Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Направление: 010801.65 – радиофизика и электроника

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Дипломная работа)

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ УСИЛЕНИЯ АНТЕНН МЕТОДОМ СПЛАЙН АППРОКСИМАЦИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕТЕОРНЫХ РАДИОСИСТЕМ

Работа завершена:

«___»_____ 2015 г. _____ (В.В.Романов)

Работа допущена к защите:

Научный руководитель
«___»_____ 2015 г. _____ (С.Н.Терешин)

Заведующий кафедрой

«___»_____ 2015г. _____ (М.Н.Овчинников)

Казань-2015

Содержание

Введение 3
Глава 1. Метеорные радиосистемы и их компьютерное моделирование 5
1.1. Развитие систем 5
1.2. Принцип работы 7
1.3. Преимущества и недостатки метеорной радиосвязи 10
1.4. Моделирование метеорных радиосистем 13
1.5. Характеристики отражающей области 16
Глава 2. Антенны и их программное моделирование 18
MMANA-GAL 18
Глава 3. Аппроксимация функций 24
3.1. Сплайн-аппроксимация 33
3.2. Типы сплайнов 41
3.3. Двухмерная сплайн-интерполяция 44
Глава 4. Программное моделирование вычисления КНД антенны методом сплайн аппроксимации 48
Заключение 53
Список литературы 54
Приложение А 56
Приложение В 60

Введение

При проектировании и использовании сложных радиосистем существенной задачей является оптимизация комплекса их параметров с целью соответствия свойствам используемойсреды распространения и критериям эффективности.

После создания системы исследования можнопроводить экспериментально на действующем объекте,но для получения достоверных результатов эксперимент необходимо проводить длительное время,что требует значительных финансовых затрат.

Другим методом определения параметров системы является использования математических моделей, реализованных в виде пакета программ на компьютере. Это позволяет достичь значительной гибкости и реализовать на модели условия, которые вызвало бы непреодолимые трудности при эксперименте.

На данный момент существуют достаточное количество компьютерных моделей для определения параметров системы, которые требуют усовершенствования и внедрения новых алгоритмов и методик.

Целью дипломной работы является создание программы, которая методом сплайн аппроксимациивычисляет значения КНД антенныи демонстрирует диаграмму направленности, используятаблично заданные данные, экспериментальные или смоделированные другими программами.

Поставленные задачи:

1. Изучить особенности метеорных радиосистем и их моделирования.
2. Ознакомиться с использованием программы MMANA-GAL, с форматом её выходных таблиц.
3. Изучить алгоритм аппроксимации функций двух аргументов по табличным данным кубическим сплайном.
4. Освоить систему программирования Lazarus и используя её создать программуSplineDNA,которая методом сплайн аппроксимации вычисляет значения КНД антенны.

Глава 1. Метеорные радиосистемы и их компьютерное моделирование

1.1. Развитие систем

Ежедневно в атмосферу Земли от мельчайшей космической пыли и кончая крупнейшими телами, проникают множество частиц из космического пространства.

График зависимости числа частиц, проникающих в атмосферу, от массы приведен на рис.1.

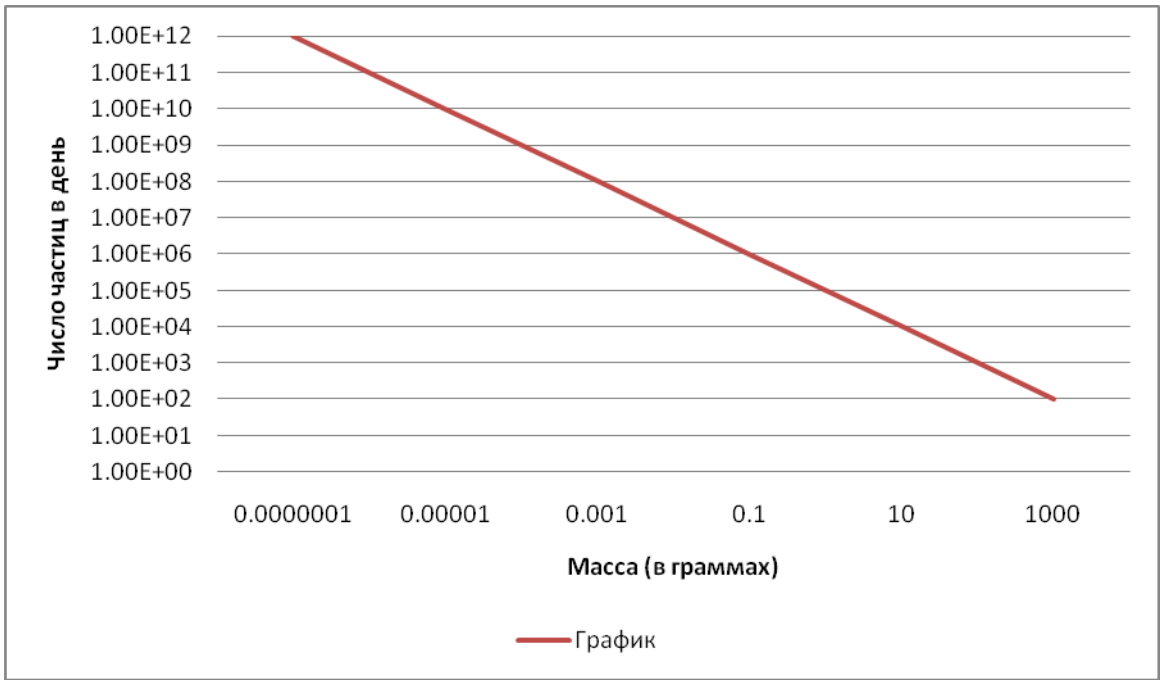


Рис.1

Известно, что источниками метеорных частиц могут быть более ста тысяч объектов в Солнечной системе.

Сгоревшая частица в атмосфере, образует за собой столб ионизованного газа, который называется «метеорный след» [14].

Поперечные размеры метеорного следа составляет несколько метров, а продольные размеры достигают несколько километров.

Из-за диффузий и влияния ветра метеорный след разрушается, приводя к быстрому спаду уровня метеорного радиосигнала. Однако если величина ионизации достаточно, то след может быть использован для отражения радиоволн и организации пакетной радиосвязи.

Наиболее эффективный диапазон частот для метеорной связи это 30-70МГц. Дальность связи, обеспечиваемая благодаря метеорному распространению радиоволн, простирается практически от 0 до2200 км. Таким образом, метеорный канал может послужить основой для организации надежный и экономически эффективных систем связи широкого применения.

1.2. Принцип работы

Для осуществления радиосвязи через метеорный канал необходимо, что бы диаграммы антенн приёмника и передатчика перекрывались, и в области перекрытия существовало достаточное количество метеорных следов, удовлетворяющих условию зеркального отражения рис.2

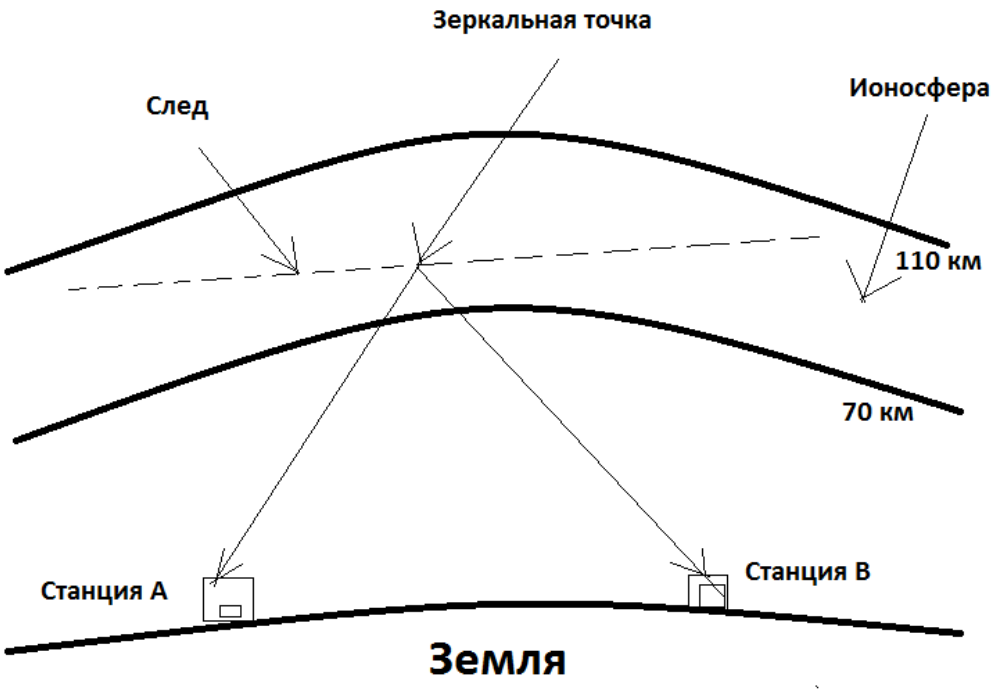


Рис.2

Для установления связи необходимо обнаружить существования пригодного метеорного следа в области перекрытия антенн.

Для этого одна из станций (центральный или Master–station) постоянно излучает в эфир зондирующий сигнал известный формы и амплитуды. Другая станция (периферийная или Remote-station), приняв этот сигнал, передает обратно сигнал, подтверждающий возможности коммуникации.

Если центральная станция примет этот сигнал, то станции входят состояние соединения и обмениваются пакетами данных до тех пор, пока существует след. Если за время сеанса связи на одном метеорном следе не вся информация окажется переданной, то станции вновь входят в режим ожидания пригодного метеорного следа.

В силу относительной редкости пригодных метеорных следов, рабочий цикл (отношения времени работы системы на передачу информации к общему времени работы системы) как правило, составляет от 1% до 5%.

Метеорная радиосвязь обеспечивает автоматическое временное уплотнение большого числа радиосигналов, в результате чего их глушения или перехват становиться чрезвычайно трудным делом. Компактные и универсальные системы метеорной связи, в которых для формирования информационных пакетов, буферизации и исправления ошибок используются средствам вычислительной техники, делают возможным создание большого числа прикладных систем передачи и сбора данных.

Припередачи информации через метеорный радиоканал используются два комплекта приёмо-передающей аппаратуры, располагающихся на концахметеорной радиолинии на рисунке 2.

Управляющей компьютер работает с накопителем информации. Информация может поступать через модем, подключенной телефонной сети, либо к локальной компьютерной сети. Информация так же может быть введена с помощью клавиатуры. Правильность набора информации, а также технические режимы работы отдельных блоков радиосистемы могут контролироваться оператором системы через дисплей. Внешняя память может быть подключена к управляющему компьютеру, если необходимо принимать и хранить большие объёмы информации. Чаще, для вывода информации

используются принтер, либо информация передается на внешние устройства через модем.

Передаваемая информация через накопитель кодируется на кодере, образуя так называемый видеосигнал. Модулятор видеосигнал преобразует в радиосигналах, который усиливается передатчиком. В метеорных радиосистемах обычно используется совмещенная.

1.3. Преимущества и недостатки метеорной радиосвязи.

Отражение метровых радиоволн от метеорных следов было обнаружено около 80 лет назад. Первые публикации, посвящённые практическому применению этого явления в астрономии и для передачи информации, появились в 50- начале 60-х годов прошлого века.

Метеорная радиосвязь более 40 лет была объектом исследования и разработок ученых Казанского университета. Этот вид радиосвязи не требует спутников для распространения на большие расстояния(до 2000км) и в то же время почти не зависит от состояния ионосферы в отличие от коротковолновой радиосвязи.Однако этот вид радиосвязи в последние годы в силу малой пропускной способности был сильно потеснен спутниковой радиосвязью и развитие мощный наземных оптоволоконных коммуникаций. Однако есть области, в которых особенности метеорный радиосвязи оказываются очень привлекательными.

О спутниковой и сотовой связи знают все, даже не специалисты в области радиосвязи о существовании метеорной связи известной лишь не большому кругу специалистов.

За счет отражения радиоволн от метеорных следов на короткое время может возникать канал связи, позволяющий предать информацию на расстояние до 2000км. Основной кажущейся недостаток метеорной связи- это ее прерывистость. Действительно, метеорный радиоканал возникает случайным образом и имеет случайное время существование. При более глубоком ознакомлении с принципами работы метеорных систем связи становятся понятным, что сама по себе прерывистость не является существенным недостатком- достаточно вспомнить что передача данных цифровых сетях с коммутацией пакетов так же является прерывистой. Прерывистость всего лишь

накладывает некоторые ограничения на вид передаваемых данных. В то же время серьезным ограничивающим фактором в работе метеорных систем следует отнести среднюю пропускную способность канала.

Действительно несколько десятков или сотен бит в секунду в сравнении с миллионами бит в секунду, которые передаются по оптоволоконным или спутниковым каналам связи, представляются слишком малой и не серьезной величиной, так что может возникнуть вопрос: а нужен ли вообще такой канал связи? Нужно ли затрачивать время и усилия на его исследование и совершенствование?

Ответов и возражений можно привести несколько.

Во-первых, если например, рассмотреть абонентскую телефонную линию, то она, будучи занятой, около 15 минут в сутки, так же имеет среднюю пропускную способность в несколько сотен бит в секунду. Однако не кто не сомневается в необходимости самих абонентских линий и в целесообразности совершенствования их состояния и повышения качества их работы. И несмотря на развития радиовещания во втором метровом диапазоне (боле известного как FM),остается радиовещание на гектометровых и декаметровых волнах (традиционные обозначения ДВ,СВ,КВ).Точно так же, развитие спутникового и кабельного телевидения не влечет за собой прекращения вещания на метровых волнах.

Во-вторых, метеорная связь была и остается связью для специфических, экстремальных условий и чрезвычайных ситуаций. Она не была и не будет конкурентом традиционным и современным системам связи, таким как проводная, сотовая, спутниковая. Кроме того, нельзя забывать, что многие из названных систем достаточно уязвимы для природных или иных вмешательств в их работу; метеорная связь в этом отношении значительно более устойчива.

В-третьих, метеорный канал - один из не многих естественных каналов связи, который обладает уникальной способностью-взаимностью. Время распространения радиоволн в прямом и обратном направлении равно. Это дает возможность строить на его основе системы синхронизации шкал времени, которая по своим точным характеристикам превосходит спутниковую систему и не зависят от спутников, а так же совместные систем связи и синхронизации. Это одно из наиболее важных и интересных применений метеорных связи.

Обзор научных материалов показывает, что метеорная связь по-прежнему используется, производится, устанавливается и усовершенствуетсяаппаратура. Продолжаются исследования по оптимизации использования метеорного канала связи.

Кроме того, при исследовании метеорного канала связи, как и при всяком научном исследовании, всегда существует вероятность обнаружить, что-либо новое, пусть в данный момент практически не применяемое.

1.4. Моделирование метеорных радиосистем

Исследования характеристик системы метеорной связи представляет собой достаточно сложную задачу. Средняя скорость передачи информации W, численность метеорных отражений N и другие информационные характеристики зависят как от большого числа технических характеристик (параметров приемопередающей аппаратуры и антенных систем), а так же имеют значительные вариации, определяющиеся астрономическими факторами, которые зависят от времени и сезона проведения эксперимента. Ввиду сложности и трудоемкости натурного эксперимента вряд ли когда-либо такое исследование будет проведено в полном объеме в натурном эксперименте. Наиболее перспективным путем развития подобных исследований представляется имитационное моделирование на математической модели метеорного радиоканала (МРК), которая должна быть откалибрована на основе сравнения с экспериментальными данными.

Суть имитационного подхода в приложении к модели метеорного радиоканала может продемонстрировать следующей функциональной цепочкой: Радиант (точка на небесной сфере). Траектория метеора - Метеорный след - Метеорный радиосигнал. Приток метеорного вещества определяется на основе таблиц распространения радиоволн спорадических метеоров, экспериментально полученных на радио полигонах КГУ.

Пример описание имитационной модели « КАМЕТ»

Программа предназначена для расчёта:

- Основных характеристик МРК численности и коэффициента заполнения для данного часа суток работы радиосистемы.

- Характеристик линии метеорной связи при конкретных параметрах аппаратуры.

Расчёты можно проводить для метеорных радиолиний, развернутых в северном полушарии и ориентируемых произвольным образом (возможная длинна трассы от 0 до 2200 км), для произвольного месяца и для любого часа радиосвязи.

Ввод данных осуществляется в диалоговом режиме. Входные данные разделяются на четыре основные группы.

Астрономические и географические параметры:

- Дата (в программе заложены таблицы распределения плотности радиантов спорадических метеоров для каждого месяца);
- Местное время проведения эксперимента;
- Географические координаты обоих пунктов (либо координаты центрального пункта, азимут и длина трассы).

Параметры аппаратуры:

- Частота излучения;
- Мощность излучения;
- Эффективная полоса;
- Вид модуляции-ЧТ (частота телеграфия) или ФТ (фазовая телеграфия);
- Вероятность ошибки на 1 бит.

Параметры антенных систем:

В программе реализована возможность расчетов диаграммы направленности вибраторных антенн (типа «волновой канал» горизонтальной и

вертикальной поляризации с учётом диэлектрических свойств подстилающей поверхности).

В программе заложен протокол с остановкой и ожиданием (системы сбора информации «Snotel»), имеющий следующие форматы:

- форма «Центральная - периферийная»
- формат «Периферийная – центральная»
- формат «Центральная- периферийная (подтверждения)»

Выходная информация представляет собой два блока. В первом блоке для контроля приводятся входные параметры, во втором блоке результаты расчетов:

- часовое число зарегистрированных следов;
- коэффициент заполнения;
- Пропускная способность канала в обоих направлениях.

Программный комплекс функционирует на PC под управлением операционной системы MS-DOS.

Основным способом проверки адекватности компьютерной модели является сопоставление результатов моделирования с данными эксперимента. Компьютерная модель «КАМЕТ» многократно подвергалась тестированию. В методологическом плане представляют интерес результаты тестирования по эксперименту 1992 года.

В первой половине 1992 года на полигоне КГУ и на радиолинии Казань-Москва был проведен цикл экспериментов. Одной из главных задач этого цикла является проверка модели МРК. В случае возможных больших откликаний экспериментальных и модельных результатов предполагалась проведение калибровке модели по этому эксперименту.

1.5. Характеристики отражающей области

Рассмотрим линию метеорной связи длинной L. Под ПОС (потенциальной областью связи) будем рассматривать часть объема ионосферы, ограниченного высотой метеорной зоны и плоскости местного горизонта обоих пунктов линии связи. Оценим размеры ПОС. Вертикальные размеры метеорной зоны ограничены высотами 70-110км, причем 90% всех отражений происходит в диапазоне выстой от 82кмдо 98км (толщина слоя 16км). На горизонтальные размеры ПОС влияние оказывает главным образом расстояние между пунктами приема и передачи. На коротких метеорных радиолиниях (менее 300км) ПОС занимает практически всю небесную сферу, включая области за обоими пунктами приема и передачи. С увеличением длины линии ПОС уменьшается в размерах, локализуясь к центру или несколько вбок от оси линии связи. Влияние местного горизонта сказывается на протяженных линиях связи и ограничивает максимальную дальность метеорной связи расстояние около 2200км.

Весь объем ПОС неодинаково полезен для связи, существует компактная зона- отражающая область, которая может состоять из одного или нескольких участков, расположенных по обе стороны радиолинии, а которой концентрируется большая часть отражающих точек. Размер и координаты отражающей области в силу астрономических факторов, меняются как в течении суток, так и сезона проведения радиосвязи. Такие различия объясняются неравномерностью распределения по небесной сфере радиантов и скоростью метеорных частиц.

Для длинных радиолиний характерный вид и размещение отражающих областей приведено на рис.3.

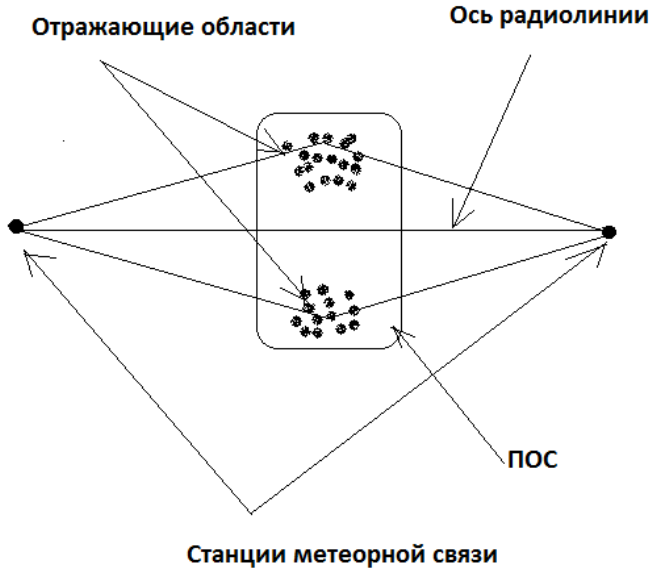


Рис.3. Расположение отражающих областей

В данном случае имеется две отражающие области по сторонам от оси радиолинии. В зависимости от сезона и времени суток одна из них будет вносить более значительный вклад по численности радио отражений. Эффективность метеорной радиосвязи во многом определяется степенью согласования диаграмм антенн радиолинии с размерами и положением в пространстве отражающей областью. Основные требования к диаграммам антенн метеорного радиоканала можно сформулировать следующим образом:

1. Угловые размеры диаграмм антенн должны быть не больше угловых размеров отражающей области.
2. Необходимо стремиться подавить боковые лепестки диаграммы направленности, которые не освещают отражающую область.

Глава 2. Антенны иих программное моделирование MMANA-GAL

В метеорных радиосистемах используется антенные системы, представляющихся из себя системы из нескольких антенн типа «волновой канал».

Антенна "Волновой канал" представляет собой набор элементов: активного - вибратора и пассивных - рефлектора и нескольких директоров, установленных на одной общей стреле.

Внешний вид антенны известен всем, так как большинство городских телевизионных антенн установленных на крышах зданий, являются антеннами «Волновой канал».

При достаточно мощных передатчиках и для радиолиний малой и средней длинны – до 800 км, антенные системы метеорных радиосистем могут быть одиночными. Для того, что бы увеличить КНД (Коэффициент направленного действия) антенной системы используют 2-8 антенн «Волновой канал», в основном однотипные и располагаемые на мачтах в 1-2 этажах друг над другом. Причем в каждом этаже располагается более 2-х антенн «Волновой канал».

В антенных системах для метеорных радиосистем чаще всего используется 5-и элементный волновой канал, который состоит из 5-и элементов: 3-х пассивный и 1-го активного вибратора и рефлектора рис. 4

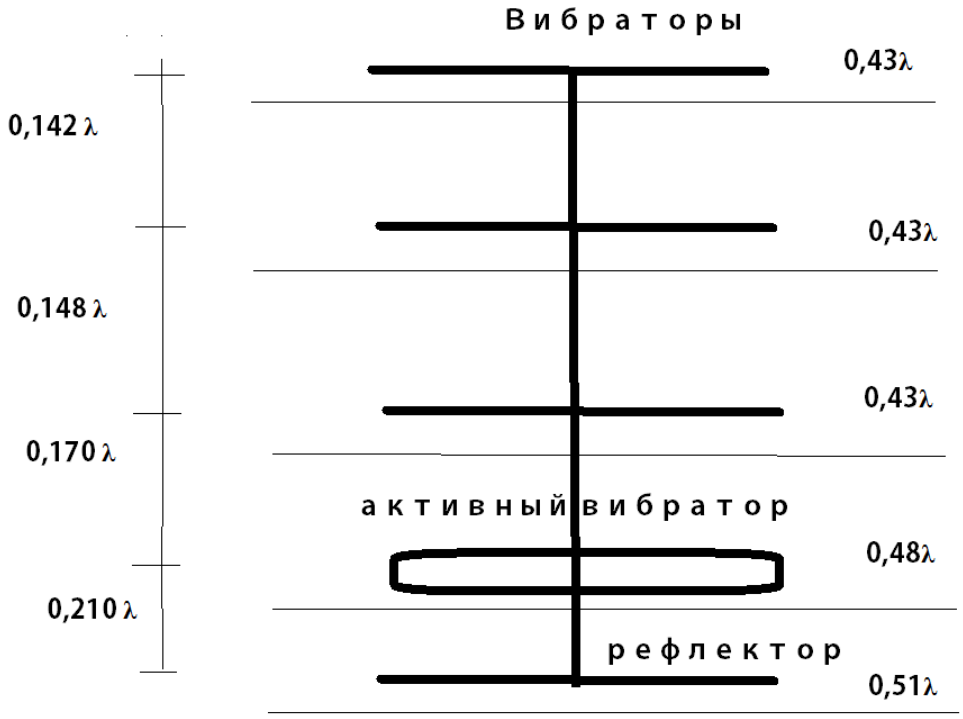


Рис.4 Геометрические размеры антенны 5элементный «волновой канал»

Одной из программ, позволяющей создавать различные модели антенн, является MMANA-GAL.

MMANA-GAL –программа моделирования, расчета и анализа любых антенн. Расчет производится методом моментов, вычислительной основой программы является MININEC3.

Данная программа позволяет комфортно подготавливать данные для расчетов в модифицированном MININEC3 и анализировать полученный результат.

Кроме подготовки-обработки данных MININEC3, MMANA включает в себя множество дополнительных функций, облегчающих жизнь проектировщику антенн.

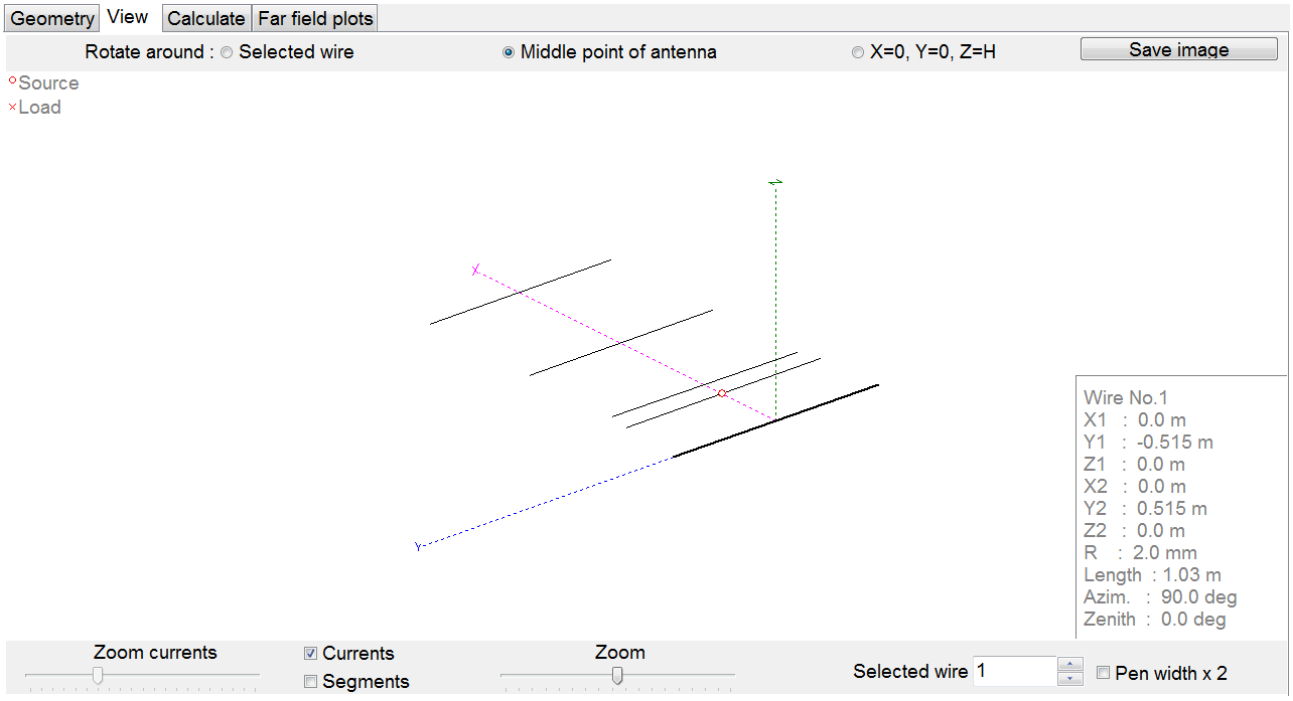
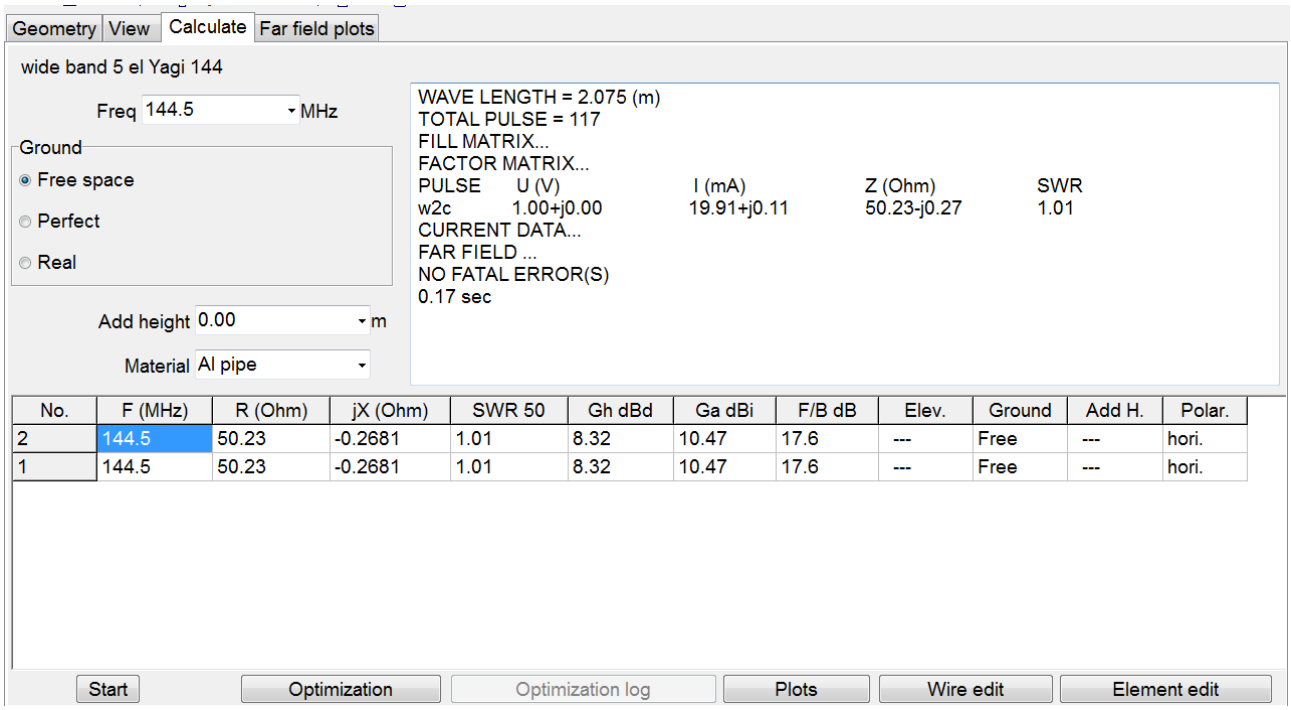


Рис.5



No.	F (MHz)	R (Ohm)	jX (Ohm)	SWR 50	Gh dBd	Ga dBi	F/B dB	Elev.	Ground	Add H.	Polar.
2	144.5	50.23	-0.2681	1.01	8.32	10.47	17.6	---	Free	---	hori.
1	144.5	50.23	-0.2681	1.01	8.32	10.47	17.6	---	Free	---	hori.

Рис.6 Расчет антенны

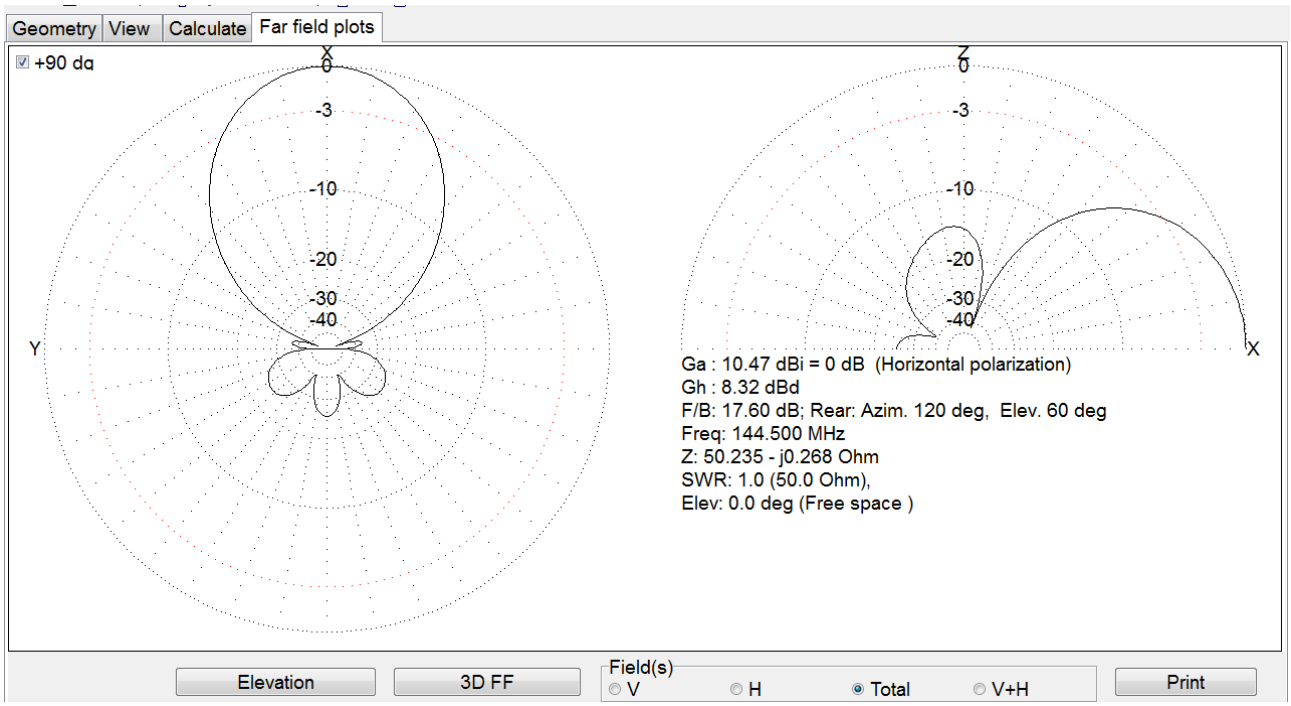


Рис.7 диаграмма направленности

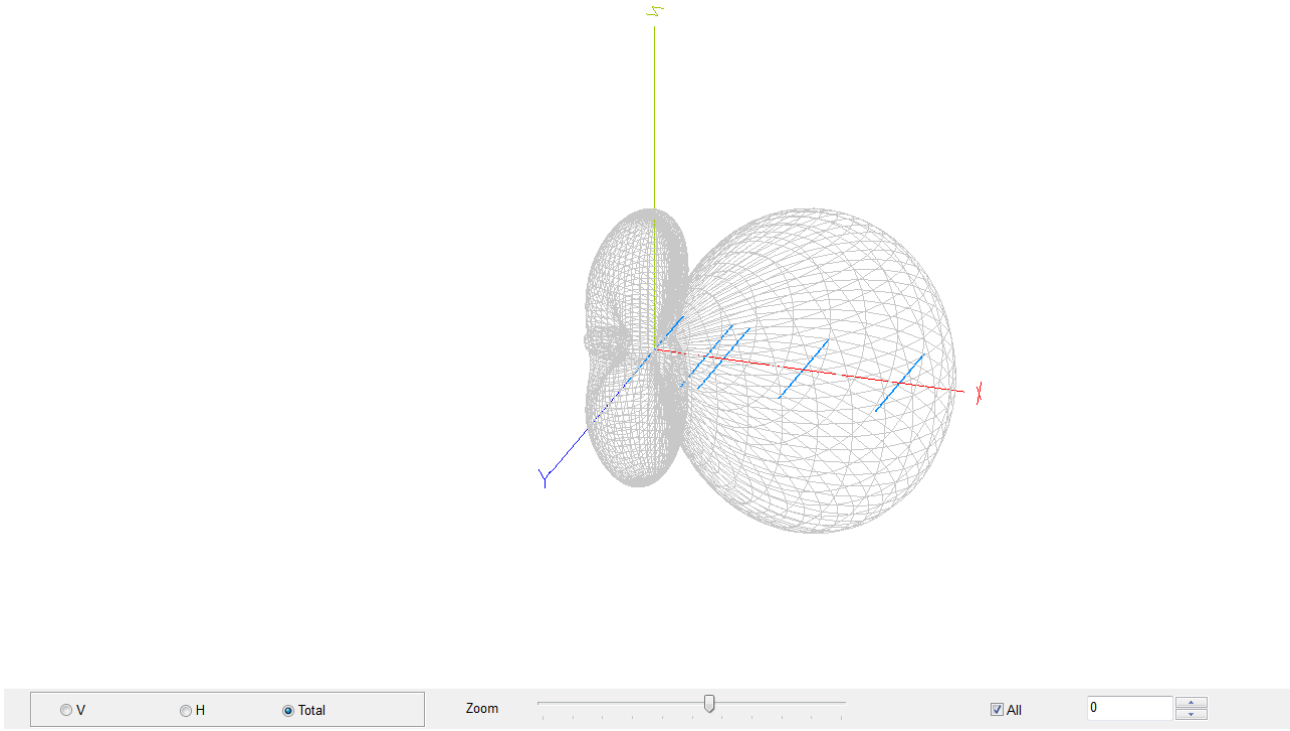


Рис.8 3D рисунок

Полученные данные из MANA-GAL записаны в текстовом формате.

1g-144-5Yagi-p.txt

ZENITH(DEG)		AZIMUTH(DEG)	VERT(dBi)	HORI(dBi)	TOTAL(dBi)
0.0	0.0	-999.00	-1.83	-1.83	
1.0	0.0	-999.00	-1.96	-1.96	
2.0	0.0	-999.00	-2.13	-2.13	
3.0	0.0	-999.00	-2.34	-2.34	
4.0	0.0	-999.00	-2.60	-2.60	
5.0	0.0	-999.00	-2.91	-2.91	
6.0	0.0	-999.00	-3.27	-3.27	
7.0	0.0	-999.00	-3.70	-3.70	
8.0	0.0	-999.00	-4.18	-4.18	
9.0	0.0	-999.00	-4.73	-4.73	
10.0	0.0	-999.00	-5.36	-5.36	
11.0	0.0	-999.00	-6.07	-6.07	
12.0	0.0	-999.00	-6.87	-6.87	
13.0	0.0	-999.00	-7.79	-7.79	
14.0	0.0	-999.00	-8.83	-8.83	
15.0	0.0	-999.00	-10.02	-10.02	
16.0	0.0	-999.00	-11.39	-11.39	
17.0	0.0	-999.00	-12.99	-12.99	
18.0	0.0	-999.00	-14.89	-14.89	
19.0	0.0	-999.00	-17.20	-17.20	
20.0	0.0	-999.00	-20.13	-20.13	
21.0	0.0	-999.00	-24.08	-24.08	
22.0	0.0	-999.00	-30.21	-30.21	
23.0	0.0	-999.00	-40.85	-40.85	
24.0	0.0	-999.00	-33.00	-33.00	
25.0	0.0	-999.00	-28.41	-28.41	
26.0	0.0	-999.00	-26.48	-26.48	
27.0	0.0	-999.00	-26.10	-26.10	
28.0	0.0	-999.00	-27.19	-27.19	
29.0	0.0	-999.00	-30.70	-30.70	
30.0	0.0	-999.00	-45.48	-45.48	
31.0	0.0	-999.00	-30.92	-30.92	
32.0	0.0	-999.00	-22.78	-22.78	
33.0	0.0	-999.00	-17.88	-17.88	
34.0	0.0	-999.00	-14.24	-14.24	

Рис.9 Выходные данные

Глава 3. Аппроксимация функций

На сегодняшний день задача аппроксимации является актуальной темой практически для каждого технического исследования. Количественные характеристики и качественные свойства изучаемых объектов зависитот выбора вида аппроксимации.

Аппроксимация— замена одних математических объектов другими, близкими к исходным. Аппроксимация позволяет исследовать числовые характеристики или качественные свойства объекта, сводя задачу к изучению более простых или удобных объектов (например, таких, характеристики которых легко вычисляются или свойства которых уже известны).

Приближение — то же, что аппроксимация, термин «приближение» используют в смысле приближающего объекта . Приближение функций — нахождение для данной функции f функции g из некоторого определенного класса (например, среди алгебраических многочленов заданной степени), в том или ином смысле близкой к f, дающей ее приближенное представление .

Модель— любой образ какого-либо объекта, процесса или явления («оригинала» данной модели), используемый в качестве его «заместителя, «представителя». Математическая модель — приближенное описание какого-либо класса явлений внешнего мира, выраженное с помощью математической символики. Физическая модель — приближенное описание некоторого объекта или явления с помощью образа, имеющего ту же физическую природу.

Одним из важных этапов изучения явления с помощью его математической модели является выяснение того, удовлетворяет ли принятая гипотетическая модель критерию практики, то есть выяснение вопроса о том, согласуются ли результаты наблюдений с теоретическими следствиями модели

в пределах точности наблюдений. В связи с этим необходима проверка на адекватность (соответствие свойствам реального объекта) данной математической модели, причем точность модели, должна быть больше точности наблюдений (ошибка модели должна быть меньше ошибки наблюдений).

Адекватность — соответствие, верность, точность. Точность измерения — характеристика измерения, отражающая степень близости его результатов к истинному значению измеряемой величины.

Современной литературы по общей теории аппроксимации, к сожалению, практически нет, некоторые разделы аппроксимации излагаются в литературе.

Условно можно разделить на два видааппроксимации:

1) строгая теория математической аппроксимации;

2) физическая (техническая) аппроксимация.

Строгая теория математической аппроксимации включает в себя следующие методы аппроксимации:

1) полиномами (многочленами);

2) сплайнами;

3) отрезками ряда Фурье;

4) полиномами по ортогональным многочленам;

5) собственными функциями краевых задач.

Следует отметить, что А.Н. Колмогоров начал изучение нового вопроса теории приближений — задача о нахождении при фиксированном n такой

системы функций ϕ , …, ϕn , для которой наилучшие приближения функций заданного класса полиномами $\sum a_k \phi_k (x)$ были бы наименьшими (задача о поперечнике класса функций).

k=1

В этом направлении в дальнейшем было выяснено, например, что для ряда важных классов периодических функций наилучшими в указанном смысле системами являются тригонометрические полиномы.

Менее строгая аппроксимация — физическая (техническая) аппроксимация или математическая модель физического явления, процесса (физической модели), технического устройства (его характеристик), сигнала (его параметров), среды, материи и т. п.

Физическая (техническая) аппроксимация включает в себя множество способов аппроксимации и аппроксимирующих функций, выбираемых исходя из конкретно поставленной физической (технической) задачи.

С помощью физической (технической) аппроксимации решается широкий круг задач, актуальных на данный момент времени, связанных с конкретными проблемами и вопросами прикладного (технического) характера. Строгая теория математической аппроксимации строится как фундаментальная, глобальная теория аппроксимации, которая для решения текущих прикладных практических задач может и не пригодиться. Произойдет вследствие либо потери актуальности с течением времени решаемой задачи, либо сложности теории (аппроксимирующей функции), либо большого количества коэффициентов аппроксимации.

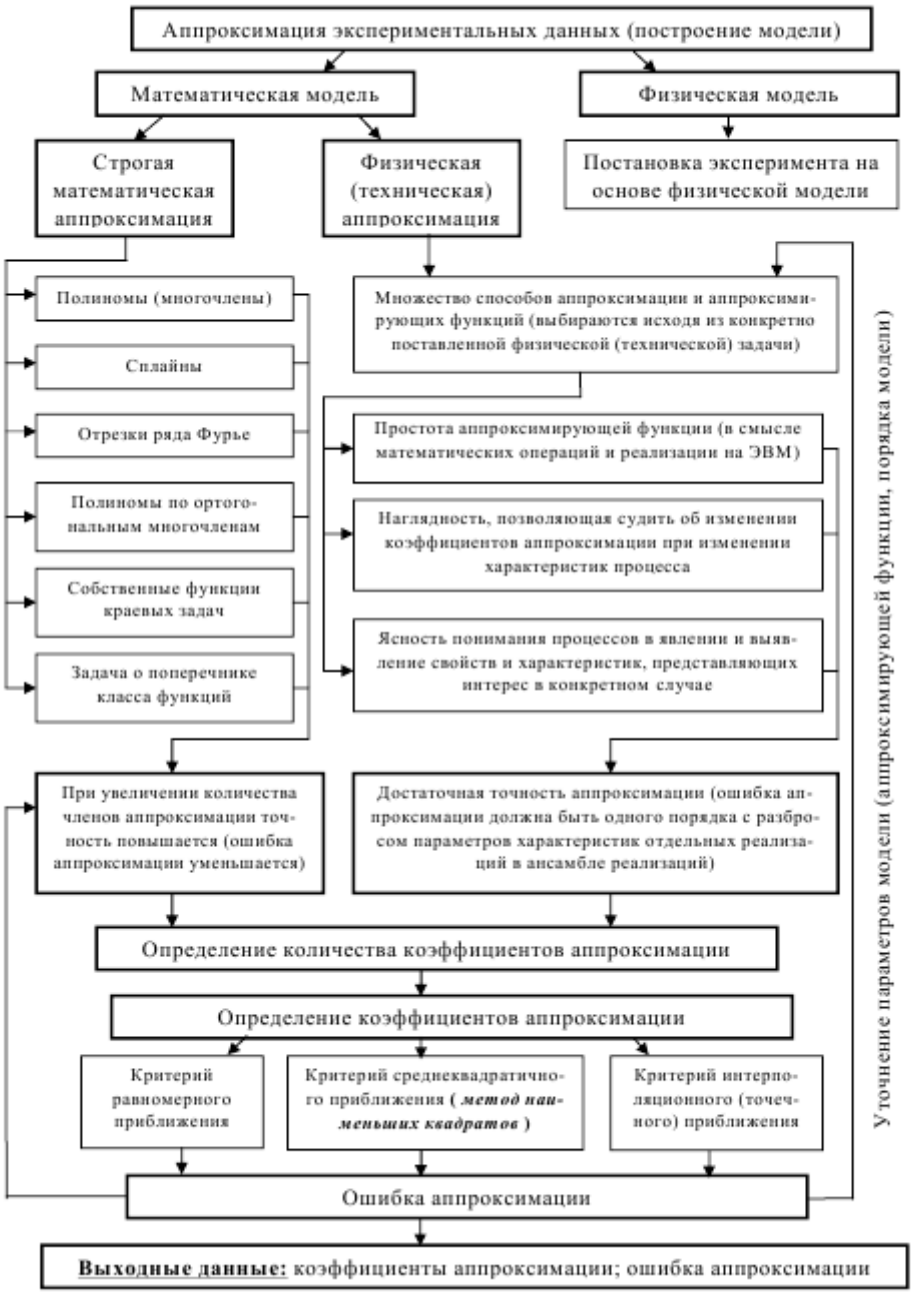


Рис.10 Классификация методов аппроксимации

Классификация методов аппроксимации экспериментальных данных и построения моделей отмеченный выше путь развития физической теории теплового излучения есть не что иное, как метод индукции— один из типов умозаключения и метод исследования — умозаключение от единичных фактов к некоторой гипотезе. Существует и другой метод исследования, это дедукция— один из основных способов рассуждения и методов исследования.

Посылками дедукции являются аксиомы, постулаты или просто гипотезы, имеющие характер общих утверждений («общее»), а концом — следствия из посылок, теоремы («частное»).

Таким образом, условно можно сравнить строгую теорию математической аппроксимации с «общим», а физическую (техническую) аппроксимацию — с «частным».

Приведем очевидные требования, предъявляемые к аппроксимирующей функции для технического вида аппроксимации. Как правило, характеристики многих сложных процессов и явлений получают экспериментально, гораздо реже удается найти их из теоретического анализа. Для изучения процессов, необходимо, прежде всего, отобразить характеристики в математической форме, пригодной для расчетов. Простым и весьма точным способом может явиться представление характеристики в виде таблицы. Этот способ удобен для анализа процессов с помощью ЭВМ, аргумент и функция образуют в запоминающем устройстве двумерный массив чисел. В ряде случаев характеристики реальных процессов и явлений имеют сложный вид и представляются в виде графиков.

Очень часто непосредственное применение экспериментальных данных в форме таблиц или графиков оказывается неудобным, и данные стремятся описать с помощью достаточно простых аналитических соотношений, хотя бы качественно отражающих характер рассматриваемых зависимостей. В данном случае необходимо решить задачу аппроксимации, т. е. заменить сложную функцию (построенную по экспериментальным данным) приближенными аналитическими выражениями. Таким образом, если исследование должно проводиться не численными, а аналитическими методами, то требуется подобрать такую аппроксимирующую функцию,

которая, будучи довольно простой, отражала бы все важнейшие особенности экспериментально снятой характеристики с достаточной степенью точности.

Общая задача аппроксимации включает в себя две самостоятельные задачи:

1) выбор класса подходящей аппроксимирующей функции;

2) определение значений, входящих в аппроксимирующую функцию постоянных коэффициентов (определение коэффициентов аппроксимации).

Выбор класса аппроксимирующей функции. Решая эту задачу, необходимо соблюдать требования, в значительной степени противоречивые:

1) простота функции (в смысле математических операций и реализации на ЭВМ);

2) достаточная точность (ошибка аппроксимации должна быть одного порядка с разбросом параметров характеристик отдельных реализаций в ансамбле реализаций);

3) наглядность, позволяющая судить об изменении коэффициентов аппроксимации при изменении характеристик процесса;

4) ясность понимания процессов в явлении и выявление свойств и характеристик, представляющих интерес в конкретном случае.

Таким образом, функцию, аппроксимирующую какую-либо характеристику, выбирают либо исходя из физических представлений об изучаемом процессе, либо чисто формально, основываясь на внешнем сходстве характеристики с графическим изображением той или иной функции. К аппроксимирующей функции предъявляются противоречивые требования:

обеспечивая хорошее качество приближения, она должна быть относительно простой и удобной для дальнейшего использования .

Наглядным примером может служить способ аппроксимации вольт-амперной характеристики нелинейного двухполюсника в виде показательной (экспоненциальной) аппроксимации. В радиотехнике для аппроксимации характеристик наиболее часто используют следующие функции:

1) степенной полином (степенная или полиномиальная аппроксимация);

2) экспоненциальный полином (частным случаем которого является показательная или экспоненциальная аппроксимация);

3) кусочно-линейная функция (аппроксимация);

4) кусочно-нелинейная функция (аппроксимация);

5) степенная функция;

6) трансцендентные функции (гиперболический тангенс и синус, функция Гаусса,

тригонометрические функции и др.).

Аналитические выражения, аппроксимирующие характеристики процессов, для повышения точности и достоверности анализа должны как можно более точно описывать ход реальных характеристик. Однако повышение точности аппроксимации приводит, как правило, к усложнению аппроксимирующих выражений, что затрудняет как определение значений входящих в эти выражения коэффициентов, так и применение этих выражений для анализа процессов. В связи с тем что характеристики различных реализаций (ансамбля реализаций) процесса отличаются друг от друга за счет

разброса параметров по реализациям и погрешности измерений, нецелесообразно стремиться получить аппроксимирующие выражения, точность которых значительно превышает точность определения отдельных параметров и пределы их разброса по ансамблю реализаций.

Таким образом, при решении задачи аппроксимации так же, как и при решении любой задачи, связанной с выбором расчетной модели, необходимо идти на компромисс между точностью и сложностью модели.

Определение коэффициентов аппроксимации тесно связано с требуемой точностью. Точность определяется критериями приближения, обычно применяют критерии равномерного, среднеквадратичного и интерполяционного (точечного приближений). Если число заданных точек превышает число определяемых коэффициентов аппроксимации, то можно использовать метод наименьших квадратов, при котором среднеквадратичная ошибка минимальна. Метод наименьших квадратов применяется, когда необходима высокая точность аппроксимации, требует громоздких вычислений, но имеет конструктивный подход для аналитического определения коэффициентов модели (аппроксимации) [13].

Метод наименьших квадратов обеспечивает наименьшую сумму квадратов отклонений значений аппроксимирующей функции от значений исходной функции в произвольном числе точек, не связанном с числом неизвестных коэффициентов.

Следует отметить, что точность аналитического представления изучаемого явления будет тем выше, чем точнее модель, описывающая данное явление. Очевидные требования, предъявляемые к выбору модели явления при одинаковой точности модели, — наименьшее количество коэффициентов модели и ее простота, выполнение данных требований

способствует уменьшению систематической ошибки и времени обработки экспериментальных данных.

Таким образом, проведен анализ и классификация методов аппроксимации экспериментальных данных и построения моделей. Конкретизированы и сформулированы требования, предъявляемые к задаче аппроксимации, даны рекомендации необходимые при построении моделей.

Аппроксимация, или приближение — научный метод, состоящий в замене одних объектов другими, в каком-то смысле близкими к исходным объектам, но более простыми.

Аппроксимация позволяет исследовать числовые характеристики и качественные свойства объекта, сводя задачу к изучению более простых или более удобных объектов (например, таких, характеристики которых легко вычисляются или свойства которых уже известны).

3.1. Сплайн-аппроксимация

Свое начало математические сплайны берут от тонких гибких стержней, которыми пользовались чертежники для проведения плавных кривых через заданные точки. Стержень закреплялся в точках (x_i, y_i) и принимал форму кривой $y(x)$ с минимальной "энергией натяжения", пропорциональной $\int (y^n)^2 dx$

Если перейти к математическому описанию сплайна, то *сплайн-функцией* степени k с точками соединения $x_0 < x_1 < \ldots < x_n$ будет функция $y(x)$, которая на отрезке $[x_0, x_n]$ имеет непрерывные производные до $(k$-1)включительно и на каждом из отрезков $[x_{i-}1, x_i]$ равна многочлену степени k. Далее будем рассматривать лишь $k = 3$кубические сплайны. Кубический сплайн обеспечивает совпадение в узлах с исходной функцией и непрерывность первой и второй производных в точках соединения.

Вначале определяются первые производные во всех точках соединения. Затем решаетсятрехдиагональная система $(n$-1) уравнений с доминирующей главной диагональю. Трехдиагональная система может быть решена, если задать два краевых условия. Программыпозволяют задавать четыре типа краевых условий:

1. известны значения первых производных на концах сетки (y_0', y_n'),

2. известны значения вторых производных на концах сетки (y_0'', y_n'');

3. при построении периодического сплайна значения функции в первой и последней точках совпадают, а также $y_0' = y_n{}'$ и $y_0'' = y_n{}''$;

4. если краевые условия не заданы, то считается, что $y_0'' = y_n'' = 0$.

После того как построена трехдиагональная матрица (или дополненная трехдиагональная матрица) и вектор свободных членов, система уравнений может быть решена. Существует эффективный алгоритм для решения такой системы, который в отечественной литературе называется методом прогонки. В результате решения системы уравнений получается вектор первых производны$y_i{}'$в точках соединения.

Значение $y(x)$ для $x_{i-}1$, x , x_i определяется из много-члена$y(x) = a_ix^3+b_ix^2+c_ix+d_i$,коэффициенты которого легко найти, поскольку известны значения функции и первые производные в точках соединения.

Метод позволяет выделить ряд самостоятельных функций:

- формирование трехдиагональной матрицы и вектора свободных членов в соответствии с заданными краевыми условиями – подпрограмма **TDMP**,
- решение системы уравнений, заданных матрицей и вектором свободных членов (метод прогонки) – подпрограмма **TRIDIG**,
- вычисление коэффициентов кубических многочленов для всех отрезков – подпрограмма **SPLINE**,
- вычисление значений сплайна на заданной равномерной сетке – подпрограмма **SPLINT**.

Программа **SPLINE** использует подпрограммы **TDMP** и **TRIDIG**. Данные программы универсальны и их применение не ограничено сплайн аппроксимацией. Их универсальность имеет и более глубокий смысл. В

частности, коэффициенты для кубических парабол можно вычислить, задав вектор производных полностью. Это означает, что программист по своему усмотрению может модифицировать вектор производных. Таким образом можно подбирать подходящую форму кривой.

Программа **SPLINE***(X,Y,U,N,A,B,C,D,KODE,IER)* вычисляет коэффициенты кубического сплайна. Попутно вычисляются значения первых производных в точках соединения. Программа имеет следующие параметры:

X,Y,U– векторы значений аргумента, функции и первых производных (длины *N)*;

N– количество точек;

A,B,C– векторы коэффициентов кубического многочлена при переменных x^3, x^2, x (длины *N*);

D– вектор свободных членов кубического многочлена (длины *N*);

KODE– признак задания краевых условий:

Таблица.1. Признак задания краевых условий

Значение	**Смысл**
-2	на концах сетки заданы вторые производные; перед вызовом программы y_1'' и y_n'' должны быть занесены соответственно в *D* (1) и *D* (*N*),
-1	на концах сетки заданы первые производные; перед вызовом программы y_1' и y_n' должны быть занесены соответственно в *D* (1) и *D* (*N*),
0	краевые условия не заданы, что равносильно $y_0'' = y_n'' = 0$,

1	задан периодический сплайн, т. е. $y_1' = y_n{}'$ и $y_1 = y_n$,
2	вектор значений производных *U* задан полностью;

IER– код ошибки; этот код для программы **SPLINE** является транзитным и передается в том виде, в каком он получен в подпрограмме **TRIDIG**.

Коэффициенты A (I),B (I),C (I)и D (I) соответствуют отрезку от X (I) до X (I+1),I = 1,…,N-1.

Программа **SPLINT***(X,N,A,B,C,D,Y,M)* позволяет вычислить значения кубического сплайна на равномерной сетке с заданным шагом. Параметры программы:

X– вектор значений аргумента (длины *N*);

N– количество точек;

A,B,C– векторы коэффициентов кубического сплайна при переменных x^3, x^2, x (длины *N*);

D– вектор свободных членов кубического сплайна (длины *N*);

*Y*вектор значений кубического сплайна (длины *M*);

*M*количество узлов равномерной сетки на отрезке [*X* (1),*X* (*N*)].

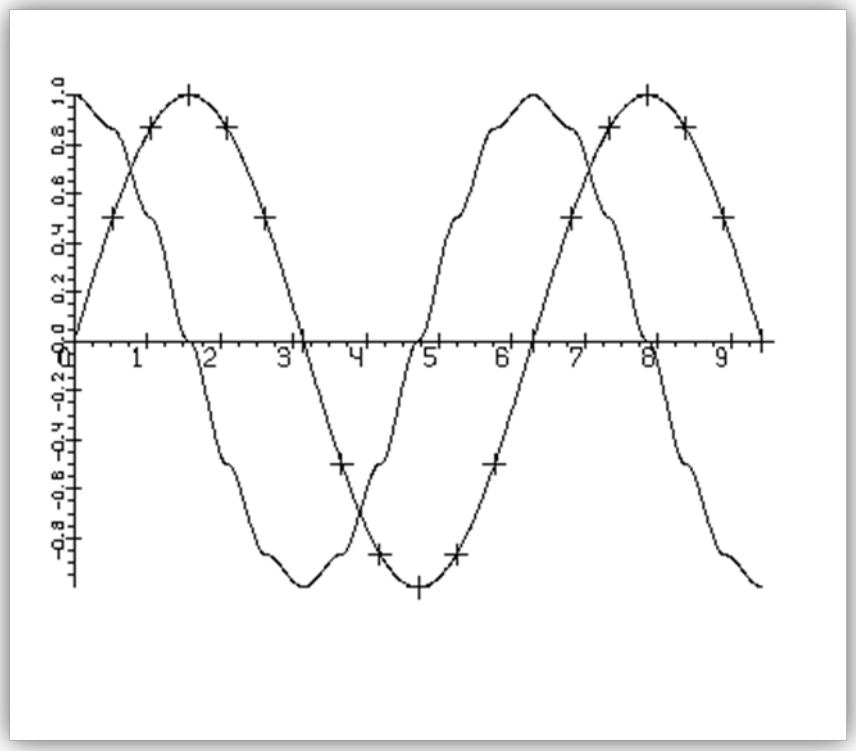


Рис.11 Пример построения сплайнов для функций sin *x* и cos *x*

На рисунке 11 построен сплайн для функций sin*x* и cos *x*, значения которых определены на сетке с шагом p/6, но для функции cos *x* значения первых производных в узлах заданы равными нулю. Пример показывает как, управляя производными, можно изменять форму кривой. Р

Программа **TDMP***(X,Y,N,A,B,C,D,KODE)* позволяет вычислить элементы трехдиагональной матрицы или дополненной трехдиагональной матрицы (в случае периодического сплайна) и вектор свободных членов. Программа имеет следующие параметры: *X*,*Y*векторы значений аргумента и функции (длины *N*);*N*количество точек; *A*,*B*,*C*поддиагональный, диагональный и наддиагональный векторы матрицы (длины *N*);*D*вектор свободных членов (длины *N*);*KODE*признак задания краевых условий:

Таблица 2. признак задания краевых условий

Значение	**Смысл**

-2	на концах сетки заданы вторые производные; перед вызовом программы y_1'' и y_n'' должны быть занесены соответственно в *D* (1) и *D* (*N*),
-1	на концах сетки заданы первые производные; перед вызовом программы y_1' и y_n' должны быть занесены соответственно в *D* (1) и *D* (*N*),
0	краевые условия не заданы, что равносильно $y_0'' = y_n'' = 0$,
1	задан периодический сплайн, т. е. $y_1' = y_n{}'$ и $y_1 = y_n$.

Программа **TRIDIG***(U,N,A,B,C,D,KODE,IER)* позволяет найти решение системы уравнений, заданной трехдиагональной матрицей или дополненной трехдиагональной матрицей, методом прогонки. В частности, для кубического сплайна решением системы является вектор первых производных в точках соединения.

Параметры программы:

*U*вектор результатов;

*N*количество уравнений;

*A,B,C*поддиагональный, диагональный и наддиагональный векторы матрицы;

*D*вектор свободных членов;

*KODE*характеристика матрицы:

Значение	**Смысл**
0	трехдиагональная матрица,

1	дополненная трехдиагональная матрица;

*IER*код ошибки:

Значение	**Смысл**
0	ошибки нет,
1	если B (1) = 0,
2	если B (J) +C (J) ´A (J-1) = 0.

Способ задания матриц:

а) трехдиагональная матрица (KODE = 0):

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{32} & r_{33} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & r_{n-2,n-2} & r_{n-2,n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & r_{n-1,n-2} & r_{n-1,n-1} & r_{n-1,n} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & r_{n,n-1} & r_{n,n} \end{bmatrix}$$

задается следующим образом:

A (1) = 0,A (2) = r_{21},…,A (N) = $r_{n,n-1}$ - поддиагональный вектор,

B (1) = r_{11},B (2) = r_{22},…,B (N) = $r_{n,n}$ - диагональный вектор;

C (1) = r_{12},C (2) = r_{23},…,C (N) = 0 - наддиагональный вектор;

б) (*KODE* = 1) дополненная трехдиагональная матрица:

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & 0 & \cdots & 0 & 0 & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{32} & r_{33} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & r_{n-2,n-2} & r_{n-2,n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & r_{n-1,n-2} & r_{n-1,n-1} & r_{n-1,n} \\ 0 & r_{n2} & 0 & \cdots & 0 & r_{n,n-1} & r_{n,n} \end{bmatrix}$$

задается следующим образом:

A (1) = r_{1n},A (2) = r_{21},…,A (N) = $r_{n,n}$-1 - поддиагональный вектор,

B (1) = r_{11},B (2) = r_{22},…,B (N) = $r_{n,n}$ - диагональный вектор;

C (1) = r_{12},C (2) = r_{23},…,C (N) = $r_{n,}$2 - наддиагональный вектор.

3.2. Типы сплайнов

Линейный сплайн - это сплайн, составленный из полиномов первой степени, т.е. из отрезков прямых линий. Точность интерполяции линейными сплайнами невысока, также следует отметить, что они не обеспечивают непрерывности даже первых производных. Однако в некоторых случаях кусочно-линейная аппроксимация функции может оказаться предпочтительнее, чем аппроксимация более высокого порядка. Например, линейный сплайн сохраняет монотонность переданного в него набора точек.

Сплайн Эрмита - это сплайн третьего порядка, производная которого принимает в узлах сплайна заданные значения. В каждом узле сплайна Эрмита задано не только значение функции, но и значение её первой производной. Сплайн Эрмита имеет непрерывную первую производную, а вторая производная разрывна. Точность интерполяции лучше, чем у линейного сплайна.

Сплайн Катмулла-Рома - это сплайн Эрмита, производные которого определяются по формуле $S'(x_i) = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}}$

Как и сплайн Эрмита, сплайн Катмулла-Рома имеет непрерывную первую производную и разрывную вторую. Сплайн Катмулла-Рома локален - значения сплайна зависят только от значений функции в четырех соседних точках (двух слева, двух справа).

Можно использовать два типа граничных условий:

- Сплайн, завершающийся параболой. В этом случае граничный отрезок сплайна представляется полиномом второй степени вместо третьей (для внутренних отрезков по-прежнему используются полиномы третьей степени). В некоторых случаях обеспечивает большую точность, чем естественные граничные условия.
- Периодическиеграничные условие (этот вид граничных условий используется при моделировании периодических функций).

Все сплайны, рассмотренные выше, являются кубическими сплайнами - в том смысле, что они являются кусочно-кубическими функциями. Когда говорят "кубический сплайн", то обычно имеют в виду конкретный вид кубического сплайна, который получается, если потребовать непрерывности первой и второй производных. Кубический сплайн задается значениями функции в узлах и значениями производных на границе отрезка интерполяции (либо первых, либо вторых производных).

- Фундаментальный сплайн- это сплайн, у которого известны точные значения первой производной на обеих границах. Погрешность интерполяции равна $O(h^4)$.
- Если значение первой (или второй) производной на границе неизвестно, то можно задать естественные граничные условия $S''(A)=0, S''(B)=0$, и получить естественный сплайн. Погрешность интерполяции естественным сплайном составляет $O(h^2)$. Максимум погрешности наблюдается в окрестностях граничных узлов, во внутренних узлах точность интерполяции значительно выше.
- Ещё одним видом граничного условия, которое можно использовать, если неизвестны граничные производные функции, является условие типа "сплайн, завершающийся параболой". В этом случае граничный отрезок сплайна представляется полиномом второй степени вместо третьей (для

внутренних отрезков по-прежнему используются полиномы третьей степени). В некоторых случаев это обеспечивает большую точность, чем естественные граничные условия.

- Периодические граничные условие. Этот вид используется при моделировании периодических функций.

Можно сочетать различные типы граничных условий на разных границах. Обычно так имеет смысл делать, если есть только часть информации о поведении функции на границе.

3.3. Двухмерная сплайн-интерполяция

Двухмерная интерполяция имеет ряд особенностей, отличающих её от одномерного случая. Главной такой особенностью является то, что подавляющее большинство алгоритмов двухмерной интерполяции может быть применено только на наборе точек специального вида - на прямоугольной сетке, ориентированной по осям координат. Именно на такой сетке могут быть построены два наиболее важных типа интерполирующих функций: билинейный сплайн и бикубический сплайн.

Билинейная функция - это функция двух аргументов t и u, которая при фиксированном значении t линейна по u и наоборот. Билинейный сплайн является двухмерным обобщением одномерного линейного сплайна и имеет те же достоинства и недостатки. Он составляется из билинейных функций, определенных на каждой ячейке сетки так, что в узлах сетки они принимают предписанные значения. Этот способ интерполяции хорош своей простотой и быстродействием. Основной недостаток - разрывность производной интерполирующей функции на границах ячеек сетки. Также можно отметить сравнительно невысокую точность такой интерполяционной схемы.

Для построения билинейного сплайна служит подпрограмма BuildBilinearSpline. Результатом работы подпрограммы является таблица коэффициентов, которая передается в подпрограмму SplineInterpolation2D. Алгоритм построения таблицы коэффициентов в этой статье не рассмотрен, однако он неплохо описан в NumericalRecipes и в Википедии.

В ряде случаев оказывается недостаточно точности, которую обеспечивают билинейные сплайны. Разрывность производной также часто оказывается мешающим фактором. Втаким случаях можно применить

бикубический сплайн, который гарантирует непрерывность первых производных dS/dX и dS/dY, а также непрерывность смешанной производной d 2S/dXdY.

Здесь можно проследить аналогию с одномерными сплайнами, однако есть и различия. Кубический сплайн гарантирует непрерывность первой и второй производных функции. Бикубический сплайн гарантирует непрерывность только градиента и смешанной производной, а непрерывность вторых производных (т.е. d 2S/dX 2 и d 2S/dY 2) не гарантируется.

Для построения бикубического сплайна требуются значения функции в узлах сетки, а также значения её градиента и смешанной производной. Если у нас есть эта информация, то мы можем сразу приступить к вычислению коэффициентов сплайна. Однако обычно мы имеем только значения функции, а значения градиента и смешанной производной требуется вычислять самостоятельно на их основе (например, используя разностные схемы). В этом модуле реализован следующий подход. Сначала на основе таблицы значений функции на сетке строится последовательность одномерных кубических сплайнов, интерполирующих функцию по переменным x и y. Затем одномерные сплайны дифференцируются, после чего мы получаем требуемые нам градиент и смешанную производную. После этого коэффициенты бикубической функции легко рассчитываются на основе полученных данных (более подробно алгоритм рассмотрен в NumericalRecipes, также можно опять обратиться к Википедии).

Построение бикубического сплайна осуществляется подпрограммой BuildBicubicSpline. Результатом работы подпрограммы является таблица коэффициентов, которая передается в подпрограмму SplineInterpolation2D (эта подпрограмма может применятсья как для вычисления значения билинейных сплайнов, так и для вычисления значения бикубических сплайнов).

Помимо вычисления значения сплайна в заданной точке этот модуль поддерживает и другие операции со сплайнами. Каждая из описанных ниже подпрограмм принимает таблицу коэффициентов, построенную подпрограммой BuildBilinearSpline или подпрограммой BuildBicubicSpline.

Подпрограмма SplineDifferentiation2D осуществляет дифференцирование сплайна: вычисление первых производных dS/dX и dS/dY, а также смешанной производной d 2S/dXdY. Для создания копии таблицы коэффициентов может быть использована подпрограмма Spline2DCopy. Для "распаковки" сплайна, т.е. получения его коэффициентов в удобной для практического применения форме, служит подпрограмма SplineUnpack2D. Линейное преобразование аргументов сплайна осуществляется подпрограммой Spline2DLinTransXY. Линейное преобразование сплайна осуществляется при помощи подпрограммы Spline2DLinTransF.

Ещё одной задачей, которая решается в этом модуле, является интерполяция. Интерполяция - это задача, которая возникает, если у нас есть значения функции на регулярной сетке размером $M1 \cdot N1$ узлов, и нам требуется перейти от этой сетки к сетке размером $M2 \cdot N2$ узлов, покрывающей ту же область, и вычислить значения функции на новой сетке. При этом новая сетка может быть как более, так и менее плотная, чем старая.

Интерполяция - это получение по известным значениям в одних точках значений функции в других точках, т.е. задача интерполяции. Но данный случай является особым - нам требуется вычислять значение функции не в произвольных точках, а в узлах сетки, и вычисления проводятся только один раз, после чего мы получаем новую сетку и больше не возвращаемся к ресурсоемкой интерполяции. Поэтому для решения данной задачи имеет смысл разработать специализированную процедуру.

Как двухмерный сплайн может быть билинейным или бикубическим, так и интерполяция делится на билинейное и бикубическое. Первое осуществляется подпрограммой BilinearResampleCartesian, второе - подпрограммой BicubicResampleCartesian.

Глава 4. Программное моделирование вычисления КНД антенны методом сплайн аппроксимации

Рассмотрим, из каких форм и модулей состоит программаSplineDNA.

Формы программы:

Mainfm–задается главная форма окна. Полный код программы в Приложении А.

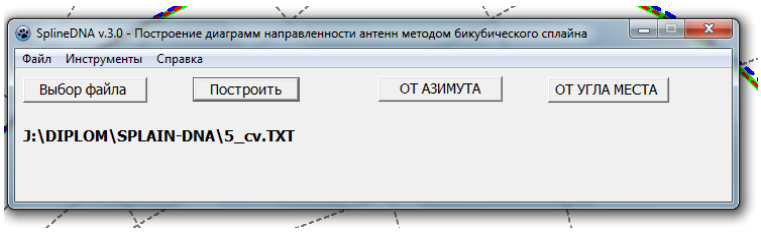


Рис.12Внешний вид формы главного окна

Команда «выбор файла» предлагает загрузить исходные данные, по которым далее будут вычислены коэффициенты сплайна и построены ДНА.

Form_Ris_A –формаокна в разрезе по углу азимута.Команда «от азимута» откроет диаграмму в зависимости от азимута.

Form_Ris_M –форма окна в разрезе по углу места.Команда «от угла места» откроет диаграмму в зависимости от угла места.

Info_Form – вспомогательная форма,которая показывает краткую информацию о программе;

Setting–форма настройки параметров программы, которые установлены по умолчанию.

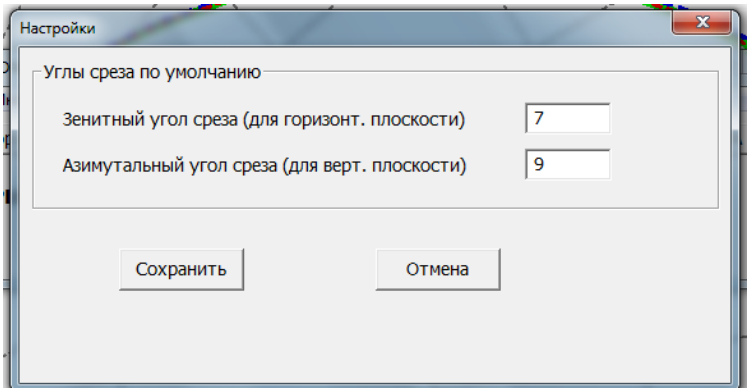


Рис.13 Форма главного окна

Модули программы:

Chit–модуль считывания исходных данных;

Vich_A–модуль, вычисления массивов точек для формирования диаграмм направленности по углу азимута;

Vich_M–модуль, вычисления массивов точек для формирования диаграмм направленности по углу места;

Ris_A –модульForm_Ris_Aпостроенияв разрезе по углу азимута;

Ris_M –модульForm_Ris_Mпостроенияв разрезе по углу места;

Ris_Vich_A –модульдемонстрации диаграммы направленности в разрезе по углу азимута;

Ris_ Vich_M –модульдемонстрации диаграммы направленности в разрезе по углу места;

Spline-модуль подпрограммы INIT_D_Sвычисления коэффициентов сплайна, которые используются подпрограммой D_S для вычисления значения КНД по ранее подготовленным коэффициентам сплайна.

Программа SplineDNA реализует построение диаграммы направленностиантенны (ДНА), используя бикубический сплайн, и сравнение ее с исходной.

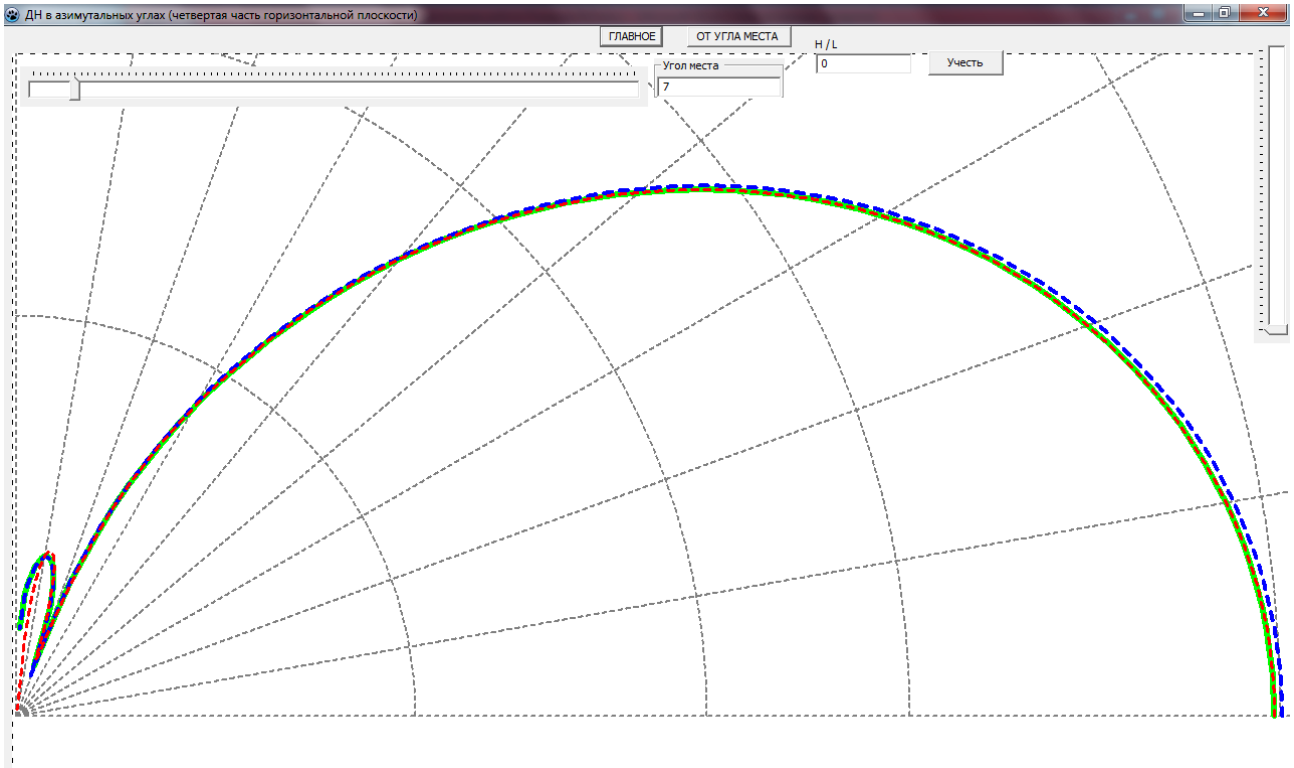


Рис.14Диаграмма направленности азимутального угла от угла места

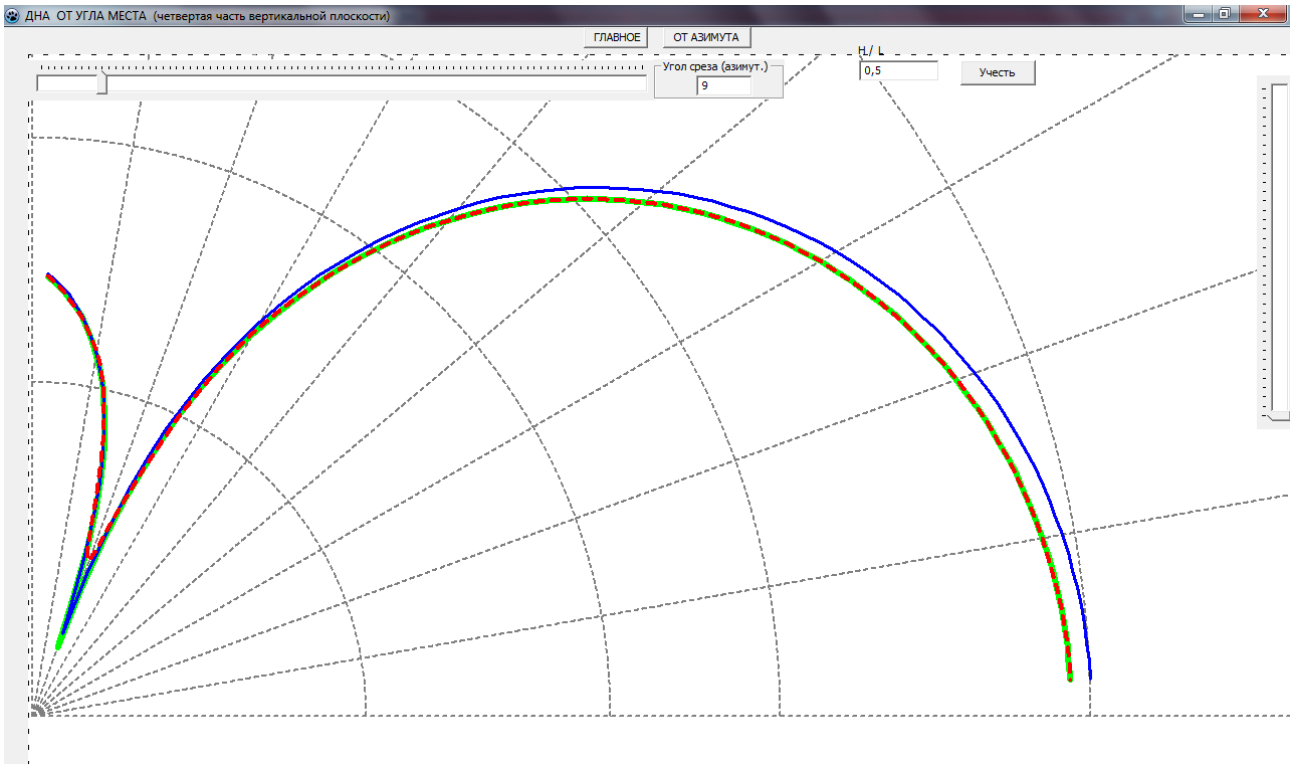


Рис.15Диаграмма направленности угла места от азимутального угла

Дополнительно демонстрируется зависимость лепесткования ДНА от высоты антенны над землёй.

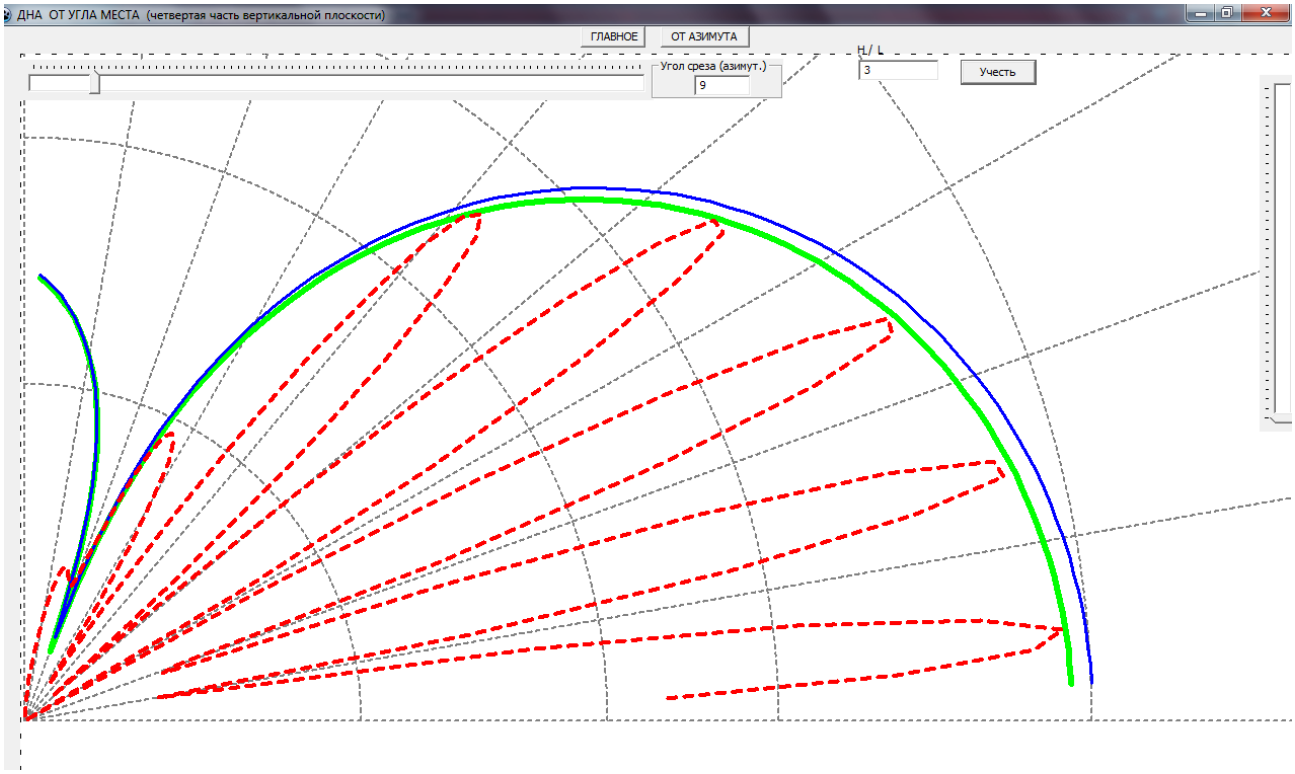


Рис.15Диаграмма направленности лепесткования

Данные об исходной диаграмме загружаются из файлов, подготовленных впрограмме MMANA-GAL. Далее этот массив данных обрабатывается с цельюполучения коэффициентов сплайна.

Сплайн по полученным коэффициентам приближенно реализует ту же диаграмму. При этом объём оперативной памяти, которая потребуется впрограмме моделирования радиосистемы для хранения данных о диаграмме направленности будет намного меньше.

В данный момент экономия оперативной памяти не существенное достоинство программы, но в перспективе для внедрения во встроенные

компьютеры или иные системы для которых важно наименьшее использование оперативной памяти, в таких системах будет учитываться, как одно из преимуществ данной программы.

При усовершенствовании в дальнейшем можно преобразовать в учебное пособие ДНА.

В программе выводятся изображения двух видов: зависимость от угла азимута при заданном угле места и зависимость от угла места при заданном угле азимута.

На графиках используются 3 линии:

Синяя линия - это часть исходной ДНА в направлении максимума.

Зеленая линия - исходная ДНА, но в направлении задаваемого угла.

Красная линия - ключевая диаграмма ДНА в заданном направлении, реализованная сплайном.

Заключение

Были изучены особенности метеорных радиосистем, связанные с требованиями выбора для них антенн с оптимальными диаграммами направленности.

Так же освоена программа моделирования, расчета и анализа антеннMMANA-GAL и её формат выходных данных.

Освоен алгоритм аппроксимации функций двух аргументов по табличным данным кубическим сплайном, который применяется вподпрограммеBuildBicubicSpline. Результатом работы подпрограммы является массив коэффициентов, используемый в дальнейшем подпрограммой SplineInterpolation2D.

Создана программа SplineDNA, реализующая построение диаграммы направленности антенны, используя бикубический сплайн.

Кроме этого программа демонстрирует зависимость лепесткования диаграммы направленности от высоты антенны над землёй.

Список литературы

1. В.В. Сидоров. Радиолокационные исследования метеоров в Казани.— Радиотехника, 2010, с.21-24.
2. В.Ф. Кравченко. Булева алгебра и методы аппроксимации в краевых задачах электродинамики.— М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2004, с. 308.
3. И.Г. Бурова, Ю.К. Демьянович.Алгоритмы параллельных вычислений и программирование. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та,2010, с.364.
4. А.М. Седлецкий. Классы аналитических преобразований Фурье и экспоненциальные аппроксимации. — ФИЗМАТЛИТ, 2005,с.504.
5. Б.И. Квасов.Методы изогеометрической аппроксимации сплайнами. — ФИЗМАТЛИТ, 2006, с.360.
6. Н.И. Ахиезер. Лекции по теории аппроксимации.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1965,с.408.
7. В.М. Тихомиров. Некоторые вопросы теории приближений. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976,с.304.
8. Н.П. Корейчук. Экстремальные задачи теории приближения. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976, с.320.
9. Г. Корн. Справочник по математике (для научных работников и инженеров).— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973, с.831.
10. И.Н. Бронштейн,К.А. Семендяев. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980, с.723.
11. Я.Б. Зельдович,А. Д.Мышкис. Элементы прикладной математики. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1965, с.592.
12. Т.И. Трофимова. Курс физики. — М.: Высшая школа, 1998, с.560.

13. Д. Возенкрафт, И. Джекобе. Теоретические основы техники связи. —М.: Мир, 1969, с.638.

14. А.В. Карпов, А.Р. Курганов, А.В. Наумов, С.Н.Терешин. Компьютерная модель радиосистемы. Ред. физ. Факультета Казань, 1998,с.39.

15. П. Ж. Лоран. Аппроксимация и оптимизация. — М.: Мир, 1975,с. 496.

16. А.В. Карпов, В.В. Сидоров. Вариант статистического моделирования распространения радиоволн для трасс произвольной длины // Тезисы докладов XII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. Ч II. М.: Наука,- J 978, с.256-259.

17. А.В. Карпов, А.В. Наумов, А.Г. Таюрский. Антенные системы в метеорных сетях коммуникаций // сборник трудов 3 Международной научно-технической конференции «Антенно-фидерные устройства, системы и средства радиосвязи ICARSM97» Воронеж. ВГУ, 1997,с.203-207.

ПриложениеА

```
objectfmMain: TfmMain
Left = 228
Height = 150
Top = 230
Width = 710
BorderIcons = [biSystemMenu, biMinimize]
BorderStyle = bsSingle
Caption = 'SplineDNAv.3.0 - Построениедиаграммнаправленностиантеннметодомбикубическогосплайна'
ClientHeight = 130
ClientWidth = 710
Color = clBtnFace
Font.Color = clWindowText
Font.Height = -14
Font.Name = 'Tahoma'
Menu = MainMenu1
OnCreate = FormCreate
Position = poDesktopCenter
LCLVersion = '1.2.6.0'
object Label1: TLabel
Left = 8
Height = 18
Top = 56
Width = 343
Caption = 'Откройтефайлисходныхданных (Ctrl + O)'
Font.Color = clWindowText
Font.Height = -15
Font.Name = 'Tahoma'
Font.Style = [fsBold]
ParentColor = False
ParentFont = False
end
object BT_RIS: TButton
```

```
Left = 176
Height = 24
Top = 8
Width = 106
Caption = 'Построить'
Enabled = False
OnClick = BT_RISClick
TabOrder = 0
end
objectBT_RisA: TButton
Left = 360
Height = 25
Top = 7
Width = 123
Caption = ' ОТАЗИМУТА '
OnClick = BT_RisAClick
TabOrder = 1
end
objectBT_RisM: TButton
Left = 528
Height = 25
Top = 8
Width = 120
Caption = 'ОТУГЛАМЕСТА '
OnClick = BT_RisMClick
TabOrder = 2
end
objectpole_pol: TEdit
Left = 16
Height = 25
Top = 8
Width = 45
TabOrder = 3
Text = '1'
end
objectknOpen: TButton
```

```
Left = 8
Height = 25
Top = 8
Width = 123
Caption = 'Выборфайла '
OnClick = knOpenClick
TabOrder = 4
end
object MainMenu1: TMainMenu
left = 384
object N1: TMenuItem
Caption = 'Файл'
object N2: TMenuItem
Caption = 'Открыть...'
ShortCut = 16463
OnClick = N2Click
end
object N4: TMenuItem
Caption = 'Сохранить...'
Enabled = False
ShortCut = 16467
OnClick = N4Click
end
object N3: TMenuItem
Caption = 'Выход'
ShortCut = 16472
OnClick = N3Click
end
end
object Jgwbb1: TMenuItem
Caption = 'Инструменты'
object N7: TMenuItem
Caption = 'Настройки'
ShortCut = 16464
OnClick = N7Click
end
```

```
end
object N5: TMenuItem
Caption = 'Справка'
object N6: TMenuItem
Caption = 'Опрограмме'
ShortCut = 16456
OnClick = N6Click
end
end
end
objectODi: TOpenDialog
left = 488
top = 65528
end
objectSDi: TSaveDialog
left = 440
end
end
```

ПриложениеВ

```
unit SPLINE;

{$MODE Delphi}

interface

 USES CHIT, SysUtils, MATH, AP, SPLINE2D, mainFM;

   FUNCTION D_S ( FI, TETA : DOUBLE ) : DOUBLE;

   PROCEDURE INIT_D_S ( CONST F : MASS_89; I_M : WORD );

   VAR

      C1, C2 : TReal1DArray;

      GRAN_M : WORD;

implementation

   PROCEDURE INIT_D_S ( CONST F : MASS_89; I_M : WORD );

   VAR

      X, Y : TReal1DArray;

      I, J, DOP, GRAN : WORD;

      F_S :  TReal2DArray;

   BEGIN

   rez_razm1 := 0;

   rez_razm2 := 0;

   // PSPëP¶Pµ PSP°PïCЂP°PIP»PµPSPëCЏPjP°PєCЃPëPjCѓPjP° PIPIPµCЂC,. PïP»PsCЃPєPsCЃC,Pë

DOP := 89 - I_M ;

GRAN := I_M DIV 3;

   SETLENGTH (X, 18 );

   SETLENGTH (Y, GRAN );

   SETLENGTH (F_S, 18 );

IF  I_M > 3 THEN

   BEGIN

FOR  I := 0 TO 17 DO

       BEGIN

         SETLENGTH (F_S[I], GRAN + 1 );

         X [ I ] := I;

FOR  J := 0 TO GRAN DO

begin

            Y [ J ] := J;
```

```
            // F_S [ I, J ] := powER ( 10, 0.1* F [ DOP + J*3, I*5 ] );
             F_S [ I, J ] := F [ DOP + J*3, I*5 ];
Inc(rez_razm1);
end;
        END;
BuildBicubicSpline( X, Y, F_S, GRAN , 18, C1 );
   END
   // PIC‹C€Pµ PSP°PïCЂP°PIP»PµPSPëCЏPjP°PєCЃPëPjCѓPjP° PIPIPµCЂC,. PïP»PsCЃPєPsCЃC,Pë
DOP := 89 - I_M;
GRAN := DOP DIV 5;
   //GRAN := DOP DIV 3;
   SETLENGTH (Y, GRAN );
   SETLENGTH (F_S, 18 );
FOR  I := 0 TO 17 DO
begin
      SETLENGTH (F_S[I], GRAN + 1);
      X [ I ] := I;
FOR  J := 0 TO GRAN DO
begin
         Y [ J ] := J;
        // F_S [ I, J ] := powER ( 10, 0.1* F [ DOP - J*5, I*5 ] );
         F_S [ I, J ] := F [ DOP - J*5, I*5 ];
Inc(rez_razm2);
end;
end;
BuildBicubicSpline( X, Y, F_S, GRAN, 18, C2 );
   GRAN_M := I_M
   END;

   FUNCTION D_S ( FI, TETA : DOUBLE ) : DOUBLE;
   VAR R : DOUBLE;  I, J : WORD;
   BEGIN
IF  TETA>= GRAN_M  THEN
begin
        //R := SplineInterpolation2D ( C2, (TETA-GRAN_M)*0.2, FI*0.2 );
R := SplineInterpolation2D ( C2, (TETA-GRAN_M)*0.2, FI*0.2 );
```

```
end
      ELSE
begin
R := SplineInterpolation2D( C1, ( GRAN_M - TETA)*0.3333333, FI*0.2 );
end;
      IF   R < 0.0001 THEN
R := 0.0001;
D_S := R;
    END;
end.
```