

**Национальный исследовательский университет
«МЭИ»**

Институт радиотехники и электроники

Кафедра радиотехнических приборов и антенных систем

**Радиотехнические системы дистанционного зондирования
Земли**

Курсовой проект

ФИО студента: Жеребин В.Р.

Группа: ЭР-15-15

Вариант №: _____

Дата: _____

Подпись: _____

ФИО преподавателя: Лукашенко Ю.И.

Оценка: _____

Москва, 2020 г.

Задание на курсовой проект.

Необходимо разработать радиолокационную систему с синтезированным раскрытием антенны (РСА) для космического базирования с требуемыми тактическими характеристиками:

- Разрешение по поверхности $\Delta X = \Delta Y = 25$ м
- Динамический диапазон изображения $B = 30$ дБ
- Полоса обзора по дальности на поверхности $\Delta L = 40$ км
- Угол визирования $\beta = 35^\circ$
- Высота полета $H = 300$ км
- Скорость полета $V = 7,5$ км/с
- Длина радиоволны передатчика $\lambda = 9$ см

Обработка бортовая с возможным некогерентным накоплением по кадрам изображения;

Необходимо:

- 1) Обосновать и рассчитать характеристики зондирующего сигнала: вид сигнала, $\tau_{\text{и}}$, $\Delta f_{\text{с}}$, $T_{\text{п}}$.
- 2) Составить подробную функциональную схему бортового комплекса.
- 3) Рассчитать размеры полотна антенны.
- 4) Обосновать алгоритм и рассчитать систему цифровой обработки сигнала, составить функциональную схему с указанием ее характеристик и требуемой производительности.
- 5) Определить требуемую мощность передатчика для получения отношения сигнал/шум порядка 10-15 дБ.

1. Расчет основных параметров и выбор формы зондирующего сигнала

Радиолокаторы с синтезированным раскрытием антенны (РСА) предназначены для получения детального радиояркого изображения лоцируемой поверхности и являются наиболее информативными активными радиосистемами дистанционного исследования и контроля поверхности и сред Земли и планет.

При выборе формы зондирующего сигнала необходимо стремиться к минимуму корреляционных шумов. Из энергетических соображений предпочтительнее использовать сигналы сложной формы. Для требуемого динамического диапазона изображения $B = 30$ дБ, уровень корреляционного шума не должен превышать величины $-B = -30$ дБ. Из сигналов сложной формы выбираем сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

Для упрощения антенной системы и большей возможности вариаций тактических характеристик будем использовать РСА с импульсным режимом зондирования.

Ширина спектра зондирующего сигнала Δf_c определяется из разрешающей способности ΔY

$$\Delta Y = \frac{\Delta R_n}{\cos \beta} = \frac{c}{\Delta f_c} \frac{1}{\cos \beta}$$
$$\Delta f_c = \frac{c}{\Delta Y \cdot \cos \beta} = \frac{3 \times 10^8}{25 \cdot \cos 35^\circ} \approx 14,639 \times 10^6 \text{ Гц} = 14,6 \text{ МГц}$$

Длительность импульса τ_n связана с шириной спектра зондирующего сигнала. Выберем базу сигнала, равной 100.

$$\tau_n = \frac{\beta}{\Delta f_c} = \frac{100}{14,639 \times 10^6} \approx 6,8 \times 10^{-6} \text{ с} = 6,8 \text{ мкс}$$

Несущая частота

$$f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{9 \times 10^{-2}} \approx 3,3 \times 10^9 \text{ Гц} = 3,3 \text{ ГГц}$$

Время синтезирования $T_{\text{син}}$

$$R_n = \frac{H}{\cos \beta} = \frac{300 \times 10^3}{\cos 35^\circ} = 366 \times 10^3 \text{ м} = 366 \text{ км}$$
$$L_c = \frac{\lambda \cdot R_n}{2 \cdot \Delta X} = \frac{9 \times 10^{-2} \cdot 366 \times 10^3}{4 \cdot 25} \approx 659 \text{ м}$$
$$T_{\text{син}} = \frac{L_c}{V} = \frac{659}{7,5 \times 10^3} \approx 87,9 \times 10^{-3} \text{ с} = 87,9 \text{ мс}$$

Элемент разрешения по наклонной дальности

$$\Delta R_n = \Delta Y \sin \beta = 25 \cdot \sin 35^\circ = 14,3 \text{ м}$$

Максимальные и минимальные наклонные дальности

$$L = R_n \cdot \sin \beta + \frac{\Delta L}{2} = 366 \times 10^3 \cdot \sin 35^\circ + \frac{40 \times 10^3}{2} = 230 \times 10^3 \text{ м} = 230 \text{ км}$$

$$R_{H \max} = \sqrt{H^2 + L^2} = \sqrt{(300 \times 10^3)^2 + (230 \times 10^3)^2} = 378 \times 10^3 \text{ м} = 378 \text{ км}$$

$$x = R_H \cdot \sin \beta + \frac{\Delta L}{2} = 366 \times 10^3 \cdot \sin 35^\circ - \frac{40 \times 10^3}{2} = 190 \times 10^3 \text{ м} = 190 \text{ км}$$

$$R_{H \min} = \sqrt{H^2 + x^2} = \sqrt{(300 \times 10^3)^2 + (190 \times 10^3)^2} = 355 \times 10^3 \text{ м} = 355 \text{ км}$$

При расчете периода повторений импульсов, необходимо исключить неоднозначность измерений. Для расчета частоты повторения импульсов необходимо использовать максимальную наклонную дальность в полосе обзора

$$2F_{д \max} \leq F_{\Pi} \leq \frac{c}{2\Delta L \cos \beta}$$

$$\frac{2V}{l_{\alpha}} \leq F_{\Pi} \leq \frac{c}{2\Delta L \cos \beta}$$

$$l_{\alpha} \approx 2\Delta X = 50 \text{ м}$$

$$\frac{2 \cdot 7,5 \times 10^3}{50} \leq F_{\Pi} \leq \frac{3 \times 10^8}{2 \cdot 40 \times 10^3 \cdot \cos 35^\circ}$$

$$300 \text{ Гц} \leq F_{\Pi} \leq 4,58 \times 10^3 \text{ Гц}$$

Выберем $F_{\Pi} = 4 \text{ кГц}$, тогда период повторения импульсов

$$T_{\Pi} = \frac{1}{F_{\Pi}} = \frac{1}{4 \times 10^3} = 250 \times 10^{-6} \text{ с} = 250 \text{ мкс}$$

Скважность импульсов

$$Q = \frac{T_{\Pi}}{\tau_{\Pi}} = \frac{250 \times 10^{-6}}{68,259 \times 10^{-9}} \approx 36,6$$

Количество импульсов в пачке

$$N = \frac{T_c}{T_{\Pi}} = \frac{87,9 \times 10^{-3}}{250 \times 10^{-6}} \approx 351,6$$

2. Расчет размеров полотна антенны

Определим раскрыв антенны и ширину диаграммы направленности луча антенны

$$\Delta \theta_{\beta} = \arcsin \left(\frac{\frac{\Delta L}{2} \sin \beta}{R_{H \min}} \right) = \arcsin \left(\frac{\frac{40 \times 10^3}{2} \sin 35^\circ}{355 \times 10^3} \right) = 32,3 \times 10^{-3} \text{ рад} = 1,85^\circ$$

$$l_{\beta} = \frac{\lambda}{\Delta \theta_{\beta}} = \frac{9 \times 10^{-2}}{32,3 \times 10^{-3}} = 2,8 \text{ м}$$

Выберем раскрыв антенны по азимуту, равным $l_{\alpha} = 10 \text{ м}$

$$\theta_{\alpha} = \frac{\lambda}{2l_{\alpha}} = \frac{9 \times 10^{-2}}{2 \cdot 10} = 4,5 \times 10^{-3} \text{ рад} = 0,258^{\circ}$$

Ширина результирующей синтезированной диаграммы направленности

$$\theta_{\alpha c} = \frac{\lambda}{2L_c} = \frac{9 \times 10^{-2}}{2 \cdot 659} = 68,3 \times 10^{-6} \text{ рад} = 0,039^{\circ}$$

Таким образом ширина луча синтезированной антенны меньше в 66 раз.

3. Определить требуемую мощность передатчика для получения отношения сигнал/шум порядка 10-15 дБ.

Рассчитаем импульсную мощность передатчика, для этого зададимся следующими параметрами:

$$\text{Постоянная Больцмана } k = 1,38 \times 10^{-23} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}$$

$$\text{Шумовая температура } T_{\text{ш}} = 600\text{К}$$

$$\text{Коэффициент использования поверхности } K_{\text{ип}} = 0,5$$

$$\text{Удельная ЭПР поверхности } \sigma_0 = 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$\text{ЭПР цели } \sigma_{\text{ц}} = \sigma_0 \Delta Y \Delta X = 10^{-2} \cdot 25 \cdot 25 = 6,25 \text{ м}^2$$

$$\text{Потери в антенно-фидерном тракте } \eta_p = 5$$

$$\text{Отношение сигнал/шум } q = 15 \text{ дБ}$$

$$\text{Кратность некогерентного накопления } m_0 = 1$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ср}} &= \frac{\frac{q^2}{2} (4\pi)^2 R_{\text{н max}}^4 k T_{\text{ш}} L}{\tau_{\text{и}} \sqrt{m_0} \left(\frac{4\pi l_{\alpha} l_{\beta} K_{\text{ип}}}{\lambda^2} \right)^2 \sigma_{\text{ц}} \cos \beta \lambda^2} \\ &= \frac{\frac{15^2}{2} \cdot (4\pi)^2 \cdot (378 \times 10^3)^4 \cdot 1,38 \times 10^{-23} \cdot 600 \cdot 5}{6,8 \times 10^{-6} \cdot \sqrt{1} \cdot \left(\frac{4\pi \cdot 10 \cdot 2,8 \cdot 0,5}{(9 \times 10^{-2})^2} \right)^2 \cdot 6,25 \cdot \cos 35^{\circ} \cdot (9 \times 10^{-2})^2} \\ &= 4,5 \times 10^3 \text{ Вт} = 4,5 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Средняя мощность передатчика

$$P_{\text{имп}} = \frac{P_{\text{имп}}}{Q} = \frac{4,5 \times 10^3}{36,6} = 124 \text{ Вт}$$

Число каналов по дальности

$$m_r = \frac{\Delta L}{\Delta Y} = \frac{40 \times 10^3}{25} = 1600$$

Число каналов по азимуту

$$m_{\alpha} = \frac{L_c m_0}{\Delta X} = \frac{659 \cdot 1}{25} = 27$$

Общее число каналов

$$m_{\Sigma} = m_r \cdot m_{\alpha} = 43200$$

4. Составить подробную функциональную схему бортового комплекса.

Система с бортовой обработкой предполагает оснащение РСА специальным цифровым процессором (СП). На наземные пункты при этом передается радиоизображение лоцируемой поверхности, пригодное для непосредственного наблюдения.

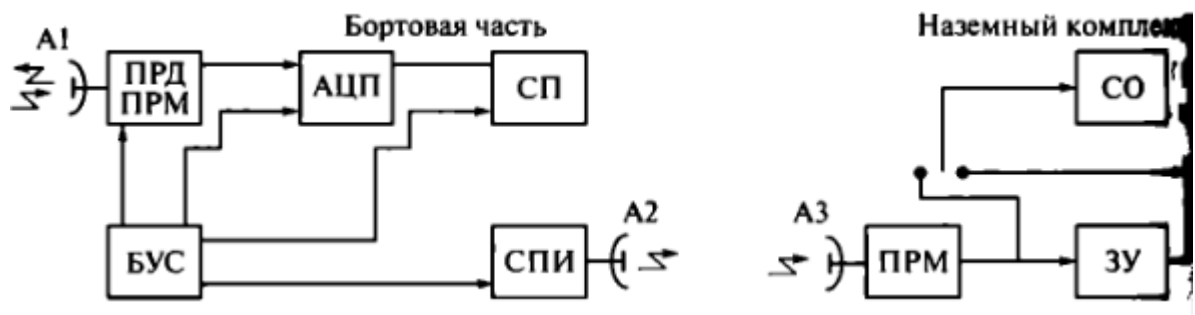


Рисунок 1 – общая функциональная схема комплекса РСА с полной бортовой обработкой сигналов: БУС – блок управления и синхронизации; СО – система отображения; ЗУ – запоминающее устройство

Структурная схема комплекса приведена на рисунке 1. В отличие от систем с наземной обработкой информации представленная система имеет бортовой спецпроцессор СП обработки сигналов в реальном масштабе времени. Наземная часть также существенно проще: в ней отсутствуют высокоинформативные запоминающие устройства ЗУ и ЭВМ наземной обработки.

Данный комплекс обладает следующими преимуществами: информация получается оперативной, передается посредством более простой системы передачи в готовом к потреблению виде и, как следствие, доступна более широкому кругу потребителей. Кроме того, имеются большие возможности для работы вне зоны радиовидимости с наземного пункта приема с запоминанием обработанной информации в бортовом ЗУ.

Основной недостаток комплекса в необходимости располагать на борту сложный бортовой процессор обработки СП. При повышении разрешающих способностей $\Delta x, \Delta y$ сложность процессора резко возрастает по требуемой производительности, по числу

азимутальных m_α и дальномерных m_R каналов, по требуемой емкости запоминающего устройства. Все это затрудняет построение бортового процессора по жесткой, но наиболее экономичной и производительной структуре.

Однако успехи в развитии цифровой техники и современных методов обработки сигналов позволяют быстро продвигаться по пути повышения производительности и компактности бортовых процессоров.

Составим и рассчитаем алгоритм работы системы с приведением временных диаграмм и общей функциональной схемы. В рассматриваемой системе эхо-сигналы (рисунок 2) поступают на прием относительно начала зондирования с начальной задержкой

$$t_{\text{нач}} = \frac{2R_{H\min}}{c} = 2,368 \text{ мс.}$$

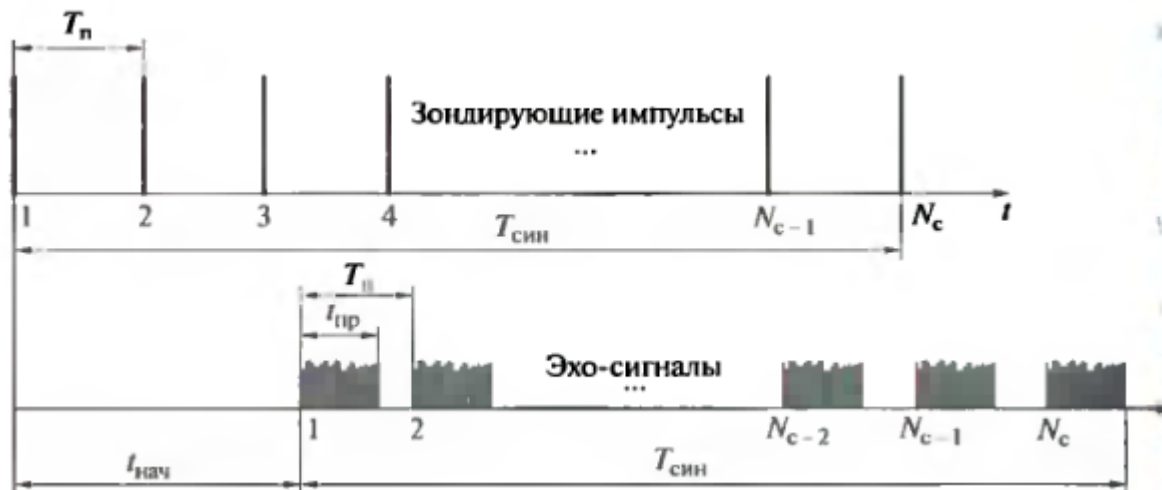


Рисунок 2 – временные диаграммы зондирующего и эхо-импульсов в космической системе РСА

При этом необходимо добиваться, чтобы время $t_{\text{нач}}$ равнялось целому числу периодов зондирования T_n с тем, чтобы эхо-сигналы от всей полосы обзора по дальности ΔL всегда попадали в паузу приема $t_{\text{пр}}$, поэтому $t_{\text{нач}} = 2,5 \text{ мс.}$

Так как в космических РСА для повышения энергетического потенциала используются сигналы сложной формы, то сначала производится обработка (сжатие) сложных сигналов при помощи “быстрых сверток”, также на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). При сжатии эхо сигналы разделяются по элементам разрешения по дальности Δu и в виде цифровых многозарядных выборок поступают на процессор синтеза СП (рисунок 3). Такая раздельная обработка возможна потому, что в РСА доплеровское смещение относительно невелико, и сложный зондирующий импульс длительностью 20...30 мкс при сжатии не подвергается заметному искажению.

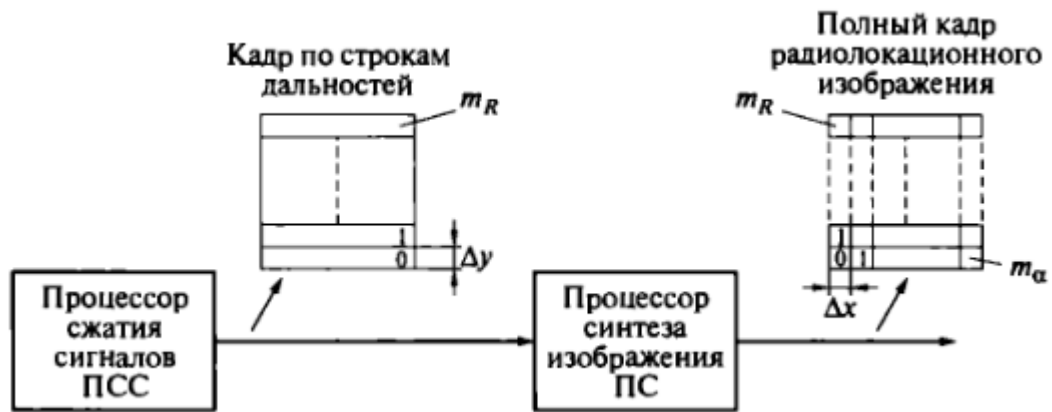


Рисунок 3 – функциональная схема системы обработки сигналов РСА при зондирующем сигнале сложной формы

5. Обосновать алгоритм и рассчитать систему цифровой обработки сигнала, составить функциональную схему с указанием ее характеристик и требуемой производительности.

Рассмотрим подробнее работу процессора сжатия сложных сигналов (ПСС). Современным решением является цифровая быстрая свертка в спектральной области на основе БПФ. Алгоритм быстрой свертки имеет вид:

$$\dot{y}(m) = \text{ОБПФ}[\text{БПФ}\{\dot{x}(n)\} * \text{БПФ}\{\dot{S}(k)\}],$$

где $\dot{y}(m)$ – отсчеты сжатых сигналов; $\dot{x}(n)$ – отсчеты эхо-сигналов в полосе обзора ΔL ; $\dot{S}(k)$ – отсчеты, описывающие зондирующий сигнал (опорная функция). Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 4.

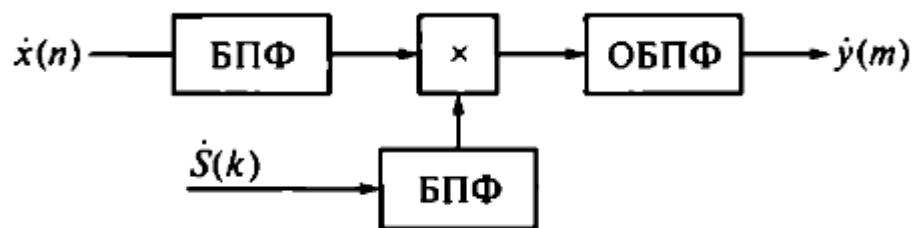


Рисунок 4 – функциональная схема алгоритма быстрой свертки в спектральной области

“Быстрым” метод называется потому, что ДПФ и ОДПФ вычисляется с помощью БПФ и ОБПФ, что многократно снижает вычислительные затраты. Так при прямой свертке последовательностей длиной $N = 5000$ отсчетов требуется $N^2 = 25000000$ умножений, при использовании алгоритма “быстрой” свертки - $N(\log_2 N + 1) = 66440$ умножений, что дает 376-кратную экономию.

Так как последовательности отсчетов $\dot{x}(n)$ и $\dot{S}(k)$ с длинами N_1 и N_2 соответственно отличаются по длине, то нужно дополнить эти последовательности нулями и вычислять линейную свертку с помощью круговой. Ясно, что последовательность $\dot{y}(m)$ является конечной и имеет длину $N_3 = N_1 + N_2 + 1$ отсчетов.

Однако, при большом различии длин последовательностей $\dot{x}(n)$ ($N_1 = 5000$) и $\dot{S}(k)$ ($N_2 = 530$) для полной реализации указанных выше преимуществ, а так же для устранения большой задержки (в виду того, что обработка начинается после приема всей последовательности $\dot{x}(n)$) в алгоритме необходима специальная организация процесса вычислений и массива исходных данных $\dot{x}(n)$. Для этого будем применять секционированную свертку с использованием метода перекрытия с суммированием, разбиением на секции.

При реализации алгоритма быстрой свертки можно сделать допущение относительно приведенной схемы. Можно исключить блок БПФ опорного сигнала, и на комплексный перемножитель подавать отсчеты спектральной составляющей. Таким образом можно уменьшить вычислительную нагрузку на процессор сжатия.

6. Список используемых источников

- 1) Лукашенко Ю.И. Космические радиолокаторы с синтезированным раскрывом антенны. Москва. МЭИ. 1992 г.
- 2) Баскаков А.И., Жутяева Т.С., Лукашенко Ю.И. Локационные методы исследования объектов и сред. М.: Издательский центр «Академия». 2011 г.

7. Приложения

Задание на курсовой проект:

Задание на выполнение курсового проекта по дисциплине

«Радиотехнические системы дистанционного зондирования Земли»

Студенту Жеребину В.Р.

Радиолокационная система с синтезированным раскрытием антенны для

спутника Земли с требуемыми тактическими характеристиками:

разрешение на поверхности $\Delta X = \Delta Y = 25$ м, с динамическим диапазоном изображения $B = 30\text{ дБ}$ полосой обзора по дальности на поверхности $\Delta S = 40\text{ км}$, углом визирования $\beta = 35^\circ$, высотой 300 км и скоростью полета $7,5\text{ км/с}$, с длиной радиоволны передатчика $\lambda = 9$ см. Обработка бортовая с возможным некогерентным накоплением по кадрам изображения.

Выполнить: 1) обосновать и рассчитать характеристики зондирующего сигнала: вид сигнала, τ_n , ΔF , T_n .

2) Составить подробную функциональную схему бортового комплекса.

3) Рассчитать размеры полотна антенны.

4) Обосновать алгоритм и рассчитать систему обработки сигнала, составить функциональную схему с указанием ее характеристик и требуемой производительности.

6) Определить требуемую мощность передатчика для получения отношения сигнал/шум порядка 10-15.

7) Пояснительная записка и чертежи по согласованию с Руководителем

Вопросы и уточнения на консультации.

Литература.

1. Ю.И. Лукашенко. Космические радиолокаторы с синтезированным раскрытием антенны. Москва. МЭИ. 1992 г.

2. А.И. Баскаков, Т.С. Жутяева, Ю.И. Лукашенко. Локационные методы исследования объектов и сред. М., Издательский центр «ААДЕМИЯ», 2011 г.

Руководитель курсового проекта проф. Лукашенко Ю.И. каф. РТП и АФУ.

Студент:

Дата: 4.02.2020