

КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ НАДИРНОГО ЭХОСИГНАЛА В ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ЗА РУБЕЖОМ

A BRIEF REVIEW OF NADIR REFLECTED SIGNAL SUPPRESSION METHODS IN ABROAD PULSED EARTH REMOTE SENSING SYSTEMS



В.П. Макаров¹,
кандидат
технических наук,
makarov@laspace.ru;
V.P. Makarov



А.С. Петров¹,
профессор, доктор
технических наук,
aspetr50@mail.ru;
A.S. Petrov



С.Ю. Самойлов¹,
кандидат технических
наук, SS2916@mail.ru;
S.Yu. Samoilov

Сделан краткий обзор методов, позволяющих повысить уровень подавления надирного эхосигнала. Проведены зависимости отношения уровня надирного эхосигнала к сигналу, принимаемому главным лепестком диаграммы направленности антенны радиолокатора с синтезированной апертурой при различном типе земной поверхности и уровне волнения моря.

Ключевые слова:
радиолокатор с синтезированной апертурой;
надирный эхосигнал;
дальномерные неоднозначности.

DOI: 10.26162/LS.2024.82.45.018

ВВЕДЕНИЕ

В системах дистанционного зондирования Земли из космоса наряду с оптическими средствами широко применяются радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА). Причём в настоящее время на орбите функционируют как миссии с аппаратами, оснащёнными большими сканирующими активными фазированными антенными решётками (АФАР) и высоким уровнем излучаемой мощности, так и созвездия, в состав которых входят малые аппараты

The article provides a brief review of methods to increase the level of nadir reflected signal suppression. The dependences of the of the nadir reflected signal level ratio to the signal received by the main antenna pattern lobe of the synthetic aperture radars at different types of the earth's surface and sea level are carried out.

Key words:
synthetic aperture radar;
nadir echo;
range ambiguities.

(Петров А.С., Демин Д.С., 2023; Петров А.С., Прилуцкий А.А., Волченков А.С., 2019). В импульсных РСА принимаемые полезные эхосигналы могут накладываться на импульсы передатчика (ПРД), что приводит к образованию слепых зон наблюдения. Кроме того, эхосигналы, принимаемые локатором при отражении импульсов от земной поверхности в области проекции платформы на земную поверхность (надирные эхосигналы – НЭС), также могут

¹ АО «НПО Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Lavochkin Association, JSC, Russia, Moscow region, Khimki.

накладываться на стробы сигналов, открывающих вход приемного устройства (ПРМ). Этот эффект возникает при выполнении следующего условия:

$$R = h + kc / (2F_n),$$

где R – наклонная дальность до центра полосы захвата; h – высота полёта платформы над земной поверхностью; k – целое число; c – скорость света в вакууме; F_n – частота повторения импульсов передатчика.

Одновременно с полезным сигналом на вход приёмника приходят не только надирные отклики, но и эхосигналы с направлений других боковых лепестков диаграммы направленности (ДН) антенны. Они формируют паразитные сигналы азимутальной и дальномерной неоднозначности. Вместе с тем, уровень надирных эхосигналов может превышать уровень сигналов, принимаемых по другим боковым лепесткам ДН антенны, поскольку расстояние от надира до платформы минимально (равно высоте её полёта) и отражение от поверхности происходит в зеркальной точке, а значит, имеет максимальное значение.

Эхосигналы, которые могут приниматься по угломестным боковым лепесткам ДН антенны, т.е. помехи угломестной неоднозначности (ПУН) удаётся избегать путём соответствующего выбора частоты повторения импульсов ПРД (Curlander J.C. et al., 1991; Melvin W.L. et al., 2013; Груздов В.В. и др., 2018; Булыгин М.Л. и др., 2015). В (Петров А.С., 2021), тем не менее было показано, что при этих значениях частоты повторения импульсов ПРД в некоторых интервалах изменения угла визирования на стробы, открывающие вход ПРМ, станут накладываться НЭС. Вариант выбора частоты F_n повторения импульсов ПРД, сделанного в соответствии с соотношениями, приведёнными в (Curlander J.C. et al.,

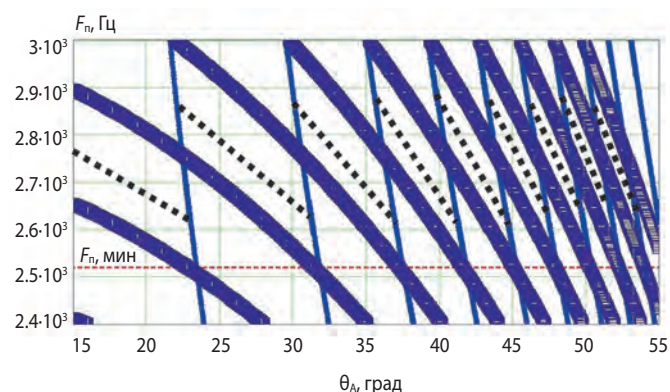


рисунок 1. Зависимость частоты повторения импульсов передатчика в маршрутном режиме работы РСА миссии Cosmo-Skymed от угла визирования, при которой не возникает наложения ПУН и надирных эхосигналов на стробы импульсов, открывающих вход приемника (точечные линии); сплошными жирными линиями зоны ПУН, а тонкими – зоны прихода надирного эхосигнала

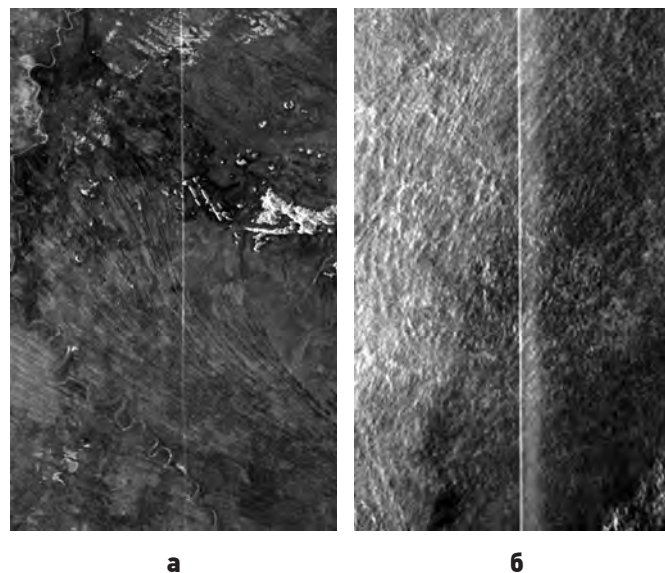


рисунок 2. Пример изображений РСА, сформированных миссией TerraSAR-X в Австралии (а) и в области Индийского океана (б); надирный эхосигнал наблюдается как яркая вертикальная полоса в центре изображения (Villano M. et al., 2022)

1991; Петров А.С., 2021), в диапазоне углов визирования от 15° до 55° проиллюстрирован на рисунке 1 точечными линиями. В качестве исходных данных приняты параметры космического РСА миссии Cosmo-Skymed, которые приведены в (Груздов В.В. и др., 2018). На этом рисунке зоны ПУН изображены сплошными жирными линиями, тонкими – области надирного эхо; пунктирная линия определяет минимально допустимое значение частоты повторения импульсов ПРД $F_{n, \min} = V_0 / \delta_x$, где V_0 – скорость движения платформы относительно земной поверхности; δ_x – азимутальное разрешение РСА.

Многoletний опыт эксплуатации зарубежных космических РСА показал, что выбор такой частоты повторения импульсов передатчика, который проиллюстрирован на рисунке 1, не обеспечивает достаточного уровня подавления надирного эхосигнала. В качестве примера на рисунке 2 приведены изображения РСА, сформированные миссией TerraSAR-X в Австралии и в области Индийского океана (Villano M. et al., 2022). В них надирный эхосигнал наблюдается как яркая вертикальная полоса в центре изображения. В литературе описаны различные методы, позволяющие в существенной мере подавить надирный эхосигнал.

Цель работы – оценка зависимости отношения уровня надирного эхосигнала к сигналу, принимаемому главным лепестком диаграммы направленности антенны РСА при различном типе земной поверхности и уровне волнения моря, а также краткий обзор методов, позволяющих повысить уровень подавления надирного эхосигнала.

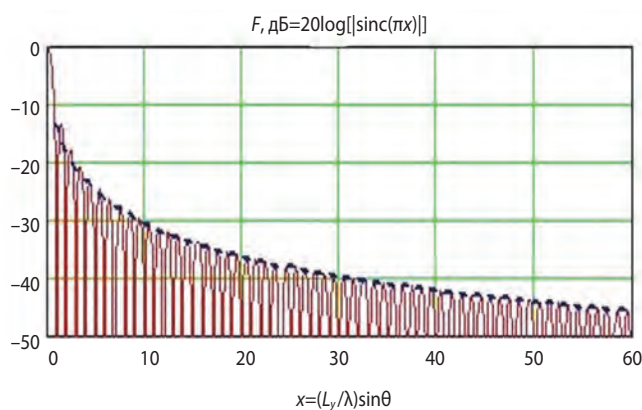
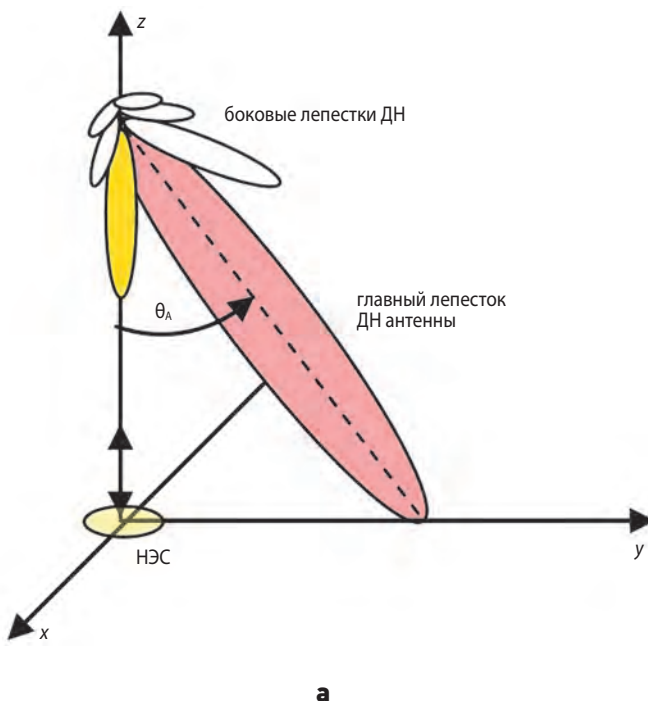
1. Уровень надирного эхосигнала

На рисунке 3а изображена диаграмма направленности антенны в угломестном сечении. Её максимум отклонён от вертикали на угол визирования θ_A , а один из боковых лепестков направлен на точку проекции платформы на земную поверхность, т.е. в надир.

Асимптотическое представление нормированной ДН антенны по уровню максимумов боковых лепестков ДН антенны, рисунок 3б, можно оценить следующим образом:

$$\Delta F, \text{ дБ} = 20 \log \{ |\text{sinc}[\pi \lceil (L_{ay}/\lambda) \sin \theta_A + 0.5 \rceil]| \}, \quad (1)$$

где L_{ay} – вертикальный размер антенны; λ – длина волны; $\lceil \cdot \rceil$ – оператор округления числа до ближайшего меньшего целого значения.



рисунк 3. Иллюстрация формирования НЭС (а); зависимость односторонней ДН антенны по мощности от нормированной угловой переменной (б)

Оценим отношение уровня сигнала, отраженного от надира (в предположении, что он попадает на максимум одного из боковых лепестков диаграммы направленности антенны), к уровню полезного сигнала. Их отношение зависит от номера бокового лепестка ДН, на который приходится отражение от надира. Если минимальный угол визирования равен 25° , а максимальный 55° , то, например, при угломестной ширине ДН антенны $\Delta\theta = \lambda/L_{ay} \rightarrow 1.2^\circ$ номера соответствующих боковых лепестков будут находиться в интервале от $n=20$ до $n=45$. Обращаясь к рисунку 3б, видим, что снижение уровня усиления антенны в соответствующих боковых лепестках ДН по сравнению с уровнем усиления в главном будет изменяться от -38 дБ до -43 дБ.

Отношение сигнала, принимаемого с направления надира, к сигналу, принимаемому с углового направления визирования центра полосы захвата, определится следующим образом:

$$\Delta L(\theta_A), \text{ дБ} = \Delta F(\theta_A) + \Delta \sigma^0(\theta_A) + \Delta L_n(\theta_A),$$

где $\Delta F(\theta_A)$ рассчитывается по формуле (1); $\Delta \sigma^0(\theta_A) = \sigma^0(0) - \sigma^0(\theta_A)$; $\Delta L_n(\theta_A) = 10 \log[R(\theta_A)/R(0)]^3$ – отношение пространственных потерь в РСА при двух значениях угла визирования (отношение расстояний под знаком логарифма возведено в третью степень, поскольку в РСА пространственные потери зависят от наклонной дальности в третьей степени); $R(\theta_A)$ – зависимость наклонной дальности от угла визирования; $\sigma^0(\theta_A)$ – зависимость удельной эффективной площади рассеяния (УЭПП) земной (морской) поверхности от угла визирования. Она определяется с помощью вычислительных процедур, таблиц данных и графиков. Зависимости наклонной дальности R и угла падения волны η_n выражаются через высоту полета платформы H и угол визирования θ_A с помощью следующих соотношений (Груздов В.В. и др., 2018):

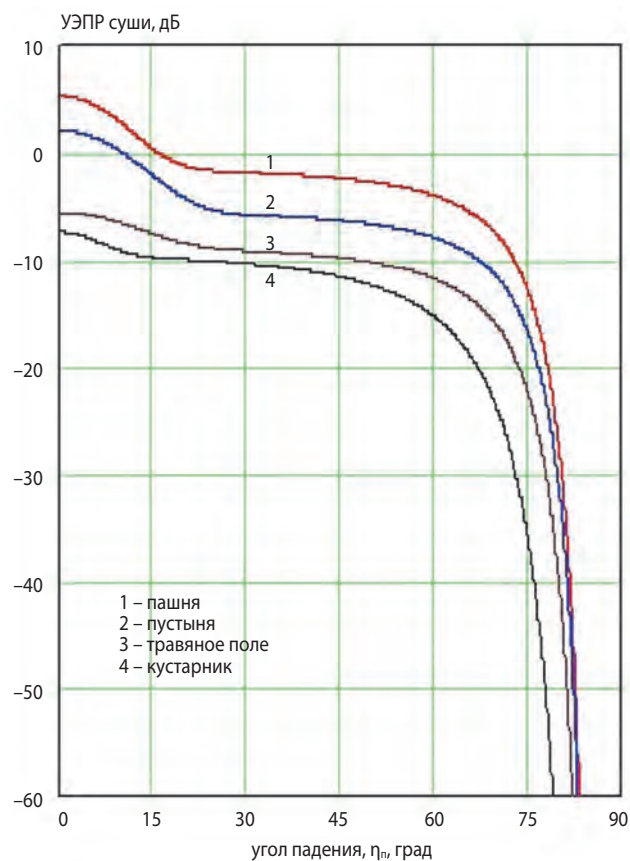
$$R = R_3 \frac{\cos(\theta_A + \gamma)}{\sin \theta_A}, \quad \eta_n = \arcsin \left[\left(1 + \frac{H}{R_3} \right) \sin \theta_A \right],$$

где R_3 – радиус Земли.

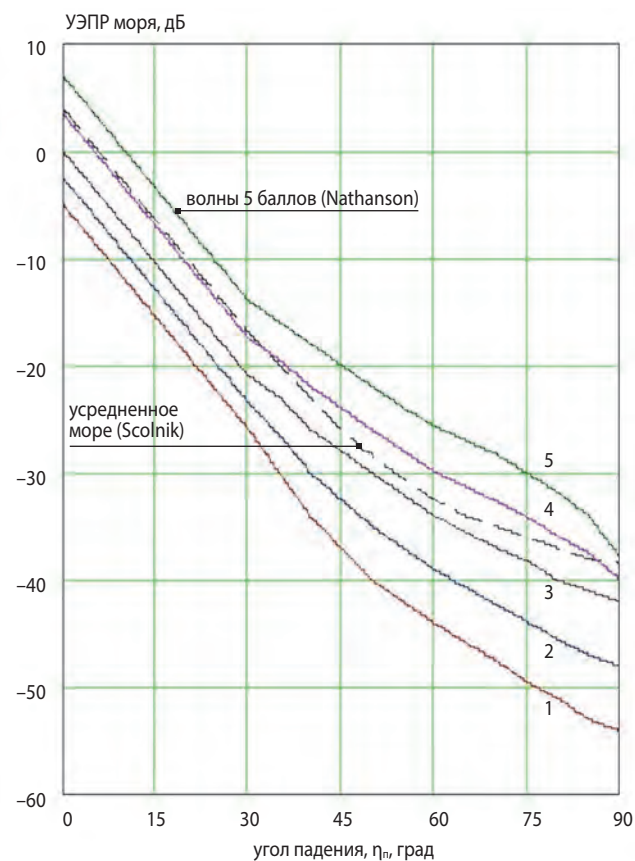
На рисунке 4 для X -диапазона приведены заимствованные из литературы (Ka M.-H. et al., 2007; Nathanson F.E. et al., 1999; Scolnik M.I., 1981) зависимости УЭПП от угла падения электромагнитной волны для земной поверхности различного типа на суше и морской поверхности при волнении моря от одного до пяти баллов. Их интерполированные значения были использованы в вычислительной процедуре.

Пример с результатами моделирования представлен на рисунке 5. Высота полёта принята равной $H=600$ км, ширина главного лепестка ДН антенны по углу места $\Delta\theta=1.2^\circ$. Цифрами обозначены кривые, описывающие УЭПП суши четырёх типов:

КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ НАДИРНОГО ЭХОСИГНАЛА В ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ЗА РУБЕЖОМ

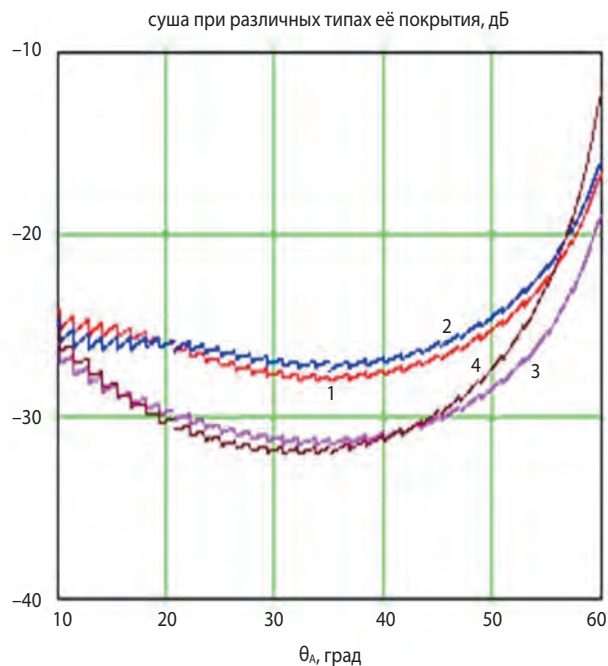


а

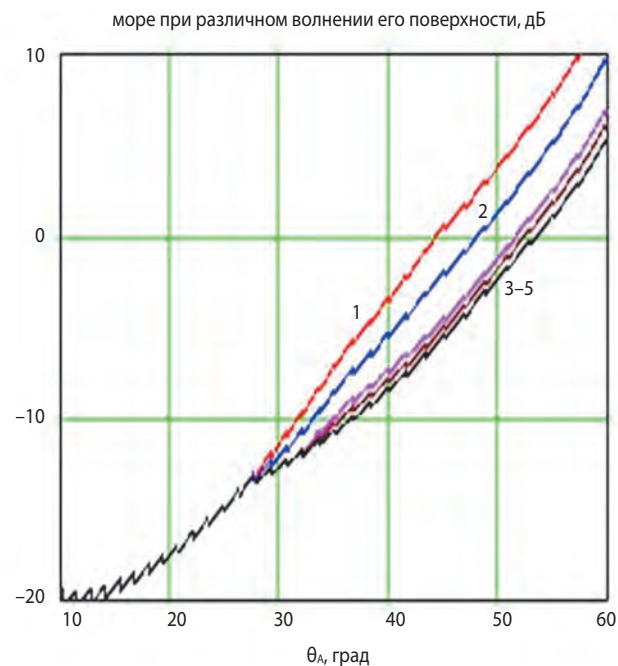


б

рисунок 4. Зависимость УЭПР земной поверхности различного типа в X -диапазоне от угла падения волны: суши (**а**); морской поверхности при волнении моря от одного до пяти баллов (**б**)



а



б

рисунок 5. Отношение сигнала, принимаемого с направления надира, к сигналу, принимаемому с углового направления визирования центра полосы захвата для суши (**а**), для моря (**б**). Ширина полосы захвата земной поверхности определяется вертикальным размером апертуры антенны и углом визирования

1 – пашня; 2 – пустыня; 3 – травяное поле; 4 – кустарник. Для моря цифрами 1–5 отмечено его волнение в баллах. Пилообразный характер поведения кривых объясняется наличием в формуле (1) функции $\lceil \cdot \rceil$, которая округляет значение числа до ближайшего меньшего целого значения.

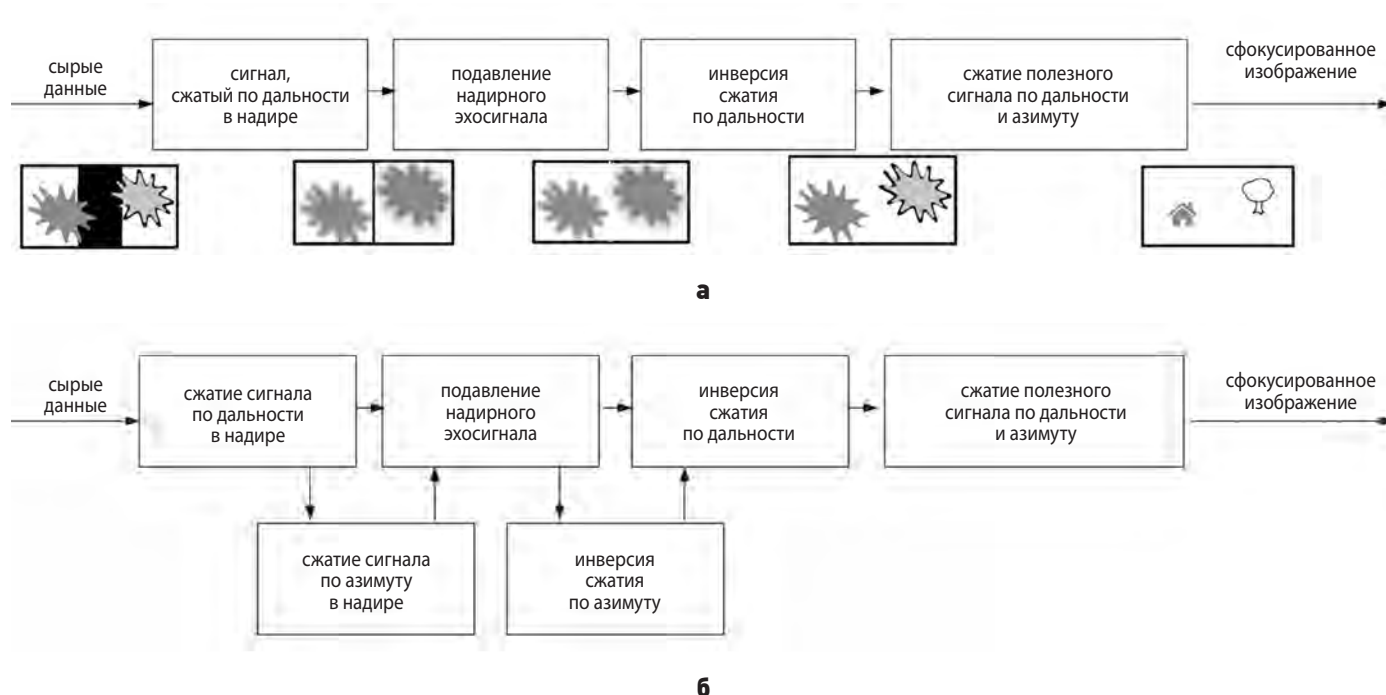
Для суши в диапазоне углов визирования $25\text{--}55^\circ$ уровень надирного сигнала оказывается ниже уровня сигнала, принимаемого главным лепестком ДН антенны, более чем на 20 дБ, а в некоторых угловых интервалах более чем на 30 дБ. Что же касается работы системы в морском режиме, то, судя по полученным результатам, необходимо подавлять надирный импульс путём формирования нулевого значения ДН антенны в направлении надира во всем диапазоне изменения углов визирования морской поверхности $25\text{--}55^\circ$.

2. Методы подавления надирного эхосигнала

В работах (Villano M. et al., 2018; Jeon S.-Y. et al., 2022; Villano M. et al., 2022; Peixoto M.N. et al., 2022; Wang Y. et al., 2021) описаны процедуры подавления надирного эхосигнала с помощью метода двойной фокусировки (МДФ) изображения, а также вариации от импульса к импульсу формы зондирующего сигнала с образованием их ортогональной последовательности. Две схемы реализации МДФ проиллюстрированы на рисунке 6 (Villano M. et al., 2018; Jeon S.-Y. et al., 2022). В первой из них постпроцессорная обработка сигнала выполняется путём его сжатия

по дальности, а во второй она реализуется при полном сжатии сигнала по дальности и азимуту. Идея метода состоит в том, что вначале производится согласованная фильтрация сигнала по дальности не для направления полезного сигнала, а для надирного направления. В результате выполнения этой процедуры надирный сигнал фокусируется, формируя яркую, узкую по наклонной дальности и длинную полосу в продольном направлении, а полезный сигнал оказывается расфокусированным. Затем эта узкая полоса удаляется из изображения (путём обнуления значений соответствующих пикселей). После этого выполняется инверсия сжатия по надирной дальности с последующей согласованной фильтрацией оставшегося полезного сигнала по его собственной (а не надирной) дальности и азимуту. В результате формируется сфокусированное полезное изображение, в котором надирный эхосигнал окажется подавленным. Вторая схема отличается от первой только тем, что подавление надирного эхосигнала происходит в сигнале, над которым предварительно выполнена процедура согласованной фильтрации в направлении надира как по дальности, так и по азимуту.

Результаты работы описанных процедур могут быть улучшены при использовании ортогональных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) несущей и периодически изменяющимся знаком крутизны изменения частоты (КИЧ). Чередование знака может выполняться как между каждыми двумя соседними импульсами, так и между группами импульсов (Villano M. et al., 2022; Демин Д.С. и др., 2023), рисунок 7.



рисунк 6. Блок-схемы постпроцессорной обработки сигнала с помощью метода двойной фокусировки путем его сжатия по дальности (а) и в области его полного сжатия по дальности и азимуту (б)

КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ НАДИРНОГО ЭХОСИГНАЛА В ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ЗА РУБЕЖОМ

Используются также ортогональные последовательности, в которых каждый элемент разделён на два интервала с изменяющейся длительностью и различным значением КИЧ, рисунок 8. Сигналы этого типа описываются с помощью следующих выражений (Villano M. et al., 2018):

$$s_i(t) = \begin{cases} \exp\left\{j\pi \frac{B}{T} \left[t - t_i - T \left(\left[\frac{t + 0.5T - t_i}{T}\right]\right)^2\right]\right\}, & -0.5T \leq t \leq 0.5T, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$t_i = \frac{i(i+1)}{2B} - T \left\lfloor \frac{i(i+1) + BT}{2BT} \right\rfloor, \quad i=0 \dots 2BT.$$

На рисунках 7 и 8 аббревиатурами ВВ и ВН обозначены ЛЧМ сигналы соответственно с возрастающей и убывающей зависимостью частоты от времени (английские сокращённые наименования up и down).

Фрагмент изображения, в котором присутствует надирный эхосигнал, и результат его постпроцессорной обработки представлены на рисунке 9. Видим, что применение описанной методики позволило обеспечить высокий уровень подавления надирного эхосигнала.

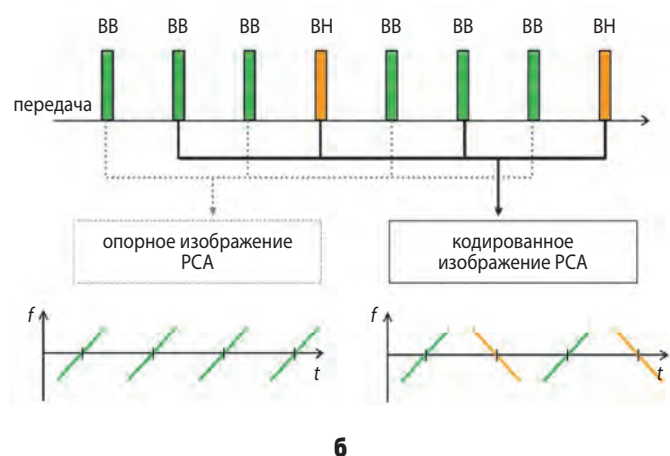
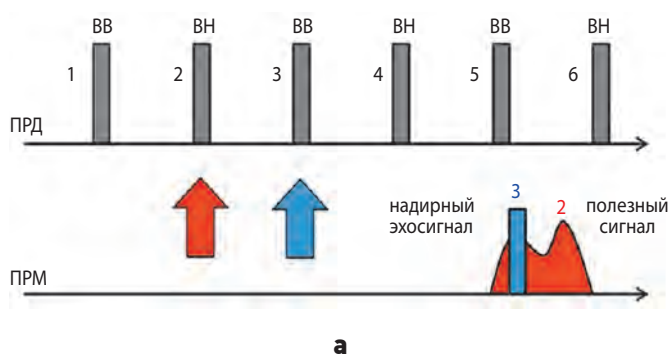


рисунок 7. Последовательности импульсов с чередующимся знаком изменения крутизны ЛЧМ между импульсами соседними (а), группами (б) (Villano M. et al., 2022)

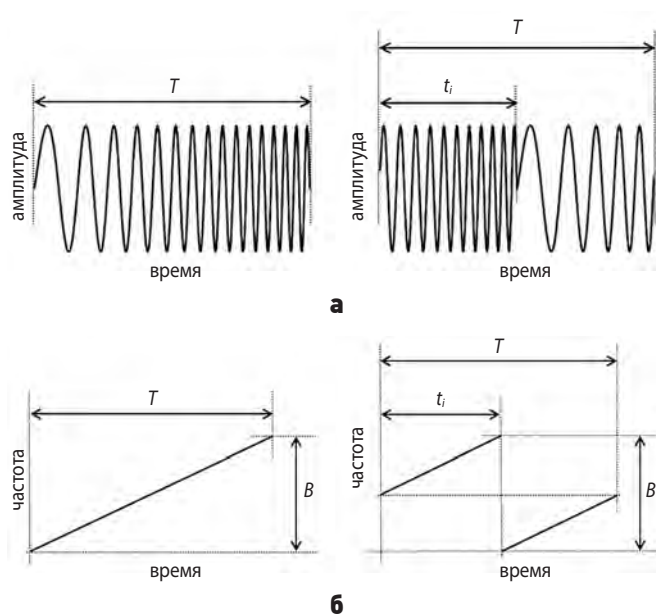


рисунок 8. Импульс с ЛЧМ и положительным КИЧ (а), элемент импульсной последовательности, разделённый по времени на две изменяющиеся по длительности части, в которых заданы различные значения КИЧ (б) (Villano M. et al., 2018)

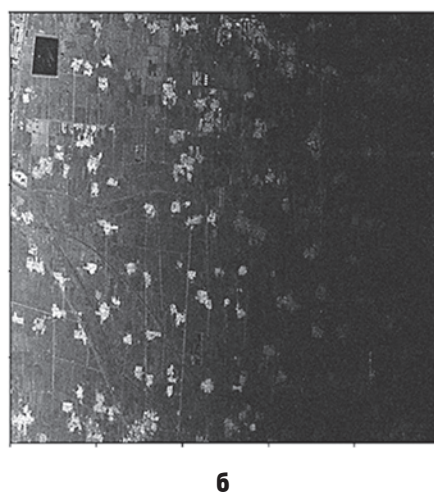
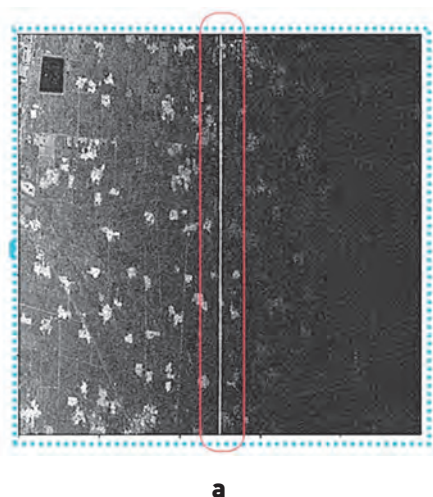


рисунок 9. Фрагмент изображения, в котором присутствует надирный эхосигнал (а) и результат его постпроцессорной обработки (б) (Петров А.С. и др., 2019)

Описанные методы подавления надирного эхосигнала применяются также и для подавления паразитных сигналов азимутальной и дальномерной неоднозначности (Петров А.С. и др., 2019).

ВЫВОДЫ

При изменении угла визирования центра полосы захвата необходимо варьировать частоту повторения импульсов передатчика. Соответствующая зависимость носит пилообразный характер. При её правильном выборе удаётся избежать наложения помех угломестной неоднозначности на стробы импульсов, открывающих вход приёмного устройства.

Полностью избежать появления в приёмном канале надирных эхосигналов во всей полосе обзора земной поверхности не удаётся. Тем не менее, для суши в диапазоне углов визирования 25–55° уровень надирного сигнала оказывается ниже уровня сигнала, принимаемого главным лепестком ДН антенны, более чем на 20 дБ, а в некоторых угловых интервалах более чем на 30 дБ. При пролёте платформы над морем надирный эхосигнал возрастает и его следует подавлять во всём диапазоне изменения углов визирования.

Надирный эхосигнал подавляется с помощью метода двойной фокусировки изображения, а также путём формирования ортогональных последовательностей излучаемых передатчиком импульсов (обрабатываемых затем в приёмном устройстве), при которых от импульса к импульсу (или в группах импульсов) варьируется функция, модулирующая несущую частоту. Другой подход состоит в формировании нулевого значения ДН антенны в направлении надирного сигнала во всём диапазоне изменения углов визирования земной суши и особенно морской поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Булыгин М.Л., Внотченко С.Л. Построение диаграмм слепых дальностей и надирных отражений радиолокатора с синтезированной апертурой в MATLAB // Труды МАИ. Выпуск № 83. 2015. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=62290&ysclid=m2srz5p9ad496023636&mobile=Y> (дата обращения: 28.10.2024).

Груздов В.В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И. Новые технологии зондирования Земли из космоса. М.: Техносфера, 2018. С. 271–283.

Демин Д.С., Макаров В.П., Самойлов С.Ю., Петров А.С. Современные зарубежные системы мини- и микроспутниковых космических миссий радиолокаторов с синтезированной апертурой // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 3. С. 72–80.

Петров А.С. Методика оценки параметров низкоорбитальных космических радиолокаторов с синте-

зированной апертурой // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т. 75, № 5. С. 46–59.

Петров А.С., Демин Д.С. Автоматизация процедуры формирования субапертурной структуры АФАР миссий низкоорбитальных космических РСА // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 2. С. 62–69.

Петров А.С., Прилуцкий А.А., Волченков А.С. Угломестная и азимутальная неоднозначности сигнала, принимаемого аппаратурой космического радиолокатора с синтезированной апертурой // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2019. № 1. С. 39–47.

Curlander J.C., McDonogh R.N. Synthetic aperture radar. Systems and signal processing. New York.: Wiley. 1991. P. 305–307.

Doerry A.W. SAR ambiguous range suppression // Technical Report September. 2006. 15 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/255280027> (дата обращения: 27.10.2024).

Jeon S.-Y., Kraus T., Steinbrecher U., Krieger G., Villano M. Experimental Demonstration of Nadir Echo Removal in SAR Using Waveform Diversity and Dual-Focus Postprocessing // IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters. 2022. Vol. 19, № 4015605. 5 p.

Ka M.-H., Kononov A.A. Effect of Look Angle on the Accuracy Performance of Fixed-Baseline Interferometric SAR // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2007. Vol. 4, № 1. P. 65–69.

Melvin W.L., Scheer J.A. Principles of Modern Radar. Vol. II: Advanced Techniques. U.K.: Scitech Publishing, 2013. P. 231–233.

Nathanson F.E., Reilly J.P. Radar Design Principles.: Medham, New Jerse.: 1999. 718 p.

Peixoto M.N., Villano M. Processing Techniques for Nadir Echo Suppression in Staggered Synthetic Aperture Radar // IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters, 2022. Vol. 19, № 4505705. 5 p.

Scolnik M.I. Introduction to radar systems. McGraw-Hill Book Co., 1981. P. 475.

Villano M., Krieger G., Moreira A. Nadir Echo Removal in Synthetic Aperture Radar via Waveform Diversity and Dual-Focus Postprocessing // IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters. 2018. Vol. 15, № 5. P. 719–723.

Villano M., Peixoto M.N. Characterization of Nadir Echoes in Multiple Elevation-Beam SAR With Constant and Variable Pulse Repetition Interval // IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing. 2022. Vol. 60, № 5215609. 9 p.

Wang Y., Ding Z., Ji W., Zeng T. Et al. Time-Varying Nadir Echo Suppression for Spaceborne Stripmap Range Sweep Synthetic Aperture Radar via Waveform Diversity // IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters. 2021. Vol. 18, № 5. P. 826–830.

Статья поступила в редакцию 14.03.2024

Статья после доработки 29.10.2024

Статья принята к публикации 30.10.2024