

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.7>

УДК: 621.37

ОБЛИК И ИНФОРМАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАДИОМОНИТОРИНГА

Корчагин Ю.Э., Коровин Д.А.

Воронежский государственный университет,
394018, Воронеж, Университетская пл., д. 1

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2026 г.

Аннотация. Наземно-космическая система радиомониторинга представлена совокупностью пространственно распределенных датчиков добывания информации о наземных (надводных) и воздушных объектах, включающих радиолокационные станции с синтезированием апертуры, оптико-электронные средства видимого и инфракрасного диапазонов, линии связи, обеспечивающие необходимое радиопокрытие земной (водной) поверхности в режиме ретрансляции требуемых объемов данных потребителям. Приведены технические характеристики современных средств космического базирования с высокой разрешающей способностью, а также аналитические выражения, необходимые для детализации исследуемых процессов. Рассмотрены вероятные действия, влияющие на информационную устойчивость мониторинга.

Ключевые слова: радиомониторинг, радиолокационная станция, синтезирование апертуры, оптико-электронное средство, спутниковая система передачи данных.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00891, <https://rscf.ru/project/24-19-00891/>.

Автор для переписки: Корчагин Юрий Эдуардович, korchagin@phys.vsu.ru

Введение

Применение известных принципов системного подхода к исследованию сложных технических систем предполагает три основных этапа действий: генерация вариантов, анализ достигаемой эффективности, выбор предпочтительного с позиций принятого критерия [1, 2]. Придерживаясь этого подхода, уточним порядок и особенности исследования типовой наземно-космической системы радиомониторинга (РМ), состоящей из информационных пространственно-распределенных датчиков.

Генерацию вариантов выполним с учетом имеющихся данных об отечественных и зарубежных системах РМ последнего поколения [3-12]. При анализе эффективности функционирования основных элементов, определяющих облик и возможности системы, будем исходить из развитых теоретических методов, позволяющих оценить соответствие потенциальных и достигнутых технических характеристик. Выбор варианта системы предполагает изучение особенностей функционирования в условиях, которые могут возникать как из-за естественных возмущений среды на трассах распространения электромагнитных волн различных диапазонов, так и из-за преднамеренных действий, препятствующих информационному процессу.

Целью статьи является системное представление описательной модели процесса наземно-космического РМ, включающего детализацию возможностей и технических характеристик основных элементов, а также обобщение аналитических описаний, позволяющих оценить как потенциальные, так и достижимые параметры в режимах извлечения и передачи данных потребителям.

Конкретизируем основные составляющие РМ. Будем считать, что:

– извлечение (добывание) информации о расположении наземных (воздушных) объектов выполняется с помощью радиолокационных средств (РЛС) с высоким разрешением, а также оптико-электронных средств (ОЭС), размещенных на космических аппаратах (КА) на геостационарных, средневысотных и низких орбитах [3-11];

– передача данных мониторинга выполняется в масштабе времени, близком к реальному, на наземные центры обработки и управления орбитальной группировки; в этих центрах производится анализ и обработка текущей информации, а также принимаются решения об объемах и времени ее предоставления потребителям;

– доставка информации осуществляется с помощью космической системы пространственно-распределенных ретрансляторов, обеспечивающих покрытие значительных по площади территорий и морских акваторий [12];

– при функционировании элементов наземно-космической системы могут воздействовать помехи различного происхождения; их действие приводит к интенсификации информационного конфликта между стороной поставщика информации и стороной, противодействующей ее получению потребителю [13, 14].

Рассмотрим более детально содержание каждого этапа и информационные возможности применяемых радиоэлектронных средств.

1. РЛС и ОЭС с высоким пространственным разрешением как средства получения информации о типах и расположении объектов

Основное преимущество РЛС – всепогодность, возможность работы независимо от времени суток. РЛС бокового обзора космического базирования являются наиболее предпочтительным инструментом наблюдения, высокое разрешение в азимутальном направлении (доли метра) обеспечивается синтезированием апертуры (СА), а по дальности – за счет излучения широкополосных сигналов с внутриимпульсной модуляцией. В отличие от типовых РЛС кругового обзора дальность действия РЛС СА определяется корнем 3-й степени от параметров РЛС (мощности передатчика и чувствительности приемника) [15, 16]. Тогда пороговое отношение сигнал/шум η определяется как

$$\eta = \frac{P_{cp} G^2 \theta_0 \sigma \lambda^2}{64 \pi^3 v K_u T_0 k \sin \beta R^3}, \quad (1)$$

где P_{cp} – средняя мощность излучения, G – коэффициент направленного действия антенны по мощности, θ_0 – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) по азимуту, σ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) наблюдаемого объекта при использовании единой приемопередающей антенны, ν – скорость носителя, $K_{ш}$ – коэффициент шума приемника, $T_0 \approx 290^\circ\text{K}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, β – азимут объекта на границе зоны обзора при его первом облучении, R – дальность действия, λ – длина волны.

Из выражения (1) следует, что при СА заметно увеличивается время облучения объекта мониторинга, т.е. $\tau_{obl} = R\theta_0/\nu \sin \beta$. Это приводит к значительному росту энергии отраженного сигнала $\mathcal{E} = P_{cp}\tau_{obl}$, а также к высокой разрешающей способности независимо от дальности и длины волны зондирующего сигнала. Максимальный размер СА за счет перемещения КА на орбите составит $A = R\theta_0/d_a$, где d_a – длина антенны, при этом максимальное линейное разрешение по азимуту $\delta l = R\delta\theta = d_a/2$, здесь $\delta\theta$ – угловое расширение луча.

Из сказанного следует, что применение в составе системы РМ РЛС СА позволяет не только преодолеть ухудшение разрешения по угловым координатам с увеличением расстояния до объекта, но и согласовать его с достигаемым за счет широкополостных сигналов разрешением по дальности.

Учитывая, что дальность радиолокационного обнаружения наземных объектов из космоса находится в пределах 700...2800 км при средней дальности около 500...1000 км, пороговое отношение сигнал/шум η при изменении ЭПР σ от 0,1 до 10 м² будет изменяться в пределах от 1,5 до 1,5·10² для РЛС типа «Лакросс-5» [3-5] и от 2,5 до 2,5·10² для РЛС типа «Топаз-5» [6-8]. При этих значениях отношения сигнал/шум результаты РМ, включающие обнаружение и идентификацию, являются вполне достоверными для большинства практически значимых ситуаций, а процесс наблюдения – вполне устойчивым. Как несложно

убедиться, соответствующие вероятности правильных решений для различных статистических моделей сигнала, учитывающих особенности распространения радиоволн на трассах космос-земля- космос, будут превышать значения $0,8 \dots 0,9$. В то же время на максимальных дальностях обнаружения (более 2000 км) объектов с ЭПР $\sigma = 0,1 \dots 3 \text{ м}^2$ пороговое отношение сигнал/шум оказывается недостаточным.

Рассматривая эти результаты как ориентировочные, позволяющие судить о потенциальных возможностях конкретных РЛС, а также учитывая значительную протяженность трассы распространения радиоволн, оценим влияние основных случайных факторов, сопутствующих обработке принимаемого РЛС траекторного сигнала.

По аналогии с [15] положим, что распределение амплитуды сигнала подчиняется закону Релея с математическим ожиданием амплитуды сигнала на входе приемника m_1 и дисперсией d_1 . Тогда $d_1 = (2 - 0,5\pi)d_2$, где $d_2 = 0,5P$, а P – мощность входного сигнала. По определению дисперсия сигнала формируемого радиоизображения объекта из-за флуктуаций амплитуды рассчитывается как [15, стр.159]

$$d_3 = \int_{-A/2}^{A/2} \int_{-A/2}^{A/2} r_b(x_1, x_2) dx_1 dx_2 + (m_1 A)^2, \quad (2)$$

где $r_b(x_1, x_2)$ – корреляционный момент амплитуды входного сигнала, A – длина синтезированной апертуры.

В случае быстрых флуктуаций из-за статистической независимости отсчетов функция $r_b(x_1, x_2) \rightarrow 0$, поэтому $d_3 \approx 0,25\pi B_0^2 G^2 A^2$, где B_0 – значение амплитуды. Если флуктуации медленные, значение сигнала примерно одинаково по всей длине синтезированного раскрытия, тогда $d_3 \approx B_0^2 G^2 A^2$. Отсюда следует, что величина дисперсии выходного сигнала РЛС СА слабо зависит от уровня амплитудных флуктуаций.

Исследования неоднородности среды распространения обычно связывают с флуктуацией фазы траекторного сигнала, которая может существенно влиять

на возможности синтезирования протяженной апертуры. Для оценки нестабильности фазы в этом случае применяется функция вида [17]

$$d_4(x_1, x_2) = 5,82(2\pi/\lambda)^2 RC_n^2 |x_1 - x_2|^{5/3}, \quad (3)$$

где C_n^2 – структурная постоянная, характеризующая степень неоднородности коэффициента преломления среды.

Согласно [15] мощность сигнала, определяющую качество радиолокационного изображения объекта, можно представить следующим образом:

$$P = \int_{-A/2}^{A/2} \int_{-A/2}^{A/2} r_1(x_1, x_2) dx_1 dx_2, \quad (4)$$

где $r_1(x_1, x_2)$ – корреляционная функция комплексной амплитуды траекторного сигнала $r_1(x_1, x_2) = B_0^2 G^2 [1 - 0,5d_4(x_1, x_2)]$. Отсюда следует, что мощность P с учетом (3) уменьшается с ростом флуктуаций коэффициента преломления среды распространения, т.е.

$$P = B_0^2 G^2 \left\{ A^2 - 2,91 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 RC_n^2 \int_{-A/2}^{A/2} \int_{-A/2}^{A/2} |x_1 - x_2|^{5/3} dx_1 dx_2 \right\}. \quad (5)$$

Учет рассмотренных и других потерь при обработке сигналов в современных РЛС СА показывает, что суммарные потери обработки находятся в пределах 9,5...10 дБ, при этом время синтезирования за счет перемещения КА и интервал синтезирования в обзорном режиме составляют примерно (1-1,8) с и (6-13) км, соответственно, а в режиме детального мониторинга (6-11,5) с и (43-78) км. Разрешающая способность по каждой координате колеблется от 0,5 м до 3 м. Эти показатели в настоящее время реализованы в указанных выше образцах космических РЛС СА.

Выявленная величина потерь несколько снижает показатели, рассчитанные выше на основе (1). Однако можно заметить, что для средних и меньших дальностей, когда отношение сигнал/шум оказывается выше требуемого для принятия адекватных решений, его снижение практически не

влияет на вероятностные характеристики наблюдения объектов. Вероятность обнаружения заметно уменьшается для объектов с ЭПР $\sigma \leq 2...3 \text{ м}^2$ на максимальных дальностях. Поэтому для парирования последствий обычно применяется режим детального мониторинга с увеличенным (в 5...7 раз) временем когерентной обработки сигнала. Другим способом может являться корректировка орбиты в нужном направлении либо использование другого носителя с пространственным положением, позволяющим охватить заданный сектор поверхности.

Если объект считается обнаруженным в зависимости от числа разрешаемых элементов N , т.е. вероятность обнаружения $P_{обн} = 1 - (1 - p_0)^N$, где p_0 – вероятность обнаружения одного элемента, для случая диффузного отражения при улучшении разрешения в 2, 4, 8 раз вероятность $P_{обн}$ возрастает с 0,1 ($N=1$) до 0,95 ($\sqrt{N}=8$). При наличии в составе объекта выраженных «блестящих точек», дающих зеркальное отражение, отмеченная тенденция роста вероятности обнаружения сохраняется.

Таким образом, космические РЛС СА могут рассматриваться как наиболее важные элементы, обеспечивающие устойчивость процесса РМ и определение типажа и местоопределения наземных и воздушных объектов практически независимо от состояния окружающей среды.

Наряду с радиолокационной компонентой в процессе РМ широкое применение получают фотографические, телевизионные, инфракрасные и другие ОЭС, размещаемые на специализированных КА. Для всех этих вариантов наблюдения процесс формирования изображения объекта основан на энергетической модели сигнала на выходе чувствительных элементов (например, матричных фотоприемных устройств), описывающей преобразование энергетических характеристик оптических сигналов наблюдаемой сцены средой распространения и установленными на КА оптическими приборами. Решение данной задачи для частично когерентного поля получено в [18], откуда следует, что при некогерентном излучении и

пространственно-однородной рассеивающей среде, позволяющей пренебречь зависимостью от длины волны, пространственно-частотная характеристика канала формирования изображения описывается произведением трех функций: функции когерентности среды $M(2\pi cR\vec{w}/\omega)$, случайной составляющей автокорреляционной функции объектива $\varphi(2\pi cR\vec{w}/\omega)$, усредненной по ансамблю типов используемых приборов, и автокорреляционной функции $T(2\pi cR\vec{w}/\omega)$ регулярной составляющей апертурной функции объектива, т.е. [14, стр. 58]

$$G(\vec{w}) = M\left(\frac{2\pi cR}{\omega}\vec{w}\right)\varphi\left(\frac{2\pi cR}{\omega}\vec{w}\right)T\left(\frac{2\pi cR}{\omega}\vec{w}\right). \quad (6)$$

Здесь c – скорость света, R – дальность до объекта мониторинга, ω – частота, вектор \vec{w} формально заменяет разность пространственных аргументов $\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2$, где $\vec{\rho}$ – вектор пространственных координат в плоскости апертуры объектива.

Так как функции $\varphi(\cdot)$ и $T(\cdot)$ описывают свойства формирующей оптики, уточним некоторые особенности формирования функции когерентности при наблюдении в турбулентной атмосфере. Считаем, что рассеивающий слой занимает пространство между объектом и средством наблюдения, а также, что интервал стационарности атмосферы меньше времени экспозиции. Тогда, согласно [17, 19, 20] нормированная пространственная корреляционная функция поля на выходе анизотропного рассеивателя канала имеет вид

$$M(\vec{\rho}) = \exp(-D(\vec{\rho})/2), \quad (7)$$

где $D(\vec{\rho})$ – структурная функция поля, которая в случае турбулентной атмосферы представляется как

$$D(\vec{\rho}) = 6,884(|\vec{\rho}|/r_0)^{5/3}, \quad (8)$$

где r_0 – интервал пространственной когерентности на выходе канала. Формула (8) в случае наблюдения на больших дальностях (плоское поле) может быть записана через структурный коэффициент атмосферной турбулентности C_n^2 [17]

$$D(\vec{\rho}) = 2,914k^2 |\vec{\rho}|^{5/3} \int_0^Z C_n^2(x) dx, \quad (9)$$

при этом интервал корреляции равен

$$r_0 = 0,1846\lambda^{6/5} \left(\int_0^Z C_n^2(x) dx \right)^{-3/5}, \quad (10)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, Z – дальность наблюдения ($Z = R$).

Из (8) следует, что нормированная по максимуму к единице функция $M(\vec{\rho})$, приведенная к плоскости визируемого объекта, имеет вид [14, стр. 66]

$$M(\vec{w}) = \exp\left(-3,442(Z\vec{w}/kr_0)^{5/3}\right). \quad (11)$$

Значение структурного коэффициента C_n^2 обычно определяется на основе обобщения известных экспериментальных данных, полученных при различных условиях наблюдения: времени суток и года, метеоусловий, характеристик подстилающей поверхности. В частности, опубликованные данные отражают изменение C_n^2 для различных условий наблюдения – пределы определяются величинами $1,5 \cdot 10^{-13}/h$ и $10^{-12}/h^{2/3}$, где h – высота трассы над поверхностью Земли.

В работе [14, стр. 67] предложена следующая аппроксимация структурной функции

$$D(\vec{\rho}) = 6,884(\rho/r_0)^2, \quad (12)$$

здесь $\rho = |\vec{\rho}|$.

Тогда, как можно убедиться, пространственно-частотная характеристика канала формирования изображения может быть представлена в виде

$$G(w) = M(Zw/k)H(Zw/k) \approx \exp(-bw^2), \quad (13)$$

где $M(Zw/k) = \exp\left(-3,4(Zw/k)^2/r_0^2\right)$, $H(Zw/k) = \exp\left(-3,4(Zw/k)^2/r_0^2\right)$,

$b = Z^2 \left(\frac{3,4}{r_0^2} + \frac{4}{d^2} \right) / k^2$, d – диаметр входного зрачка формирующей оптики.

Если предположить, что весовая функция элемента фотоприемной матрицы с угловым полем зрения δ , приведенным к плоскости объектива, $h(x) = 1/Z\delta$, то нормированная пространственно-частотная характеристика канала изображения на выходе будет равна [14, стр. 69]

$$G_1(w) = \exp(-cw^2), \quad (14)$$

где $c = b + Z^2\delta^2/15$.

В [14] отмечено, что ошибки расчетов параметров изображения по (14) независимо от длины волны λ не превышают 10 %.

Среди ОЭС как инструментов мониторинга [9-11, 14, 19] наибольшее развитие получили размещенные на КА средства, обеспечивающие получение снимков, включая обзорные видеосъемки больших участков местности, группы объектов разного размера, детальные снимки отдельных объектов, стереоскопические снимки, выполненные под различным ракурсом на одном витке путем отклонения оси оптической системы или на разных витках. Основными режимами съемки являются панхроматический (одноканальный), многоспектральный и спектрональный. Среди участков оптического спектра электромагнитных волн наибольшее применение получила телевизионная съемка (0,38-1,3 мкм) при благоприятных метеоусловиях в дневное время, при этом данные стереоскопических снимков широко используются для распознавания и анализа характеристик объектов, картографирования, создания цифровых моделей, и инфракрасная (ИК) съемка теплоконтрастных объектов в дневное и ночное время (0,8-2,5; 3,0-5,0; 8,0-12,5 мкм). Детальная ИК съемка при пороговой чувствительности тепловизоров $0,015^\circ\text{K}$ выполняется в окнах прозрачности атмосферы для этого типа излучения.

При анализе будем ориентироваться на технические характеристики телевизионной и ИК аппаратуры, размещенной на современных КА (типа американского КА «Кихоул-11») и обеспечивающей наилучшее разрешение на местности [9-11]. В частности, при использовании эллиптических солнечно-синхронных орбит с высотами апогея 350 (1020) км и перигея 280 (270) км,

линейное разрешение на местности в режиме детальной съемки, районы которой выбираются по результатам обзорной съемки, составляет соответственно для панхроматического, многоспектрального (спектрозонального) и ИК 0,15 (0,15), 0,6 (0,6), 5-10 (0,7; 2,2; 6,1) м; при круговой орбите на дальности около 400 км линейное разрешение в этих режимах составляет 0,19; 0,8; 1 (2,5; 6,6) м. Полоса съемки может изменяться для телевизионной и ИК съемки от 2,8 до 4,2 км. Количество элементов, обеспечивающих указанное линейное разрешение, для диапазона 0,38-1,3 мкм колеблется в пределах от 5000 до 32000, а в ИК диапазонах от 1100 до 4200. Судя по характеристикам передачи данных в отдельных участках диапазона (20...42 ГГц), скорости передачи 0,064-6,176 Мбит/с и объемах накопителей для сохранения полученной информации, которая не передается в процессе полета над необорудованной для приема территорией, картина формируется и обновляется практически непрерывно в реальном масштабе времени.

2. Подсистема передачи данных

Положим, что анализ данных РМ, полученных в ходе радиолокационного и оптико-электронного наблюдения, выполняется в специализированных наземных центрах, при этом с помощью разработанных и освещенных в известных источниках алгоритмов [21] устраняются определенные дефекты изображений, выполняется их классификация, рассчитывается объем и скорость передачи данных потребителям.

В качестве подсистемы передачи данных могут использоваться линии связи различных диапазонов и пространственного размещения, обеспечивающие в широком спектре условий структурную избыточность и повышенную помехозащищенность сообщений. Ниже рассматривается линия, образованная пространственно распределенными космическими ретрансляторами с требуемым радиопокрытием поверхности [12]. По мнению зарубежных и отечественных специалистов такие линии являются наиболее предпочтительными и устойчивыми при значительной нагрузке

электромагнитного спектра. Примерами эффективных космических линий связи являются введенные в эксплуатацию низкоорбитальная (высота 1200 км) система One Web, включающая в перспективе группировку из 648 КА, и система Starlink, которая будет состоять из 30000 спутников-ретрансляторов в разных орбитальных плоскостях и высотах от 328 км до 614 км, причем около 85 % спутников будут работать на очень низких орбитах с высотами порядка 400 км. Несмотря на подобие структур этих и других спутниковых линий связи (СпЛС), основным преимуществом системы Starlink является полный охват всей поверхности Земли и высокая надежность, обеспечиваемая, в том числе подключением при необходимости для передачи данных соседних аппаратов по линии межспутниковой связи.

Остановимся более подробно на структуре и технических характеристиках СпЛС Starlink как апробированной в реальных условиях эксплуатации. Космический сегмент включает группировку КА, обеспечивающих радиопокрытие территорий, абонентский сегмент состоит из стационарных и пользовательских терминалов, включая маршрутизаторы с различными технологиями модуляции (DSSS, OFDM) и скоростями передачи данных от 11 до 866,7 Мбит/с. Рабочие частоты пользовательских терминалов в режиме приема составляют (10700 – 12700) МГц, а в режиме передачи (14000 – 14500) МГц. При полном развертывании СпЛС и внедрении элементов системы второго поколения диапазон частот «вниз» планируется расширить до 20 ГГц, а также использовать поддиапазон 71 – 76 ГГц; диапазон частот «вверх» предполагается увеличить до 30 ГГц с использованием поддиапазона 81 – 86 ГГц. Кроме управления частотным диапазоном в режиме ретрансляции данных, в том числе добываемых в ходе РМ, в зависимости от текущей радиоэлектронной обстановки помехозащищенность группировки поддерживается применением сигналов с круговой поляризацией правого и левого направления вращения, фазированных антенных решеток с коэффициентами усиления антенн шлюзовых станций 49,5 дБ на передачу и 46,9 дБ на прием, пользовательских терминалов около 32...35 дБ.

Рассмотренные способы получения и передачи информации позволяют зафиксировать реальные достижения в области РМ, базирующиеся на интеграции и сопряжении различных типов пространственно распределенных датчиков, минуя промежуточные звенья и связанные с ними энергетические и временные потери. Применение современных инновационных информационных технологий направлено на повышение устойчивости, быстрого восстановления работоспособности при негативных внешних факторах, оперативного и адаптивного управления с учетом изменений радиоэлектронной обстановки [22].

3. Помехоустойчивость системы наземно-космического мониторинга

Перейдем к анализу наиболее вероятных с точки зрения снижения эффективности наземно-космической системы РМ действий, которые могут иметь как непреднамеренный, так и преднамеренный характер. Не претендуя на исчерпывающую полноту, выделим те элементы системы, которые потенциально являются наиболее уязвимыми для помех. К ним можно отнести РЛС и ОЭС, предназначенные для добывания информации о состояниях и местоположении объектов, а также аппаратуру СпЛС, предназначенную для передачи данных потребителям. Следуя [13, 14, 23], при этом целесообразно ориентироваться на возможность скрытия (маскирования) объектов, а также на дезинформацию об их наличии.

Сначала рассмотрим особенности функционирования РЛС СА в условиях воздействий, способных повлиять на исход информационного конфликта.

Согласно [24, стр. 93], условие обнаружения наземного объекта описывается неравенством

$$\Delta RL_a \geq q_c^2 K_{обр} \sigma / \sigma_0, \quad (15)$$

где ΔR – разрешающая способность РЛС, q_c^2 – коэффициент различимости сигнала на фоне помехи, равный отношению сигнал/шум, необходимому для обнаружения сигнала с заданной вероятностью при соответствующем уровне ложной тревоги ($q_c^2 = \eta$), $K_{обр}$ – коэффициент потерь мощности (энергии)

сигнала при его обработке, σ_0 – удельная ЭПР подстилающей поверхности, L_a – длина синтезированной апертуры РЛС.

Аппроксимируя диаграмму рассеяния подстилающей поверхности выражением $\sigma_0(\alpha) = \sigma_n \sin^n \alpha$, где α – отсчитываемый от горизонта вниз угол облучаемого участка поверхности, σ_n – максимальное значение удельной ЭПР при $\alpha = \pi/2$, изменяя величину n ($n=0$ соответствует закону Эйлера; $n=2$ – закону Ламберта), интегрируя энергетический спектр помехи от Земли по частоте Доплера в пределах $(-f_g, f_g)$, $f_g = 2v/\lambda$ в предположении аппроксимации боковых лепестков диаграммы направленности РЛС постоянным уровнем, получаем выражение для суммарной мощности помехи в виде [24]

$$P_{\text{помЗ}} = \frac{PG_{\text{бл}}S_{\text{бл}}\sigma_n}{16\pi H^2(1+n/2)}, \quad (16)$$

где H – высота полета КА, $G_{\text{бл}}$, $S_{\text{бл}}$ – коэффициент направленного действия передающей антенны и эффективная площадь приемной антенны для среднего уровня боковых лепестков относительно главного (нижняя полусфера), P – мощность излучения РЛС.

Используя (15) и (16), можно убедиться, что при типовых условиях обнаружения сравнительно небольших наземных объектов (типа автомобиль, катер и т.п.) условия их наблюдения будут существенно различаться. В частности, если ЭПР объекта сопоставима с уровнем фона, а потери $K_{\text{обн}} \approx 10$ дБ, то при разрешении по каждой координате 1 м и 3 м величина различимости сигнала равна $q_c^2 \leq 0,1$, т.е. объекты не обнаруживаются. Однако заметим, что реализация ЭПР σ на уровне удельной отражающей поверхности фона с помощью различных технических средств не всегда возможна, так как уровень снижения может колебаться в интервале 20...40 дБ. Поэтому в [24] отмечается, что искомый результат может достигаться только при совместном применении уменьшающих отражающую способность объектов пассивных

средств и активных шумовых (маскирующих) помех. В этом случае общий коэффициент снижения дальности обнаружения равен $K = k_1 k_2^2$, где k_1 – коэффициент снижения дальности обнаружения из-за воздействия шумовых помех, k_2 – коэффициент снижения дальности обнаружения из-за искусственного снижения отражающей способности лоцируемого объекта. В частности, при снижении дальности обнаружения за счет помех в 3 раза и в 1,78 раза за счет уменьшения отражательной способности объекта (соответствует снижению ЭПР на 10 дБ) общее снижение дальности составит 9,5 раза вместо 5,3 раза, соответствующего простому мультипликативному объединению эффектов.

Итак, информационная устойчивость функционирования РЛС СА как важного элемента РМ земной (водной) поверхности зависит от отражающих свойств наблюдаемых объектов, а также от эффективности мероприятий по их скрытию, например, маскирования отдельных участков с помощью шумовых радиоизлучений. Обычно структура этих излучений (частота, ширина спектра, поляризация) согласовывается с зондирующими сигналами для увеличения влияния на работоспособность РЭС, расположенных в относительной близости.

Далее рассмотрим факторы, связанные с уменьшением информационных возможностей рассмотренных выше типов оптических датчиков из-за мешающих воздействий, которые могут иметь место в процессе РМ.

Выше основное внимание было уделено космическим системам наблюдения с высокой разрешающей способностью как наиболее информативным. Оптическая заметность объектов, как известно, определяется количеством видимых элементов поверхности, контрастом отдельного элемента соответствующей площади, освещенностью, яркостью фона в направлении наблюдения, геометрическими характеристиками объекта и его пространственной ориентацией. В работе [23] рассмотрено алгоритмическое и программное обеспечение синтеза фотометрических преобразований типовых объектов, находящихся в естественных условиях освещения в атмосфере. На его основе обоснованы предложения по камуфлирующему

раскрашиванию объектов, обеспечивающему снижению его заметности на различных фонах. В частности, в диапазоне 0,38 – 1,2 мкм заметность может снижаться примерно в 20...40 раз. При этом относительный яркостный контраст объектов остается достаточно высоким, особенно в условиях интенсивного движения объекта, что при дневном освещении значительно затрудняет его маскирование и обеспечивает приемлемые характеристики обнаружения и идентификации объекта.

Наиболее многочисленными объектами наблюдения ОЭС и ИК диапазона являются тела с излучателями, воспринимаемыми как точечные. Обычно это факелы работающих двигателей ракет и самолетов, вертолетов, различных пиротехнических устройств. В отличие от телевизионных изображений, идентифицируемых по их детальным эталонным изображениям, в ИК диапазоне распознавание обычно выполняется по совокупности относительно простых пространственных и спектральных признаков.

В выделенных участках ИК диапазона, используя величину среднего радиационного контраста, можно указать типовые пределы ее изменения – 5...40°К. При чувствительности современных тепловизоров 0,013°К, характерных площадях проекции объектов РМ, средних значениях разницы радиационной температуры объекта и фона для КА, расположенных на эллиптических орбитах с высотами апогея и перигея в сотни километров, удастся реализовать необходимую точность восстановления температуры элементов визируемых объектов РМ, обычно это выполняется с применением двухспектральных ИК-обнаружителей. Если для скоростных целей искажения температурных и пространственных характеристик может оказаться затруднительным, то для малоподвижных пространственно-протяженных объектов в известных источниках [14, 25] рассматривается применение ложных целей с характеристиками, аналогичными истинным. Например, для тепловой маскировки объекта может применяться теплорассеивающий экран над моторным отделением, при этом для исключения спектральной селекции контрастная температура экрана на должна превышать 3...5°К. Другим

примером является создание в окрестности объекта случайного теплового поля, образуемого группой высокотемпературных пиротехнических излучений и клубов теплового дыма. Это приводит к загробению порога обнаружения объекта вплоть до его полного исключения.

Отсюда следует, что на информационную устойчивость ОЭС, определяемую рядом естественных факторов, связанных с состоянием окружающей среды, могут влиять специальные мероприятия, направленные на срыв РМ. Их детальное изучение является предметом исследований, выходящих за рамки данной работы.

Рассмотрим кратко принципиальную возможность снижения качества передачи потребителям данных, добываемых радиолокационными и оптико-электронными датчиками в режимах повышенного разрешения. Будем как и ранее полагать, что система связи включает множество пространственно-распределенных по орбитам ретрансляторов с радиопокрытием выделенных участков земной и водной поверхности.

Не обсуждая физического уничтожения ретрансляторов, допустим возможности создания маскирующих помех непосредственно с Земли. Как несложно убедиться, энергетический потенциал такой помехи при согласовании частотных диапазонов должен составлять примерно 60дБ/Вт с управлением положения луча антенны в пространстве. В частности, для линий связи типа Starlink это может привести к блокированию зоны работы одного или нескольких ретрансляторов. Однако, учитывая возможности оперативного переключения частотных каналов и перераспределение информации на другие, не пораженные помехой, ретрансляторы, эффективность подобного противодействия будет низкой. Отмеченное обстоятельство лишь подтверждает известный тезис о сложности борьбы с пространственно-распределенной системой из одной точки пространства [26].

Заключение

Подводя итоги изложенному, отметим, что, судя по развернутым в космосе системам РМ, включающим радиолокационные и оптико-электронные датчики получения информации о местоположении и типаже объектов, находящихся на земной (водной) поверхности, а также в воздушном пространстве, пространственно распределенным по различным орбитам системам передачи данных различным потребителям информационная устойчивость мониторинговых процессов является достаточно высокой для решения различных прикладных задач. Наибольшее влияние на функционирование системы вплоть до полного или частичного маскирования объектов наблюдения могут оказать преднамеренные воздействия на процессы получения информации РЭС и ОЭС; воздействие на пространственно распределенные линии связи с целью нарушения радиопокрытия необходимых территорий представляется менее вероятным.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00891, <https://rscf.ru/project/24-19-00891/>.

Литература

1. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. – Москва: Высшая школа, 1998. – 319 с.
2. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. – Москва: Наука, 1969. – 393 с.
3. Day D., Logsdon J., Latell B. Eye in the sky: the story of the CORONA spy satellites. – Smithsonian Institution, 2015.
4. Richelson J. America's space sentinels: DSP satellites and national security. – University Press of Kansas, 1999.
5. D'Errico M. Evolution of Spaceborne SAR Missions in Earth Orbit // Remote Sensing. – 2025. – Т. 17. – №. 22. – С. 3773.
6. Richelson J.T. The US intelligence community. – Routledge, 2018.

7. Day D.A. In defense of the beleaguered spysat // The Space Review. June, 2004.
URL: <https://www.thespacereview.com/article/161/1>
8. Dornheim, M.A. FIA outline takes shape // Aviation Week & Space Technology, 10 Dec. 2001, p. 73. <https://www.globalsecurity.org/org/news/2001/011221-fia.htm>
9. Richelson J. America's secret eyes in space: the US keyhole spy satellite program. – 1990.
10. Day D.A. Intersections in real time: the decision to build KH-11 KENNEN reconnaissance satellite (Part 1) // The Space review. September 9, 2019.
URL: <https://www.thespacereview.com/article/3791/1>
11. Day D.A. The long road to near-real-time satellite reconnaissance: a chronology // The Space Review. – 2025. URL: <https://thespacereview.com/article/5003/1>
12. Пехтерев С.В., Макаренко С.И., Ковалевский А.А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 4. – С. 190-255.
13. Перунов Ю.М., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба в космосе. – Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 348 с.
14. Южно П.М. Преднамеренные оптические помехи высокоточному оружию. – Москва: Радиотехника, 2017. – 640 с.
15. Кондратенков Г.С., Потехин В.А., Реутов А.П., Феоктистов Ю.А. Радиолокационные станции обзора Земли. – Москва: Радио и связь, 1983. – 272 с.
16. Мельник Ю.А., Зубкович С.Г., Степаненко В.Д. Радиолокационные методы исследования Земли. – Москва: Советское радио, 1980. – 264 с.
17. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – Москва: Наука, 1967. – 548 с.
18. Понькин В.А., Южно П.М. Энергетическая модель процесса формирования изображения оптической системой // Радиотехника и электроника. – 1983. – Т. 27. – № 6. – С. 1051-1057.
19. Молебный В.В. Оптико-локационные системы. – Москва: Машиностроение, 1981. – 184 с.

20. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т.1. – М.: Мир, 1981. – 280 с.
21. Джайн А.К. Успехи в области математических моделей для обработки изображений // ТИИЭР. – 1981. – Т. 9. – № 5. – С. 9-39.
22. Молитвин А. О реализации единого информационного пространства НАТО // Зарубежное военное обозрение. – 2008. – № 1. – С. 23-27.
23. Радзиевский В.Г., Быков В.В., Понькин В.А., Юхно П.М. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии. – М.: Радиотехника, 2006. – 424 с.
24. Быков В.В. Возможности современных радиолокационных систем в условиях совместного применения способов типа «Стелс» и активных шумовых помех // В кн. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии; под ред. В.Г. Радзиевского. – М.: Радиотехника, 2006. – С. 92-100.
25. Филин С.А., Молохина Л.А. Средства снижения заметности (По патентным материалам). – Москва: ИНИЦ Роспатента, 2003. – 215 с.
26. Радзиевский В.Г. Сетецентрическая пространственно-распределенная система на основе малогабаритных модулей разведки и помех // Радиотехника. – 2012. – № 6. – С. 4-11.

Для цитирования:

Корчагин Ю.Э., Коровин Д.А. Облик и информационная устойчивость пространственно-распределенной наземно-космической системы радиомониторинга // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.7>