17. *Serov M.Yu., YAkovlev A.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S.* Parametricheskiy analiz rezul'tatov rascheta ispytatel'nykh impul'sov v ekvivalentnykh konturakh GIT-A, GIT-D, GIT-VS [Parametric analysis of the results of calculating test pulses in the equivalent circuits of GIT-A, GIT-D, GIT-VS], *Sb. dokladov VUNTS VVS «VVA im. prof. N.E. Zhukovskogo i Yu.A.Gagarina», 23-25 noyabrya 2022* [Collection of reports of the Military Scientific Center of the Air Force "VVA named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", November 23-25, 2022], pp. 222-226.
18. *Baranov M.I.* Izbrannye voprosy elektrofiziki: monografiya [Selected issues of electrophysics: monograph], *In 3 Vol. 2. Book 2 Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach [Theory of electrophysical effects and problems* [Theory of electrophysical effects and problems]. Khar'kov: Tochka, 2010, 407 p.
19. *Bazelyan E.M., Gorin B.N., Levitov V.I.* Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashchity [Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashchity]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 223 p.
20. Sistema ispytaniya impul'snym napryazheniem GIN-800kV/80kDzh. TU-TSAEI-010217GIN. OOO «NPP «Elektromash» [GIN-800 kV/80 kJ impulse voltage testing system. TU-CAEI-010217GIN]. Novocherkassk, 2019.
21. *Ovchinnikova N.A., Sakhabudinov R.V., Golosiy A.S.* Sozdanie stendov modelirovaniya pryamogo i nepryamogo vozdeystviya molnievogo razryada na elementy raketno-kosmicheskoy tekhniki [Creation of stands for simulating direct and indirect impact of lightning discharge on elements of rocket and space technology], *Sb. dokladov Pyatoy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Aerokosmicheskoe priborostroenie i ekspluatatsionnye tekhnologii», 4-20 aprelya 2024* [Collection of reports of the Fifth International Scientific Conference "Aerospace Instrumentation and Operational Technologies", April 4-20, 2024]. Saint Petersburg: GUAP, 2024, pp. 111-115.
22. *Golosiy A.S., Samarkin A.L., Sakhabudinov R.V., Toritsyn I.V., Yakovlev A.A.* Patent na izobretenie №2834247. Vysokovol'tnyy stend molnievogo razryada i sposob ispytaniy na vozdeystvie molniy [Patent for invention No. 2834247. High-voltage lightning discharge stand and method for testing for lightning impact]. Priority of invention July 10, 2024.

Яковлев Александр Анатольевич – АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М.В. Фрунзе; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79052500726; к.т.н.; начальник управления.

Сахабудинов Роман Владиславович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: sahabudinov@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79211852881; к.т.н.; доцент.

Голосий Александр Сергеевич – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79213025903; к.т.н.; доцент.

Yakovlev Aleksandr Anatolievich – ARSENAL DESIGN BUREAU JSK; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79052500726; cand. of eng. sc.; head of Department.

Sakhabudinov Roman Vladislavovich – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: stapler1@yandex.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79211852881; cand. of eng. sc.; associate professor.

Golosiy Aleksandr Sergeevich – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79213025903; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.396.965.2 DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-175-184

А.Н. Бакуменко, В.Т. Лобач

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАЛОВЫСОТНОГО МЕТОДА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Статья посвящена разработке и исследованию нового метода маловысотного профилирования отражающей поверхности с использованием радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА), который позволяет получать радиолокационные изображения с высоким разрешением как по дальности, так и вдоль линии пути. В документе детально рассматриваются теоретические основы функционирования РСА систем, особенности формирования и обработки сигналов, а

также создание имитационной модели для проверки эффективности предложенного метода. В работе анализируются основные принципы работы РСА систем, включая использование зондирующих сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Эти сигналы играют критически важную роль в достижении высокой разрешающей способности, необходимой для качественного отображения мелких деталей на поверхности земли. В статье уделяется внимание учету особенностей движения носителя РСА, таких как его скорость и высота полета. Эти параметры оказывают существенное влияние на качество получаемых изображений, и их правильное управление позволяет значительно улучшить конечный результат. Авторы рассматривают влияние фазового фронта волны и эффекта Доплера на форму принимаемого траекторного сигнала. Понимание этих процессов необходимо для корректной интерпретации данных и повышения точности радиолокационных изображений. Представлена разработанная имитационная модель на языке программирования MATLAB, которая позволяет симулировать работу радиолокатора и оценивать качество получаемых изображений. Эта модель является важным инструментом для тестирования и оптимизации предложенного метода. В работе приводятся примеры результатов моделирования, которые подтверждают работоспособность и адекватность предложенной модели. Эти результаты показывают, что метод способен эффективно работать даже в сложных условиях и обеспечивать получение высококачественных радиолокационных изображений. Таким образом, статья представляет новый и перспективный метод маловысотного профилирования отражающей поверхности, который может быть использован в самых различных областях, включая научные исследования, мониторинг окружающей среды, сельское хозяйство, а также военные и гражданские приложения.

Радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА); маловысотное профилирование; зондирующий сигнал; линейная частотная модуляция (ЛЧМ); имитационная модель; MATLAB; разрешающая способность.

A.N. Bakumenko, V.T. Lobach

SIMULATION MODEL OF LOW-ALTITUDE METHOD OF PROFILING A REFLECTIVE SURFACE

The paper is devoted to the development and study of a new method for low-altitude surface profiling using a synthetic aperture radar (PCA), which allows obtaining high-resolution radar images both in range and along the track line. The paper examines in detail the theoretical foundations of PCA systems, the features of signal formation and processing, and the creation of a simulation model to test the effectiveness of the proposed method. The paper analyzes the basic principles of SAR systems, including the use of probing signals with linear frequency modulation (LFM). These signals play a critical role in achieving the high resolution required for high-quality display of small details on the earth's surface. The paper pays attention to taking into account the features of the SAR carrier's motion, such as its speed and flight altitude. These parameters have a significant impact on the quality of the obtained images, and their correct control can significantly improve the final result. The authors consider the influence of the wave phase front and the Doppler effect on the shape of the received trajectory signal. Understanding these processes is necessary for correct interpretation of data and improving the accuracy of radar images. The paper presents a developed simulation model in the MATLAB programming language, which allows simulating the operation of a radar and assessing the quality of the images obtained. This model is an important tool for testing and optimizing the proposed method. The paper provides examples of simulation results that confirm the performance and adequacy of the proposed model. These results show that the method is able to operate effectively even in difficult conditions and provide high-quality radar images. Thus, the article presents a new and promising method for low-altitude profiling of a reflective surface, which can be used in a variety of fields, including scientific research, environmental monitoring, agriculture, as well as military and civilian applications.

Synthetic aperture radar (SAR); low-altitude profiling; probing signal; linear frequency modulation (LFM); simulation model; MATLAB; resolution.

Введение. Последнее время наблюдается значительный прогресс в разработке технических принципов и аппаратуры для дистанционного исследования характеристик отражающей поверхности. Радиолокационные устройства для дистанционного зондирования земной поверхности или измерения параметров волнения морской поверхности с борта самолета имеют большие перспективы использования. Поскольку, их эффективность практически не зависит от метеорологических условий, они имеют несомненные

преимущества и позволяют проводить оперативные измерения на больших акваториях [1–5]. Аппаратура для измерения параметров морского волнения с летательных аппаратов имеет важное значение для решения ряда народнохозяйственных, научных и военных задач. Системы с радиолокационным синтезированием апертуры (РСА) позволяют получать высокую разрешающую способность при малых размерах реальной антенны, за счет сбора и совместной обработки сигналов, принятых в различных точках положения носителя. Для обеспечения высокой разрешающей способности по дальности в РСА системах используют сигналы с внутриимпульсной модуляцией. Наиболее широкое распространение получили зондирующие сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [6–13].

Постановка задачи. Решаемая задача заключается в разработке метода маловысотного профилирования отражающей поверхности с использованием радиолокатора с синтезированной апертурой, работающего в непрерывном режиме излучения простого гармонического сигнала с обеспечением высокой разрешающей способности по дальности и вдоль линии пути, а также имитационной модели для проверки предлагаемого маловысотного метода профилирования поверхности. Модель предполагает прямолинейное и равномерное движение носителя радиолокатора с синтезированной апертурой на неизменной высоте над поверхностью. Диаграмма направленности (ДНА) реальной антенной системы ориентирована строго в надир. Радар работает в режиме трассового синтезирования апертуры. Проекция траектории движения носителя на облучаемую поверхность называется линия пути (ЛП). Облучаемый участок поверхности, являющийся сечением ДНА, имеет узкую вытянутую вдоль ЛП форму. При трассовом синтезировании, вдоль ЛП располагается участок поверхности, называемый зоной радиолокационного обзора, границы зоны обзора располагаются параллельно ЛП, а сама ЛП представляется продольной осью симметрии зоны обзора [14–18]. Описанная сцена проиллюстрирована на рис. 1

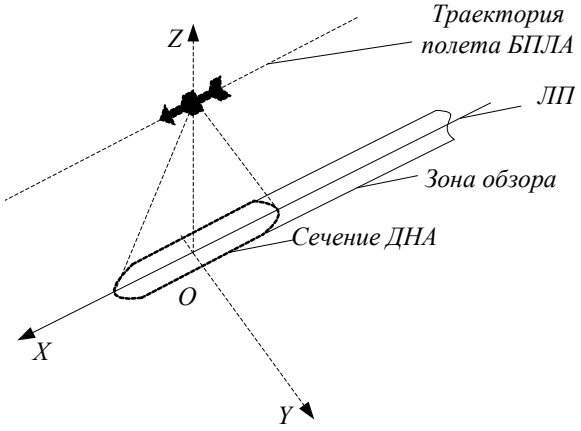

Рис. 1. Трассовое синтезирование апертуры

Максимальная длинна участка пути БПЛА на котором принимается сигнал, отраженный одиночной целью L_m, ограничивается лишь шириной ДНА. Сигнал, принимаемый по мере движения носителя на вход радиоприемника без учета влияния диаграммы направленности, имеет вид

$$u_0(t) = U_i \cos[\omega_0(t - \tau_i) + \varphi_0 + \varphi_i],$$

где U_i – максимальное значение отраженного точечной целью сигнала; φ_i – изменение фазы сигнала при отражении; τ_i – задержка радиосигнала.

Задержка радиосигнала зависит от расстояния $r_i(t)$ между БЛПА и целью, которое изменяется в процессе движения носители как показано на рис. 2.

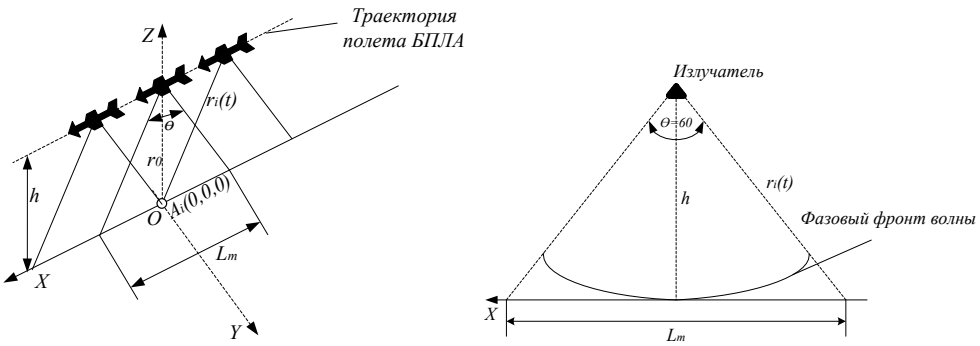

Рис. 2. Геометрия модели

Данное расстояние обуславливает закон изменения фазы отраженного точечной целью сигнала, с учетом которого, сигнал, отраженный точечной целью, имеет вид

$$u_0(t) = U_i \cos[\omega_0 t - \psi_r(t) + \varphi_0 + \varphi_i],$$

где $\psi_r(t)$ – закон изменения фазы отраженного точечной целью сигнала.

Применяя принцип суперпозиции и суммируя сигналы для всех значений $r_i(t)$, получаем суммарный отклик от одиночной цели [19–21]. Пользуясь тем, что высота полета БПЛА мала, и фазовый фронт падающей волны имеет сферическую форму, как показано на рис., обработка принятого сигнала производится путем применения набора согласованных фильтров, для каждого значения $r_i(t)$.

Имитационная модель маловысотного метода профилирования поверхности. Имитационная модель разработана на языке программирования MATLAB. Структура разработанной имитационной модели показана на рис. 3.

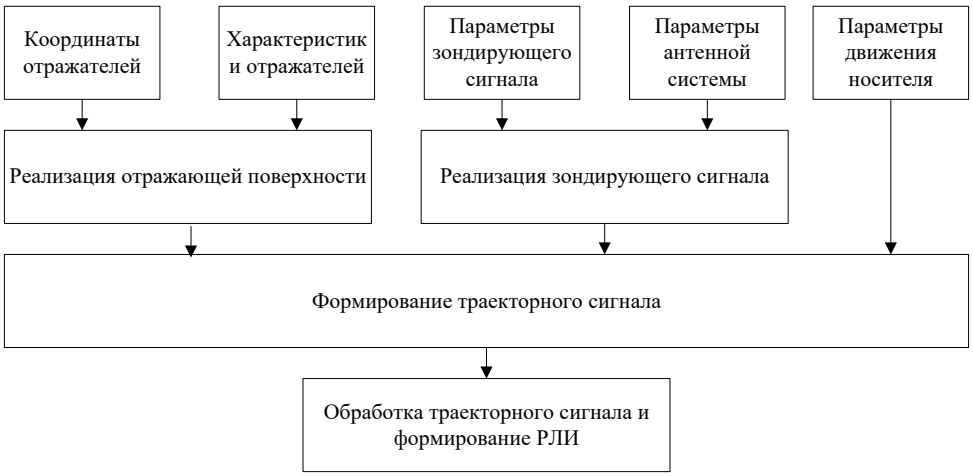

Рис. 3. Структура модели

В качестве установочных параметров можно задавать, высоту, скорость полета, и начальные координаты носителя, характер распределения точечных отражателей, их координаты и величину эффективной площади рассеивания (ЭПР). Ширину ДНА, частоту зондирующего сигнала, интервал измерения, шаг по пространству.

Исходя из заданных координат точечных отражателей, ширины ДНА, начальных координат носителя и высоты и скорости его полета, происходит расчет длинны освещаемого участка, длинны траектории полета носителя.

После чего происходит моделирование полученного траекторного сигнала по средствам вычисления текущих координат носителя, текущей дальности до отражающей точки и фазы принятого сигнала. В результате формируется отсчет принятого траекторного сигнала.

После получения траекторного сигнала начинается процесс обработки и формирования РЛИ. Обработка производится путем свертки полученного траекторного сигнала с набором опорных функций для каждой дальности. Результаты обработки представляются в графическом виде и сохраняются численном формате для дальнейшего воспроизведения и исследования.

Условно имитационную модель можно разбить на пять блоков:

1. Блок задания координат целей и их ЭПР.
2. Блок задания и расчета параметров сигнала.
3. Блок задания и расчета параметров модели.
4. Блок моделирования траекторного сигнала.
5. Блок обработки сигнала.

Произведено моделирование траекторного сигнала для одиночной точечной цели. Моделировались отражённые сигналы для различных частот зондирующего сигнала, и параметров антенной системы. На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования для частоты зондирующего сигнала $f = 1.2 * 10^9$ Гц, ширины ДНА $\theta = 120°$,высоты полета $h = 2$ м и путевой скорости $W = 10\ ^м/_с$.

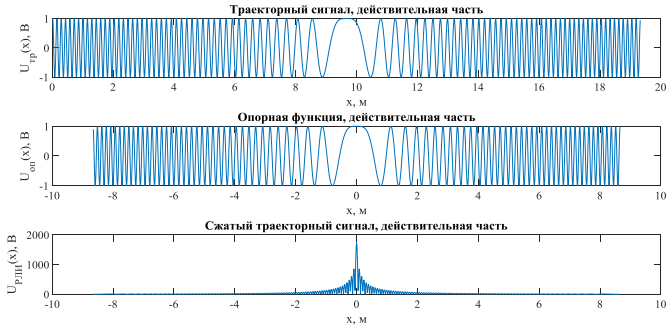

Рис. 4. Результаты моделирования сигнала, отраженного одиночной целью

Полученные графики траекторного сигнала, опорной функции и сжатого траекторного сигнала подтверждают работоспособность и адекватность разработанной модели. На рис.Рис. 6 показано РЛИ одиночной цели, расположенной на линии пути носителя на поверхности. Также было проведено моделирование со следующими параметрами модели частота зондирующего сигнала $f = 30 * 10^9$ Гц, ширины ДНА $\theta = 60°$,высоты полета $h = 2$ м и путевой скорости $W = 10\ ^м/_с$. РЛИ, полученное в результате моделирования представлено на рис. 6.

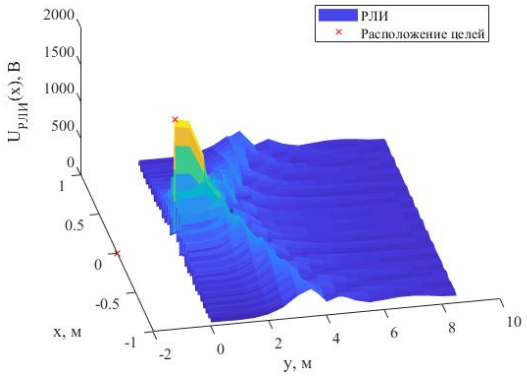

Рис. 5. РЛИ одиночной цели расположенной на ЛП на поверхности

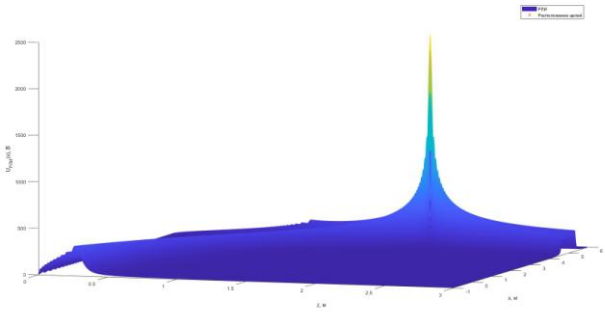

Рис. 6. РЛИ одиночной цели

При увеличении количества одиночных целей, расположенных на различных высотах, были получены радиолокационные изображения, представленные на рис. 7

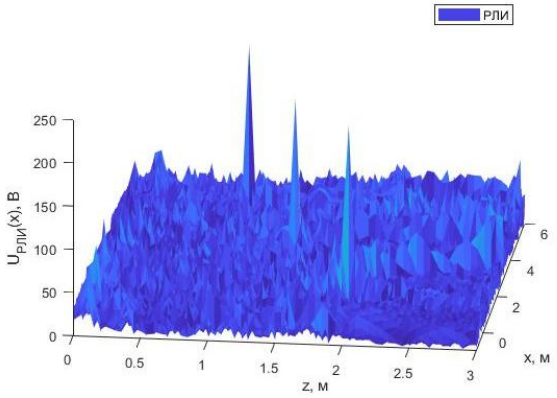

Рис. 7. РЛИ для трех одиночных целей на разных дальностях

Данное изображение получено при заданной скорости полета 10 м/с, и рабочей частоте 30 ГГц. Интервал измерения устанавливался равным 10^{-3}с.

При уменьшении интервала измерения происходит сглаживание полученного изображения, со значительным увеличением откликов целей и снижением уровня боковых составляющих. Что подтверждает адекватность модели. Результат представлен на рис. 8.

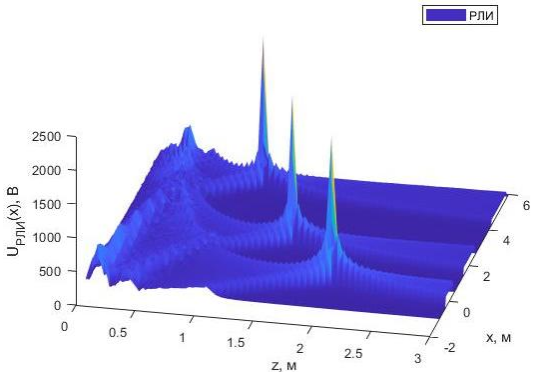

Рис. 8. РЛИ для трех целей интервал измерения 10^{-4}с.

При определении разрешающей способности по линии пути и по дальности было получено РЛИ для одиночной цели, представленное на рис. 9.

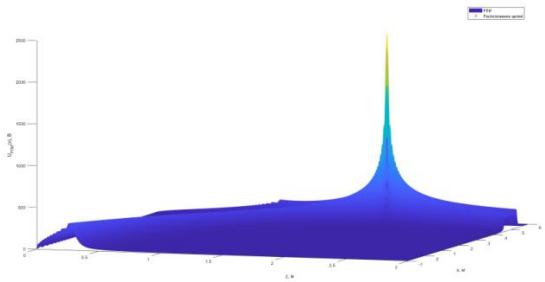

Рис. 9. РЛИ одиночной цели с шагом моделирования по дальности и линии пути 1мм

Цель была расположена на 2 метрах по дальности и на 5 метрах по линии пути, соответствующие сечения РЛИ представлены на рис. 10 и 11. Из анализа полученных графиков видно, что уровень главного максимума превышает уровни боковых максимумов минимум в 3 раза, что соответствует 9.5 дБ.

$$\text{дБ} = 20\log\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = 20\log(3) = 9{,}54$$

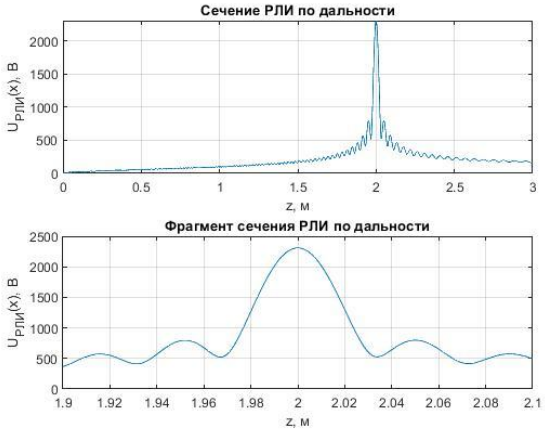

Рис. 10. Сечение РЛИ одиночной цели по дальности

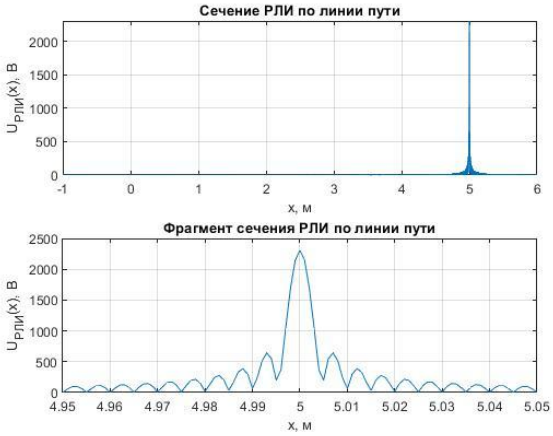

Рис. 11. Сечение РЛИ одиночной цели по линии пути

Исходя из ширины главного максимума по уровню 0.5, разрешение по дальности составляет

$$\delta_z = 0.04 \text{ м},$$

а разрешение по линии пути составляет

$$\delta_x \approx 0.006 \text{ м}.$$

Заключение. Предлагаемый метод маловысотного профилирования отражающей поверхности позволяет получать радиолокационное изображение отражающей поверхности с высоким разрешением по дальности и по линии пути при использовании зондирующего сигнала в виде простого гармонического колебания. Полученные результаты обеспечиваются при работе радиолокатора на малой высоте, в результате чего фазовый фронт волны имеет сферическую форму, а вследствие движения носителя и возникающего эффекта Доплера принимаемый траекторный сигнал имеет форму ЛЧМ сигнала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Антипов В.Н. и др.* Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. – Радио и связь, 1988.
2. *Лобач В.Т.* Статистические характеристики радиолокационных сигналов, отраженных от морской поверхности. – М.: Радио и связь, 2006. – 250 с.
3. *Лобач В.Т.* Влияние изменчивости локального коэффициента отражения на статистические характеристики отраженного электромагнитного поля в условиях ограниченного пространственного разнесения точек излучения и приема // Антенны. – 2003. – № 6.
4. *Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника. 2010. – 675 с.
5. *Кобернiченко В.Г.* Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие. – 2016.
6. *Gorham L.R.A., Moore L.J.* SAR image formation toolbox for MATLAB // Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVII. – SPIE, 2010. – Vol. 7699. – P. 46-58.
7. *Bakumenko A. et al.* Connected component labeling algorithm in streaming image processing with FPGAs // SPIE Future Sensing Technologies 2021. – SPIE, 2021. – Vol. 11914. – P. 328-340.
8. *Bakumenko A. et al.* Crop seed classification based on a real-time convolutional neural network // SPIE Future Sensing Technologies. – SPIE, 2020. – Vol. 11525. – P. 654-667.
9. *Ковалев А.В., Бакуменко А.Н*. Алгоритм маркировки связанных областей при потоковой обработке изображения // Инженерный вестник Дона. – 2022. – №. 4 (88). – С. 191-201.
10. *Бахчевников В.В., Деркачев В.А., Бакуменко А.Н.* Способ использования средств быстрого прототипирования для реализации сверточной нейронной сети на ПЛИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – №. 3 (213). – С. 146-156.
11. *Деркачев В.А., Бахчевников В.В., Бакуменко А.Н*. Классификатор изображений семян сельскохозяйственных культур с использованием сверточной нейронной сети // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – №. 4 (214). – С. 32-39.
12. *Бахчевников В.В., Деркачев В.А., Бакуменко А.Н*. Метод разработки искусственных нейронных сетей для прототипирования на ПЛИС с помощью средств Xilinx System Generator и Matlab // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении" КомТех-2020". – 2020. – С. 462-468.
13. *Cox C., Munk W.* Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // Josa. – 1954. – Vol. 44, No. 11. – P. 838-850.
14. *Hughes B.A., Grant H.L., Chappell R.W*. A fast response surface-wave slope meter and measured wind-wave moments // Deep Sea Research. – 1977. – Vol. 24, No. 12. – P. 1211-1223.
15. *Haimbach S., Wu J.* Field trials of an optical scanner for studying sea-surface fine structures // IEEE journal of oceanic engineering. – 1985. – Vol. 10, No. 4. – P. 451-453.
16. *Hwang P.A., Shemdin O.H.* The dependence of sea surface slope on atmospheric stability and swell conditions // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1988. – Vol. 93, No. C11. – P. 13903-13912.
17. *Христофоров Г.Н. и др.* Лазерная локация топографических неоднородностей на шероховатой морской поверхности // Морской гидрофизический журнал. – 1993. – № 6. – С. 64-73.
18. *Gatebe C.K. et al.* Airborne spectral measurements of ocean directional reflectance // Journal of the atmospheric sciences. – 2005. – Vol. 62, No. 4. – P. 1072-1092.
19. *Bréon FM., Henriot N.* Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2006. – Vol. 111. – No. C6.

20. *Мысленков С.А., Михайлов В.А.* Измерение параметров волн в голубой бухте (Геленджик) при помощи видеокамеры и рейки // Комплексные исследования Мирового океана. – 2019. – С. 372-373.
21. *Prager S., Moghaddam M.* Application of ultra-wideband synthesis in software defined radar for UAV-based landmine detection // IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2019. – P. 10115-10118.

REFERENCES

1. *Antipov V.N. i dr.* Radiolokatsionnye stantsii s tsifrovym sintezirovaniem apertury antenny [Radar stations with digital synthesis of antenna aperture]. Radio i svyaz', 1988.
2. *Lobach V.T.* Statisticheskie kharakteristiki radiolokatsionnykh signalov, otrazhennykh ot morskoy poverkhnosti [Statistical characteristics of radar signals reflected from the sea surface]. Moscow: Radio i svyaz', 2006, 250 p.
3. *Lobach V.T.* Vliyanie izmenchivosti lokal'nogo koeffitsienta otrazheniya na statisticheskie kharakteristiki otrazhennogo elektromagnitnogo polya v usloviyakh ogranichennogo prostranstvennogo razneseniya tochek izlucheniya i priema [Influence of variability of local reflection coefficient on statistical characteristics of reflected electromagnetic field under conditions of limited spatial separation of emission and reception points], *Antenny* [Antennas], 2003, No. 6.
4. *Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E.* Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya [Space-based radar systems for land survey]. Moscow: Radiotekhnika. 2010, 675 p.
5. *Kobernichenko V.G.* Radioelektronnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: ucheb. posobie [Radioelectronic systems of remote sensing of the Earth: a tutorial], 2016.
6. *Gorham L.R.A., Moore L.J.* SAR image formation toolbox for MATLAB, *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVII*. SPIE, 2010, Vol. 7699, pp. 46-58.
7. *Bakumenko A. et al.* Connected component labeling algorithm in streaming image processing with FPGAs, *SPIE Future Sensing Technologies 2021*. SPIE, 2021, Vol. 11914, pp. 328-340.
8. *Bakumenko A. et al.* Crop seed classification based on a real-time convolutional neural network, *SPIE Future Sensing Technologies*. SPIE, 2020, Vol. 11525, pp. 654-667.
9. *Kovalev A.V., Bakumenko A.N.* Algoritm markirovki svyazannykh oblastey pri potokovoy obrabotke izobrazheniya [Algorithm for marking connected areas in streaming image processing], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2022, No. 4 (88), pp. 191-201.
10. *Bakhchevnikov V.V., Derkachev V.A., Bakumenko A.N.* Sposob ispol'zovaniya sredstv bystrogo prototipirovaniya dlya realizatsii svertochnoy neyronnoy seti na PLIS [Method of using rapid prototyping tools for implementing a convolutional neural network on FPGA], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 3 (213), pp. 146-156.
11. *Derkachev V.A., Bakhchevnikov V.V., Bakumenko A.N.* Klassifikator izobrazheniy semyan sel'skokhozyaystvennykh kul'tur s ispol'zovaniem svertochnoy neyronnoy seti [Classifier of images of agricultural seeds using a convolutional neural network], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 4 (214), pp. 32-39.
12. *Bakhchevnikov V.V., Derkachev V.A., Bakumenko A.N.* Metod razrabotki iskusstvennykh neyronnykh setey dlya prototipirovaniya na PLIS s pomoshch'yu sredstv Xilinx System Generator i Matlab [Method for developing artificial neural networks for prototyping on FPGA using Xilinx System Generator and Matlab], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii" KomTekh-2020"* [Computer and information technologies in science, engineering and management "KomTech-2020"], 2020, pp. 462-468.
13. *Cox C., Munk W.* Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter, *Josa,* 1954, Vol. 44, No. 11, pp. 838-850.
14. *Hughes B.A., Grant H.L., Chappell R.W.* A fast response surface-wave slope meter and measured wind-wave moments, *Deep Sea Research,* 1977, Vol. 24, No. 12, pp. 1211-1223.
15. *Haimbach S., Wu J.* Field trials of an optical scanner for studying sea-surface fine structures, *IEEE journal of oceanic engineering,* 1985, Vol. 10, No. 4, pp. 451-453.
16. *Hwang P.A., Shemdin O.H.* The dependence of sea surface slope on atmospheric stability and swell conditions, *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 1988. – Vol. 93, No. C11, pp. 13903-13912.
17. *Khristoforov G.N. i dr.* Lazernaya lokatsiya topograficheskikh neodnorodnostey na sherokhovatoy morskoy poverkhnosti [Laser location of topographic inhomogeneities on a rough sea surface], *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal* [Marine Hydrophysical Journal], 1993, No. 6, pp. 64-73.
18. *Gatebe C.K. et al.* Airborne spectral measurements of ocean directional reflectance, *Journal of the atmospheric sciences,* 2005, Vol. 62, No. 4, pp. 1072-1092.

19. *Bréon FM., Henriot N.* Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions, *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 2006, Vol. 111, No. C6.
20. *Myslenkov S.A., Mikhaylov V.A.* Izmerenie parametrov voln v goluboy bukhte (Gelendzhik) pri pomoshchi videokamery i reyki [Measurement of wave parameters in blue bay (Gelendzhik) USING a video camera and a staff], *Kompleksnye issledovaniya Mirovogo okeana* [Integrated studies of the World Ocean], 2019, pp. 372-373.
21. *Prager S., Moghaddam M.* Application of ultra-wideband synthesis in software defined radar for UAV-based landmine detection, *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2019, pp. 10115-10118.

Бакуменко Алексей Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: baku@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79886031853; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем.

Лобач Владимир Тихонович – Южный федеральный университет; e-mail: vtlobach@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185233270; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

Bakumenko Alexey Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: baku@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79886031853; the Department of Radio Engineering & Telecommunication Systems; assistant professor.

Lobach Vladimir Tikhonovich – Southern Federal University; e-mail: vtlobach@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185233270; the Department of Radio Engineering & Telecommunication Systems; associate professor.