

## Радиолокационный мониторинг малоразмерных объектов «космического мусора»

А. И. Баскаков, А. А. Комаров, В. А. Пермяков

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия  
E-mail: KomarovALA@mpei.ru*

Задача наземного радиолокационного мониторинга одиночных малоразмерных объектов «космического мусора» (КМ) размером порядка 1 см и менее даже на низких орбитах чрезвычайно затруднительна из-за требований высокой энергетики и разрешающей способности радиолокационной станции (РЛС). Однако появление малоразмерных объектов связано с разрушением более крупных фракций КМ и, как правило, это неодиночные объекты. Поэтому предложено обратить внимание на мониторинг не одиночного мелкого элемента КМ, а на «рой» таких малоразмерных объектов. При этом в первом приближении можно ограничиться определением параметров, характеризующих структуру облака малоразмерных объектов КМ «в среднем». В статье использована многоточечная модель протяжённой групповой цели со случайными статистически независимыми парциальными отражателями, которые заполняют некоторую область пространства малоразмерными объектами, распределёнными по объёму облака КМ случайным образом. В радиальном направлении распределение малоразмерных фракций КМ соответствует нормальному закону относительно некоторого среднего значения высоты орбиты. В продольном направлении распределение элементов КМ равновероятное. Предложено проводить оценку средних размеров облака КМ по дисперсии высотного (радиального) распределения малоразмерных элементов КМ, которая определяется по взаимной двухчастотной корреляционной функции эхо-сигналов РЛС, отражённых от роя малоразмерных фракций КМ. Показано, что при высоком угловом разрешении антенны наземной РЛС, работающей в режиме *beam-park* вертикального зондирования, достигается необходимая чувствительность к радиальной протяжённости облака малоразмерных фракций КМ. Сужение диаграммы направленности (ДН) антенны можно достичь либо инверсным синтезированием апертуры антенны в каждом частотном канале вдоль направления пролёта КМ, либо использованием фазированных адаптивных антенных решёток вместо радиотелескопов с громоздкими зеркальными антеннами. Сужение луча ДН антенны РЛС позволяет исключить влияние декоррелирующего множителя на взаимный двухчастотный коэффициент корреляции и повысить чувствительность измерений.

**Ключевые слова:** космический мусор, радиолокационный мониторинг, многоточечная модель, протяжённая групповая цель, характеристики рассеяния, модель отражённого сигнала, взаимная двухчастотная корреляционная функция

Одобрена к печати: 01.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-130-146

### Введение

Возросшие требования к качественным характеристикам космической радиолокации привели к тому, что с помощью традиционных систем и методов справиться с задачей мониторинга малоразмерных, быстро движущихся космических объектов не удаётся. Необходимо разрабатывать новые подходы и новые принципы функционирования радиолокационных систем наблюдения и измерения. В настоящее время актуальна задача обнаружения и распознавания объектов «космического мусора» (КМ) наземными многоантенными распределёнными структурами на основе фазированных адаптивных антенных решёток (ААР), которые находят всё большее применение для радиолокационного мониторинга околоземного космического пространства, заменяя громоздкие зеркальные радиотелескопы с диаметром зеркала до сотни метров (Назаренко, 2013). Радиолокационная система на основе ААР состоит из большого числа отдельных передающих и приёмных антенн, согласованно реализующих сопровождение выбранного космического объекта (КО). Эффективность многоантенных распределённых по поверхности полей для решения задач обнаружения, пеленгации (опре-

деления координат) КО при использовании фокусированного режима работы существенно выше, чем зеркальных радиотелескопов, а их разработка и создание обходятся заметно дешевле.

К группе объектов, постоянно доступных для радиолокационных исследований, кроме множества искусственных спутников Земли относится также орбитальный КМ, группирующийся в основном на низких и средневысотных орбитах, а также в области геостационарного кольца (Космический..., 2014). Космический мусор — это отработавшие свой срок космические аппараты, их части и элементы, оставшиеся после разрушения и столкновений последних. В эту же группу можно включить метеориты, метеорные потоки и объёмные скопления малоразмерных частиц, представляющих собой естественный, не техногенный КМ.

По различным оценкам (Liou, 2020), в настоящее время в районе низких околоземных орбит вплоть до высот около 2000 км находится от 5000 т (700 тыс. фрагментов) техногенных объектов. На основе статистических оценок делаются выводы, что общее число объектов подобного рода (с поперечником порядка 1–10 см и более) достаточно неопределённо и может достигать сотни тысяч. Из них только около 10 % (примерно 9 тыс. объектов) обнаруживаются, отслеживаются и каталогизируются наземными радиолокационными и оптическими средствами и только около 6 % отслеживаемых объектов — действующие. Около 55 % — отходы, технологические элементы, сопутствующие запускам, и обломки взрывов и фрагментации. Вследствие огромного запаса кинетической энергии столкновение любого из этих объектов КМ с действующим космическим аппаратом может повредить его или даже вывести из строя. Эффективных мер защиты от объектов КМ относительно небольших размеров практически нет.

Наиболее интенсивно и плодотворно для наблюдения мало- и среднеразмержного КМ используется ветеран мониторинга радар «Хэйстэк» (*англ.* Haystack). Этот радар (рабочая длина волны 3 см), размещённый на широте 42° с. ш., может ориентировать свой луч в режиме beam-park, т. е. луч фиксируется в определённом направлении — либо вертикально, либо на юг с углом места 25° (Вениаминов, 2013). В вертикальном режиме beam-park достигается максимальная чувствительность и радиолокационной станции (РЛС). «Хэйстэк» за время использования в этом режиме дал обширную информацию о размере, высоте, радиальной скорости (по доплеровским измерениям) и направлению движения элементов КМ на высотах до 1500 км. В этом режиме локатора подсчитывают КО, пересекающие его поле зрения.

В отличие от мониторинга крупного КМ, значительные пробелы существуют в отслеживании среднеразмержных объектов. Наиболее эффективным способом мониторинга последнего остаются дистанционные наблюдения с Земли с помощью различных радиолокационных, оптических и оптико-электронных средств, прежде всего работающих в режиме beam-park. Однако они значительно хуже каталогизированы.

Что же касается малоразмерных частиц размером порядка 1 см и менее, практически не видимых радиолокационными и оптическими средствами, то регулярного мониторинга за ними не ведётся. Расчётные данные показывают, что популяция КО размером от 5 мм до 1 см составляет около 80 % от общего количества частиц размером более 5 мм. С этой «мелочью» приходится считаться, так как её опасность определяется не столько размерами, сколько скоростью.

На *рис. 1* (см. с. 132) представлены возможности радара «Хэйстэк», работающего в режиме beam-park; на рисунке показаны данные наблюдений при прохождении через его парковый луч облака осколков искусственного спутника Земли «Космос-2251» (Matney, 2010).

По оси абсцисс отложено время, по оси ординат — доплеровская радиальная скорость обнаруженных осколков. Серые полосы слева и справа — периоды, когда «Хэйстэк» не проводил измерений. Зелёные точки — КО, по мнению экспертов не относящиеся к данному облаку осколков. Чёрные точки — КО, входящие в облако более крупные осколков. Красные точки — моделированное облако малоразмерных осколков.

На *рис. 2* (см. с. 132) показано распределение средней пространственной плотности КМ по высоте орбит для различных размеров КО: крупные объекты КМ — более 10 см; среднеразмержный КМ — от 1 до 10 см; мелкий КМ — от 1 мм до 1 см.

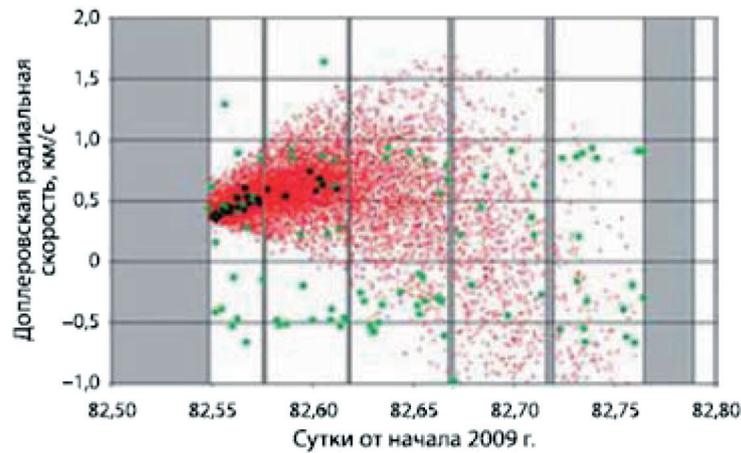


Рис. 1. Результаты наблюдений радаром «Хэйстек» облака осколков космического аппарата «Космос-2251» (Вениаминов, 2013; Matney, 2010)

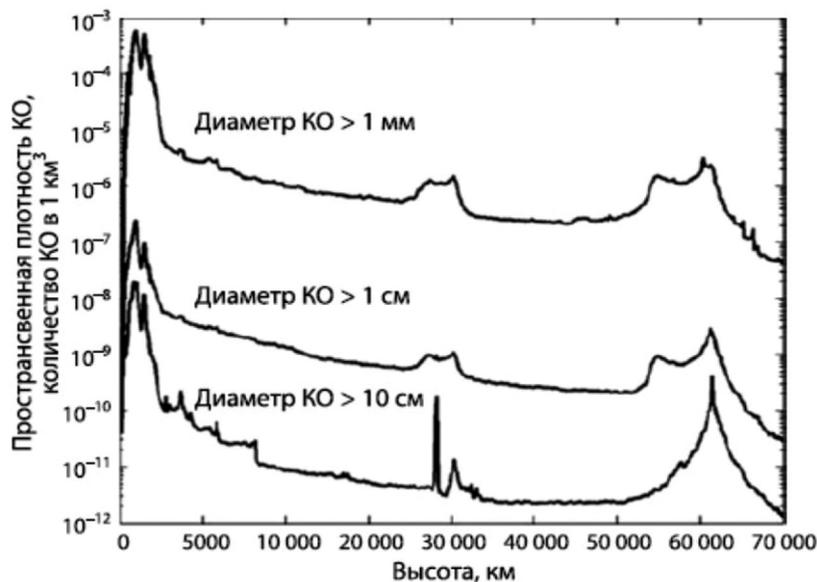


Рис. 2. Распределение пространственной плотности КМ различных размеров по высоте

Эти распределения из двух разных источников довольно хорошо согласуются между собой (Молотов и др., 2004).

Мелкий КМ образуется, как правило, в результате разрушения более крупных КО, поэтому сохраняет в некоторой степени в первое время после разрушения орбитальные параметры «родительских» КО. Причём на орбитах ниже 2000 км распределение объектов КМ очень неравномерное, явные максимумы плотности наблюдаются на высотах от 700 до 1000 км, от 1000 до 1200 км и от 1400 до 1600 км.

Объективный вывод неутешительный: объём измерений малоразмерных частиц (порядка 1 см и менее), который к тому же удалось получить только на низких высотах, настолько незначителен, что нет оснований делать какие-либо выводы относительно распределения мелкого мусора по высотам. Таким образом, для объективного описания малоразмерной популяции КМ в настоящее время недостаточен не только объём необходимых измерений, но и частота их обновления.

Имеющиеся знания о популяциях мелкого КМ составлены, главным образом, экстраполяцией с использованием незначительного объёма измерений и далеко не совершенных моделей. Улучшить модели помогли бы новые методы радиолокационного мониторинга на

основе многоантенных распределённых структур на базе ААР. Поэтому предложено обратить внимание на мониторинг не одиночного мелкого элемента КМ, а на «рой» таких малоразмерных объектов.

В данной работе в качестве объекта КМ используем многоточечную модель протяжённой объёмно-распределённой цели со случайными статистически независимыми мелкими парциальными отражателями — рой малоразмерных КО, которые заполняют некоторую область пространства и распределены по объёму облака КМ случайным образом. В исследовании показана возможность оценки дисперсии высотного разброса (радиального) парциальных отражателей — малоразмерных фракций КМ по взаимной двухчастотной корреляционной функции отражённых эхо-сигналов в режиме beam-park вертикального зондирования при пролёте КМ вдоль апертуры диаграммы направленности (ДН) антенны. При этом для существенного ослабления влияния декоррелирующего множителя необходимо реализовать высокое угловое разрешение ДН антенны РЛС, которое реализуется либо использованием инверсного синтезирования апертуры ДН антенны в каждом частотном канале вдоль направления пролёта КМ, либо использованием фазированных многоантенных поверхностно-распределённых ААР вместо радиотелескопов с громоздкими зеркальными антеннами.

Цель работы — обосновать возможность оценки средних размеров облака КМ по взаимной двухчастотной корреляционной функции отражённых сигналов при дистанционном космическом мониторинге, для чего необходимо получить алгоритмы обработки эхо-сигналов.

### Характеристики рассеяния малоразмерных объектов космического мусора

Особую опасность представляют мелкие объекты КМ размером единицы сантиметров и менее, которые трудно обнаружить из-за малости эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). Но поскольку эти объекты возникают в результате разрушений космических аппаратов и элементов их конструкции, то очень редко это одиночные объекты. Обычно летит некоторый рой разнородных малоразмерных объектов, среди которых могут встречаться и крупные обломки. В радиолокационной терминологии это не что иное, как объёмно-распределённая групповая цель. При этом в первом приближении можно ограничиться определением параметров, характеризующих структуру облака малоразмерных объектов КМ в среднем.

Для многоточечной модели протяжённой объёмно-распределённой групповой цели КМ со случайными статистически независимыми мелкими парциальными отражателями характерно возникновение флуктуаций результирующего эхо-сигнала, который следует описывать статистически.

Параметр ЭПР одного элемента КМ зависит от его размеров по отношению к длине радиоволны, от материала объекта, его конфигурации и поляризации облучающей волны.

Например, для простейшего мелкого объекта КМ в виде шара изменение характеристики отражения электромагнитных волн зависит от соотношения между размерами шара и длиной волны. Если радиус шара  $r_{\text{ш}} \ll \lambda$  ( $\lambda$  — длина волны), то преобладают дифракционные явления и объект ведёт себя, как элементарный вибратор. Интенсивность отражений невелика, и эффективная площадь рассеяния изменяется пропорционально отношению  $r_{\text{ш}}^6/\lambda^4$ , например, для металлического шара  $\sigma = 144\pi^5 r_{\text{ш}}^6/\lambda^4$ , а для диэлектрического  $\sigma = 64 \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \pi^5 r_{\text{ш}}^6/\lambda^4$ . Если размеры шара станут соизмеримыми с длиной волны, то при отражении возникнут резонансные явления, а при  $r_{\text{ш}}/\lambda \approx 1,6$  величина ЭПР практически станет равной площади поперечного сечения шара. Для длины электромагнитной волны 8 мм эта ситуация наступает при  $r_{\text{ш}} \approx 1,3$  см. Отражение от шара является частным случаем рассеяния электромагнитных волн криволинейной поверхностью. В общем случае, когда имеется отражающая поверхность, превосходящая по своим размерам длину волны, эффективная площадь рассеяния определяется выражением (Кобак, 1975)

$$\sigma = \pi r_1 r_2,$$

где  $r_1, r_2$  — главные радиусы кривизны поверхности в «блестящей точке».

При практической оценке дальности действия РЛС обычно пользуются средним значением ЭПР  $\bar{\sigma}$  (Кобак, 1975).

Если учесть, что отдельные мелкие частицы роя КМ отражают электромагнитную волну неодинаково из-за разброса размеров, конфигурации, ориентации и эффекта деполяризации, то следует в выражение для ЭПР такой групповой цели ввести коэффициент эффективности  $\eta$ :  $\eta = 0,25-0,5$ . Тогда ЭПР роя малоразмерных объектов КМ с учётом реального числа действующих в элементе разрешения РЛС отражателей  $N_d$  определяется так:

$$\bar{\sigma}_d = \eta N_d \bar{\sigma},$$

где  $\bar{\sigma}$  — среднее значение ЭПР частицы.

Можно среднюю ЭПР облака малоразмерных фракций КМ определять через удельную ЭПР объёмно-распределённой цели с размерностью  $[м^2/м^3]$ :

$$\sigma_0 = \sum_{k=1}^N \sigma_k,$$

где  $\sigma_k$  — удельная ЭПР отдельных частиц.

Тогда ЭПР роя малоразмерных объектов можно оценить по выражению

$$\bar{\sigma}_d = \eta \sigma_0 V, \quad (1)$$

где  $V$  — объём, формирующий отражённый сигнал.

Выражение для объёма  $V$  определяется формулой, вытекающей из геометрии облучения КМ, показанной на *рис. 3* (см. с. 135):

$$V = H^2 \Delta\Omega_a L_z, \quad (2)$$

где  $H$  — расстояние от фазового центра антенной решётки;  $\Delta\Omega_a$  — телесный угол, определяемый шириной ДН антенны и связанный с коэффициентом направленного действия антенны  $D_a$  выражением  $\Delta\Omega_a = 4\pi/D_a$ ;  $L_z$  — средняя радиальная протяжённость облака КМ.

Поскольку в нашем случае используются квазинепрерывные узкополосные сигналы, то разрешающая способность радара по дальности невелика и интервал разрешения  $\Delta R$  заметно превышает ожидаемые радиальные размеры облака КМ.

Итак, в качестве объекта КМ используем многоточечную модель протяжённой объёмно-распределённой групповой цели со случайными статистически независимыми мелкими парциальными отражателями — рой малоразмерных КО, которые заполняют некоторую область пространства.

В радиальном направлении распределение малоразмерных фракций КМ соответствует нормальному закону (по оси дальности) относительно некоторого среднего значения, находящегося на высоте  $H$  орбиты (см. *рис. 3*).

В продольном направлении распределение КМ равновероятное, причём в этом направлении размеры облака КМ превышают размеры облучаемой ДН антенны локатора продольной области на высоте  $H$ . При этом мелкие отражатели располагаются в пространстве на расстояниях друг от друга, превышающих длину волны.

Очевидно, подобная система отражателей обладает сложной многолепестковой диаграммой обратного рассеяния (ДОР), лепестки которой имеют разные уровни и ширину и резко изменяются при небольшом взаимном перемещении отражателей на величину, сравнимую с длиной волны. Если число отражателей велико, а объём, в котором они размещаются, за время измерения меняется мало, то ДОР может быть охарактеризована средними параметрами, средней ЭПР и средней ДОР, которая в нашем случае слабонаправленная. На данном этапе, для упрощения, будем считать, что каждый из отражателей в отдельности и вся система в целом не создают кросс-поляризованного рассеянного поля.

Будем так же считать, что горизонтальная протяжённость области малоразмерных КМ на орбите легко определяется по времени пролёта облаком КМ зоны облучения ДН фокусированной антенной решётки в режиме beam-park. Фазируемая ААР наземного радиолокатора

работает на излучение и на приём и позволяет достичь высокого углового разрешения, а при ориентации луча в вертикальном направлении в режиме beam-park достигается максимальная чувствительность. В этом режиме антенна РЛС фиксируется в заданном вертикальном положении и осуществляется приём эхо-сигналов от облака малоразмерных объектов КМ, пересекающих луч ДН антенны РЛС. Это позволит проводить работы по получению статистических данных о степени техногенного засорения околоземного космического пространства на разных высотах.

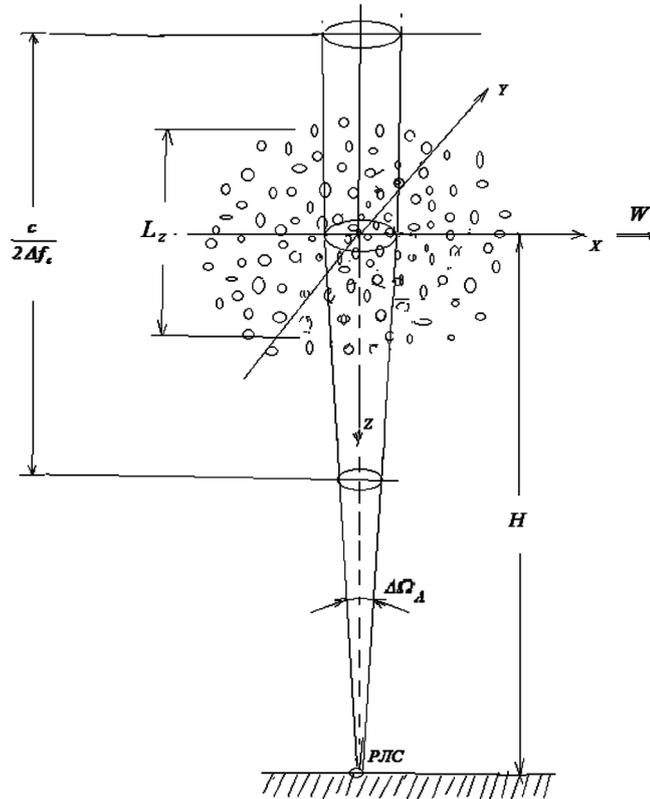


Рис. 3. Геометрия облучения КМ ААР в режиме beam-park.  $W$  — скорость движения облака космического мусора,  $c/\Delta f_r$  — разрешающая способность РЛС в радиальном направлении

Отражённый радиосигнал формируется исследуемой областью, ограниченной шириной телесного угла ДН антенны. В этом случае узкая направленность луча антенны ограничивает на среднем уровне  $H$  облака КМ в продольном направлении область диаметром

$$D_{\text{обл}} = 2H \operatorname{tg} \left( \frac{\theta_a}{2} \right), \quad (3)$$

где  $\theta_a$  — ширина ДН антенны РЛС по уровню  $-3$  дБ.

Характеристики отражений радиосигналов от объектов КМ зависят:

- 1) от параметров РЛС (длины волны, излучаемой мощности, вида зондирующего сигнала, ширины и формы ДНА, поляризации сигнала);
- 2) режима облучения (высоты орбиты, ориентации оси ДН антенны, скорости движения КМ);
- 3) средних размеров облака малоразмерных объектов КМ и статистических характеристик этой сложной групповой цели.

Из постановки задачи вытекают предварительные условия к выбору модели отражения:

- 1) поскольку рассматривается режим beam-park, будем интересоваться в основном углами зондирования, близкими к вертикали;

- 2) используются узкополосные, квазинепрерывные зондирующие сигналы, а длина зондирующей радиоволны выбирается в коротковолновой части сверхвысокочастотного диапазона;
- 3) характеристики отражения рассматриваются при условии, когда размеры облучаемой области таковы, что в пределах этой области находится количество малоразмерных фракций КМ, достаточное для полного статистического описания отражённых эхо-сигналов.

Пусть закон распределения радиального отклонения (ординат  $h$ ) малоразмерных объектов КМ относительно среднего значения (отсчётного уровня) соответствует нормальному закону

$$W(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_h} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_h^2}\right), \quad (4)$$

где  $\sigma_h$  — среднеквадратичные ординаты элементов КМ.

В соответствии с рис. 3 за значение среднего уровня примем высоту орбиты КМ на расстоянии  $H$  от РЛС.

Для более тщательного учёта характеристик облака малоразмерных элементов КМ можно ввести уточнённый закон распределения радиального отклонения (ординат) малоразмерных объектов КМ, лучше удовлетворяющий условию задачи. На практике при аппроксимации плотности вероятности, не очень сильно отличающейся от нормальной, удобно воспользоваться усечённым рядом Эджворта (Тихонов, 1982). При этом часто ограничиваются учётом только коэффициентов асимметрии и эксцесса. В этом случае можно записать:

$$W(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_h} \left[ 1 + \frac{1}{6} \gamma_1 H_3\left(\frac{z}{\sigma_h}\right) + \frac{1}{24} \gamma_2 H_4\left(\frac{z}{\sigma_h}\right) \right] \exp\left(-\frac{z^2}{\sigma_h^2}\right), \quad (5)$$

где  $H_3(x)$ ,  $H_4(x)$  — полиномы Эрмита 3-й и 4-й степени,  $H_3(x) = x^3 - 3x$ ,  $H_4(x) = x^4 - 6x^2 + 3$ ;  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  — коэффициенты асимметрии и эксцесса соответственно,  $\gamma_1 = \mu_3/\sigma_h^3 = \chi_3/\sqrt{\chi_3^2}$ ,  $\gamma_2 = \mu_4/\sigma_h^4 - 3 = \chi_4/\chi_2^2$  (здесь  $\chi_2$ ,  $\chi_3$ ,  $\chi_4$  — кумулянты,  $\mu_3$  и  $\mu_4$  — одномерные центральные моменты 3-го и 4-го порядков). В общем случае вид  $W(z)$  зависит от динамических характеристик летящего облака малоразмерных фракций КМ. Однако цель данной статьи — получить окончательные выражения в аналитическом виде, поэтому на этом этапе будем пользоваться выражением (4).

Отражённый радиосигнал является суперпозицией парциальных эхо-сигналов по облучаемой области, имеющих случайные, равномерно распределённые в интервале  $0-2\pi$  фазы. Пусть рой малоразмерных объектов КМ облучается из точки РЛС  $(0, 0, H)$ .

На свойства элементарных отражателей накладываются следующие ограничения:

1. Парциальный сигнал, отражённый от одного элементарного отражателя — мелкого элемента КМ — не зависит от сигналов, приходящих от других отражателей. Учёт их взаимовлияния, усложняя модель, не даёт ощутимых результатов.
2. Количество отражателей, образующих групповую цель, должно быть велико, а отражающие свойства этих элементов приблизительно одинаковы. Это допущение вполне обосновано для малоразмерных фракций КМ.
3. Ординаты  $z$  отдельных отражателей распределены по нормальному закону, а статистика облака малоразмерных КО считается постоянной по всей облучаемой области в течение времени формирования среднего отражённого сигнала.
4. Фазы сигналов, отражённых от элементарных отражателей, случайны, независимы и равномерно распределены в интервале  $0-2\pi$ .

Форма, размеры и взаимное расположение элементарных отражателей определяют ДОР облака малоразмерных элементов КМ и, как было сказано ранее, энергия рассеивается в диа-

пазоне углов, существенно превышающем ширину ДН антенны РЛС, и влияние ДОР в первом приближении в расчётах учитывать не будем.

### Модель радиосигнала, отражённого от малоразмерных элементов комического мусора

В режиме работы beam-park антенна радиолокатора фиксируется в заданном вертикальном положении и осуществляется приём эхо-сигналов от облака малоразмерных объектов КМ, пересекающих радиолуч. Отражённый сигнал является суперпозицией парциальных сигналов по облучаемой области, имеющих случайные, равномерно распределённые в интервале  $0-2\pi$  фазы.

Пусть рой малоразмерных фракций КМ облучается из точки РЛС  $(0, 0, H)$  узкополосными квазипериодическими электромагнитными колебаниями одновременно на двух частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , незначительно отличающихся друг от друга. Относительная их разность удовлетворяет условию

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_1} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1} \ll 1.$$

Развязка каналов обеспечивается за счёт частотной селекции. Начало координат совмещено с проекцией точки РЛС на средний уровень  $H$  и движется с орбитальной скоростью облака КМ относительно апертуры ДН антенны РЛС. Пусть в первом приближении оси ДН приёмной и передающей антенны направлены по нормали к среднему уровню КМ  $H$ , а коэффициенты усиления и форма ДН антенн совпадают.

При этих условиях отражённый парциальный сигнал от некоторого  $m$ -го мелкого парциального отражающего элемента КМ (рис. 4, см. с. 138) на любой из частот  $\omega_i$  ( $i = 1, 2$ ) может быть представлен выражением следующего вида

$$\dot{U}_{m_i}(t) = U_{m_i}(t) \exp \left[ j\omega_i \left( t - \frac{2R}{c} \right) + j\varphi_0 \right], \quad (6)$$

где  $t$  — время;  $R$  — дальность,  $R = R' - h \cos\beta$ ;  $h$  — ордината до среднего радиального уровня облака в точке  $m'$ ;  $c$  — скорость света;  $\varphi_0$  — фазовый сдвиг сигнала при отражении.

Тогда

$$\dot{U}_{m_i}(t) = U_{m_i}(t) \exp \left[ j\omega_i \left( t - \frac{2R'}{c} + \frac{2h}{c} \cos\beta \right) + j\varphi_0 \right], \quad (7)$$

где  $R' = \sqrt{R_0^2 + (x_m - Wt)^2} \approx R_0 + (x_m - Wt)^2 / (2R_0)$ ;  $R_0$  — проекция  $R'$  на плоскость  $ZOY$ ;  $W$  — скорость движения облака КМ;  $x_m$  — координата точки  $m$  на оси  $OX$ .

Тогда

$$\dot{U}_{m_i}(t) = U_{m_i}(t) \exp \left[ j \left( \omega_i t - \frac{2\pi W^2}{\lambda_i R_0} \left( t - \frac{x_m}{W} \right)^2 - \frac{4\pi}{\lambda_i} R_0 + \frac{4\pi}{\lambda_i} h \cos\beta + \varphi_0 \right) \right]. \quad (8)$$

Введём в выражении (8) обозначение  $b$ :  $b = 2\pi W^2 / (\lambda_i H)$ , что соответствует случаю, когда парциальный отражатель находится точно на оси  $X$  ( $y_m = 0$ ), иначе

$$b_i = \frac{2\pi W^2}{\lambda_i R_0} = \frac{2\pi W^2}{\lambda_i \sqrt{H^2 + y_m^2}} = b \frac{1}{\sqrt{1 + y_m^2 / H^2}} \approx b \left( 1 - \frac{\eta_m^2}{2} \right), \quad (9)$$

где  $\eta_m = y_m / H$ .

Если также в выражении (8) обозначить

$$\psi = \frac{4\pi}{\lambda_i} R_0 - \frac{4\pi}{\lambda_i} h \cos\beta - \varphi_0,$$

то приходим к выражению вида

$$\dot{U}_{m_i}(t) = U_{m_i}(t) \exp \left[ j\omega_i t - j b_1 \left( t - \frac{x_m}{W} \right)^2 - j\psi \right], \quad (10)$$

где

$$U_{m_i}(t) = \sqrt{\frac{2P_0 \lambda_i^2 G_0^2 \bar{\sigma}_m}{(4\pi)^3}} \cdot \frac{G(\beta, \varphi)}{R^2(\beta, \varphi, t)}; \quad (11)$$

$P_0$  — излучаемая передатчиком мощность;  $G_0$  — коэффициент усиления антенны;  $G(\beta, \varphi)$  — функции, учитывающие ДН антенны РЛС;  $\bar{\sigma}_m$  — среднее по множеству значение ЭПР  $m$ -го частичного элемента;  $R, \beta, \varphi$  — соответственно расстояние и угловые координаты до  $m$ -го отражателя (здесь и далее индекс  $m$  опускаем, чтобы не загромождать формулы).

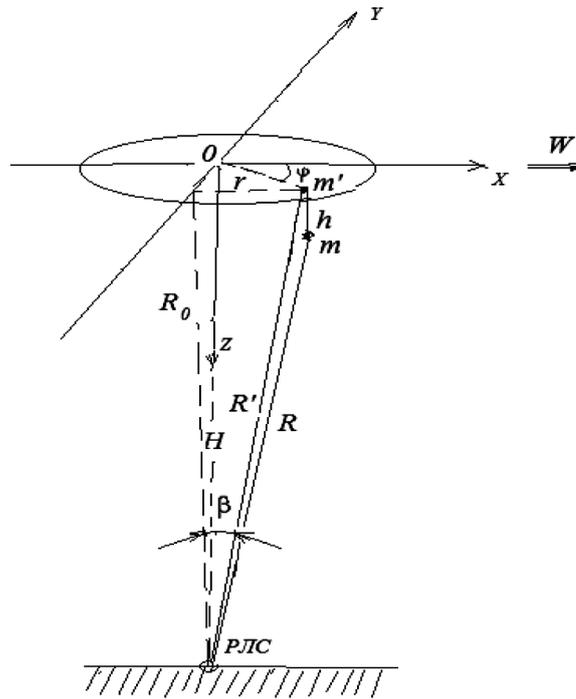


Рис. 4. Облучение одного элемента КМ в точке  $m$ , находящегося на дальности  $R$  от антенны РЛС

Аппроксимируем ДН антенны гауссовой функцией, осесимметричной, не зависящей от  $\varphi$ , тогда

$$G(\beta, \varphi) = \exp \left[ -\frac{\beta^2}{2\theta_a^2} \right]. \quad (12)$$

Угол  $\beta$  можно представить как

$$\beta = \arctg \left( \frac{r}{H} \right) \approx \frac{r}{H}, \quad r = \sqrt{(x_m - Wt)^2 + y_m^2} \ll H. \quad (13)$$

Тогда выражение (10) с учётом соотношений (11)–(13) принимает вид

$$\dot{U}_{m_i}(t) = A_{m_i} \exp \left[ -a \left( t - \frac{x_m}{W} \right)^2 \right] \exp \left[ -\frac{y_m^2}{2H^2 \theta_a^2} \right] \exp \left[ j\omega_i t - j b_1 \left( t - \frac{x_m}{W} \right)^2 - j\psi \right], \quad (14)$$

где

$$A_{m_i} = \sqrt{\frac{2P_0 \lambda_i^2 G_0^2 \bar{\sigma}_m}{(4\pi)^3}} \cdot \frac{1}{R^2}$$

и введено обозначение  $a = W^2 / (2H^2 \theta_a^2)$ .

Если парциальный отражатель в виде одиночного мелкого элемента находится на оси  $X$ , т.е.  $y_m = 0$ , то отражённый от него эхо-сигнал будет

$$\dot{U}_{m_i}(t) = A_{m_i} \exp\left[-a\left(t - \frac{x_m}{W}\right)^2\right] \exp\left[j\omega_i t - j b_1 \left(t - \frac{x_m}{W}\right) - j\Psi\right]. \quad (15)$$

Следовательно, отражённый эхо-сигнал от облака малоразмерных элементов КМ есть суперпозиция эхо-сигналов от отдельных отражателей (15).

### Оценка «средних» радиальных размеров облака малоразмерных элементов КМ по взаимной двухчастотной корреляционной функции при сужении ДНА РЛС

Средние радиальные размеры области малоразмерных элементов КМ определим по дисперсии ординат разброса малоразмерных отражателей относительно среднего уровня высоты орбиты на расстоянии  $H$  от РЛС. Априорно понятно, что при вычислении дисперсии высотного разброса (радиального) парциальных отражателей малоразмерных фракций КМ по взаимной двухчастотной корреляционной функции отражённых сигналов полезная декорреляция из-за радиального (высотного) разброса отражателей будет маскироваться вредной декорреляцией продольного разброса отражателей в облучаемой области. Существует принципиальная возможность уменьшить влияние вредного декоррелирующего множителя на двухчастотную корреляционную функцию (ДЧКФ) либо за счёт введения режима инверсного синтезирования апертуры антенны в режиме beam-peak вертикального зондирования и при пролёте облака мелкого КМ вдоль апертуры, либо за счёт использования многоантенных поверхностно-распределённых ААР, обеспечивающих при фазировании узкую ДНА РЛС.

Оставляя пока в стороне вопросы технической реализации, возьмём частотную характеристику согласованного тракта оптимальной обработки в каждом частотном канале РЛС, комплексно-сопряжённую к спектру сигнала (8) (Баскаков и др., 2006).

Определим спектр сигнала (15)

$$\begin{aligned} \dot{S}_{m_i} &= \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}_{m_i}(t) \exp(-j\omega t) dt = \\ &= A_{m_i} \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda_i}(H - h\cos\beta)\right] \sqrt{\frac{\pi}{a + j b_1}} \exp\left[-\frac{(\omega_i - \omega)^2}{4(a + j b_1)}\right] \exp\left[j(\omega_i - \omega) \frac{x_m}{W}\right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Тогда частотная характеристика согласованного тракта оптимальной обработки в каждом частотном канале РЛС

$$\dot{K}(j\omega) = K_0 \exp\left[-\frac{(\omega_i - \omega)^2}{4(a + b_1^2/a)} - j\frac{(\omega_i - \omega)^2}{4(b_1 + a^2/b_1)}\right]. \quad (17)$$

Парциальные сигналы от отражателей на направлениях, отличных от вертикали, дадут комплексный спектр сигнала

$$\dot{S}_{m_i} = A_{m_i} \sqrt{\frac{\pi}{a + j b_1}} \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda_i}\left(H + \frac{y_m^2}{2H} - h\cos\beta\right) - \frac{y_m^2}{2H^2\theta_s^2} - \frac{(\omega_i - \omega)^2}{4(a + j b_1)} + j(\omega_i - \omega) \frac{x_m}{W}\right]. \quad (18)$$

Тогда выходной парциальный сигнал после оптимальной обработки

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{m_i, \text{ВЫХ}}(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_{m_i}(j\omega) \dot{K}(j\omega) \exp(j\omega t) d\omega = \\
 &= A_{m_i} K_0 \sqrt[4]{\frac{a^2 + b^2}{(2a)^2 + (b_1 - b)^2}} \cdot \exp\left[-\frac{y_m^2}{2H^2\theta_s^2}\right] \exp\left[-a \frac{(a^2 + b^2) + (a^2 + b_1^2)}{(2a)^2 + (b_1 - b)^2} \left(t - \frac{x_m}{W}\right)^2\right] \times \\
 &\times \exp\left[-j \frac{b_1(a^2 + b^2) - b(a^2 + b_1^2)}{(2a)^2 + (b_1 - b)^2} \left(t - \frac{x_m}{W}\right)\right] \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda_i} \left(H + \frac{y_m^2}{2H} - h \cos\beta\right)\right] \times \\
 &\times \exp(j\omega_i t) \cdot \exp\left[-j \frac{1}{2} \left(\operatorname{arctg}\left(\frac{b_1}{a}\right) + \operatorname{arctg}\left(\frac{b(a^2 + b_1^2) - b_1(a^2 + b^2)}{a(a^2 + b_1^2) + a(a^2 + b^2)}\right)\right)\right]. \quad (19)
 \end{aligned}$$

Наличие остаточной частотной модуляции в уравнении (19) объясняется тем, что согласованный фильтр в тракте обработки настроен только на случай  $y_m = 0$ .

Рассмотрим отношение

$$\frac{b}{a} = \frac{4\pi}{\lambda_i} H \theta_a^2 = 2\pi \frac{2d_{\text{эф}}}{\lambda_i} \theta_a = 2\pi \frac{\theta_a}{\theta_s},$$

где  $d_{\text{эф}}$  — эффективная длина синтезированной антенны (фокусированная апертура);  $\theta_s$  — ширина ДН синтезированной антенны,  $\theta_s = \lambda_i / 2d_{\text{эф}}$ . Выражая  $a$ ,  $b$  и  $b_1$  через исходные пара-

метры и учитывая, что  $\operatorname{arctg}(b_1/a) \approx \pi/2$  и  $\operatorname{arctg}\left(\frac{b(a^2 + b_1^2) - b_1(a^2 + b^2)}{a(a^2 + b_1^2) + a(a^2 + b^2)}\right) \approx -\frac{b}{a} \cdot \frac{\eta_m^2}{4}$ ,

из выражения (19) получаем итоговое выражение для выходного парциального сигнала

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{m_i, \text{ВЫХ}}(t) &= A_{m_i} K_0 \frac{\sqrt{\pi \frac{\theta_a}{\theta_s}}}{\sqrt[4]{1 + \left(\pi \frac{\theta_a}{\theta_s}\right)^2 \frac{\eta_m^4}{4}}} \exp\left[-\frac{y_m^2}{2H^2\theta_a^2} - \frac{\left(\pi \frac{\theta_a}{\theta_s}\right)^2 \left(2 - \eta_m^2 + \frac{\eta_m^4}{4}\right)}{1 + \left(\pi \frac{\theta_a}{\theta_s}\right)^2 \frac{\eta_m^4}{4}} \cdot \frac{(Wt - x_m)^2}{2H^2\theta_a^2}\right] \times \\
 &\times \exp\left[-j \frac{\left(\pi \frac{\theta_a}{\theta_s}\right)^2 \frac{\eta_m^2}{2}}{1 + \left(\pi \frac{\theta_a}{\theta_s}\right)^2 \frac{\eta_m^4}{4}} \cdot \frac{2\pi(Wt - x_m)^2}{H\lambda_i}\right] \exp\left[-j \frac{1}{2} \operatorname{arctg}\left(-\frac{b}{a} \cdot \frac{\eta_m^2}{4}\right)\right] \times \\
 &\times \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda_i} \left(H + \frac{y_m^2}{2H} - h \cos\beta\right)\right] \exp\left[-j \frac{\pi}{4}\right] \exp(j\omega_i t). \quad (20)
 \end{aligned}$$

Используя выражение (20), определим взаимную двухчастотную корреляционную функцию, усредняя по облучаемой области и по ансамблю флуктуаций:

$$\overline{\dot{U}_1 \dot{U}_2^*} = A_0^2 K_0^2 \int_y \int_x \left[ \exp \left[ -\frac{y^2}{H^2 \theta_a^2} - \frac{\left( \pi \frac{\theta_a}{\theta_s} \right)^2 \left( 2 - \eta_m^2 + \frac{\eta_m^4}{4} \right) (Wt - x_m)^2}{1 + \left( \pi \frac{\theta_a}{\theta_s} \right)^2 \frac{\eta_m^4}{4}} \cdot \frac{H^2 \theta_a^2}{H^2 \theta_a^2} \right] \times \right. \\ \left. \times \frac{\pi \frac{\theta_a}{\theta_s}}{\sqrt{1 + \left( \pi \frac{\theta_a}{\theta_s} \right)^2 \frac{\eta_m^4}{4}}} \exp \left[ -j \frac{\left( \pi \frac{\theta_a}{\theta_s} \right)^2 \frac{\eta^2}{2}}{1 + \left( \pi \frac{\theta_a}{\theta_s} \right)^2 \frac{\eta^4}{4}} \cdot \frac{\Delta k (Wt - x)^2}{H} \right] \times \right. \\ \left. \times \exp \left[ -j \Delta k \left( 2H + \frac{y^2}{H} \right) \right] \exp(j2\pi \Delta f t) \cdot \overline{\exp(-j2\Delta k h)} \right] dx dy, \quad (21)$$

где  $\Delta f = f_1 - f_2$ ;  $\Delta k = 2\pi(f_1 - f_2)/c$ ; в амплитудном множителе

$$A_0 = \sqrt{\frac{2P_0 \lambda_i^2 G_0^2 \bar{\sigma}_d}{(4\pi)^3}} \cdot \frac{1}{H^2}$$

приближённо считаем  $R \approx H$  и  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ ;  $\bar{\sigma}_d$  — средняя ЭПР облака малоразмерных элементов КМ (1) при  $\beta = 0$ , а углы в пределах облучаемой области считаем малыми, (облучение вблизи вертикали), так что  $\cos \beta \approx 1$ .

Результат усреднения в выражении (11) составляющей, связанной со случайными флуктуациями ординат отдельных малоразмерных элементов КМ  $h$ , по ансамблю флуктуаций (с учётом выражения (4) — нормального закона распределения ординат малоразмерных элементов КМ) даст полезную искомую компоненту ДЧКФ, зависящую от среднеквадратичных ординат элементов КМ  $\sigma_h$ , и данный множитель можно вынести из-под знака интеграла в соотношении (21).

Все остальные составляющие в этом выражении дадут вклад в декоррелирующий множитель, величина которого определяется выражением

$$\dot{R}(\Delta k) = A_0^2 K_0^2 \exp(-2\Delta k^2 \sigma_h^2) \cdot \exp(-j2\Delta k H) \cdot \exp(j2\pi \Delta f t) \times \\ \times \int_y \int_x \left[ \frac{\pi \frac{\theta_a}{\theta_s}}{\sqrt{1 + \left( \pi \frac{\theta_a}{\theta_s} \right)^2 \frac{\eta^4}{4}}} \exp \left[ -\frac{y^2}{H^2 \theta_a^2} - \frac{\left( \pi \frac{\theta_a}{\theta_s} \right)^2 \left( 2 - \eta^2 + \frac{\eta^4}{4} \right) (Wt - x)^2}{1 + \left( \pi \frac{\theta_a}{\theta_s} \right)^2 \frac{\eta^4}{4}} \cdot \frac{H^2 \theta_a^2}{H^2 \theta_a^2} \right] \times \right. \\ \left. \times \exp \left[ -j \frac{\left( \pi \frac{\theta_a}{\theta_s} \right)^2 \frac{\eta^2}{2}}{1 + \left( \pi \frac{\theta_a}{\theta_s} \right)^2 \frac{\eta^4}{4}} \cdot \frac{\Delta k (Wt - x)^2}{H} \right] \exp \left[ -j \Delta k \frac{y^2}{H} \right] \right] dx dy. \quad (22)$$

Перейдём от корреляционной функции к коэффициенту корреляции

$$\dot{\rho}(\Delta k) = \frac{\dot{R}(\Delta k)}{\sqrt{|\dot{U}_1|^2} \cdot \sqrt{|\dot{U}_2|^2}}. \quad (23)$$

Для этого оценим величину  $|\dot{U}_{1,2}|^2$ , используя соотношение (21) и учитывая, что  $\eta = y/H$ ,

$$\begin{aligned} \overline{|\dot{U}_{1,2}|^2} &= A_0^2 K_0^2 \int_y \int_x \left( \frac{\pi \frac{\theta_a}{\theta_s}}{\sqrt{1 + \left(\pi \frac{\theta_a}{\theta_s}\right)^2 \frac{\eta^4}{4}}} \exp\left(-\frac{y^2}{H^2 \theta_a^2}\right) \exp\left(-\frac{\left(\pi \frac{\theta_a}{\theta_s}\right)^2 \left(2 - \eta^2 + \frac{\eta^4}{4}\right) (Wt - x)^2}{1 + \left(\pi \frac{\theta_a}{\theta_s}\right)^2 \frac{\eta^4}{4}} \cdot \frac{H^2 \theta_a^2}{H^2 \theta_a^2}\right) dx dy = \\ &= A_0^2 K_0^2 \frac{\pi}{\sqrt{2}} H^2 \theta_a^2. \end{aligned} \quad (24)$$

Из выражения (23) с использованием соотношений (22) и (24) получим выражение для коэффициента корреляции

$$\dot{\rho}(\Delta k) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-2\Delta k^2 \sigma_h^2\right) \exp(-j2\Delta k H) \cdot \exp(j2\pi \Delta f t) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\left[-\left(1 + j\Delta k H \theta_a^2\right) \xi^2\right]}{\sqrt{1 + j\frac{\Delta k H \theta_a^4}{4} \xi^2}} d\xi, \quad (25)$$

где введена новая переменная  $\xi = y/(H\theta_a)$ .

Рассмотрим знаменатель дроби под интегралом в выражении (25):

$$\sqrt{1 + j\frac{\Delta k H \theta_a^4}{4} \xi^2}. \quad (26)$$

Количественные оценки показывают, что

$$\frac{\Delta k H \theta_a^4}{4} \xi^2 \ll 1,$$

тогда можно заменить соотношение (26) приближённым выражением

$$\sqrt{1 + j\frac{\Delta k H \theta_a^4}{4} \xi^2} \approx \sqrt{\exp\left(j\frac{\Delta k H \theta_a^4}{4} \xi^2\right)} \approx \exp\left[j\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta k H \theta_a^4}{4} \xi^2\right]. \quad (27)$$

Подставив соотношение (27) в выражение (25), получим окончательное уравнение для коэффициента корреляции

$$\dot{\rho}(\Delta k) = \exp\left(-2\Delta k^2 \sigma_h^2\right) \exp(-j2\Delta k H) \cdot \exp(j2\pi \Delta f t) \frac{1}{\sqrt{1 + j\Delta k H \theta_a^2 \left(1 + \left(\theta_a^2/8\right)\right)}}. \quad (28)$$

Для аппаратной реализации метода используется вычисление модуля коэффициента корреляции, который из уравнения (28) равен

$$|\dot{\rho}(\Delta k)| \approx \frac{\exp\left(-2\Delta k^2 \sigma_h^2\right)}{\sqrt[4]{1 + \left(\Delta k H \theta_a^2\right)^2}}. \quad (29)$$

Обозначим негативно влияющий на результат декоррелирующий множитель в выражении (29)

$$g(\Delta k) = \left[1 + \left(\Delta k H \theta_a^2\right)^2\right]^{1/4}. \quad (30)$$

Можно показать, что выражение для модуля коэффициента корреляции из соотношения (29) отличается от выражения для модуля коэффициента двухчастотной корреляции, полученного без использования инверсного синтеза, в два раза меньшим дробным показателем у декоррелирующего множителя (в варианте без синтеза в уравнениях (29) и (30) будет 1/2).

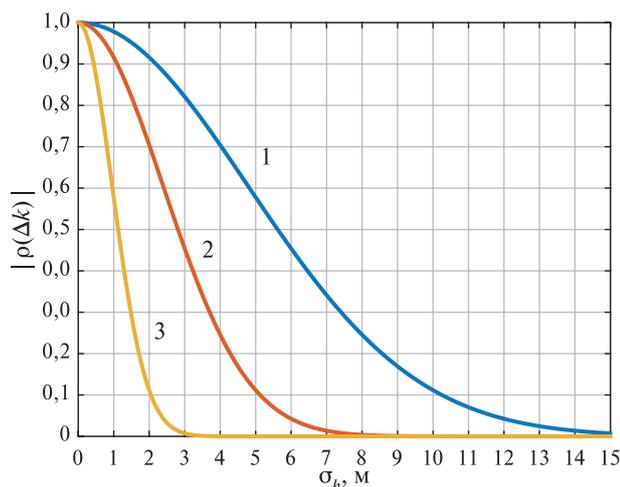


Рис. 5. Зависимость модуля двухчастотного коэффициента корреляции  $|\dot{\rho}(\Delta k)|$  от степени вариации ординат малоразмерных отражателей КМ  $\sigma_h$  относительно среднего значения  $H$  при различном разное частот (1 — 5 МГц; 2 — 10 МГц; 3 — 25 МГц). Режим облучения:  $H = 2000$  км;  $\lambda = 0,8$  см;  $D_a = 100$  м — фазированная ААР

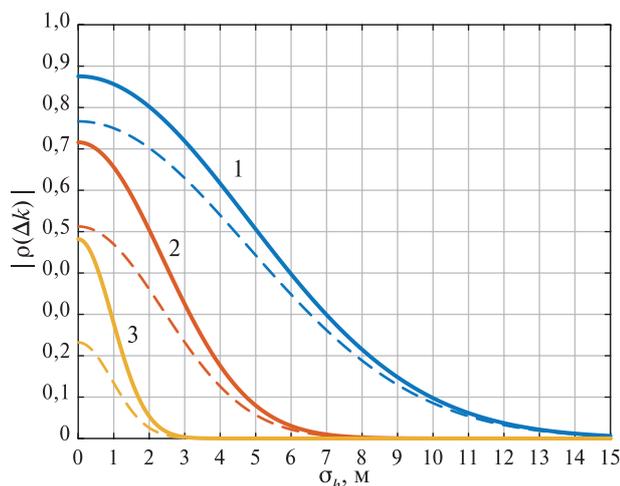


Рис. 6. Зависимость модуля двухчастотного коэффициента корреляции  $|\dot{\rho}(\Delta k)|$  от степени вариации ординат малоразмерных отражателей КМ  $\sigma_h$  относительно среднего значения  $H$  при различном разное частот (1 — 5 МГц; 2 — 10 МГц; 3 — 25 МГц). Режим облучения:  $H = 2000$  км;  $\lambda = 2$  см;  $D_a = 10$  м, пунктирными линиями показаны результаты при отсутствии инверсного синтезирования апертуры антенны

На приведённых рис. 5 и 6 показаны расчётные графики модуля коэффициента ДЧКФ в зависимости от степени вариации ординат малоразмерных отражателей относительно среднего значения при использовании фазированной ААР с узкой ДН антенны, а также при наличии и отсутствии инверсного синтезирования апертуры антенны. Полученные результаты наглядно демонстрируют чувствительность радиолокационного двухчастотного интерферометра к радиальной протяжённости облака малоразмерных элементов КМ.

### Заключение

В работе предложено вместо радиолокационного мониторинга одиночных малоразмерных объектов «космического мусора» (КМ) размером порядка 1 см и менее, осуществить который даже на низких орбитах затруднительно, проводить мониторинг роя таких малоразмерных

объектов. Для этого в статье использована многоточечная модель протяжённой групповой цели (облака КМ) со случайными статистически независимыми парциальными отражателями, которые заполняют некоторую область пространства мелкими объектами КМ, распределёнными по объёму облака случайным образом.

Для выбранной модели облака малоразмерных элементов КМ появляется возможность в режиме вертикального радиолокационного зондирования beam-park определять средние радиальные размеры облака мелкого КМ по среднеквадратичному разбросу ординат малоразмерных фракций относительно среднего значения на высоте  $H$  орбиты пролёта КМ. Продольные размеры области малоразмерных элементов КМ определяются по времени пролёта облучаемой локатором области.

Предложенный мониторинг роя малоразмерных элементов КМ даёт энергетический выигрыш в отношении сигнал/шум в зависимости от превышения средней эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) облака малоразмерных фракций КМ над средней ЭПР отдельной мелкой частицы.

При использовании поверхностно-распределённой фазированной ААР можно добиться наилучших результатов, однако увеличение частотного разноса в двухчастотном зондирующем сигнале позволяет существенно повысить чувствительность двухчастотного коэффициента корреляции к радиальной протяжённости облака мелкого КМ; но в тоже время сокращает диапазон возможных измерений  $\sigma_{\eta}$ . Отсюда следует вывод, что необходим многочастотный режим работы, а именно, для перекрытия возможного диапазона радиальной протяжённости облака малоразмерных элементов КМ от максимально до минимального необходимо не менее четырёх излучаемых частот. Таким образом приходим к необходимости реализации многочастотного радиоинтерферометра.

При более скромных требованиях к антенной системе радиолокационной станции (РЛС) по угловой разрешающей способности повысить чувствительность помогает использование инверсного синтезирования апертуры антенны. Выигрыш в чувствительности может достигать 3 дБ.

Требование иметь малую ширину луча диаграммы направленности антенны (ДНА), тем не менее, сохраняется, т. е., сужая луч ДНА при одном и том же разноре частот в выбранном сверхвысокочастотном диапазоне, можно не только значительно ослабить влияние вредного декоррелирующего множителя, но и значительно улучшить энергетику РЛС.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-19-00485 (<https://rscf.ru/project/23-19-00485/>).

## Литература

1. Баскаков А. И., Мин-Хо Ка, Терехов В. А. Оценка ординат морских волн по взаимной двухчастотной корреляционной функции отраженных сигналов при надирном синтезировании апертуры антенны // Радиотехника. 2006. № 12. С. 37–41.
2. Вениаминов С. С. Космический мусор — угроза человечеству. М.: ИКИ РАН, 2013. 208 с.
3. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. М.: Сов. радио, 1975. 248 с.
4. Космический мусор. В 2 кн. Кн. 1. Методы наблюдений и модели космического мусора / под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. Г. Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2014. 248 с.
5. Молотов И. Е., Вольвач А. Е., Коноваленко А. А., Фалькович И. С., Литвиненко Л. Н., Негода А. А., Федоров О. П., Липатов Б. Н., Горшенков Ю. Н., Агапов В. П., Туккари Дж., Лю Ш. Международные эксперименты по исследованию околоземных объектов с помощью метода РСДБ-локации // Косм. наука и технология. 2004. Т. 10. № 2/3. С. 87–92.
6. Назаренко А. И. Моделирование космического мусора. М.: ИКИ РАН, 2013. 216 с.
7. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
8. Liou J.-C. Risks from orbital debris and space situational awareness // IAA Conf. Space Situational Awareness (ICSSA). 2020. Article JSC-E-DAA-TN76975. 27 p.
9. Matney M. Small Debris Observations from the Iridium 33/Cosmos-2251 Collision // Orbital Debris Quarterly News. 2010. V. 14. Iss. 2.

## Radar monitoring of small-sized space debris objects

A. I. Baskakov, A. A. Komarov, V. A. Permyakov

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”  
Moscow 111250, Russia  
E-mail: KomarovALA@mpei.ru

The task of ground-based radar monitoring of single small-sized objects of space debris (SD) about 1 cm or less in length, even in low Earth orbits, is extremely difficult due to the requirements of high energy and radar resolution. However, the appearance of small-sized objects is associated with the destruction of larger fractions of SD and therefore, as a rule, these are not single objects. Therefore, it is proposed to consider monitoring of not a single small SD element, but a “swarm” of such small-sized objects. In this case, as a first approximation, we can limit ourselves to determining the values of parameters that characterize the structure of the cloud of small-sized SD objects on average. The article uses a multi-point model of an extended group target with random statistically independent partial reflectors that fill a certain area of space with small-sized objects randomly distributed throughout the volume of the SD cloud. In the radial direction, the distribution of small-sized fractions of SD corresponds to the Gaussian distribution relative to a certain average value of orbit height. In the longitudinal direction, the distribution of SD elements is equally probable. It is proposed to estimate the average size of a debris cloud from the variance of the altitude (radial) spread of small-sized debris elements, which is determined by the two-frequency cross-correlation function of radar echo signals reflected from a swarm of small-sized fractions of debris. It is shown that with a high angular resolution of a ground-based radar antenna operating in the beam-park mode of vertical sounding, the necessary sensitivity to the radial extent of the cloud of small-sized fractions of SD is achieved. Narrowing of the antenna radiation pattern one can achieve either by inversely synthesizing the antenna aperture in each frequency channel along the direction of flight of the SD, or by using phased adaptive antenna arrays instead of radio telescopes with bulky mirror antennas. By narrowing the beam of the radar antenna one makes it possible to eliminate the influence of the decorrelating factor on the mutual two-frequency correlation coefficient and increase the sensitivity of measurements.

**Keywords:** space debris, radar monitoring, multi-point model, extended group target, scattering characteristics, reflected signal model, two-frequency cross-correlation function

Accepted: 01.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-130-146

### References

1. Baskakov A. I., Min-Ho Ka, Terekhov V. A., Estimation of the ordinates of sea waves by the two-frequency cross-correlation function of the reflected signals during the nadir synthesis of the antenna aperture, *Radiotekhnika*, 2006, No. 12, pp. 37–41 (in Russian).
2. Veniaminov S. S., *Kosmicheskii musor — ugroza tchelovchestvu* (Space debris is a threat to humanity), Moscow: IKI RAS, 2013, 208 p. (in Russian).
3. Kobak V. O., *Radiolokatsionnye otrazhateli* (Radar reflectors), Moscow: Sovetskoe radio, 1975, 248 p. (in Russian).
4. *Kosmicheskii musor. V 2 kn. Kn. 1. Metody nablyudeniya i modeli kosmicheskogo musora* (Space debris. In 2 v. V. 1. Observation methods and models of space debris), G. G. Raikunov (ed.), Moscow: Fizmatlit, 2014, 248 p. (in Russian).
5. Molotov I. E., Volvach A. E., Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Litvinenko L. N., Negoda A. A., Fedorov O. P., Lipatov B. N., Gorshenkov Yu. N., Agapov V. P., Tukkary G., Liu Sh., International experiments on the study of near-Earth objects using the VLBI method, *Kosmicheskaya nauka i tekhnologii*, 2004, Vol. 10, No. 2/3, pp. 87–92 (in Russian).
6. Nazarenko A. I., *Modelirovanie kosmicheskogo mysora* (Space debris modeling), Moscow: IKI RAS, 2013, 216 p. (in Russian).
7. Tikhonov V. I., *Statisticheskaya radiotekhnika* (Statistical radioengineering), Moscow: Radio i svyaz, 1982, 682 p. (in Russian).

8. Liou J-C., Risks from orbital debris and space situational awareness, *IAA Conf. Space Situational Awareness (ICSSA)*, 2020, Article JSC-E-DAA-TN76975, 27 p.
9. Matney M., Small debris observations from the Iridium 33/Cosmos-2251 collision, *Orbital Debris Quarterly News*, 2010, Vol. 14, Issue 2.