

Пространственно-временная адаптивная обработка сигналов для обнаружения наземных движущихся целей в космических РСА

В.Ю. Савостьянов

АО «Аэрокон»

140180, Российская Федерация, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, 1.

E-mail: v-savostyanov@yandex.ru

В работе рассматриваются особенности применения пространственно-временной адаптивной обработки сигналов в радиолокаторах с синтезированием апертуры антенны (РСА) для повышения качества обнаружения движущихся целей. Отмечается, что при увеличении максимальной скорости движения цели до 120 км/ч разрешающая способность должна ухудшаться до значения 15 м. Иначе сигнал полезной цели начинает мигрировать по каналам дальности и доплеровским фильтрам, что приводит к неоднозначности измерений и размножению цели. Показано, что для обеспечения однозначных измерений скорости необходимо совместно оптимизировать частоту повторения импульсов, время синтезирования и пространственное разрешение.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры антенны (РСА), пространственно-временная адаптивная обработка сигналов, селекция движущихся целей, разрешение, время синтезирования, частота повторения импульсов.

Space-time adaptive signal processing for ground-based moving targets detection in space-based SAR

V.Yu. Savostyanov

JSC Aerokon

The paper examines the features of the use of space-time adaptive signal processing (STAP) in synthetic aperture radars (SAR) to improve the quality of detection of moving targets. It is noted that with an increase in the maximum speed of the target to 120 km/h, the resolution should deteriorate to a value of 15 m. Otherwise, the signal of the useful target begins to migrate through range channels and Doppler filters, which leads to ambiguity of measurements and multiplication of the target. It is shown that in order to ensure unambiguous velocity measurements, it is necessary to jointly optimize the pulse repetition frequency, synthesis time, and spatial resolution.

Key words: synthetic aperture radar (SAR), space-time adaptive signal processing (STAP), moving target indication, resolution, synthesis time, pulse repetition frequency.

Одной из важных задач в РСА космического аппарата (КА) является обнаружение (селекция) наземных и надводных движущихся целей (СНДЦ). Как известно, основной проблемой здесь является наличие в обрабатываемом сигнале не только тепловых шумов приёмника, но также фона местности, создаваемого отражением радиоволны от подстилающей поверхности, и сигналов от неподвижных объектов (мешающих отражений).

Поскольку в принимаемом от подстилающей поверхности сигнале существует однозначная связь между доплеровской частотой и углом наблюдения, то от одномерной (только по доплеровской частоте или только по углу) переходят к двумерной (пространственно-временной) обработке сигналов. Для этого в РСА, реализующих оптимальную пространственно-временную обработку сигналов, используют антенную систему с несколькими разнесенными фазовыми центрами, а также специальные

алгоритмы, основанные на различиях пространственно-временных характеристик сигналов, отражённых от движущихся и неподвижных объектов.

Идея оптимальной пространственно-временной адаптивной обработки сигналов (STAP) заключается в том, что для АР, состоящей из P фрагментов, в каждом анализируемом строке дальности для каждого заданного в координатах «угло-доплеровская частота» направления наблюдения алгоритм может быть описан как произведение матрицы-строки весовых коэффициентов вектора принятого сигнала размером PK , где K – количество зондирующих импульсов [1 – 4].

Если в режиме СНДЦ ставится задача обнаружения движущейся цели с однозначным измерением её радиальной скорости на поверхности, то частоту повторения зондирующих импульсов f_n надлежит выбирать следующим образом:

$$f_n = \frac{4}{\lambda} \max \left\{ v_{max}^t + v \cdot \sin \left(\frac{\Theta}{2} \right) |\sin \theta_0|, v \cdot \sin \left(\alpha \frac{\Theta}{2} \right) |\sin \theta_0| \right\}, \quad (1)$$

где λ – длина волны несущей, v – скорость КА, θ_0 – угол центра ДН АР относительно вектора скорости КА, v_{max}^t – максимальная скорость движения цели, $\alpha = 1,5 \dots 2$, $\Theta = \frac{\lambda}{P d_a}$ – ширина ДН АР при излучении, d_a – шаг между подрешётками.

Для оценки эффективности STAP по обнаружению наземных и надводных движущихся целей была разработана программная модель [5]. Проведённые с её помощью исследования показали, что применение STAP позволяет эффективно обнаруживать движущиеся объекты даже в условиях сильно отражающей подстилающей поверхности.

Очевидно, что наиболее простым является вариант режима СНДЦ, при котором на интервале когерентного накопления сигналов отметка от движущегося объекта находится в пределах одного элемента разрешения по дальности и азимуту. Если предположить, что перемещение объекта, движущегося на поверхности Земли с максимальной скоростью v_{max}^t , за время синтеза T_c не превысит половины элемента разрешения ρ , то справедливым будет следующее выражение:

$$T_c \leq \frac{\rho}{2v_{max}^t \cos(\gamma_n)}, \quad (2)$$

где γ_n – угол падения радиоволны на поверхность.

С другой стороны, для обеспечения равномерности по путевой и горизонтированной дальности необходимо, чтобы соблюдалось условие

$$T_c \geq \frac{\lambda H_0}{2\rho v \cos(\gamma)}, \quad (3)$$

где H_0 – высота орбиты, γ – угол отклонения луча ДН АР от надира (подспутниковой точки). Объединяя выражения (2), (3) и учитывая, что

$$\sin(\gamma_n) = \frac{R_z + H_0}{R_z} \sin(\gamma),$$

где R_z – радиус Земли, получим формулу для допустимого разрешения

$$\rho \geq \sqrt{\frac{\lambda H_0 v_{max}^t \sqrt{1 - \left(\frac{R_z + H_0}{R_z} \sin(\gamma) \right)^2}}{v \cos(\gamma)}}. \quad (4)$$

Расчёты проводились в соответствии с формулой (4) для следующих параметров РСА: $P = 5$, $\lambda = 0,03$ м, $d_a = 1,14$ м, $\theta_0 = -90^\circ$, $v = 7600$ м/с, $H_0 = 500$ км, $\gamma = 25 \dots 50^\circ$, $\alpha = 2$ и $\theta_0^t = 0^\circ$. Результаты расчётов показали, что минимальное значение ρ практически не зависит от параметра γ , а взаимосвязь параметров ρ и v_{max}^t имеет характер такой, как показано на рис. 1. Из рисунка видно, что для объекта с $v_{max}^t = 90 \dots 120$ км/ч должно быть $\rho \geq 12 \dots 15$ м, а при меньшем значении разрешения скоростные объекты будут обнаруживаться как многоточечные цели, т.е. распределённые по элементам дальности и доплеровским фильтрам.

В соответствии с (2) время синтезирования T_c будет иметь зависимость от v_{max}^t согласно рис. 2.

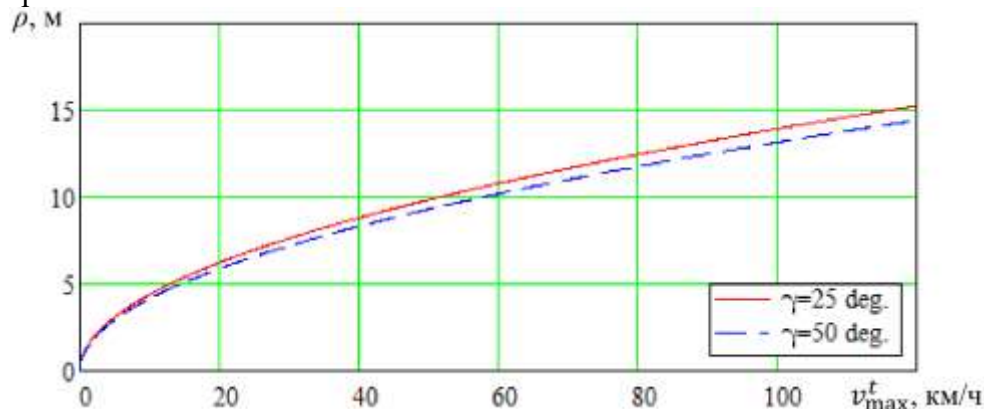


Рис. 1. Зависимость минимального разрешения ρ от параметра v_{max}^t

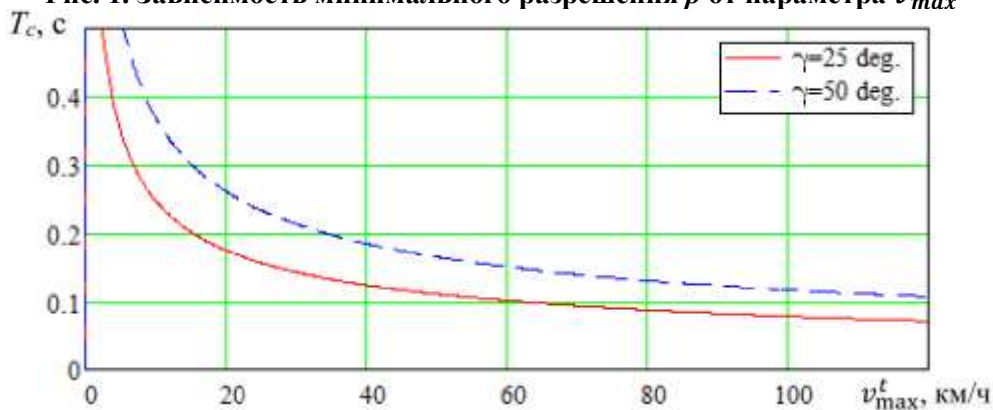


Рис. 2. Зависимость времени синтезирования T_c от параметра v_{max}^t

С другой стороны, в соответствии с (1) зависимость требуемой частоты повторения импульсов f_n от параметра v_{max}^t будет такой, как показано на рис. 3.

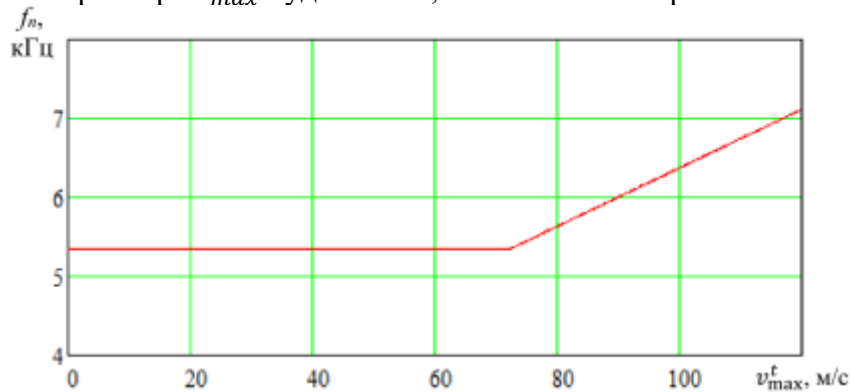


Рис. 3. Зависимость частоты повторения f_n от параметра v_{max}^t

Тогда необходимое количество импульсов K , определяемое выражением

$$K = T_c f_n, \quad (5)$$

будет зависеть от параметра v_{max}^t так, как показано на рис. 4. Из рисунка видно, что с увеличением v_{max}^t сначала K снижается, а потом снова начинает расти.

Расчёты показывают, что при заданных условиях количество импульсов K должно быть равно 758, при этом в точке $v_{max}^t = 72,1$ км/ч, т.е. в точке перехода условия в выражении (1), наблюдается минимальное значение $K = 734$ при $\gamma = 50^\circ$ и $K = 492$ при $\gamma = 25^\circ$.

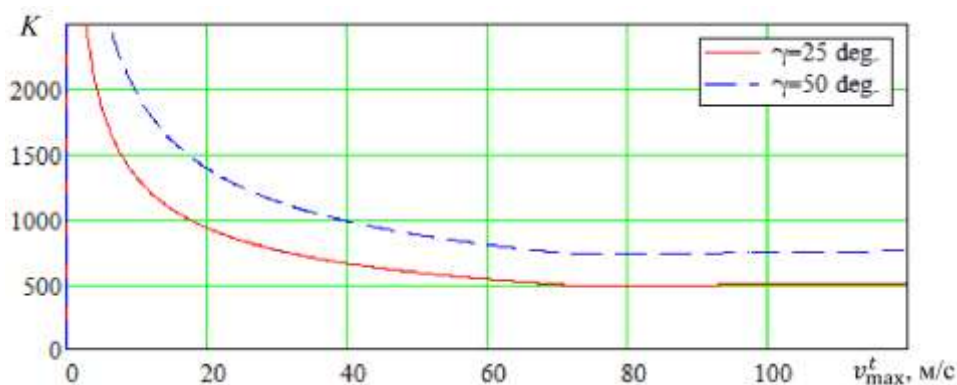


Рис. 4. Зависимость необходимого количества импульсов K от параметра v_{max}^t

Таким образом, проведённые исследования показали, что при реализации СТАР требуемый диапазон однозначно измеряемой скорости движения цели определяет не только частоту повторения импульсов, но также оптимальное разрешение, количество зондирующих импульсов и, соответственно, объём вычислений.

Литература

1. Seliktar Ya. Space-Time Adaptive Monopulse Processing. USA: Georgia Institute of Technology, 1999. 39 p.
2. Dontharaju S. Space-Time Adaptive Processing for Airborne Radar. USA: University of Dayton, 2001. 103 p.
3. Guerci J.R. Space-Time Adaptive Processing for Radar. UK: Artech House, 2003. 204 p.
4. Klemm R. Principles of Space-Time Adaptive Processing. 3rd Edition. UK: The Institution of Engineering and Technology, 2006. 670 p.
5. Савостьянов В.Ю. Эффективность пространственно-временной адаптивной обработки сигналов при селекции наземных движущихся целей в РЛС космического базирования // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2024. №4. С.45-55.