

DOI 10.24412/2221-2574-2024-4-45-55

УДК 621.396.969.32

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ПРИ СЕЛЕКЦИИ НАЗЕМНЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ В РЛС КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Савостьянов Владимир Юрьевич

кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР».

E-mail: v-savostyanov@yandex.ru

Морозова Светлана Анатольевна

кандидат технических наук, ведущий инженер-программист АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР».

E-mail: morozova_sv@mail.ru

Адрес: 115516, Российская Федерация, г. Москва, Кавказский б-р, д. 59.

Аннотация: Рассмотрены особенности реализации пространственно-временной адаптивной обработки сигналов в РЛС космических аппаратов. С помощью математического моделирования проведена оценка эффективности селекции малоскоростных движущихся наземных объектов в условиях сильно отражающей поверхности (фона), а также исследована зависимость характеристик обнаружения от параметров РЛС и принимаемого сигнала.

Ключевые слова: радиолокационная станция, антенная решётка, пространственно-временная обработка сигналов, адаптация, селекция наземных движущихся целей, фон.

Введение

Обнаружение наземных и надводных движущихся целей является одной из важнейших задач, возлагаемых на радиолокационные системы (РЛС) землеобзора. 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). В радиолокации под режимом селекции наземных движущихся целей (СНДЦ) понимают, прежде всего, разделение сигналов движущихся целей и всех других мешающих отражений, т.е. задачу обнаружения полезных сигналов в условиях интерференционных помех [1–5].

В настоящее время наиболее широкое распространение получили методы СНДЦ с доплеровской фильтрацией сигналов, с остановленным фазовым центром и с моноимпульсной антенной. Однако однозначная связь между доплеровской частотой и углом наблюдения, которая различна для сигналов фона и движущихся целей, указывает на целесообразность перехода от одномерной (только по доплеров-

ской частоте или только по углу) к оптимальной двумерной (пространственно-временной) обработке сигналов. При этом в многоканальной РЛС под пространственной обработкой понимают обработку принимаемого электромагнитного поля по раскрытию антенны, а под временной — обработку сигналов, принимаемых отдельными элементами раскрытия антенны во время перемещения носителя РЛС по траектории.

Для реализации оптимальной пространственно-временной обработки сигналов используют антенную систему с несколькими разнесёнными фазовыми центрами, а также многоканальную частотно-временную обработку траекторных сигналов с помощью специальных алгоритмов, основанных на различиях пространственно-временных характеристик сигналов, отражённых от движущихся и неподвижных объектов.

Оптимальная пространственно-временная обработка сигналов

Пусть на равномерную антенную решётку (АР), состоящую из P фрагментов, падает плоская электромагнитная волна. Если угол

прихода волны относительно центра диаграммы направленности (ДН) АР равен θ , то набег фазы сигнала, наблюдаемого в p -м элементе антенны (относительно подрешётки с номером 0), будет

$$2\pi(p-1)\frac{d_a}{\lambda}\sin\theta, \quad (1)$$

где $p = 0, 1 \dots P-1$ — номер подрешётки; d_a — шаг между подрешётками; λ — длина волны несущей (см. рис. 1).

Содержащийся в равноудалённом от центра РЛС кольце (стробе дальности) сигнал фона от земной поверхности будет иметь некоторое распределение доплеровских частот, вызванное движением РЛС. При этом каждый участок фона будет иметь пространственно-зависимую интенсивность переизлучения, которая определяется ДН АР при излучении и собственной отражательной способностью фона.

Доплеровская частота f^s , соответствующая элементу подстилающей поверхности (фона), расположенному под углом θ^s относительно центра ДН АР, вычисляется как [3–5]

$$f^s = \frac{2v}{\lambda} \cos(\theta^s + \theta_0), \quad (2)$$

где v — скорость платформы РЛС; θ_0 — угол центра ДН АР относительно вектора скорости платформы РЛС (см. рис. 1). Из выражения видно, что существует однозначная зависимость между доплеровской частотой f^s и углом θ^s . В результате энергия фона будет распределяться не по всему пространству «угол – доплеровская частота», а только вдоль линии, получившей название «гребень» фона (clutter «ridge») [6–9].

Идея заключается в том, что в каждом анализируемом стробе дальности для каждого заданного в координатах «угол-доплеровская частота» (n, m) направления наблюдения алгоритм пространственно-временной обработки сигналов может быть описан как произведение матрицы-строки весовых коэффициентов

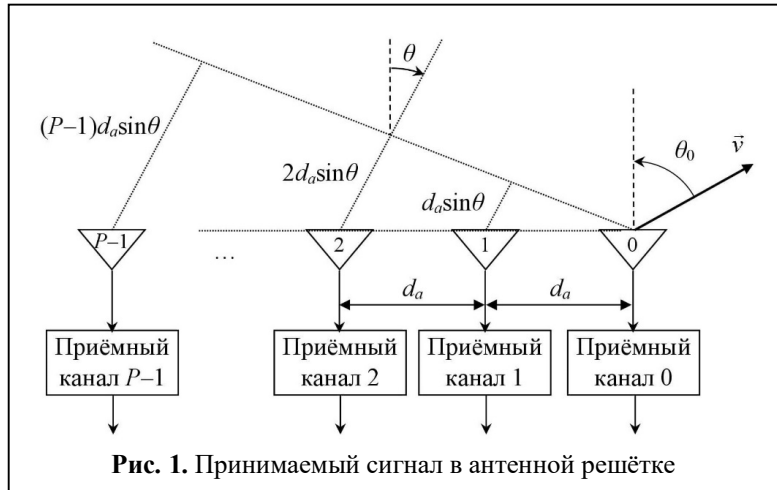


Рис. 1. Принимаемый сигнал в антенной решётке

$(\mathbf{w}_{n,m}^c)^H$ и вектора принятого сигнала χ размером PK [6–9]:

$$z_{n,m}^c = (\mathbf{w}_{n,m}^c)^H \chi, \quad (3)$$

где $z_{n,m}^c$ — сигнал на выходе фильтра (отклик); $(\bullet)^H$ — символ комплексно сопряжённого транспонирования (т.е. эрмитова преобразования) для векторов и матриц; K — количество зондирующих импульсов; χ — принимаемый вектор сигнала, представляющий собой аддитивную смесь сигналов движущихся целей, фона и шума приёмника; $\mathbf{w}_{n,m}^c$ — фильтр для оптимальной пространственно-временной обработки сигналов, который реализуется следующим образом:

$$\mathbf{w}_{n,m}^c = (\mathbf{D}^u)^{-1} \mathbf{v}_{n,m}^c. \quad (4)$$

Здесь $(\bullet)^{-1}$ — символ вычисления обратной матрицы;

$$\mathbf{v}_{n,m}^c = \left[\exp(j2\pi(p\mathcal{G}_m^c + kF_m^c)) \right]_{PK} \quad (5)$$

— направляющий пространственно-временной вектор наблюдения; \mathcal{G}_m^c и F_m^c — нормализованные пространственная и доплеровская частоты в направлении наблюдения; n и m — номера исследуемых пространственных и доплеровских частот;

$$\mathbf{D}^u = \mathbf{D}^s + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (6)$$

— ковариационная матрица интерференционных помех; \mathbf{D}^s — ковариационная матрица фона; σ^2 — средняя мощность шума приёмника РЛС;

\mathbf{I} — единичная диагональная матрица. В (6) матрицы \mathbf{D}^u , \mathbf{D}^s и \mathbf{I} имеют размерность $PK \times PK$. Очевидно, что для вычисления матрицы \mathbf{D}^s необходимо сначала оценить распределение сигнала фона в ДН АР, в чём, собственно, и заключается адаптивность метода.

Сигнал наземной цели, наблюдаемой в угловом положении θ^s и движущейся с радиальной (по отношению к АР) скоростью v^t на поверхности, будет иметь доплеровскую частоту f^t , определяемую выражением

$$f^t = \frac{2v^t}{\lambda} + f^s = \frac{2}{\lambda} (v^t + v \cos(\theta^s + \theta_0)). \quad (7)$$

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:

$$f_n = \frac{4}{\lambda} \max \left\{ v_{\max}^t + v \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) \cdot |\sin \theta_0|, v \sin\left(\alpha \frac{\Theta}{2}\right) \cdot |\sin \theta_0| \right\}, \quad (8)$$

где v_{\max}^t — максимальная скорость движения цели, $\alpha = 1,5 \dots 2$;

$$\Theta = \frac{\lambda}{Pd_a} \quad (9)$$

— ширина ДН АР при излучении. Нетрудно подсчитать, что при боковом обзоре ($|\theta_0| = 90^\circ$) для РЛС, установленной на космическом аппарате (КА), соотношение будет $v_{\max}^t + v \sin(\Theta/2) < v \sin(\alpha \Theta/2)$.

Переход от физических параметров θ^s, f^s и f^t к нормализованным ϑ^s, F^s и F^t осуществляется в соответствии с формулами:

$$\vartheta^s = \frac{d_a}{\lambda} \sin \theta^s, \quad (10)$$

$$\begin{cases} F^s = \frac{f^s}{f_{\Pi}} = \frac{v \cos(\Theta^s + \Theta_0)}{2 \max \{ v_{\max}^t + v \sin(\Theta/2) |\sin \Theta_0|, v \sin(\alpha \Theta/2) |\sin \Theta_0| \}} & \text{для фона} \\ F^t = \frac{f^t}{f_{\Pi}} = \frac{v^t + v \cos(\Theta^s + \Theta_0)}{2 \max \{ v_{\max}^t + v \sin(\Theta/2) |\sin \Theta_0|, v \sin(\alpha \Theta/2) |\sin \Theta_0| \}} & \text{для цели.} \end{cases} \quad (11)$$

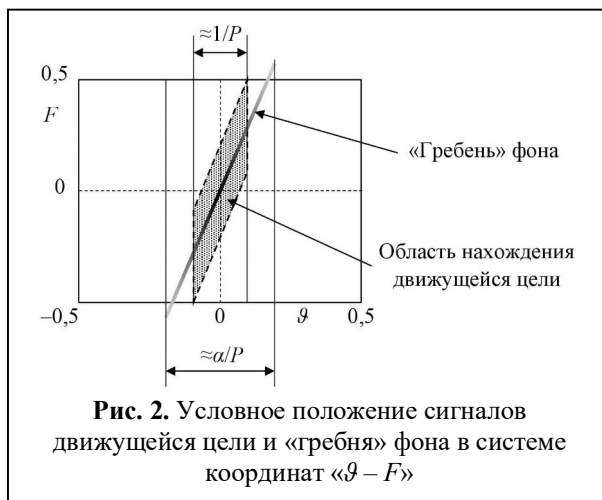


Рис. 2. Условное положение сигналов движущейся цели и «гребня» фона в системе координат « $\vartheta - F$ »

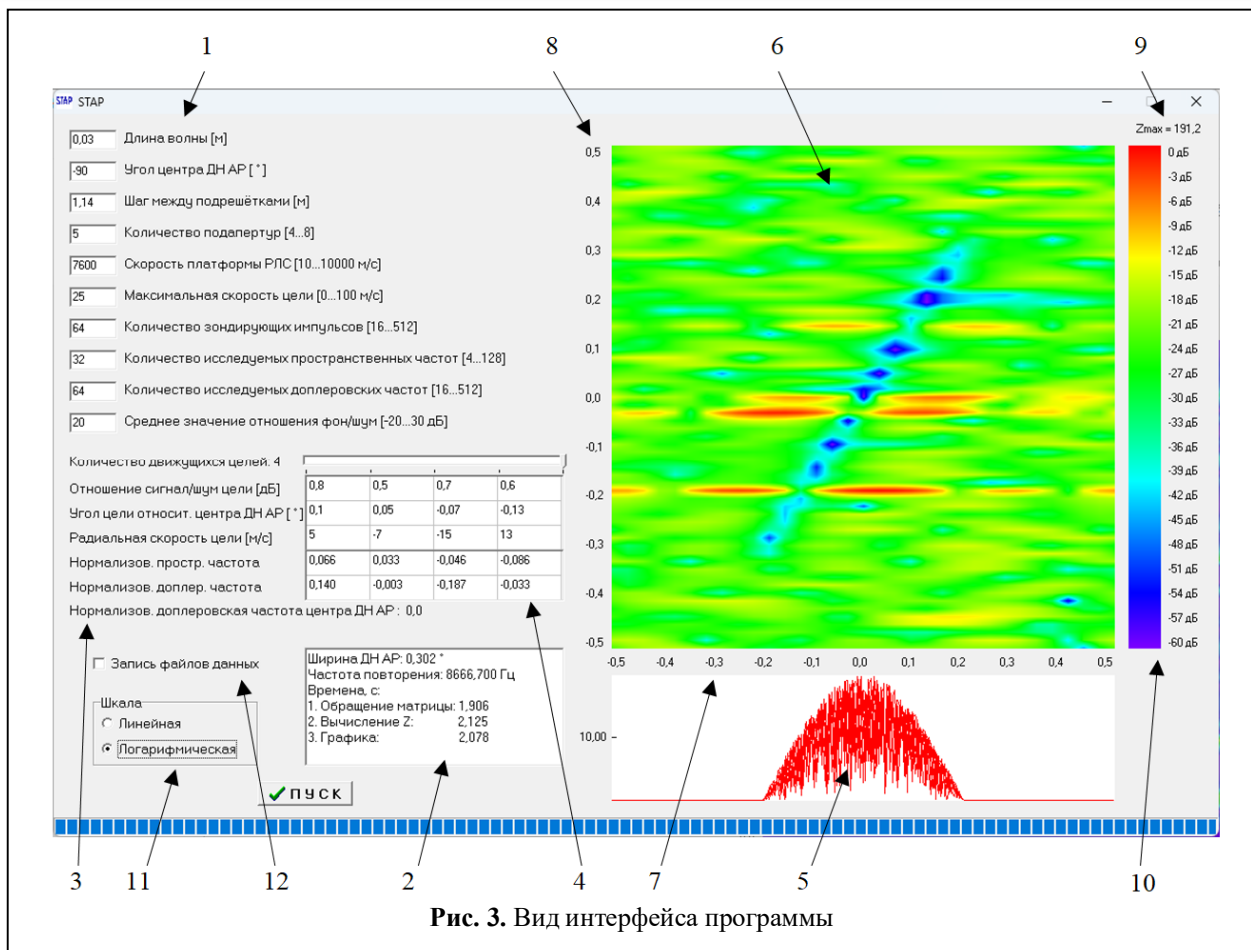
При этом общий (для фона и цели) диапазон изменения параметра ϑ^s составляет примерно $-\alpha/(2P) \dots +\alpha/(2P)$, а для параметров F^s и F^t он равен $-0,5 \dots +0,5$.

На рис. 2 в системе координат « $\vartheta - F$ » для РЛС КА показано условное положение сигналов движущейся цели и «гребня» фона, промодулированного формой ДН АР в режиме излучения.

Из формулы (10) и рис. 2 видно, что, возможно, достаточно будет исследовать не весь диапазон изменения параметров ϑ и F , а лишь область нахождения движущихся целей. Это могло бы существенно снизить объём вычислений.

Оценка эффективности обнаружения движущихся целей

Для оценки эффективности пространственно-временной адаптивной обработки сигналов по обнаружению наземных и надводных движущихся целей была разработана программная модель, с помощью которой исследовалось, как на модули откликов $z_{n,m}^c$ влияют изменения:



- количества зондирующих импульсов K и соответствующего количества исследуемых доплеровских частот M ;
- количества исследуемых пространственных частот N ;
- отношения сигнал/шум на входе фильтра q_d^i ;
- среднего отношения фон/шум на входе фильтра \bar{q}^s ;
- радиальной скорости цели v^i ;
- угла наблюдения цели θ^s .

В модели вычисление обратной матрицы $(\mathbf{D}^u)^{-1}$ размерностью $PK \times PK$ в выражении (4) выполнялось по методу Жордана — Гаусса.

Вид интерфейса программы показан на рис. 3. В реализованной программной модели по заданным физическим параметрам (поле 1) вычисляются ширина ДН АР и частота повторения импульсов (поле 2), нормализованная доплеровская частота в центре ДН АР (поле 3),

а также нормализованные значения пространственной и доплеровской частот для всех заданных целей (поле 4). Моделируется спектр фона с учётом формы ДН АР (поле 5). Вычисленные значения модуля отклика $|z|$ представляются в виде карты уровней (поле 6) со шкалами пространственной (поле 7) и доплеровской (поле 8) частот. Рядом приводятся максимальное значение модуля отклика Z_{\max} (поле 9) и цветовая шкала уровней (поле 10) относительно Z_{\max} . Отображение модуля отклика $|z|$ возможно в линейном или логарифмическом масштабе (поле 11). Кроме того, предусмотрена возможность записи промежуточных данных и конечных результатов в виде текстовых файлов (поле 12), пригодных для обработки в Excel или Mathcad.

Моделирование проводилось при следующих параметрах и допущениях:

- длина волны несущей $\lambda = 3$ см;
- количество подрешёток $P = 5$;

- шаг между подрешётками $d_a = 1,14$ м;
- скорость платформы РЛС $v = 7600$ м/с;
- ориентация платформы – по вектору скорости РЛС;
- обзор боковой по левому борту КА ($\theta_0 = -90^\circ$);
- количество зондирующих импульсов $K = 64, 256$;
- количество исследуемых пространственных частот для обнаружения движущихся целей $N = 32, 128$;
- количество исследуемых доплеровских частот для обнаружения движущихся целей $M = K = 64, 256$;
- максимальная скорость цели $v'_{\max} = 25$ м/с;
- отношение фон/шум рассчитывается по формуле

$$q_r^s = \text{random}(0, 2\bar{q}^s) \cdot \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(-1 + \frac{r}{K}\right)\right),$$

где \bar{q}^s — среднее значение отношения

- фон/шум; $r = 0 \dots 2K-2$, функция $\text{random}(a, b)$ генерирует случайный вектор длиной $2K-1$ с равномерным распределением значений на интервале $a \dots b$, а функция $\cos^2(\bullet)$ имитирует форму ДН АР при излучении (по мощности);
- в формулах (8) и (11) параметр $\alpha = 2$;
- средняя мощность шума $\sigma^2 = 1$.

На рис. 4 для $M = K = 64$ и $N = 32$ в линейной шкале показан модуль отклика $|z|$ во всех исследуемых направлениях по нормализованной пространственной и доплеровской частотам для случая, когда в анализируемом стробе дальности нет движущихся целей. Из рисунка видно, что внутри ДН АР вдоль диагонали $\mathcal{G}_n^c = F_m^c$ отклик фильтра почти нулевой, а в остальных направлениях он не превышает 40...45 ед.

На рис. 5–7 в логарифмической шкале показан модуль отклика $|z|$ при $\bar{q}^s = 20$ дБ и наличии одной цели с $q_d^t = 10$ дБ, $\theta^s = -0,05^\circ$ ($\vartheta^s = -0,033$) и $v^t = 15$ м/с ($F^t = 0,064$).

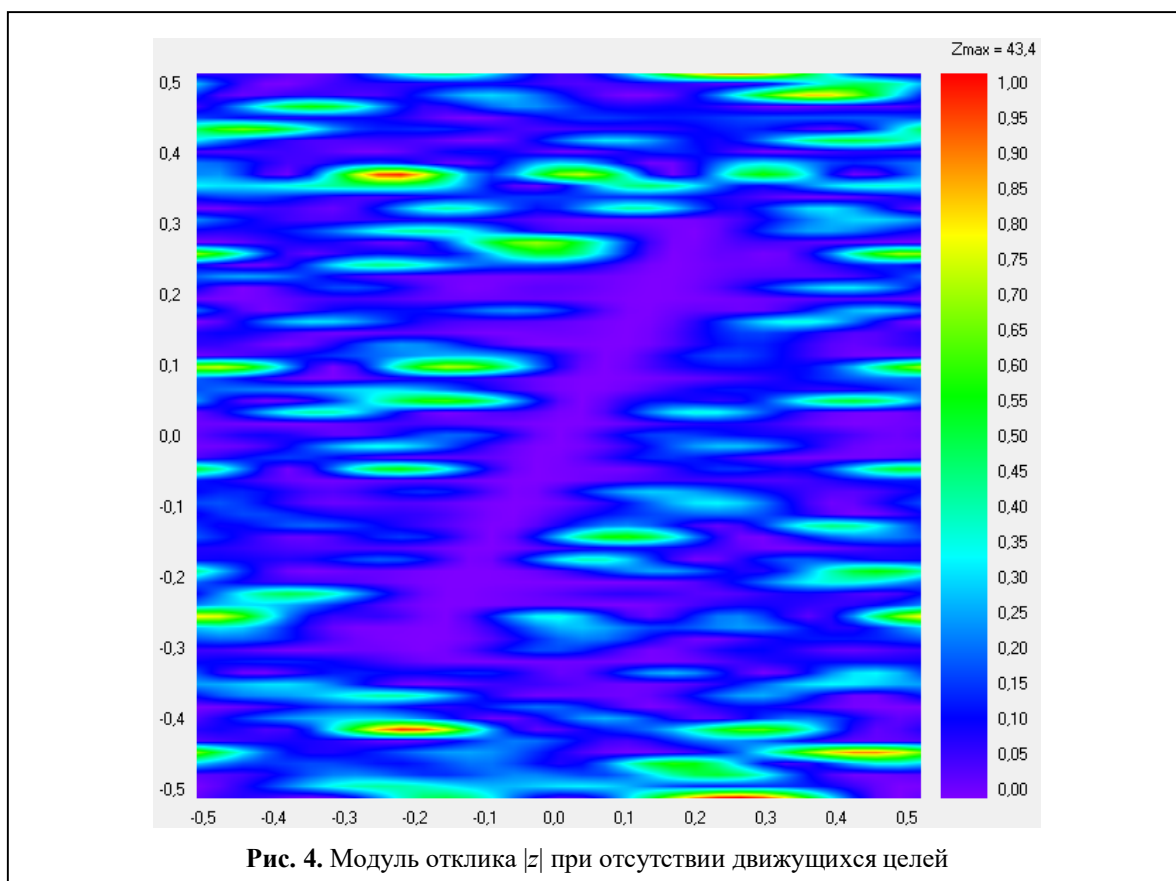


Рис. 4. Модуль отклика $|z|$ при отсутствии движущихся целей

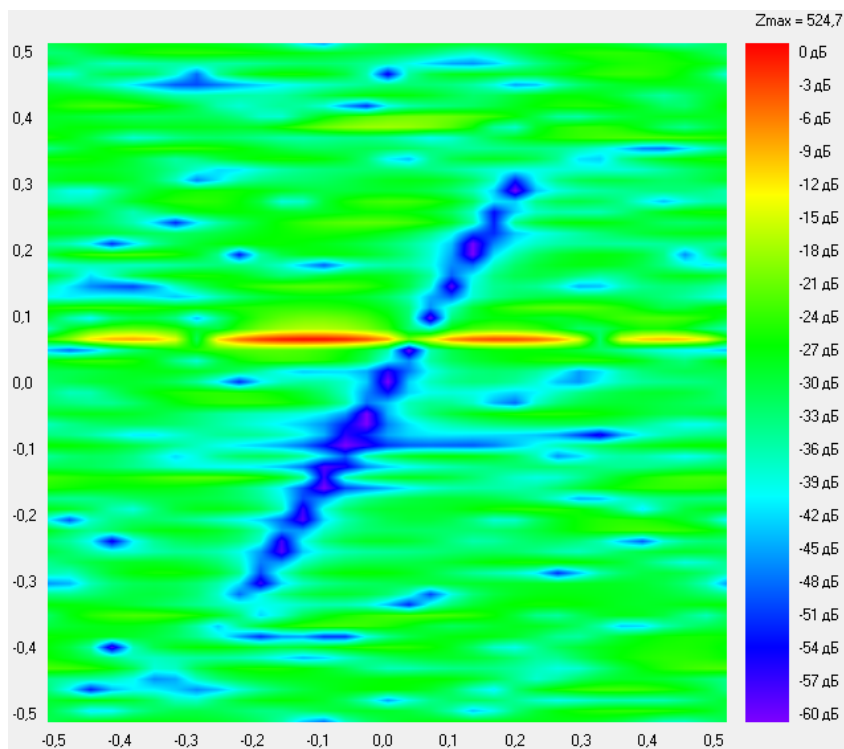


Рис. 5. Модуль отклика $|z|$ для одной цели при $\theta^s = -0,05^\circ$, $v^T = 15$ м/с для $M = K = 64$ и $N = 32$

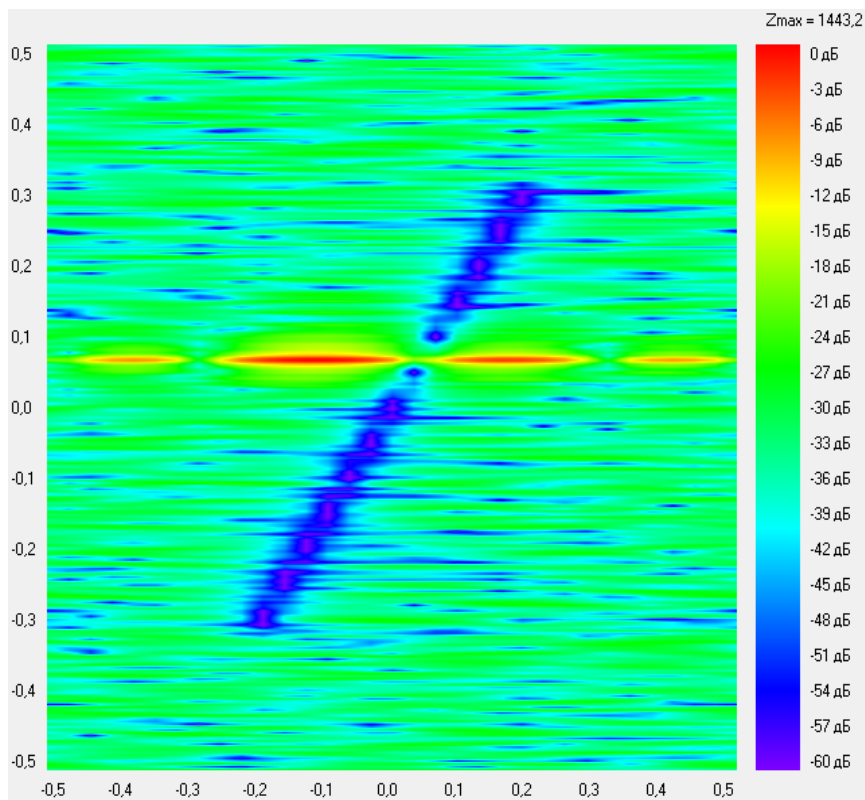


Рис. 6. Модуль отклика $|z|$ для одной цели при $\theta^s = -0,05^\circ$, $v^T = 15$ м/с для $M = K = 256$ и $N = 32$

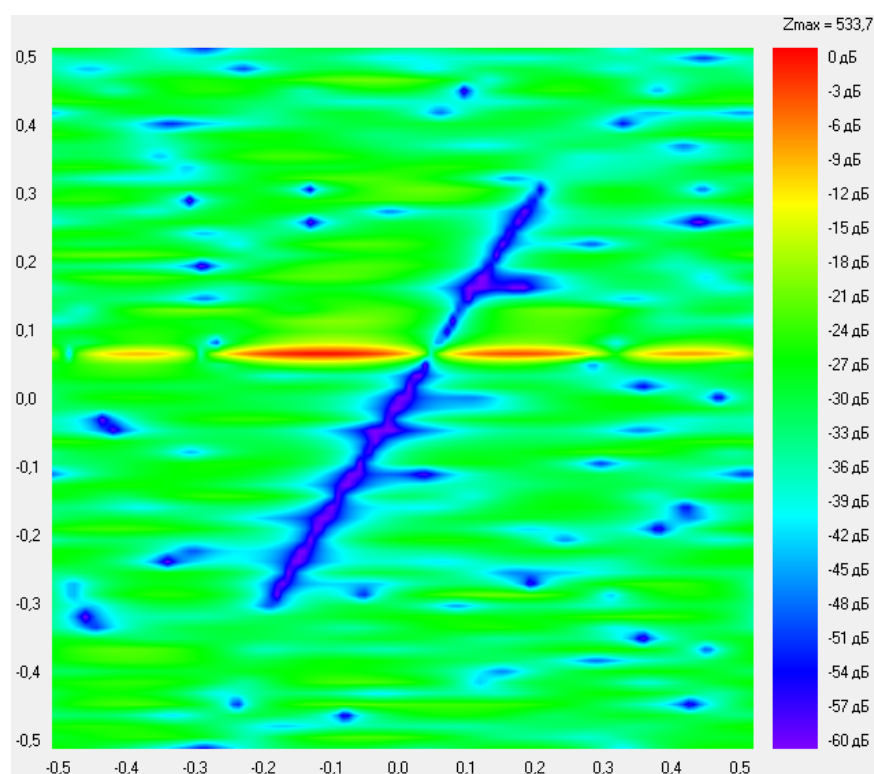


Рис. 7. Модуль отклика $|z|$ для одной цели при $\theta^s = -0,05^\circ$, $v^T = 15$ м/с для $M = K = 64$ и $N = 128$

Рис. 5 иллюстрирует ситуацию для $M = K = 64$ и $N = 32$, рис. 6 — для $M = K = 256$ и $N = 32$, а рис. 7 — для $M = K = 64$ и $N = 128$. Из сравнения рис. 5 и рис. 6 видно, что при увеличении M и K максимальный модуль отклика фильтра возрос с 525 до 1443 ед., при этом ширина отметки цели по доплеровской нормализованной частоте значительно уменьшилась. С другой стороны, из сравнения рис. 5 и рис. 7 видно, что при увеличении N максимальный модуль отклика фильтра почти не увеличился (с 525 до 544 ед.), а ширина отметки цели по пространственной частоте осталась неизменной.

На рис. 8 в логарифмической шкале показан модуль отклика $|z|$ при $\bar{q}^s = 20$ дБ и наличии одной цели с $q_d^t = 0$ дБ, $\theta^s = -0,05^\circ$ и $v^t = 15$ м/с для $M = K = 64$ и $N = 32$. Из сравнения рис. 5 и рис. 8 видно, что при уменьшении q_d^t до 0 дБ максимальный модуль отклика фильтра снизился с 525 до 188 ед. и составил примерно +13 дБ относительно максимального

уровня помех (см. рис. 4).

На рис. 9 в логарифмической шкале показан модуль отклика $|z|$ при $\bar{q}^s = -20$ дБ и наличии одной цели с $q_d^t = 10$ дБ, $\theta^s = -0,05^\circ$ и $v^t = 15$ м/с для $M = K = 64$ и $N = 32$. Из сравнения рис. 5 и 9 видно, что при уменьшении \bar{q}^s с 20 до -20 дБ в отклике фильтра практически исчез диагональный провал (при $\mathcal{G}_n^c = F_m^c$), а максимальный модуль отклика фильтра Z_{\max} остался практически таким же.

На рис. 10 в линейной шкале показан модуль отклика $|z|$ при $\bar{q}^s = -20$ дБ и наличии одной движущейся цели с $q_d^t = 10$ дБ, $\theta^s = -0,05^\circ$ и $v^t = 1,5$ м/с ($F^t = 0,0064$) для $M = K = 256$ и $N = 32$. Переход к линейной шкале и $M = K = 256$ здесь вызван тем, что при уменьшении скорости v^t происходит снижение максимального модуля отклика фильтра Z_{\max} из-за сближения доплеровских частот цели и фона.

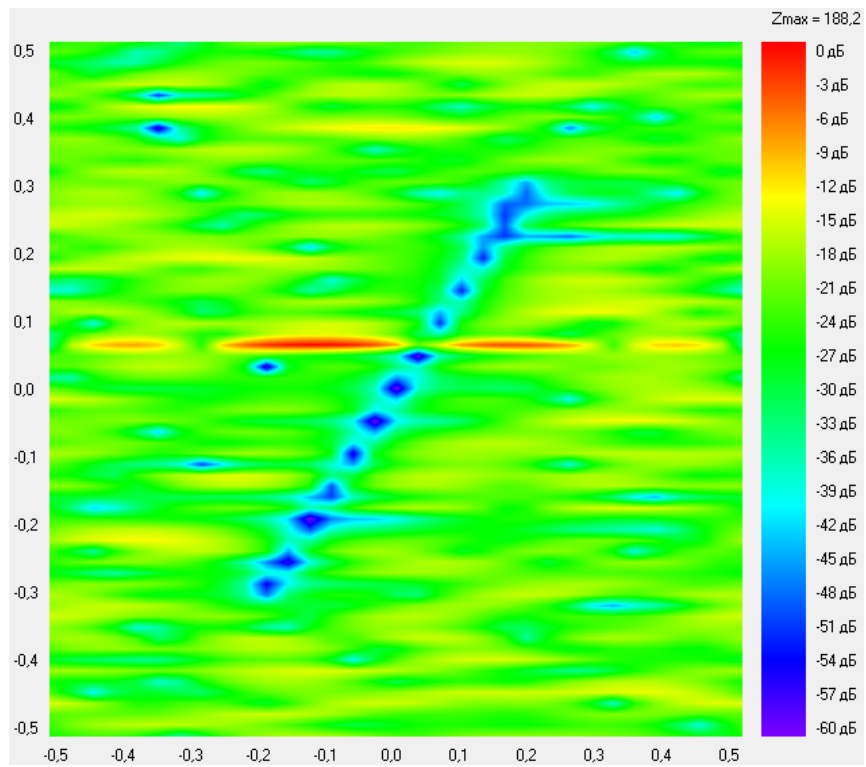


Рис. 8. Модуль отклика $|z|$ для одной цели при $q_d^t = 0$ дБ и $\bar{q}^s = 20$ дБ

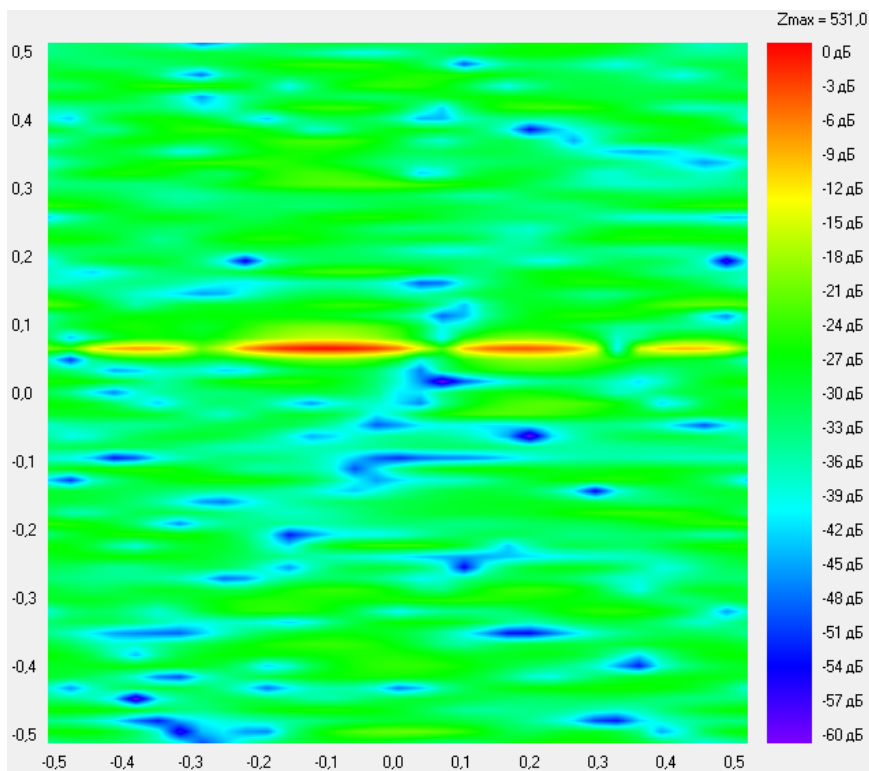


Рис. 9. Модуль отклика $|z|$ для одной цели при $q_d^t = 10$ дБ и $\bar{q}^s = -20$ дБ

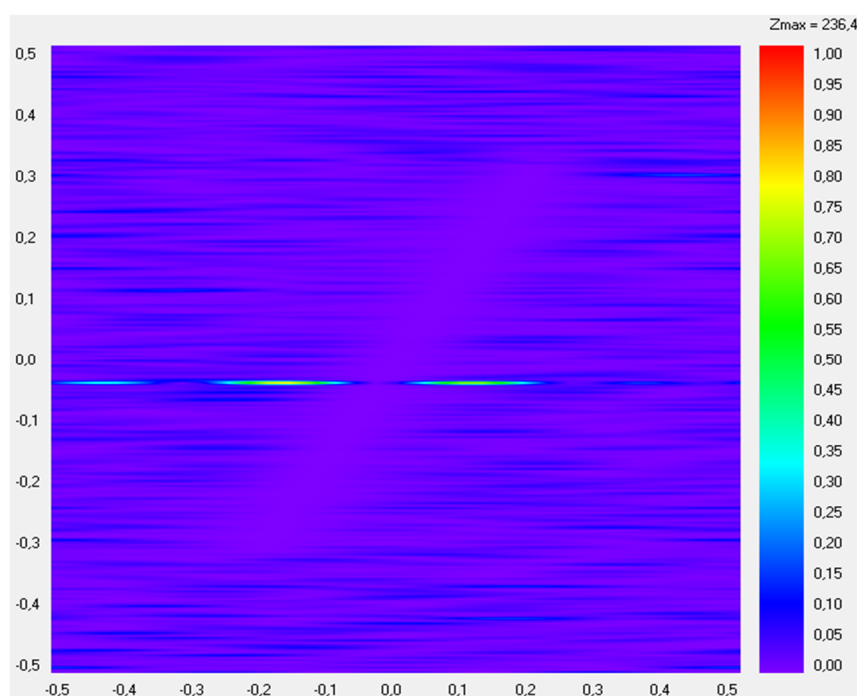


Рис. 10. Модуль отклика $|z|$ для одной цели при $v^t = 1,5$ м/с

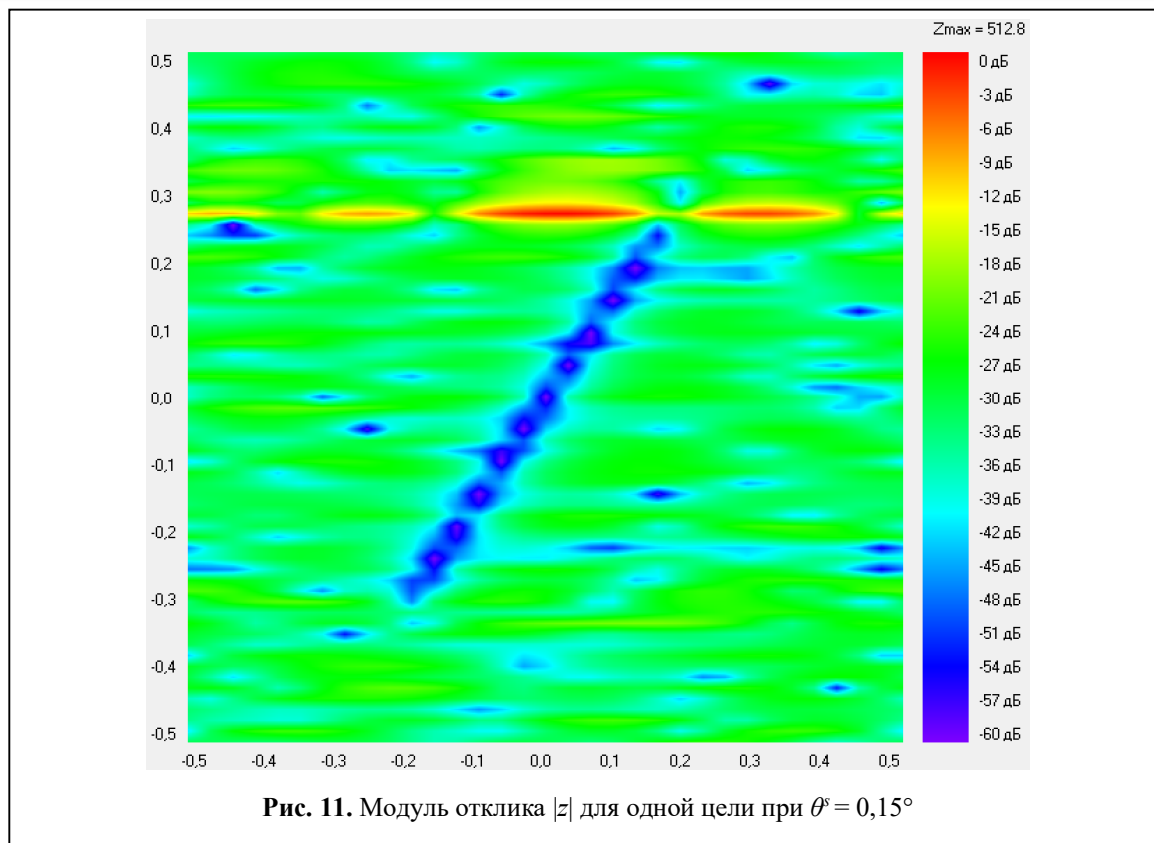
Сравнение рис. 6 и рис. 10 показывает, что и в этом случае обеспечивается обнаружение движущегося объекта, хотя при уменьшении скорости цели с 15 до 1,5 м/с амплитуда отклика снизилась с 1443 до 236 ед. Моделирование также показало, что при $v^t < 2$ м/с и $M = K = 64$ обнаружение объекта становится невозможным, поэтому для обеспечения обнаружения цели необходимо увеличивать значения параметров M и K .

Наконец, на рис. 11 в логарифмической шкале показан модуль отклика $|z|$ при $\bar{q}^s = -20$ дБ и наличии одной цели с $q_d^t = 10$ дБ, $\theta^s = 0,15^\circ$ ($\vartheta^s = 0,1$) и $v^t = 15$ м/с для $M = K = 64$ и $N = 32$. Из сравнения рис. 5 и рис. 11 видно, что изменение угла наблюдения цели θ^s приводит только к перемещению её отметки в системе координат « $\vartheta - F$ » практически без изменения амплитуды и формы отклика.

Выводы

Суммируя полученные результаты моделирования, отметим следующее:

- в отклике фильтра полностью отсутствуют сигналы фона, при этом снижение отношения фон/шум на входе фильтра приводит к уменьшению зоны режекции в области «гребня» фона;
- в пространственно-временной структуре отклик фильтра на движущуюся цель наблюдается область «провала» по угловой координате, возникающую из-за недостаточного количества антенных подрешёток и наличия области режекции;
- увеличение количества зондирующих импульсов (и соответствующего количества исследуемых доплеровских частот) приводит к повышению вероятности обнаружения движущейся цели и улучшению разрешающей способности по радиальной скорости;
- увеличение количества исследуемых пространственных частот не приводит ни к повышению вероятности обнаружения движущейся цели, ни к улучшению разрешающей способности по угловой координате;
- снижение отношения сигнал/шум на входе фильтра приводит к соответствующему



уменьшению амплитуды отклика на его выходе;

- при уменьшении радиальной скорости цели происходит снижение амплитуды отклика фильтра из-за попадания в область режекции;
- изменение угла наблюдения цели в пределах ДН АР приводит к перемещению её отметки в отклике фильтра практически без изменения амплитуды.

Таким образом, проведённые исследования показали, что:

- 1) применение пространственно-временной адаптивной обработки сигналов при заданных в РСА КА параметрах позволяет эффективно обнаруживать наземные цели, движущиеся с радиальными скоростями от 1...2 м/с, даже в условиях сильно отражающей подстилающей поверхности;
- 2) для получения достаточно точной оценки угловой координаты цели необходимо учитывать искажение формы отклика на выходе фильтра, вызванное появлением зоны режекции и наличием в РСА относительно небольшого количества антенных подрешёток.

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов. Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
2. Цифровая обработка сигналов в РСА. Под ред. Е.Ф. Толстова. Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005. 232 с.
3. Школьный Л.А., Толстов Е.Ф., Детков А.Н. и др. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского; под ред. Л.А. Школьного. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
4. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Теоретические основы построения радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2009. 360 с.
5. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турок В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
6. Seliktar Ya. Space-Time Adaptive Monopulse Processing. USA: Georgia Institute of Technology, 1999. 39 p.
7. Dontharaju S. Space-Time Adaptive Processing for Airborne Radar. USA: University of Dayton, 2001. 103 p.

8. *Guerci J.R.* Space-Time Adaptive Processing for Radar. UK: Artech House, INC., 2003. 204 p.
9. *Klemm R.* Principles of Space-Time Adaptive Processing. 3rd Edition. UK: The Institution of Engineering and Technology, 2006. 670 p.

Поступила 2 октября 2024 г.

English

EFFICIENCY OF SPACE-TIME ADAPTIVE SIGNAL PROCESSING IN SELECTION OF GROUND MOVING TARGETS IN SPACE-BASED RADARS

Vladimir Yuryevich Savostyanov — PhD in Engineering, Associate Professor, JSC “Corporation “Phazotron-NIIR”.

E-mail: v-savostyanov@yandex.ru

Svetlana Anatolyevna Morozova — PhD in Engineering, Leading Engineer, JSC “Corporation “Phazotron-NIIR”.

E-mail: morozova_sv@mail.ru

Address: 115516, Russian Federation, Moscow, Kavkazsky Boulevard, 59.

Abstract: The problem of selection of moving targets is considered, the solution of which makes it possible to control traffic, movement of equipment, etc. The solution to the problem of marine monitoring of ships, movement of ice and icebergs is most well studied, due to the relatively uniform background of object observation. For ground targets, the background is significantly non-stationary, therefore, improving the algorithms for selecting ground-based moving targets when using space-based radars is an urgent task. In the article, space-time and multichannel frequency-time processing of the trajectory signal is used for the selection of ground-based mobile targets, the features of the implementation of adaptive processing in spacecraft radars are considered. Optimization of space-time processing is carried out in the case of using a linear array with a small number of antenna elements and a uniform pitch. The relations for calculating the normalized Doppler frequencies of background echoes and moving targets in the lateral viewing mode are obtained. The description of the program of mathematical modeling of spatio-temporal processing is given, with the help of which studies of the observed signals in various tactical and technical situations (in the presence and absence of moving targets) are carried out, an assessment of the effectiveness of selection of low-speed moving ground objects in conditions of a highly reflective surface (background) is given, the issues of highlighting mobile targets in the image at various radar parameters are investigated the station and the trajectory signal. The research results have shown that the proposed adaptive algorithms make it possible to effectively detect ground-based moving targets with radial velocities of more than 1...2 m/s (3.6...7.2 km/h).

Keywords: radar, antenna array, space-time signal processing (STAP), adaptation, selection of ground moving targets, background clutter.

References

1. *Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu.* Radiovision. Radar systems for remote sensing of the Earth. Textbook for universities. Ed. by *G.S. Kondratenkov*. Moscow: Radiotekhnika, 2005. 368 p.
2. Digital signal processing in SAR. Ed. by *E.F. Tolstov*. Smolensk: Publishing house of the Military Air Defense Forces Academia of the Russian Federation, 2005. 232 p.
3. *Shkolny L.A., Tolstov E.F., Detkov A.N.* at al. Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images: a textbook for cadets of the VVIA named after Professor N.Ye. Zhukovsky. Moscow: VVIA named after Professor N.Ye. Zhukovsky, 2008. 531 p.
4. *Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu.* Theoretical foundations for the construction of radar systems for remote sensing of the Earth. Moscow: VVIA named after Professor N.Ye. Zhukovsky, 2009. 360 p.
5. *Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E.* Space-borne Earth Surveillance Radar Systems. Ed. by *V.S. Verba*. Moscow: Radiotekhnika, 2010. 680 p.
6. *Seliktar Ya.* Space-Time Adaptive Monopulse Processing. USA: Georgia Institute of Technology, 1999. 39 p.
7. *Dontharaju S.* Space-Time Adaptive Processing for Airborne Radar. USA: University of Dayton, 2001. 103 p.
8. *Guerci J.R.* Space-Time Adaptive Processing for Radar. UK: Artech House, INC., 2003. 204 p.
9. *Klemm R.* Principles of Space-Time Adaptive Processing. 3rd Edition. UK: The Institution of Engineering and Technology, 2006. 670 p.