

УДК 621.396.965.45, 621.396.969.181.234

В. П. Федосов, Д.Г. Ковтун

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ
НАЗЕМНОЙ ЦЕЛИ НА ОТКЛИК СОГЛАСОВАННОГО ФИЛЬТРА
В РЛС С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ**

Рассматривается проблема влияния движения цели на результат обработки сигналов в радиолокаторе с синтезированной апертурой (РСА). В работе описана модель радиолокационной станции с синтезированной апертурой при прямолинейном движении носителя с постоянной скоростью. Представленная модель была рассмотрена в декартовой системе координат, при этом цель была расположена на подстилающей поверхности. Селекция движущихся целей (СДЦ), основанная на доплеровском сдвиге частоты, не всегда позволяет обнаружить цели, имеющие тангенциальную скорость, когда как селекция с учетом тангенциальной скорости обеспечивает большую вероятность обнаружения цели. Представлены основные аналитические выражения, описывающие отклик согласованного траекторного сигнала при наличии движения цели, совпадающего или встречного по направлению с движением носителя в случае радиолокационной станции бокового обзора. На основе использования зондирующего линейно-частотно модулированного импульсного сигнала показан процесс формирования траекторного сигнала в случае прямолинейного движения самолета-носителя. Описано влияние скорости цели вдоль траектории полета носителя на траекторный сигнал. Представлены, как искажения закона модуляции траекторного сигнала, так и результаты фильтрации сигнала при данных искажениях. При малых скоростях цели происходит фиктивное смещение азимутальной координаты цели от фактического начального положения с уменьшением амплитуды сигнала. Приведенные аналитические выражения показывают, что даже при малых скоростях цели возможно получить значительно искажение траекторного сигнала. Показано, что в результате искажения траекторного сигнала возможно получить как неверную оценку дальности до цели, так и информацию о ее геометрических размерах.

Радиолокатор с синтезированной апертурой; ЛЧМ сигнал; формирование траекторного сигнала; селекция движущихся целей в тангенциальном направлении.

V.P. Fedosov, D.G. Kovtun

**ANALYZE OF TANGENTIAL SURFACE TARGET'S VELOCITY TO THE
RESPONSE OF MATCHED FILTER IN SYNTHETIC APERTURE RADAR**

In the paper the problem of the target velocity effect on the result of the signal processing is analyzed in a synthetic aperture radar. Radar system with synthetic aperture carrier stright motion with constant velocity is described in the model. The model was considered in a Cartesian coordinate system, while the target was located on the underlying surface. Selection of movement targets based on the Doppler shift frequency is not always possible to detect targets with a tangential speed when a selection for a tangential velocity provides a higher probability of target detection. The main analytical expressions are shown to describe the response of a matched trajectory signal if the target moves, matching or counter with the direction of movement of the carrier in case of side-looking radar station. Based on the linearly frequency modulated signal forming process is shown in the case of signal trajectory successive rectilinear movement of the carrier aircraft. It describes the effect of the target speed along the flight path on the carrier trajectory signal. A distortion of the law modulation trajectory signal and the signal filtering results in data corruption is presented. At low speeds, there is a fictional displacement target azimuth target coordinates from the actual initial position with decreasing amplitude. These analytical expressions show at low speeds, the goal is possible to obtain significant distortion of the trajectory of the signal. It has been shown that as a result of the trajectory of the signal distortion is possible to get a wrong information of the target range, and its geometrical dimensions.

Radar with synthetic aperture; LFM chirp signal; formation of a trajectory of a signal; selection of moving targets in the tangential direction.

Введение. Радиолокатор с синтезированной апертурой может осуществить картографирование практически в любых погодных условиях. РСА системы были разработаны и хорошо изучены для картографирования местности, с использованием сигналов различных типов: линейной частотной модуляцией, со случайным сдвигом частоты и шумоподобными сигналами [1–7].

С увеличением требований к РСА становится необходимым селекция и последующая обработка подвижных целей [8–11]. Селекция целей, основанная на доплеровском сдвиге частоты, обусловленной радиальной скоростью цели, отраженного сигнала хорошо изучена [9–13], а так же разработаны методы по компенсации возникающей ошибки, как за счет непрямолинейного перемещения носителя [13–16], так и за счет движения цели [17, 18]. Однако влияние скорости цели, коллинеарной со скоростью носителя $V_{цц}$, на доплеровский частотный сдвиг очень мал в РЛС бокового обзора, что затрудняет его оценку. Как правило, методы компенсации скорости цели основываются на компенсации дополнительного доплеровского сдвига при синтезе апертуры [16, 18, 19]. Причем в случае медленных целей, когда невозможно точно измерить доплеровское смещение за счет движения цели в радиальном направлении, данные алгоритмы не работают [18]. Как будет показано ниже, малые скорости $V_{цц}$ цели значительно влияет на результаты формирования радиолокационного изображения (РЛИ) земной поверхности.

Постановка задачи. Для изучения влияния скорости цели $V_{цц}$ рассмотрим следующую задачу. Носитель на высоте H_0 движется с постоянной скоростью V_n и прямолинейной траекторией вдоль оси Y . Цель с начальными координатами $\{0, x_0, y_0\}$ имеет скорость, направленную параллельно носителю (рис. 1) [20]. Носитель формирует одиночный ЛЧМ сигнал длительностью $\tau_{изл}$:

$$s(t)_{изл} = A \exp \left[j(\omega_0 t + \pi \mu t^2) \right] t \in \left[-\tau_{изл}/2 ; \tau_{изл}/2 \right].$$

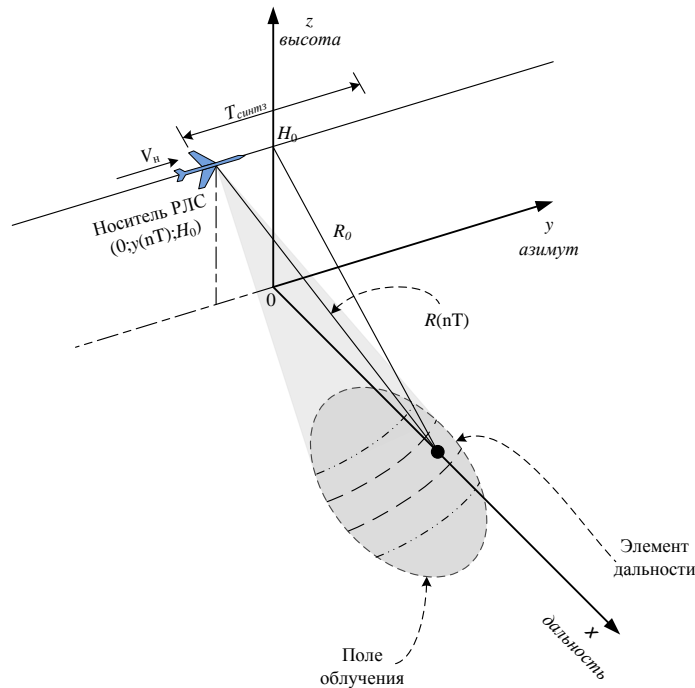


Рис. 1. Геометрическое представление РСА

В этом случае, эхосигнал от одиночной цели можно записать как

$$s(t)_{omp} = A_{omp} \exp \left[j((\omega_0 + \omega_{\partial on})(t - t_0) + \pi\mu(t - t_0)^2) \right] t \in \left[-\tau_{узл}/2; \tau_{узл}/2 \right],$$

где $\omega_{\partial on} = \frac{4\pi V_r}{\lambda}$, $t_0 = \frac{2R}{c}$, V_r – радиальная скорость цели относительно бортовой РЛС, R – текущее расстояние до цели.

Для упрощения моделирования системы далее в работе рассматривается аналитический эхосигнал вида:

$$s(t)_{omp} = A_{omp} \exp \left[j(\omega_{\partial on}(t - t_0) + \pi\mu(t - t_0)^2) \right] \exp[-j\omega_0 t_0] t \in \left[-\tau_{узл}/2; \tau_{узл}/2 \right].$$

Считаем, что влияние скорости бортовой РЛС (БРЛС) компенсировано, а влияние скорости цели на радиальную скорость V_r пренебрежимо мало, тогда выражение эхосигнала можно упростить:

$$s(t)_{omp} = A_{omp} \exp \left[j\pi\mu(t - t_0)^2 \right] \exp[-j\omega_0 t_0] t \in \left[-\tau_{узл}/2; \tau_{узл}/2 \right].$$

Формирование синтезированной апертуры. С учетом того, что было описано выше, можно сказать, что задержка сигнала зависит от текущего расстояния носителя, которое можно описать следующим образом [20]:

$$R = \sqrt{R_0^2 + y^2},$$

где R_0 – минимальное расстояние до цели.

Поскольку $R_0 \gg y$, то можно аппроксимировать выражение [20]:

$$R = \sqrt{R_0^2 + y^2} \approx R_0 + \frac{y^2}{2R_0}.$$

Перемещение вдоль оси Y описывается следующим выражением

$$y = (V_H \mp V_{Hy})nT \quad n \in [-N/2; N/2],$$

n – номер импульса, $N = T_{\text{синт}}/T$, $T_{\text{синт}}$ – интервал времени синтеза апертуры.

Тогда сигнал синтезированной апертуры можно записать:

$$s(t, nT)_{omp} = A_{omp} \exp \left[j\pi\mu(t - t_0)^2 \right] \exp \left[-j\omega_0 \frac{2R_0}{c} \right] \exp \left[-j\omega_{\partial}(nT)^2 \right],$$

$$t \in \left[-\tau_{узл}/2; \tau_{узл}/2 \right] n \in [-N/2; N/2];$$

$$\omega_{\partial} = \frac{2\pi(V_H \mp V_{Hy})^2}{R_0\lambda}.$$

В результате оптимальной фильтрации по "быстрому" (по дальности) времени

$$s(t, nT)_{omp} = A_{omp} \frac{\sin[\mu(t - t_0)(\tau_{узл} - |t|)/2]}{\mu(t - t_0)} \exp \left[-j\omega_0 \frac{2R_0}{c} \right] \exp \left[-j\omega_{\partial}(nT)^2 \right],$$

$$t \in \left[-\tau_{узл}/2; \tau_{узл}/2 \right] n \in [-N/2; N/2].$$

Поскольку скорость цели неизвестна, то для согласованной фильтрации рассмотрим фильтр, согласованный только со скоростью носителя

$$h(nT)_{\text{созл}} = \exp \left[j\omega_{\partial 0}(nT)^2 \right], \quad \omega_{\partial 0} = \frac{2\pi V_H^2}{R_0\lambda}.$$

Сигнал для медленного времени можно записать:

$$s(nT)_{omp} = \exp[j\omega_{\partial}(nT)^2].$$

Рассчитать отклик согласованного фильтра можно по следующей формуле

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)_{omp} h(t-\tau)_{\text{созл}} d\tau.$$

С учетом конечности интервалов существования сигналов для $nT \geq 0$ -

$$s(nT)_{\phi} = \frac{(-1)^{3/4} \sqrt{\pi}}{2\sqrt{\omega_{\psi}}} \cdot \exp\left\{-j\left((nT)^2 \frac{\omega_{\partial 0}(\omega_{\partial 0} + \omega_{\psi})}{\omega_{\psi}}\right)\right\} \times \\ \times \left\{ \operatorname{erfi}\left[\sqrt[4]{-1} \frac{\omega_{\partial 0} nT + \omega_{\psi} \left(nT - T_{\text{сунт}}/2\right)}{\sqrt{\omega_{\psi}}}\right] - \operatorname{erfi}\left[\sqrt[4]{-1} \frac{\omega_{\partial 0} nT + \omega_{\psi} T_{\text{сунт}}/2}{\sqrt{\omega_{\psi}}}\right] \right\},$$

$$\text{где } \omega_{\psi} = \frac{2\pi(\mp 2V_H V_{\psi} + V_{\psi}^2)}{R_0 \lambda}.$$

Выбор знака зависит от направления движения цели относительно носителя. Если направление совпадает, то знак минус. При анализе системы считается, что цель всегда находится в пределах диаграммы направленности системы.

С учетом вышеизложенного сигнал на выходе согласованного фильтра можно записать:

$$s(t, nT)_{omp} = A_{omp} \frac{\sin[\mu(t-t_0)(\tau_{узл} - |t|)/2]}{\mu(t-t_0)} \exp\left[-j\omega_0 \frac{2R_0}{c}\right] \times \\ \times \frac{(-1)^{3/4} \sqrt{\pi}}{2\sqrt{\omega_{\psi}}} \cdot \exp\left\{-j\left((nT)^2 \frac{\omega_{\partial 0}(\omega_{\partial 0} + \omega_{\psi})}{\omega_{\psi}}\right)\right\} \times \\ \times \left\{ \operatorname{erfi}\left[\sqrt[4]{-1} \frac{\omega_{\partial 0} nT + \omega_{\psi} \left(nT - T_{\text{сунт}}/2\right)}{\sqrt{\omega_{\psi}}}\right] - \operatorname{erfi}\left[\sqrt[4]{-1} \frac{\omega_{\partial 0} nT + \omega_{\psi} T_{\text{сунт}}/2}{\sqrt{\omega_{\psi}}}\right] \right\},$$

$$t \in \left[-\tau_{узл}/2; \tau_{узл}/2\right] \quad n \in [0; N/2).$$

А для случая $nT < 0$ -

$$s(t, nT)_{omp} = A_{omp} \frac{\sin[\mu(t-t_0)(\tau_{узл} - |t|)/2]}{\mu(t-t_0)} \times \\ \times \exp\left[-j\omega_0 \frac{2R_0}{c}\right] \frac{(-1)^{3/4} \sqrt{\pi}}{2\sqrt{\omega_{\psi}}} \exp\left\{-j\left((nT)^2 \frac{\omega_{\partial 0}(\omega_{\partial 0} + \omega_{\psi})}{\omega_{\psi}}\right)\right\} \times \\ \times \left\{ \operatorname{erfi}\left[\sqrt[4]{-1} \frac{\omega_{\partial 0} nT - \omega_{\psi} T_{\text{сунт}}/2}{\sqrt{\omega_{\psi}}}\right] - \operatorname{erfi}\left[\sqrt[4]{-1} \frac{\omega_{\partial 0} nT + \omega_{\psi} \left(T_{\text{сунт}}/2 + nT\right)}{\sqrt{\omega_{\psi}}}\right] \right\},$$

$$t \in \left[-\tau_{узл}/2; \tau_{узл}/2\right] \quad n \in [-N/2; 0).$$

Когда скорость цели, параллельная движению носителя равна нулю, выражение упрощается до

$$s(t, nT)_{omp} = A_{omp} \frac{\sin[\mu(t - t_0)(\tau_{изл} - |t|)/2]}{\mu(t - t_0)} \exp\left[-j\omega_0 \frac{2R_0}{c}\right] \frac{\sin[\omega_{\partial 0}(nT)(T_{синтз} - |nT|)/2]}{\omega_{\partial 0}(nT)},$$

$$t \in \left[-\frac{\tau_{изл}}{2}; \frac{\tau_{изл}}{2}\right], n \in [-N/2; N/2).$$

Анализ влияния скорости цели, параллельной движению носителя. Для анализа влияния скорости цели, параллельной движению носителя, рассматривались следующие параметры системы: минимальное расстояние до цели $R_0 = 10$ км, средняя длина волны $\lambda = 3$ см, время синтезирования апертуры $T_{синтз} = 1$ с, скорость носителя БРЛС $V_n = 200$ м/с, период повторения импульсов $T = 1$ мс, длительность одиночного ЛЧМ импульса $\tau_{изл} = 100$ мкс.

Рассмотрим влияние тангенциальной скорости цели на результаты обработки согласованной фильтрации, рассмотрев только результаты по медленному времени. На рис. 2 представлен результат фильтрации, когда траекторным сигналом полностью согласован с фильтром.

На рис. 3-5 изображены сигналы на выходе фильтра при различных скоростях цели $V_{ц}$ от 2 до 10 м/с.

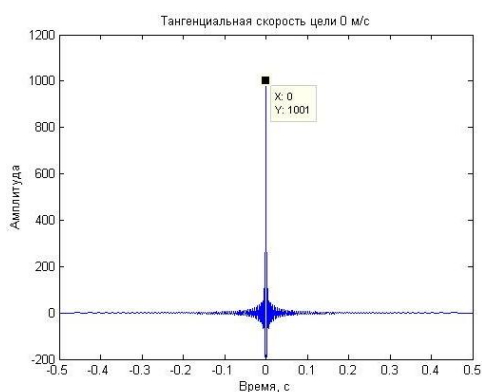


Рис. 2. Отклик согласованного фильтра при скорости цели, равной нулю, $T_{синтз} = 1$ с

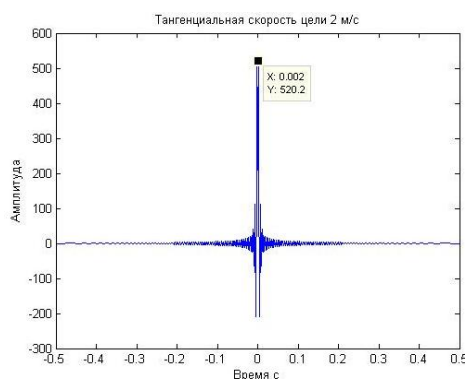


Рис. 3. Отклик согласованного фильтра при скорости цели, равной 2 м/с, $T_{синтз} = 1$ с

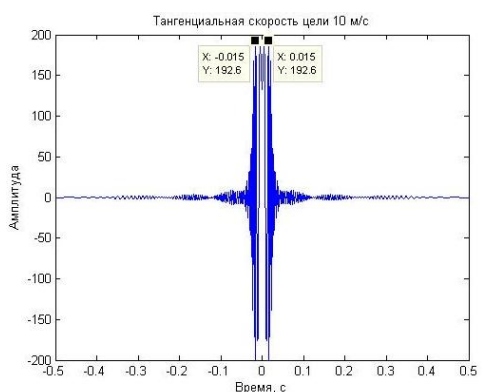


Рис. 4. Отклик согласованного фильтра при скорости цели, равной 10 м/с, $T_{синтз} = 1$ с

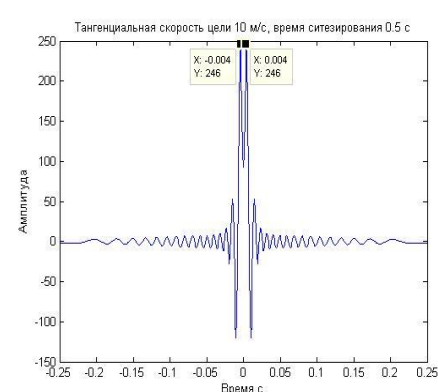


Рис. 5. Отклик согласованного фильтра при скорости цели, равной 10 м/с, $T_{синтз} = 0,5$ с

Как видно из рисунков, при малых угловых скоростях происходит сначала смещение по времени цели от фактического начального положения с некоторым уменьшением амплитуды. А с увеличением скорости $V_{цy}$ появляется "ложная" цель и представляет собой уже распределенную в пространстве, как можно видеть на рис. 4.

При селекции целей по тангенциальной скорости возможно рассмотреть алгоритм, в основе которого лежит формирование РЛИ подстилающей поверхности при различных временах синтезирования [21]. На рис. 5 для формирования отклика фильтра использовался траекторный сигнал с меньшей вдвое длительностью, чем для рис. 4. Из сравнения рис. 4 и 5 видно, что происходит изменение длительности эхосигнала от цели по азимутальной координате. Этот признак возможно использовать для селекции целей с тангенциальной скоростью.

На рис. 6 представлены модули спектров огибающих траекторных сигналов, при различных скоростях цели 0 и 10 м/с. С изменением скорости цели происходит изменение ширины спектра траекторного сигнала. Можно утверждать, что при скоростях цели меньше носителя и при совпадении направления скорости цели с носителем, происходит уменьшение полосы сигнала, а при встречном - возрастание.

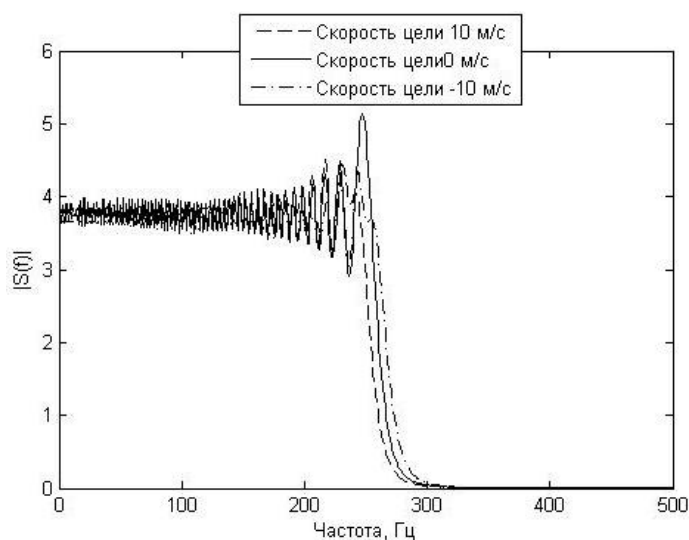


Рис. 6. Спектры огибающих траекторного сигнала при различных скоростях цели

Рассмотрим поведение сигнала в двумерном случае, когда сжатие сигнала происходит по дальности (координате "x") и по азимутальной координате (оси "y"). На рис. 7 представлен графиками серого результат обработки траекторного эхосигнала от одиночной цели. Параметры синтеза те же, что и у рассмотренного выше случая. База импульсного сигнала равна 3000, при длительности $\tau_{изл} = 100$ мкс.

На рис. 8 аналогично представлен результат обработки эхосигнала при скорости цели в 10 м/с.

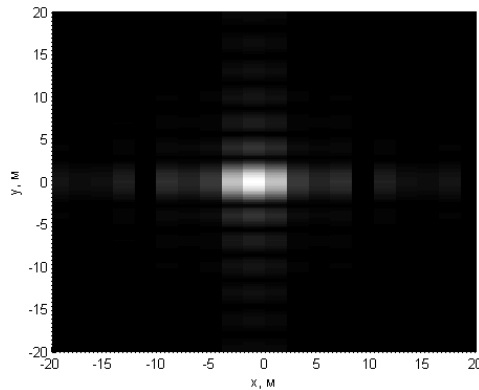


Рис. 7. Двумерное представление траекторного эхосигнала на выходе согласованного фильтра при скорости цели, равной 0 м/с

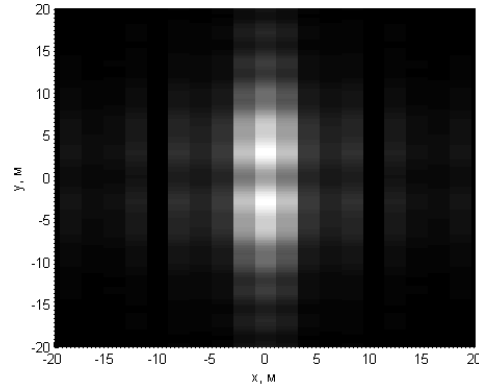


Рис. 8. Двумерное представление траекторного эхосигнала на выходе согласованного фильтра при скорости цели, равной 10 м/с

Выводы. Таким образом, получены основные аналитические выражения, описывающие отклик согласованного фильтра траекторного сигнала. Показаны основные тенденции влияния скорости цели, параллельной скорости носителя. Известные алгоритмы [21, 22] СДЦ с радиальной скоростью предполагают формирование моноимпульсной системы в азимутальной плоскости, при этом для целей с тангенциальной скоростью используют оценку разности фаз субапертур [21]. При малых тангенциальных скоростях целей возможно оценка скорости по разнице измеренных и фактических азимутальных координат, что может привести к ошибке при СДЦ с оценкой радиальной скорости.

Приведенные в статье результаты позволяют определить признаки для селекции медленных наземных целей при их движении по тангенциальным направлениям относительно носителя РЛС с синтезированием апертуры антенной решетки. Использование амплитудной антенной решетки может улучшить СДЦ с тангенциальной скоростью, обойдя ограничения для распределенной цели, характерные для фазового метода [21].

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации госзадания № 213.01-11/2014-11 «Методы, алгоритмы и программно-аппаратные средства обработки пространственно-временных сигналов в многофункциональных информационных системах». Исследования проводились в ФГАОУ ВО ЮФУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Axelsson S.R.J.* Analysis of random step frequency radar and comparison with experiments // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – Apr. 2007. – Vol. 45, No. 4. – P. 890-904.
2. *Xu X. and Narayanan R.* FOPEN SAR imaging using UWB step-frequency and random noise waveforms // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – Oct. 2001. – Vol. 37, No. 4. – P. 1287-1300.
3. *Garmatyuk D. and Narayanan R.* Ultra-wideband continuous-wave random noise arc-SAR // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – Dec. 2002. – Vol. 40, No. 12. – P. 2543-2552.
4. *G.-S. Liu, H. Gu, W.-M. Su, H.-B. Sun, and J.-H. Zhang.* Random signal radar - A winner in both the military and civilian operating environments // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – Apr. 2003. – Vol. 39, No. 2. – P. 489-498.
5. *Dang Hongxing.* Stepped frequency chirp signal SAR imaging, Synthetic Aperture Radar, 2007. APSAR 2007 // 1st Asian and Pacific Conference on, 2007. – P. 14-18.

6. Кудря А.И., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н. Расширение возможностей использования М-последовательности в РСА // II Всероссийские Армадовские чтения «Муром2012»: Материалы конференции. – 2012. – С. 518-531.
7. Савостьянов В.Ю. Исследование функции неопределенности частотно-манипулированного сигнала с внутриимпульсной ЛЧМ // Вопросы радиоэлектроники. – 2012. – Т. 2, № 2. – С. 66-83.
8. Федосов В.П. Пространственно-временные методы измерения и контроля параметров движения масс на границах раздела сред // Применение средств локации для контроля параметров водной экосреды. - Таганрог: ТРТИ, 1991. - С. 42-74.
9. Федосов В.П., Сурков М.Н., Чуйков В.М. Эффективность алгоритмов селекции экологических объектов на поверхности раздела сред // Известия СКНЦ ВШ. - 1993. - № 4. - С. 23-32.
10. Горовой Е.Н., Безвесильный А.А., Вагрий Д.М. Коррекция радиометрических ошибок на изображениях при использовании дальностно-доплеровского алгоритма в радиолокаторах с синтезированной апертурой // Радиофизика и электроника. – 2013. – Т. 4, № 2. – С. 45-50.
11. Федосов В.П., Калиновский П.Ю. Алгоритм селекции наземных движущихся целей // Радиотехника. – 2006. - № 2. - С. 86-89.
12. Федосов В.П., Цокур К.Э. Угломерно-доплеровский алгоритм селекции медленно движущихся объектов в РЛС // Известия ТРТУ. - 1997. - № 1 (4). - С. 41-44.
13. Сурков М.Н., Федосов В.П. СДЦ в РЛС с синтезированной апертурой // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1989. - Т. 32, № 4. - С. 54-58.
14. Сурков М.Н., Федосов В.П. Цифровой алгоритм СДЦ в РЛС с синтезированной апертурой // Многопроцессорные вычислительные структуры: Междувед. Сб. ТРТИ. Вып. 11. - Таганрог, 1989. - С. 65-68.
15. Meng D. et al. Topography-and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR: A back projection approach // Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International. – IEEE, 2014. – P. 448-450.
16. Sparr T. Moving target motion estimation and focusing in SAR images // Radar Conference, 2005 IEEE International. – IEEE, 2005. – С. 290-294.
17. Yang J., Zhang Y., Kang X. A Doppler Ambiguity Tolerated Algorithm for Airborne SAR Ground Moving Target Imaging and Motion Parameters Estimation // Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE. – 2015. – Vol. 12, No. 12. – P. 2398-2402.
18. Zhou F. et al. Approach for single channel SAR ground moving target imaging and motion parameter estimation // Radar, Sonar & Navigation, IET. – 2007. – Vol. 1, No. 1. – P. 59-66.
19. Yang J., Zhang Y. An airborne SAR moving target imaging and motion parameters estimation algorithm with azimuth-dechirping and the second-order keystone transform applied // Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of. – 2015. – Vol. 8, No. 8. – P. 3967-3976.
20. Henri M. Processing of Synthetic Aperture Radar Images, Wiley – 2008. - 390 p.
21. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учебное пособие для вузов / под ред. Г.С. Кондратенкова. - М.: Радиотехника, 2005. - 368 с.
22. Школьный Л.А. и др. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрование радиолокационных изображений / под ред. Л.А. Школьного. - М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.

REFERENCES

1. Axelsson S.R.J. Analysis of random step frequency radar and comparison with experiments, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Apr. 2007, Vol. 45, No. 4, pp. 890-904.
2. Xu X. and Narayanan R. FOPEN SAR imaging using UWB step-frequency and random noise waveforms, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Oct. 2001, Vol. 37, No. 4, pp. 1287-1300.
3. Garmatyuk D. and Narayanan R. Ultra-wideband continuous-wave random noise arc-SAR, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Dec. 2002, Vol. 40, No. 12, pp. 2543-2552,
4. G.-S. Liu, H. Gu, W.-M. Su, H.-B. Sun, and J.-H. Zhang. Random signal radar - A winner in both the military and civilian operating environments, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Apr. 2003, Vol. 39, No. 2, pp. 489-498.
5. Dang Hongxing. Stepped frequency chirp signal SAR imaging, Synthetic Aperture Radar, 2007. APSAR 2007, 1st Asian and Pacific Conference on, 2007, pp. 14-18.

6. Kudrya A.I., Tolstov E.F., Chetverik V.N. Rasshirenije vozmozhnostey ispol'zovaniya M-posledovatel'nosti v RSA [The possibilities of using M-sequences, RAMI], *II Vserossiyskie Armandovskie chteniya «Murom2012»: Materialy konferentsii* [II all-Russian Romantowska read Myrom2012": Materials of the conference], 2012, pp. 518-531.
7. Savost'yanov V.Yu. Issledovanie funktsii neopredelennosti chastotno-manipulirovannogo signala s vnutriimpul'snoy LChM [The study of ambiguity function of a frequency-manipulated signal with chirp vnutripolostnoe], *Voprosy radioelektroniki* [Questions of radio-electronics], 2012, Vol. 2, No. 2, pp. 66-83.
8. Fedosov V.P. Prostranstvenno-vremennye metody izmereniya i kontrolya parametrov dvizheniya mass na granitsakh razdela sred [Space-time measurement and control of parameters of motion of the masses at the boundaries of the media], *Primenenie sredstv lokatsii dlya kontrolya parametrov vodnoy ekosredy* [the Application of location to control the parameters of water akorede]. Taganrog: TRTI, 1991, pp. 42-74.
9. Fedosov V.P., Surkov M.N., Chuykov V.M. Effektivnost' algoritmov selektsii ekologicheskikh ob"ektov na poverkhnosti razdela sred [Efficiency of algorithms of selection of environment objects on the surface of the partition environments], *Izvestiya SKNTs VSh* [University News North-Caucasian Region], 1993, No. 4, pp. 23-32.
10. Gorovoy E.N., Bezvesil'nyy A.A., Vavriv D.M. Korrektsiya radiometricheskikh oshibok na izobrazheniyakh pri ispol'zovanii dal'nostno-doplerovskogo algoritma v radiolokatorakh s sintezirovannoy aperturoy [Correction of radiometric errors in the images when using daleste-Doppler algorithm in synthetic aperture radar], *Radiofizika i elektronika* [Telecommunications and Radio Engineering], 2013, Vol. 4, No. 2, pp. 45-50.
11. Fedosov V.P., Kalinovskiy P.Yu. Algoritm selektsii nazemnykh dvizhushchikhsya tseley [The algorithm of selection of ground moving targets], *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2006, No. 2, pp. 86-89.
12. Fedosov V.P., Tsukur K.E. Uglomerno-doplerovskiy algoritm selektsii medlenno dvizhushchikhsya ob"ektov v RLS [Azimuth-Doppler selection algorithm slow-moving objects in radar], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 1997, No. 1 (4), pp. 41-44.
13. Surkov M.N., Fedosov V.P. SDTs v RLS s sintezirovannoy aperturoy [In MTI, synthetic aperture radar], *Izvestiya vuzov. Ser. Radioelektronika* [Radioelectronics and Communications Systems], 1989, Vol. 32, No. 4, pp. 54-58.
14. Surkov M.N., Fedosov V.P. Tsifrovoy algoritm SDTs v RLS s sintezirovannoy aperturoy [Digital algorithm in the MTI, synthetic aperture radar], *Mnogoprotsessornyye vychislitel'nye struktury: Mezhdoved. Sb. TRTI* [Multiprocessor computer structures: Interdepartmental collection, TRTI]. Issue 11. Taganrog, 1989, pp. 65-68.
15. Meng D. et al. Topography-and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR: A back projection approach, *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International*. IEEE, 2014, pp. 448-450.
16. Sparr T. Moving target motion estimation and focusing in SAR image, *Radar Conference, 2005 IEEE International*. IEEE, 2005, pp. 290-294.
17. Yang J., Zhang Y., Kang X. A Doppler Ambiguity Tolerated Algorithm for Airborne SAR Ground Moving Target Imaging and Motion Parameters Estimation, *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2015, Vol. 12, No. 12, pp. 2398-2402.
18. Zhou F. et al. Approach for single channel SAR ground moving target imaging and motion parameter estimation, *Radar, Sonar & Navigation, IET*, 2007, Vol. 1, No. 1, pp. 59-66.
19. Yang J., Zhang Y. An airborne SAR moving target imaging and motion parameters estimation algorithm with azimuth-dechirping and the second-order keystone transform applied, *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, 2015, Vol. 8, No. 8, pp. 3967-3976.
20. Henri M. Processing of Synthetic Aperture Radar Images, Willey – 2008, 390 p.
21. Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: uchebnoe posobie dlya vuzov [Radar systems remote sensing of the Earth: textbook for high schools], ed. by G.S. Kondratenkova. Moscow: Radiotekhnika, 2005, 368 p.
22. Shkol'nyy L.A. i dr. Radiolokatsionnye sistemy vozduшной razvedki, deshifrovaniye radiolokatsionnykh izobrazheniy [The radar system of aerial reconnaissance, decryption, radar images], ed. by L.A. Shkol'nogo. Moscow: Izd-vo VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 2008.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Марчук.

Федосов Валентин Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: vpfed@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371632; 89525601246; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Ковтун Данил Георгиевич – e-mail: dan-kav@ya.ru; тел.: 88634371632; 89613023811; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Fedosov Valentin Petrovich – South Federal University; e-mail: vpfed@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia phones: +78634371632; +79525601246; the department of fundamentals of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor.

Kovtun Danil Georgievich – e-mail: dan-kav@ya.ru; phones: +78634371632; +79613023811; the department of fundamentals of radio engineering; postgraduate student.