

УДК 621.396

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ СОЗДАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
КОМПЛЕКСОВ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ
АНАЛИЗА ОТНОШЕНИЯ ПРАВДОПОДОБИЯ КОРРЕЛЯЦИОННО-
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ПОЛУЧЕННОЙ И
СИНТЕЗИРОВАННОЙ РАДИОГОЛОГРАММ**

В. В. Груздов¹, А. Н. Леухин², В. К. Слока³

¹АО «Научно-производственное предприятие «Пульсар»,
105187, г. Москва, Окружной проезд, дом 27

²Марийский государственный университет, 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 1

³АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца»,
127083, Москва, ул. 8 Марта, д.10, стр. 1

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2018 г.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы построения математической модели радиолокационного комплекса космического базирования с синтезированной апертурой антенны для решения задач формирования и первичной обработки цифровых радиоголограмм различных диапазонов радиоволн с учетом технических особенностей построения бортовой аппаратуры. На базе разработанной математической модели разработан метод комплексного имитационного моделирования процесса создания радиолокационных комплексов космического базирования с целью минимизации рисков и стоимости работ на всех этапах жизненного цикла.

Ключевые слова: радиолокационный комплекс космического базирования, управление процессами создания, математическая модель, цифровая радиоголограмма, анализ радиолокационных изображений.

Abstract. The problems of constructing a mathematical model of a space-based radar complex with a synthesized antenna aperture for solving the problems of the formation and primary processing of digital radio holograms of various radio-wave ranges are considered, taking into account the technical features of the onboard equipment construction. The main stages of the development of complex technical

systems and work, regulated for the process of designing a complex system, are given. The principles of operation of the space-based radar complex with synthesized antenna aperture are described. On the basis of the developed mathematical model, a concept is proposed and a method for complex simulation and control modeling of the technological process of creating space-based radar complexes is developed with the aim of minimizing the risks and cost of work in the life cycle of the space-based radar.

Key words: space-based radar complex, management of creation processes, mathematical model, digital radio hologram, analysis of radar images.

1. Введение

Разработка и создание перспективных радиолокационных комплексов космического базирования (РЛК КБ) является сложным процессом, который связан с поиском новых технических решений и технологий, а также с оценкой их эффективности с позиций технической, технологической и производственной реализуемости при заданных ресурсных и временных ограничениях. При создании сложных радиотехнических систем выделяют следующие этапы [1]: аванпроект (техническое предложение); эскизный проект; технический проект; разработка рабочей конструкторской документации на изделие; изготовление опытного экземпляра изделия; испытания опытного экземпляра изделия; подготовка документации на изделия серийного производства. В ходе каждого из этапов выполняются различные работы, регламентированные для процесса создания изделия и влияющие на степень успешности выполнения поставленных требований.

Стоит отметить, что современные РЛК КБ включают большое число составных частей с различными связями между ними и обладают свойствами, характерными для сложных систем [2]. Это приводит к возрастанию количества различных вариантов компоновки РЛК КБ и появлению зависимости показателей эффективности его создания от ряда факторов, характеризующих процессы разработки и производства. Соответственно, в процессе создания

РЛК КБ из всего многообразия вариантов и параметров элементов системы необходимо выбирать наилучшие (оптимальные), учитывая высокую степень их неопределенности, а также условий применения будущей системы. В зависимости от объема данных об исследуемых факторах, характеризующих процесс разработки РЛК КБ, определяется возможность его формализации теми или иными методами. В большинстве случаев эффективность проектирования обусловлена возможностью использования наборов базовых моделей для решения многих задач и выполнение на их основе имитационно-управляющего моделирования процесса создания РЛК КБ.

2. Анализ существующих методов управления процессом создания сложных технических систем

▪ Управление процессом создания авиационных комплексов радиолокационного дозора и наведения

Необходимость значительного повышения эффективности и снижения стоимости жизненного цикла предопределила разработку на основе авиационных комплексов радиолокационного дозора и наведения многофункциональной информационно-управляющей системы, что предполагает расширение числа используемых информационных и управленческих режимов. Основным направлением развития данной системы является интегрирование всех информационных датчиков в единую систему с использованием методов искусственного интеллекта и способов адаптивного управления. Данная модель контроля и управления процессом создания авиационных комплексов радиолокационного дозора и наведения оперирует лишь укрупненными блоками функциональной схемы системы и не позволяет осуществлять контроль за отдельными элементами в составе крупного блока, например, не учитывает отклонения параметров отдельных электронных компонентов от номинальных значений [2].

▪ Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения

Предлагаемый подход [1,2] к созданию системы управления рисками

может быть использован при разработке крупных автоматизированных технических систем и комплексов. В рамках этого подхода можно выделить ряд определяющих этапов, которые необходимо реализовать в ходе разработки системы:

- Создание модели рисков.
- Формирование платформенных аппаратно-программных решений, обеспечивающих высокую степень унификации при разработке и создании продуктового «ряда» аналогичных систем, и позволяющие максимизировать объемы работ, выполняемых в условиях, близких к лабораторным.
- Использование самых современных инструментов для всех видов работ по созданию и вводу системы.
- Создание и последующее использование в работе стенда Генерального конструктора, обеспечивающего формирование электронной (программной) модели создаваемой.

▪ Управление процессом создания радиолокационных систем наблюдения Земли космического базирования

Традиционно методы управления процессом создания радиолокационных систем наблюдения Земли космического базирования включают в себя создание бортового сегмента в виде радиолокатора, реализующего технологию синтезирования апертуры, и наземного сегмента, представляющего собой вычислительный комплекс, решающего задачи обработки отраженного от земной поверхности сигнала с целью получения радиолокационного изображения наблюдаемой поверхности с заданным разрешением [3-5].

Полный объем испытаний РСА, как правило, включает четыре этапа [6]:

1. Теоретические оценки характеристик сквозного тракта РСА;
2. Оценки потенциальных характеристик РСА по пилот-сигналу в ходе наземных испытаний;
3. Повтор оценок потенциальных характеристик РСА по пилот-сигналу на первом этапе летных испытаний, когда КА уже находится на орбите;

4. Оценки реальных характеристик РСА по радиолокационным мирам.

На основании сравнительного анализа РЛИ одних и тех же участков Земли получают экспериментальное подтверждение правильности работы РСА в штатных режимах.

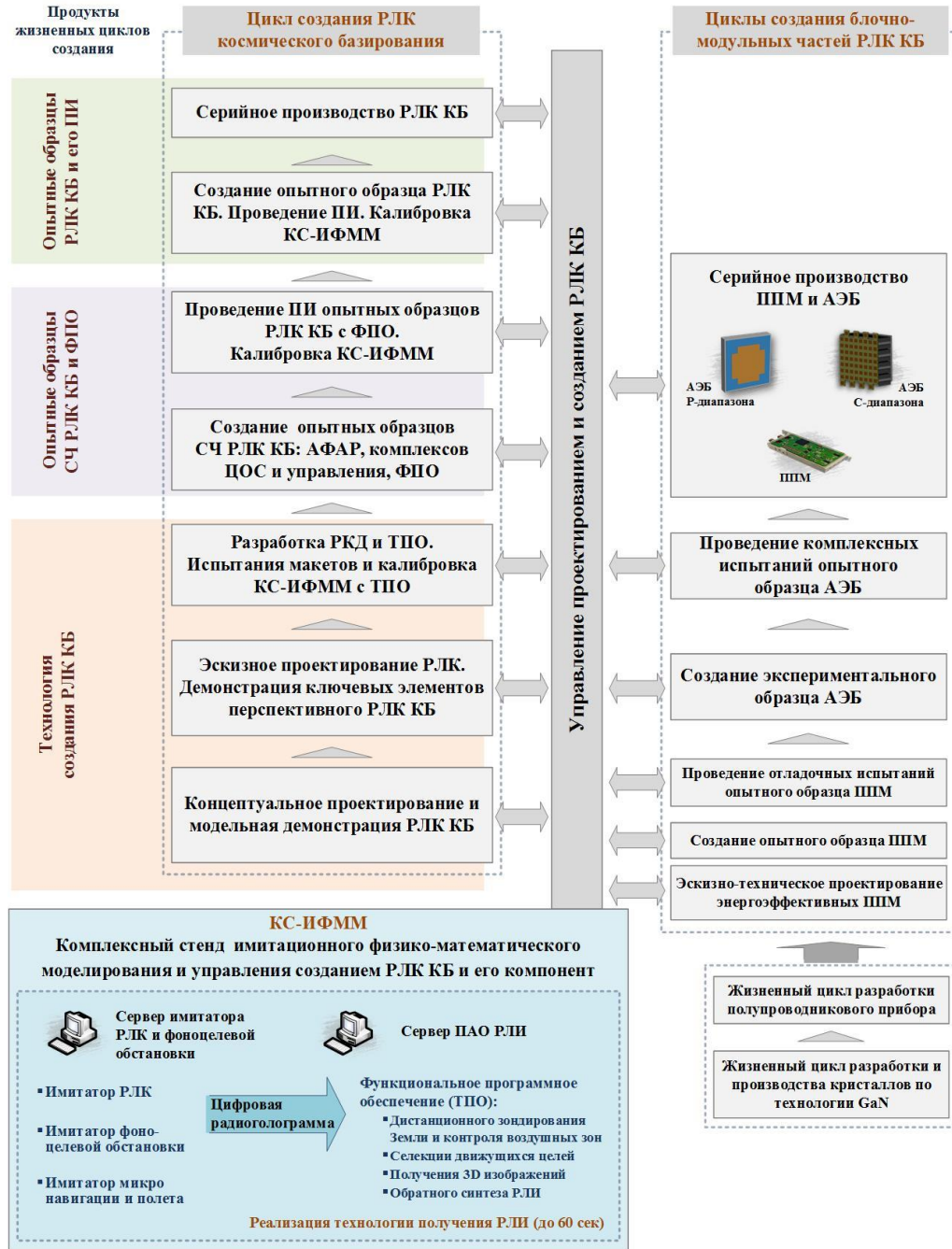


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-алгоритмической платформы проектирования и создания высокотехнологичных радиолокационных комплексов космического базирования

Анализ известных методов управления созданием РЛК КБ показал, что на современном этапе существует возможность повышения их эффективности за счет разработки сложных радиотехнических систем с использованием методов математического моделирования, позволяющих обеспечить создание продукции в заданные сроки и снизить стоимость ее изготовления за счет обеспечения контроля и управления процессом создания РЛК КБ на специальном сконструированном комплексном стенде имитационного физико-математического моделирования (КС-ИФММ) и управления созданием РЛК КБ и его компонентов. На рисунке 1 представлена структурная схема аппаратно-алгоритмической платформы проектирования и создания высокотехнологичных радиолокационных комплексов космического базирования.

3. Математическая модель построения РСА

3.1. Принцип работы РЛК с РСА

Принцип действия радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА) поясняет рисунок 2 [3-11].

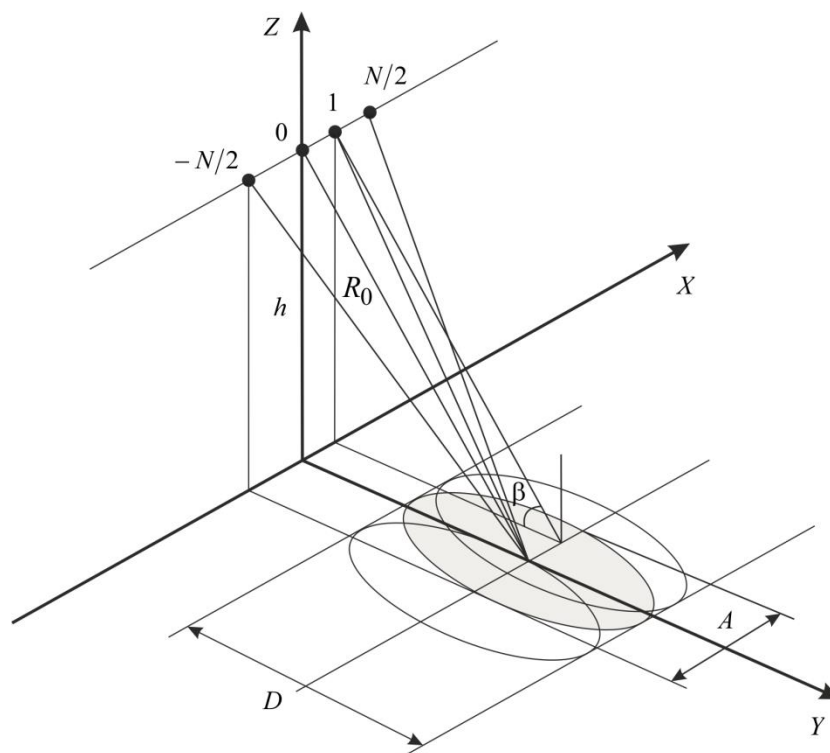


Рис.2. Принцип действия РСА.

Антенна, установленная на носителе, в соответствии со своей диаграммой направленности (ДНА) высвечивает на поверхности земли радиолокационное пятно, форма которого зависит от диаграммы направленности антенны. Размер этого пятна в направлении движения аппарата, или в азимутальном направлении, обозначим A . Размер в ортогональном направлении, или в направлении горизонтальной дальности от аппарата, – D .

Пусть точечная цель облучается последовательностью радиоимпульсов в моменты времени $t_{-N/2}, \dots, t_{-1}, t_0, t_-, t_0, \dots, t_{N/2}$.

В момент времени $t_{-N/2}$ приходит первый, отраженный от цели импульс, в $t_{N/2}$ последний. В течение этого времени антенна перемещается в пространстве на расстояние $L_s = A$, которое называют длиной синтезированной апертуры.

Каждый m -й отражённый радиоимпульс в этой пачке получает задержку $\tau_m = 2R_m/c$, фазовый сдвиг несущего колебания $\varphi_m = 4\pi R_m/\lambda$ и некоторый амплитудный коэффициент, модулированный диаграммой направленности антенны (ДНА) G_m , зависящие от момента излучения импульса t_m :

$$u_m(t) = \text{Re} \left[G_m \dot{U}_M(t - \tau_m) \cdot e^{i(\omega_0 t - \varphi_m)} \right].$$

Множество полученных таким образом отраженных сигналов удобно изображать в виде матрицы размером $N \times M$, которую принято называть радиоголограммой, где $N = A/r_a$ – размер радиолокационного пятна по азимуту в дискретах r_a , $M = D/r_d$ – размер радиолокационного пятна по наклонной дальности в дискретах r_d .

Как видно из рисунка 2, каждая строка матрицы содержит информацию обо всей полосе изображения. Строго говоря, с помощью радиоголограммы размером $N \times M$ можно получить лишь один столбец изображения с требуемым разрешением $\Delta x \ll A$.

Разрешающая способность РСА по наклонной дальности зависит от типа зондирующего сигнала и определяется эффективной полосой частот сигнала,

$$\text{т. е. } \Delta r = \frac{c}{2\Delta f}.$$

Разрешение поперек линии пути связано с разрешением станции по наклонной дальности и углом наблюдения:

$$\Delta y = \frac{\Delta r}{\cos \beta},$$

где Δr – разрешение по наклонной дальности, β – угол скольжения, отсчитываемый от горизонтальной плоскости.

Линейное разрешение по путевой дальности определяется длиной синтезированной антенны и наклонной дальностью:

$$\Delta x = \frac{\lambda R}{2L_s}.$$

Величина предельного разрешения ограничена только горизонтальным размером антенны D_x и равна:

$$\Delta x_{\min} = \frac{\lambda R}{2L_s} = \frac{D_x}{2}.$$

В РСА «невысокого» разрешения достаточно проанализировать квадратичную аппроксимацию $R(t)$ в окрестности точки траверза цели $t_{\text{тр}} = t_0$:

$$R(t) = \sqrt{R(t_{\text{тр}})^2 + (V(t - t_{\text{тр}}))^2} \approx R(t_{\text{тр}}) + \frac{V^2}{2R(t_{\text{тр}})}(t - t_{\text{тр}})^2.$$

Таким образом, комплексная огибающая пачки отражённых импульсов определяется ДНА и квадратичным фазовым набегом, который эквивалентен линейной частотной модуляции пачки импульсов, так как:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(t) \approx \frac{2V^2}{\lambda R(t_{\text{тр}})}(t - t_{\text{тр}}).$$

Частотную модуляцию пачки отражённых импульсов можно объяснить эффектом Доплера, возникающим вследствие движения летательного аппарата.

Данная линейная частотная модуляция огибающей пачки отражённых импульсов имеет полосу частот $\Delta f_{\text{огиб}} = 2VL_s / \lambda R$.

Максимальное квадратичное смещение отражённых импульсов по оси задержки, носит название эффекта миграции дальности. В САР «невысокого» разрешения данное смещение, как правило, меньше разрешающей способности РСА по задержке $\Delta \tau$.

Комплексная огибающая пачки импульсов не что иное, как дискретное представление ЛЧМ импульса. Воспользовавшись этим фактом можно сжать этот сигнал вдоль оси X до величины:

$$\Delta x = \frac{V}{\Delta f_{\text{огиб}}} = \frac{\lambda R}{2L_s},$$

воспользовавшись, например, согласованным с этим сигналом фильтром.

То есть азимутальное разрешение РСА не зависит от расстояния до цели, длины волны, скорости полёта и т.п., и определяется только длиной азимутального раскрыва антенны, причём, чем он меньше, тем выше разрешающая способность РСА. Чем меньше апертура реальной антенны, тем больше L_s , тем больше отношение длины синтезированной антенны к длине волны, которое можно сделать сколь угодно большим. Таким образом, особенность РСА в необходимости совместной когерентной обработки пачки отражённых импульсов длиной $N = 2L_s / \Delta x$.

3.2. Факторы, определяющие значения отсчетов радиоголограммы

Голограмма представляет собой двумерный массив комплексных величин, значения которых являются сложными функциями, зависящими от вида зондирующего сигнала (законов модуляции, полосы, несущей частоты, поляризации), параметров аппаратуры РЛК КБ (частота дискретизации, мощность передатчика, чувствительность приемника, характеристик цифровых и аналоговых фильтров), параметры антенны (угол наклона, вид диаграммы направленности, ширина диаграммы направленности, ориентация приемной и передающей антенн и т.д.), траектории и скорости полета носителя, среды

распространения сигналов, поверхности и электромагнитных свойств подстилающей поверхности и т.д.

3.3. Графическое представление алгоритма сравнения радиоголограмм

Исходная радиоголограмма имеет вид:

$$\mathbf{u}_\vartheta^m = \left\{ u_n^{(m)} \right\} = \left\{ |u_n^{(m)}| e^{i\varphi_n^{(m)}} \right\},$$

по которой можно построить эталонное радиолокационное изображение с помощью комплексной физико-математической модели.

Функциональная схема формирования РЛИ представлена на рисунке 3, где $H_1(t, f_a)$, $H_2(f_r, f_a)$ и $H_3(f_r, f_a)$ множители чирп-масштабируемой обработки.

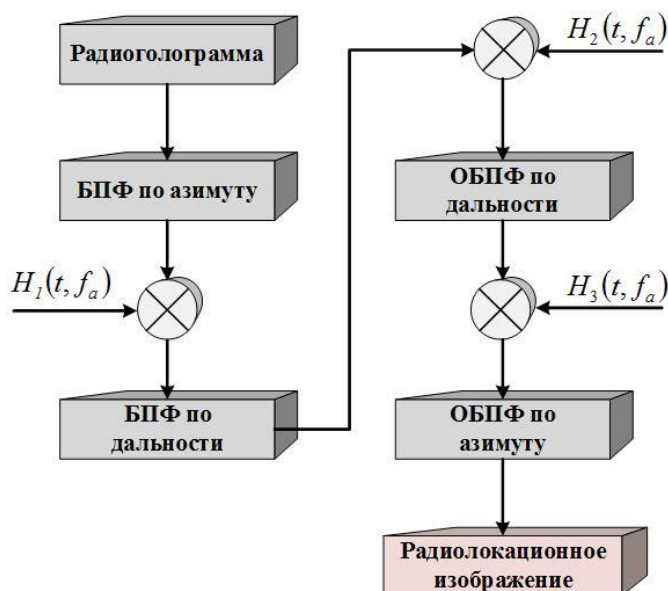


Рис. 3. Функциональная схема формирования РЛИ изображения с использованием чирп-масштабируемого алгоритма

$H_1(t, f_a)$ - масштабируемый множитель, который зависит от наклонной дальности r . Поэтому вычисления производятся для некоторой референсной дальности R_{ref} , выбираемой, как правило, в середине диапазона дальностей.

Это умножение минимизирует величину деформаций сигнала, обусловленных доплеровскими сдвигами, а фазовые центры всех сигналов будут повторять траекторию фазового центра опорного сигнала.

$$H_1(t, f_a; R_{ref}) = e^{-i\pi K_s(f_a; R_{ref}) C_s(f_a) (t - t_{ref}(f_a))^2},$$

где

$$C_s(f_a) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_s}\right)^2}} - 1, \quad K_s(f_a) = \frac{k_r}{1 + k_r \frac{2\lambda}{c_0^2} \frac{\left(\frac{\lambda f_a}{2v_s}\right)^2}{\left(1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_s}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}},$$

$$t_{ref}(f_a) = \frac{2}{c_0} [r + R_{ref} C_s(f_a)],$$

t - время, c_0 - скорость света, λ - длина волны

зондирующего сигнала, f_a - «азимутальная» частота, v_s - скорость носителя.

$H_2(f_r, f_a)$ - частотный коэффициент фильтра сжатия по дальности:

$$H_2(f_r, f_a) = e^{-i\pi \frac{f_r^2}{K_s(f_a; R_{ref})(1 + C_s(f_a))}} \times e^{-i\frac{4\pi}{c_0} f_r R_{ref} C_s(f_a)}.$$

$H_3(f_r, f_a)$ - спектральная опорная функция для сжатия сигнала по азимуту:

$$H_3(f_r, f_a) = e^{i\frac{4\pi R_0}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v_s}\right)^2} - i\frac{2\pi}{\lambda} c_0 t + i\Theta_\Delta(f_a; R_0)}.$$

Таким образом, построенное на основе принятой радиоголограммы радиолокационные изображения позволяют провести однозначную оценку о работоспособности РЛК КБ в заданных условиях и могут быть использованы для разработки методов управления и контроля процессов создания РЛК КБ.

4. Структура метода

Управление процессами создания РЛК КБ на основе анализа отношения правдоподобия корреляционно-экстремальных функций полученной и синтезированной радиоголограмм [12-13] можно представить следующим образом:

- 1) Математическая модель синтезированной эталонной радиоголограммы

$\mathbf{u}_s^m = \{u_n^{(m)}\} = \left\{ |u_n^{(m)}| e^{i\varphi_n^{(m)}} \right\}$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ - номер отчета m -ой эталонной радиоголограммы, N - количество отчетов в эталонной радиоголограмме, $|u_n^{(m)}|$ - амплитуда n -го отчета радиоголограммы, $\varphi_n^{(m)}$ - фаза n -го отчета радиоголограммы, i - мнимая единица;

2) Математическая модель синтезированной эталонной радиоголограммы с учетом линейных искажений

$$\mathbf{u}^{(c)} = \left\{ |u_{n+\tau}^{(c)}| u_{n+\tau}^{(m)} e^{i[\Delta\varphi_n + \varphi_{n+\tau}]} \right\},$$

$|u_n^{(c)}|$ - амплитуда n -го отчета принятой радиоголограммы, $\Delta\varphi_n$ - набег фазы n -го отчета принятой радиоголограммы, τ - задержка.

3) Математическая модель шума

$$\mathbf{Z} = \{\zeta_n\}_{0, N-1} = \left\{ \zeta_n^{\text{Re}} + i\zeta_n^{\text{Im}} \right\}_{0, N-1}.$$

Реальная ζ_n^{Re} и мнимая ζ_n^{Im} составляющие каждого шумового отсчёта ζ_n , $n = 0, \dots, N-1$ являются независимыми для любого n и обладают следующими характеристиками:

$$M(\zeta_n^{\text{Re}}) = M(\zeta_n^{\text{Im}}) = 0 \text{ - математическое ожидание,}$$

$$D(\zeta_n^{\text{Re}}) = D(\zeta_n^{\text{Im}}) = \sigma^2 \text{ - дисперсия,}$$

$$K(\zeta_n^{\text{Re}}, \zeta_n^{\text{Im}}) = K(\zeta_s^{\text{Re}}, \zeta_n^{\text{Re}}) = K(\zeta_s^{\text{Im}}, \zeta_n^{\text{Im}}) = \sigma^2 \cdot \delta(s - n) \text{ -}$$

корреляционная функция,

$$s, n = 0, 1, \dots, N-1, \text{ где } \delta(s - n) = \begin{cases} 1 & \text{при } n = s \\ 0 & \text{при } n \neq s. \end{cases} \text{ - символ Кронекера,}$$

реальная ζ_n^{Re} и мнимая ζ_n^{Im} подчиняются нормальному закону распределения.

Случайная величина ζ_n является комплексной, поэтому её математическое ожидание и дисперсия будут равны $M(\zeta_n) = 0$,

$D(\zeta_n) = 2\sigma^2$, $n = 0, \dots, N - 1$. Плотность распределения произвольного n -

го отсчёта шума $P(\zeta_n^{\text{Re}}, \zeta_n^{\text{Im}}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(\zeta_n^{\text{Re}})^2 + (\zeta_n^{\text{Im}})^2}{2\sigma^2}}$.

4) Математическая модель принятой радиоголограммы

$$\mathbf{N} = \mathbf{u}^{(c)} + \mathbf{Z} = \{v_n\} = \{u_n^{(c)} + \zeta_n\}_{0, N-1} = \{v_n^{\text{Re}} + i v_n^{\text{Im}}\} = \left\{ |v_n^{(m)}| e^{i\psi_n^{(m)}} \right\}_{0, N-1}$$

$|v_n^{(m)}|$ - амплитуда n -го отчета принятой радиоголограммы, $\psi_n^{(m)}$ - фаза n -го отчета принятой радиоголограммы, v_n^{Re} и v_n^{Im} - реальная и мнимая части принятой радиоголограммы, $n = 0, 1, \dots, N - 1$ - номер отчета m -ой принятой радиоголограммы, N - количество отчетов в принятой радиоголограмме,

Произвольный отчет принятой радиоголограммы v_n является двумерной случайной величиной. Тогда совместная плотность распределения произвольного n -го отчета принятой радиоголограммы с учетом влияния шума определится следующим образом:

$$P(v_n^{\text{Re}}, v_n^{\text{Im}}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(v_n^{\text{Re}} - \gamma_n^{\text{Re}})^2 + (v_n^{\text{Im}} - \gamma_n^{\text{Im}})^2}{2\sigma^2}}$$

5) Правило принятия решения о работоспособности компонентов РКЛ КБ по виду принятой радиоголограммы

Правило принятия решения о работоспособности компонентов РКЛ КБ в обоснованном принятии решения, соответствует ли принятая радиоголограмма

$$\mathbf{N} = \mathbf{u}^{(c)} + \mathbf{Z} = \{v_n\}_{0, N-1} \text{ синтезированной эталонной } \mathbf{u}_s^m = \{u_n^{(m)}\}_{0, N-1}.$$

6) Функция правдоподобия принятой голограммы

Функция правдоподобия принятой радиоголограммы:

$$\Lambda_c(\mathbf{N} / |u^{(c)}|, \tau, \Delta\varphi) = c \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2} [\|\mathbf{N}\|^2 + \|u^{(c)}\|^2 - 2\text{Re}(\mathbf{N}, u^{(c)})]}$$

$|u^{(c)}|$ - масштабный множитель, учитывающий разницу энергий принятой и синтезированной эталонной радиоголограммы, $\Delta\varphi$ - разница фаз между синтезированной эталонной и принятой радиоголограммами, τ - задержка между синтезированной эталонной и принятой радиоголограммами, $\|\mathbf{N}\|$ - энергия принятой радиоголограммы, $\|\mathbf{u}^{(c)}\|$ - энергия синтезированной радиоголограммы, $\text{Re}(\mathbf{N}, \mathbf{u}^{(c)})$ - реальная часть скалярного произведения принятой радиоголограммы и синтезированной эталонной радиоголограммы, c - константа.

7) Принятие решения

Логарифм безусловного отношения правдоподобия будет равен:

$$\ln \Lambda_c(\mathbf{N} / |u^{(c)}|, \tau, \Delta\varphi) = \ln \left(\frac{\Lambda_c(\mathbf{N} / |u^{(c)}|, \tau, \Delta\varphi)}{\Lambda(\mathbf{Z})} \right) = -\frac{1}{2\sigma^2} \left(\|\mathbf{u}^{(c)}\|^2 - 2\text{Re}(\mathbf{N}, \mathbf{u}^{(c)}) \right)$$

При различных параметрах линейных искажений эталонной радиоголограммы $|u^{(c)}|, \tau, \Delta\varphi$.

Определяется максимум логарифма безусловного отношения правдоподобия

$$\max \Lambda_c = \max_{|u^{(c)}|, \tau, \Delta\varphi} \left(\ln \Lambda_c(\mathbf{N} / |u^{(c)}|, \tau, \Delta\varphi) \right)$$

Для окончательного принятия решения необходимо сравнить максимум логарифма безусловного отношения правдоподобия с пороговым значением U_0 :

$$\max \Lambda_c \geq U_0.$$

Пороговое значение U_0 задает допустимое отклонение компонента РЛК КБ от его ТТХ. Если значение $\max \Lambda_c$ больше порогового значения U_0 , то

принимается решение о готовности компонента (модуля) РЛК КБ. В противном случае требуется уточнение и доработка компонента.

5. Заключение

С целью обеспечения создания РЛК КБ с требуемыми Заказчиком характеристиками при заданных ограничениях на срок создания изделия необходима своевременная и количественно обоснованная корректировка технологических процессов создания РЛК КБ, осуществляемая за счет оперативного выявления рассогласования текущих параметров компонентов создаваемого РЛК с требуемыми характеристиками.

Принципиальной особенностью корректировки технологических процессов является построение на основе принятой радиоголограммы радиолокационных изображений, что позволяет проводить однозначную оценку работоспособности РЛК КБ в заданных условиях и создает необходимые условия для решения задач по оперативному управлению и контролю процессов создания РЛК КБ.

Литература

1. Боев С.Ф., Ступин Д.Д., Кочкаров А.А. и др. Мощные надгоризонтные РЛС дальнего обнаружения: разработка, испытания, функционирование. Под редакцией С.Ф. Боева. М.: Радиотехника, 2013. 168 с.
2. Боев С.Ф., Ступин Д.Д., Кочкаров А.А. Особенности управления реализацией системных проектов в высокотехнологичных отраслях // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2013. № 1. С. 113-121.
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г. С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
4. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под общей ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.

5. Неронский Л.Б. Перспективы развития методов и систем радиолокационного наблюдения космического базирования // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2011. №11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov11/14/text.pdf>

6. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В.Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.

7. Бабокин М.И. Оценка состояния взволнованной морской поверхности с помощью РСА // Радиотехника. 2009. №11. С.5-14.

8. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э. и др. Итоги и уроки летных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // Доклад VI Всероссийских Армандовских чтений, МИ ВлГУ, Муром, 31 мая по 2 июня 2016г., 36 с.

9 Кондратенков Г.С., Колтышев Е.Е., Фролов А.Ю., Янковский В.Т. Фазовый портрет объектов в РЛС с синтезированной апертурой // Радиотехника. 2000. № 8. С. 6-13.

10. Osipov I.G., Neronskiy L.B., Turuk V.E., Andrianov V.I., Verba V.S., Korolev A.V., Kulikovskiy M.G., Pushkov D.V., Janushevskiy G.D., Feyzulla N.M., Panteleev V.A. Synthetic Aperture Radar for Earth and Sea Surface Observations // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 24–28 2004. Vol. 1. Pp. 59-62.

11. Бабокин М.И., Цветков О.Е. Алгоритмы интерферометрической обработки сигналов РСА при идентификации движущихся целей // Радиотехника. 2012. №10. С. 87-92.

Ссылка на статью:

В. В. Груздов, А. Н. Леухин, В. К. Слока. Управление процессами создания радиолокационных комплексов космического базирования на основе анализа отношения правдоподобия корреляционно-экстремальных функций полученной и синтезированной радиоголограмм. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb18/7/text.pdf>