

**Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт
Министерства науки, высшей школы и технической политики
Российской Федерации**

П р е п р и н т N 379

ОПТИМИЗАЦИЯ ИОНОСФЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

С. Н. Митяков

Нижний Новгород 1994

Митяков С.Н.

ОПТИМИЗАЦИЯ ИОНОСФЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА // Препринт N 379. -
Нижний Новгород: НИРФИ, 1993. - 28 с.

В работе рассматриваются возможности применения методов оптимизации на различных этапах ионосферного эксперимента.

Подписано в печать 22.12.93 г. Формат 60 x 84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 1.72 усл. п. л.
Заказ 5357. Тираж 100.

Отпечатано на ротапринтере НИРФИ

1. В В Е Д Е Н И Е

Выдающийся физик-экспериментатор Л.А.Арцимович в статье "Физик нашего времени" / 1 / писал : " Развитие науки - это цепная реакция накопления информации. Она может носить характер нарастающей лавины или же представлять собой процесс, затухающий во времени. Первое имеет место в том случае, если ценность потока информации увеличивается с течением времени...Но в отдельных областях естествознания могут наступать периоды, когда принципиальные вопросы оказываются выясненными и внимание направляется на детализацию общей картины... Это означает, что данная область переходит в категорию таких, которые принято называть классическими".

Изложенное в полной мере относится и к физике ионосферы. Исследование ионосферы - одна из актуальных задач науки, связанная с решением как фундаментальных вопросов физики космической плазмы, так и прикладных, касающихся распространения радиоволн различных диапазонов. Большое число монографий, посвященных проблемам физики ионосферы / 2,3,4 / в основном отражает современный уровень знаний в этой области. Эти монографии, как правило, содержат теоретические основы физики ионосферы, а так же обзор методов ее исследования. Основной объем информации о пространственно-временных вариациях ионосферных параметров, необходимый для построения физически корректных моделей ионосферы, в настоящее время удается получить главным образом наземными радиофизическими методами ионосферных измерений.

В то же время в некоторых областях физики ионосферы интенсивность фундаментальных исследований может объективно снижаться. Такие методы как вертикальное зондирование ионосферы, кросс-модуляция, некогерентное рассеяние радиоволн и другие уже давно стали классическими. Приближаются к насыщению исследования ионосферы методами активного воздействия на нее пучками мощных радиоволн. Все большее развитие получают различные приложения этих методов в областях физики плазмы, распространения радиоволн, геофизики, ме-

теорологии, сейсмологии, экологии, медицины и т. д.

Параллельно с эволюционным развитием науки, предусматривающим периоды взлетов и падений, осуществляется неуклонный технический прогресс, который объективно невозможно остановить. Индустриализация науки неизбежно привела к новым методам проведения экспериментальных исследований. С вводом в строй в 70-е годы нагревных стенодов были обнаружены и исследованы эффекты воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением. Одновременно с развитием радиофизических методов исследования ионосферы в последнее время широкое развитие получили аппаратные и математические методы приема и обработки сигналов / 5 /. Развитие технологий по производству изделий электроники позволило в ряде случаев сконструировать новые приборы как под конкретный эксперимент, так и более универсальные, для широкого круга задач. Изготовление самими экспериментаторами подобных приборов и измерительных комплексов во многих случаях оправдано, поскольку промышленные аналоги либо отсутствуют, либо не удовлетворяют техническим требованиям эксперимента.

Резкий подъем качества ионосферных измерений произошел с внедрением в эксперимент средств вычислительной техники. Непосредственная связь ЭВМ с экспериментальной установкой позволила не только сократить время и улучшить качество обработки данных, но и привести к получению кардинально новых физических результатов. Программно-аппаратные комплексы с применением ЭВМ, довольно давно используемые за рубежом, приобрели в последнее время широкое распространение и у нас в стране. Это направление, несомненно, будет развиваться и в дальнейшем, выводя эксперимент на все более высокий уровень по мере улучшения характеристик как ЭВМ, так и другой аппаратуры.

В настоящее время темпы развития экспериментальной науки определяются в значительной мере скоростью перестройки технологической базы исследований. В то же время эта скорость зависит от ряда факторов экономического и технологического характера, не связанных с непосредственными целями экспериментов. Сложная экономическая ситуация в стране не позволяет сохранить темпы развития экспериментальной физики на прежнем уровне. В полной мере это относится и к ионосферным исследованиям.

Изложенное выше привело к вопросу о целесообразности использования в ионосферных экспериментах методов оптимизации. Эти ме-

годы в настоящее время получили широкое распространения в различных областях науки и техники / 6 /. Однако, практически отсутствует литература по применению этих методов в практике ионосферного эксперимента. В то же время оптимально выбранная стратегия и тактика подготовки и проведения эксперимента во многом гарантирует успех исследования. Особенно важной эта проблема стала в последние годы в связи с периодом объективного насыщения в некоторых областях ионосферных исследований, а также вследствие неблагоприятной экономической ситуации в стране. Весьма актуальной представляется разработка комплексного подхода к организации и проведению ионосферного эксперимента, включающая его оптимизацию на всех этапах.

2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИОНОСФЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрим концепцию организации и проведения ионосферного эксперимента (рис. 1). Поскольку в качестве объекта исследования выступает ионосфера, концепция предполагает использование известных и разработку новых методов исследования ионосферы. Концепция включает в себя *этапы* проведения эксперимента, оптимизацию эксперимента на каждом этапе, а также *классификацию* экспериментальных задач по техническим и целевым признакам. Разбиение процесса проведения эксперимента на этапы позволяет систематизировать подход экспериментатора к проведению исследований. Этот подход может корректироваться в зависимости от используемых в эксперименте технических средств. В то же время методическое и техническое обеспечение проведения эксперимента в большой степени зависит от его целей и задач. Для каждого конкретного эксперимента целесообразно по возможности использовать методы оптимизации.

На рис. 2 приведена структурная схема ионосферного эксперимента. *Объектом* исследования является *ионосфера*. Выделены ее *основные параметры* (концентрация N , частота соударений ν , коэффициент поглощения α , ионосферный ток j и др.). Эти параметры могут быть определены с использованием *радиофизических методов* экспериментального исследования ионосферы (зондирование, радиопросвечивание, некогерентное рассеяние радиоволн, активное воздействие на ионосферу и т.д.). Поскольку практически все методы связаны с приемом и обработкой ионосферных сигналов, структурная схема включает в себя ме-

Выбор направлений и целей исследования.
Анализ эволюции научных знаний в выбранном направлении.

Выбор оптимальной стратегии исследования,
конкретных объектов и методов исследования,
исходя из целей и задач эксперимента
и уровня технической оснащенности

Выбор тактики проведения эксперимента.
Планирование и проведение эксперимента.
Оптимизация исследований на каждом этапе.

Разработка новых методов исследования ионосферы.
Разработка новых методик, образцов новой техники.
Получение новых физических результатов.

Анализ возможностей использования новых подходов
и результатов в других областях науки и техники.

Рис. 1 Концепция ионосферного эксперимента

ходы обработки сигналов. Среди них можно отметить спектральный и корреляционный анализ, модуляцию и детектирование, фильтрацию и накопление и многие другие. Методы приема и обработки в свою очередь связаны с конкретными способами и аппаратурой обработки в том числе и с применением ЭВМ при проведении измерений. Полученные в результате измерений данные обрабатываются и сопоставляются с теоретической моделью. В результате обработки с известной степенью достоверности вычисляются те или иные параметры ионосферы. Соответствующие этой концепции этапы проведения эксперимента представлены в правой части структурной схемы. На каждом из этапов целесообразно применение методов оптимизации.

На рис. 3 приведена классификация ионосферного эксперимента по техническим и целевым признакам. В левой части рисунка дается



Рис. 2 Структурная схема ионосферного эксперимента

классификация эксперимента по возможным техническим реализациям, в правой - по его целям и задачам. Рисунок отражает эволюцию ионосферного эксперимента.

Развитие технических средств эксперимента начинается с простейших наблюдений и заканчивается многофункциональными адаптивными экспериментами с применением ЭЕМ. В зависимости от степени завершенности решения научной проблемы используются разные виды экспериментов (поисковый эксперимент, исследование параметров объекта, регулярные наблюдения, комплексные исследования с применением различных методов).

В разделе 3 описаны основные этапы проведения эксперимента, начиная проблемной постановкой задачи и кончая анализом результа-

тов и их теоретической интерпретацией. В разделе 4 даны методологические основы оптимизации ионосферного эксперимента. Рассмотрены объекты и модели оптимизации, указываются области применения теории оптимизации в ионосферных экспериментах. В разделе 5 рассмотрена классификация ионосферного эксперимента.

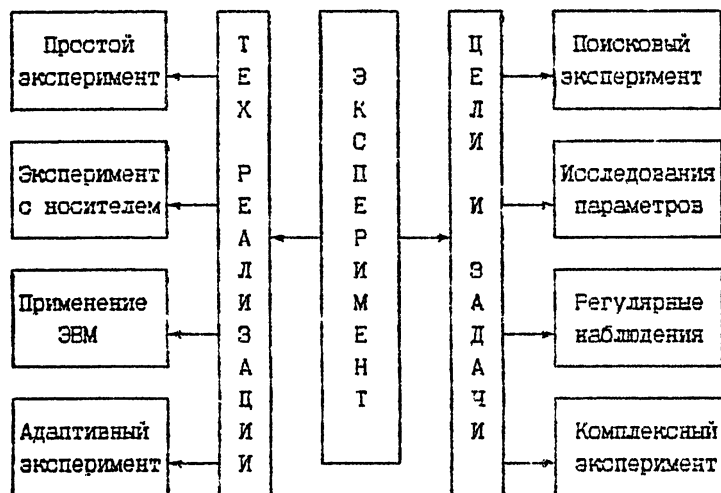


Рис. 3 Классификация ионосферного эксперимента

3. ЭТАПЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИОНОСФЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1 Постановка задачи

Задачу на проведение эксперимента ставит, как правило, физик-теоретик с целью проверки правильности разработанной теории. Если эксперимент носит поисковой характер, то в целях правильной его постановки, желательно наличие как строгой теории, так и достаточно простых модельных представлений. Однако, часто возникает и обратная ситуация, когда теория отсутствует, а существует лишь гипотеза и модель эксперимента строится на интуитивном уровне. Большинство экспериментальных открытий осуществлялось по второму сценарию.

Требования к постановке задачи существенно уменьшаются, если

речь идет об исследовании уже известных явлений. В этом случае, как правило, уже накоплен теоретический и экспериментальный материал и задача заключается в поиске новых экспериментальных подходов с целью улучшения точности, увеличения быстродействия, обнаружения тонких эффектов на классически исследованном объекте. Все это достигается изменением методики, применением новейшей (в том числе и вычислительной) техники, современных методов математической обработки. В ряде случаев такой подход дает не только количественный, но и качественный скачок в понимании явления, существенно меняя его физику.

3.2 Разработка методики эксперимента

Разработка методики является ключевым вопросом проведения эксперимента. Она включает в себя выбор методов обработки ионосферных сигналов, выбор способа измерения и набора измерительной техники, составления структурной схемы и плана проведения эксперимента .

Необходимость обработки сигналов возникает каждый раз когда нужно отделить полезный сигнал от искажающего его шума. При этом, естественно, должны быть известны предполагаемые характеристики сигнала (его интенсивность, спектр, статические свойства). В настоящее время известно множество методов обработки сигналов при физических измерениях / 5 /.

Выбор метода измерения обуславливает состав измерительной техники, принимающей участие в эксперименте. Измерительная техника включает в себя широкий набор инструментов, начиная с датчиков (антенн) и кончая электронно-вычислительными комплексами. При выборе измерительной техники необходимо обратить внимание на следующие понятия.

Чувствительность системы определяется минимальным уровнем входного сигнала, который система может анализировать. Чувствительность определяется как уровнем собственных шумов входных цепей (датчиков, предусилителей) , так и внешними шумами и помехами в полосе приема.

Динамический диапазон определяет максимальный разброс уровней сигналов, которые одновременно могут анализироваться системой.

Требования к *быстродействию* системы определяются частотой и

скважностью принимаемых сигналов, а также их статистическими свойствами (степенью нестационарности и т.д.).

Информационная емкость системы определяется необходимым для обработки объемом информации. При работе в реальном времени в условиях сильной нестационарности требования к быстродействию и информационной емкости системы повышаются.

Погрешность измерения - отклонение результата измерения от реального значения измеряемой величины. Погрешность измерения является непосредственной характеристикой точности измерения.

Выбор метода измерения обуславливает состав измерительной техники, принимающей участие в эксперименте. Измерительная техника включает в себя широкий набор инструментов, начиная с датчиков (антенн) и кончая электронно-вычислительными комплексами. При выборе измерительной техники необходимо учитывать соответствие ее параметров поставленной задаче и программе эксперимента.

После выбора метода измерения и набора измерительной техники составляется план эксперимента и его структурная схема.

3.3 Техническое и программное обеспечение проведения эксперимента

Требования к выбору аппаратуры обусловлены разработанной методикой эксперимента. Аппаратура может включать датчики (антенны), предварительные усилители и фильтры, устройства обработки и отображения информации. Если в эксперименте участвует ЭВМ, то в состав обеспечения входят устройства сопряжения измерительной аппаратуры с компьютером, устройства хранения информации в виде цифровых или аналоговых магнитофонов, магнитных дисков. Блок схема измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) может включать также средства управления передающими устройствами, средства синхронизации. ЭВМ может выполнять функции управления экспериментом, отображения результатов в реальном времени, накопления информации и ее предварительной обработки. В этом случае кроме аппаратной поддержки эксперимента нужна и программная. Выбор алгоритма и языка программирования обуславливается методическими требованиями (быстродействие, объем хранимой информации и т.д.).

ИВК, собранный по возможности из серийных приборов, может доукомплектовываться блоками или узлами, сконструированными непосредственно для проведения эксперимента. Здесь, однако, необхо-

димо учитывать требования к надежности аппаратуры.

Измерительная аппаратура должна содержать олоки и программы, предназначенные для калибровки и тестирования комплекса. Тестовые программы позволяют проверить техническое состояние отдельных узлов комплекса, включая ЭЕМ и ее периферийные устройства. В режиме калибровки проходят проверку все устройства системы, участвующие в эксперименте. Проверяется реальная чувствительность, динамический диапазон и другие параметры системы.

3.4 Проведение измерений

Этот этап представляется наиболее интересным с точки зрения физика-экспериментатора, хотя наблюдаемый эффект не всегда соответствует первоначальным представлениям. Тем не менее, в ряде случаев допускается коррекция эксперимента на этапе совершенствования методики и аппаратуры и даже на этапе постановки задачи. При правильно поставленном эксперименте 80-90% времени занимают предварительные наблюдения, после чего, в результате коррекции всего алгоритма эксперимента удается получить ожидаемые результаты.

По своей специфике эксперименты могут отличаться по способу отображения и накопления экспериментальных данных. При ручном эксперименте (запись данных на самописец) возможна коррекция эксперимента в ходе его проведения. При записи данных на бумажные или магнитные носители (перфокарты, перфоленты, магнитофоны, магнитные диски) удается сохранить большое количество данных, но возможность коррекции отсутствует. По-видимому, наиболее рационален промежуточный вариант, сочетающий запись больших массивов данных с их оперативным отображением на экране осциллографа или самописца.

Важнейшей задачей при обнаружении сигнала на фоне помехи является оценка достоверности полученного результата. Ошибки могут быть двух типов. Первый тип ошибки - принятие решения "да", когда на входе присутствует только помеха (ложная тревога). Второй тип ошибки - принятие решения "нет", когда на входе присутствуют как помеха, так и полезный сигнал (пропуск сигнала). Правильное решение также может быть двух типов - правильное обнаружение (положительный результат) и правильное необнаружение (негативный результат). Для принятия правильного решения можно пользоваться *крите-*

риями максимального правдоподобия, основанными на применении элементов математической статистики (например, распределения Стюдента) / 7 /.

3.5 Обработка экспериментальных данных.

Анализ результатов и их теоретическая интерпретация

Обработка экспериментальных данных является заключительным этапом проведения эксперимента. В ряде случаев, при применении мощной вычислительной техники в ходе проведения измерений, дополнительной обработки не требуется. Однако, в большинстве своем экспериментальные данные записываются либо на ленту самописца, либо на магнитные носители (магнитные ленты, диски), в виде первичной аналоговой или цифровой информации.

Обработка результатов эксперимента может включать в себя три этапа.

На первом этапе производится прием сигналов и выделение его из-под шумов. В зависимости от специфики эксперимента эта обработка может производиться как аппаратно с использованием приборов, так и программно с помощью ЭВМ. Разница заключается в том, что в первом случае обычно производится обработка аналоговых сигналов (например, фильтрация), а во втором - цифровых (например, цифровая фильтрация). Во многих экспериментах для предварительной обработки используют сочетание аналоговых и цифровых методов.

На втором этапе обработки производится сортировка и нормировка данных, дополнительная фильтрация, аппроксимация. Во многих случаях экспериментальные данные с использованием формул и алгоритмов, предусмотренных разработанной методикой, преобразуются в реальные физические характеристики. Для нахождения значений измеряемой функции в точках, отличных от экспериментальных, используются методы аппроксимации / 8 /. Кроме этого на втором этапе обработки данных может производиться их нормирование, сортировка, различные алгебраические преобразования. Может также быть применен метод некогерентного накопления (по сеансам наблюдений) с целью дальнейшего увеличения отношения сигнал/шум.

На третьем этапе может производиться более сложная математическая обработка. При интерпретации физических результатов, как правило, выбирают модель объекта, существенно упрощающая его математическое описание и достаточно близкая к реальности. Эта мо-

12

дель может предварительно анализироваться на ЭЕМ. Такой метод исследования называется *вычислительным экспериментом* / 8 /. Здесь может решаться *обратная задача* - по результатам эксперимента корректируется модель объекта и уточняются реальные физические параметры. Если данных не достаточно, чтобы замкнуть задачу (число уравнений меньше числа неизвестных), то применяются методы обработки, основанные на решении *некорректных задач*.

4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ В ИОНОСФЕРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

4.1 Постановка задачи оптимизации

Для того, чтобы использовать методы оптимизации для проведения эксперимента, необходимо установить границы подлежащей оптимизации системы, определить качественный критерий, на основании которого можно провести анализ вариантов с целью выявления "наилучшего", осуществить выбор переменных, которые используются для определения характеристик, и, наконец, построить модель, отражающую взаимосвязи между переменными. Эта последовательность действий составляет содержание процесса *постановки задачи оптимизации* / 6 /.

Границы системы

Прежде чем приступить к оптимизационному исследованию, важно четко определить границы изучаемой системы. Границы системы задаются пределами, отделяющими систему от внешней среды. При измерении какого-либо параметра ионосферы (например, концентрации электронов) часто пренебрегают влиянием на процесс измерения других параметров, а также их взаимозависимостью. Это ограничение границ объекта исследования в ряде случаев оправдано, поскольку учет всех факторов либо существенно усложняет эксперимент, либо делает его вообще неосуществимым.

Характеристический критерий

Если подлежащий исследованию объект определен и его границы установлены, то на следующем этапе постановки задачи оптимизации необходимо осуществить выбор критерия, на основании которого можно оценить характеристики системы и выявить наилучшие условия ее

функционирования. Важно отметить, что независимо от выбора методов оптимизации на каждом этапе проведения эксперимента только один критерий может использоваться при определении оптимума. Действительно, невозможно, например, получить решение, которое одновременно обеспечивает минимум затрат, максимум надежности и минимум потребляемой энергии. Обычно один из критериев выбирается в качестве первичного и служит характеристической мерой в задаче оптимизации. Другие, вторичные критерии порождают ограничения, которые устанавливают диапазоны изменений соответствующих показателей от минимального до максимального приемлемого значения.

Независимые переменные

На третьем основном этапе постановки задачи оптимизации осуществляется выбор независимых переменных, которые должны адекватно описывать допустимые условия функционирования эксперимента.

Модель системы

После того, как характеристический критерий и независимые переменные выбраны, необходимо построить модель, которая описывает взаимосвязи между переменными задачи и отражает влияние независимых переменных на степень достижения цели, определяемой характеристическим критерием. В принципе, задачу оптимизации исследования можно решать и не имея модели на основе непосредственного экспериментирования с объектом. Для этого следует зафиксировать значения независимых переменных, провести цикл наблюдений, оценить характеристический критерий. Затем с помощью оптимизационных методов можно скорректировать значения независимых переменных и продолжить серию экспериментов. Однако, на практике удобнее и экономически выгоднее проводить исследования, имея упрощенное математическое представление или модель явления. Модель представляет собой некоторый набор уравнений и неравенств, которые определяют взаимосвязь между переменными системы и ограничивают область их допустимых изменений.

4.2 Решение задачи оптимизации

В процессе решения задачи оптимизации обычно необходимо найти оптимальные значения некоторых параметров, определяющих данную задачу. Они называются *проектными параметрами* или *параметрами плана*. Выбор оптимального решения проводится с помощью некоторой зависимой величины - *целевой функции*. Эту функцию можно предста-

14

вить в виде / 8 /:

$$u = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n - проектные параметры. Существуют методы решения задачи оптимизации для функции одной и нескольких переменных. *Безусловная задача оптимизации* - отыскание минимума или максимума целевой функции и определение соответствующих значений аргументов. При формулировании *условной задачи оптимизации* (задачи с ограничениями) задаются некоторые условия (ограничения) совокупностью некоторых функций, удовлетворяющим уравнениям или неравенствам.

В задачах одномерной оптимизации оптимальные решения получают обычно на основе *методов поиска*, которые ориентированы на нахождение точки оптимума в заданном интервале / 9 /. Эти методы основаны на процедуре простого сравнения значений функции в двух пробных точках. Наиболее предпочтительным здесь оказывается *метод золотого сечения*, основанный на симметричном расположении каждой двух пробных точек относительно границ интервала поиска .

В многомерных задачах оптимизации поиск осуществляется с использованием координатных и градиентных методов / 6 /. В методе *покоординатного спуска* поочередно осуществляется оптимизация по одному из проектных параметров (значения других в это время фиксируются). Итерационный процесс прекращается при достижении заданной точности . В методе *градиентного спуска* путь оптимизации выбирается в направлении, противоположном направлению градиента целевой функции .

В задачах *линейного программирования* ограничения представляются в виде равенств или неравенств, а целевая функция линейна. Модели линейного программирования позволяют просто получать численные решения и широко применяются в разных областях. Чаще всего здесь применяется *симплекс-метод* / 10 /.

Задачи с нелинейной целевой функцией и линейными ограничениями иногда называют *задачами нелинейного программирования с линейными ограничениями*. При решении этой задачи используют *линеаризацию* целевой функции, а затем используют методы линейного программирования. В общем случае существует несколько методов решения задачи нелинейного программирования . Один из них связан с использованием *штрафных функций* / 6 /, позволяющих существенно уменьшить количество ограничений.

4.3 Области применения теории оптимизации в ионосферном эксперименте

Согласно / 6 / теория оптимизации эксперимента находит эффективное применение в первую очередь в следующих областях:

- проектирование экспериментальных установок и отдельных устройств;
- анализ функционирования существующих методов, устройств и систем;
- измерение, анализ и обработка информации;
- оптимальное управление.

Рассмотрим кратко возможные приложения методов оптимизации к ионосферному эксперименту.

Проектирование экспериментальных установок и отдельных устройств

Оптимизация разработки и проектирования технических средств проведения эксперимента является весьма актуальной задачей. При разработке методики эксперимента обычно составляется его структурная схема, а также функциональная схема аппаратного комплекса. Этот комплекс может включать как серийные приборы, так и устройства, изготовленные самим экспериментатором. Рассмотрим несколько характеристических критериев, которые могут использоваться для оптимизации эксперимента.

Критерий оптимального приема сигнала. Оптимизируется прием и обработка сигналов. Оптимальная фильтрация обеспечивает максимальное отношение сигнал/шум. В разных областях ионосферного эксперимента используются различные методы приема и обработки, оптимальные в каждом конкретном случае. Так, при приеме сигналов комбинационных частот / 11 / применяется так называемая схема ШОУ с использованием амплитудного ограничителя импульсных помех в полосе приема. Отдельной задачей является оптимизация выбора уровня ограничения, которая может быть решена с применением методов адаптивного управления. В методе корреляционного зондирования оптимальным является использование корреляционного анализа / 12 /.

Критерий оптимального выбора параметров измерительной техники. Оптимизируется тот или иной параметр измерительной техники (например, быстродействие, динамический диапазон, информационная емкость и т.д.).

Критерий надежности. При увеличении размеров и количества

функциональных блоков измерительной установки надежность ее функционирования снижается. При очень высоких требованиях к надежности возможно трех- и даже четырех-кратное дублирование при проектировании измерительной установки.

Критерий минимизации размеров. Используется в ряде случаев при организации ионосферных экспериментов, например, при размещении научной аппаратуры на спутнике.

Критерий минимизации затрат. Чисто экономический критерий, который в той или иной степени может иметь существенное значение на всех стадиях ионосферного эксперимента. При проектировании экспериментальных установок проектными параметрами являются число отдельных приборов, модулей и микросхем, стоимость отдельных устройств, количество паяных соединений и т.д.

Анализ функционирования существующих методов, устройств и систем

Вторая важнейшая область применения оптимизационных методов в практике эксперимента связана с усовершенствованием существующих методов исследования ионосферы, методик и отдельных устройств. Приведем пример упрощенной постановки и решения задачи оптимизации для обеспечения максимального отношения сигнал/шум при приеме сигналов комбинационных частот в условиях ночной ионосферы. Амплитуда сигнала пропорциональна величине

$$u_1 = \beta \cdot \delta \cdot (\xi + (1 - \gamma^2))^{-1} \cdot (1 + \alpha^2)^{-1/2} \quad (2)$$

где β - глубина модуляции мощной радиоволны; $\delta = P/P_{\max}$, P - излучаемая передатчиком мощность, P_{\max} - максимально возможная мощность; $\alpha = \Omega/\delta\nu$, Ω - частота модуляции нагревной волны, δ - относительная доля энергии, теряемая электроном при соударении, ν - частота соударений электронов с молекулами; $\gamma = \omega/\omega_{\text{He}}$, ω - несущая частота передатчика, ω_{He} - гирочастота электронов; ξ - малый постоянный параметр ($\xi \ll 1$). В модели (2) не учитывалось влияние поляризации и диаграммы направленности передающей антенны на амплитуду сигнала, а также нелинейная зависимость от мощности при $\omega \sim \omega_{\text{He}}$. Амплитуда шума в полосе приема пропорциональна $u_2 = 1/\alpha^2$. Целевая функция определяется отношением величин u_1/u_2 и равна

$$u(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = -\beta \cdot \delta \cdot (\xi + (1 - \gamma^2))^{-1} \cdot \alpha^2 \cdot (1 + \alpha^2)^{-1/2} \quad (3)$$

Ограничения задачи определяются физическими соображениями и условиями эксперимента. Значения параметров $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ могут изменяться в следующих интервалах:

$$0.1 \leq \alpha \leq 3 ; 0 \leq \beta \leq 1 ; 0.7 \leq \gamma \leq 6.6 ; 0 \leq \delta \leq 1 \quad (4)$$

Приближенное решение имеет вид: $\alpha^* = 1$, $\beta^* = 1$, $\gamma^* = 1$, $\delta^* = 1$. В более сложной постановке задача решается численно с использованием алгоритма Фрэнк - Бульфа / 6 / .

В работе / 12 / приведено описание нового метода корреляционного зондирования ионосферы в сравнении с известными ранее методами импульсного и ЛЧМ-зондирования. Первый из них уступает методу корреляционного зондирования в энергетическом отношении, второй - в уровне сложности аппаратуры. И тот и другой фактор в конечном итоге приводит к уменьшению экзосферических затрат при использовании метода корреляционного зондирования.

Измерение, анализ и обработка информации

Модели, построенные на основе физических законов позволяют глубже понять физику процесса. Однако такой подход весьма нетривиален и требует времени. Поэтому математическое моделирование, как правило, дополняют экспериментированием.

Идентификация представляет собой экспериментальный подход к моделированию и включает: планирование эксперимента, выбор структуры модели, оценку параметров, верификацию модели.

Математическая теория планирования эксперимента достаточно хорошо разработана и находит свое отражение в многочисленных отечественных и зарубежных публикациях / 13 /. Пусть в результате эксперимента имеется N независимых наблюдений y_1, y_2, \dots, y_N . Допуская, что исследуемая случайная величина зависит от некоторых факторов, предположим, что каждое наблюдение y_i , $i=1, 2, \dots, N$, можно представить в виде линейной комбинации

$$y_i = \theta_1 x_{i1} + \theta_2 x_{i2} + \dots + \theta_p x_{ip} + \epsilon_i \quad (5)$$

где $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p\}$ - неизвестные параметры модели (5); $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}$ - известные постоянные коэффициенты; ϵ_i - случайная ошибка наблюдения в i -м эксперименте. Целью статистического анализа является получение выводов об ошибках наблюдений ϵ_i и о неизвестных параметрах $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$. Модель (5) является моделью регрессионного анализа, если коэффициенты x_{ij} могут принимать произвольные вещественные значения. В модели дисперсионного анализа эти коэффициенты могут принимать только два значения: 0 или 1. Если в (5) имеются коэффициенты x_{ij} как первого, так и второго типа, то имеем дело с ковариационным анализом. В эксперименте чаще всего применяется регрессионный анализ, использующий коэффициенты x_{ij} , имеющие количественную природу (температура, давление, концентрация и т.д.). В ионосферном эксперименте редко

удается подобрать линейную модель типа (5). В этих случаях используют методы *нелинейной регрессии* / 6 /. Предположим, что некоторая переменная y зависит от независимой переменной x , а связь между ними задается уравнением

$$y = f(x, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p) \quad (6)$$

в котором фигурируют неизвестные параметры $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$. Для того, чтобы определить значения этих параметров, необходимо провести серию экспериментов, в каждом из которых задается значение независимой переменной x и регистрируется значение y . Результатом серии из N экспериментов является множество пар чисел $(y_i, x_i), i=1, \dots, N$. На основе полученной информации делается попытка подобрать значения $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ таким образом, чтобы обеспечить хорошую точность описания экспериментальных данных с помощью функции f . Наиболее часто на практике используется *метод наименьших квадратов*, в соответствии с которым требуется минимизировать сумму квадратов отклонений между зарегистрированным значением y_i и теоретическим значением $f(x_i, \theta_1, \dots, \theta_p)$.

Задачу оценки параметров модели можно сформулировать как задачу оптимизации; при этом наилучшей моделью будет та, которая лучше всего аппроксимирует экспериментальные данные в смысле выбранного критерия качества.

Если модель строится по экспериментальным данным, то необходимо проверить ее соответствие реальному процессу, чтобы исключить неадекватность. Для *верификации* модели полезно определить ее реакцию на известное воздействие. Особенно широко методы верификации используются в компьютерном моделировании (машинный эксперимент), а также в технике эксперимента при калибровке измерительных устройств.

Оптимальное управление

Теория оптимального управления в настоящее время достаточно хорошо изучена / 14 /. В кибернетическом эксперименте часто возникает задача управления аппаратурой и отдельными приборами при измерениях. Кроме этого может возникать проблема управления экспериментом в целом. Рассмотрим некоторые термины теории управления и подходы к организации управления, важные в эксперименте. *Устойчивость* определяется возможностью сохранения основных параметров системы под воздействием внешних и внутренних факторов. *Управляемость* определяется возможностью перевода системы из одного состояния в другое за конечное время. Если у процесса раздельно обра-

бываются четыре важных параметра, то для обеспечения управляемости необходимо иметь по крайней мере четыре исполнительных механизма. Чувствительность системы к ошибкам моделирования и к внешним возмущениям определяется степенью ее устойчивости при наличии этих факторов. Назначение регулирования - сохранение значений переменных процесса близкими к заданным вне зависимости от возмущений и колебаний в его динамике. Нередко можно найти объективный критерий качества регулирования. Если отклонения качества выражаются гауссовским законом распределения, критерий оптимального управления сводится к минимизации дисперсии качественных переменных.

Для реализации принципов управления, требуется последовательно пройти все этапы процесса: моделирование, идентификацию, проектирование системы управления и анализ чувствительности. Эти стадии приходится проходить не один раз, чтобы получить приемлемые результаты. Можно упростить эту процедуру, если включить в регулятор алгоритмы оценки параметров и конструирования управления. Такой подход приводит к понятию самонастраивающихся и адаптивных систем.

Изложенные принципы широко используются при организации космических экспериментов. В / 15 / описана адаптивная система автоподстройки мощности стенда "Сура". В / 12 / описан адаптивный принцип, заложенный в конструкцию корреляционного приемника.

4.4 Психологическая модель оптимизации эксперимента

Объектом оптимизации может быть как сам эксперимент, так и отдельные его составные части. Возможны разные подходы к этой проблеме. *Физический* подход заключается в выборе физической модели явления, тесном взаимодействии теоретика и экспериментатора. *Математический* подход включает оптимизацию на основе математического моделирования. При этом физическую модель сознательно упрощают, а недостающая информация извлекается из непосредственного экспериментирования с объектом. Кроме указанных подходов к выбору объектов и моделей оптимизации нельзя не учитывать *психологический* подход к оптимизации эксперимента. Рассмотрим различные модели экспериментальных групп. Простейшая модель (рис. 4а) предусматривает в составе группы одного физика-экспериментатора. На некоторых этапах эволюции эксперимента оптимальным является включе-

ние в группу физика-теоретика (рис. 4б). Это позволяет осуществлять обратную связь "теория-эксперимент-теория" непосредственно в процессе проведения эксперимента. При организации экспериментов с использованием ЭВМ и других технически сложных устройств целесообразно привлечение к измерениям электроника и программиста (рис. 4в). Это не означает, что при этом организация эксперимента более оптимальна, чем в первых двух случаях. Все зависит от квалификации людей, конкретных условий эксперимента, уровня его сложности. Заметим, однако, что чем больше состав экспериментальной группы, тем сложнее процесс управляемости экспериментом. Обычно в этих случаях принимать решение должен один человек - физик-экспериментатор. Модели, представленные на рис. 2.9 весьма условны. При многофункциональных комплексных экспериментах возможно привлечение большого количества экспериментаторов, теоретиков и инженеров. Важным критерием здесь является экономический аспект проблемы: стоимость эксперимента.



Рис 2.9 Модели экспериментальных групп

5. КЛАССИФИКАЦИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

5.1 Технические реализации ионосферного эксперимента

Классическая схема эксперимента

Классическая схема ионосферных наблюдений, как правило, включает в себя антенную систему, приемник, устройство первичной обработки и устройство вывода информации (рис. 5):

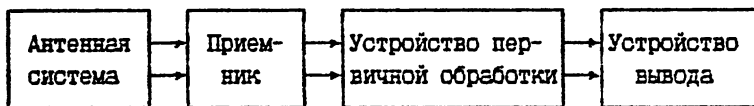


Рис. 5 Схема ионосферных наблюдений

Эксперимент с магнитным носителем

Использование носителей информации выводит эксперименты на качественно новый уровень. В качестве носителя в ионосферных наблюдениях часто используется аналоговый магнитофон, осуществляющий параллельную запись на несколько каналов в режиме частотной модуляции (ЧМ). Использование ЧМ-записи позволяет, с одной стороны, расширить динамический диапазон и частотную полосу принимаемых сигналов, а с другой - обеспечивает достаточно хорошую помехоустойчивость.

Применение ЭВМ

Другим способом усовершенствования ионосферных наблюдений является применение ЭВМ в процессе проведения эксперимента. Хотя ЭВМ появились сравнительно давно, однако их размеры и стоимость не позволяли использовать их непосредственно при наблюдениях в полевых условиях. Возможности внедрения ЭВМ в эксперимент появились у отечественных исследователей в конце 70-х годов с появлением микро-ЭВМ семейства "Электроника - 60". Один из первых подобных экспериментов был проведен автором совместно с А.М.Бабиченко в феврале 1981г. Он заключался в приеме и обработке в реальном времени спектральных характеристик сигналов комбинационных частот. С появлением на отечественном рынке в конце 80-х годов персональ-

ных ЭВМ типа IBM-PC возможности экспериментальных исследований существенно расширились. Эти машины при малых размерах отличает большая оперативная память, хорошее быстродействие, наличие высокоемких долговременных запоминающих устройств на жестких и гибких дисках, сервисных пакетов прикладных программ. Отдельной задачей является создание на базе ЭВМ или микропроцессора прибора, рассчитанного на одну или несколько конкретных задач с жестко закрепленными параметрами. Примером может служить созданное автором на базе микро-ЭВМ "Электроника-60М" устройство для оперативной обработки ионограммы вертикального зондирования с получением $N(h)$ -профиля по методу Титтереджа .

Адаптивный эксперимент

Любая адаптивная система / 17 / включает в себя объект управления, управляемый исполнительным устройством, и устройство оценки параметров, с которого подаются управляющие сигналы на исполнительное устройство (рис.6).

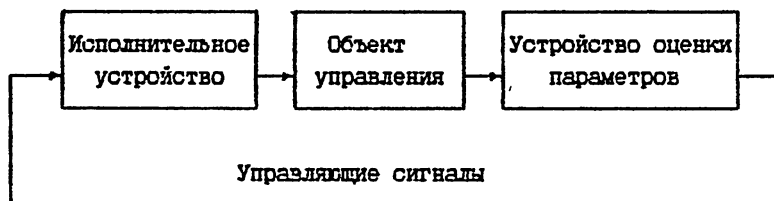


Рис. 6 Схема адаптивного управления

Подобные устройства предполагают обязательное наличие одной или нескольких (по числу параметров) цепей обратной связи, корректирующих состояние объекта управления в зависимости от оценки его параметров. Наиболее сложным является выбор критериев оценки измеряемых параметров, особенно в рамках ионосферного эксперимента. Это может быть связано с их возможной взаимозависимостью, некорректностью задачи, условностью выбранной модели, что в ряде случаев делает невозможным решение обратной задачи и нахождение критериев оценки параметров. Кроме методических, существуют и чисто технические трудности. При сложном алгоритме оценки параметров снижается быстродействие системы управления, что может привести к ее самовозбуждению. Поэтому вопрос о проведении адап-

тивных экспериментов в области ионосферы достаточно сложен и требует дополнительных как научных, так и технических проработок.

Задача может существенно упроститься, если в схеме (рис. 6) вместо устройства оценки параметров включить человека. Существенную роль здесь играет опыт и интуиция экспериментатора, которые повышают вероятность выработки правильных критериев оценки параметров объекта измерения.

Примером подобного подхода может быть предложенный Г.Н.Бойко и Л.М.Ерухимовым временной алгоритм управления параметрами искусственных неоднородностей концентрации ионосферной плазмы / 16 /.

5.2 Цели и задачи ионосферного эксперимента

Поисковый эксперимент

Проводится с целью обнаружения новых эффектов. Обычно ему предшествует теоретическая гипотеза, стимулирующая постановку эксперимента. Спецификой поискового эксперимента является его непредсказуемость. Зачастую он проводится в отсутствие строгой теории явления. В рамках поискового эксперимента могут быть опробованы несколько различных методик проведения наблюдений и методов обработки. Перебор методик и соответствующей им аппаратуры позволяет оптимизировать эксперимент. Важным критерием оптимизации является выбор состава экспериментальной группы. Оптимальным является присутствие теоретика (см. рис. 4б и 4в). В поисковом эксперименте крайне важна идентификация (планирование эксперимента, выбор структуры модели, оценка параметров, верификация модели). При выборе технических средств оптимальным является простой эксперимент или эксперимент с магнитным носителем. Возможно также применение ЭМ. Должна быть обеспечена гибкость в проведении эксперимента, возможность коррекции его программы по результатам каждого цикла наблюдений. Результат поискового эксперимента может быть позитивным (гарантированное присутствие эффекта), негативным (гарантированное отсутствие эффекта) или вероятностным (эффект присутствует или отсутствует с некоторой вероятностью).

Исследование характеристик объекта

Это - следующий этап эволюции эксперимента. Речь идет о плановом эксперименте с четкой постановкой задачи, методикой и аппаратурой, целью которого является исследование параметров объекта

по заранее составленной программе. Задачей оптимизации на этом этапе является оптимальное проектирование экспериментальной установки. Используются критерии оптимального приема сигналов и оптимального выбора параметров измерительной техники. Из-за большого объема информации оптимальным является использование магнитных носителей и применение ЭВМ. Существенно возрастает требование к жесткости управления экспериментом (жесткая программа, единоначалие в экспериментальной группе). Одной из задач на этом этапе является оптимизация режимов эксперимента с целью уверенного приема ионосферных сигналов. Примером могут служить многочисленные эксперименты по исследованию низкочастотного ионосферного излучения, проведенные на стенде "Сура" в 1981-1985 гг., в результате которых появилась возможность проверки и коррекции теоретической модели. Полученные результаты послужили основой для разработки нового метода диагностики ионосферных токовых систем с использованием эффекта Гетманцева. Таким образом, всесторонние экспериментальные исследования объекта, в совокупности с развитием теории явления, могут привести к появлению качественно новых эффектов и методов исследования ионосферы.

Регулярные наблюдения

Наблюдения за параметрами ионосферы с использованием какого-либо метода являются логическим продолжением разовых измерений. Здесь речь может идти и о создании *ионосферной службы* (основанной, например, на методе вертикального зондирования ионосферы). Суточные, сезонные, годовые наблюдения за состоянием ионосферы, в сочетании с выбранной моделью, составляют основу *ионосферного прогнозирования*. Прогнозы зависимостей ионосферных параметров от времени суток, сезона, циклов солнечной активности находят широкое применение в геофизике и метеорологии.

При проведении регулярных наблюдений существенным является предварительный анализ функционирования измерительной установки. В задаче оптимизации используются критерии увеличения качества проведения эксперимента, уменьшения размеров и стоимости аппаратуры. Важным на этом этапе является критерий надежности измерительной техники. Используются различные технические реализации эксперимента, существенным является возможность обработки данных в реальном времени. Почти все регулярные наблюдения проводятся по абсолютно жесткой программе.

При статистической обработке большого числа ионосферных данных, полученных в результате регулярных наблюдений, на фоне обычных закономерностей в поведении ионосферных параметров, можно обнаружить и более *тонкие эффекты*. Эти эффекты после их теоретической интерпретации могут привести к разработке новых методов диагностики параметров ионосферы. Анализ тонкой структуры ионосферных токов привел к появлению нового метода диагностики внутренних гравитационных волн в ионосфере с использованием эффекта Гетманцева .

Комплексные эксперименты

Это - высшая стадия эволюции ионосферного эксперимента. При проведении наблюдений, основанных на одном из методов исследования ионосферы обычно измеряется один или несколько ее параметров (например, концентрация электронов, коэффициент поглощения и т.д.). Важной задачей при этом является обеспечение физической *достоверности* (адекватности) полученных результатов. Оценкой достоверности является вероятность получения в результате измерений ожидаемого параметра ионосферы. Часто модель является достаточно грубой , а полученные результаты являются косвенными и зависят от других объективных и субъективных факторов. В этих случаях представляется целесообразным проведение *комплексных* экспериментов с целью увеличения полноты и достоверности полученной информации. Исследование объекта проводится одновременно *несколькими* методами. Полученные результаты корректируют и дополняют друг друга. Избыточность информации позволяет полностью или частично исключить неоднозначность оценки параметров, и тем самым повысить достоверность результатов.

Оптимизация комплексных экспериментов требует всестороннего подхода. Здесь могут использоваться все методы оптимизации, описанные выше. Наиболее существенным является критерий надежности работы аппаратуры. В техническом плане могут применяться все типы экспериментов, включая адаптивный.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведем основные результаты работы.

Предложена концепция проведения ионосферного эксперимента,

включающая в себя следующие положения:

- выбор направлений и целей исследования, анализ эволюции научных знаний в выбранном направлении;
- выбор оптимальной стратегии исследования, конкретных объектов и методов исследования исходя из целей и задач эксперимента и уровня его технической оснащенности;
- выбор тактики проведения эксперимента, планирование и поэтапное проведение эксперимента с оптимизацией исследований на каждом этапе;
- анализ результатов и возможностей их использования в других областях науки и техники.

Описаны основные этапы проведения ионосферных наблюдений.

Рассмотрены методы оптимизации и области их применения в ионосферных экспериментах.

В рамках предложенной концепции приведена классификация ионосферного эксперимента по техническим признакам (простые наблюдения, эксперимент с магнитным носителем, эксперимент с применением ЭВМ, адаптивный эксперимент). Приведена целевая классификация экспериментальных задач (задача обнаружения, разовые исследования, регулярные наблюдения, комплексные эксперименты).

Результатом проведенных исследований может быть разработка новых методов исследования ионосферы, новых методик измерений, образцов новой техники, получение новых физических эффектов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арцимович Л.А. Избранные труды. - М.: Наука, 1978.
2. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн в ионосфере. - М.: Наука, 1972.
3. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. - М.: Наука, 1984.
4. Брюнелли В.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. - М.: Наука, 1988.
5. Макс Э. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. 1 и 2 т. - М.: Мир, 1983.
6. Рейклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. 1 и 2 т. - М.: Мир, 1986.
7. Левин В.Р. Теоретические основы статистической радиотех-

ники. 1 и 2 т. - М.: Сов.радио, 1975.

8. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. - М.: Наука, 1989.

9. Химмельблау Д.М. Прикладное нелинейное программирование. - М.: Мир, 1975.

10. Данциг Дж. Линейное программирование, его применения и обобщения. - М.: Прогресс, 1966.

11. Белязев П.П., Котик Д.С., Митяков С.Н., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Генерация электромагнитных сигналов комбинационных частот в ионосфере // Изв.вузов. - Радиофизика. - 1987. - Т.30, N 2. - С.248.

12. Митяков С.Н., Сергеев Е.Н. Метод корреляционного зондирования ионосферы//Препринт НИРФИ N 359.- Н.Новгород, 1993, 25с.

13. Налимов В.В. Теория эксперимента. - М.: Наука, 1971.

14. Остром К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ. - М.: Мир, 1987.

15. Митяков С.Н. Исследование динамики нижней ионосферы с помощью сигналов комбинационных частот: Дис. ...канд. физ.-мат. наук.- Горький, 1987.

16. Бойко Г.Н., Ерухимов Л.М. Управление параметрами низко-частотной искусственной турбулентности и исследование процесса взаимодействия мощного КВ радиополучения с плазмой верхней ионосферы // Препринт НИРФИ N 317. Горький, 1990, 28с.

Дата поступления статьи

14 декабря 1993 г.