

УДК 621.396.9+629.78

ОЦЕНКА ТРЕБОВАНИЙ К ПЕРСПЕКТИВНОМУ КОСМИЧЕСКОМУ РАДИОЛОКАТОРУ МОНИТОРИНГА МОРСКОЙ ОБСТАНОВКИ И ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА

© 2013 С. Э. Григас, Д. Ц. Литовченко, А. А. Скорынин

ОАО «Корпорация «Комета», г. Москва

Получены требования к характеристикам радиолокатора космического базирования с синтезированной апертурой, предназначенного для мониторинга морской обстановки и воздушного пространства.

Радиолокатор с синтезированной апертурой, селекция движущихся целей.

В настоящее время радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования играют большую роль в решении задач глобального мониторинга морской обстановки и воздушного пространства. Возможность получения высокодетальных изображений в любых погодных условиях независимо от времени суток делает РСА незаменимым средством для обнаружения и распознавания объектов в интересах решения широкого класса задач. В зависимости от типа наблюдаемых объектов предъявляемые к радиолокатору требования могут сильно отличаться. В настоящей работе получены требования, предъявляемые к РСА, предназначенному для обнаружения как низкоскоростных морских судов (НК), так и высокоскоростных воздушных объектов (ВО) в составе космической системы радиолокационного наблюдения (КС РЛН).

Орбитальное построение и геометрия наблюдения

Важной задачей является выбор параметров орбитальной группировки КС РЛН. С увеличением высоты орбиты уменьшается количество космических аппаратов (КА), необходимое для обеспечения заданных требований по периодичности обзора и другим пространственно-временным характеристикам космической системы. Вместе с тем при этом возрастает дальность до цели, что приводит к снижению обнаружительных способно-

стей РСА. В настоящее время компромиссным решением являются околокруговые орбиты с высотой в диапазоне 600–700 км.

Для оценок рассмотрим круговую орбиту с высотой 650 км. Тогда при локальном угле падения $g = 45^\circ$ наклонная дальность R до центра зоны наблюдения составляет приблизительно 880 км.

Мониторинг морской обстановки

Для контроля надводной обстановки в перспективном РСА космического базирования целесообразно предусмотреть два режима работы, один из которых предназначен для обнаружения НК, а другой – для их распознавания. Исходя из накопленного опыта обработки данных космических радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли для обнаружения НК на фоне морской поверхности достаточно пространственного разрешения порядка 15–25 м [1]. Для обеспечения высоких пространственно-временных характеристик КС РЛН радиолокатор в данном режиме должен обладать как можно более широкой полосой съёмки. По предварительным оценкам при указанном выше пространственном разрешении представляется возможным расширение полосы съёмки до 700–750 км. Распознавание обнаруженных судов целесообразно проводить в узкополосном режиме детальной съёмки с шириной полосы порядка 30–50 км. Для классификации

НК с приемлемыми вероятностными характеристиками РСА в данном режиме должен обладать разрешающей способностью не хуже 3–5 м [2]. Для измерения скорости надводных целей в РСА должен быть предусмотрен режим продольной интерферометрии.

При решении задач мониторинга надводной обстановки зачастую возникает необходимость наблюдения непосредственно морской поверхности, например, для обнаружения кильватерных следов от НК с целью более точного определения вектора скорости судна. Поскольку удельная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) взволнованной морской поверхности при углах падения к местной нормали 20° – 60° в диапазоне длин волн 3–20 см изменяется приблизительно от -5 дБ до -35 дБ [3], радиометрическая чувствительность РСА (удельная ЭПР шумового эквивалента) должна быть не менее -40 дБ при пространственном разрешении 3–5 м.

Функционирование КС РЛН в режиме времени, близком к реальному, возможно только в том случае, если синтез радиолокационных изображений и последующая пороговая обработка с целью обнаружения НК осуществляются на борту. По предварительным оценкам, бортовые ЭВМ, решающие эти задачи, должны обладать производительностью порядка 10^9 флопс.

Мониторинг воздушного пространства

Специфика задачи мониторинга воздушного пространства состоит в том, что за время синтезирования апертуры антенны T быстро движущийся ВО может покинуть пределы элемента разрешения, что приводит к перераспределению сигнала между соседними элементами изображения – расфокусировке радиолокационного изображения и, как следствие, снижению отношения сигнал-шум. Для обнаружения таких объектов необходимо либо применять сложные пространственно-временные алгоритмы обработки, либо

ограничивать время когерентного накопления.

Оценим максимальное время синтезирования T_{max} , при котором не происходит расфокусировка изображения точечного подвижного объекта. Пространственное разрешение РСА по азимуту (вдоль курса) определяется выражением

$$\Delta_x = k \frac{I R}{2V_s T}, \quad (1)$$

где λ – длина волны, V_s – скорость КА, k – коэффициент запаса, обеспечивающий необходимое подавление боковых лепестков функции импульсного отклика [2]. Будем считать, что за время T_{max} цель проходит не более половины элемента разрешения. Тогда

$$\frac{\Delta_x}{2} = V_T T_{max}, \quad (2)$$

где V_T – скорость движения цели.

Из (1) и (2) следует, что

$$T_{max} = \sqrt{\frac{k I R}{4V_T V_s}}. \quad (3)$$

При наклонной дальности 880 км, скорости цели 300 м/с и $k=1,5$ максимальное время когерентного накопления для РСА X-диапазона составляет порядка 0,07 с, что соответствует наилучшему азимутальному разрешению Δ_x порядка 40 м.

Для уменьшения уровня пассивной помехи, вызванной отражением сигналов от подстилающей поверхности, при решении задачи обнаружения малоразмерных объектов элемент разрешения следует выбирать как можно меньшим. С другой стороны, во избежание расфокусировки разрешение по дальности Δ_r должно удовлетворять условию $\Delta_r / 2 \geq V_T T_{max}$. Поэтому для приведённых выше параметров оптимальное разрешение по дальности составляет приблизительно 40 м.

Таким образом, одной из особенностей режима обнаружения воздушных объектов является необходимость преднамеренного загробления пространственного разрешения. Другая особенность заключается в необходимости осмотра широких полей обзора для достижения высоких пространственно-временных характеристик КС РЛН, что обусловлено высокой подвижностью объектов наблюдения. Эти особенности позволяют рассматривать режим радиолокационной съёмки ScanSAR [2] в качестве основного режима работы РСА для мониторинга воздушной обстановки. В этом режиме осуществляется электронное перенацеливание диаграммы направленности антенны (ДНА) по углу места, что позволяет расширить полосу съёмки в беспропускном режиме за счёт сокращения времени наблюдения в каждом парциальном кадре при соответствующем ухудшении пространственного разрешения.

Оценим требования к характеристикам РСА, предназначенного для обнаружения ВО в режиме ScanSAR. Величина отношения сигнал-шум SNR в элементе разрешения определяется как [2]:

$$SNR = \frac{S}{\Delta_x \Delta_y s_0^{ne}}, \quad (4)$$

где s – ЭПР ВО, s_0^{ne} – удельная ЭПР шумового эквивалента, определяющая радиометрическую чувствительность РСА.

Величина s_0^{ne} определяется из уравнения дальности радиолокации [2]:

$$s_0^{ne} = \frac{(4p)^3 R^4 P_N c}{P_r G^2 I^2 \Delta_x \Delta_y}, \quad (5)$$

где $P_N = k_B \Delta F T_0 F_N$ – мощность тепловых шумов в приёмнике, k_B – постоянная Больцмана, $\Delta F \sim 1/T$ – ширина полосы пропускания фильтра, обратно пропорциональная времени синтеза апертуры T , $T_0 = 290$ К, F_N – шум-фактор приемни-

ка, c – коэффициент потерь в тракте, P_r – средняя излучаемая мощность, $G = 4pS/I^2$ – коэффициент усиления антенны, S – эффективная площадь антенны.

Количество лучей, необходимое для покрытия всей полосы съёмки в режиме ScanSAR без учёта перекрытия соседних лучей, составляет $N = \Delta L / L_y$, где ΔL – ширина полосы обзора, $L_y = IR / D_y \cos g$ – ширина пятна засветки на поверхности Земли по дальности, D_y – вертикальный размер антенны. Время наблюдения ВО в каждом парциальном луче определяется соотношением между размером пятна засветки по азимуту $L_x = IR / D_x$, где D_x – горизонтальный размер антенны, скоростью его перемещения, которую можно приближённо считать равной скорости V_s орбитального движения КА, и числом лучей N :

$$T = \frac{L_x}{NV_s} = \frac{(IR)^2}{D_x D_y V_s \Delta L \cos g}. \quad (6)$$

Из (4) – (6) получаем выражение для параметров РСА, обеспечивающих заданное отношение сигнал-шум:

$$P_r S = \frac{4pR^2 SNR k_B T_0 F_N V_s \Delta L c \cos g}{S}. \quad (7)$$

Пусть за счёт применения на входе приемника маломощного усилителя перед преобразователем частоты шум-фактор приёмника равен 2 дБ [4], а потери в тракте составляют 6 дБ. Достигнутый в настоящее время уровень энергообеспечения РСА космического базирования соответствует приблизительно 300 Вт средней излучаемой мощности [2]. Тогда для обнаружения ВО с ЭПР от 10 м^2 в полосе шириной 700 км с отношением сигнал-шум 20 дБ требуется антенна с апертурой не менее 30 м^2 .

Обнаружение малоразмерных ВО на фоне сильноотражающей подстилающей поверхности представляет собой сложную

задачу. Один из способов её решения, рассмотренный в работе [5], основан на том, что сигнал от подвижной ВО имеет доплеровский сдвиг частоты. При достаточно большой величине частотного сдвига отражённые от подстилающей поверхности сигналы принимаются по боковым лепесткам ДНА, что делает возможным эффективное подавление пассивной помехи.

Получим оценку для уровня боковых лепестков ДНА, обеспечивающего необходимое отношение сигнал-помеха SCR. Полуширина ΔF_C главного лепестка (по уровню первого нуля) спектра пассивной помехи, вызванной отражением сигналов от неподвижной подстилающей поверхности, определяется скоростью КА-носителя РСА V_S и горизонтальным размером антенны D_X :

$$\Delta F_C = V_S / D_X. \quad (8)$$

Доплеровский сдвиг F_D частоты отражённого от ВО сигнала определяется величиной радиальной скорости объекта V_r :

$$F_D = 2V_r / \lambda. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует, что если радиальная скорость на ВО превышает величину

$$V_{\min} = V_S \lambda / 2D_X, \quad (10)$$

то сигнал от объекта наблюдается на фоне помехи, принимаемой по боковым лепесткам ДНА. Это обеспечивает режекцию пассивной помехи, и в этом случае отношение сигнал-фон в элементе разрешения РЛИ определяется выражением:

$$SCR = \frac{s}{k^2 \Delta_X \Delta_Y S_B}, \quad (11)$$

где k - уровень первых боковых лепестков ДНА.

Из соотношений (1) и (11) получаем выражение для уровня первых боковых лепестков ДНА РСА, при котором обеспечивается заданное отношение сигнал-фон:

$$k = \sqrt{\frac{2sV_S T}{SCR k \lambda R S_B \Delta_Y}}. \quad (12)$$

Поскольку уровень боковых лепестков зависит от длины волны излучения, то прежде чем получить требуемые оценки, необходимо выбрать частотный диапазон РСА. С увеличением длины волны возрастает ЭПР ВО, в то время как удельная ЭПР подстилающей поверхности снижается. По этой причине для обнаружения малозаметных ВО на фоне сильноотражающей поверхности представляют интерес длинноволновые диапазоны. С другой стороны, согласно условию (10), чем больше длина волны, тем большего размера требуется антенна при заданной минимально обнаруживаемой скорости ВО. Обеспечение минимальных габаритов антенных систем является крайне важной задачей при проектировании РСА космического базирования, что определяет целесообразность использования X-диапазона – наиболее коротковолнового из применяемых частотных диапазонов в радиолокационных средствах ДЗЗ космического базирования.

Если при отношении сигнал-шум порядка 20 дБ отношение сигнал-фон составляет 25 дБ и более, то влиянием пассивной помехи на вероятностные характеристики обнаружения ВО можно пренебречь. Согласно формуле (12), для обнаружения ВО с ЭПР от 10 м² на фоне подстилающей поверхности с удельной ЭПР не выше $S_B = -20$ дБ уровень первых боковых лепестков ДНА не должен превышать величину $k = -19$ дБ. При этом для обнаружения ВО с радиальной скоростью 20 м/с и больше минимальный горизонтальный размер антенны, согласно выражению (10), составляет 5,6 м. Как было отмечено выше, для обеспечения задан-

ных энергетических характеристик площадь рассматриваемой антенны должна превышать 30 м². Тогда минимальный вертикальный размер антенны составляет 5,4 м и приблизительно равен горизонтальному размеру.

В рассматриваемом режиме РСА должен обладать возможностью однозначного определения радиальной скорости ВО. При скорости последних порядка 300 м/с характерная величина доплеровского сдвига частоты в X-диапазоне достигает 20 кГц. Поэтому, согласно теореме Котельникова, частота повторения импульсов F_p должна составлять не менее 40 кГц. При такой высокой частоте повторения ширина полосы однозначно определяемой дальности $L_{amb} = c \sin g / 2F_p$ составляет всего 2,6 км, что существенно меньше ширины полосы засветки $L_Y = 7$ км. В этом состоит проблема однозначного определения и дальности до ВО, которая может быть решена путём увеличения вертикального размера антенны или за счёт применения специальных методов, например, псевдослучайной черезпериодной модуляции зондирующего сигнала [2].

Полученные характеристики РСА, предназначенного для мониторинга воздушного пространства, приведены в табл. 1. Локатор с такими параметрами обладает радиометрической чувствительностью $S_0^{ne} = -52$ дБ при пространственном разрешении $\Delta_x = 430$ м и $\Delta_y = 40$ м. Высокая радиометрическая чувствительность РСА делает возможным его применение также для решения задач контроля морской обстановки.

Таблица 1. Характеристики РСА космического базирования

Параметр	Значение
Длина волны излучения, см	3
Размеры антенны, м ²	5,6×5,4
Средняя излучаемая мощность, Вт	300
Уровень первых боковых лепестков ДНА, дБ	-19
Шум-фактор приемных модулей, дБ	2

Заключение

Получены требования к характеристикам РСА космического базирования, предназначенного для мониторинга морской обстановки и воздушного пространства. Для обнаружения надводных объектов предполагается использовать широкополосный режим радиолокационной съемки с низким пространственным разрешением, для распознавания обнаруженных объектов – режим высокдетального наблюдения. Показано, что для решения задачи мониторинга воздушной обстановки целесообразно применять специальный режим работы РСА с высокой частотой повторения импульсов и высокой радиометрической чувствительностью, позволяющий обнаруживать сигналы от воздушных объектов на фоне собственных шумов и пассивных помех, вызванных отражениями от подстилающей поверхности.

Библиографический список

1. Crisp, D.J. The state-of-the-art in ship detection in Synthetic Aperture Radar imagery [Text] / D.J. Crisp // Australian Department of Defense, research report DSTO-RR-0272, 2004.
2. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования [Текст] / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук. М.: Радиотехника, 2010.
3. Skolnik, M. Radar Handbook, Third Edition / M. Skolnik. – McGraw-Hill Professional, 2008.
4. Неронский, Л.Б. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны / Л.Б. Неронский, В.Ф. Михайлов, И.В. Брагин. –СПб.: СПбГУАП, 1999.
5. Григас, С.Э. Оценка возможности обнаружения малоконтрастных воздушных целей с использованием космической радиолокации / С.Э. Григас, Д.Ц. Литовченко, А.А. Скорынин // Антенны. – 2013. – № 1. – С. 66-68.

ASSESSMENT OF TECHNICAL REQUIREMENTS FOR THE FUTURE SPACEBORNE MARITIME AND AIRSPACE SURVEILLANCE RADAR

© 2013 S. E. Grigas, D. Ts. Litovchenko, A. A. Skorynin

«Corporation «Kometa» plc, Moscow

Technical requirements for a spaceborne maritime and airspace surveillance synthetic aperture radar are discussed.

Synthetic aperture radar, moving target indication.

Сведения об авторах

Григас Станислав Эдуардович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, ОАО «Корпорация «Комета». E-mail: stanislav.grigas@gmail.com. Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли с использованием радиолокаторов космического базирования.

Литовченко Дмитрий Цезарьевич, доктор технических наук, заместитель генерального директора – генерального конструктора по научному обеспечению разработок, ОАО «Корпорация «Комета». E-mail: dc_litovchenko@mtu-net.ru. Область научных интересов: космические системы наблюдения реального масштаба времени.

Скорынин Александр Андреевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, ОАО «Корпорация «Комета». E-mail: skoraleks@ya.ru. Область научных интересов: математическое моделирование космических радиолокационных комплексов.

Grigas Stanislav Eduardovich, candidate of physics and mathematics, research associate, «Corporation «Kometa» plc. E-mail: stanislav.grigas@gmail.com. Area of research: spaceborne radar Earth remote sensing.

Litovchenko Dmitry Tsesaryevich, doctor of technical science, deputy general director – general designer of «Corporation «Kometa» plc. E-mail: dc_litovchenko@mtu-net.ru. Area of research: spaceborne real-time surveillance systems.

Skorynin Alexander Andreevich, candidate of physics and mathematics, research associate, «Corporation «Kometa» plc. E-mail: skoraleks@ya.ru. Area of research: modeling and numerical simulation of spaceborne radars.