

УДК 621.396.96

doi: 10.53816/20753608_2025_2_78

**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ
МЕТОДОМ КРОСС-СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
В АКТИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**
**SIGNAL FUSION USING CROSS-SPECTRAL ANALYSIS
IN ACTIVE RADAR SYSTEMS**

По представлению чл.-корр. РАРАН М.В. Чернышова

С.А. Захаров, Д.А. Масыгина, Ю.В. Коноплев, А.А. Юев

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

S.A. Zakharov, D.A. Masyagina, Yu.V. Konoplev, A.A. Yuev

В статье описан алгоритм комплексирования данных методом кросс-спектрального анализа. В его основе лежат преобразования сигналов в частотной области, позволяющие выявить их взаимосвязь, взвешенно объединяя спектральные представления. Метод нацелен на повышение качества выходных данных, минимизирование влияния различных источников шума и помех. В статье кратко рассмотрены и другие методы комплексирования данных в радиолокационных системах.

Ключевые слова: комплексирование, кросс-спектральный метод, преобразование Фурье, частота зондирования.

This paper describes an algorithm for data fusion using the cross-spectral analysis method. It is based on signal transformations in the frequency domain, enabling the identification of their interrelationships by weighting and combining their spectral representations. The method is aimed at improving the quality of the output data and minimizing the impact of various noise sources and interference. The article also briefly discusses other data fusion methods in radar systems.

Keywords: data fusion, cross-spectral method, Fourier transform, radar frequency.

Введение

Радиолокационные системы (РЛС) являются важнейшим инструментом в современных методах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Еще несколько лет назад их место занимали оптические методы съемки. Однако с развитием технологий стало возможным получать данные, которые не уступают оптическим. При этом такие системы являются активными, то есть об-

ладающими возможностью работать практически в любых погодных условиях, в любое время суток [1]. Они находят широкое применение не только в разведывательно-военных сферах, но и в таких областях, как картография, мониторинг природных ресурсов, управление земельными ресурсами и т.д.

Значение этих достоинств особенно велико применительно к задачам мониторинга территории России. Высокая доля времени, в течение

которого здесь имеют место неблагоприятные условия освещенности и облачности (около 75% в среднем по стране, до 90% в Арктическом регионе). Длительность существования таких условий не позволяет эффективно использовать оптическую аппаратуру наблюдения при решении обширного круга актуальных задач различного назначения [2].

Отдельного внимания заслуживают современные методы обработки сигналов РЛС ДЗЗ. Отраженный радиосигнал содержит в себе всю необходимую информацию об объектах наблюдения, однако извлечение этой информации достаточно ресурсоемкий процесс. Благодаря увеличению вычислительных мощностей и оптимизации работы фильтров стало возможным обрабатывать большие объемы данных как непосредственно на уровне сигналов, так и на уровне получаемых изображений, что положительно сказывается на итоговом качестве получаемых данных.

Современное развитие технологий требует от РЛС ДЗЗ максимизации получаемой информации. Вследствие физического ограничения в отношении проникающей способности определенных длин волн (например, более длинные волны лучше проходят через препятствия, чем короткие (рис. 1)), а следовательно, и ограничения получаемой информации выявляется необходимость совершенствовать антенные устройства. Яркий пример таких систем — активные фазированные антенные решетки (АФАР), которые способствуют излучению сигналов на различных частотах, что ведет к возможности комплексирования (объединения) получаемых данные.

В настоящее время в России проводят разработки двухдиапазонной СВЧ (X-диапазон) и УВЧ (P-диапазон) АФАР. Подобная техноло-

гия уже активно используется за рубежом, яркий тому пример космический аппарат (КА) TerraSAR-X [2].

Сравнительную характеристику получаемых данных в СВЧ и УВЧ диапазонах можно описать следующим образом.

1. В СВЧ диапазоне эффективная площадь рассеяния (ЭПР) выше, чем в УВЧ, что сказывается на контрастности радиолокационных снимков земной поверхности.
2. Радиоволны УВЧ диапазона способны проникать в плотные среды, что позволяет выявить скрытые элементы.
3. Данные СВЧ диапазона близки по структуре к визуальному восприятию и могут использоваться для привязки к картам, что упрощает навигационные задачи.
4. Искусственные объекты имеют одинаковый ЭПР.

Таким образом, комплексирование данных, получаемых при использовании разных длин волн, позволит объединить их преимущества, улучшая общее качество и информативность получаемых данных. Это делает задачи комплексирования особенно важными для современных исследований и практических приложений его использования.

Целью данной работы является исследование комплексирования данных на уровне сигналов в активных РЛС ДЗЗ.

Анализ способов комплексирования

Решением вопроса комплексирования данных в антенных системах является использование многочастотных/многодиапазонных радиолокационных систем. При этом самым простым вариантом построения таких систем является использование нескольких отдельно

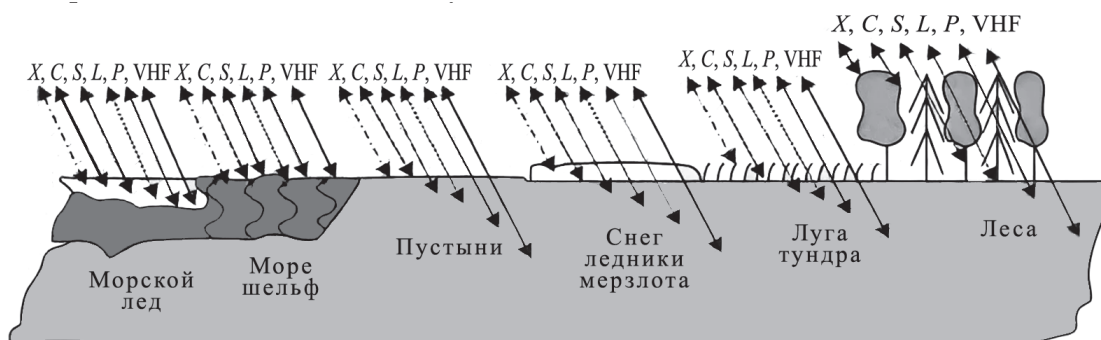


Рис. 1. Проникающая способность волн разной длины

приемо-передающих трактов или использование одной антенны с перестройкой несущей частоты. Однако очевидным недостатком любого из вышеописанных методов будет являться усложнение аппаратной части [3].

Таким образом, можно выделить следующие варианты комплексирования данных (рис. 2).

1. Комплексирование сигналов.

Частным видом комплексирования сигналов является получение интерферограммы в методе интерферометрического обзора земной поверхности. Другим видом комплексирования сигналов является метод кросс-спектрального анализа.

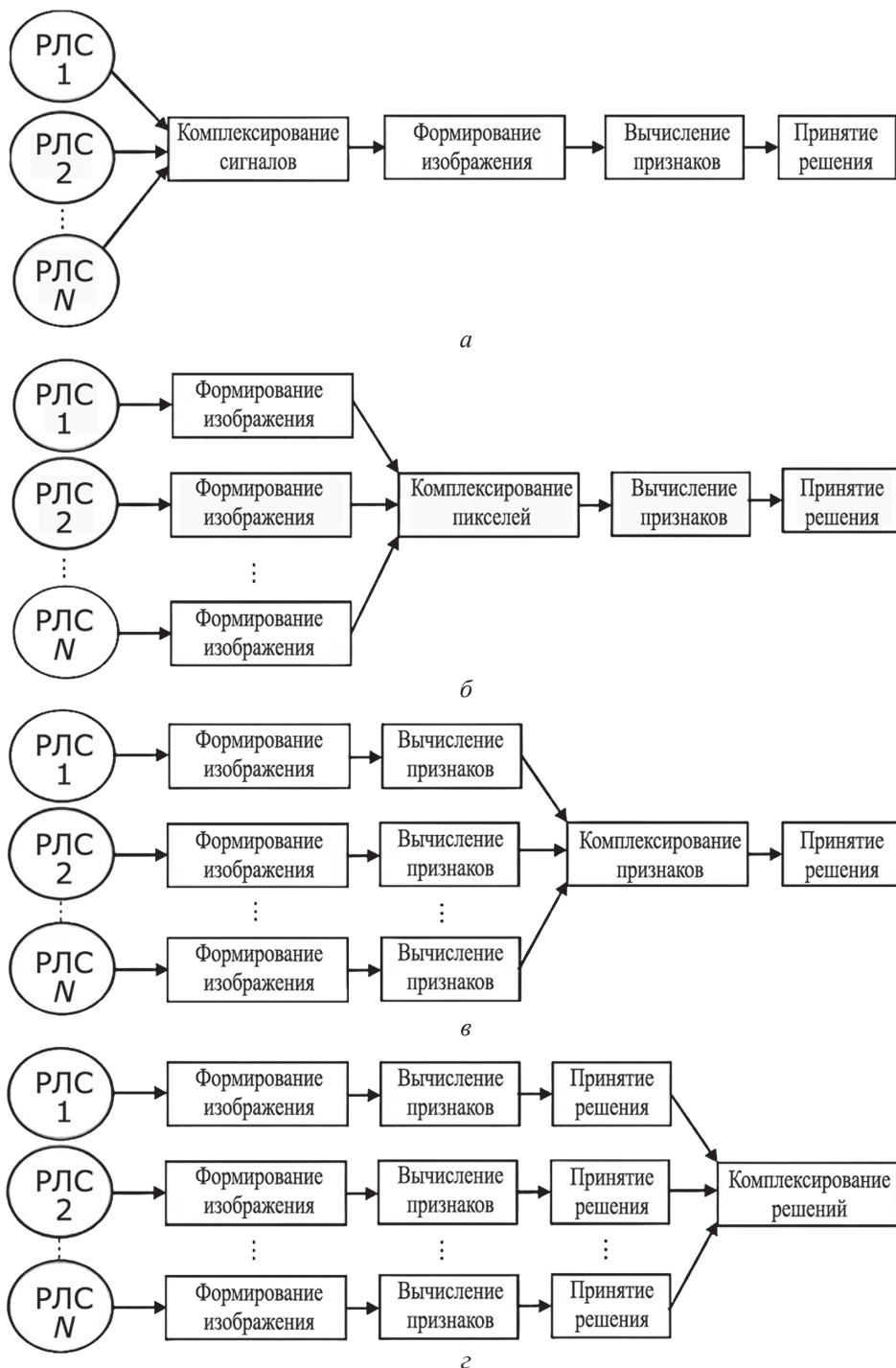


Рис. 2. Варианты комплексирования данных

2. Комплексование пикселей.

Каждый пиксель может быть объединен с другим на основе методов среднего и медианного значений, а также взвешенного суммирования. Однако стоит учитывать необходимость строгой корегистрации входных данных, иначе при комплексовании пикселей могут возникнуть артефакты на итоговом результате.

3. Комплексование признаков.

В качестве примера комплексования на уровне признаков можно привести методы снижения размерности и объединения признаков, такие как PCA (Principal Component Analysis) и LDA (Linear Discriminant Analysis). Комплексование признаков позволяет учитывать различия в уровне качества выходных данных на основе алгоритмов по типу Вейвлет-преобразований [4].

4. Комплексование решений.

Этот подход является самым трудоемким из приведенных, так как требует учета множества факторов и вероятностей (ложной тревоги, пропуска цели) для достижения высокой надежности и точности.

Кросс-спектральный анализ

Предполагается, что есть два набора данных, которые описываются функциями отраженных сигналов с разными зондирующими частотами. Для их успешного комплексования необходимо выявить, как эти два набора данных могут быть связаны друг с другом [4].

В антенной технике существует ряд способов выявления взаимосвязей между сигналами. Одним из таких способов является метод взаимной корреляционной функции (ВКФ):

$$S_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)Y(t + \tau)dt.$$

Частным случаем ВКФ является кросс-спектральный анализ (КСП):

$$S_{xy}(f) = X(f)^* Y(f). \tag{1}$$

КСП связан с ВКФ через преобразование Фурье. Анализ КСП позволяет определить взаимосвязь между двумя временными рядами как функцию частоты. Обычно предполагает-

ся, что статистически значимые пики на одной и той же частоте были показаны в двух временных рядах, и необходимо определить связаны ли эти периодичности друг с другом, и, если да, то какова фазовая зависимость между ними.

Мерой взаимосвязи двух сигналов в частотной области является когерентность. Когерентность объединяет спектральные и корреляционные характеристики процессов и характеризует корреляцию между процессами отдельно в каждой спектральной полосе. Функция когерентности является мерой (нормированной 0...1) линейной связи двух сигналов на заданной частоте f :

$$C_{xy}(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}. \tag{2}$$

Моделирование комплексования сигналов методом кросс-спектрального анализа

Предполагается, что имеется две антенные системы со следующими входными данными:

- амплитуда сигналов $U = 1$ В;
- частота зондирования первого сигнала $f_{s1} = 9,6$ ГГц;
- частота зондирования второго сигнала $f_{s2} = 1,2$ ГГц;
- длина волны первого сигнала $\lambda_1 = 0,03$ м;
- длина волны второго сигнала $\lambda_2 = 0,25$ м.

Каждая из антенн излучает в пространство сигнал, зачастую линейно-частотно модулированный (ЛЧМ). Зная координаты цели и закон изменения наклонной дальности от летательного или космического аппарата, можно определить принятые сигналы каждой из антенн, которые будут описываться своими квадратурными и синфазными составляющими [5].

Таким образом, принятые сигналы первой и второй антенны будут описываться следующими выражениями [6]:

$$\dot{s}_1(t) = u_{ic1}(t) + ju_{is1}(t);$$

$$\dot{s}_2(t) = u_{ic2}(t) + ju_{is2}(t).$$

Графики синфазных и квадратурных составляющих описываемых сигналов представлены на рис. 3.

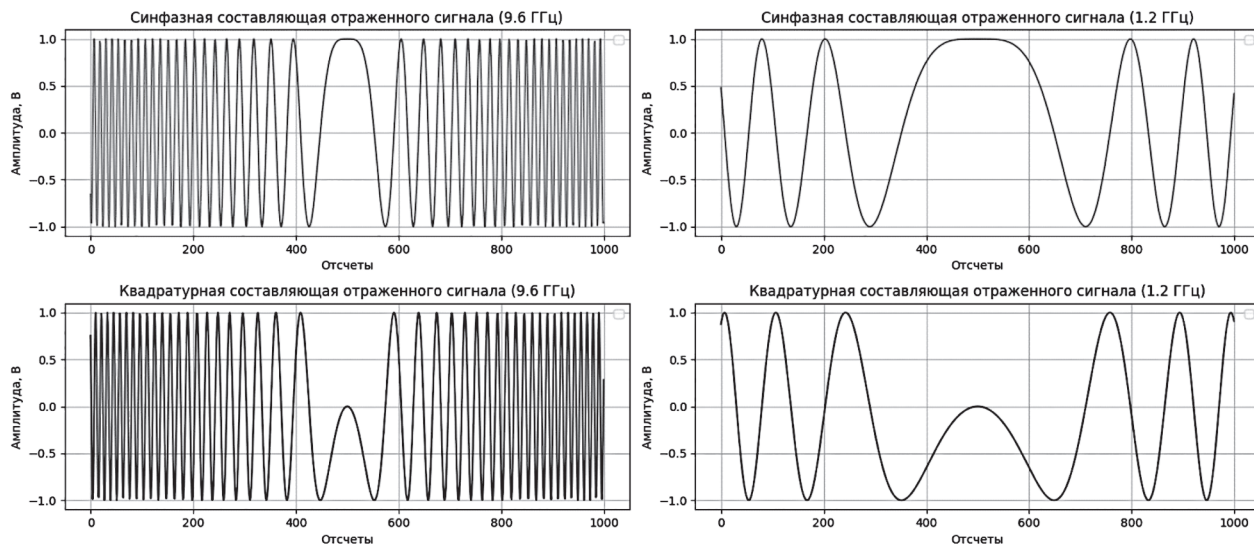


Рис. 3. Графики синфазных и квадратурных составляющих описываемых сигналов

Метод кросс-спектрального анализа состоит из нескольких этапов, его структура представлена на рис. 4.

На первом этапе необходимо выполнить прямое преобразование Фурье для перехода от временной области в частотную:

$$X(f) = F(\dot{s}_1(t));$$

$$Y(f) = F(\dot{s}_2(t)).$$

Это преобразование позволит определить спектры сигналов, которые содержат информацию о частотах, амплитудах и фазах компонентов сигнала [7].

На рис. 5 представлены спектры этих сигналов.

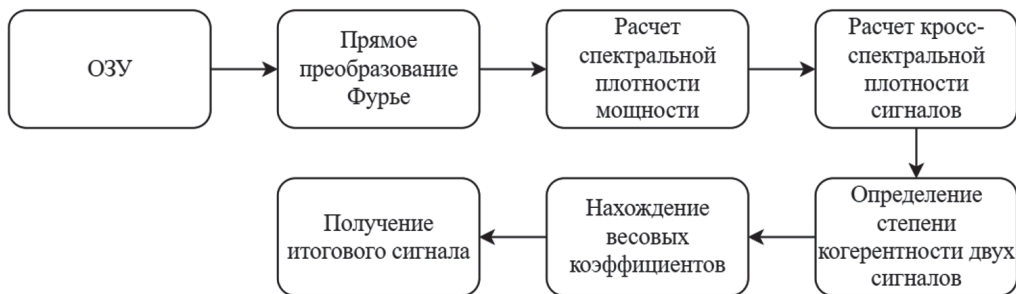


Рис. 4. Структура кросс-спектрального анализа

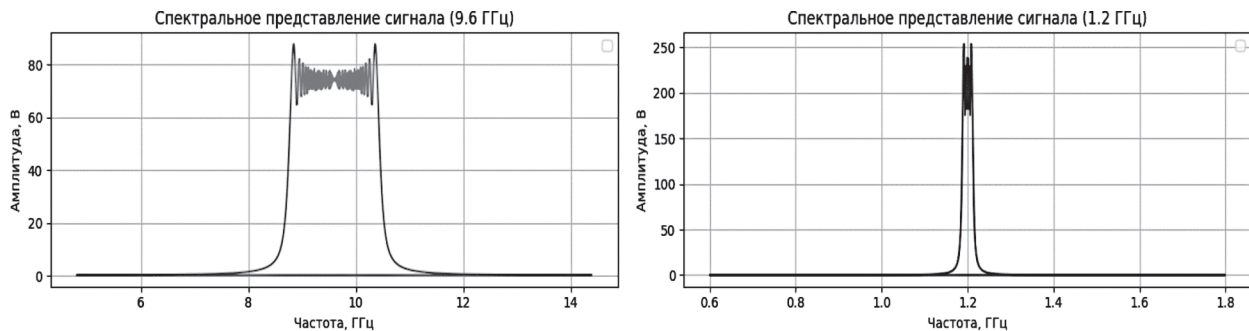


Рис. 5. Графики спектров двух сигналов

По графикам спектров можно сделать вывод, что левый график (9,6 ГГц) описывает широкополосный сигнал, центральная частота которого сосредоточена в области 9,6 ГГц. Большая ширина полосы пропускания позволяет добиться высокого разрешения по наклонной дальности, что является важным аспектом в области ДЗЗ.

Правый график (1,2 ГГц) представляет узкополосный сигнал. Центральная частота сосредоточена в области 1,2 ГГц. Относительно небольшая ширина полосы пропускания ведет к низкой разрешающей способности по наклонной дальности.

Колебания в спектрах сигналов описываются ЛЧМ процессами.

На втором этапе, зная спектры сигналов, необходимо определить спектральные плотности мощности для того, чтобы оценить, как мощность распределяется на каждой частоте:

$$S_{xx}(f) = |X(f)|^2;$$

$$S_{yy}(f) = |Y(f)|^2.$$

Графики спектральной плотности мощности двух сигналов представлены на рис. 6.

Максимальная спектральная плотность мощности для сигнала 9,6 ГГц достигает 1,75 В²/Гц, что можно описать небольшой проникающей способностью через препятствия. В то время как сигнал 1,2 ГГц имеет максимальную мощность 16 В²/Гц, что значительно выше, чем у широкополосного сигнала. Высокая мощность указывает на способность сигнала проникать на большие расстояния и поддерживать стабильную передачу в условиях сложных сред (например, через растительность или атмосферные осадки).

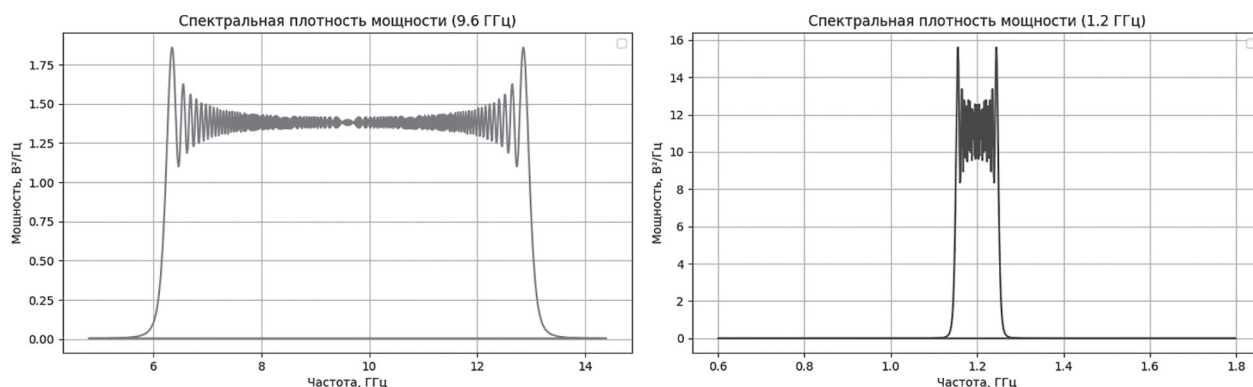


Рис. 6. Графики спектральной плотности мощности двух сигналов

На третьем этапе необходимо определить кросс-спектральную плотность двух сигналов согласно формуле (1).

На рис. 7 представлен график кросс-спектральной плотности.

Основная энергия сигнала сосредоточена в диапазоне частот около 9,6 ГГц, что характерно для широкополосного сигнала. Это подтверждает, что два анализируемых сигнала имеют общую корреляцию в данном частотном диапазоне. Максимальная амплитуда кросс-спектральной плотности достигает 4 В, что указывает на высокую степень когерентности между сигналами на этой частоте.

Производным от функции когерентности (2) является квадрат модуля когерентности (КМК). Зная кросс-спектральную плотность, можно определить КМК [4]:

$$C_{xy}(f)^2 = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}.$$

КМК указывает на степень взаимосвязи между сигналами с точки зрения энергии на частоте [5].

На основе КМК рассчитываются весовые коэффициенты:

$$\alpha(f) = \frac{C_{xy}(f)S_{xx}(f)}{\tilde{N}_{xy}(f)^2 S_{xx}(f) + S_{yy}(f)};$$

$$\beta(f) = \frac{C_{xy}(f)S_{yy}(f)}{\tilde{N}_{xy}(f)^2 S_{xx}(f) + S_{yy}(f)}.$$

Весовые коэффициенты используются для взвешенного объединения сигналов на основе их

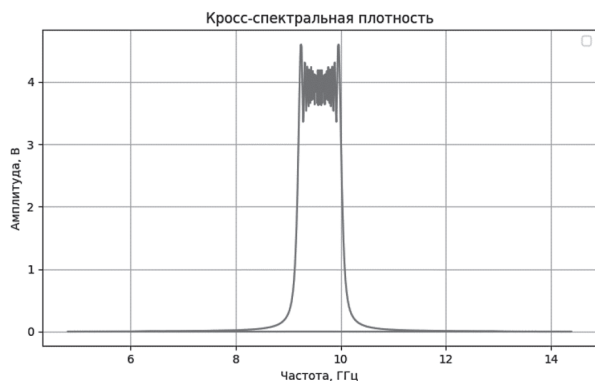


Рис. 7. График кросс-спектральной плотности сигналов

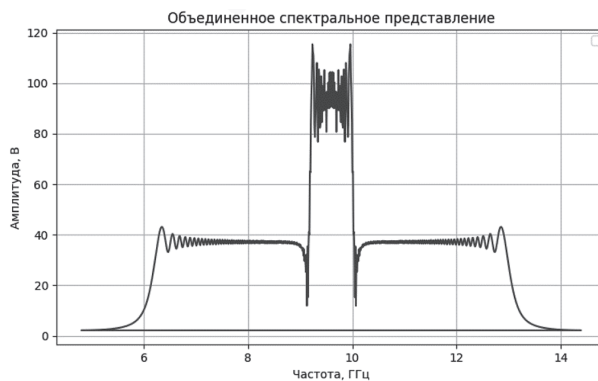


Рис. 8. График итогового сигнала в частотной области

КМК. Они позволяют учесть степень когерентности сигналов на каждой частоте [8].

Зная весовые коэффициенты, можно получить итоговое выражение для результирующего сигнала в частотной области:

$$Z(f) = \alpha(f)X(f) + \beta(f)Y(f).$$

График результирующего сигнала в частотной области представлен на рис. 8.

Объединенный сигнал охватывает широкий диапазон частот от 6 ГГц до 14 ГГц, с основной энергией, сосредоточенной в районе 9,6 ГГц, что соответствует частоте максимальной мощности обоих исходных сигналов. Это широкий спектр, который может быть полезен для улучшения пространственного разрешения систем ДЗЗ.

В области между 9 и 10 ГГц наблюдаются резкие провалы в амплитуде, что может быть

связано с фазовыми сдвигами или частотными разностями между двумя сигналами. Эти провалы могут указывать на несогласованность фаз между исходными сигналами, что требует дополнительного анализа.

Выполнив обратное преобразование Фурье, можно получить результирующий сигнал во временной области:

$$\dot{s}_{12}(t) = F^{-1}(Z(f)).$$

Полученный сигнал также описывается своими синфазными и квадратурными составляющими.

График результирующего сигнала во временной области представлен на рис. 9.

Цифрой 1 на рис. 9 обозначена синфазная составляющая итогового сигнала. Цифрой 2 — квадратурная составляющая сигнала.

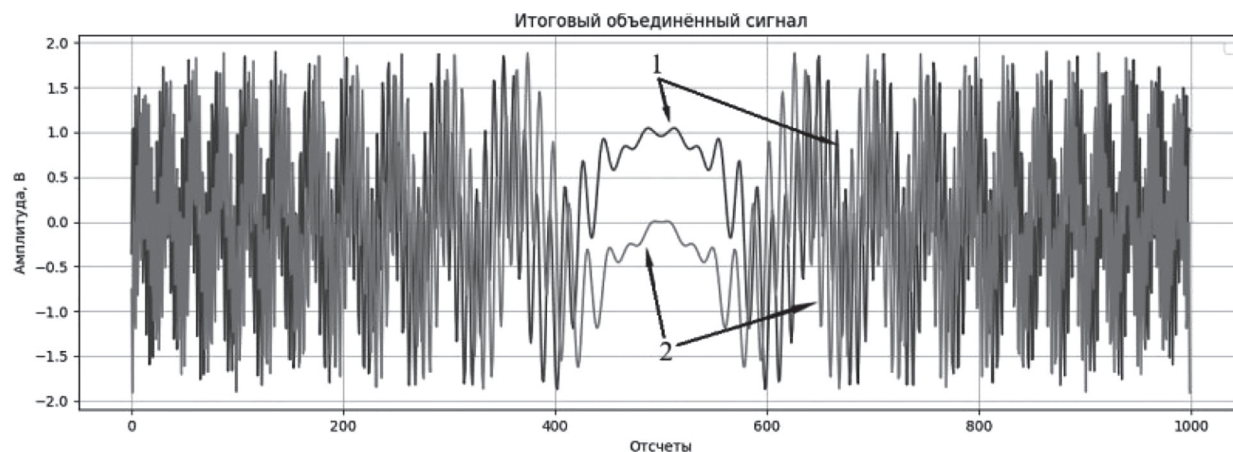


Рис. 9. График результирующего сигнала

Вывод

В статье рассмотрен и описан перспективный подход комплексирования сигналов методом кросс-спектрального анализа. Реализация подобных алгоритмов позволит решать комплексные задачи в сфере активной радиолокации, а именно в средствах дистанционного зондирования Земли. Кросс-спектральный метод является ключевым инструментом в комплексировании данных активных радиолокационных систем. Он обеспечивает высокую точность и надежность анализа, способствует решению задач интеграции данных из различных источников и улучшению технологий дистанционного зондирования. Однако реализация данного метода требует больших вычислительных мощностей для выполнения сложных математических операций, таких как быстрое преобразование Фурье, кросс-корреляция и когерентное накопление [9]. Это приводит к высокой вычислительной нагрузке на оборудование, особенно при обработке больших объемов данных. Для выполнения этих вычислений в реальном времени необходимы мощные процессоры или специализированные FPGA, что увеличивает стоимость и сложность системы.

Список источников

1. Michael Inngs. Synthetic Aperture Radar during the 50 Years of the Aerospace and Electronic Systems Society // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. Vol. 38, edition 1. Pp. 22–31.
2. Костров В.В., Криштопов А.В., Толстов Е.Ф., Цветков О.Е. Анализ возможностей

двухчастотного космического РСА X и P диапазонов / Всероссийские открытые Армандовские чтения // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн, 2019. Муром: Муромский институт (филиал) ВГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2019. С. 371–383.

3. Потапов А.А., Кузнецов В.А., Аликулов Е.А. Анализ способов комплексирования изображений, формируемых многодиапазонными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24. № 3. С. 6–21.

4. Столбов М.Б. Основы анализа и обработки речевых сигналов. СПб.: НИУ ИТМО, 2021. 101 с.

5. Лихачев В.П., Купряшкин И.Ф., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. М.: Радиотехника, 2020. 279 с.

6. Cumming I.G., Wong F.H. Digital data processing by synthesized radar aperture: Algorithms and implementation. Boston, London: 436 p.

7. Верба В.С., Неронский Л.Б., Турук В.Э. Перспективные технологии цифровой обработки радиолокационной информации космических РСА: монография под общ. ред. члена-корреспондента Российской академии наук В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2019. 416 с.

9. Доросинский Л.Г., Виноградова Н.С. Теория и практика формирования и обработки радиолокационных изображений: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург, 2021. 232 с.

10. Robert Wang, Yunkai Deng. Bistatic SAR System and Signal Processing Technology. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018. 286 p.