

Повышение разрешающей способности РСА с применением алгоритма многополосной обработки

К. Лялин, к. ф. - м. н.¹, Ю. Мелёшин²,
А. Переверзев, д. т. н.³, М. Хасанов⁴

УДК 621.03.01 | ВАК 05.11.03

В настоящее время нашли широкое применение радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) с высокой разрешающей способностью. Показаны возможности и ограничения получения высокой разрешающей способности РСА X-диапазона частот при ограниченных аппаратных возможностях.

Одной из ключевых технических характеристик радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) является разрешающая способность по дальности, которая зависит от рабочей полосы частот системы [1]. Построение сверхширокополосных систем – сложная задача, так, к основным проблемам относят: сложность регулировки аналоговых трактов и антенн, реализация малой неравномерности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) аналоговых трактов и антенн и высокую частоту дискретизации аналого-цифрового преобразователя. Однако существует алгоритм многополосной обработки сигналов, позволяющий частично решить эти проблемы. Подробное описание алгоритма представлено в работах [2, 3].

В статье рассмотрены вопросы использования данного алгоритма многополосной обработки сигналов при проектировании малогабаритного РСА X-частотного диапазона с высокой разрешающей способностью для требований сельского хозяйства и промышленности. Также будут рассмотрены вопросы выбора количества используемых поддиапазонов частот и ограничений, связанных с параметрами полета носителя.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА

Представленный алгоритм заключается в разбиение желаемой суммарной рабочей полосы частот на N полос меньшей ширины. Для разложения исходного широкополосного сигнала применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Особенностью алгоритма является то, что получаемые в результате разложения сигналы поддиапазонов повторяют форму исходного сигнала, что позволяет применять данный алгоритм в системах с бинарной

фазовой модуляцией, не усложняя устройства формирования модулирующих сигналов. Результат такого разложения для $N=15$ представлен на рис. 1.

Однако, по представленному графику видно, что используемые поддиапазоны частот пересекаются по оси частот и крайние составляющие имеют значительно более низкую амплитуду, чем центральные. Эти факты ведут к снижению энергетической эффективности системы.

Если просуммировать полосы частот всех используемых сигналов поднесущих частот, суммарная полоса частот будет рассчитываться по формуле:

$$F_{\text{сумм}} = N \cdot \Delta f_c, \quad (1)$$

где Δf_c – рабочая полоса частот сигнала поднесущей частоты.

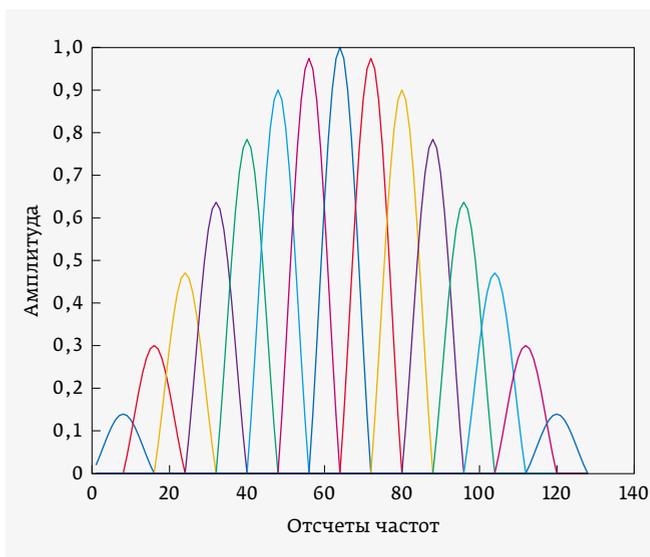


Рис. 1. Разбиение исходной полосы на поддиапазоны частот для $N=15$

¹ Институт МПСУ, заместитель директора.

² НИУ «МИЭТ», инженер-радиоэлектронщик.

³ НИУ «МИЭТ», проректор по инновационной деятельности.

⁴ НИУ «МИЭТ», инженер-радиоэлектронщик.

В данной конфигурации $\Delta f_c = \Delta F/N$, следовательно,

$$F_{\text{сумм}} = \frac{2 \cdot N}{(N+1)} \cdot \Delta F. \quad (2)$$

Так, при $N=15$

$$F_{\text{сумм}} = 1,875 \cdot \Delta F. \quad (3)$$

Улучшить энергетическую эффективность системы возможно за счет применения способа эффективного ограничения спектра, описанного в [4]. Конфигурация используемой рабочей полосы частот, разделенной на 15 полос после применения способа эффективного ограничения спектра, показана на рис. 2.

Как видно из представленного графика (по сравнению с рис. 1), данный случай обладает большей суммарной энергией составляющих, а также меньшим пересечением сигналов поддиапазонов. В таком случае суммарная используемая полоса частот поднесущих сигналов считается по формуле:

$$F_{\text{сумм}} = \frac{2 \cdot N}{(N+1)} \cdot K_{\text{исх}} \cdot \Delta F. \quad (4)$$

Следовательно, при $N=15$ и $K_{\text{исх}}=0,6$ (коэффициент ограничения спектра) имеем:

$$F_{\text{сумм}} = 1,125 \cdot \Delta F. \quad (5)$$

Можно сделать вывод, что применение способа эффективного ограничения спектра позволило улучшить энергетическую эффективность системы на 40%.

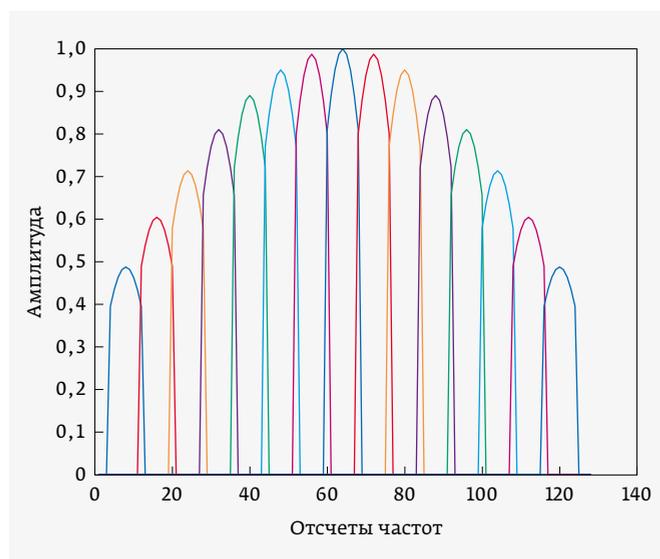


Рис. 2. Разбиение исходной полосы на поддиапазоны частот для $N=15$ после применения способа эффективного ограничения спектра

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА

Вопросы расчета технических характеристик и построения PCA изучены досконально и не являются предметом данного исследования. Рассмотрим именно научные и технические основы проектирования PCA на основе алгоритма многополосной обработки. Не во всех случаях использование многополосного PCA оправдано, следовательно, необходимо рассмотреть ограничение применения таких систем.

Как известно [5], для классических PCA существует ограничение частоты повторения импульсов, определяемое выражением:

$$F_{\text{сл_исх}} \geq \frac{2V}{L_p}, \quad (6)$$

где V – скорость движения носителя; L_p – размер антенны по направлению движения.

Соответственно, ограничение на период следования записывается как:

$$T_{\text{сл_исх}} \leq \frac{L_p}{2V}. \quad (7)$$

В многополосной системе необходимо учесть количество используемых частотных поддиапазонов (N):

$$T_{\text{сл_треб}} \leq \frac{L_p}{2 \cdot V \cdot N}. \quad (8)$$

Далее необходимо рассмотреть ограничение, связанное с временем распространения сигнала и временем перестройки центральной рабочей частоты между частотами поддиапазонов:

$$T_{\text{сл_треб}} \geq \frac{2 \cdot R_{\text{max}}}{c} + \tau, \quad (9)$$

где R_{max} – максимальная наклонная дальность системы; τ – время перестройки рабочей частоты системы (как правило, определяется временем перестройки используемого синтезатора частоты); c – скорость света.

Существуют общеизвестные способы [6–9] смягчения требования, описанного выражением (9). Однако в настоящей работе уделяется особое внимание проектированию малогабаритных и дешевых PCA для промышленности и сельского хозяйства, где применение этих способов нецелесообразно.

Таким образом, используя выражения (7) и (8), можно составить основное выражение, которое позволит оценить возможность и целесообразность применения многополосного PCA для конкретного типа носителя при различном количестве используемых частотных поддиапазонов:

$$\frac{L_p}{2 \cdot V \cdot N} \geq \frac{2 \cdot R_{\text{max}}}{c} + \tau. \quad (10)$$

Данное выражение является инструментом оценки и было использовано при дальнейшем проектировании РСА.

РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНОГО РСА X-ДИАПАЗОНА ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В рамках выполнения работы «Исследование и разработка радиолокационных средств оперативного контроля состояния поверхности Земли с беспилотных летательных аппаратов» стояла задача проектирования малогабаритной многофункциональной РСА со следующими основными техническими параметрами:

- X-диапазон частот;
- суммарная ширина полосы частот – не менее 2 ГГц.

Исходя из представленных требований, можно установить зависимость высоты и скорости полета от количества используемых поддиапазонов. Время перестройки центральной частоты τ для первоначальных расчетов прием равным 50 мкс, в соответствии с верхней границей перестройки предлагаемого к использованию синтезатора частоты [10].

Максимальная наклонная дальность R_{\max} определяется высотой полета, углом наклона антенны $\theta_{\text{ант}}$ и шириной диаграммы направленности (ДН) системы в угломестной плоскости ($\theta_{-3\text{дБ}}$):

$$R_{\max} = \frac{H}{\cos\left(\frac{\theta_{\text{ант}} + \theta_{-3\text{дБ}}}{2}\right)} \quad (11)$$

Как правило, угол наклона антенны в таких системах равен примерно 45° , а ширина ДН в угломестной плоскости примерно $30\text{--}60^\circ$. Для первичной оценки возьмем

крайнее значение диапазона. Таким образом, используя выражения (10) и (11), получаем следующее выражение:

$$V \cdot N \cdot (0,26 \cdot H + 50) \cdot 10^{-6} \leq 1. \quad (12)$$

Зависимость максимальной скорости полета от высоты полета носителя при разных значениях N представлена на рис. 3.

Малогабаритные РСА для применения в промышленности предполагается использовать на относительно небольших высотах (до 3 км) и носителях со скоростями до 100 м/с. Следовательно, из представленных данных можно сделать вывод о допустимости использования нескольких десятков поднесущих частот. Это позволит строить систему с существенно меньшей мгновенной полосой обработки и формирования сигналов (по отношению к суммарной), что в значительной мере упрощает систему.

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ МНОГОПОЛОСНОЙ РСА

На основании представленных ранее данных разработана структурная схема РСА. С учетом выбранной элементной базы структурная схема имеет вид, представленный на рис. 4.

Данная схема позволяет реализовать суммарную рабочую полосу частот $9\text{--}11,5$ ГГц, что соответствует ширине полосы частот $2,5$ ГГц и свидетельствует об успешном выполнении поставленных требований. Таким образом, при $N=15$ применение алгоритма многополосной обработки позволило снизить мгновенную полосу работы системы с $2,5$ до $0,32$ ГГц. Что позволило реализовать суммарную рабочую полосу частот РСА более 2 ГГц и соответствующую ей разрешающую способность по дальности не более 10 см.

* * *

Применение алгоритма многополосной обработки сигналов в РСА позволяет существенно улучшить разрешающую способность по дальности при сохранении небольшой мгновенной полосы формирования и обработки сигналов, что открывает широкие перспективы по развитию малогабаритных РСА с низкой себестоимостью. Представлен процесс разработки РСА X-диапазона частот (с разрешающей способностью не более 10 см) с точки зрения анализа и выбора режима работы, конфигурации использования рабочих частот и соответствующих им модулирующих сигналов. Показаны

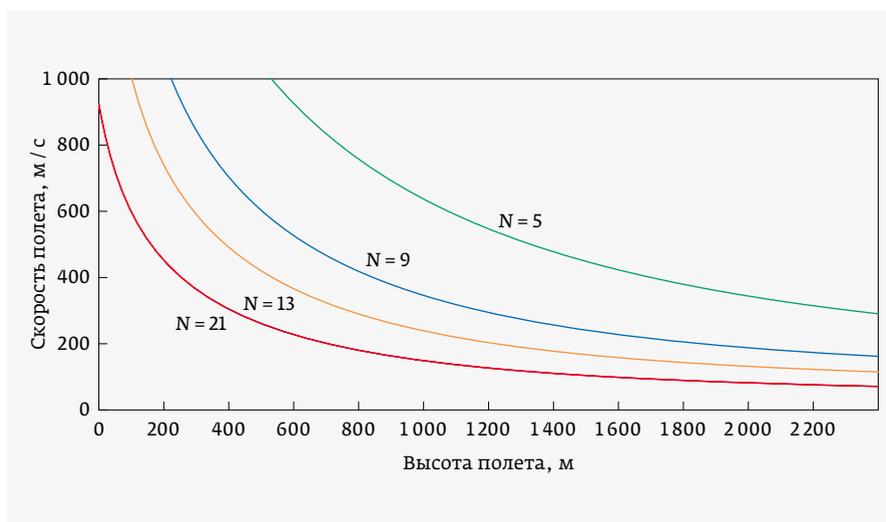


Рис. 3. Зависимость максимальной скорости полета от высоты носителя при различных N

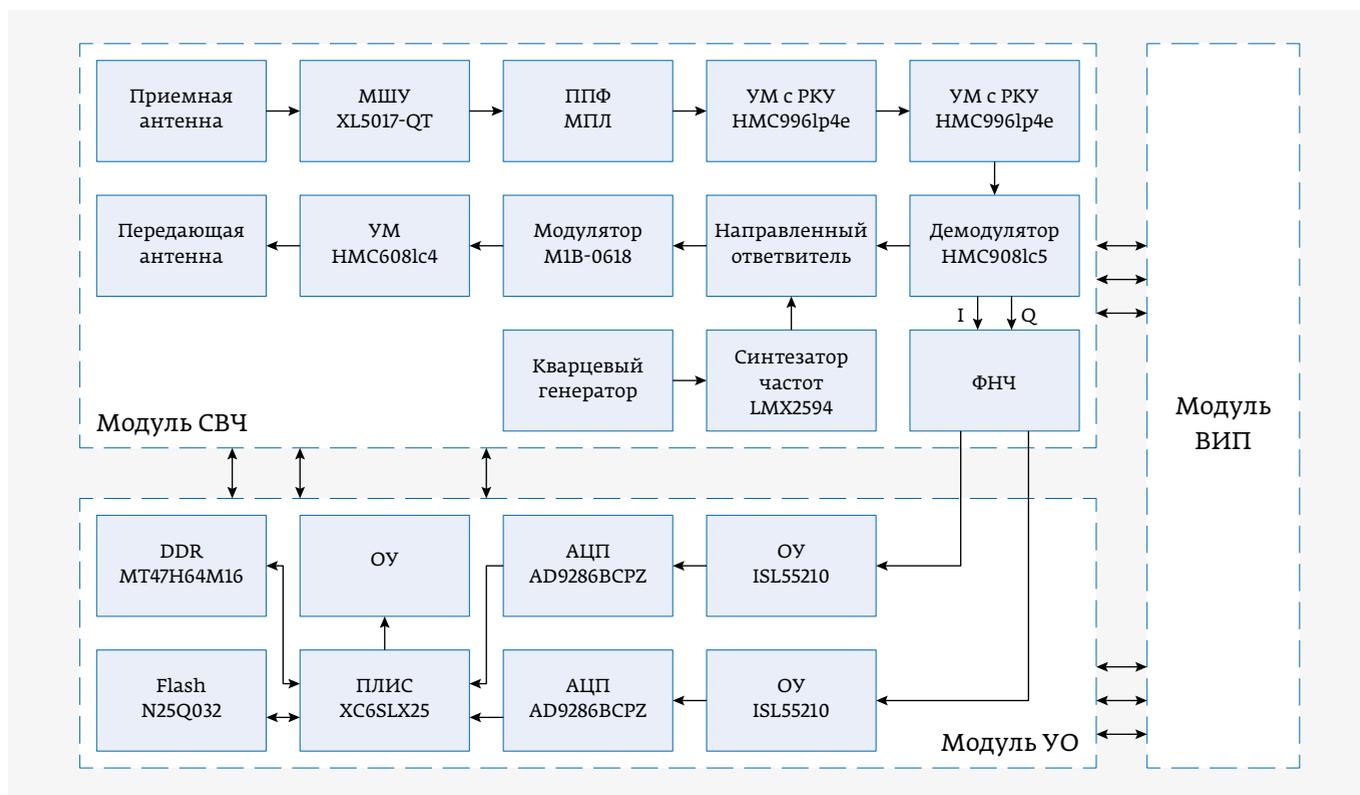


Рис. 4. Структурная схема разработанного РСА

ограничения, связывающие полетные характеристики носителя РСА и временные задержки, возникающие в системе.

В дальнейшем планируется продолжить исследования вопросов аппаратной реализации алгоритма многополосной обработки сигналов в РСА X-диапазона частот, а также проведение экспериментальной отработки полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. **Quegan S., Oliver C.** Understanding Synthetic Aperture Images. Norwood: Artech House. 1998.
2. **Мелешин Ю. М., Лялин К. С., Хасанов М. С., Орешкин В. И.** Способ формирования и обработки сигналов в многодиапазонных и многополосных радиолокационных системах. Патент на изобретение RU2 684 896 С1. Апр 16. 2019.
3. **Мелешин Ю. М., Лялин К. С., Орешкин В. И., Хасанов М. С., Довгаль Т. А.** Метод улучшения разрешающей способности // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2018. Изд. 23. № 4, С. 371–378.
4. **Meleshin Y. M., Khasanov M. S., Oreshkin V. I., Tsvetkov V. K., Chistukhin V. V.** Spectral distortions of a phase-shift keying signal // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2017.
5. **Сколник М. И.** Справочник по радиолокации. В 2-х кн. Т. 1–2. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015.
6. **Мелешин Ю. М., Лялин К. С., Хасанов М. С., Кузьмин И. А.** Спектральный метод подавления боковых лепестков // ТРУДЫ МАИ. 2018. № 103. С. 23.
7. **Костров В. В., Сидоров А. А.** Обработка траекторного сигнала РСА в условиях скошенного режима и миграции по дальности // IV Всероссийские армандовские чтения. – Муром, 2014. 2014. С. 236–242.
8. **Meleshin Y. M., Khasanov M. S., Merkulova Z. V., Dovgal T. A., Kurganov V. V.** Approach To Optimization Of Radar Image Synthesis From Hologram With Redundant Pulse Frequency Rate // Proceedings Of The 2018 IEEE Conference Of Russian Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering. 2018. P. 1681–1684.
9. **Тарасенко А. М.** Формирование сигналов с различными видами модуляции радиотехнических средств на несущих частотах // Материалы VIII Всероссийских Армандовских чтений Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». – Муром: МИ ВлГУ, 2018. ISSN2304-0297 (CD-ROM). С. 538–546.
10. <http://www.ti.com/>[Электронный ресурс] URL: <http://www.ti.com/>