

УО «Белорусская государственная академия авиации»
Факультет гражданской авиации
Кафедра технической эксплуатации авиационного и радиоэлектронного
оборудования

Математическая модель радиовысотомера

Якута Константин Иванович

Форма обучения: очная

Специальность:

1-37 04 02 «Техническая эксплуатация авиационного оборудования»

Направление специальности:

1-37 04 02-02 «Техническая эксплуатация авиационного оборудования
(радиоэлектронное оборудование)»

Специализация:

1-37 04 02-02 01 «Радиоэлектронное оборудование воздушных судов»

5 курс, группа Р116

Научный руководитель:
майор Боровой А.Г., кандидат
технических наук

Минск, 2021

Содержание

Введение.....	3
1. Основные задачи и структурная схема математической модели	5
2. Модель формирования отраженного от земной поверхности сигнала радиовысотомера	7
3. Модель функционирования радиовысотомера	9
4. Анализ результатов моделирования функционирования радиовысотомера	11
Заключение	17
Список использованных источников	18

Введение

Высота полета летательного аппарата (ЛА) является одним из основных измеряемых навигационных параметров, что обусловлено непосредственным ее влиянием на безопасность полетов. В настоящее время существуют множество измерителей высоты, основными из которых являются: барометрический высотомер, радиовысотомер, спутниковая навигационная система.

Барометрические высотомеры измеряют высоту полета относительно, как правило, уровня морской поверхности и имеют значительные погрешности из-за отклонения реальных параметров атмосферы от стандартных, принятых при калибровке. Основным недостатком спутниковой навигационной системы является ее относительно низкая помехоустойчивость, что затрудняет ее использование. В связи с этим данные измерители высоты не могут быть использованы в качестве основных источников информации.

Радиовысотомеры измеряют истинную высоту полета, то есть высоту самолета над реальным рельефом земной поверхности. Их точность практически не зависит от атмосферных условий. По этой причине радиовысотомеры активно применяются особенно при полете на малых и предельно малых высотах.

Бортовые авиационные радиовысотомеры активно применяются уже несколько десятилетий [2]. В настоящее время нашли широкое применение два типа радиовысотомеров: импульсные радиовысотомеры и радиовысотомеры с частотной модуляцией. Импульсные радиовысотомеры применяются для измерения больших высот, их относительные погрешности малы и не превышают 0,25 % измеряемой высоты. Измерение малых высот с помощью импульсных радиовысотомеров затруднительно из-за невозможности отсчета малого времени запаздывания (меньшего, чем длительность импульсов). Получение очень коротких импульсов (около долей микросекунд и меньше) сравнительно простыми средствами до настоящего времени проблематично. Поэтому для измерения малых высот применяются радиовысотомеры с непрерывным излучением и частотной модуляцией. Для измерения больших высот радиовысотомеры с частотной модуляцией не применяются.

Однако использование существующих изделий в качестве бортового оборудования для малогабаритных летательных аппаратов в значительной степени ограничено. Масса-габаритные ограничения и необходимость

снижения энергопотребления являются основными для любого бортового оборудования. В таких условиях всегда является актуальной задача разработки новой аппаратуры, которая будет удовлетворять заранее установленным ограничениям.

Начальным этапом в процессе разработки любой аппаратуры является разработка ее имитационной математической модели, что позволяет на основе анализа результатов моделирования в значительной степени обосновать технический облик (структуру и технические характеристики) разрабатываемой аппаратуры.

1. Основные задачи и структурная схема математической модели

Разрабатываемая математическая модель радиовысотомера в значительной степени должна отражать как его принципы функционирования, так и условия его применения. Для этого была разработана структурная схема имитационной математической модели радиовысотомера, представленная на рисунке 1.

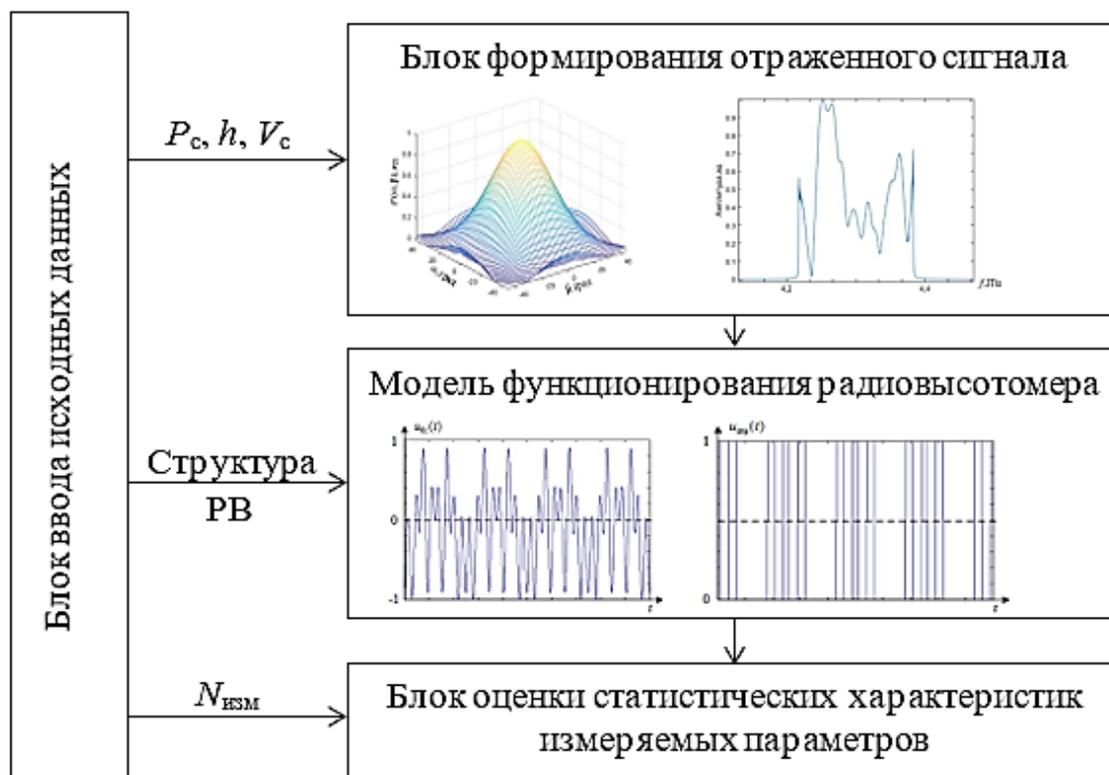


Рисунок 1 – Структурная схема математической модели радиовысотомера малых высот

Математическая модель радиовысотомера состоит из четырех составляющих: блока ввода исходных данных, блока формирования отраженного сигнала, модели функционирования радиовысотомера и блока оценки статистических характеристик измеряемых параметров.

Блок ввода исходных данных отвечает за формирование начальных условий и ограничений для имитационной математической модели радиовысотомера.

На основе информации, поступающей с блока ввода исходных данных, в блоке формирования отраженного сигнала (сумма отраженных сигналов от единичных элементов подстилающей поверхности) формируется, принимаемое радиовысотомером излучение [3,5]. Под единичным элементом

понимается участок подстилающей поверхности, облучаемый передающей антенной радиовысотомера с площадью рассчитываемой исходя из количества моделируемых элементов диаграммы направленности антенны (ДНА) и геометрических соотношений. При этом учитывается подавляющее большинство факторов влияющих на формирование отраженного сигнала, основными из которых являются:

- мощность излучаемого сигнала, его вид и характеристики, передающей и приемной антенн радиовысотомера;
- расстояние от фазового центра антенны до середины единичного элемента подстилающей поверхности;
- угол падения излучаемого сигнала на подстилающую поверхность;
- тип подстилающей поверхности;
- значения уровня ДНА в направлении излучения;
- значение доплеровской частоты и фазы сигнала в зависимости от геометрических соотношений для каждого отраженного сигнала от единичного элемента земной поверхности.

Модель функционирования радиовысотомера описывает основные преобразования осуществляемые в процессе обработки отраженного от подстилающей поверхности сигнала. В ней также учтена возможность изменения структуры и алгоритмов обработки сигнала, что используется при обосновании технического облика радиовысотомера для ЛА [4].

Выходная информация с модели функционирования радиовысотомера поступает на блок оценки статистических характеристик, который предназначен для получения оценок технических характеристик радиовысотомера в зависимости от условий моделирования [1]. Это позволяет на основе анализа полученных результатов обосновать технический облик радиовысотомера в зависимости от заданных ограничений. Основным анализируемым выходным параметром является точность определения скорости БЛА, которая определяется с использованием статистического метода [3].

Основными задачами математической модели является:

- проведение сравнительного анализа точности получения оценок высоты летательного аппарата при использовании радиовысотомера с излучаемыми непрерывным немодулированным и с частотно модулированным сигналами;
- обоснование оптимальных значений размеров апертуры антенн и углов наклона их максимумов диаграмм направленности при заданной точности определения высоты;

– выработка рекомендаций и разработка способов по повышению точности измерения высоты полета ЛА.

2. Модель формирования отраженного от земной поверхности сигнала радиовысотомера

Отраженный от подстилающей поверхности сигнал формируется большим числом рассеивающих элементов, причем фазы элементарных сигналов от рассеивающих элементов не зависят друг от друга. Данный факт позволяет сделать вывод о достаточно сложной структуре отраженного сигнала [3]. В этой связи для упрощения описания модели отраженного сигнала будут сделаны следующие допущения:

– коэффициент радиолокационного отражения от рассеивающего элемента зависит только от угла падения зондирующего сигнала и на площади единичного элемента земной поверхности является постоянным;

– площадь единичного элемента земной поверхности не зависит от угла падения сигнала радиовысотомера;

– начальная фаза и доплеровская частота отраженного сигнала от рассеивающего элемента являются детерминированными значениями и зависят от геометрических соотношений.

Рассмотрим геометрические соотношения, поясняющие принцип формирования отраженного сигнала и введенных допущений (рисунок 2).

Основными этапами формирования отраженного сигнала являются:

Формирование ДНА. Характеристики которой рассчитываются в зависимости от ее апертуры в соответствии с выражением [3]:

$$F(\alpha, \beta) = \frac{\sin[(\pi a / \lambda) \sin \alpha \cos \beta]}{(\pi a / \lambda) \sin \alpha \cos \beta} \times \frac{\sin[(\pi b / \lambda) \sin \alpha \sin \beta]}{(\pi b / \lambda) \sin \alpha \sin \beta}, \quad (2.1)$$

где: a , b – размеры апертуры антенны в продольной и поперечной плоскостях соответственно;

α – угол в точку, где определяется отражение от земной поверхности и осью $-Y$;

β – угол в точку, где определяется отражение от земной поверхности и плоскостью $O'OX$.

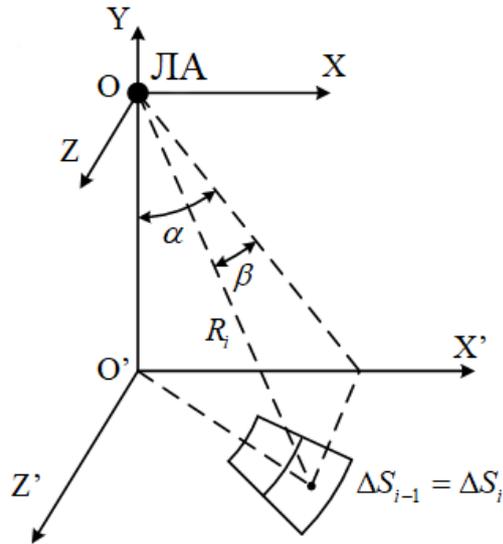


Рисунок 2 – Геометрия формирования отраженного сигнала от i -го единичного элемента земной поверхности

Моделирование ДНА осуществляется в заданном секторе с определенным угловым «шагом», что позволяет ее разбить на N направлений, которые формируют единичные элементы земной поверхности. При значении углов α и β равным нулю формируется максимум ДНА. Угол наклона максимума ДНА определяется исходя из наклона антенн радиовысотомера относительно планера БЛА и его угловой ориентации относительно земной поверхности (углы Эйлера).

После формирования ДНА радиовысотомера происходит расчет коэффициента усиления антенны исходя из полученной ширины ДНА [3]:

$$G = 4\pi / A_{0,5} B_{0,5}, \quad (2.2)$$

где $A_{0,5}, B_{0,5}$ – ширина ДНА радиовысотомера по уровню половинной мощности в радианах.

Расчет значения амплитуды отраженного сигнала i -го единичного элемента земной поверхности $U_{\text{отр}\Delta S_i}$, который примем равным корню квадратному из мощности отраженного сигнала, рассчитываемой с использованием следующего выражения [3]:

$$P_{\text{отр}\Delta S_i} = \frac{PG^2\lambda^2\Delta S_i\sigma_i}{(4\pi)^3 R_i^4}, \quad (2.3)$$

где: P – мощность передатчика радиовысотомера;

ΔS_i – площадь i -го единичного элемента земной поверхности;

λ – длина волны сигнала радиовысотомера;

σ_i – коэффициент рассеивания i -го единичного элемента земной поверхности;

R_i – расстояние от центра масс ЛА до i -го единичного элемента земной поверхности.

Площадь i -го единичного элемента земной поверхности рассчитывается как отношение площади земной поверхности облучаемой антенной радиовысотомера на количество единичных элементов. Значение R_i рассчитывается исходя из геометрических соображений, а коэффициент σ_i выбирается исходя из значения угла падения излучения радиовысотомера [3].

Формирование результирующего отраженного сигнала ($u_{\text{отр}}(t)$) от участка подстилающей поверхности можно представить в следующем виде:

$$u_{\text{отр}}(t) = \sum_{i=1}^N U_{\text{отр}\Delta S_i} \sin((\omega_0 + \omega_{D_i})t + \varphi_i), \quad (2.4)$$

где: $U_{\text{отр}\Delta S_i}$ – амплитуда отраженного сигнала от i -го единичного элемента земной поверхности;

ω_0 – несущая частота зондирующего сигнала (может быть и не фиксированного значения);

ω_{D_i} – доплеровская добавка от каждого i -го единичного элемента земной поверхности;

φ_i – начальная фаза отраженного сигнала от каждого i -го единичного элемента земной поверхности;

N – количество единичных элементов земной поверхности.

Значения ω_{D_i} и φ_i рассчитываются исходя из геометрических соображений.

Таким образом, формирование отраженного сигнала осуществляется в три этапа на основе исходных данных и с учетом геометрических соображений.

3. Модель функционирования радиовысотомера

В современных радиовысотомерах малых высот (РВМВ) в основном применяются два вида частотной модуляции излучаемых сигналов: пилообразная и по гармоническому закону. Рассмотрим основные количественные соотношения для случая гармонической модуляции частоты излучаемых колебаний с использованием упрощенной структурной схемой РВМВ (рисунок 3) [4, 5].



Рисунок 3 – Структурная схема радиовысотомера

Генератор СВЧ формирует непрерывные частотно-модулированные колебания, излучаемые передающей антенной. При гармонической модуляции частота излучаемых колебаний $\omega(t)$ описывается выражением:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos(\Omega_M t), \quad (2.5)$$

где ω_0 – средняя частота (циклическая);
 $\Delta\omega$ – девиация частоты (циклической);
 Ω_M – частота модуляции.

С учетом (2.5) излучаемый сигнал можно представить в виде:

$$u_{\text{изл}}(t) = U_{\text{изл}} \sin \left(\omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega_M} \sin(\Omega_M t) \right) = U_{\text{изл}} \sin(\varphi_1), \quad (2.6)$$

где $U_{\text{изл}}$ – амплитуда излучаемого сигнала.

Отраженные от поверхности земли колебания принимаются приемной антенной РВМВ и далее поступают на один из входов балансного смесителя. Принимаемый сигнал может быть представлен следующим образом:

$$u_{\text{пр}}(t) = U_{\text{пр}} \sin \left(\omega_0 (t - \tau) + \frac{\Delta\omega}{\Omega_M} \sin [\Omega_M (t - \tau)] \right) = U_{\text{пр}} \sin(\varphi_2), \quad (2.7)$$

где $\tau = 2h/c$;

$U_{\text{пр}}$ – амплитуда принимаемого сигнала;
 h – высота полета воздушного судна.

Ослабленный излучаемый (прямой) и принимаемый сигналы подаются на балансный смеситель, в котором преобразование сигналов сводится к их перемножению и выделению сигнала разностной частоты. Разделение излучаемого и принимаемого сигналов в РВМВ достигается за счет

использования разности приемной и передающей антенн в пространстве. В результате перемножения образуется напряжение:

$$u_{\text{бс}}(t) = \frac{1}{2} K_{\text{бс}} U_{\text{изл}} U_{\text{пр}} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{1}{2} K_{\text{бс}} U_{\text{изл}} U_{\text{пр}} \cos(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (2.8)$$

где $K_{\text{бс}}$ – коэффициент передачи балансного смесителя.

Выходная нагрузка балансного смесителя должна обладать резонансными свойствами, поэтому на выход проходят только сигнал разностной частоты (частоты биений F_b):

$$u_c(t) = \frac{1}{2} K_{\text{бс}} U_{\text{изл}} U_{\text{пр}} \cos\left(\omega_0 \tau + 2 \frac{\Delta\omega}{\Omega_M} \sin\left(\frac{\Omega_M \tau}{2}\right) \cos\left[\Omega_M \left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right]\right) \quad (2.9)$$

Сигнал $u_c(t)$ с выхода балансного смесителя подается на усилитель низкой частоты (УНЧ) и дифференцируется. В результате этого на выходе УНЧ действует сигнал:

$$u_{\text{вых}}(t) = K_{\text{унч}} K_{\text{бс}} U_{\text{изл}} U_{\text{пр}} \Delta\omega \frac{H}{c} \Omega_M \sin\left[\omega_0 \tau + \Delta\omega \tau \cos\left(\Omega_M \left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right)\right] \times \quad (2.10) \\ \times \sin\left(\Omega_M \left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right)$$

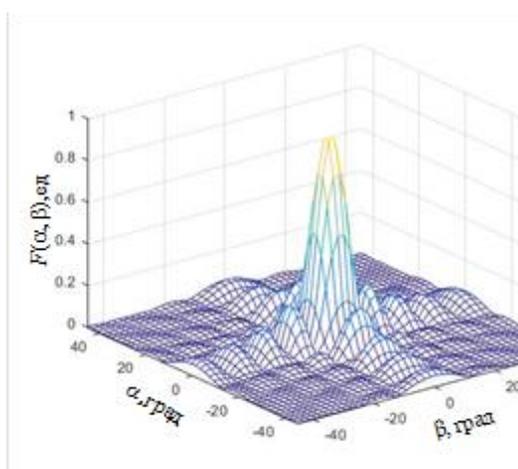
где $K_{\text{унч}}$ – коэффициент передачи УНЧ.

Сигнал с выхода УНЧ поступает в устройство формирования импульсов, где он в простейшем случае усиливается и ограничивается. С выхода устройства формирования импульсов снимаются калиброванные импульсы с постоянной амплитудой и длительностью, которые подаются на счетчик импульсов. В счетчике последовательность импульсов преобразуется в постоянное напряжение, которое пропорционально измеряемой высоте. Это напряжение после усиления поступает на индикатор, шкала которого проградуирована в единицах высоты, а также в пилотажно-навигационный комплекс.

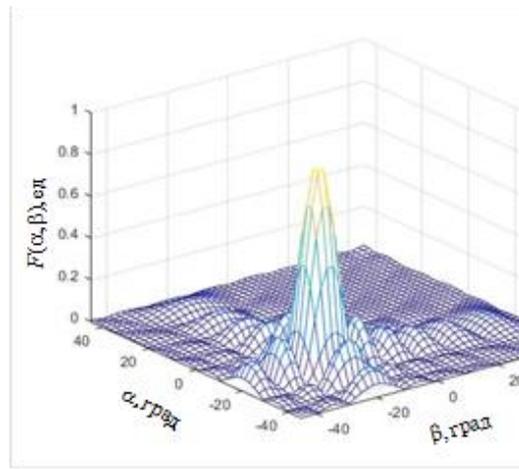
4. Анализ результатов моделирования функционирования радиовысотомера

Участок земной поверхности под ЛА разбивается на единичные участки, которые определяются периодом модуляции излучаемых радиовысотометром колебаний. На каждом таком интервале ЛА считается неподвижным.

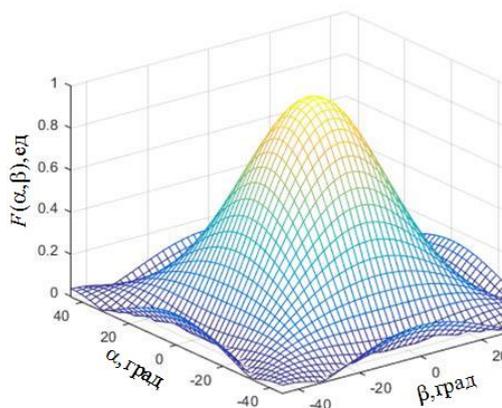
В соответствии с начальным угловым положением антенн радиовысотомера относительно планера ЛА формируются их диаграммы направленности, которые характеризуют направление излучения относительно земли. Внешний вид ДНА, направленных к земле под разными углами и для разных апертур представлен на рисунке 4.



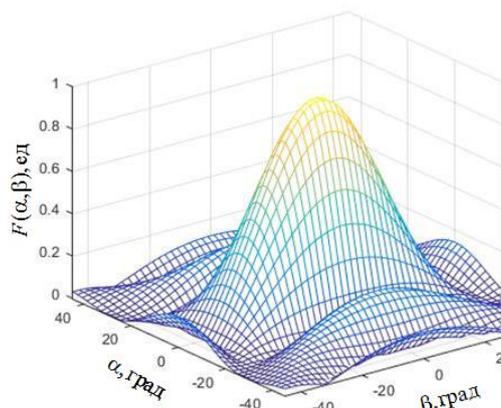
а



б



в



г

размеры апертур антенн: а – $0,2 \times 0,2$ м; в – $0,1 \times 0,05$ м; г – $0,05 \times 0,05$ м;
 угол наклона максимума ДНА: б – $\alpha = 20$ град; $\beta = 20$ град

Рисунок 4 – Вид ДНА направленные перпендикулярно относительно планера ЛА для разных размеров апертур антенн (а, в, г) и направленной под углом к планеру ЛА (б)

После формирования ДНА производится расчет отраженного сигнала в соответствии с моделью, представленной в разделе 3.

При этом учитывается значение коэффициента рассеивания σ_i которое зависит от угла облучения земной поверхности.

График зависимости σ_i от углов α и β представлены на рисунке 5.

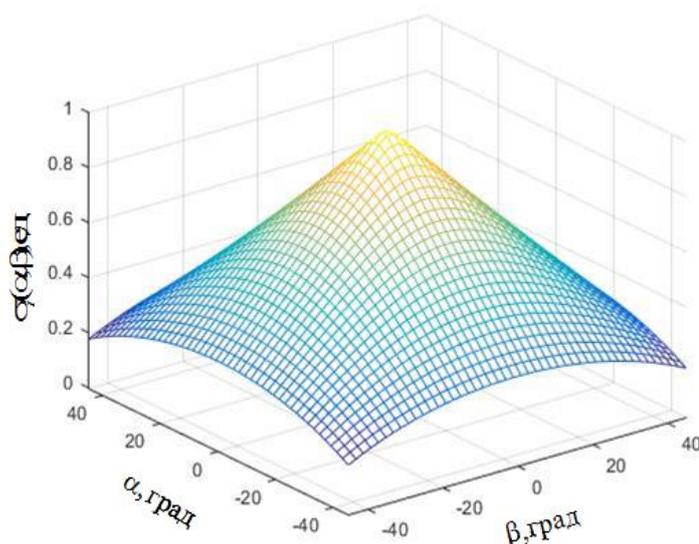


Рисунок 5 – График зависимости коэффициента рассеивания i -го единичного элемента земной поверхности (σ_i) от углов α и β

Данная зависимости должна носить явно не линейный характер, однако для упрощения расчетов была проведена линейризация данной зависимости представленная в [4].

При расчете отраженного сигнала учитываются начальные фазы и доплеровские частоты сигналов отраженных от каждого i -го единичного элемента земной поверхности. Это приводит к тому, что отраженный от земли сигнал имеет достаточно сложную структуру. Для подтверждения данного факта проведем сравнения нормированных спектров излучаемого и отраженного сигналов (рисунок 6 и рисунок 7).

После формирования отраженного сигнала осуществляется моделирования его обработки в приемном тракте радиовысотомера. Основные этапы преобразования (обработки) отраженного от земной поверхности сигнала в приемном тракте радиовысотомера представлены на рисунке 8. В процессе преобразования происходит выделение разностной частоты сигнала, которая характеризует расстояние от антенны радиовысотомера до центра облучаемого участка земной поверхности. При этом зная значения девиации частоты и периода модуляции и используя известные выражения [3] можно

рассчитать истинную высоту, что и является главной задачей радиовысотомера.

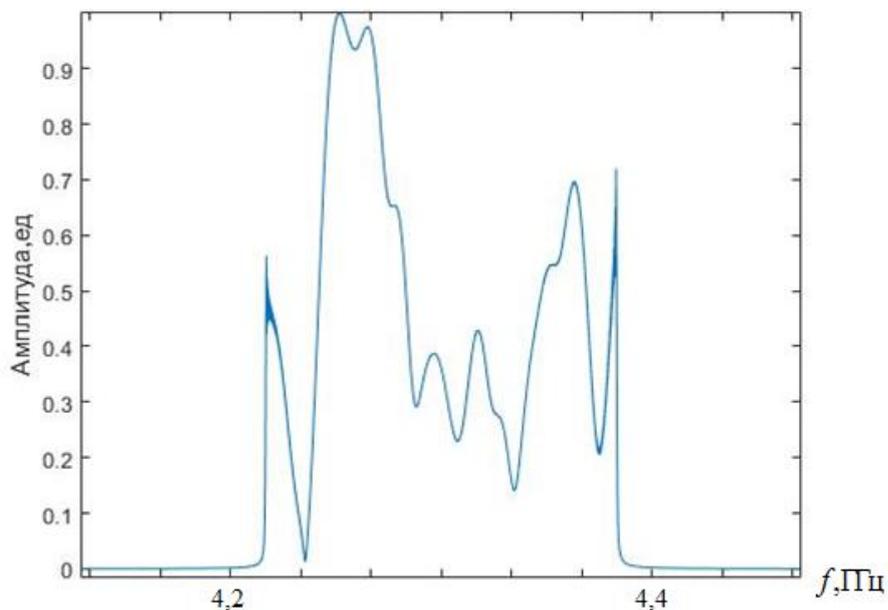


Рисунок 6 – График нормированного спектров излучаемого радиовысотомером сигнала

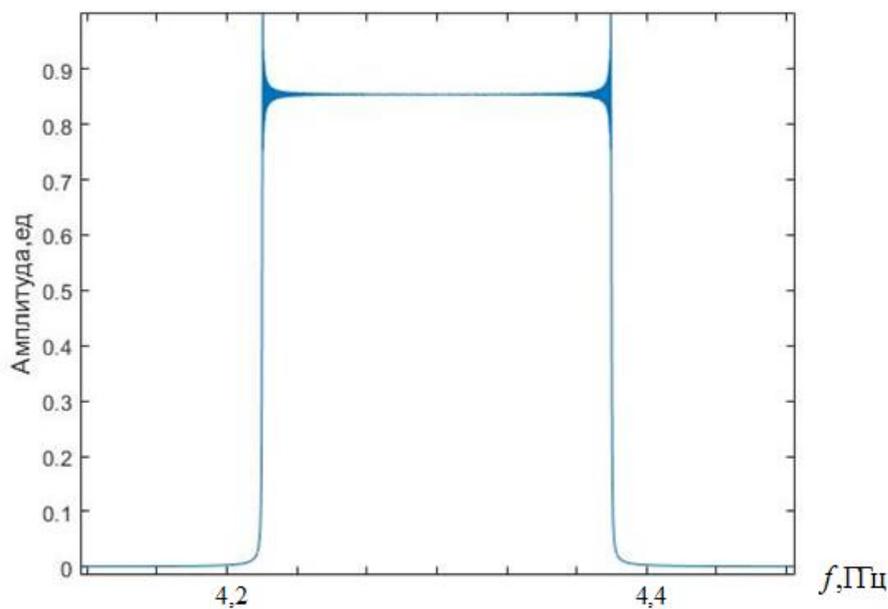
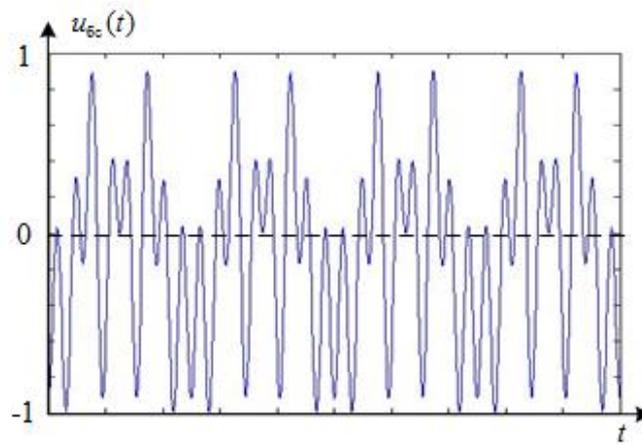
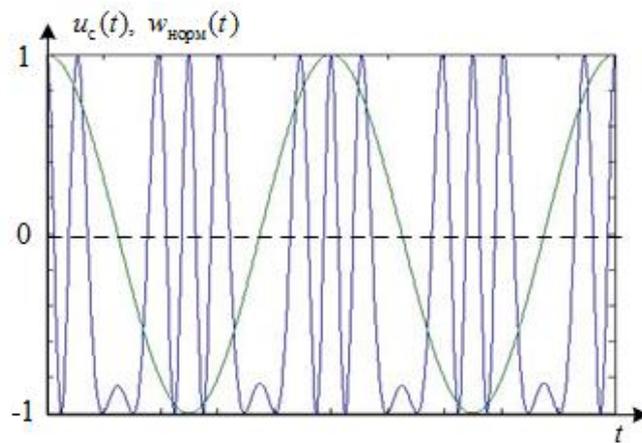


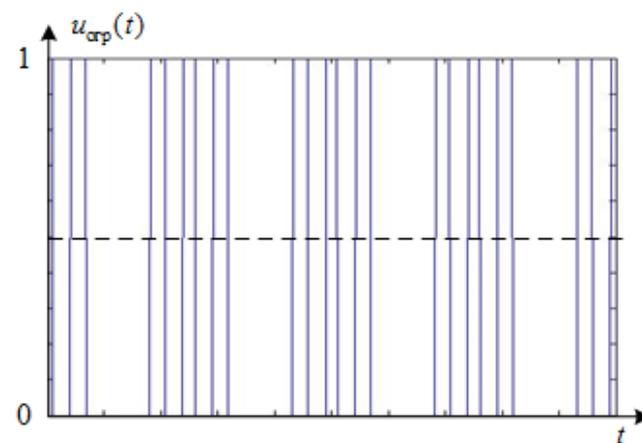
Рисунок 7 – График нормированного спектров отраженного от земной поверхности сигнала



a



б



в

a – сигнал на выходе балансного смесителя; *б* – сигнал на выходе усилителя низкой частоты; *в* - сигнал на выходе формирователя импульсов;

Рисунок 8 – Графики временных диаграмм сигналов после преобразований в приемном тракте радиовысотомера

Однако существует проблема организации режима слежения в РВМВ поскольку спектр и временная структура отраженного сигнала не характеризуется симметричностью (рисунок 9), что несомненно приведет к появлению дополнительных ошибок измерения.

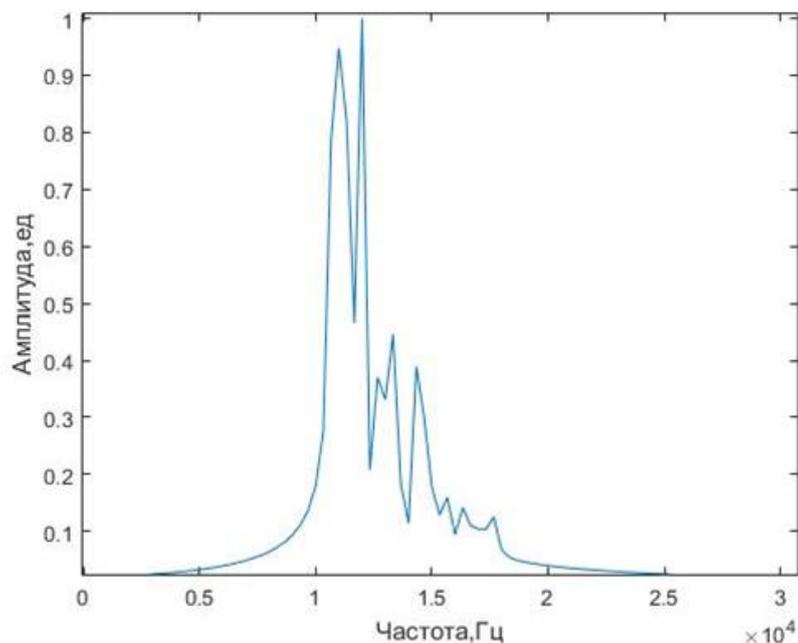


Рисунок 9 – Графики нормированного спектра сигнала частоты биений

Основными решениями проблемы несимметричности спектра сигнала частоты биений могут быть увеличение апертуры антенны и уменьшении угла наклона максимума ДНА к перпендикуляру относительно планера ЛА и разработка алгоритмов учета таких смещений.

Таким образом, математическая модель функционирования РВМВ представляет собой совокупность моделей движения БЛА формирования отраженного сигнала от земной поверхности и принципа функционирования РВМВ, что в целом позволяет оценить его работу в реальных условиях.

Заключение

Активное развитие малой авиации в Республике Беларусь приводит к необходимости расширения области их применения, что в свою очередь связано с развитием навигационной системы ЛА. Несмотря на наличие широкого перечня ЛА различных классов неизменным является использование спутниковой системы навигации для обеспечения полетов. Однако учитывая относительно низкую помехоустойчивость спутниковой навигационной системы использовать её как основной источник информации не является целесообразным.

В процессе выполнения данной работы было проведено частичное обоснование облика РВМВ для ЛА, как неотъемлемой части оборудования для автоматизации полета.

Разработанная имитационная математическая модель РВМВ представляет собой эффективный инструмент проведения анализа основных достоинств и недостатков различных схем построения, а также позволяет обобщить существующие подходы к разработке радиоэлектронных комплексов и решить следующие задачи:

- проведение исследований основных достоинств и недостатков различных принципов построения РВМВ;
- повысить наглядности при изучении основных этапов функционирования РВМВ по средствам анализа параметров сигналов в процессе их основных преобразований;
- обосновать технические характеристики для достижения заданных параметров.

Список использованных источников

1. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: учебник / Е.С. Вентцель. 6-е изд. стер. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.
2. Сосновский, А.А. Авиационная радионавигация: Справочник / А.А. Сосновский, И.А. Хаймович, Э.А. Лутин, И.Б. Максимов / под ред. А.А. Сосновского. – М.: Транспорт, 1990. – 264 с.
3. Справочник по радиолокации. Т. 1. Основы радиолокации / под ред. Я.С. Ицхоки. – М.: «Сов. радио», 1976. – 456 с.
4. Калитин, С. Б. Авиационные радионавигационные устройства и системы. Авиационные радиовысотомеры / С. Б. Калитин. – Минск: ВА РБ, 2008. – 89 с.
5. Ярлыков, М. С. Авиационные радионавигационные устройства и системы / М.С. Ярлыков, В.А. Болдин, А.С. Богачев / под ред. М.С. Ярлыкова, Издание ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского, 1980, – 384 с.