

Особенности обеспечения требуемого шумового эквивалента и радиометрического разрешения в РСА X-диапазона

К.К. Храмов, В.В. Костров

*Муромский институт Владимирского государственного университета
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23
E-mail: hramovkk@gmail.com*

В докладе рассмотрены вопросы обеспечения требуемых значений удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) шумового эквивалента и радиометрического разрешения радиолокаторов с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования при их работе на базе малых космических аппаратов. Приведен необходимый математический аппарат и выполнен расчет указанных величин для РСА X-диапазона, работающих в маршрутном режиме обзора при максимальном разрешении. Проведен анализ влияния основных технических характеристик космических РСА на УЭПР шумового эквивалента и радиометрическое разрешение.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры (РСА), удельная эффективная поверхность рассеяния, шумовой эквивалент, радиометрическое разрешение, маршрутный режим.

Issues of ensuring the required noise equivalent sigma zero and radiometric resolution in X-band SAR

K.K. Khramov, V.V. Kostrov

Murom Institute of Vladimir State University

The report discusses the issues of ensuring the required values of the noise equivalent sigma zero and radiometric resolution of space-borne synthetic aperture radars (SAR) when they operate on the basis of small satellites. The necessary mathematical apparatus is given and the indicated values are calculated for the X-band SAR operating in strip mode at maximum resolution. An analysis of the influence of the main technical parameters of space SAR on the noise equivalent sigma zero and radiometric resolution was carried out.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), noise equivalent sigma zero, radiometric resolution, stripmap mode.

Введение

В настоящее время радиолокационные системы с синтезированием апертуры антенны (РСА) космического базирования представляют собой эффективные, надежные и перспективные средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с достаточно широкими возможностями [1-4].

Вместе с тем количество космических аппаратов (КА) радиолокационного зондирования меньше числа КА оптического наблюдения [5]. Это обусловлено более жесткими техническими требованиями и ограничениями, предъявляемыми к РСА космического базирования, а также другими, в частности, экономическими причинами. Ограничения касаются, прежде всего, ресурсов системы энергоснабжения, мощности передатчика, размеров антенных систем, вычислительных возможностей бортовой аппаратуры, пропускной способности канала передачи информации, стоимости средств выведения КА [4, 6].

В последние годы наблюдается тенденция перехода РСА землеобзора космического базирования к применению сравнительно компактных радиолокаторов на базе малых космических аппаратов (МКА) и ракет-носителей легкого класса [5-11]. При этом среди факторов, влияющих на эту тенденцию, можно назвать [5]:

- развитие технологий в областях микроэлектроники и аппаратуры наблюдения;
- рост предложений по средствам выведения МКА, в т.ч. по групповым запускам;
- появление и развитие концепции разработки унифицированных платформ, что позволяет снижать стоимость, увеличивать надежность и уменьшать время изготовления МКА;
- увеличение числа задач, решаемых с помощью МКА.

Целью работы является оценка достижимой удельной эффективной поверхности рассеяния шумового эквивалента и радиометрического разрешения радиолокаторов с синтезированием апертуры космического базирования X-диапазона при их работе на базе малых космических аппаратов в маршрутном режиме обзора.

Постановка задачи

Удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР) шумового эквивалента (радиометрическая чувствительность) и радиометрическое разрешение наряду с углом визирования и используемым диапазоном длин волн относятся к основным данным, используемым при расчёте проектных параметров целевой аппаратуры для РСА [4]. При этом для первой итерации расчётов в качестве начальных данных задаются высотой рабочей орбиты H и углом визирования β . Для космических РСА значения угла визирования находятся в пределах 20...60 градусов: при малых β ухудшается разрешение по горизонтальной дальности и возрастает уровень сигнала фона, а при больших – уменьшается диапазон однозначного измерения дальности и ухудшается отношение сигнал-шум.

В известной литературе, например [2, 4-9, 11], имеются данные по расчету чувствительности для частных случаев, описывающих конкретные радиолокационные системы с синтезированием апертуры. При этом практически отсутствуют обобщенные результаты, позволяющие оценить качественное и количественное влияние наиболее значимых технических характеристик и параметров РСА на их радиометрическую чувствительность и радиометрическое разрешение.

Выполним расчёты для сцены (рис. 1), содержащей носитель РСА – космический аппарат КА, движущийся по орбите с постоянной орбитальной скоростью V_0 на высоте H . Визирование наблюдаемого участка местности осуществляется под углом β . Угол падения γ электромагнитной волны на этот участок (угол места) и наклонная дальность R_0 зависят от значений H и β [1, 4]. Зададимся следующими параметрами: режим съёмки – нормальный боковой обзор (угол наблюдения $\theta_n = 90^\circ$), длина волны зондирующего сигнала $\lambda = 3,14$ см (X диапазон).

Выражение для расчета удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) шумового эквивалента (радиометрической чувствительности) может быть получено из уравнения максимальной дальности обнаружения цели [1, 2]

$$R_0^4 = \frac{P_u \tau_u N_u G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 N_0 Q L}, \quad (1)$$

где P_u – импульсная мощность излучения; τ_u – длительность импульсов; $N_u = T_{ca} F_n$ – количество когерентных импульсов, излученных за время зондирования T_{ca} (время

синтезирования апертуры) и следующих с частотой повторения F_n ; $G = 4\pi\eta S/\lambda^2$ – коэффициент усиления антенны, зависящий от площади S и коэффициента использования η антенны; σ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели; $N_0 = k_0 T_0 F_u$ – спектральная плотность мощности внутреннего шума приемника, определяемая его коэффициентом шума F_u , постоянной Больцмана $k_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц·°К) и абсолютной температурой приемной системы $T_0 = 290$ °К; L – суммарные потери в канале распространения сигнала; Q – отношение сигнал-шум.

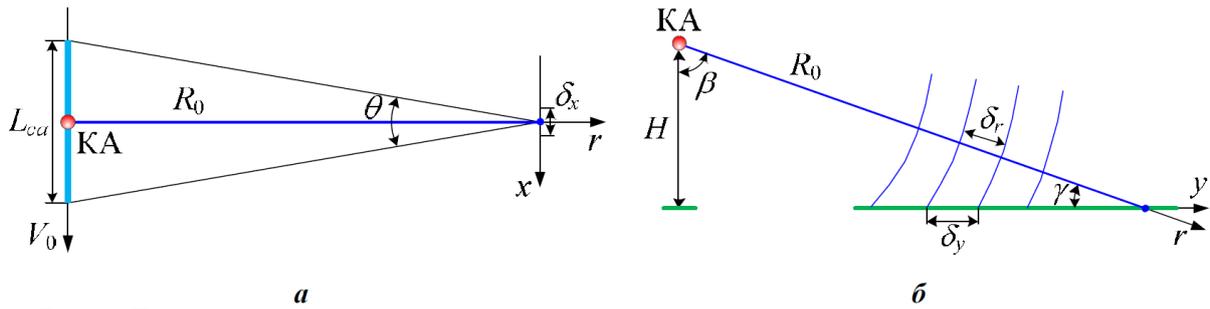


Рис. 1. Геометрия обзора в маршрутном режиме съемки: азимутальная плоскость (а), угломестная плоскость (б)
Удельная эффективная поверхность рассеяния шумового эквивалента

Для нормального бокового обзора справедливо равенство

$$N_u = \frac{\lambda R_0 F_n}{2\delta_x V_0}, \quad (2)$$

где $\delta_x = \lambda R_0 / (2L_{ca})$ – азимутальное разрешение РСА; L_{ca} – длина синтезированной апертуры (рис. 1,а).

ЭПР цели определяется выражением [1, 2]

$$\sigma = \sigma_0 \delta_x \delta_y, \quad (3)$$

где σ_0 – удельная ЭПР наблюдаемого участка местности; δ_y – разрешение РСА по горизонтальной дальности (рис. 1,б).

Чувствительность РСА, характеризующая влияние шумов приемника, определяется значением минимальной удельной ЭПР фона местности, которое создает на выходе синтезированного РЛИ мощность, равную мощности шумов приемника. Поэтому этот параметр называют удельной ЭПР шумового эквивалента σ_0^{ne} [1, 2, 5].

Подставив формулы (2)-(3) в уравнение (1) и, учитывая, что при значении $\sigma_0 = \sigma_0^{ne}$ и отсутствии некогерентного накопления отношение сигнал-шум на выходе РСА $Q = 0$ дБ, можно записать выражение для удельной ЭПР шумового эквивалента (чувствительности РСА):

$$\sigma_0^{ne} = \frac{32\pi^2 R_0^3 k_0 T_0 F_u L V_0}{P_{cp} \lambda G \eta S \delta_y}, \quad (4)$$

где $P_{cp} = P_u \tau_u F_n$ – средняя мощность излучения.

Выполним расчет удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) шумового эквивалента (чувствительности) РСА X-диапазона, работающего в маршрутном режиме обзора при максимальном разрешении, с параметрами, характерными для малых космических аппаратов [5-11] (таблица 1).

Графики чувствительности, полученные при изменении пространственного разрешения $\delta = \delta_x = \delta_y$ для различных значений высоты орбиты H космического аппарата, приведены на рис. 2.

Таблица 1. Параметры РСА

Параметр	Значение
Высота орбиты космического аппарата H , км	550...650
Длина волны λ , см	3,14 (X диапазон)
Угол визирования β , градусы	45
Импульсная мощность излучения P_u , Вт	800
Длительность импульсов, τ_u , мкс	20
Скважность импульсов q	4
Площадь антенны S , м ²	10
Коэффициент использования антенны η	0,6
Коэффициент шума приемника F_u , дБ	3
Суммарные потери в канале распространения L , дБ	5

Из полученных зависимостей, а также непосредственно из выражения (4) очевидно, что повышение разрешающей способности РСА и уменьшение мощности зондирующего сигнала приводят к пропорциональному ухудшению чувствительности системы. Повышение высоты орбиты КА также приводит к ухудшению значения σ_0^{ne} за счет снижения орбитальной скорости носителя РСА, однако эта зависимость не является линейной. Как следует из приведенных на рис. 2 графиков при использовании маршрутного режима съемки в РСА на базе МКАс реализуемыми в настоящее время величинами δ , H , P_u [5-9] и параметрами, приведенными в таблице 1, достижимые значения чувствительности лежат в пределах $\sigma_0^{ne} = (-22 \dots -25)$ дБ.

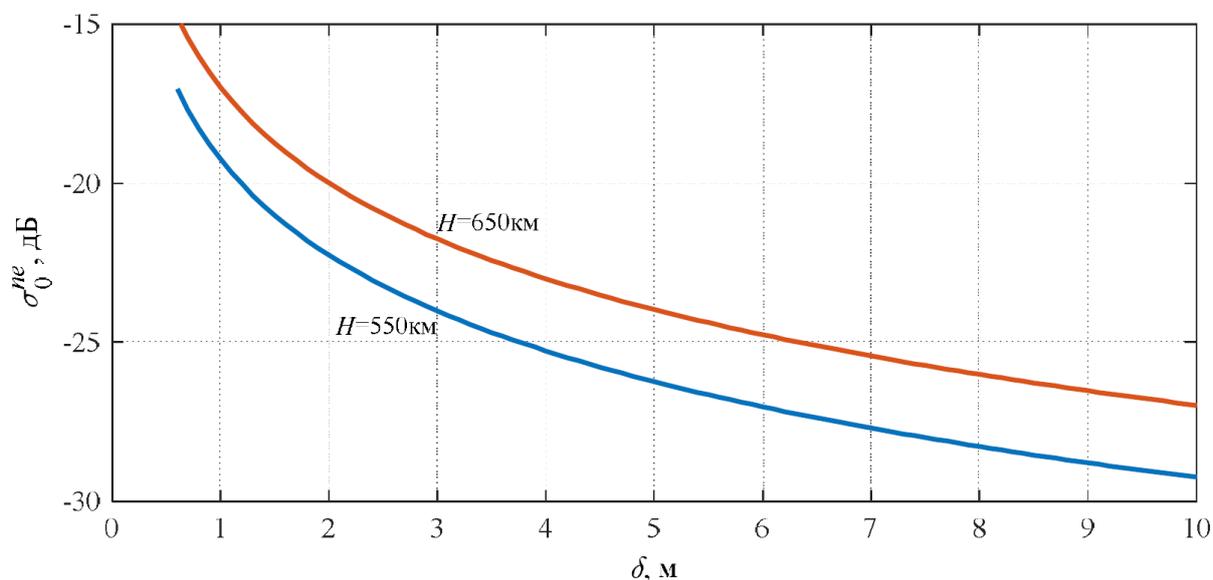


Рис. 2. Зависимости чувствительности РСА от реализуемого пространственного разрешения δ при различных значениях высоты орбиты КА

Стремление разработчиков РСА космического базирования минимизировать размеры антенных систем, обеспечив при этом требуемые технические характеристики и параметры радиолокатора, входит в противоречие, в том числе, с тем, что чувствительность РСА снижается обратно пропорционально квадрату площади

антенны (рис. 3). Приведенные на этом рисунке зависимости соответствуют параметрам, представленным в таблице 1, при значении импульсной мощности излучения $P_u = 800$ Вт. При реализации РСА на базе МКА значения площади антенны обычно не превышают $(3,5...4,5) \text{ м}^2$ [8, 11]. Поэтому в маршрутном режиме при пространственном разрешении $\delta = 3$ м чувствительность РСА ограничена величинами $\sigma_0^{ne} = (-13...-16)$ дБ. Как следует из (4) повышение разрешающей способности РСА без изменения площади антенны приведет к пропорциональному снижению радиометрической чувствительности.

На УЭПР шумового эквивалента РСА также оказывает значительное влияние угол визирования β , который для постоянного значения высоты H орбиты КА определяет наклонную дальность R_0 до снимаемого участка земной поверхности и угол падения волны γ на этот участок. Зависимости чувствительности РСА от изменения угла визирования приведены на рис. 4. Графики построены для маршрутного режима съемки при двух значениях пространственного разрешения (1 м и 3 м) и $H = 550$ км. Из них следует, что при неизменном значении δ увеличение угла визирования приводит к снижению чувствительности РСА, что связано с уменьшением уровня отраженного сигнала.

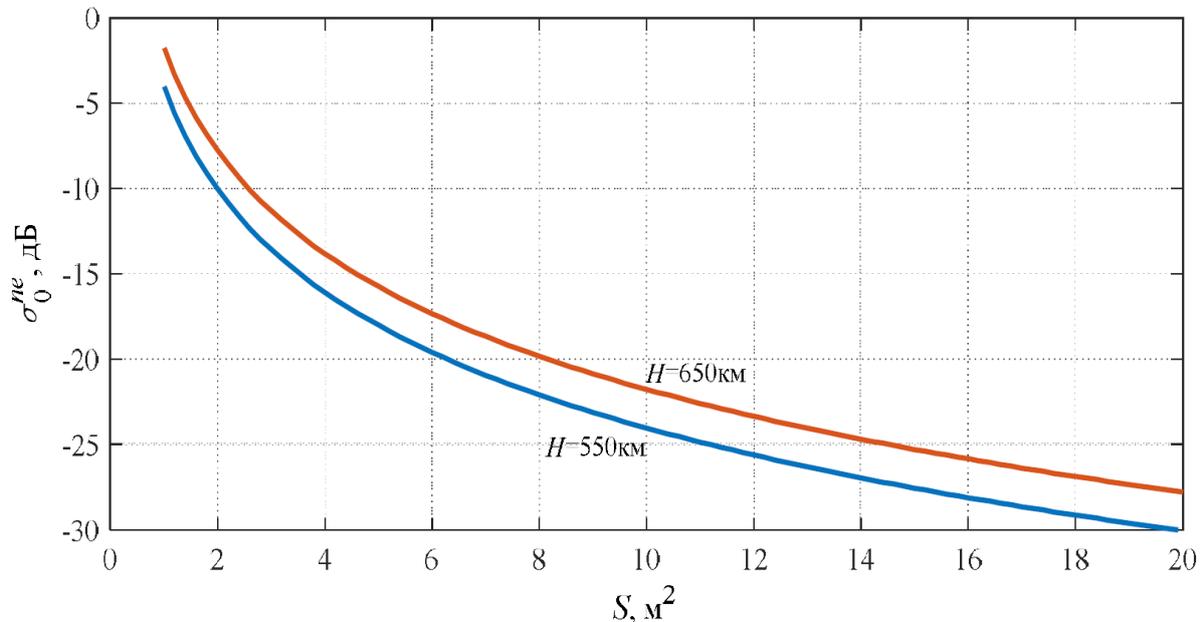


Рис. 3. Зависимости чувствительности РСА от площади S антенны при $\delta = 3$ м и различных значениях высоты орбиты КА

Полученные на рис. 4 зависимости являются нелинейными, причем при больших углах визирования большинство наблюдаемых пространственно-распределенных объектов становятся неотличимыми от шума, поэтому использование в МКА углов визирования больше $(55...60)^\circ$ является нецелесообразным. Добавим, что при фиксированном угле визирования β уменьшение мощности зондирующих радиоимпульсов и повышение пространственного разрешения пропорционально снижают чувствительность РСА.

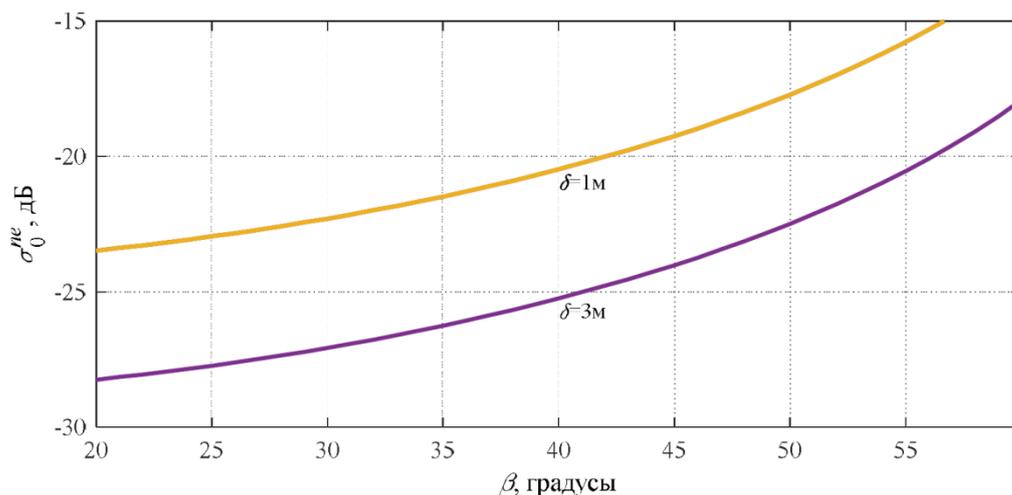


Рис. 4. Зависимости чувствительности РСА от угла визирования β при $H = 550$ км и различных значениях пространственного разрешения

Радиометрическое разрешение

Радиометрическое разрешение характеризует возможность различения объектов, отличающихся значениями удельной ЭПР [1, 3-5]. При дешифрировании радиолокационных изображений повышение точности измерений и вероятности различения контрастов между участками может быть достигнуто за счет увеличения количества независимых наблюдений путём усреднения отсчётов по площади наблюдаемого участка (межэлементное некогерентное накопление) или путём накопления различных разновременных изображений (поэлементное некогерентное накопление) [1].

Радиометрическое разрешение, выраженное в децибелах, можно вычислить по формуле [1, 4, 5]:

$$K = 10 \cdot \lg \left[1 + \frac{1}{\sqrt{N}} \left(1 + \frac{\sigma_0^{ne}}{\sigma_0} \right) \right], \quad (5)$$

где N – количество независимых наблюдений, накапливаемых в элементе разрешения.

Графики радиометрического разрешения РСА, построенные по выражениям (4)-(5) как функции количества независимых наблюдений для различных значений пространственного разрешения и удельной ЭПР фона, приведены на рис. 5. Данные функциональные зависимости позволяют определить необходимое число некогерентных накоплений для обеспечения требуемого значения радиометрического разрешения. При этом происходит обмен пространственного разрешения на радиометрическое. В современных РСА при наличии высокопроизводительных систем обработки такой обмен выполняется, как правило, за счет использования межэлементного некогерентного накопления по площади наблюдаемого объекта [1].

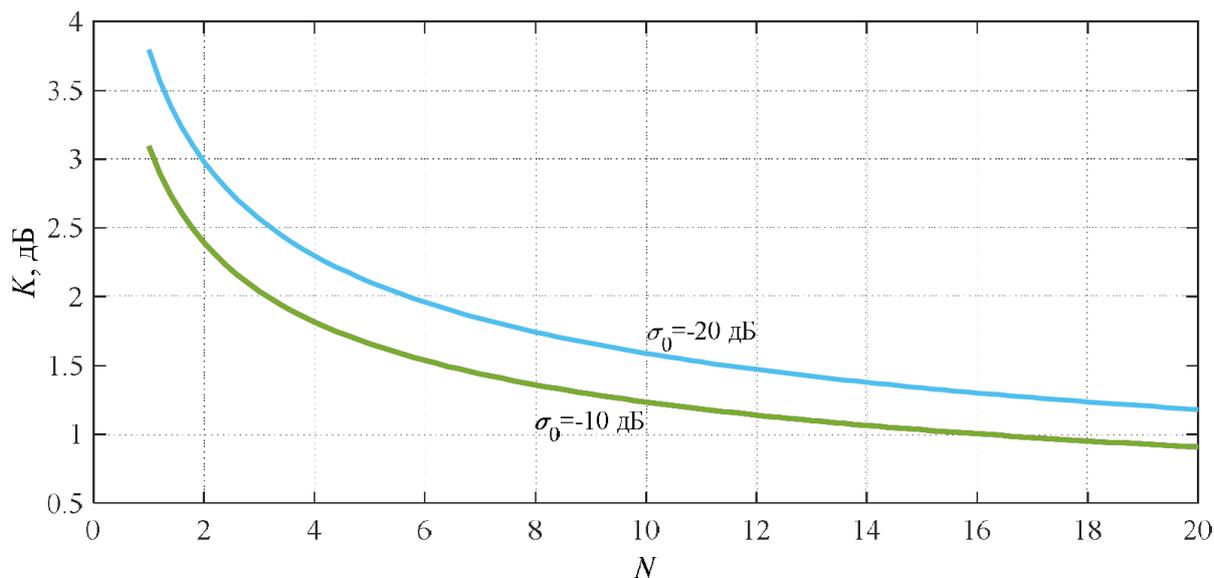


Рис. 5. Радиометрическое разрешение РСА в зависимости от количества независимых наблюдений N при $\delta = 3$ м и различных значениях удельной ЭПР фона

Заключение

Таким образом, полученные в работе зависимости позволяют провести качественный и количественный анализ влияния основных технических характеристик космических РСА, работающих на базе малых космических аппаратов в маршрутном режиме обзора, на удельную эффективную поверхность рассеяния шумового эквивалента σ_0^{ne} и радиометрическое разрешение K – параметры, определяющие ошибки измерения контраста и точность оценки удельной ЭПР объектов.

Литература

1. Вербя В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербя. – М.: Радиотехника. 2010. – 680 с.
2. Skolnik M.I. Radar Handbook. 3-dEdition. – New York: McGrawHill, 2008. – 1351 p.
3. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
4. Костров В.В., Толстов Е.Ф. Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: Конспекты лекций / VII Всероссийские Армандовские чтения: молод. школа. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. – С.76-113.
5. Современные подходы к созданию малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на базе унифицированных платформ: монография / С.Л. Сафронов [и др.]; под ред. засл. деятеля науки РФ, д-ра техн. наук, проф. В.В. Салмина. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 276 с.
6. Голов Н.А., Усачев В.А., Корянов Вс.Вл., Топорков А.Г. Перспективные технологии создания космического комплекса радиолокационного зондирования Земли на базе малых космических аппаратов и ракет-носителей легкого класса // Инженерный журнал: наука и инновации. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – №5, с. 1-20. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-5-1881.

7. Внотченко С.Л., Коваленко А.И., Риман В.В., Смирнов С.Н., Шишанов А.В. Возможности создания широкозахватных радиолокаторов с синтезированной апертурой для малых космических аппаратов // Вопросы электромеханики. ТрудыВНИИЭМ. 2013. Т.134, № 3. С.21-26.
8. Hirako K., Shirasaka S., Obata T., Nakasuka S., Saito H., Nakamura S., Tohara T. Development of small satellite for X-Band compact synthetic aperture radar // Journal of Physics: Conference Series, 2018, pp. 1–9. DOI: 10.1088/1742-6596/1130/1/012013.
9. H. Saito et al. Compact X-Band Synthetic Aperture Radar for 100kg Class Satellite // IEICE Transactions on Communications, 2017, vol. E100.B, issue 9, pp. 1653-1660. DOI: 10.1587/transcom.2016PFI0008.
10. Костров В.В., Григас С.Э., Скорынин А.А., Терехов Ю.Е. Энергетическое обеспечение радиолокационных комплексов космического базирования для обнаружения летательных аппаратов // Проектирование и технология электронных средств, 2015, № 3. С.44-51.
11. Freeman A. Design Principles for Smallsat SARs // 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2018, Logan, UT, 2018.