

С.О. Грачев, В.А. Доброжанский, А.Ю. Егоров

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ $\alpha\beta$ -ФИЛЬТРА

Учебное пособие

ПИШ РПИ МФТИ
2023

| | |
|--|--|
| Введение..... | 4 |
| 1 Теоретические сведения | 6 |
| 1.1 Вторичная обработка радиолокационной информации с использованием $\alpha\beta$ -фильтра..... | 6 |
| 1.1.1 Система сопровождения воздушного объекта..... | 6 |
| 1.1.2 Элементы теории оценивания | 9 |
| 1.2 Оценка параметров движения сопровождаемого воздушного объекта..... | 15 |
| 1.3 Расчет ошибок оценивания параметров движения сопровождаемого воздушного объекта..... | 17 |
| 1.4 Дальность действия радиолокационной станции | 18 |
| 1.4.1 Шум приемника | 23 |
| 1.4.2 Отношение сигнал-шум | 25 |
| 1.4.3 Суммарные потери | 25 |
| 1.4.4 Дальность прямой видимости радиолокационной станции | 28 |
| 1.5 Обзор пространства | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.5.1 Сектор обзора..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.5.2 Период обзора | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.5.3 Способы обзора пространства..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.6 Обнаружение целей | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.6.1 Вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.6.2 Флуктуации сигнала цели..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.7 Завязка трасс целей..... | Ошибка! Закладка не определена. |

| | |
|--|--|
| 1.7.1 Завязка трасс в математических стробах | Ошибка! |
| Закладка не определена. | |
| 1.7.2 Завязка трасс в физических стробах | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.7.3 Накопленная вероятность завязки трассы..... | Ошибка! |
| Закладка не определена. | |
| 1.8 Моделирование движения воздушных объектов..... | 28 |
| 1.8.1 Маневр «Разворот» | 32 |
| 1.8.2 Маневр «Изменение высоты»..... | 32 |
| 1.8.3 Маневр «Изменение скорости» | 33 |
| 1.9 Унифицированный язык моделирования | 33 |
| 2 Постановка инженерной задачи | 40 |
| 3 Ход работы..... | 42 |
| 3.1 Исходные данные для расчета | 42 |
| 3.2 Проектирование архитектуры программного обеспечения | 43 |
| 3.3 Расчет траектории движения воздушного объекта | 46 |
| 3.4 Расчет отношения сигнал-шум | 46 |
| 3.5 Расчет вероятности завязки трассы в текущем цикле обзора | Ошибка! Закладка не определена. |
| 3.6 Разработка графического интерфейса..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| 3.7 Разработка графического интерфейса | 49 |
| 3.8 Разработка программной и эксплуатационной документации | Ошибка! Закладка не определена. |
| Заключение | 51 |
| Список литературы | 52 |
| Глоссарий..... | 53 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| Приложение А Системы координат | 54 |
|--------------------------------------|----|

ВВЕДЕНИЕ

В рамках данной работы должно быть разработано программное обеспечение (далее – ПО) математической модели радиолокационной станции (далее – РЛС), предназначенное для оценки характеристик вторичной обработки радиолокационной информации в РЛС с использованием $\alpha\beta$ -фильтра.

Основными задачами вторичной обработки радиолокационной информации являются [1-5]:

1) определение принадлежности единичного измерения координат по результатам зондирования к сопровождаемой траектории воздушного объекта (далее – ВО);

2) фильтрация координат ВО для обеспечения его сопровождения и повышения точности оценки координат ВО.

В работе студентам предлагается получить необходимые знания и навыки, которые позволят принимать участие в разработке программно-алгоритмического обеспечения РЛС.

При выполнении данной работы студенты:

1) ознакомятся с теоретическими основами вторичной обработки радиолокационной информации;

2) изучат применение $\alpha\beta$ -фильтра при фильтрации координат ВО;

3) изучат основы моделирования траекторий движения ВО;

4) освоят методики разработки ПО;

5) ознакомятся с принципами построения архитектуры ПО с использованием унифицированного языка моделирования (англ., Unified modeling language);

6) ознакомятся с современными технологиями и библиотеками для разработки ПО;

7) ознакомятся с порядком разработки графического интерфейса пользователя;

- 8) ознакомиться с порядком подготовки документации
- 9) ознакомиться с методикой оценки параметров сопровождаемого ВО.

1 Теоретические сведения

1.1 Вторичная обработка радиолокационной информации с использованием $\alpha\beta$ -фильтра

1.1.1 Система сопровождения воздушного объекта

Одной из основных задач РЛС является сопровождение ВО, при котором РЛС с некоторой периодичностью выполняет оценку параметров движения ВО, обеспечивая при этом вторичную обработку радиолокационной информации. Сопровождение ВО обеспечивается системой сопровождения РЛС, которая включает в себя следующие этапы [4]:

- 1) завязка (обнаружение) траектории ВО;
- 2) определение принадлежности единичного измерения координат по результатам зондирования к сопровождаемой траектории ВО;
- 3) экстраполяция траектории;
- 4) фильтрация траектории;
- 5) прекращение сопровождения (сброс траектории).

Последовательность этапов приведена на рисунке 1.

Можно выделить два класса РЛС с точки зрения построения системы сопровождения:

- 1) РЛС, обеспечивающие сопровождение ВО в процессе регулярного обзора пространства с использованием т.н. «математических» стробов;
- 2) РЛС, обеспечивающие сопровождение ВО с использованием отдельных специализированных зондирований, т.н. «физических» стробов.

К первому классу относятся обзорные РЛС, основной задачей которых является обнаружение ВО, их сопровождение и выдача информации оповещения на автоматизированные системы управления.

Ко второму классу относятся РЛС из состава зенитных ракетных комплексов, основной задачей которых является точное сопровождение ВО и наведение на них зенитных управляемых ракет.



Рисунок 1 – Последовательность операций при сопровождении целей

Несмотря на такое разделение по классам, в настоящее время создаются обзорные РЛС, использующие в некоторых случаях «физические» стробы для сопровождения целей, а в РЛС наведения при выделении отдельных специализированных зондирований для сопровождения производится дополнительное «математическое» стробирование для повышения точности сопровождения.

По результатам этапа завязки траектории в РЛС формируется оценка координат и скорости ВО по нескольким последовательным обращениям к ВО.

На следующем этапе (при следующем обращении к цели) и в дальнейшем регулярно при сопровождении ВО требуется определять принадлежность единичного измерения («отметки») к траектории ВО с учетом

свойств цели. К примеру, в случае движения цели с постоянной скоростью, с помощью экстраполяции по текущим координатам и скорости могут быть вычислены координаты ВО на момент следующего обращения. Однако текущие координаты и скорости могут быть оценены с некоторой ошибкой, поэтому их необходимо учитывать при поиске ВО в последующем такте обращения к ВО (такте сопровождения). Для этого формируется поисковый строб, центр которого имеет координаты предполагаемого местоположения ВО. Отметка, обнаруженная в пределах такого строга, считается принадлежащей траектории. Размеры строга определяются оценками ошибок измерения координат и скорости, а также ошибками единичных измерений отметки. Поисковый строб должен иметь достаточно большие размеры, чтобы сигнал, отраженный от цели в следующем цикле обращения, попал в него с высокой вероятностью. В то же время он должен иметь как можно меньшие размеры, поскольку при наличии ложных отметок в строб больших размеров их будет попадать больше. Это усложнит процесс продолжения траектории, т.к. если в строб попадает более одной отметки, то возникает необходимость решения задачи селекции отметки, действительно принадлежащей траектории.

Такой подход применим лишь в случае неманеврирующих ВО. Однако он может быть распространен и на случай сопровождения маневрирующих ВО. При этом вводятся определенные ограничения на возможные маневры ВО. В простейшем случае задается значение максимального ускорения. Для учета возможных маневров ВО строб сопровождения должен быть расширен – имеются два источника рассогласования экстраполированного и истинного положения ВО на следующем такте сопровождения: ошибки измерения координат и ошибки, обусловленные возможным маневром ВО. Итоговые размеры строга формируются с учетом наибольшего рассогласования, обусловленного ошибками от обоих источников.

Предположим, что принято решение о том, что следующая отметка цели принадлежит сопровождаемой траектории. После этого необходимо обновить

и скорректировать оценки координат и скорости ВО с учетом вновь полученной отметки (этап фильтрации координат). Данная операция выполняется с помощью алгоритма фильтрации, в котором вычисляется ошибка между измеренным и экстраполированным положениями отметки, а на выходе формируются значения оценок сглаженных координат и скорости. Эти параметры вычисляются путем корректировки экстраполированных координат и скорости ВО с учетом текущего измерения координат ВО. Алгоритмы фильтрации координат решают задачу статистического оценивания параметров ВО.

В случае, если полученная отметка не попадает в строб сопровождения, или если при очередном обращении к ВО отметка отсутствует – необходимо принимать решение о дальнейшей экстраполяции координат цели или сбросе траектории ВО с сопровождения. В первом случае оценки ошибок для формирования следующего строба сопровождения должны быть увеличены в соответствии с увеличивающимся временем экстраполяции, во втором – формирование новых стробов сопровождения ВО прекращается, а траектория считается потерянной.

1.1.2 Элементы теории оценивания

Введем следующие основные определения:

1. Вектор истинного значения $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, составляющие которого x_1, x_2, \dots, x_n представляют собой n неизвестных параметров, подлежащих оцениванию.
2. Вектор наблюдения $\vec{z} = (z_1, z_2, \dots, z_k)^T$, составляющее которого z_1, z_2, \dots, z_k представляют собой k полученных результатов измерений.
3. Вектор оценки $\hat{x} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)^T$, составляющие которого $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n$ представляют собой результат оценивания вектора \vec{x} по результатам измерений \vec{z} , с использованием некоторого «оценителя». Оценка может быть сформирована по каждому вектору наблюдений \vec{z} . В

общем случае оценка \hat{x} может не совпадать с истинным значением \vec{x} и возникает ошибка оценивания.

4. Ошибка оценивания $\vec{e} = \vec{x} - \hat{x}$ определяется близостью оценки и истинного значения и характеризует качество оценивания.

При разработке оценщика необходимо стремиться к минимизации ошибок, в связи с этим вводится функция потерь, имеющая смысл цены ошибок измерения. Оценщик называется оптимальным в соответствии с указанным критерием, если получаемые с его помощью оценки минимизируют функцию потерь.

В большинстве случаев, когда составляющие вектора \vec{x} являются случайными величинами или когда наблюдения \vec{z} искажены шумом, оценка \hat{x} и, соответственно, ошибка \vec{e} , представляют собой случайные векторы. Поэтому минимизируется математическое ожидание функции потерь.

В случае, если \vec{x} и \vec{z} являются совместно распределенными случайными векторами, применяется оценка по критерию минимума средней квадратической ошибки. Минимизируется по отношению к оценке \hat{x} следующая квадратичная функция потерь

$$J = f(\hat{x}, \vec{z}) = E_{\vec{x}|\vec{z}}\{(\vec{x} - \hat{x})W(\vec{x} - \hat{x})|\vec{z}\}, \quad (1)$$

где $E_{\vec{x}|\vec{z}}$ — математическое ожидание случайной величины $\{\cdot\}$, вычисленное по условному распределению \vec{x} при заданном значении \vec{z} ;

W — неотрицательная действительная матрица весов.

В явном виде функцию потерь можно записать следующим образом

$$J(\hat{x}, \vec{z}) = \int (\vec{x} - \hat{x})W(\vec{x} - \hat{x})p(\vec{x}|\vec{z})d\vec{x}. \quad (2)$$

Решение \hat{x} уравнения $\frac{dJ}{d\hat{x}} = 0$ минимизирует функцию потерь и представляет собой условное математическое ожидание вектора \vec{x}

$$\hat{x} = E_{\vec{x}|\vec{z}}\{\vec{x}|\vec{z}\} = \int \vec{x}p(\vec{x}|\vec{z})d\vec{x}, \quad (3)$$

не зависящее от W . Данный результат имеет большое значение в теории оценивания. Кроме того, эта оптимальная оценка обеспечивает минимум ковариационной матрицы

$$\hat{P} = E\{(\vec{x} - \hat{x})(\vec{x} - \hat{x})^T | \vec{z}\}, \quad (4)$$

поэтому средний квадратический критерий называют критерием минимальной дисперсии. Решение уравнения для \hat{x} обеспечивает извлечение максимальной (в среднем) информации о векторе \vec{x} из полученных данных наблюдения. В общем случае \vec{x} является нелинейной функцией \vec{z} . Однако если векторы \vec{x} и \vec{z} имеют совместное гауссовское распределение, то оптимальная оценка является линейной функцией \vec{x} и может быть получена на основе априорных знаний статистических параметров первого и второго порядков векторов \vec{x} и \vec{z} . Кроме того, в этом случае оптимальная оценка соответствует также критериям наименьших квадратов и максимальной апостериорной вероятности.

Также среднеквадратичная оценка обладает следующим важным свойством – ошибка оценивания среднего квадратического оценивателя не коррелирована с \vec{z} и любой функцией $g(\vec{z})$, в частности она не коррелирована с оценкой \hat{x} , т.е.:

$$E\{(\vec{x} - \hat{x})g^T(\vec{z})\} = 0. \quad (5)$$

Пусть \vec{x} и \vec{z} имеют совместное гауссовское распределение с матрицами средних значений $M_{\vec{x}}$, $M_{\vec{z}}$ и ковариационными матрицами:

$$\text{cov}\{(\vec{x} - M_{\vec{x}})\} = P_{\vec{x}\vec{x}}, \quad (6)$$

$$\text{cov}\{(\vec{z} - M_{\vec{z}})\} = P_{\vec{z}\vec{z}}, \quad (7)$$

$$E\{(\vec{x} - M_{\vec{x}})(\vec{z} - M_{\vec{z}})^T\} = P_{\vec{x}\vec{z}}. \quad (8)$$

Тогда плотность вероятностей $p(\vec{x}|\vec{z})$ имеет гауссовское распределение с матрицами средних значений и ковариаций:

$$E\{\vec{x}|\vec{z}\} = M_{\vec{x}} + P_{\vec{x}\vec{z}}P_{\vec{z}\vec{z}}^{-1}(\vec{z} - M_{\vec{z}}), \quad (9)$$

$$\hat{P} = \text{cov}\{\vec{x}|\vec{z}\} = P_{\vec{x}\vec{x}} - P_{\vec{x}\vec{z}}P_{\vec{z}\vec{z}}^{-1}P_{\vec{x}\vec{z}}^T. \quad (10)$$

В случае получения последовательности из $k + 1$ коррелированных измеренных векторов $\vec{z}^{(1)}, \vec{z}^{(2)}, \dots, \vec{z}^{(k)}, \vec{z}^{(k+1)}$ оптимальный оцениватель может быть представлен рекуррентной формулой, что является важным в динамических задачах. Пусть \hat{x}_k — оценка вектора \vec{x} по результатам

измерений $\vec{z}^{(1)}, \vec{z}^{(2)}, \dots, \vec{z}^{(k)}$, \tilde{x}_k — соответствующая ошибка, $\tilde{z}_{k+1|k}$ — ошибка оценки z_{k+1} , основанная на наблюдениях $\vec{z}^{(1)}, \vec{z}^{(2)}, \dots, \vec{z}^{(k)}$. Тогда

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + \hat{x}(\hat{z}_{k+1|k}), \quad (11)$$

$$\hat{P}_{k+1} = \hat{P}_k - cov\{\tilde{x}_k, \tilde{z}_{k+1|k}\}cov\{\tilde{z}_{k+1|k}\}^{-1}, \quad (12)$$

где $\hat{P}_k = cov\{\tilde{x}_k\}$.

Важным следствием данного свойства является отсутствие необходимости при получении новых значений $\vec{z}^{(k+1)}$ вновь анализировать все $k+1$ результатов измерения. Оценка \hat{x}_k может быть откорректирована на основе совместной обработки новой информации $\tilde{z}_{k+1|k}$.

Вектор $\tilde{z}_{k+1|k} = \vec{z}^{(k+1)} - \hat{z}_{k+1|k}$ называется сигналом обновления и играет важную роль в теории линейного оценивания в динамических задачах. В нем содержится вся информация о $\vec{z}^{(k+1)}$, которая не может быть спрогнозирована по данным $\vec{z}^{(1)}, \vec{z}^{(2)}, \dots, \vec{z}^{(k)}$.

Во многих задачах оценивания неизвестный вектор характеризует эволюцию системы во времени, а результаты наблюдения \vec{z} представляют собой выходные сигналы этой системы и, следовательно, являются функцией времени. В таком случае зависимость входных и выходных последовательностей описывается во временной области с помощью моделей состояний и наблюдаемых выходных сигналов. Состояние характеризует «внутренние условия» системы и является как бы «отображением» предшествующих входных воздействий: «входные сигналы» могут включать как детерминированные функции времени, так и стохастические процессы, которые имитируют непредсказуемые возмущения или шум. «Выходные сигналы» являются функцией состояния с учетом случайных ошибок измерений.

Радиолокационные системы сопровождения относятся к классу непрерывно-дискретных систем, т.е. систем, непрерывно эволюционирующих во времени, но наблюдаемых только в дискретные моменты времени. Движение ВО (состояние системы) описывается непрерывными во времени

динамическими уравнениями относительно координат и скорости ВО, а измерения осуществляются в конкретные дискретные моменты времени. В таком случае дискретная природа наблюдений позволяет считать изменения состояний значимыми только в те моменты времени, когда производятся наблюдения.

В общем виде система, работающая в дискретном времени, может быть описана следующим образом

$$s_{k+1} = f(s_k, u_k, v_k, k), \quad (13)$$

$$z_{k+1} = g(s_{k+1}, w_{k+1}, k + 1), \quad (14)$$

где $k, k + 1$ — целочисленные индексы, обозначающие дискретные моменты времени,

s_k — n -мерный вектор состояния в момент k ;

u_k — p -мерный вектор детерминированных входных воздействий;

v_k — g -мерный вектор случайных входных сигналов;

w_k — r -мерный вектор шумов наблюдения;

z_k — t -мерный вектор наблюдений;

$f(\cdot)$ — векторная функция, характеризующая переход состояния s_k в s_{k+1} в момент времени k в результате входного воздействия (u_k, v_k) ;

$g(\cdot)$ — векторная функция, отображающая внутреннее состояние на выходные наблюдаемые переменные z_{k+1} и характеризующая влияние ошибок w_{k+1} .

В случае, если рассматриваемая система является линейной (т.е. $f(\cdot)$ и $g(\cdot)$ являются линейными функциями), уравнения можно записать в следующем виде

$$s_{k+1} = \Phi_k s_k + B_k u_k + G_k v_k, \quad (15)$$

$$z_{k+1} = H_{k+1} s_{k+1} + L_{k+1} w_{k+1}, \quad (16)$$

где $\Phi_k, B_k, G_k, H_{k+1}, L_{k+1}$ — вещественные матрицы размерами $n \times n, n \times p, n \times g, t \times n, t \times r$ соответственно.

Задача оценивания для динамических систем может быть сформулирована следующим образом: результаты наблюдений на выходе системы формируются в течение интервала времени $(0, N)$. По имеющимся данным в соответствии с критерием необходимо оценить состояние s_k в момент времени $k \geq 0$. Оценка является функцией результата всех наблюдений z^N , средняя квадратическая ошибка минимизируется в соответствии с выражениями:

$$\min J = E\{(s_k - \hat{s}_k)^T (s_k - \hat{s}_k) | z^N\}, \quad (17)$$

$$s_k = \sum_{p=0}^N A_{k,p} z_p + b_k, \quad (18)$$

где $A_{k,p}$ – матрица $n \times m$, зависящая от времени,

b_k – вектор $n \times 1$, обеспечивающий наименьшую среднюю квадратическую ошибку J .

В зависимости от положения времени k , в которое оценивается состояние системы, относительно интервала $(0, N)$, существуют три задачи оценивания:

- 1) фильтрация, если $k = N$;
- 2) экстраполяция, если $k > N$;
- 3) сглаживание, если $0 < k < N$.

Фильтрация представляет собой типичную процедуру, осуществляемую для каждого заданного текущего момента времени. Это связано с тем, что для оценки s_k используется информация, собранная к моменту времени N , причем эта операция может выполняться для любых $N > 0$, т.е. производиться последовательно по мере поступления новых данных. В простейшем случае, когда z_k является просто копией s_k , искаженной шумом наблюдений, фильтр, производящий оценивание по критерию минимума средней квадратической ошибки (далее – СКО) обеспечивает подавление мешающего шума и оценивает как можно точнее истинное значение s_k .

Экстраполяция решает задачу предсказания эволюции состояния системы после того, как выполнено последнее возможное измерение.

Сглаживание представляет собой процесс оценивания вектора s_k по результатам наблюдений, полученных на интервале как $(0, k)$, так и (k, N) . Поэтому данная операция является типичной операцией, выполняемой не для текущего момента времени. При этом вектор s_k зависит только от эволюции системы до момента времени k . Однако обработка данных, полученных на интервале (k, N) может уменьшить ошибку определения s_k .

1.2 Оценка параметров движения сопровождаемого воздушного объекта

Простейшим случаем построения системы фильтрации координат ВО является вариант, основанный на следующих предположениях:

- 1) траектории движения ВО в основном являются прямолинейными равномерными, в связи с чем используется линейная гипотеза движения;
- 2) темп обращения к ВО при сопровождении в РЛС является постоянным;
- 3) единичные измерения по дальности (R), азимуту (β) и углу места (ε) являются независимыми.

В таком случае оценка параметров движения сопровождаемого ВО для каждой из координат R, β, ε производится с использованием рекуррентного $\alpha\beta$ -фильтра

$$\hat{\lambda}_i = \alpha\lambda_i + (1 - \alpha)\hat{\lambda}_{\varepsilon i}, \quad (19)$$

$$\hat{\lambda}_i = \frac{\beta}{\Delta t} \cdot \lambda_i - \frac{\beta}{\Delta t} \hat{\lambda}_{\varepsilon i} + \hat{\lambda}_{i-1}, \quad (20)$$

где $\hat{\lambda}_i, \hat{\lambda}_i$ — оценки координаты и ее производной на текущий момент времени t_i по результатам фильтрации;

α и β — текущие, на момент времени t_i , коэффициенты фильтра по координате и ее производной;

λ_i — текущее измерение координаты (R, β, ε);

$\hat{\lambda}_{\varepsilon i} = \hat{\lambda}_{i-1} + \hat{\lambda}_{i-1}\Delta t$ — экстраполированная оценка координаты на текущий момент времени t_i ;

Δt – темп сопровождения ВО.

Коэффициенты α и β определяют вес текущего измерения координаты в получаемой оценке. В случае, если коэффициенты близки к 1, то доверие к экстраполяции с предыдущего такта сопровождения (а, соответственно, и к результатам оценки на прошлом такте) низкое, и результат оценивания на данном такте сопровождения будет близок к текущему измерению. В противоположном случае, если коэффициенты близки к 0, то доверие к экстраполяции с предыдущего такта сопровождения высокое, и результат текущего измерения практически не влияет на оценку на текущем такте сопровождения. Предельный случай $\alpha = \beta = 1$ соответствует сопровождению по единичным измерениями, а $\alpha = \beta = 0$ – сопровождению по экстраполированным значениям.

Значения коэффициентов α и β зависят от номера такта сопровождения и выражаются следующим образом

$$\alpha = \frac{2i(2i-1)}{i(i+1)}, \quad (21)$$

$$\beta = \frac{6}{i(i+1)\Delta t}. \quad (22)$$

При небольшом количестве тактов сопровождения оценки координат и производных ВО статистически ненадежны, поэтому коэффициенты α и β имеют большие значения для увеличения веса текущих измерений. По мере роста числа выполненных измерений надежность оценок возрастает и коэффициенты α и β должны уменьшаться.

В реальных условиях, однако, траектория движения реального ВО может отличаться от выбранной линейной модели движения – ВО может совершать маневры. В таком случае необходимо ограничивать снизу возможные значения коэффициентов. Одним из возможных способов ограничения является выбор т.н. «памяти» фильтра, т.е. максимального количества тактов сопровождения i для рассмотрения.

1.3 Расчет ошибок оценивания параметров движения сопровождаемого воздушного объекта

В процессе фильтрации координат можно рассчитать потенциальную ошибку оценивания координат цели на основании ошибки единичного измерения и текущих коэффициентов фильтра. В связи с указанными при построении фильтра предположениями можно выделить две составляющие ошибки оценивания. Первая составляющая является шумовой (случайной) и вызвана неточностью определения положения цели при измерении, ее также называют флуктуационной составляющей ошибки оценивания. Вторая составляющая обусловлена возможным несоответствием истинной траектории ВО модели движения, заложенной в алгоритме фильтрации. В данном случае модель движения выбрана линейной, и в случае совершения ВО маневра возникает т.н. динамическая составляющая ошибки оценивания. Однако при работе алгоритма фильтрации факт совершения ВО маневра не известен, в связи с чем возможно оценить только потенциально возможную динамическую составляющую ошибки.

Расчет квадрата СКО флуктуационной ошибки оценки координат ВО на текущем i -ом такте сопровождения можно выполнить рекуррентным способом

$$\sigma_{\hat{\lambda}_i}^2 = \alpha^2 \sigma_{\lambda_i}^2 + (1 - \alpha)^2 \sigma_{\hat{\lambda}_{\varepsilon i}}^2, \quad (23)$$

где σ_{λ_i} – СКО единичного измерения координаты ВО на i -м такте сопровождения;

$$\sigma_{\hat{\lambda}_{\varepsilon i}}^2 = \overline{(\hat{\lambda}_{i-1} + \hat{\lambda}_{i-1} \Delta t)^2} = \sigma_{\hat{\lambda}_{i-1}}^2 + 2K_{\hat{\lambda}_{i-1} \hat{\lambda}_{i-1}} \Delta t + \sigma_{\hat{\lambda}_{i-1}}^2 \Delta t^2 - \text{квадрат СКО}$$

экстраполированной на i -й такт сопровождения оценки координаты;

$$K_{\hat{\lambda}_i \hat{\lambda}_i} = \overline{(\alpha \lambda_i + (1 - \alpha) \hat{\lambda}_{\varepsilon i}) \cdot \left(\frac{\beta}{\Delta t} \cdot \lambda_i - \frac{\beta}{\Delta t} \hat{\lambda}_{\varepsilon i} + \hat{\lambda}_{i-1} \right)} - \text{ковариационная}$$

матрица оценки координаты и скорости ВО на i -м такте сопровождения;

$$\sigma_{\hat{\lambda}_i}^2 = \overline{\left(\frac{\beta}{\Delta t} \cdot \lambda_i - \frac{\beta}{\Delta t} \hat{\lambda}_{\varepsilon i} + \hat{\lambda}_{i-1} \right)^2} - \text{квадрат СКО оценки скорости ВО.}$$

Выразить соответствующие значения через коэффициенты α и β можно следующим образом

$$K_{\hat{\lambda}_i \hat{\lambda}_i} = \frac{\alpha\beta}{\Delta t} \sigma_{\lambda_i}^2 - \frac{(1-\alpha)\beta}{\Delta t} \sigma_{\lambda_{\varepsilon i}}^2 + (1-\alpha)K_{\hat{\lambda}_{\varepsilon i} \hat{\lambda}_{i-1}}, \quad (24)$$

$$\sigma_{\hat{\lambda}_i}^2 = \frac{\beta^2}{\Delta t^2} \sigma_{\lambda_i}^2 + \frac{\beta^2}{\Delta t^2} \sigma_{\lambda_{\varepsilon i}}^2 - 2 \frac{\beta}{\Delta t} K_{\hat{\lambda}_{\varepsilon i} \hat{\lambda}_{i-1}} + \sigma_{\hat{\lambda}_{i-1}}^2, \quad (25)$$

$$\text{где } K_{\hat{\lambda}_{\varepsilon i} \hat{\lambda}_{i-1}} = \overline{(\hat{\lambda}_{i-1} + \hat{\lambda}_{i-1} \Delta t) \hat{\lambda}_{i-1}} = K_{\hat{\lambda}_{i-1} \hat{\lambda}_{i-1}} + \sigma_{\hat{\lambda}_{i-1}}^2 \Delta t.$$

Если принять в качестве начальных значений для 0-го и 1-го тактов сопровождения

$$\sigma_{\hat{\lambda}_1} = \sigma_{\lambda_0}, \sigma_{\hat{\lambda}_1} = \sqrt{2} \frac{\sigma_{\lambda_0}}{\Delta t}, K_{\hat{\lambda}_{\varepsilon 1} \hat{\lambda}_0} = 0, \quad (26)$$

то можно обеспечить расчет флуктуационной составляющей ошибки оценивания на каждом такте сопровождения.

Значение динамической составляющей ошибки можно ограничить сверху максимально возможным изменением координат за время, прошедшее с предыдущего обращения к цели, т.е.

$$\Delta \lambda_{\text{дин}} = \frac{1}{\beta} \ddot{\lambda}_M \Delta t^2, \quad (27)$$

где $\ddot{\lambda}_M$ – максимальное значение второй производной координаты при маневре.

Таким образом суммарная потенциальная ошибка оценки координат будет равна

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{\hat{\lambda}_i}^2 + \Delta \lambda_{\text{дин}}^2. \quad (28)$$

1.4 Дальность действия радиолокационной станции

Одной из основных задач при проектировании РЛС является расчет максимальной дальности обнаружения, которая также является одним из важнейших тактических показателей системы. При противоборстве очень важно, какая из сторон быстрее обнаружит соответствующий объект. От этого в основном зависит исход этого противоборства. Поэтому рассмотрение

основных факторов, влияющих на дальность действия радиолокационных устройств и систем, является весьма актуальным.

Уравнение дальности действия РЛС в свободном пространстве (т.е. без учета влияния Земли и поглощения в атмосфере) для точечной цели устанавливает связь между всеми основными параметрами РЛС.

Рассмотрим точку O на расстоянии (дальности) R от РЛС (рисунок 2).

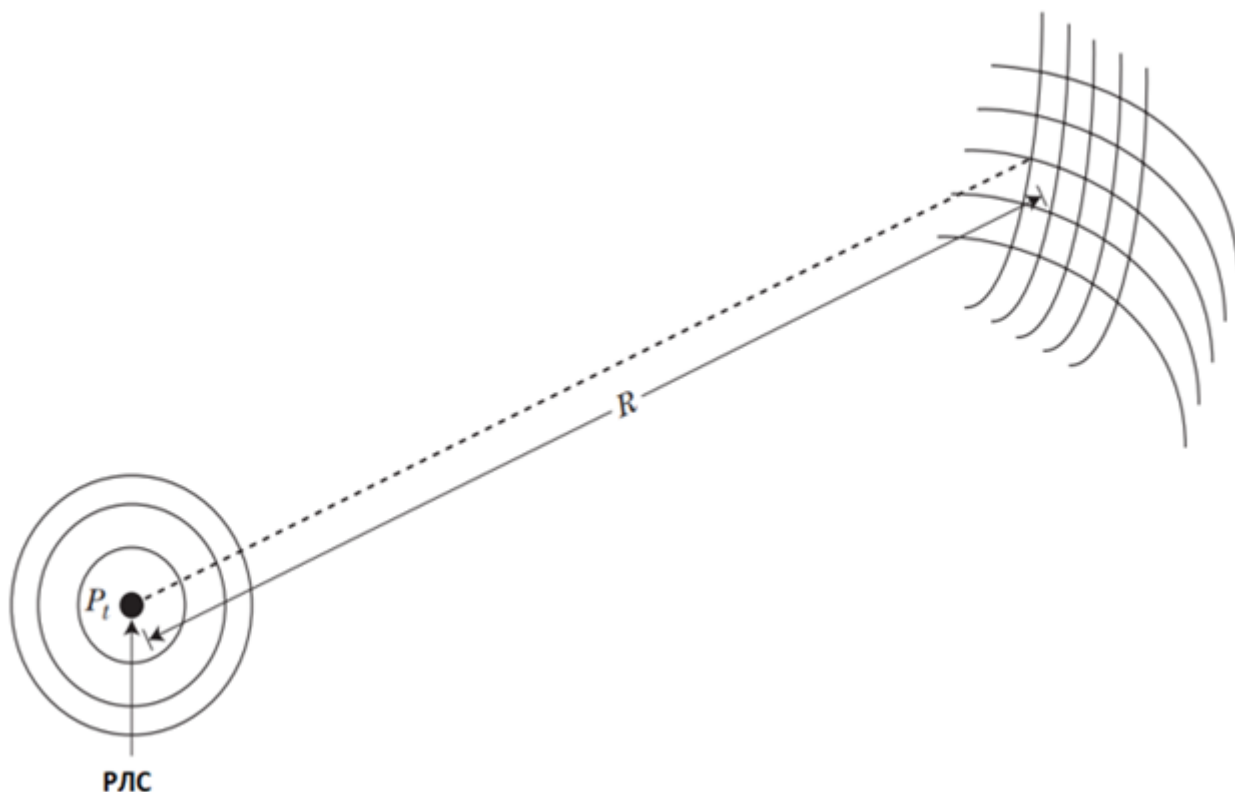


Рисунок 2 – Плотность потока мощности на дальности R (изотропная антенна)

При изотропной (всеаправленной) антенне вся излучаемая мощность $P_{\text{изл}}$ равномерно распределялась бы по поверхности сферы $4\pi R^2$, откуда плотность потока мощности прямой электромагнитной волны в точке O – $Q_{\text{изл}}$, определяется по формуле

$$Q_{\text{изл}} = \frac{P_{\text{изл}}}{4\pi R^2}, \quad (29)$$

где, $P_{\text{изл}}$ – излучаемая мощность, Вт,

R – дальность цели, м.

Практически во всех РЛС используется антенна с направленной диаграммой направленности антенны (далее – ДНА). Это означает, что передаваемая мощность концентрируется в ограниченном угловом направлении, обычно имеющем ширину в несколько градусов, как по азимуту, так и по углу места. В этом случае плотность потока мощности в центре ДНА выше, чем у изотропной антенны, потому что излучаемая мощность сосредоточена на меньшую площадь на поверхности сферы, как показано на рисунке 3. Плотность потока мощности в серый эллипс, изображающий луч антенны, увеличена по сравнению с изотропной антенной.

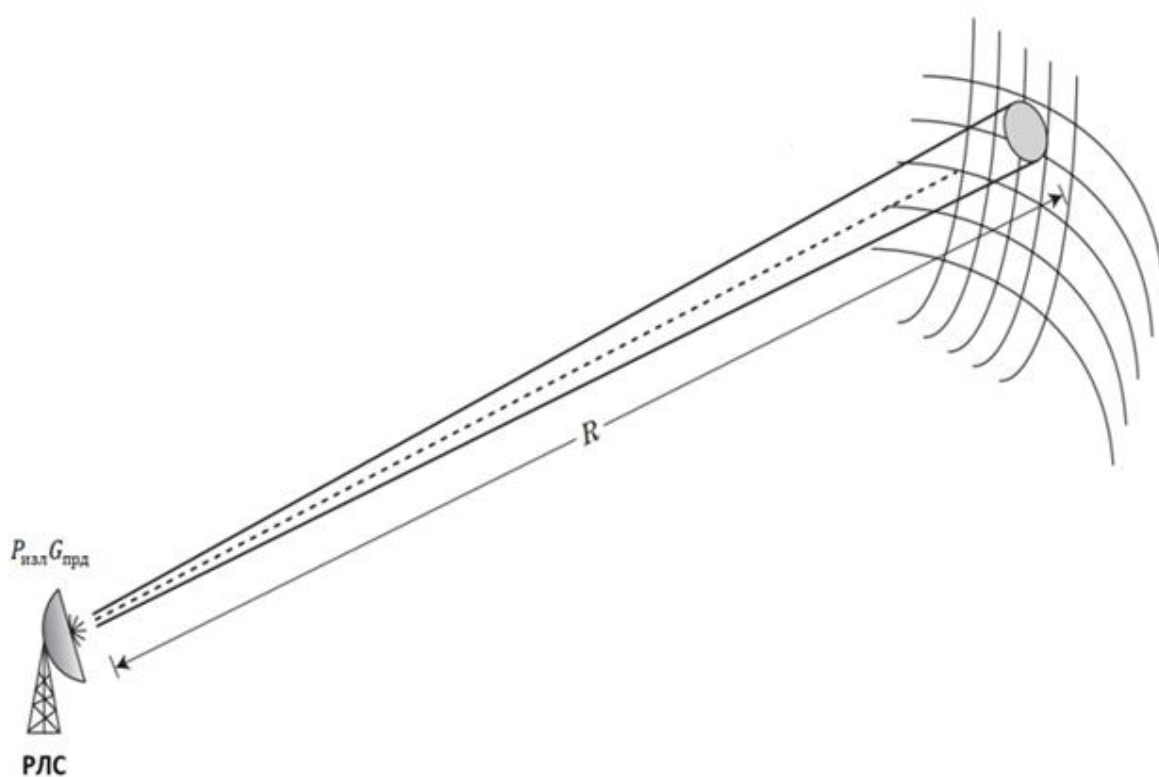


Рисунок 3 – Плотность потока мощности на дальности R (направленная антенна)

Отношение между плотностью потока мощности из направленной антенны и изотропной антенны называется направленностью и численно определяется коэффициентом усиления передающей антенны $G_{\text{прд}}$ антенны на передачу. Учитывая $G_{\text{прд}}$, плотность потока мощности за счет использования направленной антенны выражается по формуле

$$Q_{\text{изл}} = \frac{P_{\text{изл}} G_{\text{прд}}}{4\pi R^2}. \quad (30)$$

Пусть радиолокационная «цель» находится на дальности R , облучается зондирующим сигналом (далее – ЗС), излучаемым антенной. Излучаемый ЗС отражается от цели в различных направлениях, как показано на рисунке 4.

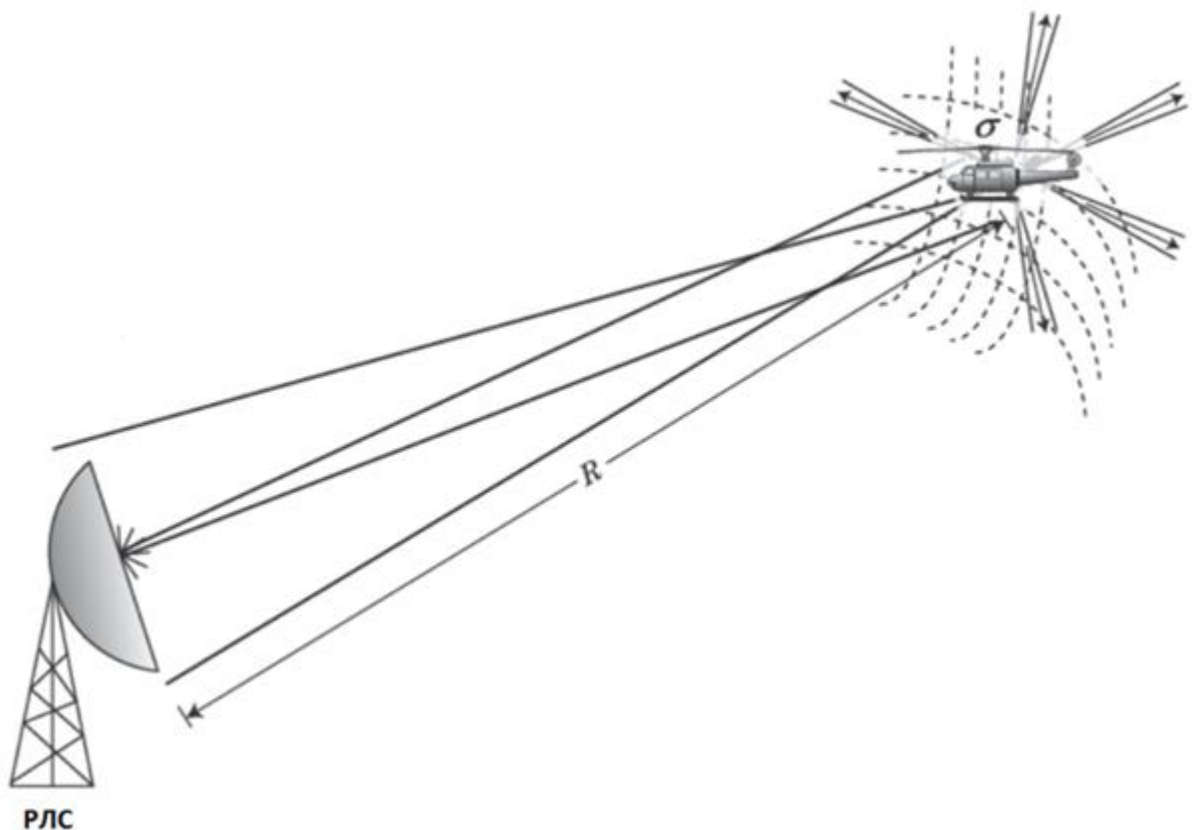


Рисунок 4 – Плотность потока мощности отраженная в направлении РЛС

Излучаемый сигнал наводит на поверхность цели изменяющиеся во времени токи, так что теперь цель становится источником радиоволн, часть которых будет распространяться обратно к РЛС. Мощность, отраженная от цели обратно к радару – $P_{\text{отр}}$, выражается как произведение плотности потока

мощности, падающей на цель на коэффициент, называемый эффективной площадью рассеяния (далее – ЭПР) цели. ЭПР определяется размером, формой, материалами, из которых цель сделана.

Мощность, отраженная обратно в направлении РЛС, $P_{отр}$ от цели определяется по формуле

$$P_{отр} = Q_{изл} \sigma = \frac{P_{изл} G_{прд} \sigma}{4\pi R^2}, \quad (31)$$

где, σ – средняя ЭПР цели, m^2 .

Сигнал, отраженный от цели, распространяется обратно к РЛС на расстояние R , так что плотность потока мощности на полотне антенны РЛС $Q_{прм}$, определяется по формуле

$$Q_{прм} = \frac{P_{отр}}{4\pi R^2}. \quad (32)$$

Из формул (31), (32) плотность мощности радиоволн, принимаемых обратно приемной антенной РЛС, определяется по формуле

$$Q_{прм} = \frac{Q_{изл} \sigma}{4\pi R^2} = \frac{P_{изл} G_{прд} \sigma}{(4\pi)^2 R^4}. \quad (33)$$

Из формулы (33) дальность цели от РЛС R появляется в знаменателе, возведенном в степень четыре.

Пример

Если дальность цели от РЛС удваивается, плотность потока мощности принимаемого сигнала, отраженного от цели, уменьшается в 16 раз, т.е. на 12 дБ.

Пусть, радиолокационная волна, отраженная от цели, которая распространилась на расстояние R , дает плотность потока мощности, определяемую уравнением $Q_{прм}$, принимается (собирается) приемной антенной РЛС с эффективной площадью антенны равной A . Тогда принимаемая мощность от цели – $P_{прм}$, на дальности R на приемной антенне с эффективной площадью A определяется как плотность потока мощности на антенне, умноженная на эффективную площадь антенны

$$P_{прм} = Q_{прм} A = \frac{P_{изл} G_{прд} A \sigma}{(4\pi)^2 R^4}, \quad (34)$$

где $P_{\text{прм}}$ – принимаемая мощность от цели на приемной антенне, Вт.

Обычно, эффективная площадь антенны A , заменяется значением коэффициента усиления приемной антенны на прием $G_{\text{прм}}$, создаваемым этой площадью антенны. Кроме того, из-за потерь эффективная площадь антенны несколько меньше, чем физическая площадь. Связь между коэффициентом усиления приемной антенны $G_{\text{прм}}$ и ее эффективной площадью A определяется формулой

$$G_{\text{прм}} = \frac{4\pi A}{\lambda^2}. \quad (35)$$

где λ – длина волны, м.

Из формул (34), (35) получается формулу для вычисления принимаемой мощности

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{изл}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}. \quad (36)$$

Примечание – Формула (36), также называется основным уравнением радиолокации – формула, описывающая дальность действия радиолокатора, через расчет мощности радиосигналов и различных потерь.

1.4.1 Шум приемника

В идеальном случае принятый сигнал, который обычно имеет очень маленькую амплитуду, может быть усилен на произвольно большую величину до тех пор, пока он не станет видимым на дисплее или в пределах динамического диапазона аналого-цифрового преобразователя (далее – АЦП). Всегда существует сигнал, который искажает полученные данные и имеет случайно изменяющуюся амплитуду и фазу, данный сигнал называется случайный шум.

Различают следующие случайные шумы:

- 1) внешний случайный шум, который
 - а) поступает через антенну;
 - б) возникает из нескольких источников;

2) космический случайный шум, возникает в открытом космосе:

а) вносит существенный вклад в общий случайный шум на частотах ниже примерно 1 ГГц;

б) вклад в общий случайный шум на частотах выше 1 ГГц – незначителен.

Солнечный шум исходит от солнца, близость солнца делает его значительным фактором, однако его влияние уменьшается за счет усиления боковых лепестков антенны (далее – БЛА), если только главный луч антенны не направлен прямо на солнце.

В дополнение к внешнему шуму, поступающему через антенну, случайное движение электронов в цепях приемника, вызванное тепловым возбуждением, создает случайный тепловой шум.

В уравнении дальности действия РЛС предполагается, что внутренний тепловой шум (иногда называется «белый» шум) в приемнике преобладает над уровнем внешнего шума. Мощность теплового шума практически равномерно распределена по всем частотам РЛС, то есть его спектральная плотность мощности постоянна или однородна.

Серьезно влияют на работу РЛС, только шумовые сигналы с частотами в диапазоне частот, который может быть обнаружен приемником РЛС. Диапазон частот, для которых РЛС чувствителен к шумовым сигналам, определяется шириной полосы приемника – B , тогда, мощность теплового шума – $P_{ш}$, отрицательно влияющего на работу РЛС, будет пропорциональна B и определяется по формуле,

$$P_{ш} = kT_{ш}B = kT_0FB, \quad (37)$$

где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Вт·сек/К;

$T_0 = 290$ – стандартная температура, К;

$T_{ш} = T_0 \cdot F$ шумовая температура системы, К;

B — мгновенная ширина полосы приемника, Гц,

F – коэффициент шума подсистемы приемника.

Коэффициент шума F – это альтернативный метод описания шума приемника, в зависимости от шумовой температуры системы $T_{ш}$.

Примечание – Коэффициент шума F , в литературе, часто указывается в дБ, однако для использования его необходимо преобразовать в линейные единицы.

1.4.2 Отношение сигнал-шум

Отношением сигнал-шум называется отношением мощности принятого целевого сигнала $P_{прм}$ на мощность шума $P_{ш}$.

Из формул (35), (36) отношение сигнал-шум определяется по формуле

$$\rho = \frac{P_{изл} G_{прд} G_{прм} \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_{ш} F B}. \quad (38)$$

1.4.3 Суммарные потери

Основное уравнение радиолокации было представлено в идеализированной форме, то есть без учета потерь. На практике, мощность принимаемого сигнала обычно ниже прогнозируемой мощности, это связано со следующими факторами:

- 1) поглощение волн в атмосфере, $\eta_{атм}$;
- 2) потери в приемном и передающем тракте, $\eta_{прм}$, $\eta_{прд}$;
- 3) неидеальные условия обработки сигнала, $\eta_{обр}$.

Сели не учитывать данные факторы, то это приведет к далекому от идеального отношению сигнал-шум.

Суммарные потери сигнала – η_{Σ} , определяются по формуле

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{прд} \eta_{атм} \eta_{прм} \eta_{обр}. \quad (39)$$

В результате учета потерь по формуле (33), отношение, определяющее сигнал-шум (38) принимает следующий вид

$$\rho = \frac{P_{изл} G_{прд} G_{прм} \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_{ш} F B} \eta_{\Sigma}. \quad (40)$$

Выразим из формулы (40) R , получаем уравнение дальности действия РЛС

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{изл}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 \rho k T_{\text{ш}} F B}} \eta_{\Sigma}. \quad (41)$$

Потери на передачу сигнала, $\eta_{\text{прд}}$, учитывают потери в уровне сигнала, когда он проходит от передатчика к антенне, по волноводному или коаксиальному кабелю и через такие устройства, как циркулятор, направленный ответвитель или переключатель передачи/приема. Для большинства обычных РЛС потери составляют порядка 3 или 4 дБ, в зависимости от длины волны, длины линии передачи и включенных устройств. В дополнение к общим потерям, связанным с каждым компонентом, существуют некоторые потери, связанные с соединением этих компонентов вместе.

Электромагнитная волна испытывает затухание в атмосфере по мере прохождения от РЛС к цели и обратно. Потери из-за ослабления радиоволн в атмосфере, $\eta_{\text{атм}}$, вызваны взаимодействием сигнала (электромагнитной волны) с молекулами кислорода и парами воды. Затухание радиоволн наблюдается даже в чистом воздухе.

Эффект затухания в атмосфере имеет следующие особенности:

- 1) обычно увеличивается с увеличением несущей частоты;
- 2) однако вблизи областей, в которых радиоволна резонирует с молекулами воды или кислорода, наблюдаются острые пики затухания с относительными нулями между этими пиками.

Примечание – Туман, дождь и снег в атмосфере усиливают затухание.

Потери из-за ослабления радиоволн в нижних (содержащих кислород) слоях атмосферы определяются по формуле

$$\lg \eta_{\text{атм}} = -2k R_{\text{атм}}, \quad (42)$$

где k – удельный коэффициент поглощения радиоволн в нижних слоях атмосферы;

$R_{\text{атм}} = \min \{R, R_{\text{макс}}\}$ – расстояние, пройденное радиоволной в нижних слоях атмосферы, м;

R – дальность РЛС (расстояние до цели), м;

$R_{\text{макс}}$ – расстояние до точки, находящейся на линии визирования на высоте h_a , м.

Высота $R_{\text{макс}}$ определяется по формуле

$$R_{\text{макс}} = \sqrt{R_3^2 (\sin \varepsilon)^2 + h_a (h_a + 2R_3)} - R_3 \cdot \sin \varepsilon, \quad (43)$$

где R_3 – радиус Земли, м;

ε – угол места цели, м;

h_a – эффективная высота нижних слоев атмосферы (~7,5 км), м.

Потери при приеме сигнала, $\eta_{\text{прм}}$ – это потери на пути между приемной антенной и приемником РЛС. Как и в случае с потерями при передаче, $\eta_{\text{прд}}$, они вызваны линией передачи и ее компонентами

- 1) волноводный кабель;
- 2) коаксиальный кабель;
- 3) циркулятор;
- 4) защитными переключателями приемника
- 5) фильтрами предварительной селекции.

В потерях при приеме сигнала должны учитываться все потери до точки в РЛС, для которой указан коэффициент шума.

Потери при обработке сигнала, $\eta_{\text{обр}}$, учитывают несовершенство аппаратуры и алгоритмов обработки сигнала.

Пример

Потери на аналогово-цифровое преобразование сигнала или потери при пороговой обработке сигнала.

1.4.4 Дальность прямой видимости радиолокационной станции

Дальность прямой видимости – расстояние между антенной РЛС и целью, при котором прямая линия, соединяющая их, касается земной поверхности (рисунок 5).

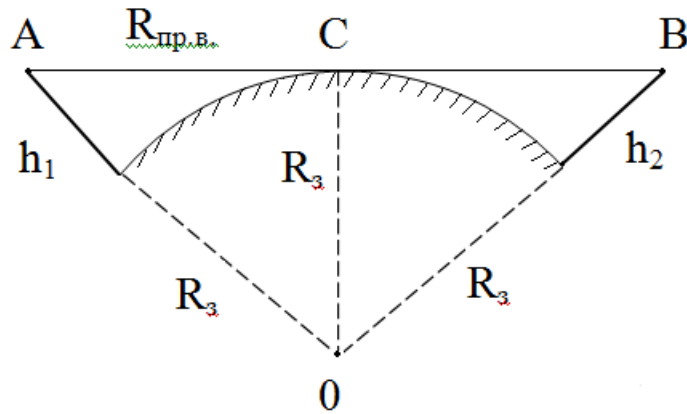


Рисунок 5 – Дальность прямой видимости РЛС

В реальных условиях распространения с учетом сферической формы поверхности Земли радиоволны испытывают как дифракцию, так и рефракцию, благодаря чему происходит прием радиосигналов за пределами прямой видимости. Для диапазона УКВ дальность прямой видимости вычисляется по формуле

$$R = 4,12(\sqrt{h_{\text{фц}}} + \sqrt{h_{\text{во}}}), \quad (44)$$

где $h_{\text{фц}}$ – высота фазового центра антенны, м

$h_{\text{во}}$ – высота наблюдаемого воздушного объекта, м.

1.5 Расчет траектории движения воздушных объектов

Для расчета траектории движения ВО используется модель ВО, которая состоит из двух частей:

- 1) модели движения ВО;
- 2) модели управления движением ВО.

При построении модели движения аэродинамическая цель принималась за материальную точку постоянной массы. Влияние атмосферы и ветра не учитывалось.

Модель движения ВО способна имитировать изменение параметров своего движения в соответствии с входным управляющим ускорением. Модель управления движением определяет управляющее ускорение, которое позволяет модели движения реализовать заданную траекторию (с учетом кривизны земной поверхности).

Формирование траекторий ВО производится в геоцентрической системе координат (далее – ГСК) (см. Приложение). В каждый момент времени цель характеризуется вектором координат (\mathbf{R}_r), вектором скорости (\mathbf{V}_r) и вектором ускорения (\mathbf{W}_r) в ГСК.

$$\mathbf{R}_{0r} = (R_3 + H_0) \cdot \begin{bmatrix} -\sin \varphi_0 \\ \cos \lambda_0 \cdot \cos \varphi_0 \\ \sin \lambda_0 \cdot \cos \varphi_0 \end{bmatrix}, \quad (45)$$

где R_3 – радиус Земли;

H_0 – начальная высота;

λ_0 – начальная долгота;

φ_0 – начальная широта цели, передаваемые на модель перед началом ее работы.

Значения начальной долготы и широты используются и для определения матрицы перехода из ГСК в местную систему координат (далее – МСК), связанную с ВО

$$\mathbf{M}_{\text{МГ}} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 & \cos \lambda_0 \cdot \sin \varphi_0 & \sin \lambda_0 \cdot \sin \varphi_0 \\ -\sin \varphi_0 & \cos \lambda_0 \cdot \cos \varphi_0 & \sin \lambda_0 \cdot \cos \varphi_0 \\ 0 & -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 \end{bmatrix}, \quad (46)$$

Матрица перехода из МСК в траекторную систему координат (далее – ТрСК), связанную с ВО, перед началом полета ВО задается следующим образом

$$\mathbf{M}_{\text{ТМ}} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_0 \cdot \cos \Psi_0 & \sin \Theta_0 & -\cos \Theta_0 \cdot \sin \Psi_0 \\ -\sin \Theta_0 \cdot \cos \Psi_0 & \cos \Theta_0 & \sin \Theta_0 \cdot \sin \Psi_0 \\ \sin \Psi_0 & 0 & \cos \Psi_0 \end{bmatrix}, \quad (47)$$

где Θ_0 – заданный угол наклона траектории;

Ψ_0 – заданный угол курса ВО.

Матрица перехода из ГСК в МСК определяется через произведение

$$\mathbf{M}_{\text{ТГ}} = \mathbf{M}_{\text{ТМ}} \cdot \mathbf{M}_{\text{МГ}}. \quad (48)$$

Начальный вектор скорости ВО в ГСК определяется по формуле:

$$\mathbf{V}_{0\Gamma} = V_0 \cdot \mathbf{i}_{\text{ТГ}}, \quad (49)$$

где V_0 – заданный модуль скорости цели;

$\mathbf{i}_{\text{ТГ}}$ – орт оси OX ТрСК в ГСК.

Вектор ускорения ВО задается, исходя из вектора управляющего ускорения ($\mathbf{U}_\text{Т}$) в ТрСК, определяемого в модели управления движением ВО

$$\mathbf{W}_{0\Gamma} = \mathbf{M}_{\text{ТГ}}^T \cdot \mathbf{U}_\text{Т}. \quad (50)$$

Расчет кинематических параметров траектории ВО на заданный момент времени t производится путем численного интегрирования.

В ходе полета вектор координат ВО в ГСК определяется по формуле

$$\mathbf{R}_\Gamma = (R_3 + H) \cdot \mathbf{j}_{\text{МГ}}, \quad (51)$$

где R_3 – радиус Земли;

H – высота полета цели;

$\mathbf{j}_{\text{МГ}}$ – орт оси OY МСК в ГСК.

Высота полета ВО вычисляется в ходе численного интегрирования, а ее производная определяется как скалярное произведение орта оси OX МСК в ГСК ($\mathbf{i}_{\text{МГ}}$) и вектора скорости цели в ГСК (\mathbf{V}_Γ)

$$\dot{H} = \mathbf{i}_{\text{МГ}} \cdot \mathbf{V}_\Gamma. \quad (52)$$

Вектор скорости ВО в ГСК определяется по формуле

$$\mathbf{V}_\Gamma = V \cdot \mathbf{i}_{\text{ТГ}}, \quad (53)$$

где $\mathbf{i}_{\text{ТГ}}$ – орт оси OX ТрСК в ГСК;

V – модуль скорости цели, вычисляемый в ходе численного интегрирования.

Производная модуля скорости определяется по формуле

$$\dot{V} = \frac{\mathbf{V}_\Gamma \cdot \mathbf{W}_\Gamma}{V}. \quad (54)$$

Ориентация осей МСК относительно ГСК изменяется с угловой скоростью, определяемой по формуле

$$\omega_{\text{МГ}} = \frac{\mathbf{j}_{\text{МГ}} \times \mathbf{V}_{\text{Г}}}{R_3 + H}. \quad (55)$$

Ориентация осей ТрСК относительно ГСК изменяется с угловой скоростью, определяемой по формуле

$$\omega_{\text{ТГ}} = \frac{\mathbf{i}_{\text{ТГ}} \times \mathbf{W}_{\text{Г}}}{V} + \omega_{\text{МГ}}. \quad (56)$$

Изменение ориентации ортов матриц $\mathbf{M}_{\text{МГ}}$ и $\mathbf{M}_{\text{ТГ}}$ за время Δt рассчитывается методом поворота вокруг вектора угловой скорости.

Для матрицы $\mathbf{M}_{\text{МГ}}$

$$\mathbf{j}_{\text{МГ}} = \left(\mathbf{j}_{\text{МГ}} - \frac{\omega_{\text{МГ}} \cdot (\omega_{\text{МГ}} \cdot \mathbf{j}_{\text{МГ}})}{\omega_{\text{МГ}}^2} \right) \cdot \cos(\omega_{\text{МГ}} \Delta t) + \frac{\omega_{\text{МГ}} \times \mathbf{j}_{\text{МГ}}}{\omega_{\text{МГ}}} \cdot \sin(\omega_{\text{МГ}} \Delta t) + \frac{\omega_{\text{МГ}} (\omega_{\text{МГ}} \cdot \mathbf{j}_{\text{МГ}})}{\omega_{\text{МГ}}^2}, \quad (57)$$

$$\mathbf{k}_{\text{МГ}} = (\mathbf{i}_{\text{ГГ}} \times \mathbf{j}_{\text{МГ}}) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (\mathbf{i}_{\text{ГГ}} \cdot \mathbf{j}_{\text{МГ}})^2}}, \quad (58)$$

$$\mathbf{i}_{\text{МГ}} = \mathbf{j}_{\text{МГ}} \times \mathbf{k}_{\text{МГ}}, \quad (59)$$

где $\mathbf{i}_{\text{МГ}}, \mathbf{j}_{\text{МГ}}, \mathbf{k}_{\text{МГ}}$ – орты осей OX, OY и OZ МСК в ГСК соответственно;
 $\mathbf{i}_{\text{ГГ}}$ – орт оси OX ГСК в ГСК.

Для матрицы $\mathbf{M}_{\text{ТГ}}$

$$\mathbf{i}_{\text{ТГ}} = \left(\mathbf{i}_{\text{ТГ}} - \frac{\omega_{\text{ТГ}} \cdot (\omega_{\text{ТГ}} \cdot \mathbf{i}_{\text{ТГ}})}{\omega_{\text{ТГ}}^2} \right) \cdot \cos(\omega_{\text{ТГ}} \Delta t) + \frac{\omega_{\text{ТГ}} \times \mathbf{i}_{\text{ТГ}}}{\omega_{\text{ТГ}}} \cdot \sin(\omega_{\text{ТГ}} \Delta t) + \frac{\omega_{\text{ТГ}} (\omega_{\text{ТГ}} \cdot \mathbf{i}_{\text{ТГ}})}{\omega_{\text{ТГ}}^2}, \quad (60)$$

$$\mathbf{j}_{\text{ТГ}} = \left(\mathbf{j}_{\text{ТГ}} - \frac{\omega_{\text{ТГ}} \cdot (\omega_{\text{ТГ}} \cdot \mathbf{j}_{\text{ТГ}})}{\omega_{\text{ТГ}}^2} \right) \cdot \cos(\omega_{\text{ТГ}} \Delta t) + \frac{\omega_{\text{ТГ}} \times \mathbf{j}_{\text{ТГ}}}{\omega_{\text{ТГ}}} \cdot \sin(\omega_{\text{ТГ}} \Delta t) + \frac{\omega_{\text{ТГ}} (\omega_{\text{ТГ}} \cdot \mathbf{j}_{\text{ТГ}})}{\omega_{\text{ТГ}}^2}, \quad (61)$$

$$\mathbf{k}_{\text{ТГ}} = \mathbf{i}_{\text{ТГ}} \times \mathbf{j}_{\text{ТГ}}, \quad (62)$$

где $\mathbf{k}_{\text{ТГ}}, \mathbf{i}_{\text{ТГ}}, \mathbf{j}_{\text{ТГ}}$ – орты осей OX, OY и OZ ТрСК в ГСК соответственно.

Модель движения ВО фактически описывает движение неманеврирующей ВО, то есть летательного аппарата, который совершает полет с постоянной скоростью, на постоянной высоте над Землей и с постоянным углом курса. В тоже время модель управления движением ВО позволяет имитировать движение и маневрирующих целей. Для этого в

зависимости от типа маневра вычисляется вектор требуемого управляющего ускорения в ТрСК

$$\mathbf{U}_T = [u_x, u_y, u_z]^T. \quad (63)$$

Далее приводится описание каждого вида маневра по отдельности.

1.5.1 Маневр «Разворот»

Задаваемые параметры маневра:

- $t_{\text{нм}}$ – время начала маневра (от начального момента времени работы модели);
- $t_{\text{м}}$ – продолжительность маневра;
- n – установившееся значение перегрузки (может принимать и положительные и отрицательные значения).

Время окончания маневра определяется по формуле

$$t_{\text{км}} = t_{\text{нм}} + t_{\text{м}} + 2 \cdot \tau, \quad (64)$$

где τ – время выхода на заданную перегрузку.

Составляющая управляющего ускорения по оси OZ ТрСК определяется по формуле

$$u_z = g_0 \cdot \begin{cases} n \cdot \frac{t-t_{\text{нм}}}{\tau}, & \text{если } 0 < t \leq (t_{\text{нм}} + \tau) \\ n, & \text{если } (t_{\text{нм}} + \tau) < t \leq (t_{\text{км}} - \tau) \\ n \cdot \frac{t_{\text{км}}-t}{\tau}, & \text{если } (t_{\text{км}} - \tau) < t \leq (t_{\text{км}}) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (65)$$

где g_0 – ускорение свободного падения.

1.5.2 Маневр «Изменение высоты»

Задаваемые параметры маневра:

- $t_{\text{нм}}$ – время начала маневра (от начального момента времени работы модели);
- $t_{\text{м}}$ – продолжительность маневра;

– n – установившееся значение перегрузки (может принимать и положительные и отрицательные значения).

Время окончания маневра определяется по формуле

$$t_{\text{KM}} = t_{\text{HM}} + t_{\text{M}} + 4 \cdot \tau, \quad (66)$$

Составляющая управляющего ускорения по оси OY ТрСК определяется по формуле

$$u_y = g_0 \times \begin{cases} n \cdot \frac{t-t_{\text{HM}}}{\tau}, & \text{если } 0 < t < (t_{\text{HM}} + \tau) \\ n, & \text{если } (t_{\text{HM}} + \tau) \leq t < (t_{\text{HM}} + 0,5 \cdot t_{\text{M}} + \tau) \\ n \cdot \frac{t_{\text{HM}} + 0,5 \cdot t_{\text{M}} + 2 \cdot \tau - t}{\tau}, & \text{если } (t_{\text{HM}} + 0,5 \cdot t_{\text{M}} + \tau) \leq t < (t_{\text{HM}} + 0,5 \cdot t_{\text{M}} + 3 \cdot \tau) \\ -n, & \text{если } (t_{\text{HM}} + 0,5 \cdot t_{\text{M}} + 3 \cdot \tau) \leq t < (t_{\text{KM}} - \tau) \\ -n \cdot \frac{t_{\text{KM}} - t}{\tau}, & \text{если } (t_{\text{KM}} - \tau) \leq t < t_{\text{KM}} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (67)$$

1.5.3 Маневр «Изменение скорости»

Время окончания маневра определяется по формуле (64).

Составляющая управляющего ускорения по оси OX ТрСК определяется по формуле

$$u_x = g_0 \cdot \begin{cases} n \cdot \frac{t-t_{\text{HM}}}{\tau}, & \text{если } 0 < t \leq (t_{\text{HM}} + \tau) \\ n, & \text{если } (t_{\text{HM}} + \tau) < t \leq (t_{\text{KM}} - \tau) \\ n \cdot \frac{t_{\text{KM}} - t}{\tau}, & \text{если } (t_{\text{KM}} - \tau) < t \leq (t - t_{\text{KM}}) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (68)$$

1.6 Унифицированный язык моделирования

Унифицированный язык моделирования (англ., Unified modeling language, UML) – это язык для визуализации, специфицирования, конструирования и документирования артефактов программных систем.

Язык состоит из словаря и правил, позволяющих комбинировать входящие в него слова и получать осмысленные конструкции. В языке моделирования словарь и правила ориентированы на концептуальное и

физическое представление системы. Язык моделирования, подобный UML, является стандартным средством для составления «чертежей», ПО.

Моделирование необходимо для понимания системы. При этом единственной модели никогда не бывает достаточно. Напротив, для понимания любой нетривиальной системы приходится разрабатывать большое количество взаимосвязанных моделей. В применении к программным системам это означает, что необходим язык, с помощью которого можно с различных точек зрения описать представления архитектуры системы на протяжении цикла ее разработки

Словарь и правила такого языка, как UML, объясняют, как создавать и читать хорошо определенные модели, но ничего не сообщают о том, какие модели и в каких случаях нужно создавать. Это задача всего процесса разработки программного обеспечения. Хорошо организованный процесс должен подсказать, какие требуются артефакты, какие ресурсы необходимы для их создания, как можно использовать эти артефакты, чтобы оценить выполненную работу и управлять проектом в целом [10].

UML представляет собой общецелевой язык визуального моделирования, который разработан для спецификации, визуализации, проектирования и документирования компонентов программного обеспечения, бизнес-процессов и других систем. Язык UML одновременно является простым и мощным средством моделирования, который может быть эффективно использован для построения концептуальных, логических и графических моделей сложных систем самого различного целевого назначения. Этот язык вобрал в себя наилучшие качества методов программной инженерии, которые с успехом использовались на протяжении последних лет при моделировании больших и сложных систем [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

UML – это язык визуализации. Написание моделей на UML преследует одну простую цель – облегчение процесса передачи информации о системе: явная модель облегчает общение.

Некоторые особенности системы лучше всего моделировать в виде текста, другие – графически. На самом деле во всех интересных системах существуют структуры, которые невозможно представить с помощью одного лишь языка программирования. UML – графический язык, что позволяет решить вторую из обозначенных проблем.

UML – это не просто набор графических символов. За каждым из них стоит хорошо определенная семантика. Это значит, что модель, написанная одним разработчиком, может быть однозначно интерпретирована другим – или даже инструментальной программой.

UML – это язык специфицирования. В данном контексте специфицирование означает построение точных, недвусмысленных и полных моделей. UML позволяет специфицировать все существенные решения, касающиеся анализа, проектирования и реализации, которые должны приниматься в процессе разработки и развертывания системы программного обеспечения.

UML – это язык конструирования. UML не является языком визуального программирования, но модели, созданные с его помощью, могут быть непосредственно переведены на различные языки программирования. Иными словами, UML-модель можно отобразить на такие языки, как Java, C++, Visual Basic, и даже на таблицы реляционной БД или устойчивые объекты объектно-ориентированной БД. Те понятия, которые предпочтительно передавать графически, так и представляются в UML; те же, которые лучше описывать в текстовом виде, выражаются с помощью языка программирования.

Такое отображение модели на язык программирования позволяет осуществлять прямое проектирование: генерацию кода из модели UML в какой-то конкретный язык. Можно решить и обратную задачу: реконструировать модель по имеющейся реализации. Обратное проектирование не представляет собой ничего необычного. Если вы не закодировали информацию в реализации, то эта информация теряется при прямом переходе от моделей к коду. Поэтому для обратного проектирования

необходимы как инструментальные средства, так и вмешательство человека. Сочетание прямой генерации кода и обратного проектирования позволяет работать как в графическом, так и в текстовом представлении, если инструментальные программы обеспечивают согласованность между обоими представлениями.

Помимо прямого отображения в языки программирования UML в силу своей выразительности и однозначности позволяет непосредственно исполнять модели, имитировать поведение систем и контролировать действующие системы.

UML – это язык документирования. Компания, выпускающая программные средства, помимо исполняемого кода производит и другие артефакты, в том числе следующие:

- 1) требования к системе;
- 2) архитектуру;
- 3) проект;
- 4) исходный код;
- 5) проектные планы;
- 6) тесты;
- 7) прототипы;
- 8) версии, и др.

В зависимости от принятой методики разработки выполнение одних работ производится более формально, чем других.

Упомянутые артефакты – это не просто поставляемые составные части проекта; они необходимы для управления, для оценки результата, а также в качестве средства общения между членами коллектива во время разработки системы и после ее развертывания.

UML позволяет решить проблему документирования системной архитектуры и всех ее деталей, предлагает язык для формулирования требований к системе и определения тестов [12].

Словарь языка UML включает три вида строительных блоков:

- 1) сущности;
- 2) отношения;
- 3) диаграммы.

Сущности – это абстракции, являющиеся основными элементами модели. Отношения связывают различные сущности; диаграммы группируют представляющие интерес совокупности сущностей.

Обобщение (англ., Generalization) – это отношение «специализация/обобщение», при котором объект специализированного элемента (потомок) может быть подставлен вместо объекта обобщенного элемента (родителя или предка).

Отношения реализации встречаются в двух случаях:

- 1) между интерфейсами и реализующими их классами или компонентами;
- 2) между прецедентами и реализующими их кооперациями.

Отношение реализации изображается в виде пунктирной линии с незакрашенной стрелкой, как нечто среднее между отношениями обобщения и зависимости.

Диаграмма в UML – это графическое представление набора элементов, изображаемое чаще всего в виде связанного графа с вершинами (сущностями) и ребрами (отношениями). Диаграммы рисуют для визуализации системы с разных точек зрения. Диаграмма – в некотором смысле одна из проекций системы. Как правило, за исключением наиболее тривиальных случаев, диаграммы дают свернутое представление элементов, из которых составлена система. Один и тот же элемент может присутствовать во всех диаграммах, или только в нескольких (самый распространенный вариант), или не присутствовать ни в одной (очень редко). Теоретически диаграммы могут содержать любые комбинации сущностей и отношений. На практике, однако, применяется сравнительно небольшое количество типовых комбинаций, соответствующих пяти наиболее употребительным видам, которые составляют архитектуру программной.

В UML выделяют девять типов диаграмм [12]:

- 1) диаграммы классов;
- 2) диаграммы объектов;
- 3) диаграммы прецедентов;
- 4) диаграммы последовательностей;
- 5) диаграммы кооперации;
- 6) диаграммы состояний;
- 7) диаграммы действий;
- 8) диаграммы компонентов;
- 9) диаграммы развертывания.

Строительные блоки UML нельзя произвольно объединять друг с другом. Как и любой другой язык, UML характеризуется набором правил, определяющих, как должна выглядеть хорошо оформленная модель, то есть семантически самосогласованная и находящаяся в гармонии со всеми моделями, которые с ней связаны.

В языке UML имеются семантические правила, позволяющие корректно и однозначно определять:

- 1) имена, которые можно давать сущностям, отношениям и диаграммам;
- 2) область действия (контекст, в котором имя имеет некоторое значение);
- 3) видимость (когда имена видимы и могут использоваться другими элементами);
- 4) целостность (как элементы должны правильно и согласованно соотноситься друг с другом);
- 5) выполнение (что значит выполнить или имитировать некоторую динамическую модель).

Модели, создаваемые в процессе разработки программных систем, эволюционируют со временем и могут неоднозначно рассматриваться разными участниками проекта в разное время. По этой причине создаются не только хорошо оформленные модели, но и такие, которые [9]:

- 1) содержат скрытые элементы (ряд элементов не показывают, чтобы упростить восприятие);
- 2) неполные (отдельные элементы пропущены);
- 3) несогласованные (целостность модели не гарантируется).

Элементами диаграммы UML могут быть классы программного кода, страницы сайта, части механизма, зоны торгового зала – в зависимости от того, какой процесс или какую сущность описывает ее создатель.

2 Постановка инженерной задачи

Требуется разработать ПО, реализующее:

- 1) математическую модель РЛС;
- 2) модель ВО;
- 3) управление моделированием;
- 4) графический интерфейс пользователя.

Математическая модель РЛС должна обеспечивать:

- 1) единичное измерение координат ВО;
- 2) принятия решения о принадлежности единичного измерения сопровождаемой траектории ВО;
- 3) оценку параметров движения ВО с использованием $\alpha\beta$ -фильтра;
- 4) расчет ошибки оценивания параметров ВО.

Модель ВО должна обеспечивать:

- 1) равномерное прямолинейное движение ВО;
- 2) выполнение маневров «разворот», «изменение высоты» и «изменение скорости».

Управление моделированием должно обеспечивать диспетчеризацию времени в ПО, а также запуск и остановку моделирования.

Графический интерфейс пользователя должен обеспечивать:

- 1) задание параметров варианта моделирования:
 - а) задание параметров РЛС;
 - б) задание параметров ВО и траектории движения ВО;
 - в) задание времени окончания моделирования;
- 2) загрузку и сохранение вариантов моделирования;
- 3) отображение результатов моделирования:
 - а) отображение траектории движения ВО;
 - б) отображение траектории ВО по данным сопровождения РЛС;
 - в) отображение оценки параметров движения ВО по результатам моделирования в зависимости от времени;

г) отображение ошибок оценивания параметров движения ВО в зависимости от времени.

Разработка ПО должна быть выполнена на языке C++ или Python с использованием библиотек Qt.

Параметры модели РЛС и параметры моделируемых ВО описаны далее.

3 Ход работы

3.1 Исходные данные для расчета

Исходными данными для расчета являются параметры моделируемой РЛС (таблица 1), параметры моделируемых ВО (таблица 2), а также параметры, используемые при подготовке вариантов моделирования (таблица 3).

Т а б л и ц а 1 – Параметры моделируемой РЛС

| Параметр | Значение |
|--|---|
| Высота фазового центра антенны | 5 м |
| Импульсная мощность излучаемого сигнала | 150 кВт |
| Длительность импульса | 0,1 мс |
| Коэффициенты усиления передающей антенны | 40 дБ |
| Коэффициенты усиления приемной антенны | 40 дБ |
| Длина волны | 0,035 м |
| Шум-фактор приемного устройства | 5 дБ |
| Потери при передаче сигнала | 1,5 дБ |
| Потери при приеме сигнала | 1,5 дБ |
| Потери при обработке сигнала | 1 дБ |
| Ширина диаграммы направленности антенны | 1° |
| Полоса сигнала | 2 МГц |
| Период обращения к ВО при сопровождении, с | 2 |
| Зона сопровождения | Круговая |
| Максимальное количество одновременно сопровождаемых ВО | 10 |
| Минимальная память фильтра | 5 |
| Максимальная память фильтра | 20 |
| Координаты ВО измеряемые независимо | Дальность (R), азимут (β), угол места (ε) |

Т а б л и ц а 2 – Параметры моделируемых ВО

| Параметр | Значение |
|--|------------------|
| Минимальное значение скорости, м/с | 50 |
| Максимальное значение скорости, м/с | 650 |
| Минимальное ускорение при маневре, доли g_0 | 0,1 |
| Максимальное ускорение при маневре, доли g_0 | 5 |
| ЭПР | 10 м^2 |

Т а б л и ц а 3 – Параметры вариантов моделирования

| Параметр | Значение |
|--|----------|
| Шаг перебора по памяти фильтра сопровождения в модели РЛС | 5 |
| Шаг перебора по скорости ВО, м/с | 20`0 |
| Шаг перебора по ускорению при маневре ВО, доли g_0 | 1 |
| Минимальное количество реализаций для каждого варианта моделирования | 100 |

3.2 Проектирование архитектуры программного обеспечения

В ходе проектирования архитектуры ПО должны быть выполнены следующие виды деятельности:

- 1) определение вариантов использования ПО;
- 2) проектирование подсистем;
- 3) определение последовательности работы подсистем;
- 4) проектирование классов.

Цель определения вариантов использования – определение связей между внешними системами и рассматриваемым проектом (например, между пользователем и разрабатываемым ПО).

Проектирование вариантов использования производится с помощью диаграмм вариантов использования UML.

Цель проектирования подсистем:

- 1) обеспечить максимально возможную независимость подсистемы от других подсистем и/или их интерфейсов;
- 2) обеспечить предоставление системой правильных интерфейсов;
- 3) обеспечить выполнение подсистемой ее задач, что включает в себя корректную реализацию операций в соответствии с определениями предоставляемых ею интерфейсов.

Например, в состав модели РЛС могут входить следующие подсистемы:

- 1) диспетчер моделирования;
- 2) модель ВО;
- 3) модель РЛС;
- 4) графический интерфейс пользователя.

Проектирование подсистем производится с помощью диаграмм классов использования UML на уровне подсистем.

Цель определения последовательности работы подсистем – определение взаимосвязей подсистем ПО и последовательности их выполнения.

Проектирование последовательности работы производится с помощью диаграмм взаимодействия и диаграмм последовательностей UML.

Цель проектирования классов – создание статической структуры системы, определения типов объектов и отношений между ними.

При проектировании класса определяются:

- 1) его атрибуты (состояний, в которых он находится);
- 2) отношения, в которые он вступает;
- 3) методы (которые реализуют его операции);
- 4) зависимости от обобщенных классов.

Проектирование классов производится с помощью диаграмм классов использования UML на уровне отдельных классов.

3.3 Процесс моделирования

В данной работе требуется обеспечить набор статистических данных для выполнения дальнейших оценок. Это обуславливает необходимость управлять

процессом формирования случайных значений в ходе набора статистики, а именно – иметь возможность как обеспечить повторяемость результатов моделирования при одинаковых исходных данных, так и сделать их различными из-за других значений т.н. «датчика случайных чисел», т.е. компонента ПО, обеспечивающего формирование случайных величин в процессе моделирования. В связи с этим введем следующие понятия.

Вариант моделирования – набор исходных данных (параметров РЛС, параметров ВО, параметров моделирования), для которого производится моделирование. К примеру, РЛС с периодом обращения к ВО 2 с и памятью фильтра в 10 измерений, ВО, движущийся в направлении РЛС равномерно прямолинейно с дальности 100 км со скоростью 250 м/с, длительность моделирования 500 с.

Примечание – В данной работе необходимо создать различные варианты моделирования и провести моделирование для каждого параметра из набора параметров как РЛС, так и ВО, представленных в разделе 3.1.

Реализация варианта моделирования – результаты моделирования конкретного варианта с конкретной последовательностью, формируемой датчиком случайных чисел. Т.е., к примеру, если необходимо провести моделирование 10 реализаций варианта, это означает, что исходные данные для всех 10 процессов моделирования будут одинаковые, а результаты — разные, в связи со случайными процессами, происходящими при моделировании (в первую очередь — в процессе оценки координат ВО в РЛС).

Примечание – В данной работе требуется для каждого варианта моделирования выполнить количество реализаций не меньше заданного в разделе 3.1.

Процесс моделирования проходит в модельном времени, расчет которого выполняется диспетчером моделирования. Кроме того, диспетчер

моделирования на каждом шаге моделирования проверяет необходимость запуска модели движения ВО и модели РЛС. При этом может производиться:

- 1) расчет обновленных координат ВО;
- 2) проверка обнаружения ВО моделью РЛС с учетом дальности действия (при необходимости);
- 3) расчет отношения сигнал-шум;
- 4) оценка параметров движения ВО в модели РЛС;
- 5) расчет ошибок оценивания параметров движения ВО в модели РЛС.

Для каждой реализации необходимые данные сохраняются для отображения в графическом интерфейсе и для дальнейшего анализа.

3.4 Расчет траектории движения воздушного объекта

В модели должен производиться расчет прямолинейного равномерного движения ВО (цели). Расчет траекторий должен производиться в ГСК с последующим пересчетом в МЗСК РЛС. В каждый момент времени цель характеризуется вектором координат $\mathbf{R} = \{x \ y \ z\}$ и вектором скорости $\mathbf{V} = \{\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}\}$.

Для описания гравитационного поля Земли используется сферическая модель: радиус сферы равен $R_3 = 6371210$ м, ускорение силы тяжести на поверхности сферы равно стандартному $g_0 = 9,80665$ м/с².

3.5 Расчет отношения сигнал-шум

Расчет отношения сигнал-шум должен проводиться при каждом обращении РЛС к цели с учетом текущих координат цели.

Отношение сигнал-шум на входе приемника РЛС рассчитывается по формуле

$$\rho = \frac{P_{\text{изл}} \tau_{\text{и}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 N_{\text{ш}} kT} \eta, \quad (69)$$

где $P_{\text{изл}}$ – импульсная мощность излучаемого сигнала;

$\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса;

$G_{\text{прд}}$ – коэффициенты усиления передающей антенны,

$G_{\text{прм}}$ – коэффициенты усиления приемной антенны,

λ – длина волны,

σ – ЭПР цели,

η – суммарный коэффициент потерь,

R – дальность цели,

$N_{\text{ш}}$ – шум-фактор приемного устройства,

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Вт·с/град,

$T = 290$ – стандартная температура, К.

3.6 Принятие решения об обнаружении отраженного сигнала воздушного объекта

Производится расчет дальности прямой видимости для РЛС по формуле, приведенной в разделе 1.4.

Отраженный от ВО сигнал считается обнаруженным, если:

- 1) расстояние от РЛС до ВО меньше, чем дальность прямой видимости;
- 2) отношение сигнал-шум $\rho > 13$ дБ.

3.7 Оценка параметров движения сопровождаемого воздушного объекта

После оценки отношения сигнал-шум, в случае принятия решения об обнаружении отраженного сигнала от цели, модель РЛС обеспечивает расчет измеренных координат ВО — производит «единичное измерение».

Измеренные координаты ВО $\lambda = \{R, \beta, \varepsilon\}$ рассчитываются следующим образом:

$$\lambda = \lambda_{\text{ВО}} + \Delta_{\lambda}, \quad (70)$$

где $\lambda_{\text{ВО}}$ — истинные координаты ВО,

Δ_{λ} — ошибки единичных измерений координат в сферической системе координат, которые представляют собой случайные величины,

некоррелированные между собой и во времени, и имеют нормальные законы распределения с нулевыми математическими ожиданиями $\Delta_\lambda = N(0, \sigma_\lambda)$ и СКО ошибок σ_λ .

СКО ошибок зависят от отношения сигнал-шум:

$$\sigma_R = \frac{c}{2} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{k_1 \sqrt{2 \cdot \rho}}, \quad \sigma_\beta = \sigma_\varepsilon = \frac{\sqrt{\pi}}{k_2 \sqrt{2 \cdot \rho}}, \quad (71)$$

где ρ – отношение сигнал/шум;

k_1 – ширина диаграммы направленности антенны, значение которой приведена в разделе 3.1;

k_2 – полоса сигнала, значение которой приведено в разделе 3.1;

После расчета результатов единичного измерения модель РЛС выполняет фильтрацию координат и скорости ВО с использованием $\alpha\beta$ -фильтра и экстраполяцию координат на момент следующего обращения к цели. Алгоритм фильтрации координат с использованием $\alpha\beta$ -фильтра описанного в разделе 1.2. Значения памяти фильтра которые необходимо использовать в данной работе приведены в разделе 3.1.

3.8 Расчет ошибок оценивания параметров движения сопровождаемого воздушного объекта

Расчет ошибок оценивания параметров движения необходимо проводить по набору реализаций каждого варианта моделирования двумя способами.

1. Усреднением по набору реализаций текущих расчетов СКО суммарной ошибки оценивания параметров движения ВО в процессе фильтрации по формулам, приведенным в разделе 1.3.

2. Усреднением по набору реализаций разницы между истинным положением ВО и оценкой положения ВО при сопровождении его моделью РЛС с использованием $\alpha\beta$ -фильтра.

Расчет ошибок должен проводиться для одних и тех же моментов времени, определяемых обращением модели РЛС к ВО при сопровождении.

Количество реализаций каждого варианта моделирования для оценки должно быть одинаковым для всех вариантов моделирования и не должно быть меньше указанного в разделе 3.1.

3.9 Разработка графического интерфейса

Разработка графического интерфейса модели РЛС должна быть выполнена с использованием библиотек Qt.

Основными задачами графического интерфейса являются следующие:

- 1) Задание исходных данных для моделирования:
 - а) параметров варианта моделирования;
 - б) задание параметров РЛС;
 - в) задание траектории движения ВО.
- 2) Просмотр и обработка результатов моделирования:
 - а) траектории моделируемых ВО;
 - б) траектории ВО, сопровождаемых РЛС;
 - в) оценки ошибок сопровождения ВО по набору реализаций;
 - г) оценки ошибок сопровождения ВО на основании работы алгоритма фильтрации.

3.10 Подготовка документации по результатам моделирования

Отчет по результатам моделирования должен включать:

- 1) введение
- 2) описание алгоритмов функционирования модели РЛС;
- 3) архитектуру разработанной модели РЛС;
- 4) результаты моделирования с использованием модели РЛС;
- 5) заключение.

Раздел «Введение» должен содержать общее описание выполнявшейся работы, содержать цель работы и задачи, решавшиеся для достижение поставленной цели.

Раздел «Описание алгоритмов функционирования модели РЛС» должен содержать краткое описание алгоритмов функционирования каждой из составных частей разработанной модели.

Раздел «Архитектура разработанной модели РЛС» должен содержать UML-диаграммы разработанной модели – диаграмму прецедентов, диаграммы классов, диаграмму взаимодействия, диаграмму активности.

Раздел «Результаты моделирования с использованием модели РЛС» должен содержать результаты моделирования вторичной обработки радиолокационной информации для различных траекторий ВО, в частности:

- 1) траектории моделируемых ВО;
- 2) траектории ВО, сопровождаемых РЛС;
- 3) оценки ошибок сопровождения ВО по набору реализаций;
- 4) оценки ошибок сопровождения ВО на основании работы алгоритма фильтрации.

Результаты могут быть представлены в табличном виде, а также в виде скриншотов работы разработанного графического интерфейса.

Раздел «Заключение» должен содержать выводы о проведенной работе, информацию о достижении цели работы и выполнении поставленных задач, а также анализ полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнение данной работы позволяет студентам ознакомиться с теоретическими основами вторичной обработки радиолокационной информации, а также научиться создавать простейшие математические модели РЛС и модели движения ВО.

Основным результатом выполнения данной работы является разработанное ПО математической модели РЛС, обеспечивающее:

- 1) задание параметров варианта моделирования;
- 2) задание параметров РЛС;
- 3) задание траектории движения ВО;
- 4) просмотр траектории движения ВО по результатам моделирования;
- 5) просмотр траектории ВО по данным сопровождения РЛС;
- 6) оценку параметров движения ВО по результатам моделирования;
- 7) определение ошибок оценивания параметров движения ВО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. — М.: Радиотехника, 2004, 320 с., ил.
2. Кузьмин С.З. Основы цифровой обработки радиолокационной информации. М., «Сов. Радио», 1974, 432 с., ил.
3. Кузьмин С. З. Цифровая обработка радиолокационной информации. — М.: Сов. радио, 1967. — 400 с.
4. Фари́на А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1993 — 320 с.: ил.
5. Bar-Shalom, Y. Estimation with applications to tracking and navigation — John Wiley & Sons, inc, 2001 — 558 p.
6. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Сколника. Пер. с англ. (в четырёх томах) под общей ред. К. Н. Трофимова — М.: Сов. радио, 1976, т. 1 — 456 с.; 1979, т. 3 — 528 с.; 1978, т. 4 — 376 с.
7. Справочник по радиолокации / Под ред. М. И. Сколника. / Пер. с англ. под общей ред. В. С. Вербы. — М.: Техносфера 2014. — т. 1 — 672 с.; т. 2 — 680 с.
8. Теоретические основы радиолокации. / Под редакцией Ширмана Я. Д. — М.: Сов. Радио, 1970. — 560 с.
9. Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. — М: Радио и связь, 1992. — 304 с.
10. Буч. Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML/ Руководство пользователя: пер.с англ. - М.: ДМК, 2000 — 432 с.: ил.
11. Лешек А. Мацяшек Анализ и проектирование информационных систем с помощью UML 2.0 [пер. с англ.] — 3-е изд. — М. Вильямс 2008 — 816 с.: ил.
12. Змитрович А. И, Интеллектуальные информационные системы. — Мн.: НТООО «ТетраСистемс», 2007.

ГЛОССАРИЙ

В данном методическом пособии используются следующие сокращения

| | | |
|------|---|------------------------------------|
| АЦП | – | аналогово-цифровой преобразователь |
| БД | – | база данных |
| ВО | – | воздушный объект |
| ГСК | – | геоцентрическая система координат |
| ДНА | – | диаграмма направленности антенны |
| МЗСК | – | местная земная система координат |
| ПО | – | программное обеспечение |
| РЛС | – | радиолокационная станция |
| ТрСК | – | траекторная система координат |
| СКО | – | среднее квадратическое отклонение |
| УКВ | – | ультракороткие волны |
| ЭПР | – | эффективная поверхность рассеяния |
| UML | – | Unified modeling language |

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

Геоцентрическая система координат $OXYZ_\Gamma$, представленная на рисунке А.1, связана с земным сфероидом радиуса R_3 . Начало координат совмещено с центром сфероида, ось OX_Γ направлена по оси вращения в направлении на север, ось OY_Γ лежит в плоскости экватора и проходит через Гринвичский меридиан, направление оси OZ_Γ образует с осями OX_Γ и OY_Γ правую систему координат.

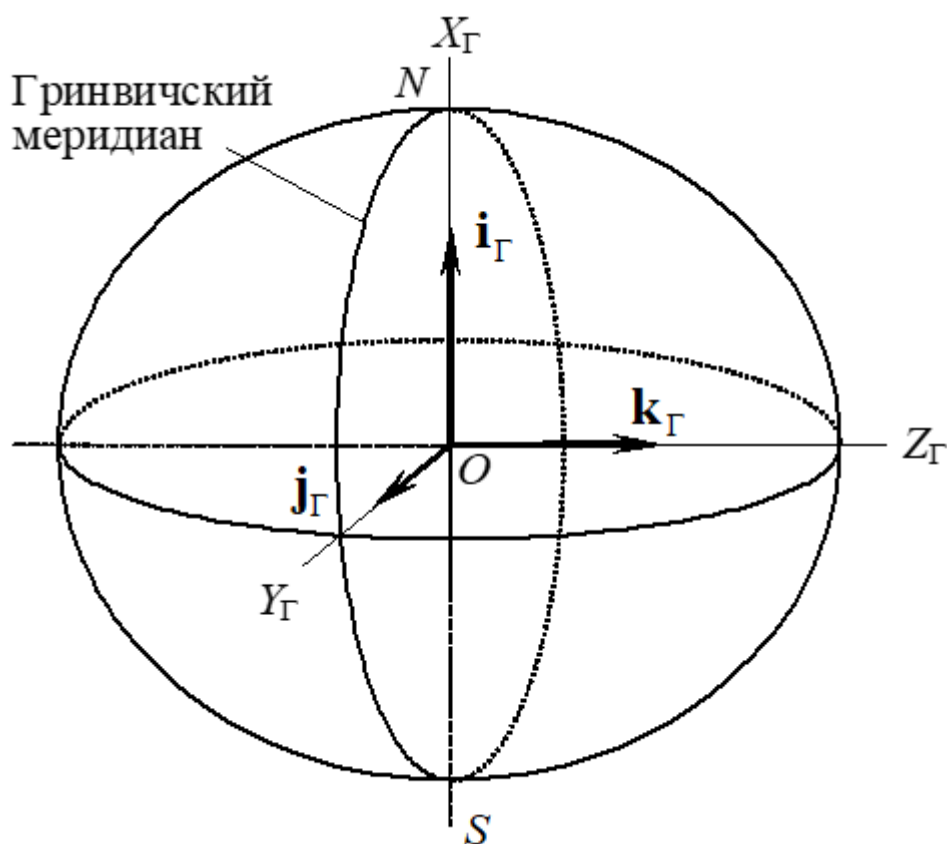


Рисунок А.1 – Геоцентрическая система координат

Геоцентрическая система координат задана ортами

$$i_\Gamma = \|1, \quad 0, \quad 0\|^T, \quad (\text{A.1})$$

$$j_\Gamma = \|0, \quad 1, \quad 0\|^T, \quad (\text{A.2})$$

$$k_\Gamma = \|0, \quad 0, \quad 1\|^T, \quad (\text{A.3})$$

где T – знак транспонирования.

Местная земная система координат объекта $MXYZ_M$ представлена на рисунке А.2. Начало МЗСК связано с положением объекта и задается в ГСК долготой χ_M , широтой ϕ_M и высотой h_M . Ось MX_M направлена параллельно касательной к местному меридиану в направлении на север, ось MY_M направлена по радиус-вектору \mathbf{r} положения объекта, ось MZ_M параллельна плоскости экватора.

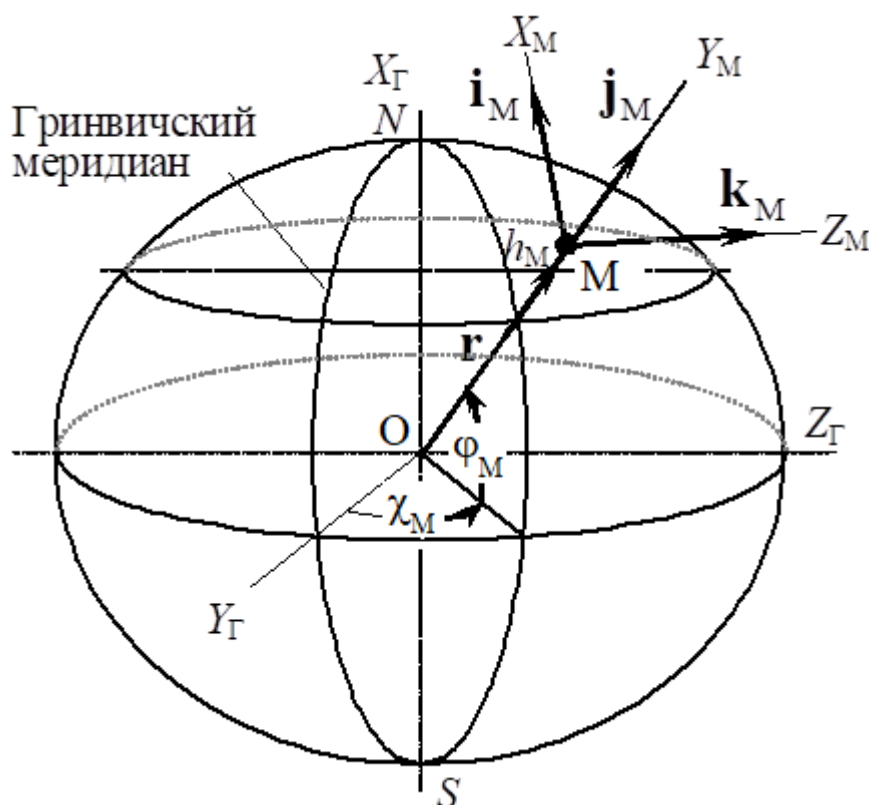


Рисунок А.2 – Местная земная система координат объекта

Долгота χ_M – угол $(-180^\circ < \chi_M \leq 180^\circ)$ между плоскостями начального (Гринвичского) меридиана и местного меридиана положения объекта. Восточные долготы, т.е. долготы точек, расположенных восточнее Гринвичского меридиана, считаются положительными, а западные – отрицательными.

Широта ϕ_M – угол между плоскостью экватора и радиус-вектором \mathbf{r} положения объекта $(-90^\circ < \phi_M \leq 90^\circ)$. Северные широты, т.е. широты точек, расположенных севернее экватора, принято считать положительными, южные – отрицательными.

Высота h_M – расстояние до объекта от поверхности земного сфероид по радиус-вектору r . Высота объекта, расположенного над поверхностью сфероид, считается положительной, под поверхностью – отрицательной.

Орты МЗСК в ГСК (i_M, j_M, k_M) могут быть заданы в полярных координатах

$$i_M = \|\cos(-\varphi_M), \cos \chi_M \cdot \sin(-\varphi_M), \sin \chi_M \cdot \sin(-\varphi_M)\|^T, \quad (A.4)$$

$$j_M = \|\sin(-\varphi_M), \cos \chi_M \cdot \cos(-\varphi_M), \sin \chi_M \cdot \cos(-\varphi_M)\|^T, \quad (A.5)$$

$$k_M = \|0, -\sin \chi_M, \cos \chi_M\|^T, \quad (A.6)$$

или декартовых координатах

$$i_M = \left\| \frac{r_{YZ}}{r}, \frac{-r_Y \cdot r_X}{r \cdot r_{YZ}}, \frac{-r_Z \cdot r_X}{r \cdot r_{YZ}} \right\|^T, \quad (A.7)$$

$$j_M = \left\| \frac{r_X}{r}, \frac{r_Y}{r}, \frac{r_Z}{r} \right\|^T, \quad (A.8)$$

$$k_M = \left\| 0, \frac{-r_Z}{r_{YZ}}, \frac{r_Y}{r_{YZ}} \right\|^T. \quad (A.9)$$

Вектор начала координат МЗСК в ГСК вычисляется по формуле

$$r = j_M \cdot (R_3 + h_M). \quad (A.10)$$

Матрица перехода в МЗСК из ГСК имеет вид

$$M = \|i_M, j_M, k_M\|^T. \quad (A.11)$$

Пересчет координат включает две задачи:

1) пересчет вектора координат и вектора скорости точки P в МЗСК объекта A из ГСК и обратно;

2) пересчет вектора координат и вектора скорости точки P в МЗСК объекта B , заданного в МЗСК объекта A .

Алгоритм пересчета вектора координат и вектора скорости точки P в МЗСК объекта A из ГСК и обратно:

$$r_{P<M_A>} = M_A \cdot (r_{P<\Gamma>} - r_A), \quad (A.12)$$

$$v_{P<M_A>} = M_A \cdot v_{P<\Gamma>}, \quad (A.13)$$

$$r_{P<\Gamma>} = M_A^T \cdot r_{P<M_A>} + r_A, \quad (A.14)$$

$$v_{P<\Gamma>} = M_A^T \cdot v_{P<M_A>}, \quad (A.15)$$

где $r_{P<\Gamma>}$ – вектор координат точки P в ГСК;

$v_{P<\Gamma>}$ – вектор скорости точки P в ГСК;

$r_{P<M_A>}$ – вектор координат точки P в МЗСК объекта A;

$v_{P<M_A>}$ – вектор скорости точки P в МЗСК объекта A;

$M_A = \|i_A, j_A, k_A\|^T$ – матрица перехода в МЗСК объекта A из ГСК;

$i_M = \|\cos(-\varphi_A), \cos \chi_A \cdot \sin(-\varphi_A), \sin \chi_A \cdot \sin(-\varphi_A)\|^T$;

$j_A = \|- \sin(-\varphi_A), \cos \chi_A \cdot \cos(-\varphi_A), \sin \chi_A \cdot \cos(-\varphi_A)\|^T$;

$k_A = \|0, -\sin \chi_A, \cos \chi_A\|^T$;

χ_A, φ_A, H_A – долгота, широта и высота объекта A;

$r_A = j_A \cdot (R_3 + H_A)$ – вектор начала координат МЗСК объекта A в ГСК.

Алгоритм пересчета вектора координат и вектора скорости точки P в МЗСК объекта B, заданного в МЗСК объекта A

$$r_{P<M_B>} = M_B \cdot (r_A - r_B + M_A^T \cdot r_{P<M_A>}), \quad (A.16)$$

$$v_{P<M_B>} = M_B \cdot M_A^T \cdot v_{P<M_A>}, \quad (A.17)$$

где $r_{P<M_B>}$ – вектор координат точки P в МЗСК объекта B;

$v_{P<M_B>}$ – вектор скорости точки P в МЗСК объекта B;

$M_B = \|i_B, j_B, k_B\|^T$ – матрица перехода в МЗСК объекта B из ГСК;

$i_M = \|\cos(-\varphi_B), \cos \chi_B \cdot \sin(-\varphi_B), \sin \chi_B \cdot \sin(-\varphi_B)\|^T$;

$j_B = \|- \sin(-\varphi_B), \cos \chi_B \cdot \cos(-\varphi_B), \sin \chi_B \cdot \cos(-\varphi_B)\|^T$;

$k_B = \|0, -\sin \chi_B, \cos \chi_B\|^T$;

χ_B, φ_B, H_B – долгота, широта и высота объекта B,

$r_B = j_B \cdot (R_3 + H_B)$ – вектор начала координат МЗСК объекта B в ГСК.

Прямоугольная и сферическая системы координат

Прямоугольные координаты

Начало координат местной земной системы координат (МЗСК) расположено в точке стояния объекта на поверхности Земли. Ось OX направлена на «Север». Ось OY направлена по радиус-вектору Земли. Ось OZ

перпендикулярна осям OX, OY и образует с ними правую систему координат (рисунок А.3).

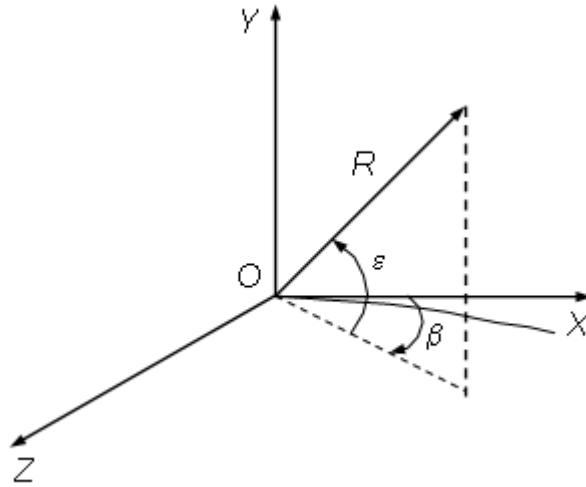


Рисунок А.3 – Местная земная система координат

Сферические координаты

В МЗСК сферические координаты: дальность, азимут и угол места (R, β, ε) связаны с прямоугольными координатами (x, y, z) соотношениями

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (\text{A.18})$$

$$\beta = \arctg \frac{z}{x}, \quad (\text{A.19})$$

$$\varepsilon = \arctg \frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}, \quad (\text{A.20})$$

где азимут β отсчитывается от оси OX по часовой стрелке.

Прямоугольные координаты в МЗСК \rightarrow Сферические координаты в МЗСК

Сферические координаты МЗСК R, β, ε вычисляются по формулам (А.18 – А.20).

При расчете β необходимо учитывать знаки x и z и рассчитывать β в интервале $[0, 2\pi]$:

если $z > 0$ и $x > 0$:

$$\beta = \arctg \left(\left| \frac{z}{x} \right| \right) = \arcsin \frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}}, \quad (\text{A.21})$$

если $z > 0$ и $x < 0$:

$$\beta = \pi - \arctg\left(\left|\frac{z}{x}\right|\right) = \pi - \arcsin \frac{z}{\sqrt{x^2+z^2}}, \quad (\text{A.22})$$

если $z < 0$ и $x < 0$:

$$\beta = \pi + \arctg\left(\left|\frac{z}{x}\right|\right) = \pi + \arcsin \frac{z}{\sqrt{x^2+z^2}}, \quad (\text{A.23})$$

если $z < 0$ и $x > 0$:

$$\beta = 2\pi - \arctg\left(\left|\frac{z}{x}\right|\right) = 2\pi - \arcsin \frac{z}{\sqrt{x^2+z^2}}. \quad (\text{A.24})$$

Производные сферических координат R, β, ε :

$$\dot{R} = \frac{x\dot{x}+y\dot{y}+z\dot{z}}{R}, \dot{\beta} = \frac{x\dot{z}-\dot{x}z}{x^2+z^2}, \dot{\varepsilon} = \frac{R\dot{y}-y\dot{R}}{R\sqrt{x^2+z^2}},$$

где $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ – производные прямоугольных координат x, y, z .

Сферические координаты в МЗСК \rightarrow Прямоугольные координаты в МЗСК

Прямоугольные координаты МЗСК x, y, z :

$$x = R \cos \beta \cos \varepsilon, y = R \sin \varepsilon, z = R \sin \beta \cos \varepsilon. \quad (\text{A.25})$$

Производные прямоугольных координат x, y, z :

$$\dot{x} = \dot{R} \cos \beta \cos \varepsilon - R\dot{\beta} \sin \beta \cos \varepsilon - R\dot{\varepsilon} \cos \beta \sin \varepsilon, \quad (\text{A.26})$$

$$\dot{y} = \dot{R} \sin \varepsilon - R\dot{\varepsilon} \cos \varepsilon, \quad (\text{A.27})$$

$$\dot{z} = \dot{R} \sin \beta \cos \varepsilon - R\dot{\beta} \cos \beta \cos \varepsilon - R\dot{\varepsilon} \sin \beta \sin \varepsilon. \quad (\text{A.28})$$