

DOI 10.24412/2221-2574-2024-4-78-84

УДК 621.396.96

ФОРМИРОВАНИЕ РЛИ ТОЧЕЧНОГО ОБЪЕКТА С УЧЁТОМ ПОМЕХ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ПО ДАЛЬНОСТИ В СИСТЕМАХ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Жиганов Сергей Николаевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: s_zh_72@mail.ru

Смирнов Михаил Станиславович

старший преподаватель кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: smirnov.murom@gmail.com

Тараскин Дмитрий Александрович

студент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская область, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Аннотация: В импульсных радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны (РСА) в качестве зондирующих в основном находят применение сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Однако для получения радиолокационного изображения (РЛИ) могут быть использованы и другие широкополосные сигналы с частотной модуляцией. В работе приводится сравнение сформированных при помощи сигналов с частотной модуляцией РЛИ точечного объекта, а также даётся оценка влияния помех неоднозначности по дальности в РСА космического базирования. При наличии и отсутствии помехи неоднозначности получены РЛИ точечного объекта и помехи, сформированные при помощи ЛЧМ сигналов, ЛЧМ сигналов с поимпульсной сменой знака изменения частоты, сигналов с гиперболическим и V-образным законами изменения частоты. Проведено сравнение полученных РЛИ.

Ключевые слова: космический мониторинг, радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), неоднозначность по дальности, частотно-модулированные сигналы, моделирование.

Введение

В последние десятилетия активно развиваются системы авиационного и космического мониторинга, использующие импульсные радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА) различных частотных диапазонов [1–6]. Поскольку в РСА космического базирования ширина полосы захвата, которая определяет период следования ЗС, существенно меньше дальности до носителя РСА, появляются помехи неоднозначности по дальности, когда ЗС отражаются от объектов на земной поверхности, находящихся до и после полосы сканирования. В современных системах чаще всего в качестве зондирующих используются сигналы

с линейным законом изменения частоты (ЛЧМ) [5, 6], однако в РСА могут найти применение ЗС с другими видами частотной модуляции. Целью работы является сравнение сформированных при помощи сигналов с частотной модуляцией РЛИ точечного объекта (ТО) и анализ влияния помех неоднозначности по дальности в РСА космического базирования.

Помехи неоднозначности по дальности

Пусть зондирование земной поверхности осуществляется с помощью РСА, находящегося на борту космического аппарата (КА) и работающего в режиме бокового обзора. Зоны неодно-

значности формируются по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны (ДНА), как показано на рис. 1. Скорость движения носителя, параметры орбиты, параметры ЗС и ДНА по дальности известны. Из рис. 1 видно, что в зависимости от высоты орбиты спутника и угла визирования помеховые сигналы могут поступать из нескольких зон неоднозначности, как до основной зоны, так и после. На рис. 1 схематично показаны только одна зона неоднозначности до основной и одна после, которые обозначены номерами -1 и $+1$. В верхней правой части рис. 1 темным фоном схематично показан отражённый от основной зоны обзора сигнал, а бледные зоны соответствуют отражённым от -1 и $+1$ зон неоднозначности сигналам, которые складываются с сигналом из основной зоны.

Сигнал, отражённый от цели из зоны обзора с наклонной дальностью R_n , является основным, а сигналы, отражённые в предыдущий и последующий периоды, формируют сигналы неоднозначности. Они приходят по боковым лепесткам ДНА и имеют значения наклонной дальности

$$R'_n(\tau) = R_n + \frac{c \cdot k}{2 \cdot PRF}, \quad (1)$$

где c — скорость света; PRF — частота повторения импульсов; τ — медленное (азимутальное) время; $k = \pm 1; \pm 2; \pm 3 \dots$ — номер зоны неоднозначности.

Основной $s_{очн}(\tau, t)$ и неоднозначные из k -й зоны $s_{неодн}(\tau, t, k)$ сигналы поступают на вход приёмного устройства РСА. Суммарный сигнал может быть представлен в виде

$$s(\tau, t) = s_{очн}(\tau, t) + \sum_k s_{неодн}(\tau, t, k), \quad (2)$$

где t — быстрое время.

Из рис. 1 и выражения (2) видно, что сигнал, отражённый от цели, складывается с помеховыми сигналами. Степень воздействия помеховых сигналов зависит от отражающей способности объектов, находящихся в зонах неоднозначности, и дальности до них, при этом существенное влияние на $s_{очн}(\tau, t)$ могут

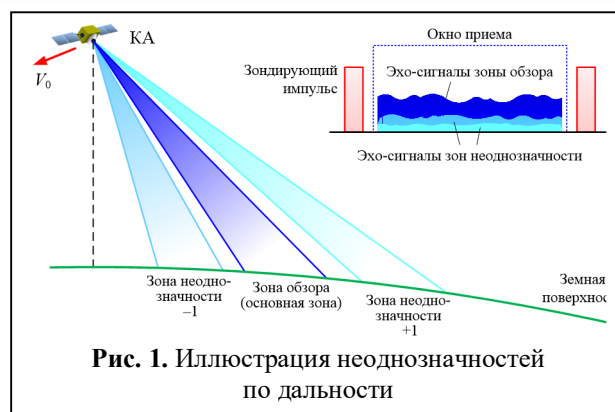


Рис. 1. Иллюстрация неоднозначностей по дальности

оказывать помехи из нескольких зон неоднозначности, особенно тех, что находятся ближе к носителю РСА [7].

РЛИ точечной цели при использовании ЛЧМ сигнала

Была создана математическая модель РСА, находящегося на борту спутника, со следующими параметрами: тип орбиты — круговая; высота орбиты — 650 км; режим обзора — маршрутный; частота зондирования — 9550 МГц; ширина ДНА в угломестной плоскости — 12° ; потери на краях полосы обзора в угломестной плоскости — 2 дБ; ширина ДНА в азимутальной плоскости — 2° ; потери на краях полосы обзора в азимутальной плоскости — 0,5 дБ; угол визирования — 38° .

В качестве исходной модели РЛИ были сформированы радиолокационные изображения от ТО, когда в качестве ЗС был использован ЛЧМ сигнал. Для формирования голограммы использован алгоритм, описанный в [8]. В работе под голограммой понимается значение отсчётов действительной составляющей отражённого сигнала. Здесь и далее на рисунках горизонтальная ось соответствует значениям азимута, а вертикальная — значениям дальности. При моделировании задавались следующими параметрами сигнала: длительность — 5 мкс; девиация частоты — 28 МГц; база сигнала — 140; число отсчётов в ЗС $N = 210$. При построении модели отражённых сигналов руководствовались методикой, изложенной в [8].

На рис. 2 приведено яркостное РЛИ ТО, полученное при использовании зондирующего

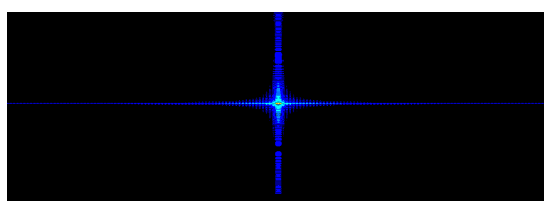


Рис. 2. РЛИ ТО, полученное при использовании ЛЧМ сигнала

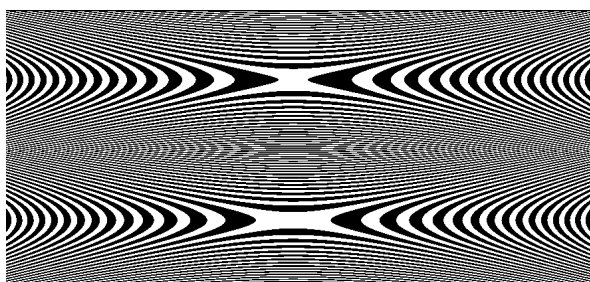


Рис. 3. Голограмма ТО при наличии помехи неоднозначности (без перекрытия сигналов)

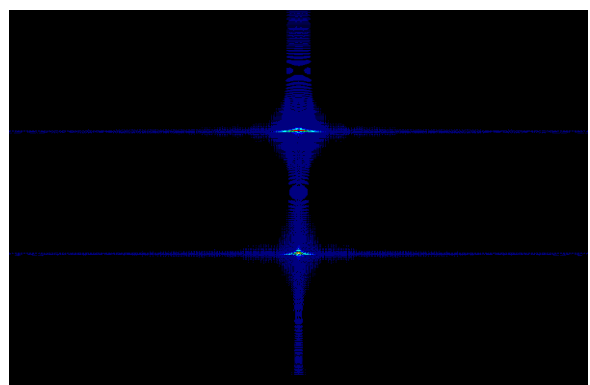


Рис. 4. РЛИ ТО при наличии помехи неоднозначности без перекрытия сигналов

ЛЧМ сигнала. Размер отклика по уровню минус 3 дБ составляет 5 пикселей по азимуту и 3 пикселя по дальности.

Помехи неоднозначности по дальности формируются яркими объектами, находящимися за пределами зоны обзора, и искажение основного сигнала помехами происходит в случае, когда составляющие помехового сигнала накладываются на соответствующие составляющие основного сигнала. Соответственно, на интервале N_n отсчетов образуется аддитивная смесь помехового сигнала и отсчетов основного сигнала, при этом N_n может принимать значения от 0 до N .

Для анализа влияния помех неоднозначности по дальности на РЛИ рассмотрим ситуацию, когда наложение сигналов отсутствует ($N_n=0$) и неоднозначная цель находится в +1 зоне. Отражающая способность неоднозначной цели была выбрана таким образом, чтобы с учетом подавления ДНА по дальности уровень квадратурных составляющих помехового сигнала был равным уровню основного сигнала. На рис. 3 приведена результирующая голограмма основного сигнала и помехового. Нижняя половина рис. 4 соответствует отклику цели, а верхняя — помехе. Из приведённого рисунка видно, что даже в случае одинакового уровня сигналов, отражённых от целей из основной области и зоны неоднозначности, голограммы отличаются друг от друга. Это связано с тем, что неоднозначная цель имеет большую наклонную дальность, поэтому диапазон изменения доплеровских частот в пределах ДНА становится больше и наблюдается расфокусировка отклика неоднозначной цели.

На рис. 4 приведено РЛИ цели и помехового ТО, голограмма которых показана на рис. 3. Размеры отклика цели остались без изменения, в то время как размер отклика помехового объекта составляет 15 пикселей по азимуту и 3 пикселя по дальности.

В следующем эксперименте дальность до помехового объекта была уменьшена таким образом, что помеховый сигнал наложился на половину длительности основного сигнала, т.е. $N_n=N/2$. На рис. 5 приведена результирующая голограмма, а на рис. 6 — соответствующее РЛИ.

Из рис. 5 видно, что при наличии сигнала неоднозначности голограмма искажается. Отклики цели и помехи на РЛИ (рис. 6) существенно отличаются от откликов, показанных на рис. 4. Главный лепесток отклика цели приобрел округлую форму и его размеры составили 5 пикселей по азимуту и 5 пикселей по дальности. Кроме того, увеличился уровень боковых лепестков в угломестной плоскости. Отклик помехового объекта также изменился из-за расфокусировки. Его уровень на РЛИ на

40 дБ меньше уровня цели. Таким образом, при наложении помехи неоднозначности по дальности на основной сигнал, результирующая РЛИ цели существенно искажается.

Одним из очевидных способов борьбы с помехами неоднозначности является использование ортогональных сигналов [9, 10]. В работе при формировании РЛИ ТО использовались ЛЧМ-импульсы с одинаковой длительностью и девиацией частоты, но с противоположными законами изменения частоты. На рис. 7 приведено РЛИ, сформированное при помощи таких ЗС для случая, когда основной и неоднозначный сигналы накладываются друг на друга на половину длительности.

Из рис. 7 видно, что на результирующем РЛИ присутствует отклик основной цели, размеры которого составляют 5 пикселей по азимуту и 4 пикселя по дальности, а также помеховые артефакты достаточно большой интенсивности. Шумовая область увеличилась по азимутальной координате по сравнению с результатом, приведённым на рис. 6. Максимальный уровень помехового сигнала составляет -25 дБ. При использовании таких ЗС удалось подавить уровень помех неоднозначности по дальности на 13 дБ. Следует отметить, что такие квазиортогональные ЛЧМ сигналы эффективно подавляют помехи неоднозначности по дальности только для нечётных зон неоднозначности.

РЛИ точечной цели при использовании ЗС с различными видами ЧМ

В радиолокационных системах наряду с линейным применяют и другие законы изменения частоты ЗС [11, 12]. Наиболее известным является V-образный закон изменения частоты:

$$\Omega(t) = \begin{cases} -\pi W - \mu_v t, & -T/2 \leq t \leq 0, \\ -\pi W + \mu_v t, & 0 \leq t \leq T/2, \end{cases} \quad (3)$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \Omega(t),$$

где μ_v — скорость нарастания (спада) частоты в импульсе; $\mu_v = 4\pi W/T$; ω_0 — центральная частота ЗС; W — девиация частоты; $B = WT$ — база сигнала.

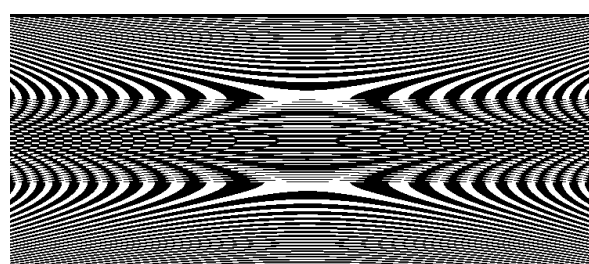


Рис. 5. Голограмма ТО при наличии помехи неоднозначности при наложении основного и помехового сигналов

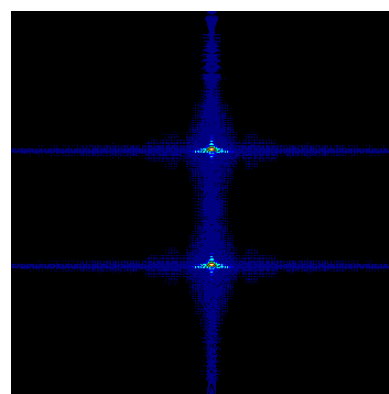


Рис. 6. РЛИ ТО при наличии помехи неоднозначности при наложении основного и помехового сигналов

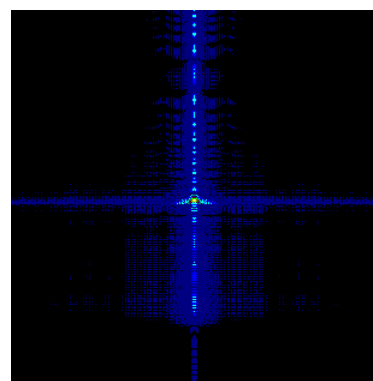


Рис. 7. РЛИ ТО при наличии помехи неоднозначности при использовании ЛЧМ сигналов с противоположными законами изменения частоты

На рис. 8 приведена голограмма ТО, полученная при помощи сигнала с законом изменения частоты (3).

Из рис. 8 видно, что при таком законе изменения частоты голограмма теряет симметрию по горизонтали. Радиолокационное изображение

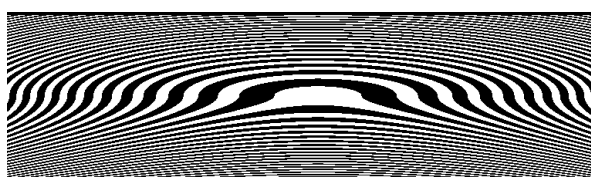


Рис. 8. Голограмма ТО, полученная при использовании сигнала с V-образным законом изменения частоты

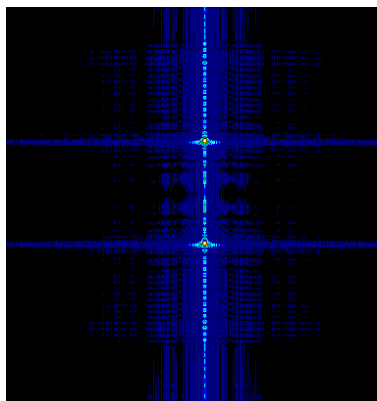


Рис. 9. РЛИ ТО в присутствии помехи неоднозначности, полученное при использовании ЗС с V-образным законом изменения частоты

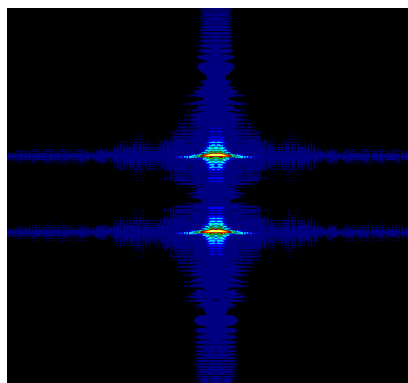


Рис. 10. РЛИ ТО в присутствии помехи неоднозначности, полученное при использовании ЗС с гиперболическим законом изменения частоты

ние, синтезированное на основе данной радиоголограммы, также существенно отличается от РЛИ ТО, полученного при помощи ЛЧМ сигнала. Размер основного лепестка отклика цели на РЛИ составляет 5 пикселей по азимуту и 5 пикселей по дальности. При этом в азимутальном сечении $\varphi=0$ в пределах длительности ЗС уровень сигнала составляет -25 дБ относительно максимума отклика.

На рис. 9 показано РЛИ ТО в присутствии помехи неоднозначности по дальности, полученное для V-образного закона изменения частоты ЗС.

Далее в качестве ЗС был рассмотрен сигнал с гиперболическим законом изменения частоты вида:

$$\Omega(t) = -\frac{2\pi W}{2} + 2\pi Wm \frac{1}{at+b}, \quad \omega(t) = \omega_0 + \Omega(t), \quad (4)$$

где m — нормировочный коэффициент; a и b — константы.

На рис. 10 приведено РЛИ ТО в присутствии помехи неоднозначности по дальности с наложением отражённых сигналов на половину длительности. Это РЛИ получено при использовании ЗС с гиперболическим законом изменения частоты. Из рисунка видно, что форма откликов основной цели и помехи практически не изменяется.

Заключение

В работе выполнен сравнительный анализ голограмм и РЛИ, формируемых в РСА X-диапазона космического базирования, при использовании ЗС с различными законами частотной модуляции в условиях воздействия помех неоднозначности по дальности. При использовании зондирующего ЛЧМ сигнала на РЛИ наблюдаются два отклика, соответствующие цели и помехе. При этом форма и размеры откликов на результирующем РЛИ существенно искажаются. Отклик помехового объекта оказался расфокусирован. Применение последовательности квазиортогональных ЛЧМ сигналов позволяет достаточно эффективно подавлять помехи из нечётных зон неоднозначности. Как показали исследования, помеховый сигнал на РЛИ был подавлен на 13 дБ, а форма отклика цели не изменилась.

Если в качестве ЗС используется сигнал с V-образным законом изменения частоты, то размеры отклика цели на РЛИ увеличиваются на несколько пикселей по дальности, что приводит к ухудшению разрешения по дальности и азимутальной координате, однако увеличи-

вается яркость артефактов, появляющихся практически по всей полоске дальности при нулевом значении азимута. Наличие помех неоднозначности по дальности усугубляет эти негативные эффекты на РЛИ при использовании таких сигналов. Если в качестве ЗС использовать сигналы с гиперболическим законом изменения частоты, то, по сравнению с предыдущим случаем, размеры ТО становятся еще больше, но отсутствуют яркие артефакты при других значениях дальности и азимута.

*Исследование выполнено при поддержке
гранта Российского научного фонда
№23-29-10114*

Литература

1. Антипов В.И., Горяинов В.Т., Кулин А.Н., Толстов Е.Ф., Титов М.П. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. Под ред. В.Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
2. Цифровая обработка сигналов в РСА. Под ред. Е.Ф. Толстова. Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2005. 232 с.
3. Школьный Л.А., Толстов Е.Ф., Титов М.П. и др. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского. Под ред. Л.А. Школьного. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
4. 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.

5. Skolnik M.I. Radar handbook, 3d ed. McGraw-Hill Companies, 2008. 1352 p.

6. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06.2016 г., Муром). Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2016. С. 16–36.

7. Xu W., Huang P., Tan W. Azimuth Phase Coding by Up and Down Chirp Modulation for Range Ambiguity Suppression // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 143780–143791. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2944871

8. Храмов К.К., Костров В.В. Моделирование радиолокационных изображений РСА космического базирования в режиме обнаружения воздушных целей // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 14-ой международной научно-технической конференции. Владимир: ВлГУ, 2021. С. 243–246.

9. Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны: учеб. пособие. СПб.: СПбГУАП, 1999. Ч. 2. 220 с.

10. Dall J., Kusk A. Azimuth Phase Coding for Range Ambiguity Suppression in SAR // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS-2004). Vol. 3. Pp. 1734–1737. DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1370667

11. Свистов В.М. Радиолокационные сигналы и их обработка. М.: Сов. радио, 1977. 448 с.

12. Levanon N., Mozeson E. Radar signals. John Wiley & Sons, Inc. 2004. 427 p.

Поступила 28 сентября 2024 г.

English

RADAR IMAGE FORMATION FOR A POINT OBJECT IN SPACE MONITORING SYSTEMS USING FREQUENCY-MODULATED PROBING SIGNALS TAKING INTO ACCOUNT RANGE AMBIGUITY INTERFERENCE

Sergey Nikolayevich Zhiganov — PhD in Engineering, Associate Professor, the Radio Engineering Department, Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”.

E-mail: s_zh_72@mail.ru

Mikhail Stanislavovich Smirnov — Senior Lecturer, the Radio Engineering Department, Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”.

E-mail: smirnov.murom@gmail.com

Dmitry Aleksandrovich Taraskin — student, the Radio Engineering Department, Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”.

Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya st., 23.

Abstract: In pulsed synthetic aperture radars (SAR), chirp signals are mainly used as probing signals. However, other broadband signals with frequency modulation can also be used to obtain a radar image (RI). The paper presents a comparison of the RI of a point object formed using signals with frequency modulation, and also provides an estimation of the effect of range ambiguity interference in space-based radar systems. In the presence and absence of ambiguity interference, the radar image of a point object and of interference, generated using chirp signals, chirp signals with a pulse-by-pulse change of the frequency change sign, signals with hyperbolic and V-shaped frequency change laws are obtained. A comparison of the obtained RI is carried out.

Keywords: space monitoring, synthetic aperture radar (SAR), range ambiguity, frequency-modulated signals, modeling.

The work was partially supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-29-10114

References

1. *Antipov V.I., Goryainov V.T., Kulin A.N., Tolstov E.F., Titov M.P.* et al. Digital synthetic aperture radars. Ed. by *V.T. Goryainov*. Moscow: Radio i svyaz, 1988. 304 p.
2. SAR digital signal processing. Ed. by *E.F. Tolstov*. Smolensk, VPVO WA Publishing house of Russian Armed Forces, 2005. 232 p.
3. *Shkolny L.A., Tolstov E.F., Titov M.P.* et al. Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images. Moscow: Publishing House of the VVIA named after Prof. N.E. Zhukovsky, 2008. 531 p.
4. *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.
5. *Skolnik M.I.* Radar handbook, 3d ed. McGraw-Hill Companies, 2008. 1352 p.
6. *Babokin M.I., Efimov A.V., Zaitsev S.E., Karpov O.A., Kostrov V.V., Neronskiy L.B., Savosin G.V., Titov M.P., Tolstov E.F., Turuk V.E., Tsvetkov O.E.* Results and lessons of flight tests of the SAR of the small spacecraft "Kondor-E". VI All-Russian Armandov Readings: Radiophysical Methods in Remote Sensing of Environments: VII All-Russian Scientific Conference (31.05–2.06.2016, Murom). Murom: IPC MI VISU, 2016. Pp. 16–36.
7. *Xu W., Huang P., Tan W.* Azimuth Phase Coding by Up and Down Chirp Modulation for Range Ambiguity Suppression. IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 143780–143791. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2944871.
8. *Khramov K.K., Kostrov V.V.* Modeling of space-based SAR radar images in the air target detection mode. Advanced technologies in information transmission media: Proceedings of the 14th international scientific and technical conference. Vladimir: VISU, 2021. Pp. 243–246.
9. *Neronskiy L.B., Mikhailov V.F., Bragin I.V.* Microwave equipment for remote sensing of the Earth's surface and atmosphere. Radars with synthetic aperture antenna: textbook. SPb.: SPbGUAP, 1999. Part 2. 220 p.
10. *Dall J., Kusk A.* Azimuth Phase Coding for Range Ambiguity Suppression in SAR. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS-2004). Vol. 3. Pp. 1734–1737. DOI:10.1109/IGARSS.2004.1370667
11. *Svistov V.M.* Radar signals and their processing. Moscow: Sov. radio, 1977. 448 p.
12. *Levanon N., Mozeson E.* Radar signals. John Wiley & Sons, Inc. 2004. 427 p.