиолокационная астрономия, широкополосные сигналы, закрученные радиосигналы, стробоскопическая обработка сигнала.

Введение

Исследование строения малых небесных тел является одним из магистральных направлений в изучении Солнечной системы в последние десятилетия. К сожалению, до сих пор количество объектов в главном поясе астероидов с изученным(ой) рельефом или хотя бы формой поверхности крайне мало ввиду несовершенства используемых средств. Исследования дальних астероидов в настоящее время возможны только с борта АМС, что ограничивает изучение одним-двумя объектами в рамках отдельной миссии. Повышение дальности и разрешающей способности средств наблюдения радарной астрономии позволит значительно раздвинуть горизонты изучаемой части Солнечной системы.

На данный момент характерные показатели радиолокационного разрешения астероидов составляют $\sim 7,5 \text{ м}$ на дальности $\sim 7 \text{ млн км}$ [36; 37] и $\sim 3,75 \text{ м}$ на дальности $< 4 \text{ млн км}$ [38]. Ключевым рубежом для радарной астрономии является достижение границы в $\sim 200 \text{ млн км}$, которое позволит достичь главного пояса астероидов и тем самым на несколько порядков увеличить число изучаемых объектов, при этом будут кардинально снижены затраты в расчете на один исследуемый объект. Кроме того, использование радарной астрономии дает возможность расширить арсенал методов изучения малых небесных тел из главного пояса астероидов.

Для увеличения дальности работы средств радарной астрономии необходимо повышение мощности излучаемых сигналов, что требует вывод этих средств за пределы атмосферы и ионосферы. Использование фазированных антенных решеток за счет распределения мощности по апертуре антенны позволит существенно увеличить суммарную мощность, излучаемую антенной. Фазированные антенные решетки позволяют значительно повысить скорость обзора пространства за счет электронного управления лучом. Отсутствие механических элементов даст возможность повысить надежность средств наблюдения наряду с увеличением апертуры антенны.

Попытаемся оценить возможности увеличения радиуса действия космических радиолокационных средств в недалеком будущем, исходя из современного уровня техники, перспективных разработок и прогнозов развития на ближайшее десятилетие. В наших оценках мы будем руководствоваться представлением позиционирования радиолокацион-

ных средств за пределами атмосферы (орбитальная или расположенная на поверхности Луны платформа).

Здесь следует отметить некоторые ограничения, встающие на пути экспансии радиолокационных методов в изучении дальнего Космоса. Ограничения подразделяются на фундаментальные и технологические.

Фундаментальное ограничение определяется конечными размерами антенных систем (дифракционный предел). К числу технологических ограничений, в частности, относятся:

- ограничение по возможности излучения высокой мощности для наземных систем (пробивная напряженность воздуха составляет ~ 30 кВ/см);
- чувствительность приемных устройств ограничена естественными шумами аппаратуры при ненулевой абсолютной температуре;
- возможности накопления принимаемых сигналов с большой дальности ограничена конечным интервалом когерентности источников опорных колебаний [21].

Мы рассчитываем, что со временем эти проблемы могут быть решены.

Спектральная трансформация отраженных сигналов позволяет надеяться на получение детальных радиолокационных портретов малых небесных тел [46]. Это расширяет номенклатуру их геометрии, форм и рельефа поверхности. Под радиолокационным портретом понимается отраженный сигнал, полученный в режиме сверхразрешения при зондировании короткими (наносекундными) импульсами [18]; определение понятия сверхразрешения будет дано ниже. Без трансформации временного масштаба получить радиолокационный портрет весьма проблематично. В этой связи значительный интерес представляют методы спектральной трансформации отраженных радиолокационных сигналов при разрешении по дальности в 0.1–1 м. Стробоскопические методы преобразования широкополосных сигналов позволяют это сделать. Они обменивают разрешающую способность по дальности на время наблюдения. Практическая реализация получения радиолокационных портретов требует периодичности зондирующих сигналов и относительной «стабильности» цели (например, малого смещения в картинной плоскости за характерное время экспозиции в десятки секунд). На данном этапе развития технологий выполнение указанных требований вполне достижимо.

Тенденция расширения области применения широкополосных сигналов, особенно в системах радиолокации (РЛС) ближнего радиуса действия ($\lesssim 1$ млн км) с высоким разрешением, определяет актуальность проблемы исследования методов обработки сигналов в каналах этих систем.

Основные результаты в прикладной электродинамике, являющейся базой для разработки методов анализа РЛС со сложными широкополосными сигналами, связаны с применением аппарата теории линейных динамических систем, начало которому положили работы Кенно и Моффата [13; 33; 42]. Выявление фундаментальной связи между импульсной, переходной и другими характеристиками рассеяния объекта и его формой, размерами и ориентацией, позволили на качественно новом уровне ставить и решать задачу определения параметров отражающего объекта по рассеянному электромагнитному полю [5]. Эта задача является наиболее общей среди других задач радиолокационного наблюдения.

Разработка принципа пространственно-временной эквивалентности позволила рассматривать цель и антенные системы как обобщенные фильтры, характеристики которых определяются пространственной структурой объекта и временной структурой сиг-

нала. Задачи, решаемые с помощью РЛС (обнаружение, измерение параметров положения и движения, идентификация, классификация и распознавание целей), сводятся к измерению характеристик электромагнитного поля, рассеянного целью; это позволяет рассматривать РЛС как измерительную систему [5]. Повышение точности измерений обуславливает использование моделей сложных целей, среди которых выделяют пространственно-распределенные и сосредоточенные цели. Режим радиолокационного наблюдения, при котором отклики рассеивающих центров цели регистрируются отдельно, называют «сверхразрешением» [24]. Модели целей, справедливые при использовании сверхразрешения, являются обобщенными, то есть допускают в частном случае получение традиционных моделей радиолокационных характеристик, определяемых при монохроматическом сигнале.

Строгие решения электродинамических задач, позволяющие аналитически определять радиолокационные характеристики, известны лишь для ограниченного числа тел простой формы. На практике широко используются приближенные методы решения задач рассеяния и экспериментальные измерения на натурных моделях [4; 7; 8; 24].

Отражающий объект может быть описан временной характеристикой $h(t)$, аналогичной импульсной характеристике линейной цепи и инвариантной к зондирующим сигналам [13; 19; 44]. При таком определении отраженный сигнал $s(t)$ связан с зондирующим $x(t)$ простым соотношением (интегралом Дюамеля):

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \xi)x(\xi)d\xi. \quad (1)$$

Индивидуальный характер импульсных характеристик позволяет использовать их для решения задач распознавания целей [3; 39; 41].

При любом виде широкополосных радиосигналов задача измерения радиолокационных характеристик в диапазоне частот, достигающем сотен мегагерц-десятков гигагерц, связана с необходимостью регистрации и обработки процессов в нано- и пикосекундных интервалах времени. Для обеспечения обработки сигналов такой длительности требуется применение масштабно-временных преобразований с коэффициентом трансформации временного масштаба $q = 10^2 - 10^3$ и соответствующее увеличение времени анализа [11].

Стробоскопические методы спектральной трансформации, получившие широкое распространение в измерительной технике, позволяют сравнительно простыми техническими средствами согласовать частотный диапазон широкополосных радиосигналов с возможностями анализирующей аппаратуры [12]. Основным ограничением использования этих методов является требование к периодичности исследуемых сигналов на интервале наблюдения, однако в большинстве практических задач выполнение этого условия не представляет сложности. Временное квантование, присущее этим методам, хорошо сочетается с принципами цифровой обработки, что позволяет использовать стробоскопические методы при цифровой обработке на ЭВМ радиолокационных портретов.

Потенциальные возможности методов стробоскопической трансформации наиболее полно реализуются в осциллографической технике. На рисунке 1 приведены для сравнения параметры аналоговых и стробоскопических осциллографов некоторых отечественных и зарубежных фирм (Tektronix, Hewlett-Packard, Iwatsu) по данным на вторую половину 2000-х годов.

Как видно из рисунка, соответствующее произведение $S\Delta f$ у стробоскопических приборов в $10^2 - 10^4$ раза выше, чем у обычных аналоговых и с трубкой бегущей волны (ТБВ).

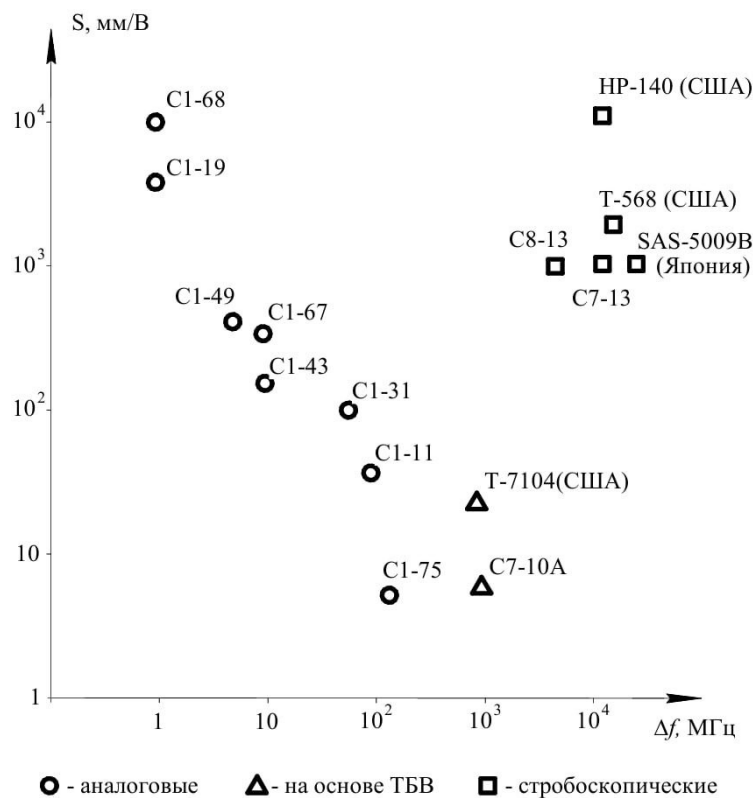


Рис. 1. Параметры аналоговых осциллографических приборов, приборов на основе трубок бегущей волны и стробоскопических приборов: Δf (МГц) — полоса пропускания; S (мм/В) — чувствительность по экрану [10]

Возможность стробоскопической обработки модулированных сигналов путем стробирования их короткими радиоимпульсами получила развитие в работах А.И. Найденкова и Б.А. Челнокова [15–17; 22; 23]. Компрессия спектра огибающей сигнала за счет эффекта стробоскопической трансформации (в современных устройствах в 10^4 – 10^6 раз) позволяет многократно увеличить разрешающую способность по частоте (скорости), не ухудшая при этом временной разрешающей способности (по дальности). С повышением разрешения, как правило, возрастает стабильность отраженного сигнала, что связано с сокращением числа интерферирующих «блестящих точек» в элементе разрешения [6; 39]. Эти возможности и определяют место методов когерентной стробоскопической обработки в современных системах радиолокации.

Новые возможности в радиолокации открывают технологии применения закрученных радиолучей (сингулярной оптики) для повышения разрешающей способности. Под закрученным лучом понимается световой пучок, обладающий ненулевым орбитальным угловым моментом.

Зондирование вихревыми пучками применяется, например, в гидролокации и при создании эффективных подводных акустических средств связи [31], в оптическом исследовании атмосферы с помощью лидаров и разработке средств надежной оптической связи в турбулентной атмосфере [29; 35].

Предполагается, хотя это и не подтверждено строгими математическими доказательствами, что такое зондирование обладает большей помехоустойчивостью [25]. Устройства, необходимые для формирования скрученных волн, — вихревые маски — в свою очередь используются для блокировки бликов ярких объектов в вихревых коро-

нографах; подобные коронографы применяются для обнаружения экзопланет [26].

Имеются сообщения о создании прототипов радиоантенн с пространственными модуляторами электромагнитного излучения для генерации многомодовых вихревых пучков [30]. В радиодиапазоне использование вихревых пучков открывает качественно новые возможности при зондировании вращающихся целей. Зондирование волнами с ненулевым орбитальным моментом принципиально позволяет определить скорость вращения космического тела, ось вращения которого сонаправлена с лучом зрения, так что продольный эффект Доплера отсутствует [28]. В перспективе следует ожидать повышения разрешения в картинной плоскости, а также повышение отношения сигнал-шум при измерении параметров отраженного сигнала и получение более точных оценок скорости вращения объекта.

1. Оценка максимальной дальности зондирования при современном уровне техники генерации СВЧ-сигналов

Основное уравнение радиолокации связывает излучаемую и принимаемую мощности с дальностью и отражательной способностью цели [32]

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{G_1}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot \frac{G_2 \lambda^2}{4\pi}, \quad (2)$$

где P_1 — мощность сигнала, излучаемого передающей антенной; P_2 — мощность отраженного сигнала в приемной антенне; G_1, G_2 — соответственно коэффициенты усиления передающей и приемной антенн; σ — эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) цели; R — расстояние от РЛС до цели; λ — длина волны колебаний. При использовании одной антенны на передачу и прием $G_1 = G_2 = G$; этот вариант представляется наиболее перспективным, поскольку отпадает необходимость дополнительной юстировки передающей и приемной антенн. Для апертурных СВЧ-антенн коэффициент усиления связан с эффективной площадью раскрытия A антенны соотношением [40]:

$$G = 4\pi \frac{A}{\lambda^2}. \quad (3)$$

С учетом изложенного соотношение (2) примет вид:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{R^4} \cdot \frac{A}{4\pi \lambda^2} \sigma. \quad (4)$$

Если ввести минимальную мощность сигнала, регистрируемую приемником $P_2 = P_{\min}$, то основное уравнение (4) можно разрешить относительно максимальной дальности:

$$R_{\max} = \left(\frac{A}{4\pi \lambda^2} \sigma \frac{P_1}{q P_{\min}} \right)^{1/4}. \quad (5)$$

Здесь q — отношение сигнал-шум на выходе приемника РЛС на максимальной дальности. Для задачи обнаружения эта величина может составлять $q \sim 1$; для задач измерения параметров необходимо обеспечить $q \gtrsim 10$. Отношение $P_1/P_{\min}$ называется *энергетическим потенциалом* РЛС.

Величину P_1 оценим исходя из перспективных разработок релятивистских СВЧ генераторов значением в десятки ГВт [2; 27]. Такие мощности могут быть реализованы при

использовании радиолокационных станций космического базирования далеко за пределами ионосферы, например, на геостационарной орбите или на Луне, с использованием фазированных антенных решеток.

Еще в 70-х гг. прошлого столетия проводились эксперименты с релятивистскими электронными потоками в СВЧ приборах мощностью до 1 ГВт [27]. В последующих мощных импульсных СВЧ генераторах, использующих энергию релятивистских электронов, уже к 90-м гг. была достигнута мощность ~ 10 ГВт при наносекундной длительности импульсов [2; 9; 27]. Приборы с такими мощностями актуальны и в настоящее время, хотя работы по увеличению мощности ведутся.

Величину $P_{\min}$ можно оценить, используя чувствительность в Янских (Jy), эффективную площадь антенны A и ширину полосы пропускания приемника ΔF :

$$P_{\min} = Jy \times A \times \Delta F. \quad (6)$$

Высокой чувствительностью в современных приемниках космического радиоизлучения считается величина $\lesssim 10 \mu Jy$. Например, на массиве радиотелескопов SKA в сверхглубоких обзорах неба планируется достичь чувствительности $0,04 \mu Jy$ [43].

Полоса частот сигнала ΔF определяет разрешение по дальности $\delta R \sim 0,5 c / \Delta F$, откуда

$$\Delta F = P_{\min} \sim 0,5 c / \delta R. \quad (7)$$

Таким образом,

$$R_{\max} = \left(\frac{A}{4\pi\lambda^2} \sigma \frac{P_1}{qJy} \frac{2\delta R}{c} \right)^{1/4}. \quad (8)$$

ЭПР астероида можно оценить выражением $\sigma \approx \alpha \pi L^2 / 4$, где α – радиолокационное альbedo; L – поперечный размер астероида.

Примеры расчета:

Площадь раскрыва антенны	$A = 1\,000 \text{ м}^2$.
Размер астероида	$L = 50 \text{ м}$.
Альbedo	$\alpha = 0,5$.
Длина волны	$\lambda = 3 \text{ см}$.
Чувствительность	$Jy = 10 - 0,01 \text{ мЯн}$.
Разрешение по дальности	$\delta R = 10\,000 \text{ м}$ (обнаружение), $\delta R = 5,0 \text{ м}$ (измерение параметров).

Режим обнаружения:

$q = 10$; $\delta R = 10\,000 \text{ м}$; $\Delta F = 15 \text{ kHz}$; $F_0 = 10 \text{ GHz}$; $A = 1\,000 \text{ м}^2$; $L = 50 \text{ м}$.

Значения дальности при заданных значениях чувствительности приемника и излучаемой мощности даны во втором-пятом столбцах приведенных ниже таблиц.

Таблица 1

Моноимпульсное зондирование ($N = 1$)

Чувствительность Мощность, ГВт	1.0 мJy, млн км	0.1 мJy, млн км	0.01 мJy, млн км	0.001 мJy, млн км
$P_1 = 1.0$	15.51	27.58	49.05	87.22
$P_1 = 10.0$	27.58	49.05	87.22	155.10
$P_1 = 100.0$	49.05	87.22	155.10	275.84

Таблица 2

Зондирование пачкой импульсов (используется накопление) ($N = 1\,000$)

Чувствительность Мощность, ГВт	1.0 мJy, млн км	0.1 мJy, млн км	0.01 мJy, млн км	0.001 мJy, млн км
$P_1 = 1.0$	87.22	155.10	275.81	490.47
$P_1 = 10.0$	155.10	275.81	490.47	877.20
$P_1 = 100.0$	275.81	490.47	877.20	1551.20

Режим измерения параметров:

$q = 100$; $\delta R = 5$ м; $\Delta F = 30$ МГц; $F_0 = 10$ ГГц; $A = 1\,000$ м²; $L = 50$ м.

Таблица 3

Моноимпульсное зондирование ($N = 1$)

Чувствительность Мощность, ГВт	1.0 мJy, млн км	0.1 мJy, млн км	0.01 мJy, млн км	0.001 мJy, млн км
$P_1 = 1.0$	1.30	2.32	4.12	7.33
$P_1 = 10.0$	2.32	4.12	7.33	13.04
$P_1 = 100.0$	4.12	7.33	13.04	23.19

Таблица 4

Зондирование пачкой импульсов (используется накопление) ($N = 1\,000$)

Чувствительность Мощность, ГВт	1.0 мJy, млн км	0.1 мJy, млн км	0.01 мJy, млн км	0.001 мJy, млн км
$P_1 = 1.0$	7.33	13.04	23.19	41.24
$P_1 = 10.0$	13.04	23.19	41.24	73.34
$P_1 = 100.0$	23.19	41.24	73.34	130.43

2. Нарушение когерентности сигнала вследствие дисперсии в космической плазме

Наряду с ограничением дальности работы радиолокационных систем мощностью излучения, использование когерентных методов приема широкополосных радиосигналов наталкивается на фундаментальные ограничения по фазовой стабильности используемых сигналов при достижении максимальных разрешения и дальности.

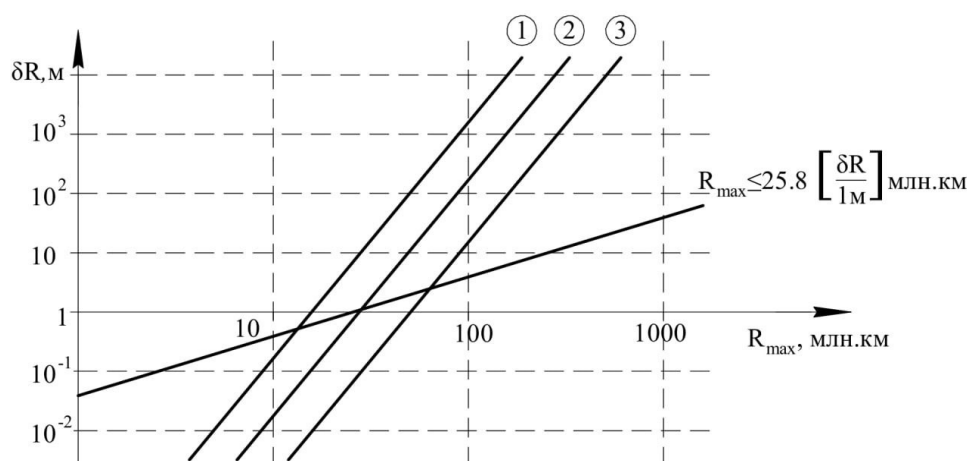


Рис. 2. Теоретический предел разрешения в зависимости от дальности зондирования. Мощность в импульсе: 1.0 ГВт (1); 10.0 ГВт (2); 100.0 ГВт (3). Непронуемрованной линией показано ограничение вследствие дисперсии радиоимпульса в космической плазме [21]

Для характерных значений плазменной частоты в околоземной части пространства и частоты зондирующего сигнала существует связь между допустимыми дальностью и разрешением, обусловленная расплыванием радиоимпульса вследствие дисперсии в космической плазме [21]. Расчеты дают ограничение на дальность при заданном линейном разрешении δr вдоль луча зрения (рис. 2):

$$R = 25.8 \left(\frac{\delta R}{l_m} \right) \text{ млн км.} \quad (9)$$

Пример расчета:

Площадь раскрыва антенны	$A = 1\,000\text{ м}^2$.
Размер астероида	$L = 50\text{ м}$.
Альбедо	$\alpha = 0.5$.
Длина волны	$\lambda = 3\text{ см}$.
Чувствительность	$Jy = 0.01\text{ мЯн}$.
Отношение сигнал/шум	100.
Накопление	$N = 1\,000$.

3. Стробоскопическая локация с использованием сложных сигналов

Применение сложных зондирующих сигналов с различными видами модуляции весьма эффективно при анализе отражающих свойств как пространственно-распределенных объектов, так и неоднородностей СВЧ-тракта передачи, идентифицируемых методами импульсной рефлектометрии. При наличии периодичности в последовательности сигналов, их регистрацию и обработку можно осуществлять стробоскопическими методами, позволяющими наряду с трансформацией временного масштаба реализовать когерентное накопление.

Рассмотрим математическую модель когерентной стробоскопической обработки в задачах локации (рис. 3), используя комплексное представление зондирующего $s(t)$ и опорного $a(t)$ сигналов.

Стробоскопический преобразователь (рис. 3) представляет собой коррелятор разностной частоты, осуществляющий перемножение периодического входного сигнала на последовательность стробирующих импульсов

$$y(t) = \frac{1}{2}s(t)a^*(t), \quad (10)$$

где $x(t)$ — зондирующий сигнал с периодом T , $h(t)$ — импульсная характеристика зондируемого объекта, $s(t)$ — принятый отраженный сигнал, $a(t)$ — стробирующий сигнал с периодом T_1 , $T_1 = T + \Delta T$, где шаг считывания $\Delta T \ll (T, T_1)$.

При обработке периодической последовательности радиоимпульсов $s(t)$ последовательность $a(t)$ также представляет собой периодические радиоимпульсы:

$$s(t) = \sum_{k=0}^N A(t - kT)e^{j\omega_0 t}, \quad a(t) = \sum_{k=0}^N A_1(t - kT_1)e^{j\omega_1 t}, \quad (11)$$

где $A(t)$, $A_1(t)$ — комплексные огибающие сигналов, финитные на интервалах $[0, \tau_0]$ и $[0, \tau_1]$, соответственно, ω_0 , ω_1 — несущие частоты радиоимпульсов, причем $\omega_0 - \omega_1 = \Omega \ll (\omega_0, \omega_1)$, $T_1 = T(1 + 1/N)$, $N \gg 1$.

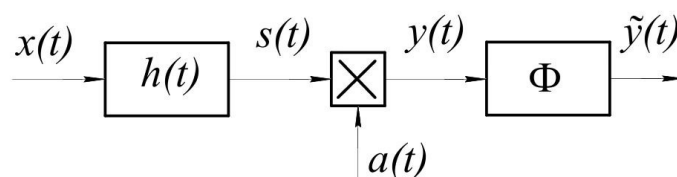


Рис. 3. Стробоскопическая локация с использованием сложных сигналов: $h(t)$ — импульсная характеристика объекта, Φ — узкополосный фильтр

Периодические последовательности (11) будем считать когерентными на интервале наблюдения $t \in [0, NT]$. Строб $A_1(t)$ выбирается много короче исследуемого радиоимпульса $s(t)$. Относительное смещение строба $k\Delta T$ внутри периода зондирования T обеспечивается схемой автосдвига [16] и определяется требуемой величиной трансформации спектра N . При этом можно показать [10], что выходной сигнал стробоскопической системы локации (рис. 3) в окрестности разностной частоты несущих $\Omega = \omega_0 - \omega_1$ асимптотически (при $N \rightarrow \infty$) узкополосен и описывается соотношением

$$\tilde{y}(\tau) \sim \frac{e^{j\Omega\tau}}{T} \int_{-\infty}^{\infty} B(t) h\left(\frac{\tau}{N} - t\right) e^{-j\omega_0(\frac{\tau}{N} - t)} dt, \quad (12)$$

где $B(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} A(t') A_1(t' - t) dt$ — комплексная огибающая функции взаимной корреляции зондирующего и опорного (стробирующего) радиосигналов. Результат перемножения обрабатывается узкополосным фильтром Φ на разностной частоте Ω .

Это позволяет сделать вывод, что для повышения энергетического потенциала при сохранении высокой разрешающей способности стробоскопической РЛС, как и в обычных системах, целесообразно применение сложных сигналов (чирп-сигналов и фазоманипулированных последовательностей). При использовании одностипных формирователей зондирующего и стробирующего сигналов, элемент разрешения по дальности стробоскопической системы будет определяться функцией автокорреляции используемых сигналов, в то время как полоса частот выходного сигнала может быть сужена до любой требуемой величины соответствующим выбором коэффициента спектральной трансформации N .

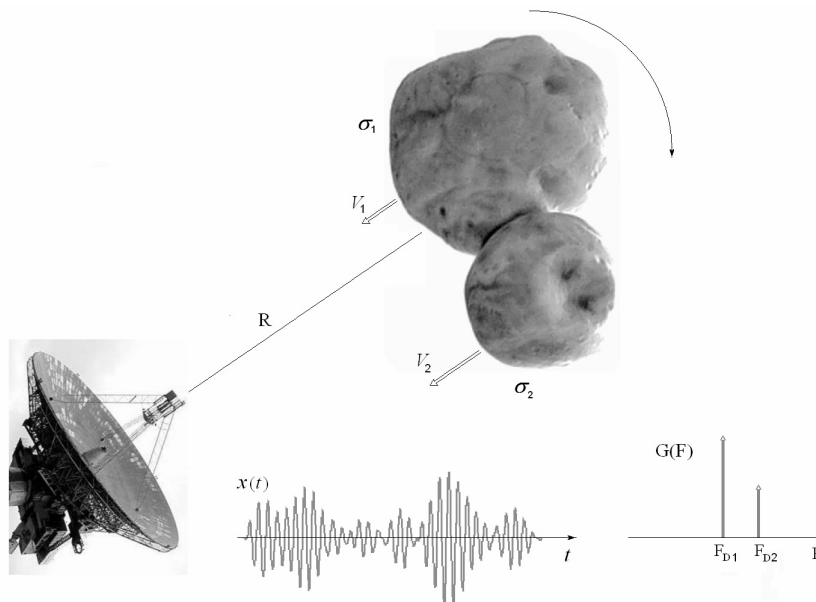


Рис. 4. Пример локационного зондирования контактно-двойного астероида. Здесь $\sigma_{1,2}$ — ЭПР локальных участков отражения на объекте; $G(F)$ — сигнал на выходе канала частоты

В частности, при наличии множества точек локального отражения («блестящих точек») и вращения объекта (см. рис. 4) модель импульсной характеристики будет пред-

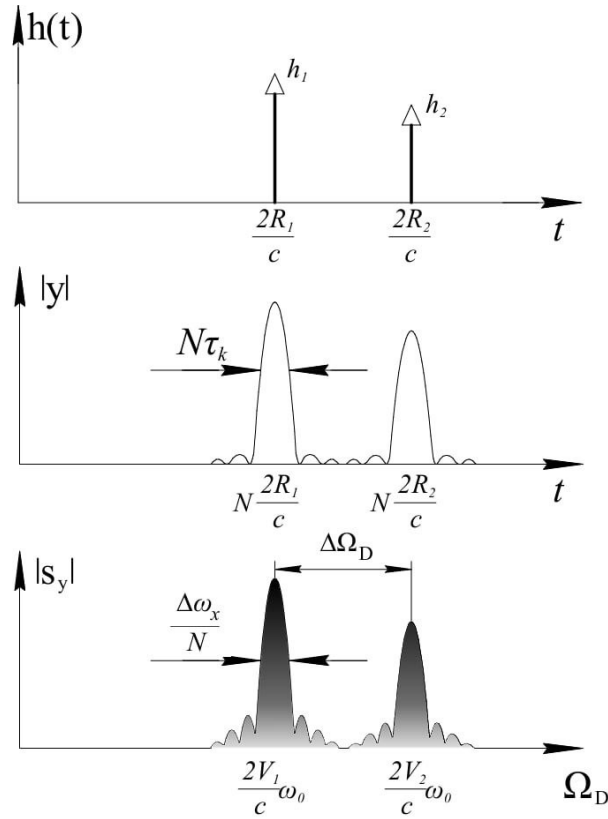


Рис. 5. Импульсная характеристика, радиолокационный портрет цели и спектр преобразованного сигнала

ставлена суперпозицией отражений $\{h_i\}$

$$h(t) = \sum_i^n h_i \delta(t - t_i), \quad t_i = \frac{2R_i}{c}, \quad (13)$$

и соотношение (12) будет иметь вид:

$$\tilde{y}(\tau) = \frac{e^{j\Omega\tau}}{T} \sum_i^n B\left(\frac{\tau - t_i}{N}\right) h_i e^{j\phi_i}. \quad (14)$$

Огибающая сигнала, выделяемая амплитудным детектором в случае разрешения целей, показана на рисунке 5.

Учет эффекта движения локальных участков отражения приведет к доплеровскому сдвигу на величину $\Omega_{di} = 2V_i\omega_0/c$ для каждой «блестящей точки» объекта:

$$\tilde{y}(\tau) = \frac{e^{j\Omega\tau}}{T} \sum_i^n B\left(\frac{\tau - t_i}{N}\right) h_i e^{j(\Omega_{di}\tau + \phi_i)}. \quad (15)$$

Заметим, что при стробоскопическом преобразовании доплеровский сдвиг трансформации не подвергается и может быть измерен частотомером в канале частоты.

В канале дальности мы получаем радиолокационный портрет объекта. Оба этих канала независимы и допускают одновременное измерение указанных параметров (см. рис. 6).

Таким образом, сжатый по спектру в N раз на разностной частоте Ω сигнал может быть использован для разрешения близких целей по скорости при спектральном анализе, поскольку в схеме радиоимпульсного стробирования доплеровские сдвиги несущей частоты трансформации не подвергаются. Роль анализатора спектра может выполнять ЭВМ, использующая быстрые алгоритмы спектрального анализа (например, БПФ).

Приведенные радиолокационный портрет и спектр соответствуют примеру локационного зондирования астероида сложной формы (см. рис. 4). Астероид может иметь несколько центров отражения, вращение, при этом доплеровские сдвиги от локальных участков отражения могут быть разными.

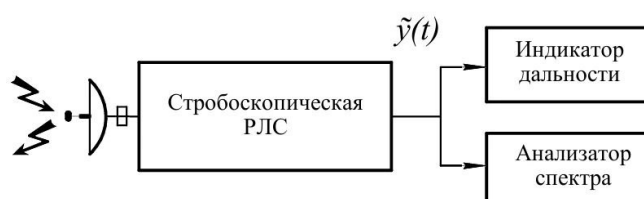


Рис. 6. Функциональная схема РЛС со сверхвысоким разрешением

Подведем итоги.

1. Адекватная трансформация временного масштаба комплексной огибающей узкополосных СВЧ-сигналов в схеме радиоимпульсного стробирования возможна лишь при наличии достаточно короткого радиостроба. Потенциальные возможности повышения разрешающей способности стробоскопических РЛС определяются только корреляционными свойствами опорных сигналов и практически ограничиваются быстродействием схем их формирования.

2. Для повышения энергетического потенциала при сохранении высокой разрешающей способности в стробоскопической РЛС, как и в обычных системах, целесообразно применение сложных сигналов (сигналов с частотной модуляцией и фазоманипулированных последовательностей).

3. При использовании однотипных формирователей зондирующего и стробирующего сигналов разрешение по дальности стробоскопической системы будет определяться функцией автокорреляции используемых сигналов, в то время как полоса частот выходного сигнала может быть сужена до любой требуемой величины соответствующим выбором коэффициента спектральной трансформации N . Сжатый по спектру сигнал стробоскопической РЛС может быть использован для разрешения близких целей по скорости при спектральном анализе, поскольку доплеровские сдвиги несущей частоты трансформации не подвергаются.

4. Оценка максимального разрешения скорости вращения астероидов при использовании закрученных сигналов

В своих оценках исходим из того факта, что частота — самый высокоточно измеряемый параметр (точность эталона $\sim 10^{-17}$) в метрологии.

Методика измерения с помощью закрученных радиоволн частоты вращения объекта, ось вращения которого сонаправлена с лучом зрения, имеет тот же первый порядок

по величине v/c , что и продольный эффект Доплера [28]. Это позволяет производить измерения, существенно более точные по сравнению с традиционными измерениями доплеровского смещения при поперечном эффекте Доплера, который характеризуется вторым порядком по отношению v/c и потому вызывает серьезные трудности при регистрации.

Согласно [28], отраженный от вращающейся с частотой f_0 поверхности закрученный световой сигнал при нормальном падении и регистрации при обратном рассеянии испытывает колебания интенсивности (модуляцию интенсивности) с частотой

$$F = 2|l|f_0. \quad (16)$$

Здесь l — топологический заряд зондирующего пучка. В экспериментах с лазерным излучением авторы [28] использовали моды $|l| \sim 20$.

Поперечный эффект Доплера при существенно нерелятивистских скоростях может быть сведен к зависимости

$$\frac{\Delta f}{f_s} = \frac{v^2}{2c^2}, \quad (17)$$

где Δf — доплеровский сдвиг; f_s — частота зондирующего сигнала; v — максимальная линейная скорость точек поверхности, расположенных на периферии тела вращения. Для частоты f_0 вращения тела имеем

$$v = 2\pi f_0 r, \quad (18)$$

где r — радиус тела.

Сравним оба метода по точности детектирования минимальной частоты f_0 . В этом случае общей задачей служит селекция сверхнизких частот: в первом методе — величины F , во втором — Δf . Возможности разрешения по частоте определяются не физическими ограничениями, а технологическими, в первую очередь стабильностью эталонов частот. Рекордное значение разрешения продемонстрировано в проекте NASA по определению сверхнизкочастотных составляющих модулированного рентгеновского сигнала из скопления галактик Персей А с помощью телескопа Chandra. Группе исследователей удалось выявить сверхнизкочастотную составляющую колебаний с частотой $f_{\min} = 1.66 \cdot 10^{-15}$ Гц [34]. В качестве эталона точности возьмем радионавигационные системы на спутниках ГЛОНАСС, на борту которых установлены атомные стандарты частоты с относительной нестабильностью $3 \cdot 10^{-13}$ для цезиевых и $12 \cdot 10^{-13}$ для рубидиевых эталонов [20]. Для используемых в навигационной системе сигналов с несущей частотой 1600 МГц погрешность составляет $f_{\min} = (5 - 20) \cdot 10^{-4}$ Гц.

Фиксируем в обоих методах $F = \Delta f = f_{\min}$.

Из (16) вытекает, что для метода с применением закрученных радиоволн минимально регистрируемое значение частоты вращения f_0 равно

$$f_0 = \frac{F}{2|l|}. \quad (19)$$

Для $|l| = 20$ и $F = f_{\min} = 10^{-3}$ Гц получаем $f_0 = 2.5 \cdot 10^{-5}$ Гц.

Собирая (17) и (18), выводим аналогичное значение для традиционных методов измерения доплеровского сдвига при поперечном эффекте

$$f_0 = \frac{c}{2\pi r} \sqrt{\frac{2\Delta f}{f_s}}. \quad (20)$$

Полагая $r = 100$ м, $f_s = 10^{10}$ Гц и $\Delta f = f_{\min} = 10^{-3}$ Гц, находим $f_0 = 0.2$ Гц, что в $9 \cdot 10^3$ менее точно, чем в методе закрученных пучков. Таким образом, зондирование с помощью закрученных пучков позволяет селективировать более медленно вращающиеся астероиды с частотами вращения вплоть до величин ~ 2.2 сутки $^{-1}$.

Мы рассматриваем этот результат как принципиально новый в радиолокационной астрономии. В отличие от используемых в практике длительных последовательностей сигналов, позволяющих восстановить угловую скорость вращения астероидов по полученным кривым блеска, наш подход позволяет чрезвычайно быстро находить искомую кинематическую характеристику астероидов в режиме моноимпульсной локации. Для сравнения, регистрация кривой блеска астероидов, как правило, занимает часы или многие сутки, в то время как импульсная локация позволяет получить результат за минуты или десятки секунд.

Для повышения точности измерения закрутки тел с помощью радиоволн с орбитальным угловым моментом следует использовать гармоники высокого порядка с большими значениями топологического заряда $l \gtrsim 10$. Однако из расчетов и экспериментов по распространению волн терагерцового диапазона в земной атмосфере [1; 14] известно, что атмосферная турбулентность может вносить заметные искажения в структуру волнового пучка, разрушая вихри высокого порядка. Исследования по изучению влияния атмосферы на закрученные волны гигагерцового диапазона, по всей видимости, еще не проводились, тем не менее, есть основания полагать, что поглощение молекулами и рассеяние на турбулентных вихрях в интересующем нас диапазоне частот 1–10 ГГц не должно быть существенным [32; 45].

Заключение

Современные технологии развития СВЧ-генераторов дают возможность начать разработку РЛС мощностью до 10 ГВт [27], что позволяет рассчитывать на радиолокационные исследования небесных тел в главном поясе астероидов с орбиты Земли или с лунной поверхности. Внедрение стробоскопических методов регистрации сигналов в технологии радарной астрономии дает возможность регистрировать радиолокационные портреты с высоким разрешением (до 0.5 м). Применение закрученных радиосигналов позволяет измерять с высокой точностью угловые скорости вращения астероидов, что выгодно отличает данный метод от традиционного (измерение доплеровского уширения) в случае вращения небесного тела в картинной плоскости — в ситуации, когда доплеровское уширение ничтожно мало. Для типовых частотомеров выигрыш в точности может составлять $\sim 10^4$ раз. Зондирование с помощью закрученных пучков позволяет селективировать медленно вращающиеся астероиды с частотами вращения вплоть до величин ~ 2.2 сутки $^{-1}$.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-20082, <https://rscf.ru/project/25-22-20082/> и за счет средств бюджета Волгоградской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов, В. П. Флуктуации орбитального углового момента лазерного пучка, несущего оптический вихрь, в турбулентной атмосфере / В. П. Аксенов, Ч. Е. Погуца // Квантовая электроника. — 2008. — Т. 38, № 4. — С. 343–348. — DOI: 10.1070/QE2008v038n04ABEH013576
2. Анализ релятивистских генераторов СВЧ излучения большой мощности / А. М. Горбань, А. Ю. Звягинцев, Ю. Ф. Лонин, А. Г. Пономарев // Системы обработки информации. — 2012. — № 5. — С. 7–12.
3. Андреев, Г. А. Формирование радиолокационных изображений на СММ и ММВ / Г. А. Андреев, А. А. Потапов // Зарубежная радиоэлектроника. — 1989. — № 6. — С. 3–34.
4. Астанин, Л. Ю. Методы теоретического и экспериментального исследования нестационарного рассеяния и излучения электромагнитных волн / Л. Ю. Астанин, А. А. Костылев // Зарубежная радиоэлектроника. — 1981. — № 9. — С. 3–27.
5. Астанин, Л. Ю. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений / Л. Ю. Астанин, А. А. Костылев. — М. : Радио и связь, 1989. — 192 с.
6. Атаянц, Б. А. Результаты экспериментального исследования характеристик рассеяния земной поверхностью сигналов наносекундной длительности / Б. А. Атаянц, Э. К. Атаянц, В. Д. Захарченко // XI Всесоюзная конференция по распространению радиоволн : тез. докл. Ч. III. — Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1975. — С. 17.
7. Баум, К. Э. Новые методы нестационарного (широкополосного) анализа и синтеза антенн и рассеивателей / К. Э. Баум // ТИЭЭР. — 1976. — Т. 64, № 11. — С. 53–74.
8. Боровиков, В. А. Геометрическая теория дифракции / В. А. Боровиков, Б. Е. Кинбер. — М. : Связь, 1978. — 247 с.
9. Быстров, Р. П. Электромагнитные системы и средства преднамеренного воздействия на физические и биологические объекты / Р. П. Быстров, В. Г. Дмитриев, А. А. Потапов // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. — 2014. — Т. 6. — № 2. — С. 129–169.
10. Захарченко, В. Д. Методы временного анализа для повышения точности и разрешающей способности систем обработки радиолокационных сигналов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.12.04 / В. Д. Захарченко. — Таганрог : Таганрогский радиотехнический институт, 2002. — 266 с.
11. Захарченко, В. Д. Численное моделирование высотомера малых высот с двойной частотной модуляцией / В. Д. Захарченко, С. В. Захарченко, А. Л. Якимец // Математ. физика и компьютер. моделирование. — 2020. — Т. 23, № 3. — С. 5–11. — DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2020.3.1
12. Захарченко, В. Д. Оценка потенциальной помехоустойчивости стробоскопического преобразователя периодических импульсных сигналов методом численного моделирования / В. Д. Захарченко, А. А. Писанко // Математ. физика и компьютер. моделирование. — 2024. — Т. 27, № 1. — С. 17–25. — DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2024.1.2
13. Кенно, Е. Аппроксимация переходных и импульсных переходных характеристик / Е. Кенно, Д. Моффатт // ТИИЭР. — 1965. — Т. 53, № 8. — С. 1025–1034.
14. Кусков, В. В. Экспериментальное исследование распространения вихревого лазерного излучения в турбулентной атмосфере / В. В. Кусков, Л. О. Герасимова, Р. М. Махманзаров // Оптика атмосферы и океана. — 2025. — Т. 38, № 9. — С. 681–688.
15. Найденов, А. И. Теоретические основы и методы преобразования временного масштаба электрических сигналов / А. И. Найденов // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Радиоизмерительная техника. — 1968. — № 6. — С. 43–51.
16. Найденов, А. И. Трансформация спектра наносекундных импульсов / А. И. Найденов. — М. : Сов. радио, 1973. — 180 с.
17. Найденов, А. И. Дискретизация полосовых сигналов / А. И. Найденов, Б. А. Челноков // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Радиоизмерительная техника. — 1974. — № 4. —

С. 96–102.

18. О возможности оценки геометрических характеристик астероида по радиолокационному портрету / В. Д. Захарченко, И. Г. Коваленко, П. А. Акимов, З. А. Денисов // Математ. физика и компьютер. моделирование. — 2023. — Т. 26, № 4. — С. 69–82. — DOI: 10.15688/мрст.jvolsu.2023.4.6

19. Сиберт, У. М. Цепи, сигналы, системы / У. М. Сиберт. — М. : Мир, 1988. — 336 с.

20. Тяпкин, В. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС / В. Н. Тяпкин, Е. Н. Гарин. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. — 260 с.

21. Фундаментальные ограничения по когерентности зондирующих сигналов в задаче достижения максимальных разрешения и дальности при стробоскопической локации астероидов / В. Д. Захарченко, И. Г. Коваленко, О. В. Пак, В. Ю. Рыжков // Космические исследования. — 2018. — Т. 56, № 3. — С. 209–217. — DOI: 10.1134/S0010952518030085

22. Челноков, Б. А. Линейное преобразование спектра амплитудно-модулированных сигналов / Б. А. Челноков, А. И. Найденов // Радиоэлектроника : тр. науч.-техн. конф. — Каунас, 1970. — Т. 6. — С. 23–29.

23. Челноков, Б. А. Методы построения преобразователей временного масштаба полосовых сигналов / Б. А. Челноков, А. И. Найденов // Осциллографические методы измерений : материалы 1-й Всесоюз. конф. — Вильнюс : ВНИИРИП, 1972. — С. 79–80.

24. Штагер, Е. А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы / Е. А. Штагер. — М. : Радио и связь, 1986. — 184 с.

25. Aksenov, V. P. The Influence of the Vortex Phase on the Random Wandering of a Laguerre-Gaussian Beam Propagating in a Turbulent Atmosphere: A Numerical Experiment / V. P. Aksenov, V. V. Kolosov, C. E. Pogutsa // Journal of Optics. — 2013. — Vol. 15. — Article ID: 044007. — DOI: 10.1088/2040-8978/15/4/044007

26. Aleksanyan, A. Multiple-Star System Adaptive Vortex Coronagraphy Using a Liquid Crystal Light Valve / A. Aleksanyan, N. Kravets, E. Brasselet // Phys. Rev. Lett. — 2017. — Vol. 118, № 20. — Article ID: 203902. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.203902

27. Benford, J. N. History and Future of High Power Microwaves / J. N. Benford // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2024. — Vol. 52, № 4. — P. 1137–1144. — DOI: 10.1109/TPS.2024.3391732

28. Detection of a Spinning Object Using Light's Orbital Angular Momentum / M. P. J. Lavery, F. C. Speirits, S. M. Barnett, M. J. Padgett // Science. — 2013. — Vol. 341. — P. 537. — DOI: 10.1126/science.1239936

29. Fluctuations of the Orbital Angular Momentum of a Laser Beam Registered by a Finite-size Receiver Aperture after Propagation Through a Turbulent Atmosphere / V. P. Aksenov, V. Dudorov, V. Kolosov, G. A. Filimonov // Optics Continuum. — 2021. — Vol. 4, № 7. — P. 1945–1955. — DOI: 10.1364/OSAC.430142

30. Generating Multiple Orbital Angular Momentum Vortex Beams Using a Metasurface in Radio Frequency Domain / S. Yu, L. Li, G. Shi, A. Zhen // Appl. Phys. Lett. — 2016. — Vol. 108, № 24. — Article ID: 241901. — DOI: 10.1063/1.4953786

31. High-Speed Acoustic Communication by Multiplexing Orbital Angular Momentum / Ch. Shi, M. Dubois, Yu. Wang, X. Zhang // Proc. of the National Academy of Sci. — 2017. — Vol. 114, № 28. — P. 7250. — DOI: 10.1073/pnas.1704450114

32. Meikle, H. D. Modern Radar Systems / H. D. Meikle. — 2nd ed. — London : Artech House, 2008. — 722 p.

33. Moffatt, D. L. Ramp Response Radar Imagery Spectral Content / D. L. Moffatt // IEEE Trans. — 1981. — Vol. AP-29, № 2. — P. 399–401.

34. NASA's New NASA Black Hole Sonifications with a Remix. — URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/news/new-nasa-black-hole-sonifications-with-a-remix.html

35. Nevzorov, A. A. A Method of Wavefront Distortions Correction for an Atmospheric Optical Link with a Small Volume of Information Transmitted Through a Service Channel

/ A. A. Nevzorov, D. A. Stankevich // Computer Optics. — 2020. — Vol. 44, № 5. — P. 848–851. — DOI: 10.18287/2412-6179-CO-733

36. Potentially Hazardous Asteroid (85989) 1999 JD6: Radar, Infrared, and Lightcurve Observations and a Preliminary Shape Model / S. E. Marshall, E. S. Howell, M. Brozović, W. S. Cimbell // American Astron. Soc., DPS Meeting #47. — Washington, DC, 2015. — Vol. 47. — P. 204.

37. Radar Observations of Near-Earth Asteroids from Arecibo and Goldstone / P. A. Taylor, J. E. Richardson, E. G. Rivera-Valentín, A. B. Choen // 47th Lunar and Planet. Sci. Conf. held March 21–25, 2016 at The Woodlands. — Texas, 2016. — P. 2772–2772.

38. Brozović, M. Recent Goldstone Radar Observations of Selected Near-Earth Asteroids Less Than 140 m in Diameter / M. Brozović, L. A. M. Benner, M. W. Busch // Asteroids: New Observations, New Models. Proceedings IAU Symposium No. 318, 2015. — Cambridge : Cambridge University Press, 2016. — P. 160–169.

39. Stone, R. W. Scanning the Issue / R. W. Stone // Proc. IEEE. — 1989. — Vol. 77, № 5. — P. 635–638.

40. Sullivan, R. J. Radar Foundations for Imaging and Advanced Concept / R. J. Sullivan. — SciTech Publishing Inc., 2004. — 489 p.

41. Tiberio, R. RCS Reconstruction Using Microwave Imaging / R. Tiberio, G. Pelosi, G. Bettini // Alta Freq. — 1988. — Vol. 58, № 2. — P. 205–216.

42. Transient Response Characteristics in Identification and Imaging / D. L. Moffatt, J. D. Young, A. A. Ksienki, H. C. Lin, C. M. Rhoads // IEEE Trans. — 1981. — Vol. AP-29, № 2, pt. 1. — P. 192–205.

43. Wagg, J. SKA1 Scientific Use Cases / J. Wagg. — Jodrell Bank, Lower Withington, Macclesfield, Cheshire, SK11 9FT, UK : SKA Observatory, 2021. — 568 p.

44. Yunsheng, G. Automatic Time Domain Measurement System / G. Yunsheng, S. Wansheng // CPEM'88 Dig.: Conf. Precis. Electromagn. Means. — 1988. — P. 412–413.

45. Zakharchenko, V. D. Accuracy of Estimating the Velocity of Fast-Moving Space Objects Using the Fractional Doppler Signal Differentiation Algorithm: the Negative Impact of the Frequency Properties of the Path / V. D. Zakharchenko, I. G. Kovalenko, Yu. A. Bondar // Signals. — 2026. — In Press.

46. Zakharchenko, V. D. Estimate of Sizes of Small Asteroids (Cosmic Bodies) by the Method of Stroboscopic Radiolocation / V. D. Zakharchenko, I. G. Kovalenko, O. V. Pak // Acta Astronautics. — 2015. — Vol. 108. — P. 57–61. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.12.006

REFERENCES

1. Aksenov V.P., Pogutsa Ch.E. Fluctuations of the Orbital Angular Momentum of a Laser Beam, Carrying an Optical Vortex, in the Turbulent Atmosphere. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics], 2008, vol. 38, no. 4, pp. 343–348. DOI: 10.1070/QE2008v038n04ABEH013576

2. Gorban A.M., Zvyagintsev A.Yu., Lonin Yu.F., Ponomarev A.G. Analysis of Relativistic High-Power Microwave Generators. *Sistemi obrobki informatsii* [Information Processing Systems], 2012, no. 5, pp. 7–12.

3. Andreev G.A., Potapov A.A. Formation of Radar Images in SMM and MMV. *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1989, no. 6, pp. 3–34.

4. Astanin L.Yu., Kostylev A.A. Methods of Theoretical and Experimental Study of Nonstationary Scattering and Radiation of Electromagnetic Waves. *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1981, no. 9, pp. 3–27.

5. Astanin L.Yu., Kostylev A.A. *Fundamentals of Ultra-Wideband Radar Measurements*. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1989. 192 p.

6. Atayants B.A., Atayants E.K., Zakharchenko V.D. Experimental Study of Scattering of Nanosecond Signals by Earth's Surface. *XI Vsesoyuznaya konferentsiya po rasprostraneniyu radiovoln: tez. dokl. Ch. III.* Kazan, Izd-vo Kazan. un-ta, 1975, pp. 17.

7. Baum K.E. New Methods of Transient (Broadband) Analysis and Synthesis of Antennas and Scatterers. *TIEER*, 1976, vol. 64, no. 11, pp. 53-74.
8. Borovikov V.A., Kimber B.E. *Geometrical Theory of Diffraction*. Moscow, Svyaz Publ., 1978. 247 p.
9. Bystrov R.P., Dmitriev V.G., Potapov A.A. Electromagnetic Systems and Means of Deliberate Impact on Physical and Biological Objects. *Radioelektronika. Nanosistemy. Informatsionnye tekhnologii* [Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii], 2014, vol. 6, no. 2, pp. 129-169.
10. Zakharchenko V.D. *Time Analysis Methods for Improving Accuracy and Resolution of Radar Signal Processing Systems: Doctor of Technical Sciences Dissertation: 05.12.04*. Taganrog, Taganrogskiy radiotekhnicheskii institut, 2002. 266 p.
11. Zakharchenko V.D., Zakharchenko S.V., Yakimets A.L. Numeric Modeling of Low-Altitude Altimeter With Double Frequency Modulation. *Matemat. fizika i kompyuter. modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2020, vol. 23, no. 3, pp. 5-11. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2020.3.1
12. Zakharchenko V.D., Pisanko A.A. Assessment of Potential Noise Immunity of Stroboscopic Converter of Periodic Pulse Signals by Numerical Simulations. *Matemat. fizika i kompyuter. modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2024, vol. 27, no. 1, pp. 17-25. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2024.1.2
13. Kenno E., Moffatt D. Approximation of Transient and Impulse Response Characteristics. *TIEER*, 1965, vol. 53, no. 8, pp. 1025-1034.
14. Kuskov V.V., Gerasimova L.O., Makhmanazarov R.M. Experimental Study of Vortex Laser Radiation Propagation in a Turbulent Atmosphere. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2025, vol. 38, no. 9, pp. 681-688.
15. Naydenov A.I. Theoretical Foundations and Methods of Time-Scale Transformation of Electrical Signals. *Voprosy radioelektroniki. Ser.: Radioizmeritelnaya tekhnika*, 1968, no. 6, pp. 43-51.
16. Naydenov A.I. *Transformation of Nanosecond Pulse Spectrum*. Moscow, Sov. radio Publ., 1973. 180 p.
17. Naydenov A.I., Chelnokov B.A. Sampling of Band-Limited Signals. *Voprosy radioelektroniki. Ser.: Radioizmeritelnaya tekhnika*, 1974, no. 4, pp. 96-102.
18. Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G., Akimov P.A., Denisov Z.A. On the Possibility of Assessing the Geometric Characteristics of an Asteroid Using Radar Signatures. *Matemat. fizika i kompyuter. modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2023, vol. 26, no. 4, pp. 69-82. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2023.4.6
19. Sibert U.M. *Circuits, Signals, Systems*. Moscow, Mir Publ., 1988. 336 p.
20. Tyapkin V.N., Garin E.N. *Methods for Determining Navigation Parameters of Vehicles Using the GLONASS Satellite Radio Navigation System*. Krasnoyarsk, Sib. Feder. un-t, 2012. 260 p.
21. Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G., Pak O.V., Ryzhkov V.Yu. Fundamental Limitations of Probing Signal Coherence in Achieving Maximum Resolution and Range in Stroboscopic Asteroid Radar. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Research], 2018, vol. 56, no. 3, pp. 190-198. DOI: 10.1134/S0010952518030085
22. Chelnokov B.A., Naydenov A.I. Linear Transformation of AM Signal Spectra. *Radioelektronika: tr. nauch.-tekhn. konf.* [Radioelektronika: tr. nauch.-tekhn. konf.]. Kaunas, 1970, vol. 6, pp. 23-29.
23. Chelnokov B.A., Naydenov A.I. Methods for Designing Time-Scale Converters of Band-Limited Signals. *Ostsillograficheskie metody izmereniy: materialy 1-y Vsesoyuz. konf.* Vilnyus, VNIIRIP, 1972, pp. 79-80.
24. Shtager E.A. *Scattering of Radio Waves on Bodies of Complex Shape*. Moscow, Radio i svyaz, 1986. 184 p.
25. Aksenov V.P., Kolosov V.V., Pogutsa C.E. The Influence of the Vortex Phase on the Random Wandering of a Laguerre-Gaussian Beam Propagating in a Turbulent Atmosphere: A Numerical Experiment. *Journal of Optics*, 2013, vol. 15, art. ID: 044007. DOI: 10.1088/2040-8978/15/4/044007

26. Aleksanyan A., Kravets N., Brasselet E. Multiple-Star System Adaptive Vortex Coronagraphy Using a Liquid Crystal Light Valve. *Phys. Rev. Lett.*, 2017, vol. 118, no. 20, art. ID: 203902. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.203902
27. Benford J.N. History and Future of High Power Microwaves. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2024, vol. 52, no. 4, pp. 1137-1144. DOI: 10.1109/TPS.2024.3391732
28. Lavery M.P.J., Speirits F.C., Barnett S.M., Padgett M.J. Detection of a Spinning Object Using Light's Orbital Angular Momentum. *Science*, 2013, vol. 341, p. 537. DOI: 10.1126/science.1239936
29. Aksenov V.P., Dudorov V., Kolosov V., Filimonov G.A. Fluctuations of the Orbital Angular Momentum of a Laser Beam Registered by a Finite-Size Receiver Aperture After Propagation Through a Turbulent Atmosphere. *Optics Continuum*, 2021, vol. 4, no. 7, pp. 1945-1955. DOI: 10.1364/OSAC.430142
30. Yu S., Li L., Shi G., Zhen A. Generating Multiple Orbital Angular Momentum Vortex Beams Using a Metasurface in Radio Frequency Domain. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, vol. 108, no. 24, art. ID: 241901. DOI: 10.1063/1.4953786
31. Shi Ch., Dubois M., Wang Yu., Zhang X. High-Speed Acoustic Communication by Multiplexing Orbital Angular Momentum. *Proc. of the National Academy of Sci.*, 2017, vol. 114, no. 28, p. 7250. DOI: 10.1073/pnas.1704450114
32. Meikle H.D. *Modern Radar Systems*. 2nd ed. — London, Artech House, 2008. 722 p.
33. Moffatt D.L. Ramp Response Radar Imagery Spectral Content. *IEEE Trans.*, 1981, vol. AP-29, no. 2, pp. 399-401.
34. NASA's New NASA Black Hole Sonifications with a Remix. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/news/new-nasa-black-hole-sonifications-with-a-remix.html
35. Nevzorov A.A., Stankevich D.A. A Method of Wavefront Distortions Correction for an Atmospheric Optical Link with a Small Volume of Information Transmitted Through a Service Channel. *Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 5, pp. 848-851. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-733
36. Marshall S.E., Howell E.S., Brozović M., Cimbell W.S. Potentially Hazardous Asteroid (85989) 1999 JD6: Radar, Infrared, and Lightcurve Observations and a Preliminary Shape Model. *American Astron. Soc., DPS Meeting #47*. Washington, DC, 2015, vol. 47, pp. 204.
37. Taylor P.A., Richardson J.E., Rivera-Valentín E.G., Choen A.B. Radar Observations of Near-Earth Asteroids from Arecibo and Goldstone. *47th Lunar and Planet. Sci. Conf. held March 21–25, 2016 at The Woodlands*. Texas, 2016, pp. 2772-2772.
38. Brozović M., Benner L.A.M., Busch M.W. Recent Goldstone Radar Observations of Selected Near-Earth Asteroids Less Than 140 m in Diameter. *Asteroids: New Observations, New Models. Proceedings IAU Symposium No. 318, 2015*. Cambridge, Cambridge University Press, 2016, pp. 160-169.
39. Stone R.W. Scanning the Issue. *Proc. IEEE*, 1989, vol. 77, no. 5, pp. 635-638.
40. Sullivan R.J. *Radar Foundations for Imaging and Advanced Concept*. SciTech Publishing Inc., 2004. 489 p.
41. Tiberio R., Pelosi G., Bettini G. RCS Reconstruction Using Microwave Imaging. *Alta Freq.*, 1988, vol. 58, no. 2, pp. 205-216.
42. Moffatt D.L., Young J.D., Ksienki A.A., Lin H.C., Rhoads C.M. Transient Response Characteristics in Identification and Imaging. *IEEE Trans.*, 1981, vol. AP-29, no. 2, pt. 1, pp. 192-205.
43. Wagg J. *SKA1 Scientific Use Cases*. Jodrell Bank, Lower Withington, Macclesfield, Cheshire, SK11 9FT, UK, SKA Observatory, 2021. 568 p.
44. Yunsheng G., Wansheng S. Automatic Time Domain Measurement System. *CPEM'88 Dig.: Conf. Precis. Electromagn. Means*, 1988, pp. 412-413.
45. Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G., Bondar Yu.A. Accuracy of Estimating the Velocity of Fast-Moving Space Objects Using the Fractional Doppler Signal Differentiation Algorithm: the Negative Impact of the Frequency Properties of the Path. *Sigmals*, 2026. In Press.
46. Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G., Pak O.V. Estimate of Sizes of Small Asteroids (Cosmic Bodies) by the Method of Stroboscopic Radiolocation. *Acta Astronautica*, 2015, vol. 108, pp. 57-61. DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.12.006

PROMISING METHODS AND TOOLS OF RADAR ASTRONOMY

Vladimir D. Zakharchenko

Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
 Department of Radiophysics,
 Volgograd State University
 zakharchenko_vd@mail.ru
 Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Ilya G. Kovalenko

Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,
 Department of Theoretical Physics and Wave Phenomena,
 Volgograd State University
 i.kovalenko@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1565-8940>
 Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. We present the state of the art review for radar astronomy and its future prospects. We show that radar methods for probing asteroids can be used to monitor not only near-Earth space (distances of $\sim 10^6$ – 10^7 km), but potentially also deep space with distances an order of magnitude greater. We consider a method for transforming the signal time scale that allows us to obtain a detailed radar portrait of an asteroid. We also provide an estimate of the maximum resolution of the asteroid's rotation velocity using twisted radio signals in the case where rotation occurs in the plane of the image and the transverse Doppler effect is realized. The gain in measurement accuracy can be as much as $\sim 10^4$ times. This gain in accuracy allows the selection of slowly rotating asteroids with rotation frequencies down to values of $\sim 2.2 \text{ day}^{-1}$. Moreover, the use of twisted radio signals makes it possible to measure the angular velocity of an asteroid's rotation in single-pulse location mode for minutes or tens of seconds without prolonged recording of its light curve.

Key words: small bodies of the Solar System, radar astronomy, broadband signals, twisted radio signals, stroboscopic signal processing.