

УДК.621.396.96

## **Коррекция дальностных искажений с внутренней калибровкой в авиационном РСА**

И. И. Ивенков

### **Аннотация**

Рассматриваются актуальные вопросы обработки радиолокационных изображений, полученных радиолокатором с синтезированной апертурой с временной автоматической регулировкой усиления (ВАРУ). Предложены теоретические модели подстилающих поверхностей различных типов. Рассчитаны теоретические функции ВАРУ для различных режимов работы РЛС и типов подстилающих поверхностей, позволяющие улучшать радиолокационное изображение за счет коррекции яркостных искажений. Рассмотрена возможность вносить корректирующие коэффициенты, учитывающие нестабильности параметров блоков по пилот-сигналу.

### **Ключевые слова**

Временная автоматическая регулировка усиления; эффективная площадь рассеяния; дальностные искажения; внутренняя калибровка

## Оглавление

Введение	3
Глава 1 Исследование требуемых характеристик временной автоматической регулировки усиления	5
1.1 Исследование необходимости временной регулировки в радиолокаторе с синтезированной апертурой	5
1.2 Исследование факторов влияющих на видимые эффективную площадь рассеяния точечных объектов	8
1.3 Расчет корректирующих функций временной автоматической регулировки усиления	8
Глава 2 Исследование путей разработки платы управления временной автоматической регулировкой усиления	12
2.1 Обоснование элементной базы	12
2.2 Элементная база	13
Глава 3 Разработка прибора управления временной автоматической регулировкой усиления	14
3.1 Принципиальная схема	14
3.2 Расчет надежности и теплового режима.	15
Глава 4 Макро- и микропрограммное обеспечение	19
Глава 5 Организационно - экономическая часть	20
Заключение	21
Библиографический список	22

## Введение

При выполнении боевых задач наземными войсковыми частями и штурмовой авиации чрезвычайно важно иметь точные и полные разведданные о противнике, в том числе расположение единиц боевой техники, замаскированных командных пунктов, местах дислокации войск. Особенно важной задачей в современных условиях является разведка месторасположения схронов, подземки, выявление групп боевиков, в том числе на марше. Для решения этих и других задач правительством Российской Федерации принято решение о разработке межвидового разведывательного комплекса (МРК). Важнейшими средствами разведки является бортовой многочастотный радиолокационный комплекс, так как только это средство дистанционного зондирования является всепогодным, всепогодным и способно решать поставленные задачи как днем, так и ночью. РЛС позволяют строить карты рельефа местности, выявлять на них точечные и протяженные объекты, производить селекцию движущихся целей.

Принципиально важной является возможность проведения глубинного послыоного зондирования используя информацию радиолокаторов всех длин волн.

Наиболее высокое разрешение позволяет получать радиолокатор бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА). Суть метода работы РСА заключается в том, что на борту размещается сравнительно небольшая антенна с достаточно широкой диаграммой направленности. Передатчик формирует короткие импульсы амплитудно-частотной модуляции (АЧМ) в широкой полосе. Импульсы излучаются в антенну и после отражения от подстилающей поверхности принимаются приемником. При обработке спецвычислителями ЛЧМ импульса увеличивается разрешение по дальности (в направлении поперечном направлению полета), разрешение по азимуту достигается за счет накопления большего числа импульсов зондирования вдоль линии полета и обработки их с учетом фазы и доплеровского сдвига. Разрешающая способность по азимуту зависит от длины синтезирования [1].

Недостатком существующих систем бокового обзора (БО) является то, что цели с одинаковым эффективным поверхностным рассеянием (ЭПР), находящиеся на разных расстояниях от линии полета, выглядят на синтезированном изображении по-разному. Данный недостаток может быть устранен при помощи применения временной автоматической регулировки усиления.

Разработке прибора управления временной автоматической регулировки усиления и посвящена данная работа.

Для решения этой задачи необходимо исследовать:

- факторы, влияющие на кажущиеся значения ЭПР точечных объектов;
- пути компенсации этих факторов;
- схемы реализации прибора;
- алгоритмы построения специализированного программного обеспечения.

## **Глава 1 Исследование требуемых характеристик временной автоматической регулировки усиления**

### **1.1 Исследование необходимости временной регулировки в радиолокаторе с синтезированной апертурой**

Автоматическая регулировка усиления (АРУ), система, автоматически изменяющая коэффициент усиления приёмника при изменении мощности сигнала на его входе.

В большинстве случаев мощность сигналов, поступающих на вход приёмника, значительно меняется: из-за различия мощности передатчика, диаграммы направленности антенны, угол встречи с землей и дальности до объекта отражения. Эти изменения приводят к большим колебаниям мощности сигнала на входе приёмника. Действие АРУ направлено на значительное уменьшение изменений напряжения выходных сигналов приёмника по сравнению с входными.

Ранее, временная автоматическая регулировка усиления если и применялась в радиолокаторах, то в виде аналоговой схемы, тем самым во много раз усложняя возможность коррекции, доработки или изменения. Необходимо было полностью заменить аналоговую составляющую ВАРУ. На сегодняшний день от аналоговой части ВАРУ отказались, обработка изображения и его доработка производится на удаленном терминале за персональным компьютером, что во многом затрудняет и замедляет процесс своевременного получения информации в удобном для заказчика виде. На персональном компьютере оператор убирает огрехи существующей системы работающей без автоматической регулировки усиления: увеличивается четкость получаемого изображения, подгоняется яркость, программным средством дорабатывают нехватку системы АРУ. Такой вариант обработки полученной информации требует дополнительные затраты не только времени, но и квалифицированного оператора. Разрабатываемая плата временной автоматической регулировки усиления позволяет в режиме реального времени регулировать уровень входного сигнала.

На рисунке 1.1 представлено некорректированное радиолокационное изображение и яркостная функция, характеризующая усиление тракта. Темные участки показывают места, где требуется усиление для компенсации яркости изображения, светлые участки характеризуют нормальное усиление. По полученной яркостной функции можно легко

оценить необходимую функцию временной автоматической регулировки усиления для получения нормального распределения усиления по всему участку изображения.

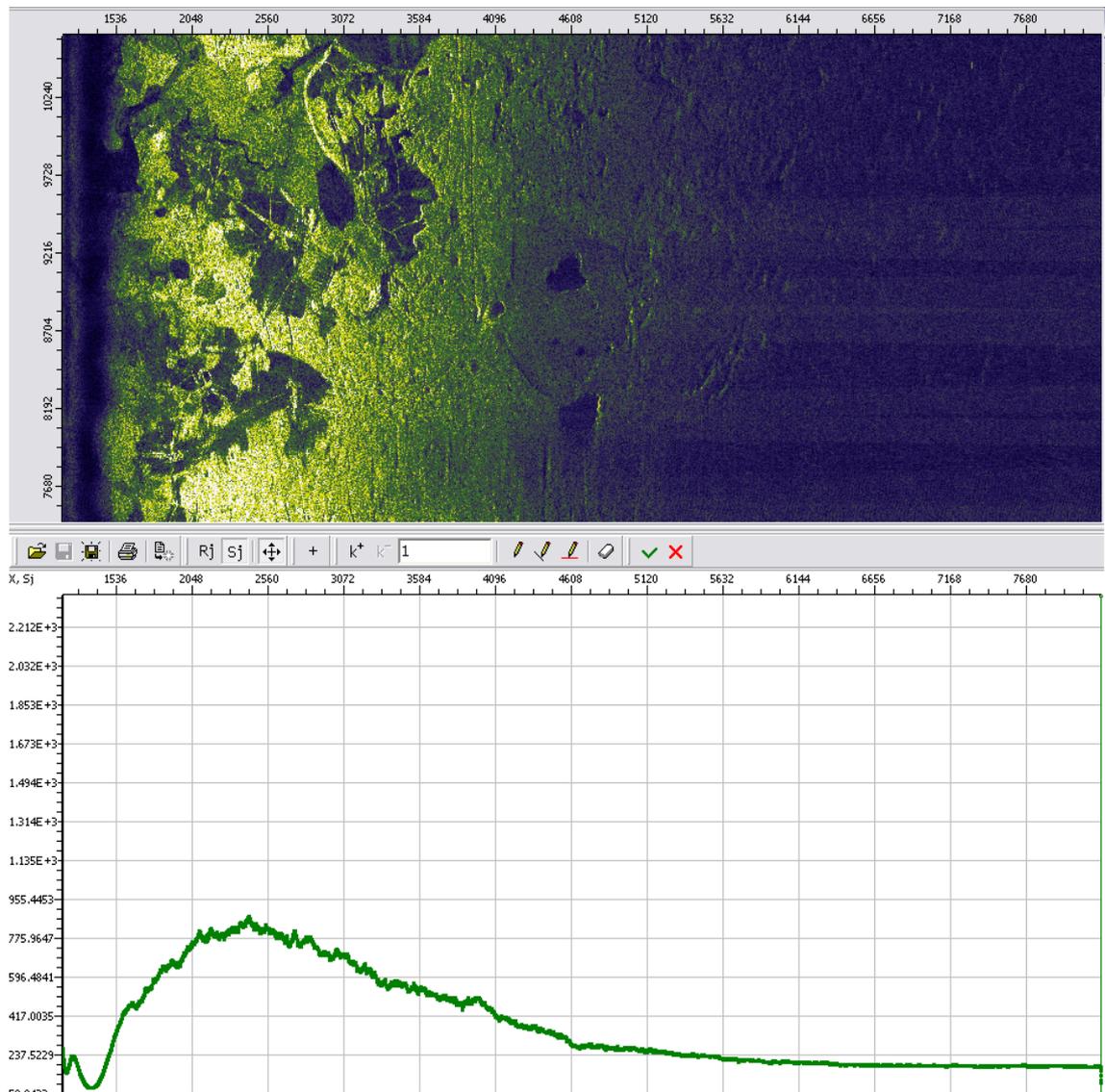


Рис. 1.1 Изображение получаемое РСА бокового обзора без АРУ и яркостная функция полученных данных

Для каждого диапазона частот компенсирующая функция будет иметь свой вид, что характеризуется рабочей частотой. Влияние сторонних факторов на эквивалентную поверхность рассеивания и расчет функции временной автоматической регулировки усиления будет рассмотрен в последующих главах.

Изображение, полученное при помощи программного компенсирования нехватки автоматической регулировки усиления, показано на рисунке 1.2. Яркостной баланс приведен в соответствие с удобной визуализацией полученных данных, что, несомненно, делает изображение более наглядным и читабельным.

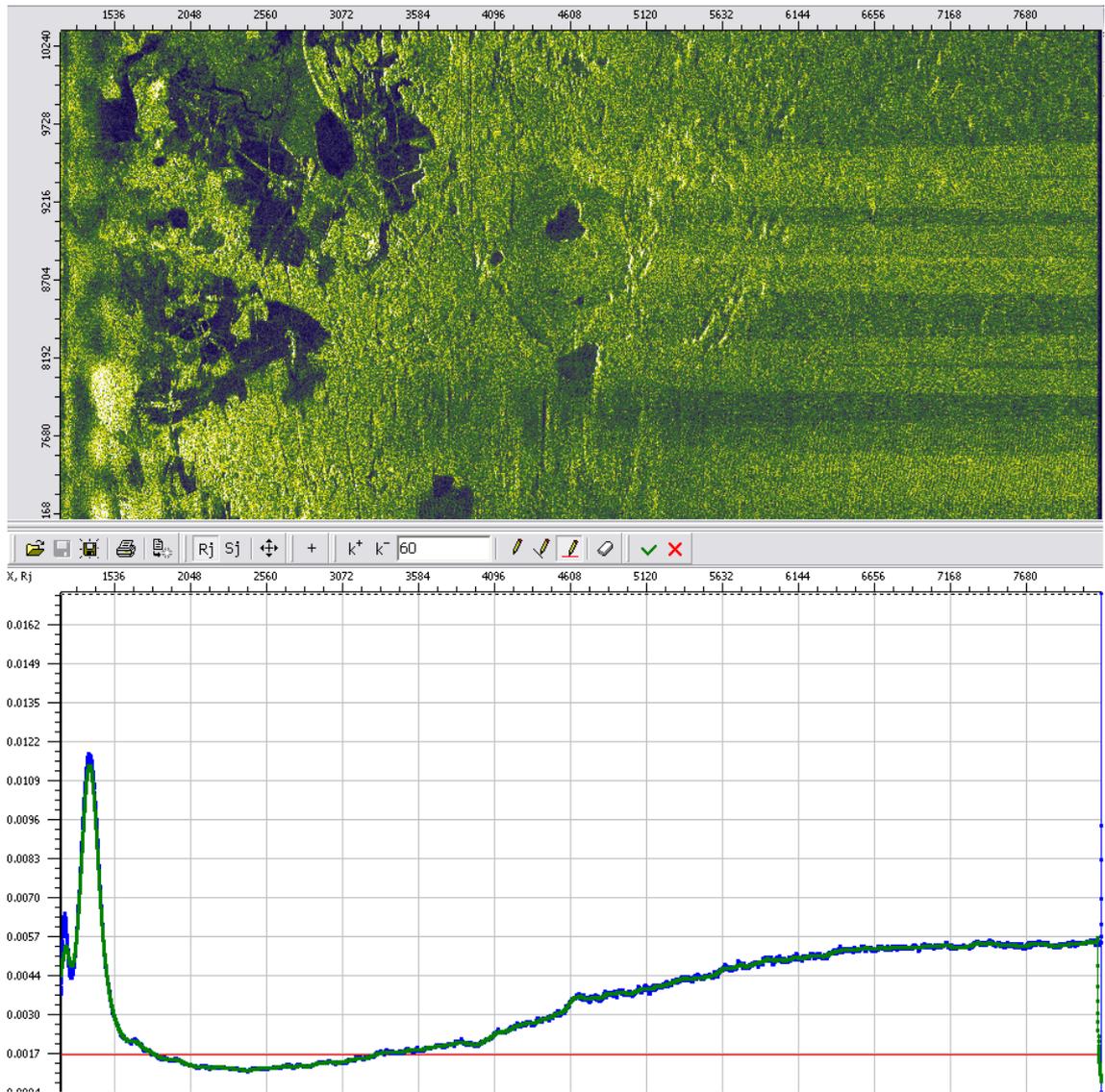


Рис. 1.2 Данные РСА бокового обзора после обработки на терминале

Из приведенных примеров наглядно и ясно видна реальная необходимость в потребности платы временной автоматической регулировки усиления. Изображения, полученные при использовании системы АРУ, будут иметь большую наглядность и информативность.

## 1.2 Исследование факторов влияющих на видимые эффективную площадь рассеяния точечных объектов

Основными факторами, влияющими на кажущееся значение ЭПР точечных объектов являются: диаграмма направленности антенны, дальность до объекта, характеристика рассеяния подстилающей поверхности.

Диаграммы направленности антенн бывают различных типов, в зависимости от диапазона длин волн. Диаграммы направленности вида  $\text{cosec}(x)$  и вида  $\sin(x)/x$  используются в дальнейших расчетах.

Зависимость кажущейся ЭПР от дальности определяется уравнением радиолокационной дальности [2, 3]. Для моноимпульсных радиолокаторов зависимость от расстояния до объекта выражается степенной функцией четвертого порядка ( $1/R^4$ ). Для радиолокаторов синтезированной апертуры эта зависимость представляется степенной функцией третьего порядка ( $1/R^3$ ).

Характеристика рассеяния подстилающей поверхности существенно зависит от типа поверхности (водная поверхность, равнинная или гористая местность, лесные массивы). В первом приближении будем считать, что исследуемая поверхность равномерное рассеяние для любых углов падения.

## 1.3 Расчет корректирующих функций временной автоматической регулировки усиления

Кажущееся ЭПР объекта пропорциональна ЭПР самого объекта и произведения характеристик всех вышеописанных факторов:

$$\sigma_{\text{каж}} = K * \frac{1}{R^3} * \varphi(\alpha) * \varphi(\beta)$$

Для расчета функции ВАРУ необходимо в приведенной выше формуле перейти от угловых координат к координатам дальности. Поскольку дальность объекта визирования связана с временем прихода отклика на зондирующий сигнал простой формулой  $t=2D/c$ , где  $c$  – скорость света, то дальностная координата соответствует временной координате.

Полученные формулы были запрограммированы в системе MathCad и для следующих исходных значений были рассчитаны функции ВАРУ. Теоретический вид корректирующих

функций для ДН антенны вида  $\sin(x)/x$  и различных подстилающих поверхностей (рис. 1.5 и 1.6) представлены на рис. 1.4 и 1.7. Теоретический вид функций ВАРУ для ДН антенны вида  $\operatorname{cosec}(x)$  и различных подстилающих поверхностей представлены на рис. 1.8 и 1.9.

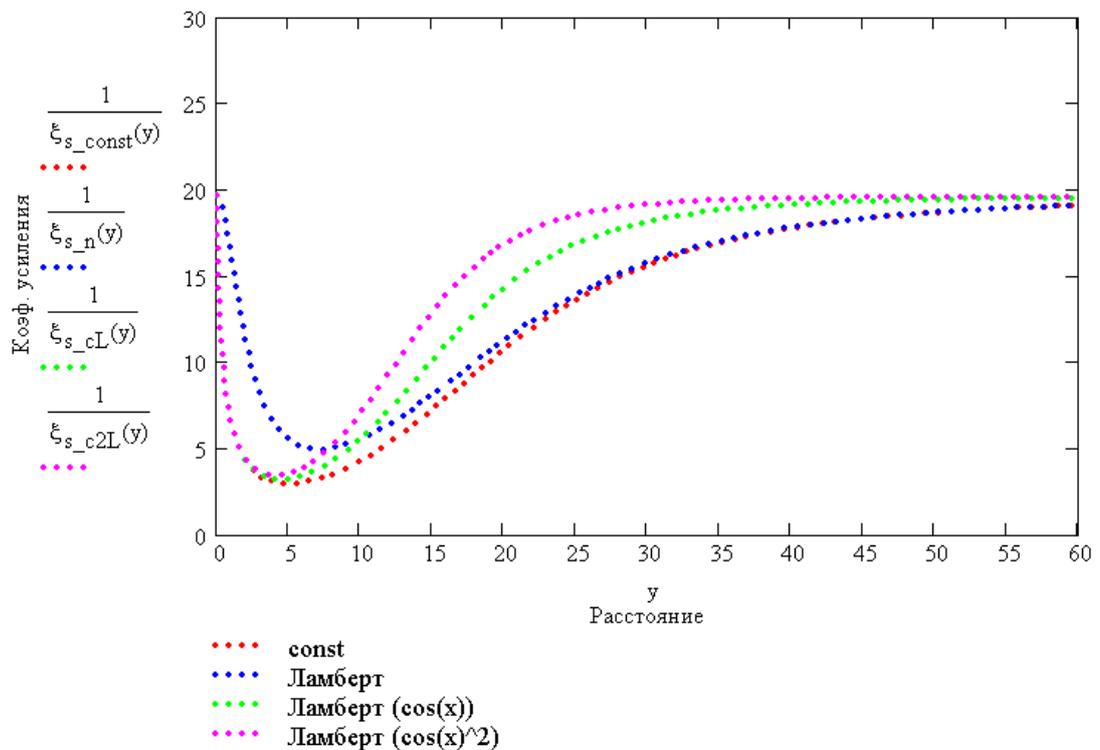


Рис. 1.3. Корректирующие функции для ДН антенны вида  $\sin(x)/x$  при различных подстилающих поверхностях

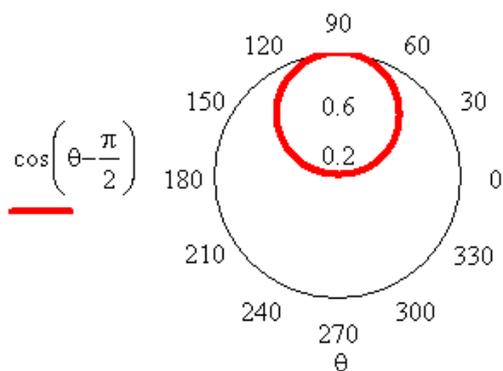


Рис. 1.4. Ламбертово рассеяние

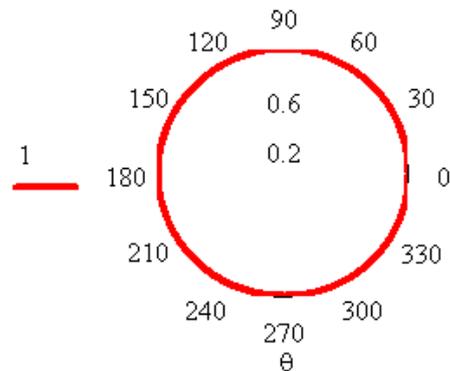


Рис. 1.5. Сферическое рассеяние. Частный случай Ламбертова рассеяния

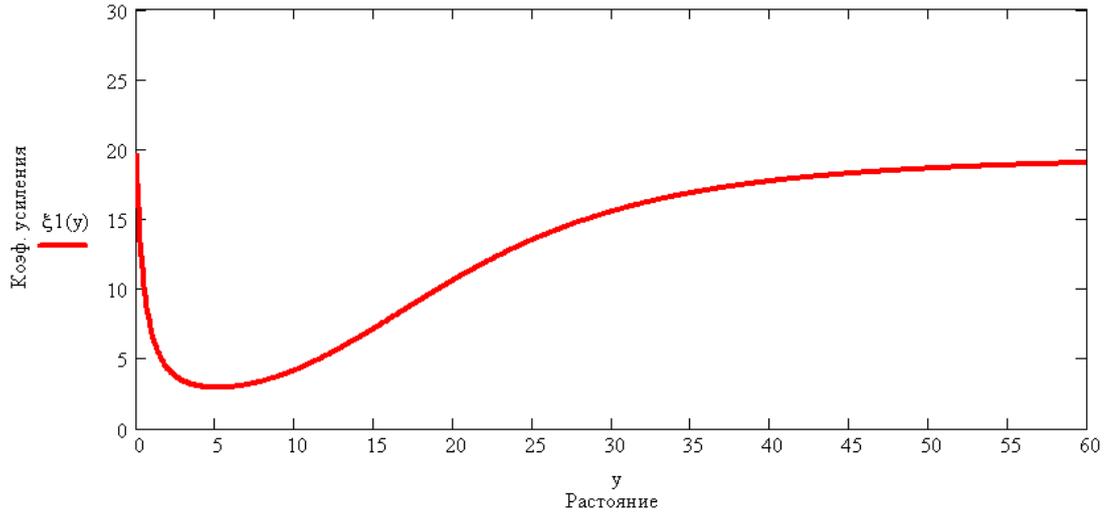


Рис. 1.6. Теоретический вид функции ВАРУ для ДН антенны вида  $\sin(x)/x$  при частном (сферическом) случае Ламбертова рассеяния

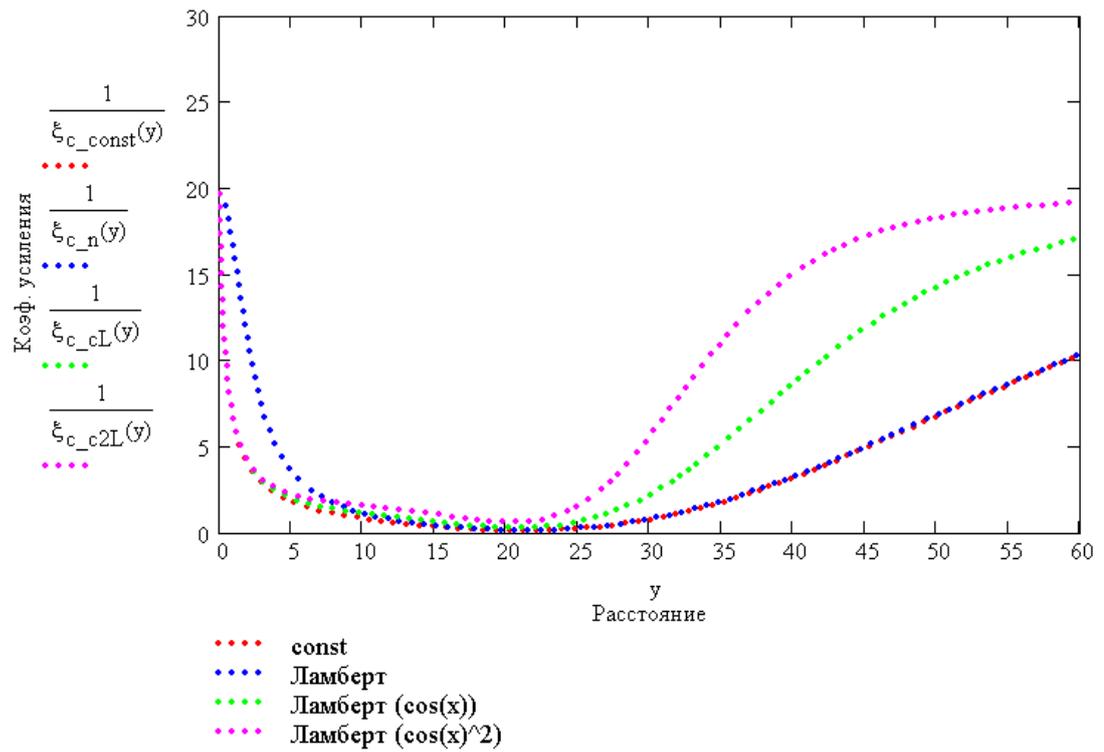


Рис. 1.7. Корректирующие функции для ДН антенны вида  $\cos(x)$  при различных подстилающих поверхностях

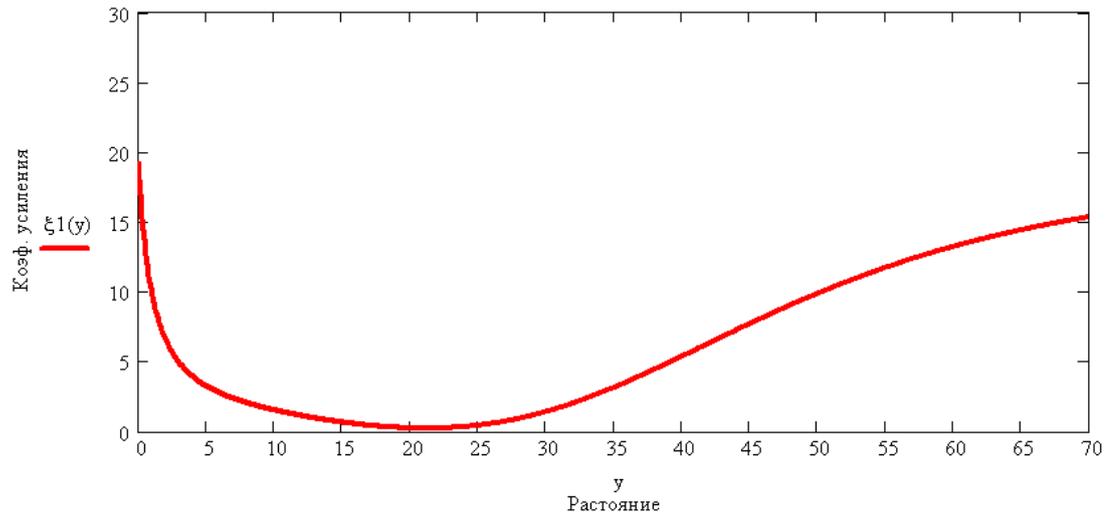


Рис. 1.8. Теоретический вид корректирующей функции для ДН антенны вида  $\text{cosec}(x)$  при частном (сферическом) случае Ламбертова рассеяния

## **Глава 2 Исследование путей разработки платы управления временной автоматической регулировкой усиления**

### **2.1 Обоснование элементной базы**

Согласно техническому заданию плата временной автоматической регулировки должна формировать выходной аналоговый сигнал в диапазоне от 0.1 до 0.9 Вольт. Следовательно, выходные каскады платы временной автоматической регулировки должны быть разработаны на аналоговых элементах. При реализации функции ВАРУ на аналоговых элементах схема прибора зависела бы от вида функций ВАРУ, поэтому при необходимости изменения функций временной автоматической регулировки усиления требовалось бы заменить всю аналоговую часть [4, 5].

Создание платы временной автоматической регулировки усиления с использованием цифроаналогового преобразователя и микропроцессорной элементной базы позволяет, не изменяя схему усилителя, изменять вид функций ВАРУ. Для этого нет необходимости демонтажа всего блока; нужно подключиться к выводам микросхемы, подведенным к лицевой панели, и перепрограммировать микропроцессор, что занимает не больше минуты. Флеш память микропроцессора поддерживает перезапись до 10000 раз, а новейшие технологии в области микропроцессорных сборок позволяют производить перезапись до сотни тысяч раз. Кроме того, объем памяти микропроцессора позволяет запомнить несколько функций ВАРУ, и выбирать необходимую по командам оператора. Предусмотрена возможность динамической загрузки функций временной автоматической регулировки усиления, что может понадобиться в случае изменения режима полета.

Работа системы внутренней калибровки основана на анализе пилот-сигнала (ПС), представляющего собой ЛЧМ сигнал. Формирователь частот сигналов (ФЧС) генерирует пилот-сигнал в определенные моменты времени, который транслируется в приемный тракт от циркулятора до системы обработки информации, имитируя тем самым данные поступающие на РЛС. Пройденный через приемный тракт сигнал поступает на систему обработки, где сжимается и анализируется. В идеальном случае сигнал должен соответствовать заданному по длительности и амплитуде. В том случае если сжатый сигнал «развалился» по длительности импульса, то приемный тракт внес недопустимые искажения, произошел отказ аппаратуры и дальнейшая работа невозможна. Если сжатый пилот-сигнал

отличен по мощности от нормированного значения, то требуется изменить усиление приемника.

Домножение функции ВАРУ на коэффициент нормировки, полученный на основе анализа ПС пройденного через приемный тракт, учет мощностные искажения приемного тракта, что, несомненно, улучшит качество РЛИ. Записываем новую функцию ВАРУ и таким образом корректируем искажения приемного тракта.

Расширяя систему большим числом учитываемых коэффициентов, можно корректировать различные факторы, влияющие на качество радиолокационной информации. Например, учитывать температурный дрейф коэффициента усиления приемника, температурный дрейф коэффициента усиления передатчика и пр.

## **2.2 Элементная база**

На сегодняшний день на рынке существует довольно много микроконтроллеров которые можно применять для решения задачи управления ВАРУ, в частности микроконтроллеры семейства MCS-51, AVR, сигнальные микропроцессоры типа AD2181, микроконтроллеры с ядром ARM. MCS-51 и AVR – 8-разрядные микроконтроллеры, третье семейство представляет собой 16-разрядные микроконтроллер, четвертое семейство представляет собой 32-разрядные контроллер. С точки зрения экономической целесообразности разумно использовать 8-разрядные микроконтроллеры, которые вполне достаточны для выполнения поставленной задачи.

В настоящее время широкое применение приобретают программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), но в данном случае использование такой элементной базы будет экономически нецелесообразным

ATmega128 – маломощный 8-разрядный КМОП микроконтроллер, основанный на расширенной AVR RISC-архитектуре [6]. За счет выполнения большинства инструкций за один машинный цикл ATmega128 достигает производительности 1 млн. операций в секунду/МГц, что позволяет проектировщикам систем оптимизировать соотношение энергопотребления и быстродействия. Большинство команд выполняются за один машинный такт с одновременным исполнением текущей и выборкой следующей команды, что обеспечивает производительность до 1 MIPS на каждый МГц тактовой частоты.

## **Глава 3 Разработка прибора управления временной автоматической регулировкой усиления**

### **3.1 Принципиальная схема**

Плата временной автоматической регулировки работает по специальной функции для каждого из режимов работы. Выбор функции определяется специальным кодом передаваемым по выводам RXD и TXD.

После того как параметры работы микропроцессора будут определены, подается импульс общего запуска. Микропроцессор переходит из режима ожидания (опроса портов), в режим передачи функции на вход цифроаналогового преобразователя.

Код одного отсчета выбранной функции УВАРУ устанавливается на вход данных цифроаналогового преобразователя в параллельном коде. На выходе ЦАП возникает сигнал, значения тока которого пропорционально записанному значению функции ВАРУ. На выходе операционного усилителя возникает напряжение пропорциональное выходному току ЦАП.

Операционный усилитель на выходе ЦАП представляет собой преобразователь выходных токов в аналоговое напряжение в диапазоне от 0,1 до 0,9 Вольт.

Интегрирующий низкочастотный RC фильтр, осуществляет сглаживание выходного напряжения, которое имеет ступенчатый вид. Развязка выходного сигнала необходима для проверки микросхемы во время работы.

В системе автоматизированного проектирования P-CAD 2002 разрабатывалась схема электрическая принципиальная и монтаж печатной платы [7]. Элементная база располагается в библиотеке элементов. Имеется возможность создавать элементы, редактировать, подгружать множество библиотек одновременно.

Для редактирования или создания нового элемента потребуется программа Symbol Editor входящая в состав программного обеспечения P – CAD 2002. При использовании иностранной элементной базы необходимо учитывать российские ГОСТ, которые могут быть не идентичны.

### 3.2 Расчет надежности и теплового режима

Для вычисления надежности воспользуемся программой АСОНИКА-К. Для расчета надежности резисторов (рис. 3.1) необходимо ввести номинал сопротивления, мощность рассеяния и напряжение [8]. Все остальные данные входящие в формулу находятся в базе данных элементов, либо рассчитываются автоматически.

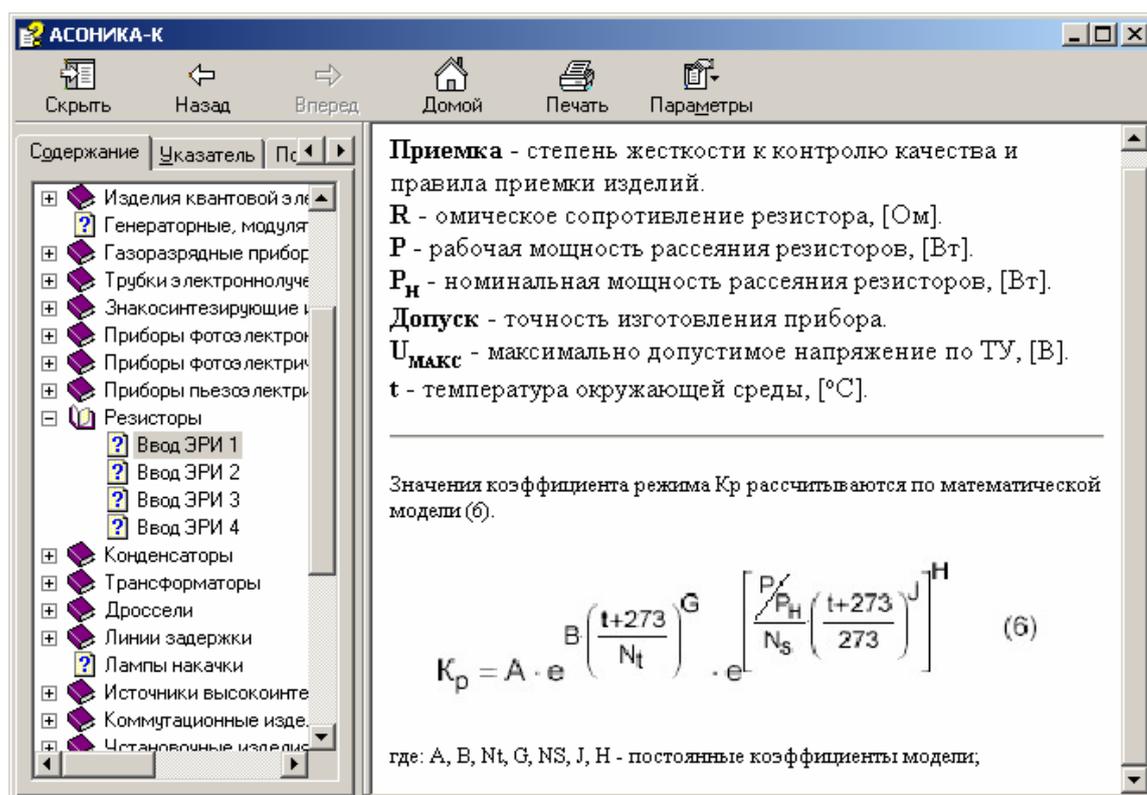


Рис. 3.1. Окно помощи программы АСОНИКА-К

Результаты произведенного расчета предоставлены в таблице 3.1. На рисунке 3.2 в графическом виде представлен вклад в надежность устройства в целом его отдельными элементами.

Тепловой режим для платы УВАРУ также рассчитывается в среде программы АСОНИКА-К. Результаты расчета представлены в таблице 3.2 и на рисунке 3.3

Эксплуатационная надежность изделия составляет  $\lambda = 1,38 \cdot 10^{-6}$ .

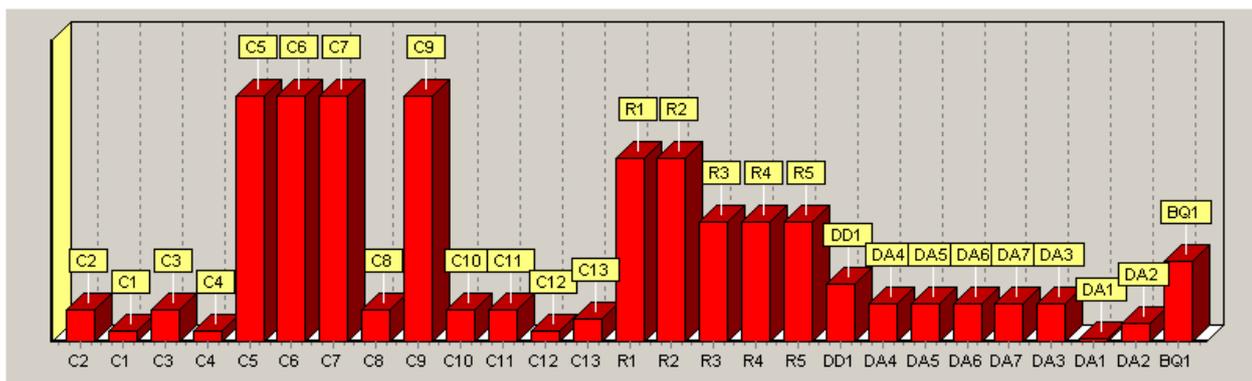


Рис. 3.2. Диаграмма вклада отдельного элемента в надежность устройства

Таблица 3.1.

Наименование компонента	Дец. номер / Тип изделия	Эксплуатационная интенсивность отказов
C1	K10-17	6,69E-9
C2	K10-17	1,9E-8
C3	K10-17	1,9E-8
C4	K10-17	6,69E-9
C5	K53-22	1,49E-7
C6	K53-22	1,49E-7
C7	K53-22	1,49E-7
C8	K10-17	1,9E-8
C9	K53-22	1,49E-7
C10	K10-17	1,9E-8
C11	K10-17	1,9E-8
C12	K10-17	6,69E-9
C13	K10-17	1,34E-8
R1	P1-12	1,11E-7
R2	P1-12	1,11E-7
R3	P1-12	7,3E-8
R4	P1-12	7,3E-8
R5	P1-12	7,3E-8

Продолжение таблицы 3.1

DD1	ATMEGA128	3,54E-8
DA1	ADR380	1,7E-9
DA2	AD5445	1,07E-8
DA3	AD8051	2,33E-8
DA4	AD8051	2,33E-8
DA5	AD8051	2,33E-8
DA6	AD8051	2,33E-8
DA7	AD8051	2,33E-8
BQ1	PK386	4,86E-8

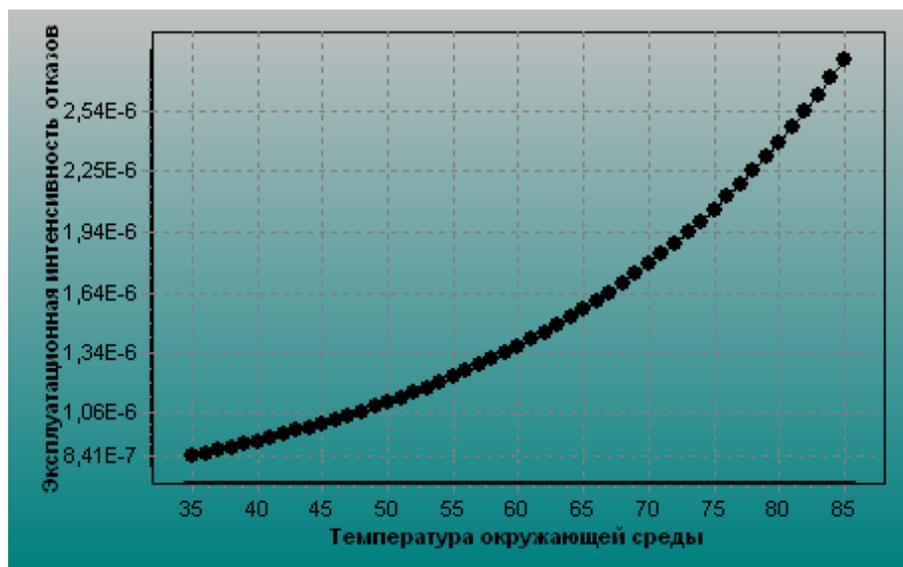


Рис.3.3. Зависимость надежности устройства от температуры окружающей среды

Таблица 3.2.

Температура	Эксплуатационная интенсивность отказов
40	9,14560132514453E-7
45	1,00151373771951E-6
50	1,10550729459646E-6
55	1,23048266686965E-6

Продолжение таблицы 3.2.

60	1,3813597661283E-6
65	1,5642719972675E-6
70	1,78686298113462E-6
75	2,05864807867329E-6
80	2,3193583729153E-6

## Глава 4 Макро- и микропрограммное обеспечение

Прибор УВАРУ работает под управлением программы, хранящейся во внутренней памяти микроконтроллера. Также, в памяти микроконтроллера находятся таблица функций ВАРУ. Для записи функций ВАРУ в память микроконтроллера было разработано специализированное программное обеспечение.

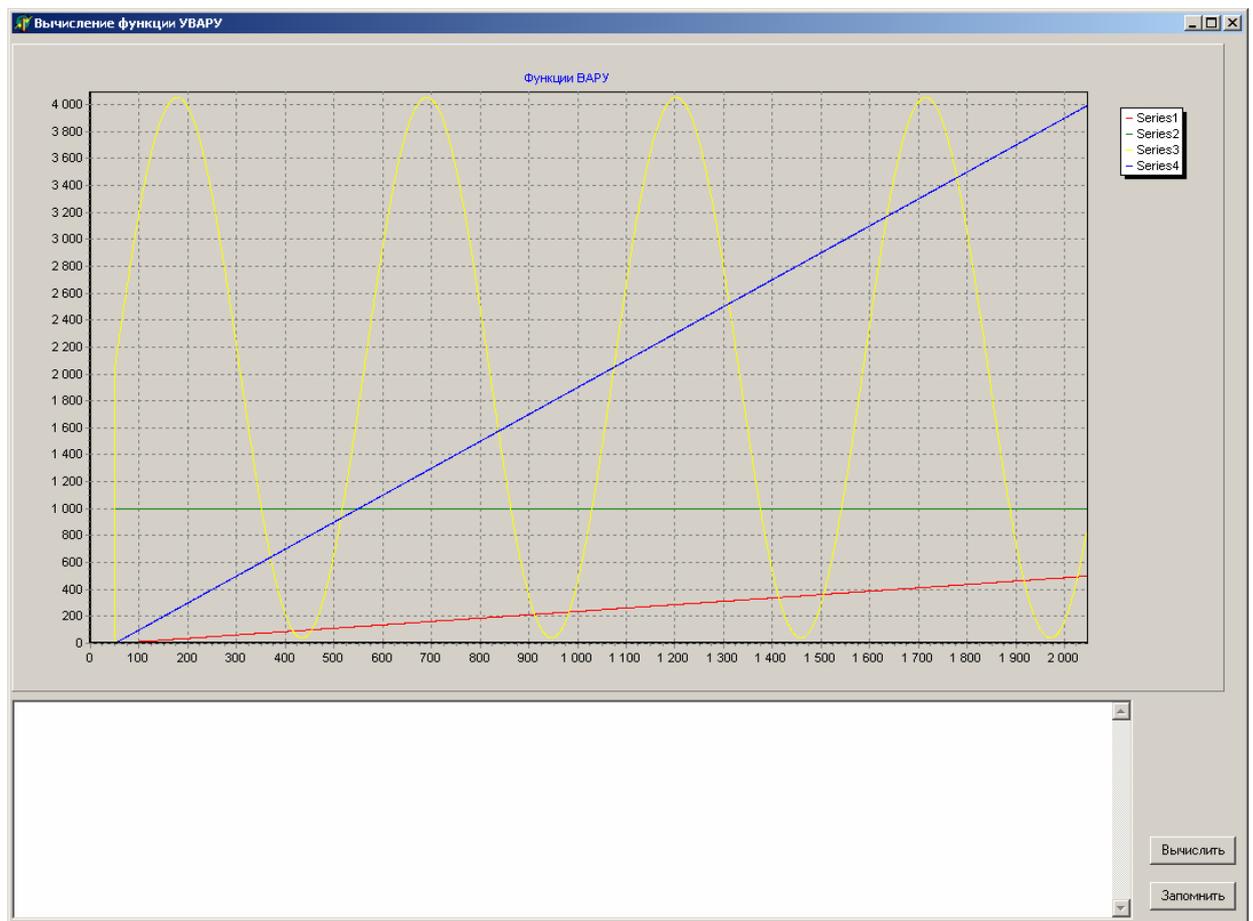


Рис. 4.1. Программная среда записи функций ВАРУ

Функции ВАРУ для записи в микроконтроллер описываются математической формулой. Программа строит график и присваивает значению напряжения цифровые коды, которые и будут записаны в постоянную память микроконтроллера. На рисунке 4.1 изображены тестовые функции, записанные в микроконтроллер в ходе наладки.

Разработка программного обеспечения для микроконтроллера а также его отладка с внутрисхемной эмуляцией производится в среде AVR Studio производства фирмы ATMEL.

## Глава 5 Организационно-экономическая часть

Проектируемое изделие ориентировано прежде всего на оборонные и исследовательские нужды. Россия является одной из ведущих стран мира в области проектирования и изготовления подобных систем. Для изготовления комплекса будут использованы как отечественные компоненты, так и зарубежная микропроцессорная элементная база.

Стоит отметить, что основная проблема по производству специальной техники (к которой относится и проектируемое устройство) заключается в том, что спрос на нее (в отличие от товаров широкого потребления), невелик и, как правило, определяется государственным заказом. Однако, без новых научных разработок, а главное, без практической реализации новых идей, без выпуска новых образцов техники не мыслим научно-технический прогресс человечества.

Разработка устройства ВАРУ позволит осуществить модернизацию существующих бортовых радиоэлектронных комплексов, а это, в свою очередь, позволит улучшить массогабаритные и тактико-технические параметры бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

Проектируемый прибор должен быть установлен в состав радиопередатчика синтезированной апертуры на борту самолета для решения широкого круга задач специального назначения (использование в военных и научных целях), а также для выполнения задач народного хозяйства (зондирование почвы, и т.п.).

## **Заключение**

В результате проделанной работы, можно сделать следующие выводы:

- наличие ВАРУ позволяет значительно улучшить качество изображений РСА;
- для построения системы ВАРУ целесообразно применение цифровой обработки;
- функции ВАРУ существенно зависят от типа подстилающей поверхности, поэтому целесообразно вычисление функций ВАРУ на борту в процессе работы комплекса с последующей их динамической загрузкой;
- возможно вносить корректирующие коэффициенты учитывающие нестабильности параметров различных по анализу ПС.

## Библиографический список

- [1] Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005.
- [2] Теоретические основы радиолокации. Под ред. В. Е. Дулевича, М., 1964.
- [3] Теоретические основы радиолокации. Под ред. Я. Д. Ширмана, М., 1970.
- [4] Алексеенко А.Г., Галицин А.А., Иванников А.Д. “Проектирование радиоэлектронной аппаратуры на микропроцессорах” М.: Радио и связь, 1987.
- [5] Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники - М.: «Мир», 1993.
- [6] Голубцов М.С., Кириченкова А.В. Микроконтроллеры AVR от простого к сложному - серия Библиотека инженера - М.: «Солон-пресс» 2004.
- [7] Стешечко В.Б. ACCEL EDA технология проектирования печатных плат - М.: «Нолидж» 2000.
- [8] Единый справочник. Надежность электрорадиоизделий - М.: «Электронстандарт», 1992.

## Сведения об авторе

Ивенков Илья Игоревич, инженер, ОАО «Концерн радиостроения «ВЕГА»,  
[2499427@mail.ru](mailto:2499427@mail.ru), (499) 249-94-27, 121170 г. Москва, Кутузовский пр-т, д. 34