

Оценка предельных параметров РСА X-диапазона на базе малых космических аппаратов

К.К. Храмов, В.В. Костров

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
602264 г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23
E-mail: hramovkk@gmail.com, yvk_2004@rambler.ru

Рассматриваются вопросы оценки площади антенны, радиометрической чувствительности, пространственного 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 линейные размеры антенны, чувствительность, пространственное и радиометрическое разрешение.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры (РСА), пространственное разрешение, чувствительность радиолокатора, радиометрическое разрешение, антенна.

Estimation of the limiting parameters of the X-band SAR based on small spacecraft

K.K. Khramov, V.V. Kostrov

Murom Institute of Vladimir State University

The issues of estimation of the antenna area, radiometric sensitivity, spatial and radiometric resolution of space-based synthetic aperture radars (SAR) operating on the basis of small spacecraft are considered. The necessary mathematical apparatus is given and the above values are calculated for the X-band SAR operating in strip mode at maximum resolution. The influence of the main technical parameters of space SAR on the linear dimensions of the antenna, sensitivity, spatial and radiometric resolution is analyzed.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), spatial resolution, radar sensitivity, radiometric resolution, antenna.

Введение

Современные радиолокационные системы с синтезированием апертуры антенны (РСА) космического базирования являются эффективными, многофункциональными и перспективными средствами дистанционного зондирования с достаточно широким спектром возможностей [1-4]. При этом в последние годы наблюдается переход к более широкому применению сравнительно компактных радиолокаторов на базе малых космических аппаратов (МКА) и ракет-носителей легкого класса [5-11]. Сфера, связанная с услугами разработки, производства и эксплуатации МКА в западной литературе получила название «New Space». В нашей стране развитию МКА способствует, в том числе, обновленное в 2020 году «Положение о лицензировании космической деятельности». При этом среди факторов, влияющих на тенденцию такого перехода, можно назвать [5]:

- развитие технологий в областях микроэлектроники и аппаратуры наблюдения;

- возможность проведения фото- и видеосъемки, радиолокационного наблюдения с использованием высококачественной миниатюрной аппаратуры;
- рост предложений по средствам выведения МКА, в т.ч. по групповым запускам, запускам с помощью сверхлегких ракет, запускам с международной космической станции;
- появление и развитие концепции разработки унифицированных малогабаритных космических платформ, что позволяет снижать стоимость, увеличивать надежность и уменьшать время изготовления МКА;
- увеличение числа задач, решаемых с помощью МКА: геоинформационные и коммуникационные сервисы, метеорологические задачи, мониторинг окружающей среды и природных ресурсов, оборонные задачи, межпланетная космонавтика.

Целью работы является оценка достижимых значений геометрических размеров антенны, радиометрической чувствительности, пространственного 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

В большинстве случаев в РСА используется импульсный режим зондирования, который позволяет упростить антенную систему и дает больше возможностей для вариаций технических характеристик и параметров РСА. При расчете временных параметров съемки исходными являются геометрические параметры и основные тактико-технические характеристики РСА: угол визирования β , длина волны передатчика λ , разрешающие способности по дальности δ_y и азимуту δ_x , длина синтезированной апертуры L_{ca} , время синтезирования апертуры T_{ca} , наклонная дальность R_0 , а также некоторые параметры ориентации КА на орбите.

Рассмотрим сцену (рис. 1), содержащую носитель РСА – космический аппарат КА, движущийся по орбите с постоянной орбитальной скоростью V_0 на высоте H .

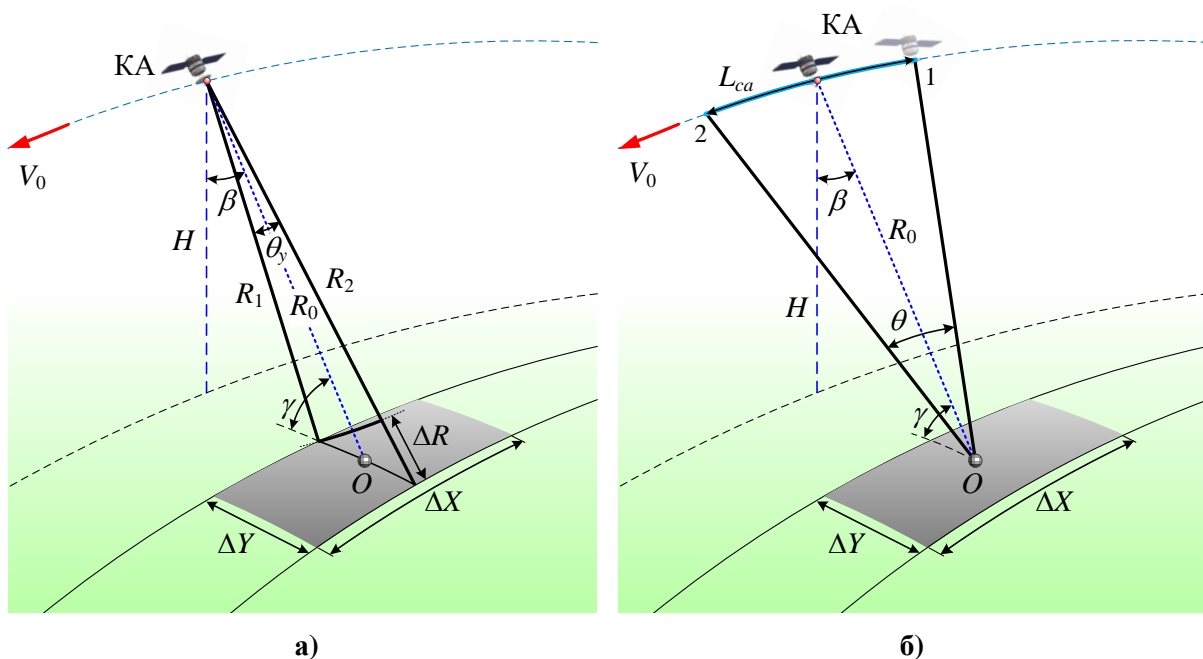


Рис. 1. Геометрия обзора в маршрутном режиме съемки:
а) – угломестное сечение, б) – азимутальное сечение

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).

Площадь антенны

Основным временным параметром съёмки является частота повторения зондирующих импульсов F_n , которая обратно пропорциональна периоду повторения зондирующих импульсов

$$T_n = 1/F_n.$$

Применение периодических зондирующих сигналов в РСА ведет к появлению эффекта неоднозначности на РЛИ, поэтому при расчете частоты повторения необходимо обеспечить однозначность измерений в частотной (доплеровской) и временной (в полосе задержек) областях.

В космических РСА, где максимальная наклонная дальность $R_{0 \max}$ достигает сотен километров, полную однозначность измерений по дальности можно достичь только при учете задержек в полосе обзора ΔY , а не максимальной дальности (рис. 1,а). В этом случае максимальная частота повторения $F_{n \max}$ определяется разностью путей ΔR прохождения зондирующего сигнала от КА до точки начала R_1 и от КА до точки конца R_2 облучаемой площадки в угломестной плоскости [12]:

$$F_{n \max} = \frac{c}{2 \cdot \Delta R} = \frac{c}{2 \cdot (R_2 - R_1)}, \quad (1)$$

где c – скорость света.

Таким образом, чем меньше расстояние ΔR , тем выше значение максимальной частоты повторения. Значение $F_{n \max}$ определяется, в конечном счете, высотой орбиты КА, шириной диаграммы направленности антенны РСА в угломестной плоскости и углом визирования.

С другой стороны, минимальное значение частоты повторения зондирующих импульсов $F_{n \min}$ выбирается из условия устранения неоднозначности по азимуту, т.е. из условия передачи всего спектра доплеровских частот траекторного сигнала и определяется максимальным доплеровским смещением частоты $F_{d \max}$ траекторного сигнала на краях синтезированной апертуры (или линейными размерами реальной антенны в азимутальной плоскости l_x) [1, 4]:

$$F_{n \min} = 2F_{d \max} = \frac{2 \cdot V_0}{l_x} = \frac{V_0}{\delta_x}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует двойное неравенство

$$\frac{V_0}{\delta_x} < F_n < \frac{c}{2 \cdot \Delta R}, \quad (3)$$

которое можно переписать в виде

$$\frac{\Delta Y \cdot \cos(\gamma)}{\delta_x} < \frac{c}{2 \cdot V_0}. \quad (4)$$

Полоса обзора по дальности может быть представлена выражением [1, 4]

$$\Delta Y = \lambda R_0 / (l_y \sin(\gamma)),$$

где l_y – линейный размер антенны в угломестной плоскости.

Подставляя последнее выражение и выражение (2) в неравенство (4), получим

$$\frac{2\lambda R_0 \cos(\gamma)}{l_x l_y \sin(\gamma)} < \frac{c}{2 \cdot V_0}.$$

Учитывая, что орбитальная скорость космического аппарата

$$V_0 = \sqrt{\mu / (R_3 + H)},$$

где $\mu = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ – гравитационная постоянная;

R_3 – радиус Земли,

можно записать выражение для площади антенны РСА

$$S = l_x l_y > \frac{4\lambda R_0}{c \cdot \text{tg}(\gamma)} \sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H}}. \quad (5)$$

Параметры R_0 и γ в общем случае являются функциями высоты орбиты и угла визирования, поэтому на основании (5) можно получить формулу для вычисления минимальной площади антенны РСА

$$S_{\min}(H, \beta) = \frac{4\lambda R_0(H, \beta)}{c \cdot \text{tg}(\gamma(H, \beta))} \sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H}}. \quad (6)$$

На рис. 2,а приведены графики $S_{\min}(H, \beta)$, полученные для трех значений угла визирования: 35, 45 и 55 градусов. Из приведённых зависимостей следует, что с ростом высоты орбиты носителя РСА и угла визирования минимальная требуемая площадь антенны возрастает. На основании данных рис. 2,а можно заключить, что при высоте орбиты носителя РСА 520-580 км минимальные значения площади антенны лежат в пределах 3...4 м², что вполне достижимо в современных МКА. На рис. 2,б приведен сравнительный анализ площади антенн для некоторых действующих РСА X-диапазона в плоскости (H, S) .

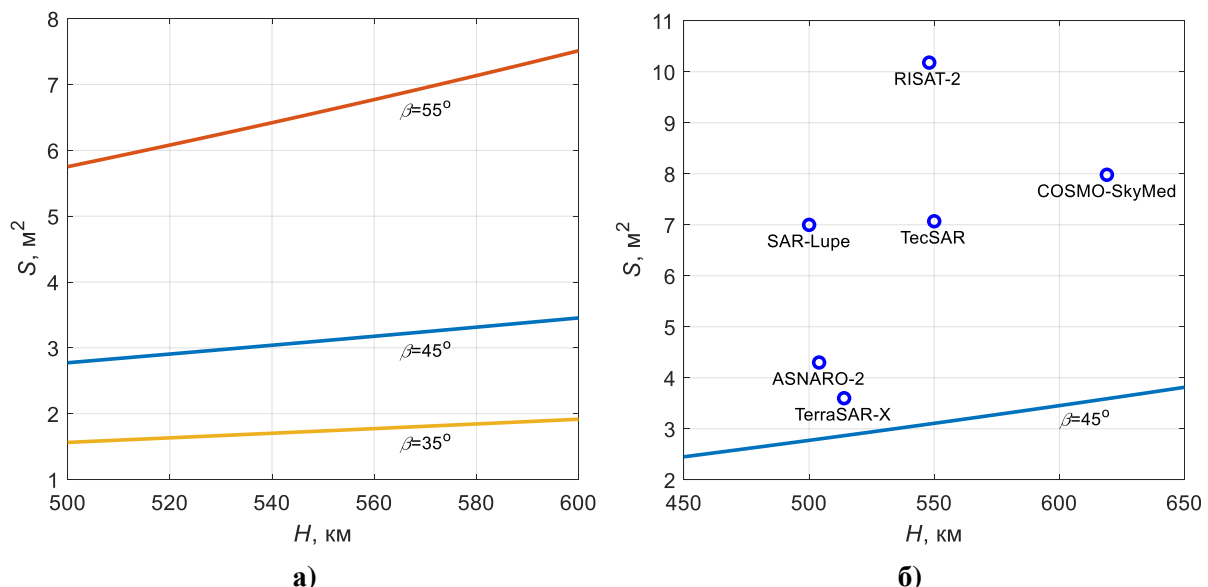


Рис. 2. Минимальная площадь антенны в зависимости от высоты орбиты КА:
 а) – при изменении угла визирования, б) – при $\beta=45^\circ$ в сравнении с РСА X-диапазона

Добавим, что выражения (5)-(6) были получены из условия максимума отношения полосы обзора по дальности к азимутальному разрешению РСА. Это означает, что при проектировании системы РСА, которая не должна одновременно обеспечивать

наилучшее возможное разрешение и наилучшую возможную ширину полосы обзора, площадь антенны может иметь меньшее значение [13]. В любом случае, при окончательном расчете параметров антенны РСА должны учитываться коэффициент усиления и коэффициент использования антенны, форма ее диаграммы направленности и другие параметры РСА, такие как наклонная дальность, частота повторения импульсов и ширина полосы обработки.

Пространственное разрешение

Выражения (1)-(3) также могут быть использованы для оценки предельного значения пространственной разрешающей способности δ РСА в маршрутном режиме. При этом исходными данными, которые положим неизменными при такой оценке, являются высота орбиты H , углы визирования β и падения γ , длина волны λ зондирующего сигнала, координаты центра $O = (x_0, y_0)$ наблюдаемого участка местности (рис. 1). Это означает, что расстояние от КА до точки O (наклонная дальность) при расчете останется неизменным и равным

$$R_0 = R_3 \cos(\beta + \gamma) / \sin(\beta).$$

Расчет выполним при следующих условиях и допущениях: равенстве азимутального разрешения и разрешения по горизонтальной дальности $\delta_x = \delta_y = \delta$ (при этом разрешение по наклонной дальности будет определяться выражением $\delta_r = \delta_y \cos(\gamma)$); равенстве ширины диаграммы направленности антенны РСА в азимутальной и угломестной плоскостях $\theta_x = \theta_y$.

Вычисления по формулам (1)-(3) будем проводить итерационно путем изменения параметров зондирующего сигнала и пересчета значений ширины диаграммы направленности антенны и длины синтезированной апертуры вплоть до достижения равенства минимальной и максимальной частот повторения зондирующих импульсов

$$F_{n \min} = F_{n \max} \quad (7)$$

На рис. 3 представлены графики предельного пространственного разрешения РСА, полученные для маршрутного режима съемки при выполнении равенства (7).

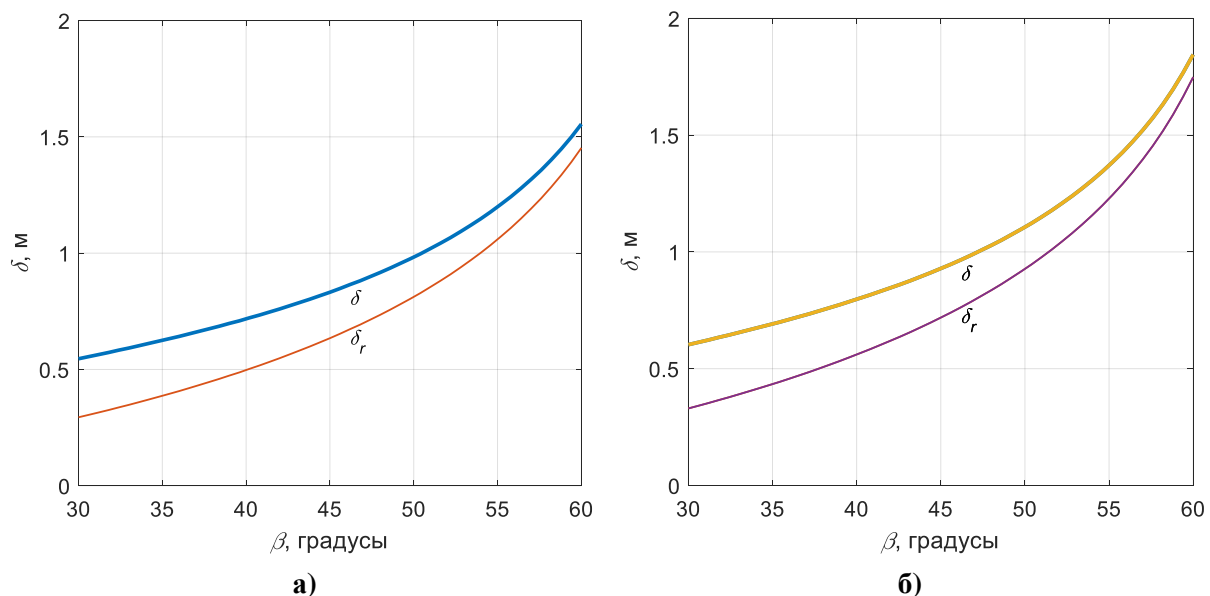


Рис. 3. Предельное разрешение РСА в маршрутном режиме в зависимости от угла визирования: а) – при $H=500$ км, б) – $H=600$ км

При малых углах визирования, когда расстояние ΔR остается относительно небольшим, имеется бóльшая возможность варьирования значением частоты повторения импульсов. Это, в свою очередь, позволяет добиться более низких значений δ , что означает улучшение разрешающей способности РСА. Как следует из приведенных зависимостей, при снижении высоты орбиты КА и соответствующем повышении орбитальной скорости наблюдается рост достижимого пространственного разрешения. При этом на высотах, характерных для современных РСА на базе МКА (рис. 2,б), предельное значение пространственного разрешения в маршрутном режиме съемки не превысит 1 м.

Полученные результаты не противоречат известному утверждению о том, что при малых углах визирования ухудшается разрешение по горизонтальной дальности. Этот вывод справедлив при изменении β и неизменных других параметрах РСА. Зависимости $\delta(\beta)$, приведенные на рис. 3, были получены путем вычисления допустимых значений параметров РСА для каждого значения угла визирования.

Радиометрическая чувствительность

Выражение для расчета радиометрической чувствительности может быть получено из уравнения максимальной дальности обнаружения цели [1, 2]

$$R_0^4 = \frac{P_u \tau_u N_u G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 N_0 Q L}, \quad (8)$$

где P_u – импульсная излучаемая мощность;

τ_u – длительность импульсов;

$N_u = T_{ca} F_n$ – количество когерентных импульсов, излученных за время зондирования T_{ca} ;

$G = 4\pi\eta S/\lambda^2$ – коэффициент усиления антенны, зависящий от площади S и коэффициента использования η антенны;

σ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели;

$N_0 = k_0 T_0 F_{ui}$ – спектральная плотность мощности внутреннего шума приемника;

F_{ui} – коэффициентом шума приемника,

$T_0 = 290$ К – абсолютная температура приемной системы;

$k_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц · К) – постоянная Больцмана;

L – суммарные потери в канале распространения сигнала;

Q – отношение сигнал-шум.

Для нормального бокового обзора справедливо равенство

$$N_u = 0,5 \lambda R_0 F_n / (\delta_x V_0). \quad (9)$$

ЭПР цели определяется выражением [1, 2]

$$\sigma = \sigma_0 \delta_x \delta_y, \quad (10)$$

где σ_0 – удельная ЭПР наблюдаемого участка местности.

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 (9)-(10) в уравнение (8) 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 чувствительности РСА [14]:

$$\sigma_0^{ne} = \frac{8\pi\lambda R_0^3 N_0 L V_0 \cos\gamma}{P_{cp} \eta^2 S^2 \delta_r}, \quad (11)$$

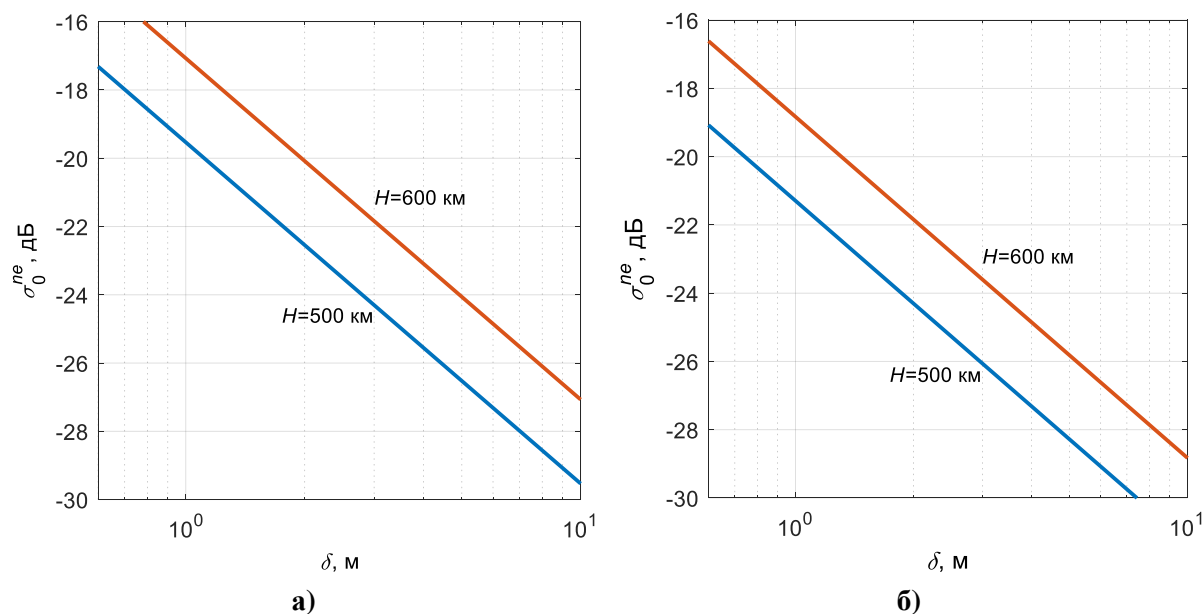
где $P_{cp} = P_u \tau_u F_n$ – средняя мощность излучения.

Выполним расчет радиометрической чувствительности РСА X -диапазона, работающего в маршрутном режиме обзора с параметрами, характерными для малых космических аппаратов [5-11] (таблица 1).

Таблица 1. Параметры РСА

Параметр	Значение
Высота орбиты космического аппарата H , км	500...600
Длина волны λ , см	3,14 (X диапазон)
Угол визирования β , градусы	45
Импульсная мощность излучения P_u , кВт	0,8...1,2
Длительность импульсов, τ_u , мкс	20
Скважность импульсов q	12
Площадь антенны S , м ²	10
Коэффициент использования антенны η	0,6
Коэффициент шума приемника F_u , дБ	4
Суммарные потери в канале распространения L , дБ	5

Графики чувствительности, полученные при изменении пространственного разрешения δ для различных значений высоты орбиты H космического аппарата, приведены на рис. 4.



**Рис. 4. Зависимости чувствительности РСА от реализуемого пространственного разрешения δ при различных значениях высоты орбиты КА:
а) – $P_u = 0,8$ кВт, б) – $P_u = 1,2$ кВт**

Из полученных зависимостей, а также непосредственно из выражения (11) 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. 4 графиков при использовании маршрутного режима съемки в РСА на базе МКА с реализуемыми в настоящее время величинами δ , H , P_u [5-9] и параметрами, приведенными в таблице 1, достижимые значения чувствительности лежат в пределах $\sigma_0^{ne} = (-22...-26)$ дБ.

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. 5). Приведенные на этом рисунке зависимости соответствуют параметрам, представленным в таблице 1, при значении импульсной мощности излучения $P_u = 0,8$ кВт. Из графиков следует, что в маршрутном режиме при пространственном разрешении $\delta = 3$ м чувствительность РСА ограничена величинами $\sigma_0^{ne} = (-14...-18)$ дБ, а при $\delta = 1$ м – значениями $\sigma_0^{ne} = (-9...-13)$ дБ. При повышении высоты орбиты на 100 км чувствительность РСА снижается примерно на 3 дБ. Повышение разрешающей способности РСА без изменения площади антенны приведет к пропорциональному снижению радиометрической чувствительности.

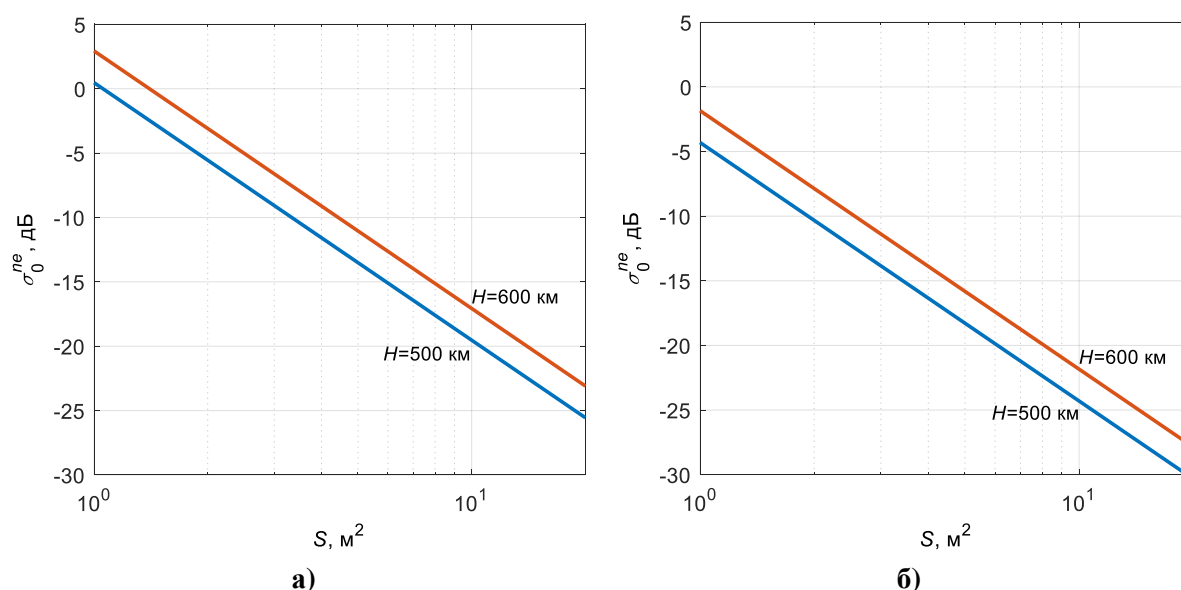


Рис. 5. Зависимости чувствительности РСА от площади S антенны при различных значениях высоты орбиты КА: а) – $\delta = 1$ м, б) – $\delta = 3$ м

На радиометрическую чувствительность 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. 6. Графики построены для маршрутного режима съемки при двух значениях пространственного разрешения (1 м и

3 м) и $H = 500$ км. Из них следует, что при неизменном значении δ увеличение угла визирования приводит к снижению чувствительности РСА, что связано с уменьшением уровня отраженного сигнала.

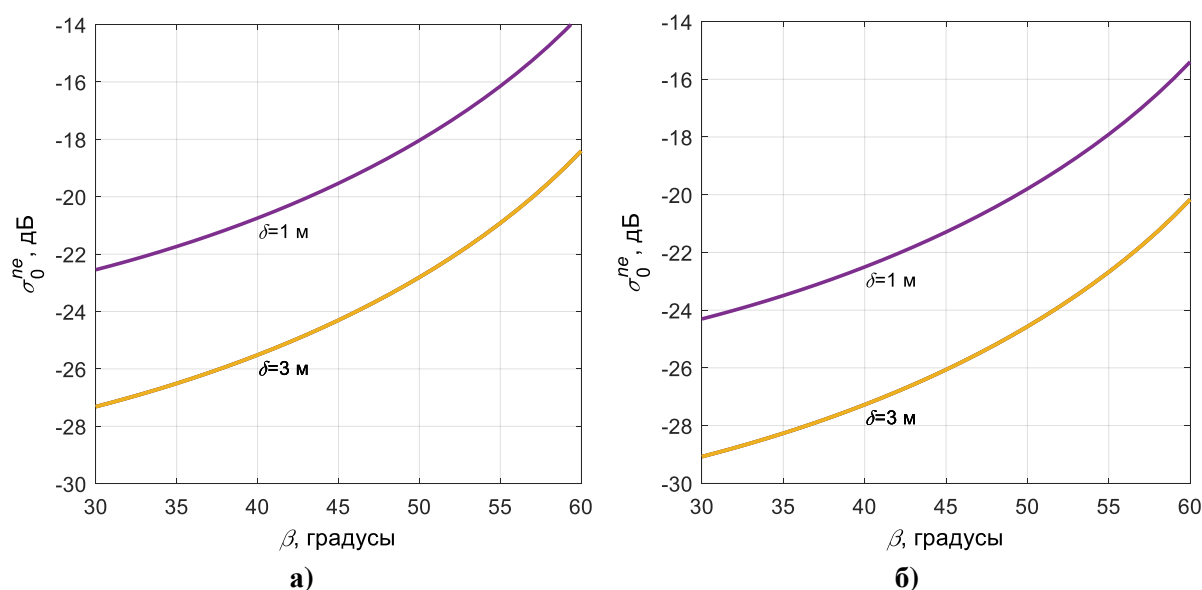


Рис. 6. Зависимости чувствительности РСА от угла визирования β при различных значениях пространственного разрешения: а) – $P_u = 0,8$ кВт, б) – $P_u = 1,2$ кВт

Полученные на рис. 6 зависимости являются нелинейными, причем при больших углах визирования большинство наблюдаемых пространственно-распределенных объектов становятся неотличимыми от шума, поэтому использование в МКА углов визирования больше ($55 \dots 60^\circ$) является нецелесообразным [14]. Добавим, что при фиксированном угле визирования β уменьшение мощности зондирующих радиоимпульсов и повышение пространственного разрешения пропорционально снижают чувствительность РСА.

Радиометрическое разрешение

Радиометрическое разрешение характеризует возможность различения объектов, отличающихся значениями удельной ЭПР [1, 3-5]. Радиометрическое разрешение можно вычислить по формуле [1, 4, 5, 14]:

$$K = 10 \cdot \lg \left[1 + \frac{1}{\sqrt{N}} \left(1 + \frac{\sigma_0^{ne}}{\sigma_0} \right) \right], \quad (12)$$

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

Графики радиометрического разрешения РСА, построенные по выражениям (11), (12) при $H = 500$ км и $P_u = 0,8$ кВт как функции количества независимых наблюдений для различных значений пространственного разрешения и удельной ЭПР фона, приведены на рис. 7.

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 такой обмен выполняется, как правило, за счет использования межэлементного некогерентного накопления по площади наблюдаемого объекта [1].

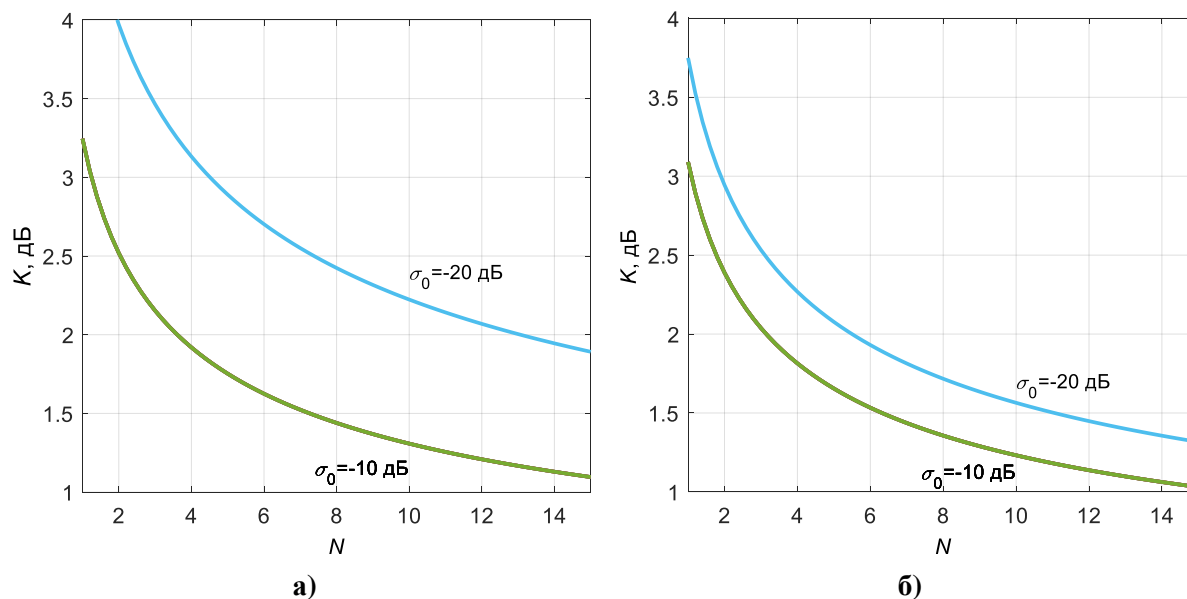


Рис. 7. Радиометрическое разрешение РСА в зависимости от количества независимых наблюдений N при различных значениях удельной ЭПР фона: а) – $\delta=1$ м, б) – $\delta=3$ м

Выводы

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 его предельные параметры: минимальное значение площади антенны, радиометрическую чувствительность, пространственное и радиометрическое разрешение.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-10114 (<https://rscf.ru/project/23-29-10114/>)

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника. 2010. – 680 с.
2. Skolnik, Merrill I. “Radar Handbook” – 3rd revised edition. New York: McGraw Hill, 2008.
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. Труды ВНИИЭМ. 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.
12. A. Freeman, W. Johnson, B. Huneycutt, R. Jordan, S. Hensley, P. Siqueira, and J. Curlander, "The "Myth" of the Minimum SAR Antenna Area Constraint," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2000, 38, 320–324. DOI: 10.1109/36.823926.
13. X.V. Yang, V.M. Patel and A.P. Petropulu, "Spaceborne SAR antenna size reduction enabled by compressive sampling," 2016 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), Washington, DC, USA, 2016, pp. 297-301. DOI: 10.1109/GlobalSIP.2016.7905851.
14. Храмов К.К., Костров В.В. Обеспечение чувствительности и радиометрического разрешения РСА X-диапазона на базе малых космических аппаратов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022, №3. С. 43-50. DOI 10.24412/2221-2574-2022-3-43-50.