



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

---

ФАКУЛЬТЕТ «Радиоэлектроника и лазерная техника»

КАФЕДРА «Радиоэлектронные системы и устройства»

---

**ОТЧЕТ**  
***К КОНСТРУКТОРСКОЙ ПРАКТИКЕ***  
***НА ТЕМУ:***

Пректирование радиовысотомера больших высот

---

---

---

---

---

Студент группы РЛ1-84

(Подпись, дата)

**М.А. Белкин**

(И.О. Фамилия)

Руководитель от предприятия

(Подпись, дата)

**Н.В. Буянова**

(И.О. Фамилия)

Руководитель от кафедры

(Подпись, дата)

**М.В. Родин**

(И.О. Фамилия)

**2021 г.**

## РЕФЕРАТ

Расчетно-пояснительная записка 50 с., 29 рис., 7 табл., 13 ист., 4 прил.

РАДИОВЫСОТОМЕР, ИМПУЛЬСНЫЙ РАДИОВЫСОТОМЕР,  
РАДИОВЫСОТОМЕР БОЛЬШИХ ВЫСОТ, ПИЛОТАЖНО-  
НАВИГАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС, А-075, ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ПрМ.

Объектом разработки является радиовысотомер больших высот предназначенный для функционирования в составе прицельно-навигационного комплекса

Цель работы — провести разработку радиовысотомера больших высот, аналогичного по функционалу и характеристикам серийному радиовысотомеру А-075, с переводом на современную элементную базу с целью уменьшения стоимости.

В процессе работы была переработана функциональная схема радиовысотомера, проведён расчёт рабочих характеристик зондирующего импульса, эскизный расчёт приёмника, подбор элементной базы, расчёт согласующих и селектирующих цепей.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ . . . . .	5
1 Определение общей структуры радиовысотомера . . . . .	7
1.1 Определение функциональной схемы . . . . .	9
1.2 Определение коэффициента затухания зондирующего импульса . . . . .	10
1.3 Определение временных характеристик зондирующего импульса . . . . .	14
2 Расчёт модуля приёмника . . . . .	14
2.1 Выбор схемы приёмника . . . . .	14
2.2 Расчёт преобразователя частоты . . . . .	15
2.2.1 Выбор смесительного элемента . . . . .	15
2.2.2 Выбор гетеродина . . . . .	16
2.2.3 Выбор усилителя в цепи гетеродина . . . . .	17
2.2.4 Согласование цепей гетеродина . . . . .	19
2.3 Расчёт МШУ . . . . .	21
2.3.1 Выбор усилительного элемента . . . . .	21
2.3.2 Эскизный расчёт чувствительности приёмника . . . . .	22
2.3.3 Согласование с антенно-фидерным трактом . . . . .	24
2.3.4 Межкаскадное согласование . . . . .	26
2.3.5 Согласование с преобразователем частоты . . . . .	28
2.4 Расчёт цепей ПЧ . . . . .	29
2.4.1 Выбор АЦП . . . . .	29
2.4.2 Выбор усилительных элементов . . . . .	30
2.4.3 Расчёт антиалисингового ФНЧ . . . . .	32
2.5 Определение потребляемых мощностей . . . . .	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	35
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ . . . . .	36
ПРИЛОЖЕНИЕ А Техническое задание . . . . .	38
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Функциональная схема радиовысотомера . . . . .	43
ПРИЛОЖЕНИЕ В S-параметры цепей согласования приёмника . . . . .	45
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Схемы модуля приёмника . . . . .	50

## **ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

АЦП — аналого-цифровой преобразователь

АЧХ — ампер-частотная характеристика

ВД — временной дискриминатор

ВМ — временной модулятор

ГП — генераторный прибор

ДИСС — доплеровский измеритель скорости и угла сноса

И — интегратор

ИМ — импульсная модуляция

ИП — источник питания

КСВ — коэффициент стоячей волны

ЛА — летательный аппарат

МОССУ — модуль обработки сигнала, синхронизации и управления.

МШУ — малозумящий усилитель

Н — измеренное значение истинной высоты

ПМ — приёмный модуль

ПП — печатная плата

ПрМ — передающий модуль

ПЧ — промежуточная частота

РВ — радиовысотомер

УМ — усилитель мощности

ФВС — формирователь выходных сигналов

ФЧХ — фазо-частотная характеристика

ЧМ — частотная модуляция

## ВВЕДЕНИЕ

Успешное освоение человечеством воздушно-космического пространства определило развитие нового направления навигации, как одной из старейших наук — авианавигации. Основой успешного самолетовождения является комплексное применение технических средств, которое заключается в том, что самолетовождение осуществляется с помощью не одного какого-либо средства, а нескольких. При этом результаты навигационных измерений, полученные с помощью одних средств, уточняются с помощью других средств. Такое дублирование исключает возможность допущения грубых ошибок, повышает точность и надежность самолетовождения.

Традиционными средствами навигации являлись механические и магнитные приборы: бараметрические высотомер, вариометр и измеритель скорости, аэродинамический измеритель угла сноса, магнитный компас. Благодаря данным приборам, навигационным картам и визуальному наблюдению специально обученный член экипажа, штурман, зная время полёта, мог определять положение летательного средства и вести его по курсу. Однако, такой способ навигации требовал больших трудозатрат и обладал малой точностью, поэтому постепенно он дополнялся, а со временем и заменялся методами радионавигации. Первым радионавигационным устройством можно считать радиокомпас — устройство показывающее направление на опорный радиомаяк. Далее появились автономные радионавигационные системы летательных аппаратов, т.е. системы, позволяющие определять его местоположение без помощи наземных станций и получившей в дальнейшем развитие спутниковой радионавигации. Основными приборами здесь являются: радиовысотомеры (РВ), доплеровские измерители скорости и угла сноса (ДИСС), а также обзорные радиолокационные системы навигации по рельефу местности.

В дальнейшем речь пойдёт о расчёте и конструировании РВ больших высот. РВ предназначены для измерения истинной высоты полета летательного аппарата радиолокационными методами. В данной работе будет рассматриваться РВ больших высот (макс. рабочая высота

25,000 м.), проектируемый на основе существующего РВ А-075. Основной поставленной задачей будет являться переход на современную элементную базу, повышение технологичности и экономичности производства. При этом будет сохраняться взаимозаменяемость с основной моделью, а именно габаритные размеры, устройства крепления, интерфейс подключения к бортовой системе электроснабжения и бортовой шине данных. Кроме того должна сохраняться совместимость с используемым антенно-волноводным трактом модели А-061-4.

# 1 Определение общей структуры радиовысотомера

Радиовысотомер — измерительный прибор, основывающийся на радиолокационном методе измерения высоты. По принципу формирования зондирующего сигнала и способу измерения подразделяют две группы высотомеров:

- РВ с частотной модуляцией;
- РВ с импульсной модуляцией.

Упрощённый принцип работы РВ первого типа заключается в излучении по направлению к земле высокочастотных колебаний, модулированных по частоте специальным частотным модулятором. Кроме того, колебания генератора подаются непосредственно к балансному декодеру (так называемый прямой сигнал). Отраженные от земли частотно-модулированные высокочастотные колебания принимаются приемной антенной радиовысотомера и поступают на вход балансного декодера с запаздыванием по отношению к прямому сигналу на время

$$t = \frac{2H}{C}, \quad (1)$$

где  $H$  — высота полета,  $C$  — скорость света. В результате смещения прямого и отраженного сигналов (рис. 1) на входе балансного детектора образуется результирующий сигнал, представляющий собой высокочастотные колебания, модулированные не только по частоте, но и по амплитуде. Далее, демодулируя огибающую данного сигнала, получаем напряжение пропорциональное высоте полёта.

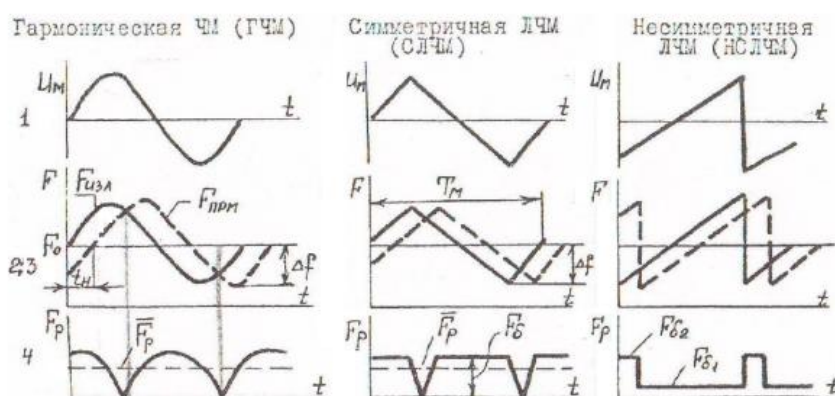


Рисунок 1 – Временные диаграммы сигналов при различных типах ЧМ

По данной схеме строятся главным образом РВ малых высот, так как они обладают большей точностью, но ограничены максимальной высотой, так как с ростом высоты требуется большая девиация частоты передаваемых колебаний и расширению полосы. Находят применение в управлении ЛА в вертикальной плоскости в системах захода на посадку и автоматической посадки.

Импульсный РВ строится по классической схеме радиолокатора с компенсационным отсчётом. Прибор построенный по данной схеме (рис. 2) включает в себя следующую систему, основными элементами которой являются временной модулятор ВМ (устройство управляемой задержки, выполненное, например, на фантастроне и блокинг-генераторе), временной дискриминатор ВД (выполненный, например, на каскаде совпадений) и интегратор И. Синхронизирующий генератор СГ выполняется по схеме генератора синусоидальных колебаний с кварцевой стабилизацией частоты КГ, дополненного делителем частоты ДЧ. Последний формирует импульсы запуска передатчика Прд и ВМ. При совпадении части СИ с отраженным импульсом ОИ появляется напряжение на выходе БД, которое отключает источник напряжения  $+E$  и включает схему переключения режимов СПР. Последняя разрешает выдачу сигнала текущей высоты Н через схему сопряжения СС внешним потребителям. РВ переходит в режим слежения.

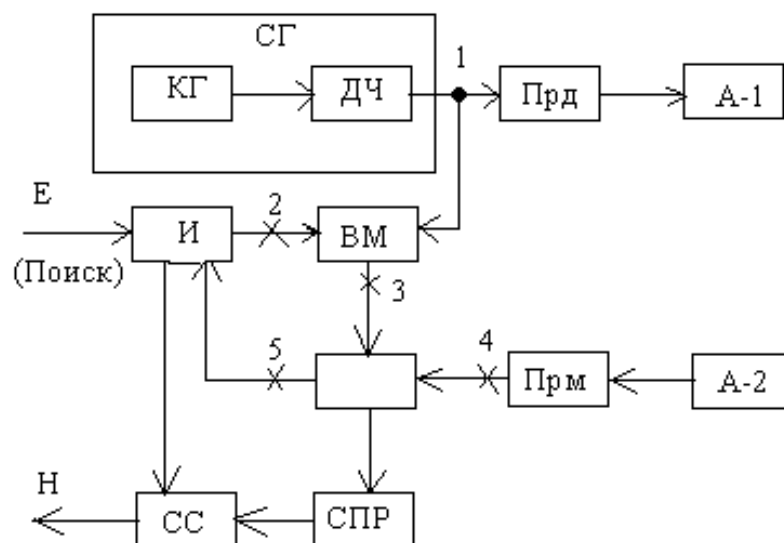


Рисунок 2 – Структурная схема импульсного РВ

По схеме импульсного РВ строятся высотомеры больших высот,



применяемые как вспомогательное навигационное средство при аэрофотосъемке местности и для других целей.

### **1.1 Определение функциональной схемы**

Согласно ТЗ необходимо разработать РВ больших высот (до 25 км), следовательно необходимо строить его по импульсной схеме. Большую часть формирования и обработки сигнала будем производить в цифровом виде, поэтому, а также согласно требований повышенной ремонтнопригодности, разделим устройство РВ на 5 отдельных легкозаменяемых модулей (Приложение ):

- модуль приёмника — отвечает за согласование с приёмным антенно-фидерным трактом, начальное усиление и селекция радиочастотного сигнала, понижение частоты, усиление и окончательную селекцию сигнала на промежуточной частоте;

- модуль передатчика — отвечает за формирование зондирующего импульса и гетеродинного сигнала, модулирование несущей частоты, предварительное усиление радиосигнала и окончательное усиление с переменной выходной мощностью, согласование с передающим антенно-фидерным трактом;

- модуль обработки сигнала, синхронизации и управления — отвечает за цифровую обработку сигнала, формирование синхроимпульсов, а также управлением и контролем остальных систем РВ;

- модуль формирования выходных сигналов — отвечает за формирование всех типов выходных сигналов согласно ТЗ (ПРИЛОЖЕНИЕ А);

- источник питания — отвечает за формирование необходимых напряжений питания других модулей.

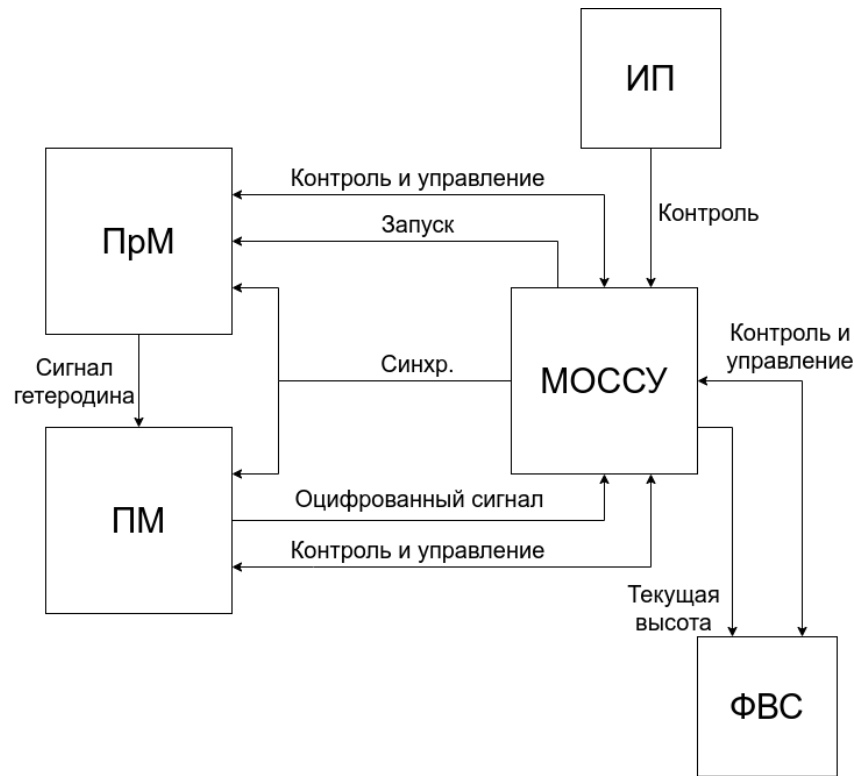


Рисунок 3 – Функциональная схема РВ

Полученная функциональная схема РВ больших высот приведена на рисунке 3 (ПРИЛОЖЕНИЕ Б).

## 1.2 Определение коэффициента затухания зондирующего импульса

Основную роль в расчёте коэффициента затухания играет процесс отражения Э/М волн от земной поверхности. Различают два основных процесса формирующих отраженный сигнал: зеркальное отражение и диффузное рассеяние. Общая отражённая мощность определяется как сумма вкладов каждого процесса.

$$P_{\Sigma} = P_{\text{Зер. отр.}} + P_{\text{Диф. рас.}} \quad (2)$$

Для наблюдения значимого вклада зеркальной составляющей мощности необходимо выполнение условия Релея о гладкости поверхности.

$$\sigma_h \cos(\Theta) < \frac{\lambda}{8}, \quad (3)$$

где  $\Theta$  — угол наклона ЛА,  $\sigma_h$  — шероховатость условно гладкой поверхности. Длина волны при рабочей частоте в 4.3 ГГц составляет около 7 сантиметров. Таким образом, согласно (3) шероховатость поверхности должна составлять не более 8.75 мм, что будет наблюдаться только на бетонных дорожках аэродромов и на спокойной водной поверхности. Данные ситуации в полёте встречаются не так часто, поэтому при дальнейших расчётах будем считать зеркальную составляющую мощности стремящейся к нулю.

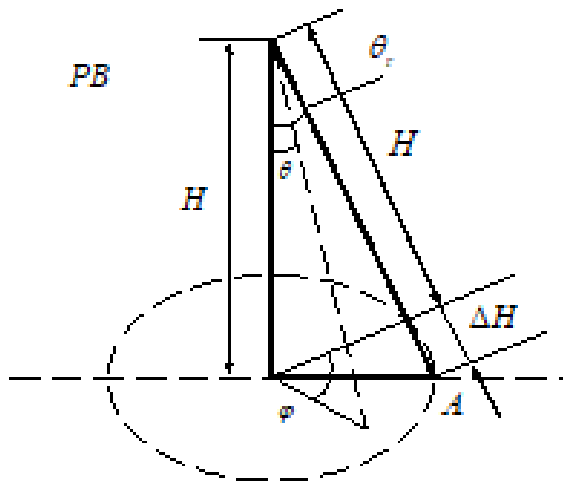


Рисунок 4 – Падение зондирующего импульса на шероховатую поверхность

В случае диффузного рассеяния от шероховатой поверхности важным параметром будет являться площадь эффективного рассеяния, определяемая временем анализа  $\tau_a$  (время зондирующего импульса). Данная поверхность ограничивается радиусом (рис. 4):

$$R = \sqrt{(H + \Delta H)^2 + H^2} = \sqrt{H\Delta H(2 + \frac{\Delta H}{H})} \approx \sqrt{cH\tau_a}, \quad (4)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме. Также данная поверхность характеризуется видимым углом  $\Theta_\tau$ , который определяется из отношения:

$$\operatorname{tg} \Theta_\tau = R / H \approx \sqrt{\frac{c\tau_a}{H}} \quad (5)$$

В зависимости от соотношения данного угла с углом ДН антенны по половине мощности выделяют два режима работы РВ:

- режим ограничения временем анализа —  $\Delta\Theta_0 > 2\Theta_{ant}$ . В данном случае коэффициент потерь определяется формулой:

$$\beta_{рас.} = \frac{G^2 \lambda^2 \sigma_0 c \tau_a}{64 \pi^2 H^3}, \quad (6)$$

где  $G$  — КУ антенны,  $\sigma_0$  — удельная ЭПР подстилающей поверхности;

- режим ограничения ДН антенны —  $\Delta\Theta_0 < 2\Theta_{ant}$ . Коэффициент потерь определяется формулой:

$$\beta_{рас.} = \frac{G^2 \lambda^2 \sigma_0 t g^2(\Delta\Theta_0/2)}{64 \pi^2 H^2}; \quad (7)$$

Последний режим является наиболее оптимальным с энергитической точки зрения, так как вся облучённая поверхность участвует в формировании отражённого импульса. В дальнейшем будем определять временные характеристики зондирующего импульса так, дабы всегда находится в режиме ограничения ДН антенны.

Далее применяя модель диффузионного рассеяния получаем итоговую формулу для коэффициента затухания зондирующего импульса:

$$\beta_{рас.} = \frac{Q \Delta\Theta_0^2}{\Delta\Theta_0^2 + \Delta\Theta_{op}^2} \exp\left(-\frac{\pi \Theta_S^2}{\Delta\Theta_0^2 + \Delta\Theta_{op}^2}\right) \quad (8)$$

$$Q = \frac{G^2 \lambda^2 K_f}{64 \pi^2 H^2}, \quad (9)$$

где  $K_f$  — коэффициент зеркального отражения подстилающей поверхности,  $\Theta_S$  — угол наклона ЛА,  $\Delta\Theta_0 = \frac{\Delta\Theta_L}{\sqrt{2}}$  — эффективная ширина результирующей ДН антенны,  $\Delta\Theta_{op} = \sqrt{\pi} a_{ш}$  — ширина ДН обратного рассеяния,  $a_{ш}$  — параметр шероховатости поверхности.

Теперь построим зависимость (рис. 5) коэффициента затухания от высоты (2—25,000 м.) и угла наклона ЛА ( $\pm 45^\circ$ ), а также срез для ЛА в горизонтальном полёте (рис. 6). В качестве исходных данных для расчёта используем:

- коэффициент усиления антенн — не менее 20 дБ;
- длина волны рабочей частоты —  $\lambda = \frac{c}{f_{нec}} = 70 \text{ мм.}$  ;
- коэффициент зеркального отражения подстилающей поверхности — 0.4 для худшего случая в виде сухой почвы;

- ширина ДН антенны —  $30^\circ$ ;
- коэффициент шероховатости поверхности — 0.3 для худшего случая в виде лесистой местности.

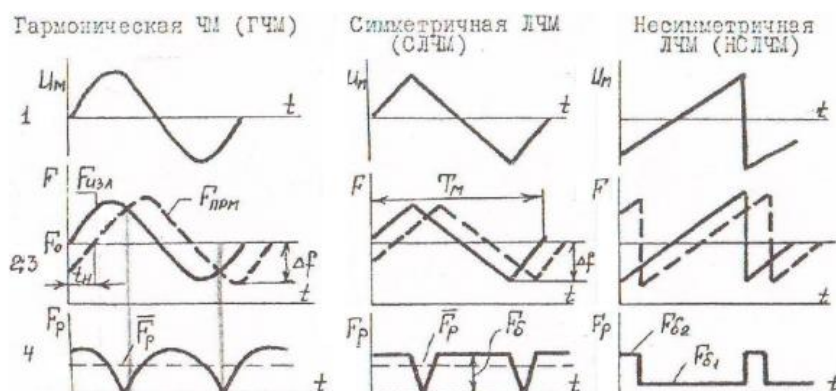


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента затухания от высоты полёта ЛА и его угла наклона

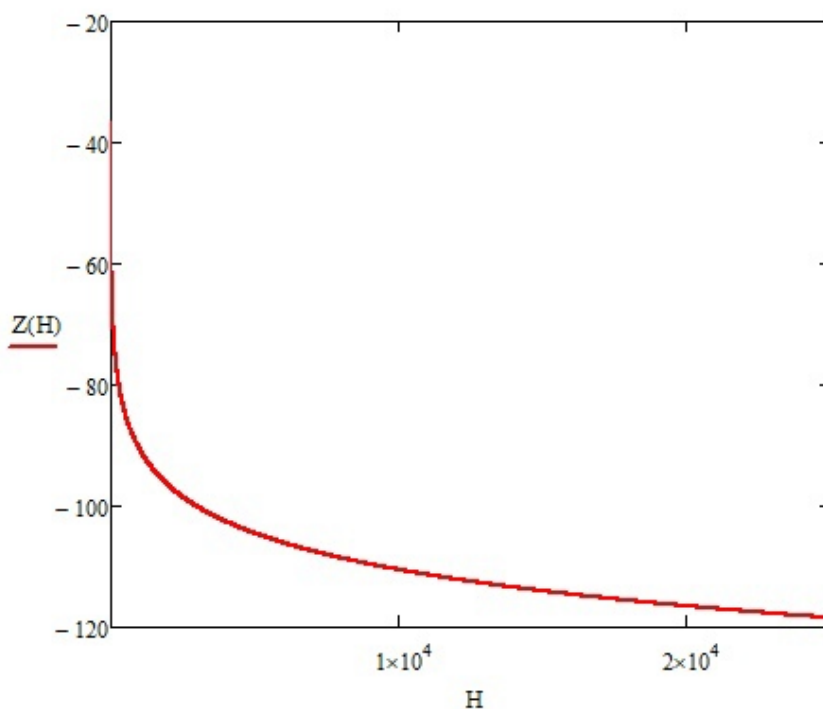


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента затухания для ЛА в горизонтальном полёте

### 1.3 Определение временных характеристик зондирующего импульса

Временные характеристики зондирующего импульса определяются режимом работы РВ с ограничением по ДН антенны. В данном режиме минимальная длительность импульса определяется ДН антенны и высотой полёта, максимальное же эмперической формулой.

$$\tau_{min}(H) = \frac{(tg\Theta_{\tau})^2 H}{c}, \quad (10)$$

где  $\Theta_{\tau}$  — эффективная ширина раскрыва ДН передающей антенны

$$\tau_m(H) = \frac{0.07H}{c} \quad (11)$$

В качестве результата построим график зависимости длительности импульса от высоты (рис. 7). Также ограничим минимальную длительность зондирующего импульса уровнем 100 нс.

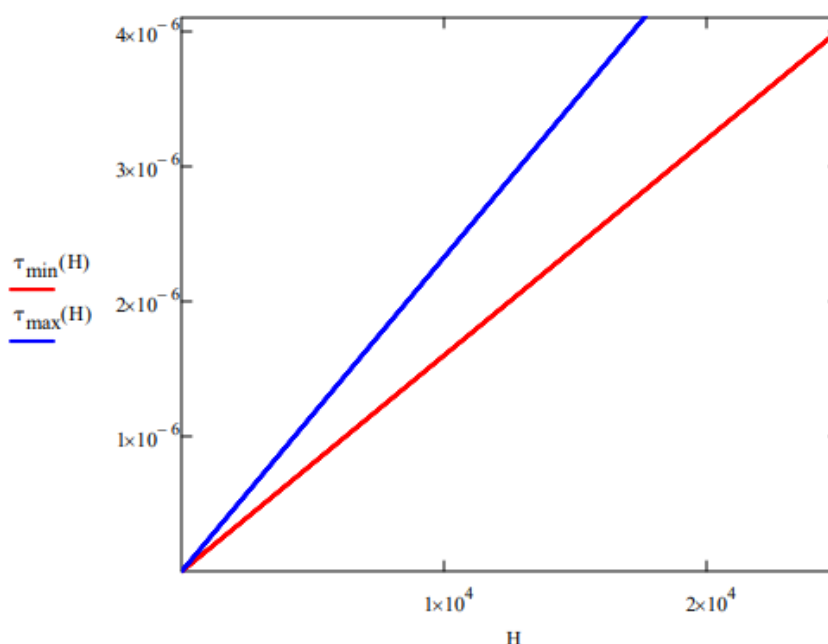


Рисунок 7 – Зависимость длительности импульса от высоты полёта

## 2 Расчёт модуля приёмника

### 2.1 Выбор схемы приёмника

В работе РВ используется сигнал СВЧ диапазона  $((4300 \pm 10) \text{ МГц})$ , следовательно для качественной селекции и приёма сигнала необходимо

использовать одну из гетеродинных схем приёмника. Так как было принято строить РВ по импульсной схеме (пункт 1.1), то наиболее простым решением будет использовать схему с переносом частоты сигнала в ноль. Таким образом, приёмник будет включать следующие компоненты:

- МШУ;
- смеситель;
- усилитель ПЧ;
- АЦП.

## **2.2 Расчёт преобразователя частоты**

Понижающий преобразователь частоты будем строить на основе твердотельной интегральной схемы смесителя. При этом гетеродин будем выполнять в виде отдельной ИМС, так как его сигнал также будет использоваться в Прм. Располагаться сам генератор тоже будет в ПрМ, дабы не переусложнять схему ПМ.

Для подбора всех компонентов будем пользоваться сервисом компании "Mouser" [4], так как их каталог обладает наиболее обширным списком аналоговых радиочастотных компонентов.

### **2.2.1 Выбор смесительного элемента**

Для выбора смесителя зададимся следующими параметрами:

- минимальная частота РЧ — не более 4200 МГц;
- максимальная частота РЧ — не менее 4400 МГц;
- минимальная частота гетеродина — не более 4200 МГц;
- максимальная частота гетеродина — не менее 4400 МГц;
- минимальная частота ПЧ — 0 МГц;
- максимальная частота ПЧ — не менее 10 МГц;
- минимальная рабочая температура — не более  $-60^{\circ}\text{C}$ ;
- максимальная рабочая температура — не менее  $+55^{\circ}\text{C}$ .

Заданным характеристикам удовлетворяет 136 элементов.

Компонент	Производитель	Потери, дБ	Коэф. шума, дБ	Цена, \$
HMC218B	Analog Devices	7	-	8.29
ADL5801	Analog Devices	1.8	13.6	13.62
LTC5562	Analog Devices	7.6	15.9	13.78
SIM-83LH	Mini-Circuits	8.9	-	16.41
...	...	...	...	...

Таблица 1 – Смесители удовлетворяющие условиям

Как можно видеть среди подходящих смесителей наиболее дешёвым является HMC218B производства Analog Devices. Основным недостатком который можно выделить у данного компонента - это отсутствие дифференциальных выходов по РЧ и гетеродину, однако большинство МШУ не имеют дифференциальных входов, а гетеродин расположится на ПрМ, и его сигнал будет подан по коаксиальному кабелю, переходящему в микрополосковую линию, значит данный недостаток не существен.

### 2.2.2 Выбор гетеродина

Для выбора гетеродина зададимся следующими параметрами:

- минимальная частота генерации — не более 4200 МГц;
- максимальная частота генерации — не менее 4400 МГц;
- наличие встроенного ГУН;
- количество контуров генерации — 1;
- минимальная рабочая температура — не более  $-60^{\circ}\text{C}$ ;
- максимальная рабочая температура — не менее  $+55^{\circ}\text{C}$ .

Заданным характеристикам удовлетворяет 8 элементов.





документации [8] Таким образом для выбора усилителя зададимся следующими параметрами:

- минимальная частота генерации — не более 4200 МГц;
- максимальная частота генерации — не менее 4400 МГц;
- КУ — 15 дБ, 12 дБ, 9 дБ, 6 дБ;
- точка компрессии — не менее 12 дБм;
- минимальная рабочая температура — не более -60<sup>0</sup>С;
- максимальная рабочая температура — не менее +55<sup>0</sup>С.

Заданным характеристикам удовлетворяет 21 элемент.

Компонент	Производитель	КУ, дБ	Точка компр., дБм	Цена, \$
TRF37A73	Texas Instruments	12	14.5	1.72
TRF37A75	Texas Instruments	12	18	1.75
GRF2012	Guerrilla RF	5	22.5	1.95
GRF2042	Guerrilla RF	54	22	3.35
...	...	...	...	...

Таблица 3 – Усилители удовлетворяющие условиям

Как можно видеть среди подходящих смесителей наиболее дешёвым является TRF37A73 производства Texas Instruments. Также имеется чуть более дорогой вариант TRF37A75 с большей точкой компрессии, однако такое повышение не даёт в нашем случае преимуществ, а значит будем использовать более дешёвый вариант. Также приведём схему стандартной обвязки согласно тех. документации [12].

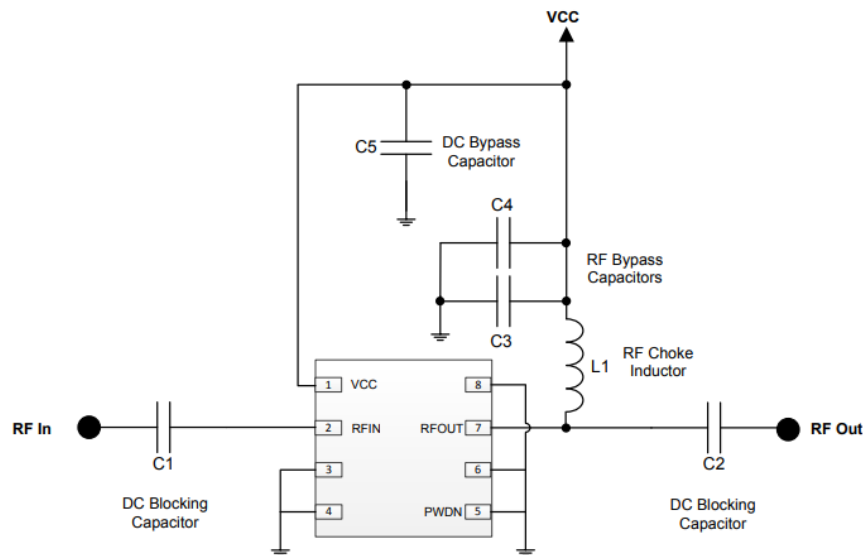


Рисунок 9 – Стандартная обвязка TRF37A73

#### 2.2.4 Согласование цепей гетеродина

Так как микросхема гетеродина будет находится на ПрМ, то необходимо согласовать один из выходов микросхемы с 50-оммным коаксиальным кабелем, однако согласно [9] данный генератор не требуется согласовывать с 50-оммной нагрузкой, потери мощности при этом являются приемлемыми (около 1.2 дБ).

Далее необходимо согласовать усилитель со смесителем. В данном случае коэф. отражения на 50-оммном пробнике выхода усилителя составляет  $\Gamma = 0.0446e^{96.055^{\circ}i}$ . Получим выходное сопротивление соответствующее данному коэф. отражения:

$$Z = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = 49.34 + 4.385i \text{ Ом} \quad (12)$$

Далее получим входное сопротивление смесителя соответствующее коэф. отражения  $\Gamma = 0.226e^{-17.053^{\circ}i}$  при максимальном КУ:

$$Z = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = 76.66 - 10.71i \text{ Ом} \quad (13)$$

На основе этих данных запустим расчёт согласования на частоте несущей 4300 МГц. Ввиду того, что сигнал гетеродина узкополосный, будем использовать согласующую цепь 3 порядка. В результате получим следующие варианты построения согласующих цепей на рисунках 11 и 12.

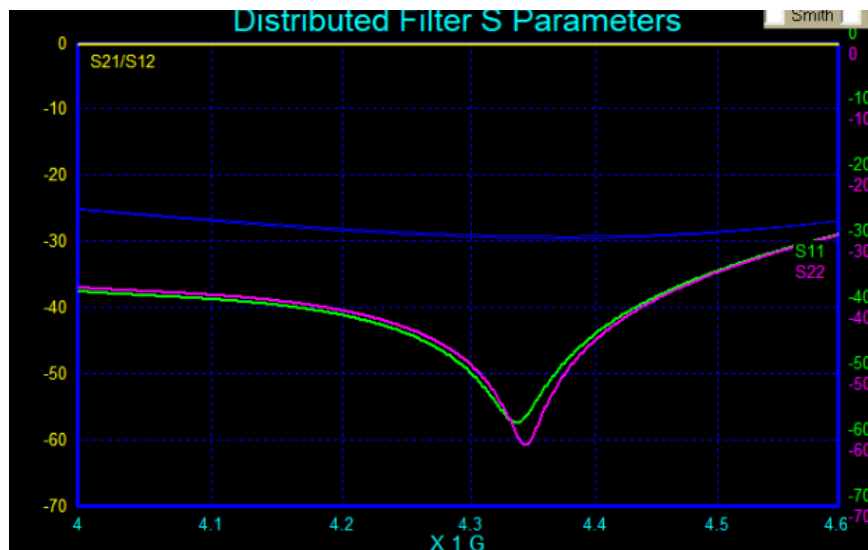


Рисунок 10 – Характеристики согласующей цепи усилителя гетеродина

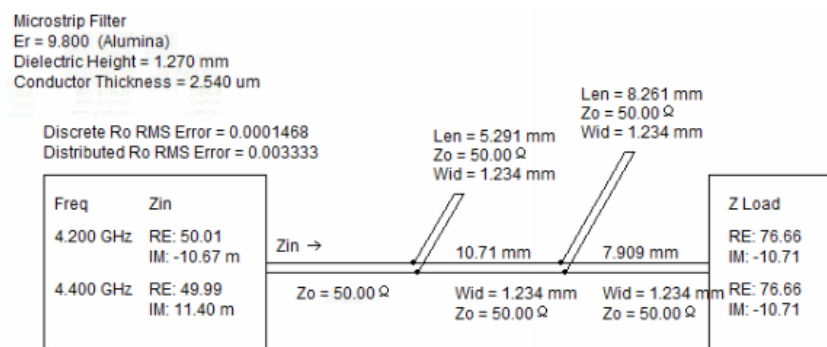


Рисунок 11 – 1 вариант построения согласующей цепи усилителя гетеродина

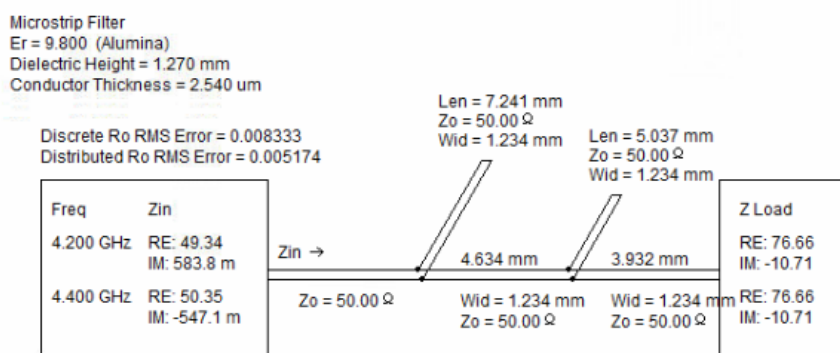


Рисунок 12 – 2 вариант построения согласующей цепи усилителя гетеродина

Дальнейшее решение о выборе схемы согласующей цепи примет человек занимающийся проектированием ПП.

## 2.3 Расчёт МШУ

### 2.3.1 Выбор усилительного элемента

Для выбора усилительного элемента МШУ зададимся следующими параметрами:

- минимальная рабочая частота — не более 4200 МГц;
- максимальная рабочая частота — не менее 4400 МГц;
- уровень шумов менее 1.5 дБ;
- минимальная рабочая температура — не более  $-60^{\circ}\text{C}$ ;
- максимальная рабочая температура — не менее  $+55^{\circ}\text{C}$ .

Заданным характеристикам удовлетворяет 68 элементов.

Компонент	Производитель	Коэф. шума, дБ	Цена, \$
SGA8343Z	Qorvo	1.4	0.615
BGU7003W	NXP Semiconductors	1.2	0.668
GRF2001	Guerrilla RF	0.9	1.11
BGB707L7	Infineon	0.6	1.48
...	...	...	...

Таблица 4 – Усилители удовлетворяющие условиям

Как можно видеть среди подходящих усилителей наиболее дешёвым является SGA343Z производства Qorvo, однако при сравнительно небольшом увеличении цены можно значительно уменьшить коэф. шума используя далее BGU7003W производства NXP Semiconductors. При переходе к следующей позиции также наблюдается значительное уменьшение коэф. шума, но цена возрастает примерно в 2 раза, поэтому остановим свой выбор на BGU7003W. Также приведём схему стандартной обвязки согласно тех. документации [5].

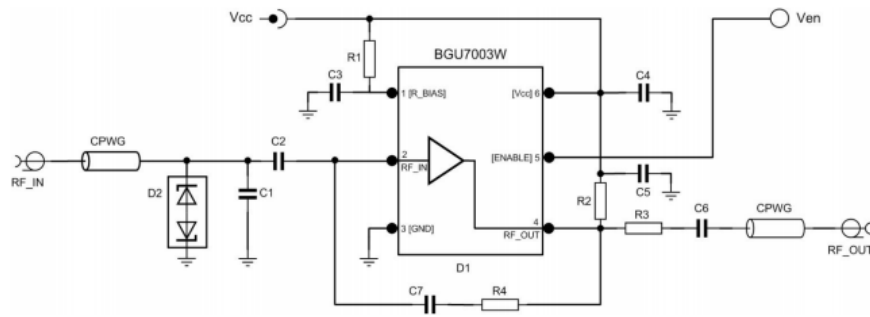


Рисунок 13 – Стандартная обвязка BGU7003W

### 2.3.2 Эскизный расчёт чувствительности приёмника

Расчитывать чувствительность приёмника будем согласно известной формулы в зависимости от количества каскадов:

$$E_{min}(n) = \sqrt{4kT_{max}\Pi_{max}R_{ант}(N(n) - 1)SNR}, \quad (14)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_{max}$  — максимальная температура,  $\Pi_{max}$  — максимальная ширина полосы сигнала,  $R_{ант}$  — сопротивление антенны,  $N(n)$  — уровень шумов МШУ в зависимости от числа каскадов,  $SNR$  — отношение сигнал шум на входе смесителя,  $n$  — число каскадов МШУ.

Также приведём формулу расчёта коэф. шума в зависимости от числа каскадов:

$$N(n) = N_{min} + \frac{\frac{N_{main}-1}{G} \left[ \left( \frac{1}{G} \right)^{n-1} - 1 \right]}{\frac{1}{G} - 1}, \quad (15)$$

где  $N_{min}$  — минимальный коэф. шума первого каскада,  $N_{main}$  — коэф. шума последующих каскадов настроенных на максимальное усиление,  $G$  — коэф. усиления одного каскада,  $n$  — число каскадов.

Теперь зададимся использованными в 14 и 15 параметрами:

- максимальная температура  $T_{max} = 273 + 55 = 328K$  согласно ТЗ (ПРИЛОЖЕНИЕ А);

- максимальная ширина полосы сигнала  $\Pi_{max} = \frac{1}{\tau_{min}} = 10\text{МГц}$ , где  $\tau_{min} = 100\text{нс}$  — минимальная длительность зондирующего импульса;

- сопротивление антенно-фидерного тракта  $R_{\text{ант}} = 50\text{Ом}$  согласно ТЗ (ПРИЛОЖЕНИЕ А);

- отношение сигнал шум на входе смесителя  $SNR$  зададим равным 5;

- параметры усилительного элемента  $N_{\min} = 1.329()$ ,  $N_{\max} = 2.657\text{дБ}$ ,  $G = 15.8\text{дБ}$  согласно расчётам на основе S-параметров формата Touchstone [10];

Далее построим хар-ки МШУ по формулам 14 и 15 в зависимости от числа каскадов.

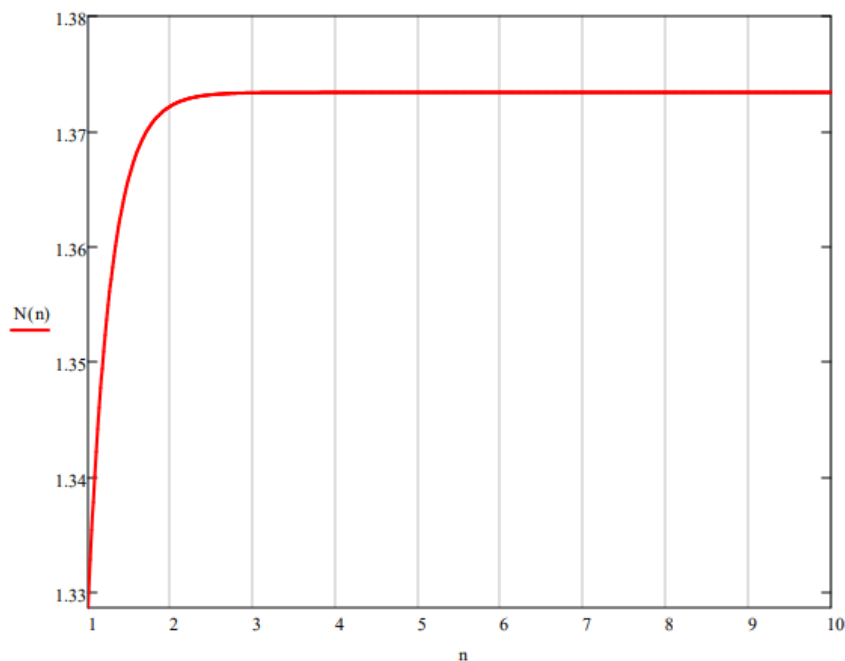


Рисунок 14 – Зависимость коэф. шума МШУ от количества каскадов

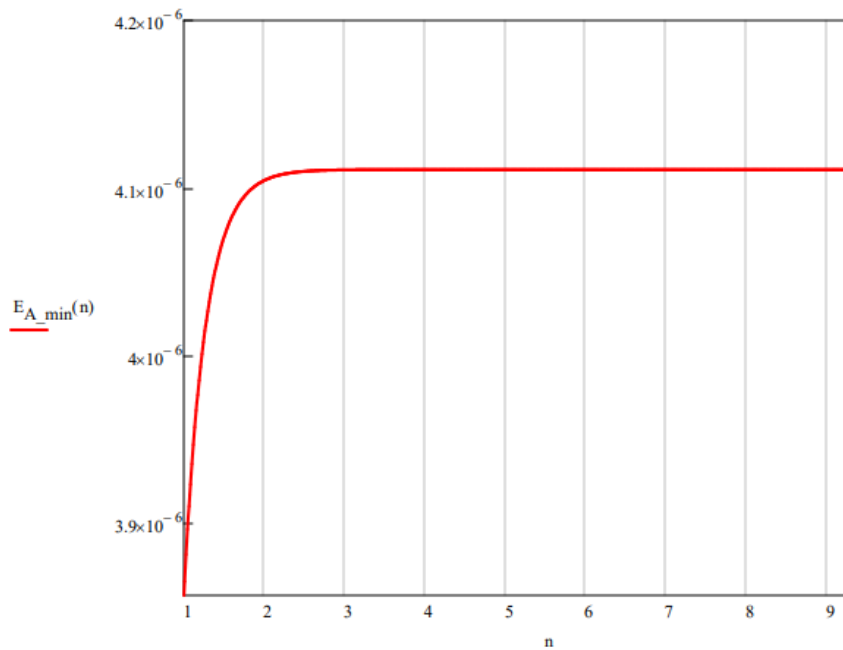


Рисунок 15 – Зависимость чувствительности МШУ от количества каскадов

Как можно видеть на рисунке 15, чувствительность МШУ при увеличении каскадов стабилизируется примерно на уровне 4.1 мВ. На основе этого возьмём в качестве минимального рабочего уровня входного сигнала 5 мВ., что равно  $P_{in} = -123.01\text{дБм}$ . Тогда при известном уровне минимально допустимой мощности сигнала на входе гетеродина  $P_{lo\_min} = -10\text{дБм}$  оценим необходимое кол-во каскадов МШУ:

$$n = \frac{P_{lo\_min} - P_{in}}{G} = 7.153 \quad (16)$$

На основе полученного значения зададим количество контуров МШУ равным 7 и рассчитаем на основе этого минимальную мощность входного сигнала при известной мощности на входе смесителя.

$$P_{in} = P_{lo\_min} - nG = -120.6\text{дБм} \quad (17)$$

Полученное значение минимальной входной мощности в дальнейшем будет использоваться при расчёте ПрМ.

### 2.3.3 Согласование с антенно-фидерным трактом

Выходное сопротивление антенно-фидерного тракта равно 50 Ом. Первый каскад будем настраивать на минимальный уровень шумов, при



этом коэф. отражения на 50-оммном пробнике составляет  $\Gamma = 0.308e^{113.23^{\circ}i}$ . Далее получим входное сопротивление соответствующее данному коэф. отражения:

$$Z = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = 33.829 + 21.156i \text{ Ом} \quad (18)$$

На основе этих данных запустим расчёт согласования на частоте несущей 4300 МГц. Ввиду того, что зондирующий сигнал достаточно узкополосен, будем использовать согласующую цепь 3 порядка. В результате получим следующие варианты построения согласующих цепей на рисунках 17 и 18.

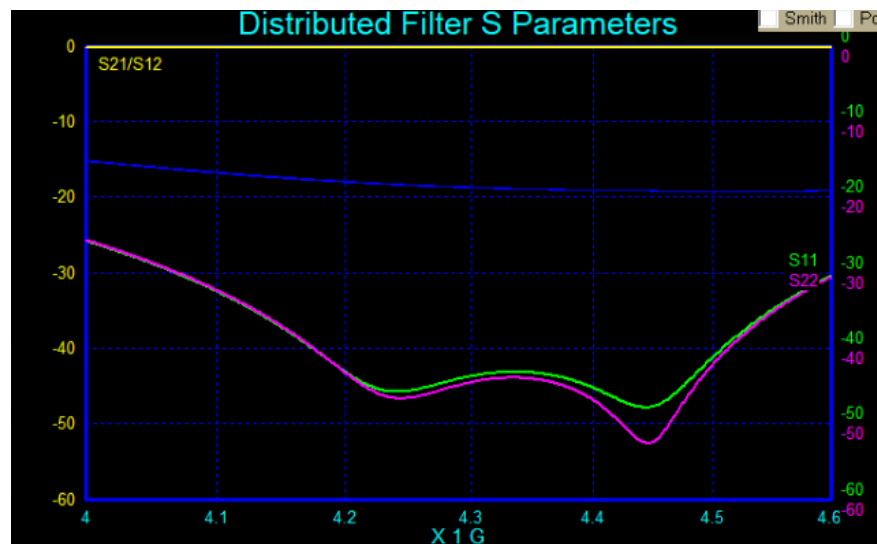


Рисунок 16 – Характеристики входной согласующей цепи МШУ

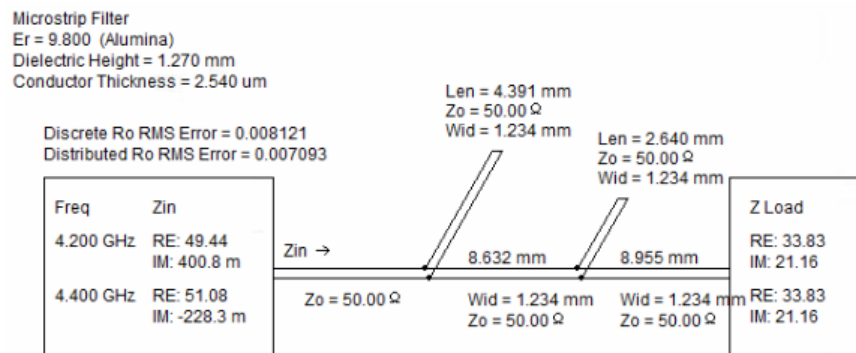


Рисунок 17 – 1 вариант построения входной согласующей цепи МШУ

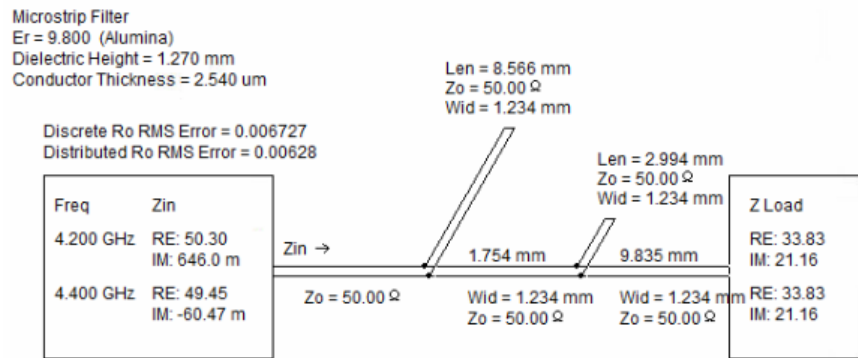


Рисунок 18 – 2 вариант построения входной согласующей цепи МШУ

Дальнейшее решение о выборе схемы согласующей цепи примет человек занимающийся проектированием ПП.

### 2.3.4 Межкаскадное согласование

Межкаскадное согласование в МШУ будем проводить с целью получения максимального КУ. В данном случае коэф. отражения на 50-оммном пробнике выхода усилителя составляет  $\Gamma = 0.363e^{-97.07^{\circ}i}$ . Получим выходное сопротивление соответствующее данному коэф. отражения:

$$Z = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = 35.563 - 29.488i \text{ Ом} \quad (19)$$

Далее получим входное сопротивление соответствующее коэф. отражения  $\Gamma = 0.607e^{-153.69^{\circ}i}$  при максимальном КУ:

$$Z = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = 12.854 - 10.951i \text{ Ом} \quad (20)$$

На основе этих данных запустим расчёт согласования на частоте несущей 4300 МГц. Ввиду того, что зондирующий сигнал достаточно узкополосен, будем использовать согласующую цепь 3 порядка. В результате получим следующие варианты построения согласующих цепей на рисунках 20 и 21.

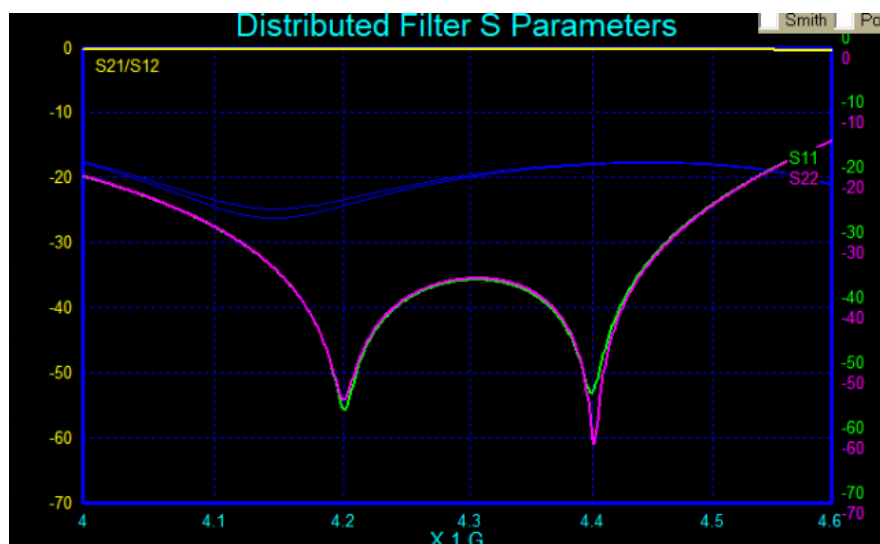


Рисунок 19 – Характеристики межкаскадной согласующей цепи МШУ

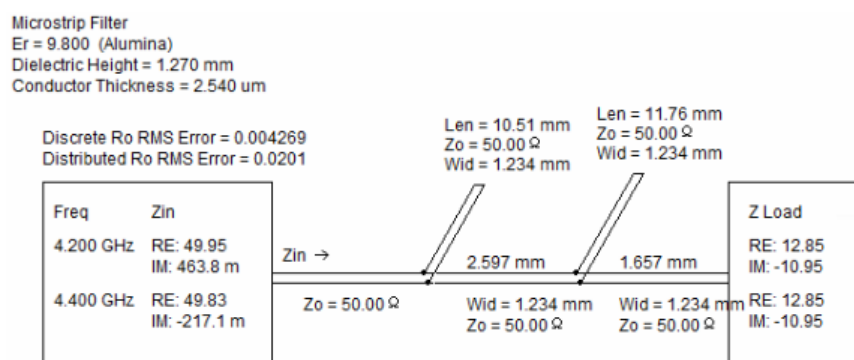


Рисунок 20 – 1 вариант построения межкаскадной согласующей цепи МШУ

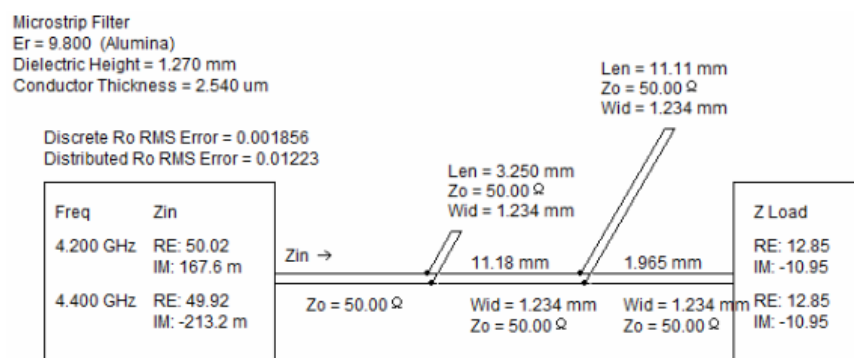


Рисунок 21 – 2 вариант построения межкаскадной согласующей цепи МШУ

Дальнейшее решение о выборе схемы согласующей цепи примет человек занимающийся проектированием ПП.

### 2.3.5 Согласование с преобразователем частоты

Согласование со смесителем будем проводить с целью получения максимального КУ.В данном случае выходное сопротивление усилителя равно рассчитанному в предыдущем пункте, а коэф. отражения на 50-оммном пробнике входа смесителя составляет  $\Gamma = 0.352e^{22.862^0i}$ . Получим выходное сопротивление соответствующее данному коэф. отражения:

$$Z = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = 92.210 + 28.808i \text{ Ом} \quad (21)$$

На основе этих данных запустим расчёт согласования на частоте несущей 4300 МГц. Ввиду того, что зондирующий сигнал достаточно узкополосен, будем использовать согласующую цепь 3 порядка. В результате получим следующие варианты построения согласующих цепей на рисунках 23 и 24.

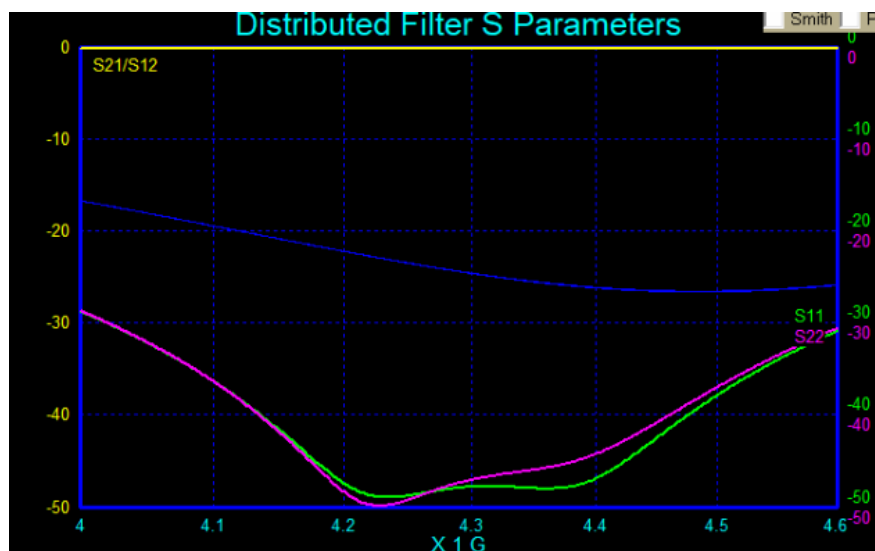


Рисунок 22 – Характеристики согласующей цепи смесителя по входу

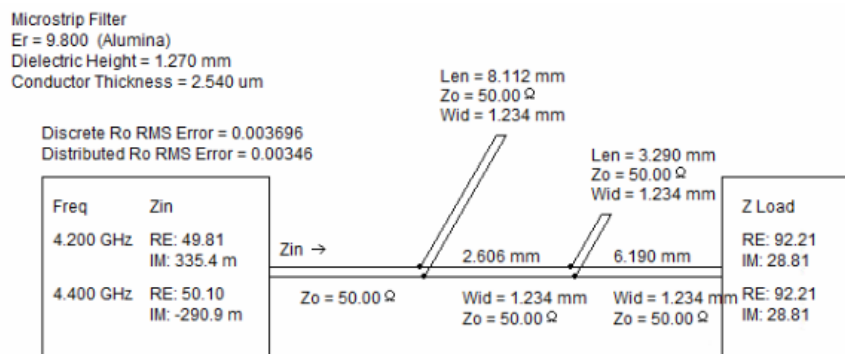


Рисунок 23 – 1 вариант построения согласующей цепи смесителя по входу

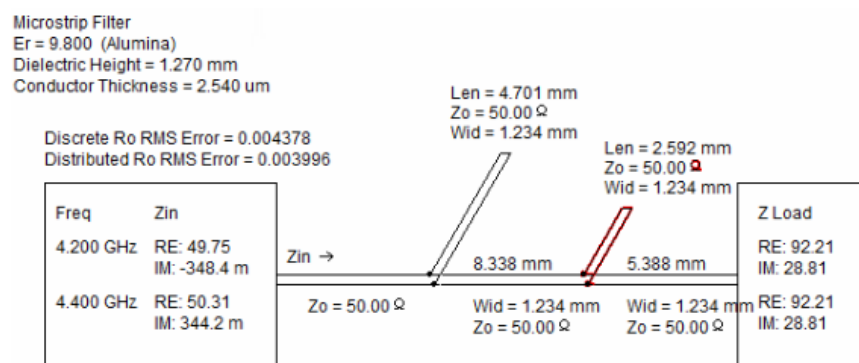


Рисунок 24 – 2 вариант построения согласующей цепи смесителя по входу

Дальнейшее решение о выборе схемы согласующей цепи примет человек занимающийся проектированием ПП.

## 2.4 Расчёт цепей ПЧ

### 2.4.1 Выбор АЦП

Для выбора АЦП приёмника зададимся следующими параметрами:

- частота дискретизации — 100 МВыб/с, так как для адекватной обработки сигнала необходимо около 10 отсчётов на его длительность, которая в минимальном варианте составляет 100 нс;
- разрешение — 8 бит, так как модуляция сигнала импульсная и большого количества отсчётов не требуется;
- минимальная рабочая температура — не более  $-60^{\circ}\text{C}$ ;
- максимальная рабочая температура — не менее  $+55^{\circ}\text{C}$ .

Заданным характеристикам удовлетворяет 11 элементов.

Компонент	Производитель	Коэф. шума, дБ	тип входа	Цена, \$
ADC08100	Texas Instruments	47	Single	9.89
MAX19506	Maxim Integrated	49.8	Diff	14.13
AD9283	Analog Devices	47	Diff	17.96
MAX1198	Maxim Integrated	48.5	Diff	24.01
...	...	...	...	...

Таблица 5 – АЦП удовлетворяющие условиям

Как можно видеть среди подходящих АЦП наиболее дешёвым является ADC08100 производства Texas Instruments, который также обладает одиночным входом, что в нашем случае удобнее. Также приведём схему стандартной обвязки согласно тех. документации [6].

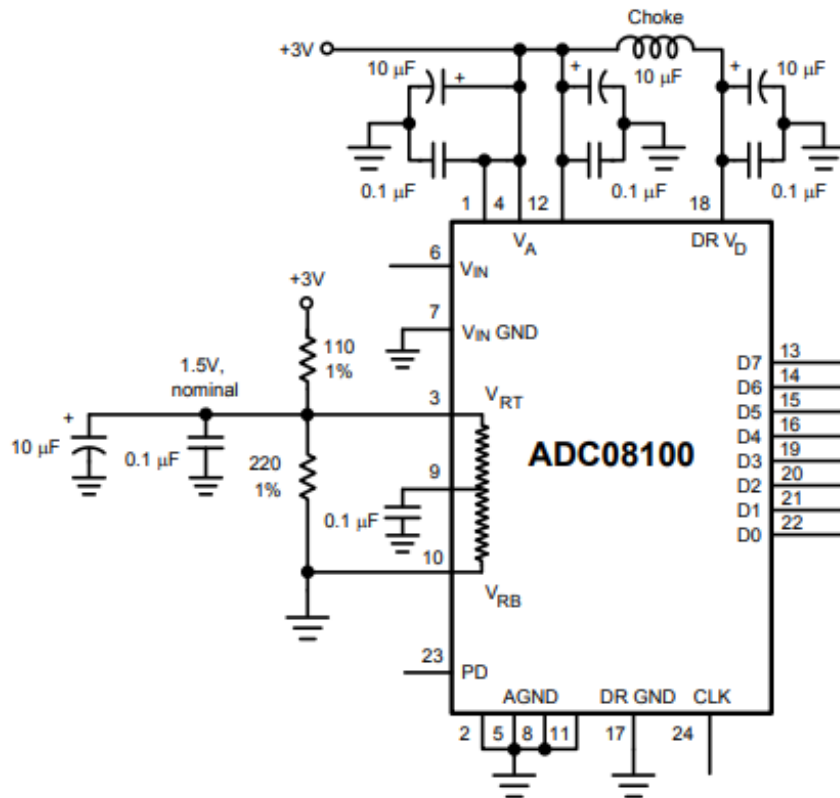


Рисунок 25 – Стандартная обвязка ADC08100

#### 2.4.2 Выбор усилительных элементов

Для начала определим необходимый уровень мощности на входе АЦП. Учитывая что согласно документации [6] входное сопротивление АЦП больше 1 МОм и не обладает большой стабильностью, будем использовать нагрузочный резистор номиналом 10 кОм. Тогда при входном размахе напряжения в 1.6 В. входная мощность сигнала на АЦП составит:

$$P_{\text{АЦП}} = \frac{U_{\text{range}}^2}{R_{\text{АЦП}}} = -5.9\text{дБм} \quad (22)$$

Таким образом, максимальный коэффициент усилителя ПЧ составит:

$$P_{\text{ПЧ}} = P_{\text{АЦП}} - P_{\text{МШУ}} + P_{\text{СМ}} = 11.1\text{дБ} \quad (23)$$

Для выбора усилителя ПЧ зададимся следующими параметрами:

- максимальная рабочая частота — более 10 МГц;
- максимальный КУ — более 11.1 дБ;
- точка компрессии — более -5.9 дБм;
- наличие управляемого коэффициента усиления для реализации АРУ;
- минимальная рабочая температура — не более -60<sup>0</sup>С;
- максимальная рабочая температура — не менее +55<sup>0</sup>С.

Заданным характеристикам удовлетворяет 8 элементов.

Компонент	Производитель	Макс. КУ, дБ	тип входа	Цена, \$
AD8337	Analog Devices	18	Single	6.3
AD8330	Analog Devices	30	Diff	11.2
...	...	...	...	...

Таблица 6 – Усилители удовлетворяющие условиям

Как можно видеть среди подходящих усилителей наиболее дешёвым является AD8337 производства Analog Devices. Обладает как достаточным коэффициентом усиления, так и одиночным входом, что удобнее в текущем исполнении Также приведём схему стандартной обвязки согласно тех. документации [13].

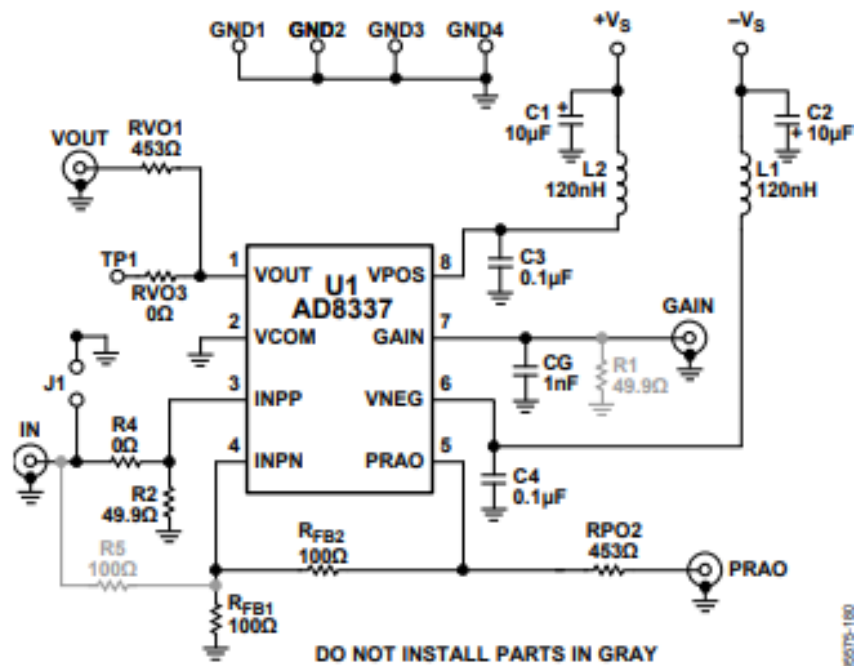


Рисунок 26 – Стандартная обвязка AD8337

### 2.4.3 Расчёт антиалисингового ФНЧ

Производить синтез фильтра будем во встроенном модуле программного пакета MicroCap, задавшись следующими критериями:

- граничная частота полосы пропускания — 10 МГц, согласно полосе сигнала;
- неравномерность в полосе пропускания — 0.5 дБ;
- граничная частота полосы заграждения — 50 МГц, как половина частоты дискретизации;
- коэффициент затухани в полосе заграждения — 30 дБ, что достаточно для 8-битного АЦП;
- аппроксимирующий полином — по Чебышеву, так как значительно уменьшает порядок фильтра, не сильно ухудшая ФЧХ.

Результаты синтеза фильтра представлены на рисунках 27 — 29.



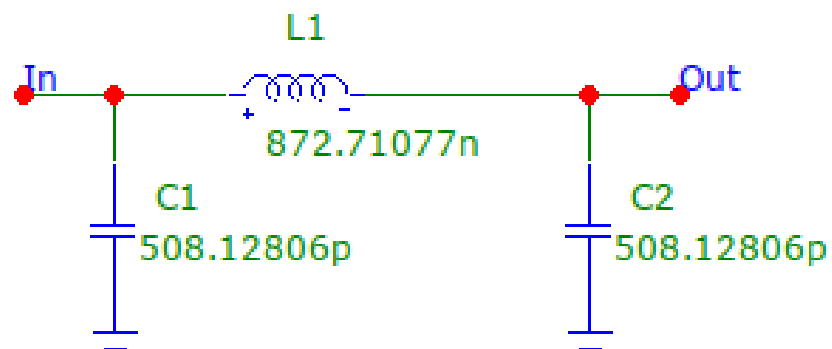


Рисунок 27 – Синтезированная цепь фильтра



Рисунок 28 – АЧХ фильтра

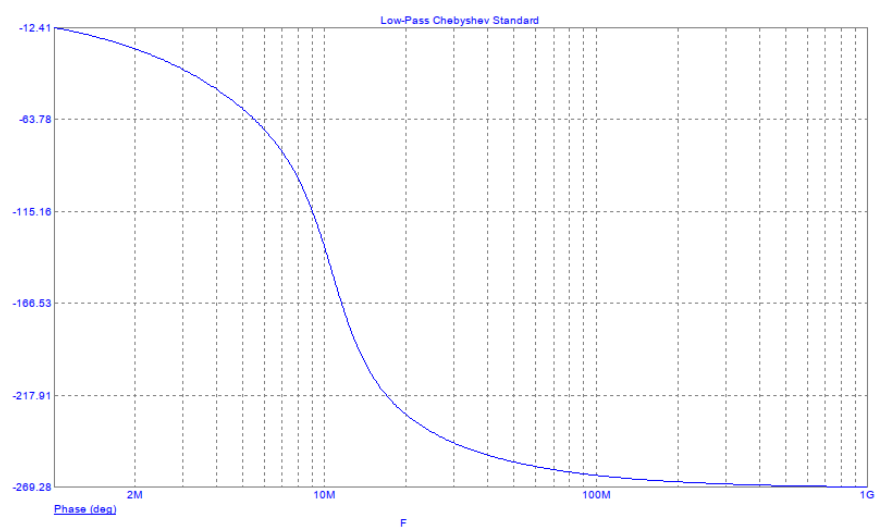


Рисунок 29 – ФЧХ фильтра

## 2.5 Определение потребляемых мощностей

Перечислим основных потребителей и характеристики их питания:

- гетеродин — напряжение питания 3.3 В, потребление тока логикой управления — до 27 мА, потребление выходным драйвером — до 26 мА, потребление ГУН — до 80 мА. Суммарное потребление до 133 мА или примерно 440 мВт;
- смеситель — пассивный элемент;
- АЦП — Напряжение питания 3.3 В, потребление тока до 53 мА или 186 мВт;
- усилитель гетеродина — Напряжение питания 3.3 В, потребление тока до 65 мА или 215 мВт;
- усилитель МШУ — Напряжение питания 2.5 В, потребление тока до 15 мА. или 38 мВт;
- усилитель ПЧ — Напряжение питания 5 В, потребление тока до 25.5 мА, или 130 мВт.

Общая потребляемая мощность на различных напряжениях представлена в таблице 7.

Напряжение, В	Потребляемый ток, мА	Мощность, мВт
2.5	105	266
3.3	251	838
5	25.5	130

Таблица 7 – Потребляемая мощность

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате работы были разобраны теоретические основы проектирования и расчёта РВ, было сформулировано ТЗ на проектирование РВ больших высот. Также получена функциональная схема и характеристики зондирующего импульса РВ больших высот. Проведено эскизное проектирование ПМ, подобраны рабочие элементы и рассчитаны согласующие цепи.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. О.А. Алексеев РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. Часть 1. Автономные радио-навигационные системы летательных аппаратов. Учебное пособие/ О.А. Алексеев, А.И. Баскаков, В.А. Терехов. Под. ред. Ю.Н. Бугаева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014 – 68 с.
2. Баженов, А.В. РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ/ Учебное пособие. [Текст]/ А.В. Баженов, Г.И. Захаренко, А.Н. Бережнов, К.Ю. Савченко./ Под ред. А.В. Баженова – Ставрополь: СВВАИУ(ВИ) , 2007 – 202с.
3. Баженов, А.В. РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ/ Учебное пособие. [Текст]/ А.В. Баженов, Г.И. Захаренко, А.Н. Бережнов, К.Ю. Савченко./ Под ред. А.В. Баженова – Ставрополь: СВВАИУ(ВИ) , 2007 – 202с.
4. Mouser.com Каталог аналоговых СВЧ компонентов./ URL: [https://ru.mouser.com/Semiconductors/Wireless-RF-Semiconductors/\\_/N-96p9c](https://ru.mouser.com/Semiconductors/Wireless-RF-Semiconductors/_/N-96p9c) Дата обращения: 20.07.2021
5. BGU7003W Техническая документация. МШУ/ URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BGU7003W.pdf> Дата обращения: 20.07.2021
6. ADC08100 Техническая документация. АЦП/ URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/adc08100.pdf> Дата обращения: 20.07.2021
7. HMC218b Техническая документация. Смеситель/ URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc218b.pdf> Дата обращения: 20.07.2021
8. ADF4351 Техническая документация. Синтезатор частоты с ФАПЧ/ URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4351.pdf> Дата обращения: 20.07.2021
9. CN-0285 Техническая документация. Описание схемы примера широкополосного передатчика/ URL:

<https://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/CN0285.pdf> Дата обращения: 22.07.2021

10. Touchstone BGU7003W Техническая документация. S-параметры BGU7003W/ URL: [https://www.nxp.com/downloads/en/s-parameters/BGU7003W\\_S\\_NF\\_Parameters.zip](https://www.nxp.com/downloads/en/s-parameters/BGU7003W_S_NF_Parameters.zip) Дата обращения: 23.07.2021
11. Touchstone HMC218C Техническая документация. S-параметры HMC218C/ URL: [https://www.analog.com/media/en/simulation-models/s-parameters/HMC218B\\_S-parameter.zip](https://www.analog.com/media/en/simulation-models/s-parameters/HMC218B_S-parameter.zip) Дата обращения: 23.07.2021
12. ADF4351 Техническая документация. Усилитель/ URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/trf37a73> Дата обращения: 23.07.2021
13. AD8337 Техническая документация. Усилитель с переменным КУ/ URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8337.pdf> Дата обращения: 23.07.2021

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**(справочное)**  
**Техническое задание**

## **Наименование изделия**

”Радиовысотомер больших высот”.

## **Назначение разработки**

### **Функциональное назначение**

Изделие должно измерять истинную высоту летательного аппарата над земной поверхностью на заданном диапазоне высот с заданной точностью. Также изделие должно производить контроль исправности своей работы и корректности измеряемых величин, а также информировать об этом бортовое вычислительное устройство.

Кроме того, должен производиться контроль занимаемого эшелона (до 3-х значений высот) и информирование о выходе за пределы заданных высот эшелона.

### **Эксплуатационное назначение**

Изделие должно эксплуатироваться в составе пилотажно-навигационного комплекса летательных средств гражданского назначения. С точки зрения ремонтнопригодности изделие должно быть модульного исполнения для оперативной замены вышедших из строя компонентов.

## **Требования к изделию**

### **Требования к функциональным характеристикам**

Рабочая частота прибора —  $(4300 \pm 10)$  МГц.

Диапазон рабочих высот в нормальном режиме — от 2 м до 25,000 м.

Диапазон рабочих высот в режиме ”Контроль РВ” — от 15 м до 20 м.

Погрешности измерений:

- на высотах от 2 м до 1500 м при скоростях до 3-х М и угле тангаж/крен до  $\pm 30^0$  —  $\pm(1.5+0.015)H$ , м;
- на высотах от 2 м до 1500 м при скоростях до 3-х М и угле тангаж/крен до  $\pm 45^0$  —  $\pm(3+0.03)H$ , м;

- на высотах от 1500 м до 6000 м при скоростях до 3-х М и угле тангаж/крен от  $\pm 15^0$  до  $\pm 30^0$  —  $\pm(3+0.03)H$ , м;
- на высотах от 1500 м до 12,000 м при скоростях до 3-х М и угле тангаж/крен до  $\pm 15^0$  —  $\pm(1.5+0.015)H$ , м;
- на высотах от 12,000 м до 25,000 м при скоростях до 3-х М и угле тангаж/крен до  $\pm 5^0$  —  $\pm(1.5+0.015)H$ , м.

### **Требования к надёжности**

- время непрерывной работы — 24 ч;
- время готовности — не более 60 с;
- наработка на отказ — не менее 2500 ч;
- ресурс работы — не менее 20,000 ч;
- срок службы — не менее 20 лет.

### **Условия эксплуатации**

- рабочие температуры — от  $-60^0\text{C}$  до  $+55^0\text{C}$ ;
- влажность — до 95% при температуре  $35^0\text{C}$ ;
- давление — от 2 до 106 кПа;
- вибрации — от 5 до 2000 Гц;
- линейные перегрузки — до 10G;
- удары — до 8G;
- акустические шумы — от 100 до 10,000 Гц. при звуковом давлении до 130 дБ.

### **Требования к информационной совместимости**

Информация о текущей высоте выдаётся в цифровой и аналоговой формах. В цифровом виде с помощью параллельного кода:

- разрядность кода — 16 бит;
- вес одного бита — 0.5 м/бит;
- выдача на всех рабочих высотах при наличии сигналов "РВ готов";
- уровень "0" —  $-(5\pm 0.5)$  В;
- уровень "1" —  $+(5\pm 0.5)$  В;
- отсутствие сигнала — от -0.5 В до +0.5 В.



В цифровом виде с помощью параллельного кода:

- разрядность кода — 32 бит;
- скорость передачи —  $(48 \pm 12)$  бит/с;
- выдача на всех рабочих высотах при наличии сигналов "РВ готов";
- интерфейс представляет собой дифференциальную пару "А" и "Б";
- уровень "0" на линии "А" —  $(-5 \pm 0.5)$  В;
- уровень "1" на линии "А" —  $(+5 \pm 0.5)$  В;
- отсутствие сигнала на линии "А" — от -0.5 В до +0.5 В;
- уровень "0" на линии "Б" —  $(+5 \pm 0.5)$  В;
- уровень "1" на линии "Б" —  $(-5 \pm 0.5)$  В;
- отсутствие сигнала на линии "Б" — от -0.5 В до +0.5 В;
- максимальный нагрузочный ток — 0.1 А.

В аналоговом виде с помощью двух независимых портов:

- максимальное выходное напряжение — 28 В;
- максимальный нагрузочный ток одного порта — 0.6 А;
- выдача на высотах до 1500 м. при наличии сигналов "РВ готов";
- крутизна сигнала —  $(0.02 \pm 0.0006)$  В/м.

При наличии питания выдаются служебные сигналы:

Сигнал "ИСПРАВ.":

- указывает на исправную работу прибора;
- напряжение при наличии сигнала — 27 В;
- максимальный нагрузочный ток — 0.1 А.

Сигнал "ОТКАЗ":

- указывает на отказ прибора;
- характеризуется включением светодиодного индикатора "ОТКАЗ" на передней панели прибора;
- при наличии данного сигнала снимается сигнал "Исправ."

Сигнал "РВ ГОТОВ":

- указывает на корректность показаний;
- выдаётся только при наличии сигнала "Исправ." и состояния "Захват";

- напряжение при наличии сигнала — 27 В;
- максимальный нагрузочный ток — 0.1 А.

### **Требования к совместимости с антенно-фидерным трактом**

В качестве приёмной и передающей антенны будут применяться две волноводно-щелевые антенны типа А-061-4 со следующими характеристиками:

- рабочая частота — 4.3 ГГц;
- КСВ — не более 1.5;
- коэффициент усиления — не менее 20 дБ;
- волновое сопротивление фидерного тракта — 50 Ом;
- модель штекера — .

### **Требования к совместимости по питанию**

- напряжение постоянного тока —  $27_{-3}^{+2.4}$  В;
- максимальная потребляемая мощность по постоянному току — не более 46 Вт;
- напряжение переменного тока —  $115_{-7}^{+4}$  В при частоте 400 Гц;
- максимальная потребляемая мощность по переменному току — не более 60 Вт.

### **Требования к габаритной совместимости**

- ширина изделия — не более 57 мм;
- высота изделия — не более 194 мм;
- глубина изделия — не более 380 мм.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

**(справочное)**

**Функциональная схема радиовысотомера**

Справ. №		Перв. примен.		МГТУ.464419.001Э2																																																												
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">ИП</div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">ПрМ</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">ПМ</div> </div> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">МОССУ</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">ФВС</div> </div> </div> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Сигнал гетеродина</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Синхр.</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Оцифрованный сигнал</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Текущая высота</div> </div> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Контроль и управление</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Запуск</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Контроль</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 10px;">Контроль и управление</div> </div> </div> </div>																																																																
МГТУ.464419.001Э2																																																																
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>Изм.</td> <td>Лист</td> <td>№ докум.</td> <td>Подп.</td> <td>Дата</td> <td rowspan="5" style="text-align: center; vertical-align: middle;"> <div>РВ больших высот</div> <div>Схема электрическая функциональная</div> </td> <td>Лит.</td> <td>Масса</td> <td>Масштаб</td> </tr> <tr> <td>Разраб.</td> <td>Белкин М.А.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Пров.</td> <td>Буянова Н.В.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Т.контр.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Н.контр.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Утв.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Лист 1</td> <td>Листов 1</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="6"></td> <td colspan="3" style="text-align: center;">МГТУ им. Н.Э.Баумана</td> </tr> </table>						Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>РВ больших высот</div> <div>Схема электрическая функциональная</div>	Лит.	Масса	Масштаб	Разраб.	Белкин М.А.							Пров.	Буянова Н.В.							Т.контр.								Н.контр.								Утв.						Лист 1	Листов 1								МГТУ им. Н.Э.Баумана		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	<div>РВ больших высот</div> <div>Схема электрическая функциональная</div>	Лит.	Масса	Масштаб																																																								
Разраб.	Белкин М.А.																																																															
Пров.	Буянова Н.В.																																																															
Т.контр.																																																																
Н.контр.																																																																
Утв.						Лист 1	Листов 1																																																									
						МГТУ им. Н.Э.Баумана																																																										

## **ПРИЛОЖЕНИЕ В**

**(справочное)**

**S-параметры цепей согласования приёмника**

## Межкаскадная согласующая цепь МШУ

1	#	MHz	S	MA	R	50						
2	!	Freq-MHz			S11-mag	S11-arg	S21-mag	S21-arg	S12-mag	S12-arg	S22-mag	
										S22-arg		
3		3000		0.624		-111.19	5.958	94.78	0.105	34.65	0.574	-62.75
4		3100		0.640		-114.35	5.926	93.34	0.107	32.91	0.566	-65.29
5		3200		0.635		-117.54	5.829	91.86	0.108	31.20	0.553	-67.06
6		3300		0.649		-121.01	5.804	90.25	0.109	29.47	0.544	-69.66
7		3400		0.643		-123.93	5.714	88.65	0.109	27.91	0.530	-71.45
8		3500		0.653		-127.52	5.674	86.88	0.110	26.36	0.519	-73.87
9		3600		0.647		-130.30	5.585	85.14	0.110	24.87	0.504	-75.68
10		3700		0.653		-133.92	5.544	83.37	0.110	23.66	0.494	-77.96
11		3800		0.647		-136.07	5.450	81.68	0.110	22.54	0.481	-79.55
12		3900		0.649		-139.89	5.388	79.78	0.110	21.50	0.468	-81.79
13		4000		0.647		-141.56	5.304	78.22	0.110	20.58	0.456	-83.35
14		4100		0.645		-145.38	5.230	76.33	0.109	19.73	0.444	-85.15
15		4200		0.643		-146.69	5.152	74.73	0.110	18.99	0.434	-86.91
16		4300		0.642		-150.40	5.080	73.00	0.109	17.85	0.422	-88.99
17		4400		0.641		-151.98	5.007	71.28	0.109	17.17	0.412	-90.59
18		4500		0.636		-155.56	4.923	69.51	0.108	16.27	0.399	-92.30
19		4600		0.638		-156.94	4.854	67.80	0.108	15.62	0.388	-94.18
20		4700		0.629		-160.50	4.759	66.08	0.107	14.98	0.376	-95.74
21		4800		0.633		-161.39	4.698	64.56	0.106	14.69	0.369	-97.18
22		4900		0.621		-165.07	4.601	62.75	0.105	14.20	0.355	-99.00
23		5000		0.628		-165.84	4.551	61.25	0.105	14.19	0.351	-100.31
24		5200		0.622		-170.00	4.398	58.21	0.104	14.30	0.333	-103.50
25		5400		0.618		-173.66	4.257	55.22	0.104	14.17	0.319	-106.32
26		5600		0.612		-177.54	4.114	52.29	0.103	14.08	0.304	-109.72
27		5800		0.606		179.38	3.983	49.47	0.104	14.70	0.293	-112.40
28		6000		0.602		176.14	3.855	46.73	0.105	14.75	0.283	-115.74
29												

## Согласующая цепь МШУ с антенно-фидерным трактом

1	#	MHz	S	MA	R	50				
2	!	Freq-MHz		S11-mag	S11-arg	S21-mag	S21-arg	S12-mag	S12-arg	S22-mag
				S22-arg						
3	3000	0.748	-73.39	1.301	48.01	0.0195	-130.82	0.89444	-101.35	
4	3100	0.759	-75.94	1.051	46.93	0.0247	-141.26	0.88926	-106.69	
5	3200	0.765	-78.22	0.827	48.37	0.0279	-148.72	0.88123	-112.16	
6	3300	0.777	-80.65	0.638	53.72	0.0330	-155.52	0.86869	-117.06	
7	3400	0.787	-83.78	0.490	65.45	0.0386	-161.99	0.85269	-122.31	
8	3500	0.788	-86.66	0.432	84.01	0.0438	-168.22	0.83463	-126.83	
9	3600	0.797	-89.11	0.449	103.07	0.0490	-173.97	0.81424	-131.68	
10	3700	0.799	-91.74	0.530	116.92	0.0550	-179.70	0.79412	-136.24	
11	3800	0.798	-95.10	0.641	122.43	0.0592	173.82	0.76585	-140.42	
12	3900	0.797	-97.47	0.753	124.53	0.0641	169.70	0.74205	-144.38	
13	4000	0.797	-99.45	0.860	124.69	0.0672	164.88	0.71366	-148.07	
14	4100	0.793	-102.26	0.948	122.90	0.0717	161.16	0.68621	-151.18	
15	4200	0.789	-104.85	1.019	121.25	0.0751	157.40	0.66753	-154.16	
16	4300	0.786	-106.94	1.095	120.27	0.0797	154.60	0.64865	-157.59	
17	4400	0.788	-109.00	1.174	118.08	0.0837	149.67	0.62252	-160.92	
18	4500	0.782	-111.82	1.226	115.60	0.0879	147.18	0.6059	-163.48	
19	4600	0.778	-114.22	1.294	113.31	0.0954	144.21	0.58487	-166.85	
20	4700	0.781	-116.19	1.358	111.61	0.1003	142.09	0.56384	-170.24	
21	4800	0.783	-118.53	1.412	108.91	0.1052	138.55	0.5439	-172.97	
22	4900	0.775	-121.92	1.481	106.30	0.1115	135.11	0.51845	-176.56	
23	5000	0.769	-124.13	1.555	103.17	0.1191	131.40	0.48711	179.99	
24	5100	0.759	-126.27	1.604	99.56	0.1238	127.38	0.45401	177.66	
25	5200	0.748	-129.29	1.624	95.73	0.1255	123.09	0.42687	176.64	
26	5300	0.730	-131.14	1.631	92.43	0.1281	119.98	0.4087	176.02	
27	5400	0.724	-132.14	1.655	89.42	0.1327	117.33	0.38466	174.68	
28	5500	0.731	-133.96	1.669	87.41	0.1347	115.38	0.37072	172.66	
29	5600	0.713	-137.30	1.679	83.99	0.1377	111.76	0.35235	171.92	
30	5700	0.692	-139.18	1.693	80.87	0.1424	109.58	0.33155	171.80	
31	5800	0.707	-139.20	1.720	78.96	0.1466	107.33	0.31087	170.75	
32	5900	0.706	-142.70	1.695	75.52	0.1461	104.30	0.2935	171.73	
33	6000	0.637	-145.48	1.636	71.63	0.1436	100.43	0.29168	174.71	
34										

---

## Согласующая цепь МШУ со смесителем

1	#	MHz	S	MA	R	50				
2	!	Freq-MHz		S11-mag	S11-arg	S21-mag	S21-arg	S12-mag	S12-arg	S22-mag
				S22-arg						
3	3000	0.451	-50.350	2.598	66.130	0.068	45.820	0.719	-62.230	
4	3100	0.466	-51.710	2.399	62.200	0.066	41.740	0.732	-68.010	
5	3200	0.481	-53.320	2.208	58.650	0.063	37.720	0.742	-73.690	
6	3300	0.497	-55.100	2.025	55.520	0.060	33.860	0.752	-79.240	
7	3400	0.511	-57.250	1.854	52.660	0.057	30.030	0.760	-84.720	
8	3500	0.524	-59.460	1.689	50.220	0.053	26.370	0.765	-90.150	
9	3600	0.538	-61.890	1.535	48.300	0.049	22.770	0.767	-95.560	
10	3700	0.551	-64.610	1.390	47.080	0.045	19.510	0.769	-100.88	
11	3800	0.564	-67.420	1.259	46.610	0.040	16.930	0.770	-106.10	
12	3900	0.576	-70.400	1.141	47.010	0.035	14.410	0.769	-111.30	
13	4000	0.587	-73.450	1.039	48.390	0.029	12.690	0.765	-116.49	
14	4100	0.597	-76.590	0.954	50.740	0.023	12.590	0.760	-121.64	
15	4200	0.605	-79.930	0.892	54.110	0.017	16.670	0.753	-126.67	
16	4300	0.613	-83.350	0.854	58.060	0.012	29.940	0.747	-131.55	
17	4400	0.620	-86.710	0.838	62.280	0.008	62.470	0.738	-136.38	
18	4500	0.627	-90.330	0.842	65.990	0.010	103.250	0.728	-141.18	
19	4600	0.632	-94.080	0.862	69.170	0.016	121.230	0.716	-145.85	
20	4700	0.636	-97.870	0.899	71.380	0.024	126.390	0.704	-150.33	
21	4800	0.639	-101.630	0.944	72.590	0.032	127.070	0.692	-154.65	
22	4900	0.639	-105.400	0.994	72.810	0.040	125.910	0.679	-158.85	
23	5000	0.639	-109.350	1.043	72.120	0.048	123.350	0.665	-162.90	
24	5100	0.636	-113.210	1.088	70.880	0.056	120.240	0.651	-166.74	
25	5200	0.632	-117.030	1.131	69.210	0.063	116.850	0.639	-170.33	
26	5300	0.628	-120.520	1.173	67.160	0.070	113.540	0.629	-173.80	
27	5400	0.627	-124.180	1.207	64.760	0.077	110.810	0.617	-177.19	
28	5500	0.624	-127.930	1.236	62.300	0.085	107.900	0.605	179.570	
29	5600	0.621	-131.700	1.265	59.580	0.092	104.650	0.595	176.540	
30	5700	0.617	-135.620	1.288	56.530	0.099	101.340	0.587	173.730	
31	5800	0.610	-139.410	1.304	53.480	0.105	98.050	0.580	171.050	
32	5900	0.603	-143.140	1.313	50.400	0.112	94.950	0.573	168.440	
33	6000	0.597	-146.730	1.319	47.320	0.118	91.360	0.567	165.990	
34										



## Согласующая цепь усилителя сигнала гетеродина со смесителем

1	#	MHz	S	MA	R	50				
2	!	Freq-MHz		S11-mag	S11-arg	S21-mag	S21-arg	S12-mag	S12-arg	S22-mag
				S22-arg						
3	3000	0.90874		-78.55	0.179	33.34	0.179	33.05	0.939	-40.47
4	3100	0.91285		-80.34	0.183	31.89	0.184	31.62	0.937	-41.85
5	3200	0.90369		-83.32	0.186	29.83	0.187	29.52	0.934	-43.25
6	3300	0.90908		-85.11	0.191	28.35	0.197	28.04	0.932	-44.67
7	3400	0.90036		-88.02	0.193	26.37	0.194	26.02	0.930	-46.04
8	3500	0.90543		-89.89	0.197	24.75	0.191	24.39	0.927	-47.51
9	3600	0.8963		-92.79	0.199	22.74	0.200	22.31	0.924	-48.98
10	3700	0.90163		-94.51	0.203	21.34	0.203	20.97	0.923	-50.36
11	3800	0.89309		-97.28	0.205	19.45	0.205	19.04	0.920	-51.79
12	3900	0.89758		-99.28	0.208	17.83	0.208	17.44	0.916	-53.34
13	4000	0.88921		-101.70	0.210	16.08	0.210	15.73	0.914	-54.76
14	4100	0.89336		-104.03	0.212	14.38	0.213	13.96	0.912	-56.24
15	4200	0.88491		-106.16	0.214	12.87	0.219	12.51	0.909	-57.76
16	4300	0.88943		-108.33	0.217	11.08	0.217	10.61	0.907	-59.24
17	4400	0.88422		-110.59	0.218	9.31	0.218	8.89	0.909	-60.71
18	4500	0.88751		-112.86	0.220	7.46	0.220	6.96	0.901	-62.22
19	4600	0.88215		-115.05	0.223	5.64	0.221	5.18	0.899	-63.90
20	4700	0.8861		-117.30	0.222	3.85	0.222	3.26	0.898	-65.46
21	4800	0.88066		-119.37	0.222	2.19	0.222	1.65	0.895	-66.97
22	4900	0.88477		-121.74	0.222	0.28	0.222	-0.30	0.892	-68.53
23	5000	0.88015		-123.59	0.223	-1.36	0.222	-1.86	0.890	-70.33
24	5200	0.87811		-127.98	0.228	-4.61	0.221	-5.06	0.886	-73.63
25	5400	0.87608		-132.23	0.221	-7.79	0.220	-8.29	0.879	-76.93
26	5600	0.87586		-136.62	0.218	-11.54	0.217	-12.01	0.876	-80.57
27	5800	0.87318		-140.78	0.215	-14.52	0.214	-15.04	0.870	-83.99
28	6000	0.87082		-144.91	0.212	-17.72	0.214	-18.21	0.865	-87.84
29										

---

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г**  
**(справочное)**  
**Схемы модуля приёмника**