

(1.1). Она также полностью определяет и параметры квазиполя: его плотность a^2 и скорость движения $\mathbf{V} = (\hbar/m)\nabla\beta$. Но обратно, зная только плотность и скорость движения квазиполя, нельзя полностью определить волновую функцию. Действительно, при этом мы будем знать только модуль волновой функции и градиент её аргумента в соответствии с (1.8), т.е. производные аргумента по координатам. При этом можно к аргументу добавить ещё произвольную функцию времени, не зависящую от координат, при этом градиент не изменится.

Чтобы найти β , надо ещё знать производную $\partial\beta/\partial t$. Её можно найти из уравнения (1.7), зная U , поскольку волновая функция должна удовлетворять уравнению Шрёдингера. Тогда получим

$$\beta(\mathbf{r}, t) = \beta(\mathbf{r}_0, t_0) + \int_{t_0}^t \frac{\partial\beta(\mathbf{r}_0, t)}{\partial t} dt + \int_{\mathbf{r}_0}^{\mathbf{r}} \nabla\beta(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r}. \quad (2.7)$$

Таким образом, квазиполе совместно с U определяют волновую функцию с точностью до постоянной $\beta(\mathbf{r}_0, t_0)$, которая на состоянии квантона не сказывается.

Так же, как не всякая комплексная функция может быть волновой — она должна удовлетворять уравнению Шрёдингера, так и не всякое поле $a^2(\mathbf{r}, t)$ и $\mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$ могут представлять квазиполе — они должны соответствовать некоторой волновой функции.

2.6. Если в уравнение Шрёдингера (1.3) подставить волновую функцию $\psi(\mathbf{r}, t) = a(\mathbf{r}, t) \exp(i\beta(\mathbf{r}, t))$ и учесть соотношение для скорости квазиполя (2.3), то выражения для мнимой (1.6) и действительной (1.7) частей уравнения Шрёдингера приобретают простой физический смысл. Действительно, с учетом (2.3) соотношение (1.6) переходит в

$$\frac{\partial a^2}{\partial t} = -\nabla(a^2\mathbf{V}), \quad (2.8)$$

а соотношение (1.7), если взять градиент от обеих его частей, переходит в

$$-m \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla \frac{\nabla^2 a}{a} + \frac{m}{2} \nabla V^2 + \nabla U. \quad (2.9)$$

Уравнение (2.8) равносильно уравнению (2.2) и говорит о том, что квазиполе не может возникать и исчезать, а только перемещаться. Уравнение (2.9), с учётом (1.10) и (2.3), будет эквивалентно уравнению (2.5), т.е. тому положению, что ускорение элементов квазиполя равно сумме сил — внешней и силе самого квазиполя, делённой на массу частицы. Таким образом, уравнение Шрёдингера для квазиполя соответствует уравнению газодинамики с той разницей, что сила, с которой квазиполе действует на самого себя и которую мы обозначили \mathbf{F}_q , в корне отличается от аналогичной силы в газодинамике.

PACS numbers: 01.65.+g, 95.55.-n, 96.30.-t
DOI: 10.3367/UFN.0179.200902i.0208

Владимир Александрович Котельников и исследования Солнечной системы

Л.М. Зелёный, Н.А. Арманд

1. Введение

В биографических описаниях деятельности академика Владимира Александровича Котельникова обычно говорят о его выдающихся трудах в области теоретических

основ связи (знаменитая теорема отсчётов, теория потенциальной помехоустойчивости, теоремы в теории криптографии). О его роли в советских космических исследованиях говорится значительно меньше. Между тем вклад Владимира Александровича и руководимых им коллективов — Особого конструкторского бюро Московского энергетического института (ОКБ МЭИ) и Института радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН — в эту область не менее велик. Другая сторона его "космической" деятельности связана с работой на постах вице-президента АН СССР и председателя Совета "Интеркосмос".

В этом небольшом докладе мы кратко расскажем об основных этапах деятельности В.А. Котельникова, выдающегося учёного, инженера, политика и руководителя.

2. В.А. Котельников и космическая радиолокация

Побудительным мотивом к становлению космической радиолокации были вполне практические потребности. В 1960-х годах состояние космической техники в СССР и США позволяло планировать научные космические миссии для исследования ближайших к Земле планет: Венеры и Марса. Для того чтобы обеспечить полёт космических аппаратов к этим планетам на расстояния порядка нескольких сотен километров, требовалось знать их положение относительно Земли с большой точностью. Оказалось, что астрономические наблюдения, проведённые ранее, с хорошей точностью установили только относительное положение этих небесных тел. Что касается абсолютных значений взаимных расстояний, то они являлись весьма грубыми с точки зрения навигационных требований, предъявляемых к управлению полётом космического аппарата.

Все расстояния между планетами выражаются через астрономическую единицу (а.е.), которая равняется среднему расстоянию от Земли до Солнца и оценивается в 150 млн км. По данным астрономических наблюдений эта величина была определена с точностью порядка 10000 км. Это означает, что расстояние, например, до Венеры было известно с точностью в несколько тысяч километров. Ясно, что указанная точность не могла рассматриваться как удовлетворительная.

Возможность с необходимой точностью измерить расстояние между Землёй и какой-либо ближайшей планетой предоставляла радиолокация. Достаточно послать радиоимпульсы длительностью порядка 6 мкс, для того чтобы снизить погрешность измерения расстояния примерно до 1 км. Весь вопрос заключался в необходимой мощности этих импульсов — такой, при которой отражённый планетой сигнал превышал бы уровень шумов приёмника радиолокатора, установленного на поверхности Земли. Если учесть, что в радиолокации действует закон "обратной четвёртой степени расстояния", а расстояния между планетами составляют в лучшем случае несколько десятков миллионов километров, то легко понять, что для успешной радиолокации планет необходимы антенны площадью в несколько тысяч квадратных метров и передатчики с мощностью в несколько десятков киловатт. Такое "удовольствие" было доступно лишь странам с хорошо развитой промышленностью. Поэтому естественно, что планетная радиолокация получила развитие прежде всего в США, СССР и частично в Англии.

В СССР в то время вблизи г.Евпатория (Крым) создавался Центр дальней космической связи (ЦДКС), предназначенный для связи с теми космическими аппаратами, которые предполагалось послать для изучения



Рис. 1. Антенна АДУ-1000.

прежде всего Венеры и Марса. Для этой цели были построены три антенны АДУ-1000 (рис. 1): одна для передачи сигналов и две другие для приёма. Передатчик мощностью порядка 10 кВт работал на длине волны 40 см. Эти характеристики соответствовали требованиям радиолокации планет, и ЦДКС был выбран для проведения эксперимента.

По мере развития средств радиолокации (повышение мощности передатчика и чувствительности приёмника, разработка метода цифровой частотно-линейной модуляции сигнала и др.) удалось получить весьма точное значение астрономической единицы: $1 \text{ а.е.} = 149597867 \pm \pm 0,9 \text{ км}$. Результат оказался столь высоким, что сказывалась точность знания скорости света, поскольку в радиолокации непосредственно определяется время распространения импульса, а величина расстояния получается умножением этого времени на скорость света. По этой причине XVI Генеральная ассамблея Международного астрономического союза, анализируя результаты исследований, проведённых в СССР и США, для астрономической единицы приняла значение $1 \text{ а.е.} = 149597870 \pm 2 \text{ км}$ с оговоркой, что скорость света при этом принята равной $c = 299792658 \pm 1,2 \text{ км}$. Столь высокая точность определения астрономической единицы и сегодня обеспечивает успешные полёты космических кораблей для исследований планет и межпланетного пространства Солнечной системы. Более того, такая точность потребовала для правильного описания движения планет Солнечной системы привлечения уравнений общей теории относительности, что и было сделано, в частности, усилиями специалистов Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИМАШ), Института прикладной математики (ИПМ) РАН и ИРЭ РАН.

Помимо определения астрономической единицы методами планетной радиолокации были получены и другие интересные результаты. Остановимся на одном, наиболее важном с нашей точки зрения, связанном с выяснением периода вращения Венеры. Определить этот период оптическими методами было сложно из-за того, что Венера покрыта толстым слоем облаков. Радиолокационные методы открывали такую возможность, поскольку вращение планеты вызывает спектральное расширение сигнала, отражённого её поверхностью. В итоге было выяснено, что период вращения Венеры $T = 243,04 \text{ сут}$, что примерно совпало с данными, полученными в США. Международный астрономичес-



В.А. Котельников с сотрудниками Института радиотехники и электроники, участниками радиолокационных исследований Венеры. (Слева направо: А.М. Шаховский, В.А. Котельников, О.Н. Ржига, В.М. Дубровин.)

кий союз принял этот период равным 243,01 сут. Интересно отметить, что в отличие от вращения остальных планет вращение Венеры обратное, т.е. противоположное по отношению к вращению планеты вокруг Солнца. Также интересно заметить, что измеренное значение весьма близко к периоду синодического резонанса, при котором Венера должна была бы быть обращённой одной и той же стороной к Земле в периоды нижнего соединения.

Пополнение опыта по радиолокации планет, накопленного в ИРЭ РАН, было продолжено учениками учеников Владимира Александровича при проведении радиолокации малых тел Солнечной системы. Ввиду их небольших размеров наиболее удобным стал метод биатомической локации, в котором излучение осуществлялось одной антенной, а приём отражённого сигнала — другой. При достаточном удалении антенн друг от друга возможно излучение весьма длительного сигнала и соответствующего когерентного накопления на приёмном конце. Это потребовало международной кооперации. Определённую роль здесь также играли и финансовые соображения. С российской стороны, точнее российско-украинской, использовалась антенна ТНА-2500 (рис. 2), построенная в ЦДКС (г. Евпатория) ещё в советское время, с иностранной — использовались антенны в Эффельсберге (Германия), Голдстоуне (США), Кашиме (Япония) и Медичине (Италия). Были пролоцированы астероиды 4179 Tautatis, 6479 Golevka и 1998 WT24. Анализ принятых сигналов позволил получить ряд сведений о скорости вращения этих объектов, их размерах, рассеивающей способности и т.п. Рисунок 3 демонстрирует возможности спектрального анализа для построения рельефа поверхности астероида WT24. Технология построения рельефа основывается на том, что астероид непрерывно вращается и волны, рассеянные разными точками его поверхности, имеют различный доплеровский сдвиг. Суммарный спектр рассеянного сигнала подобен тем, которые показаны в левой части рис. 3 для двух ортогональных круговых поляризаций при различных ракурсах астероида.

Дальнейшим развитием космической планетной радиолокации стала миссия аппаратов "Венера-15" и "Венера-16", имевших на борту радиолокаторы с синтезированной апертурой. Мы уже говорили, что поверхность Венеры постоянно закрыта облаками и получить её изображение в оптическом диапазоне волн даже с борта искусственного спутника планеты нельзя. Это стало возможным лишь с борта аппарата, опускающегося на поверхность планеты, что и было осуществлено в 1975 г. с помощью космических аппаратов "Венера-9" и "Ве-



Рис. 2. Антенна ТНА-2500.

нера-10". При этом следует учесть, что посадочные аппараты работали при температуре порядка 700 К и

давлении около 100 атм. Но площадь наблюдаемого ими участка поверхности была слишком мала для того, чтобы делать существенные геологические выводы относительно планеты. Для этого необходимы изображения больших территорий, которые можно получить лишь с помощью спутников планеты.

Эта задача и была решена в 1983 г. миссиями "Венера-15" и "Венера-16". Установленные на борту искусственных спутников Венеры радиолокаторы с синтезированной апертурой (рис. 4) позволили с расстояния 1000 км получить радиоизображение поверхности планеты с пространственным разрешением 1 км.

При реализации этого проекта В.А. Котельников выступал неформальным лидером, что сыграло решающую роль, обеспечив, в частности, согласованную работу ИРЭ РАН, ОКБ МЭИ, Научно-производственного объединения им. Лавочкина и ряда других промышленных и академических организаций. Была выполнена съёмка 115 млн км² (25 % поверхности планеты) северного полушария Венеры. Пример одного из изображений представлен на рис. 5.

Получение глобальных изображений планеты, полностью закрытой облаками, стало выдающимся научным достижением, внесшим огромный вклад в мировую науку. Анализ этих изображений позволил существенно развить наши представления о сравнительной планетологии.

При реализации этого проекта были сделаны важные шаги в развитии техники обработки радиолокационных изображений. В частности, впервые в Советском Союзе проведена процедура получения цифрового изображения. Накопленный опыт в дальнейшем использовался при создании программного обеспечения для обработки данных радиолокатора с синтезированной апертурой орбитального комплекса "Алмаз", предназначенного для радиокартографирования поверхности Земли с пространственной разрешающей способностью 10 м.

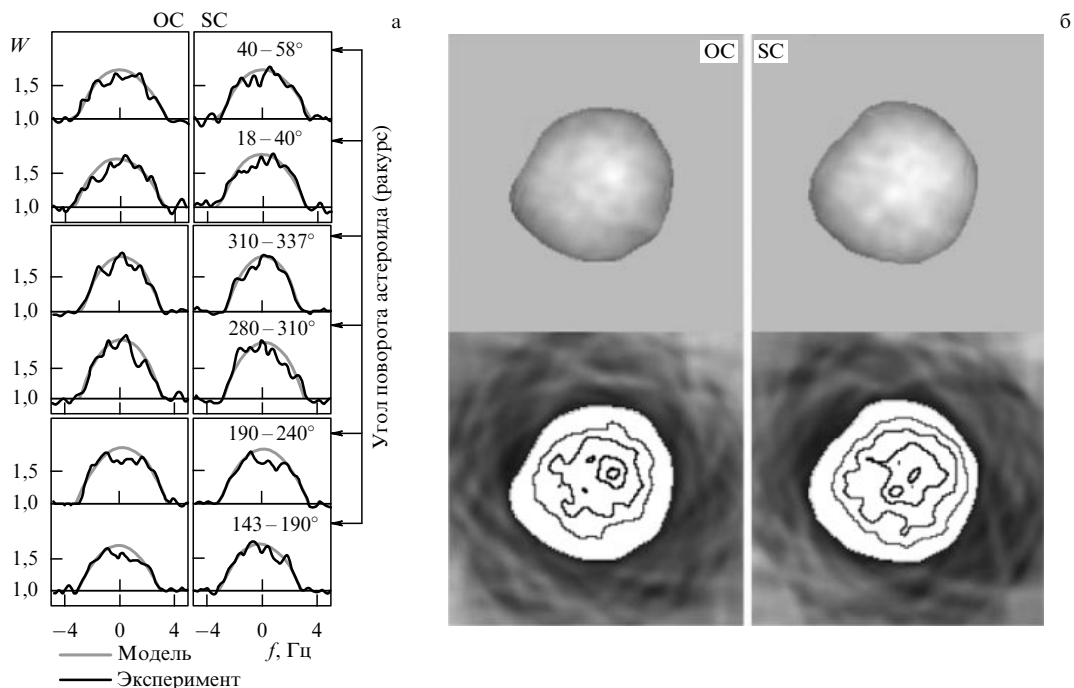


Рис. 3. (а) Сравнение спектров мощности и результатов моделирования шероховатого эллипсоида для различных ракурсов. (б) Радиоизображение астероида WT24 на двух поляризациях.



Рис. 4. Космический аппарат "Венера-15".

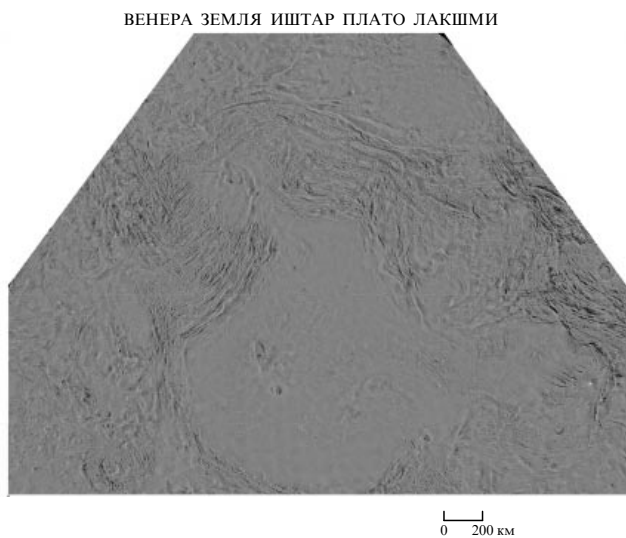


Рис. 5. Фрагмент радиолокационного изображения Венеры.

Перспективы радиолокационных исследований Солнечной системы. Радиолокационные исследования планет Солнечной системы, развитые под руководством В.А. Котельникова, получили продолжение в программах ИРЭ РАН, направленных на развитие техники подповерхностного зондирования планет с борта их искусственных спутников. В настоящее время эти исследования ведутся в рамках обработки данных радара MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding), установленного на космическом аппарате "Mars-Express", запущенном Европейским космическим агентством (ЕКА).

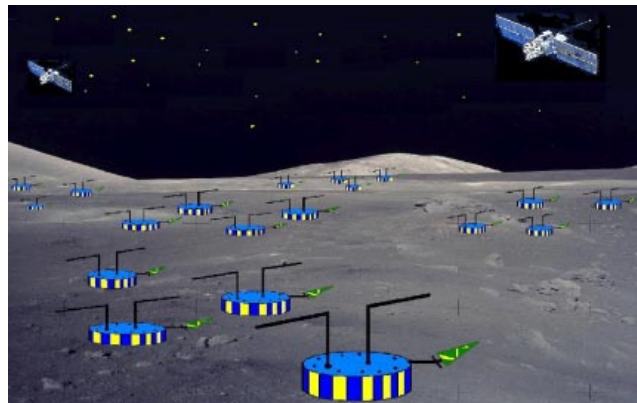


Рис. 6. Низкочастотная радиоастрономия на поверхности Луны.

Ближайшая перспектива — радарные исследования в процессе реализации проекта "Фобос-Грунт". На спускаемом на поверхность Фобоса аппарате планируется установить радар подповерхностного зондирования с несущей частотой 150 МГц и шириной полосы сигнала 50 МГц. Предполагается, что этот аппарат позволит получить данные о подповерхностной структуре Фобоса до глубин не менее 100 м с разрешающей способностью 2 м.

Обсуждаются возможности и подповерхностной радиолокации в исследованиях Луны (рис. 6). Основные задачи:

- изучение подповерхностной слоистой структуры до глубин в несколько километров;
- изучение диэлектрических свойств лунного грунта;
- обнаружение и идентификация крупных вкраплений различных пород;
- локализация мест грунта с повышенной проходимостью;
- исследование крупномасштабной шероховатости Луны;
- уточнение топографии поверхности Луны.

Для решения этих задач потребуется многочастотный радиолокатор, окончательный облик которого зависит от формируемой в настоящее время Российской программы исследований Луны.

В более отдалённой перспективе возможно радарное исследование ледового покрова спутника Юпитера Европы (толщина этого покрова оценивается величинами от нескольких километров до 100 км). Если предположить, что этот лёд пресноводный, то он практически прозрачен в широком диапазоне частот радиоволн. Поэтому для выбора частот радиолокатора основными факторами являются диэлектрические свойства ледяного покрова. Так, сильная шероховатость льда не позволяет использовать слишком короткие радиоволны, например дециметровые, из-за их сильного рассеяния. Препятствием для применения дециметровых волн является высокий уровень шумов, генерируемых синхротронным излучением радиационного пояса Юпитера. По-видимому, компромиссом могут стать метровые волны. Каков будет выбор для российской миссии к Европе, покажет будущее. Однако самое сложное в этой миссии — сильная радиоактивность вокруг Юпитера, что предъявляет высокие требования к защите как космической платформы, так и её служебных и научных систем. Это также обуславливает существенное сокращение сроков реализации программы исследований.

3. В.А. Котельников и программа "Интеркосмос"

Изучение и освоение космоса и международное сотрудничество неразрывно связаны. Напомним, что первый искусственный спутник Земли (ИСЗ) был запущен в период проведения Международного геофизического года (1957–1958 гг.) — широкой программы изучения Земли, в которой приняли участие научные учреждения 66 стран.

Первый секретарь ЦК КПСС тех лет Никита Сергеевич Хрущев очень быстро, всего через несколько дней после запуска первого ИСЗ, осознал огромный пропагандистский потенциал научных космических исследований, обусловленный скрытой, часто остающейся в подтексте связью военного и мирного космоса.

Было также очевидно, что наука, в том числе и бурно развивающаяся космонавтика, может стать дополнительным к экономике мощнейшим фактором укрепления как идеологических, так и личностных связей народов социалистических стран. Ядерная физика и космос — эти два направления науки казались важнейшими во второй половине XX в. Довольно быстро, без обычной бюрократической волокиты, были созданы Объединённый институт ядерных исследований в Дубне и Совет по международному сотрудничеству в области исследования и использования космического пространства при Академии наук СССР (в обиходе он назывался Совет "Интеркосмос") под председательством вице-президента АН академика Б.Н. Петрова.

Основными направлениями научного сотрудничества в космических исследованиях должны были стать космическая физика, космическая метеорология, физика и техника дальней радиосвязи и телевидения, космическая биология и медицина, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ)¹ из космоса. Обсуждались также вопросы совместного создания и запуска спутников, разработки приборов и оборудования для проведения исследований.

К апрелю 1967 г. удалось выработать уже конкретную программу совместных работ, объединившую Болгарию, Венгрию, Вьетнам, ГДР, Кубу, Монголию, Польшу, Румынию, Советский Союз и Чехословакию. Научный потенциал этих стран сильно различался, и лозунг "Интеркосмоса": "Социализм — стартовая площадка для космических полетов" — можно спустя столько лет вспомнить и иронически, и с определённой ностальгией. Но что было, то было, и приведённые выше слова в значительной мере справедливы — именно в эти годы, в странах, включившихся в программу "Интеркосмос", был заложен фундамент их космической индустрии.

Сразу подчеркнём, что всю советскую, по тем временам новейшую уникальную технику: космические аппараты; ракеты-носители; космодромы и наземный измерительный комплекс; средства и оборудование, обеспечивающие подготовку, запуск и управление полётом спутников, — Советский Союз безвозмездно предоставил в распоряжение стран-участниц программы. Другая особенность программы "Интеркосмос" состояла в том, что каждая страна предлагала свою программу исследований, а также участвовала в заинтересовавших её экспериментах партнёров, в разработке научной аппаратуры, а часто и служебных систем, устанавливаемых на спутниках, а результаты совместных достижений становились общим достоянием.



Рис. 7. Динамика запуска космических объектов по программе "Интеркосмос".

На ежегодно проводимых совещаниях руководителей национальных координационных органов принимались принципиальные решения и рекомендации по разнообразным практическим вопросам, а также перспективам развития сотрудничества в тех или иных направлениях. В 1980 г. руководителем советского национального координационного органа — председателем Совета "Интеркосмос" — стал выдающийся советский учёный и организатор науки В.А. Котельников. Под его руководством программа достигла своей зрелости: в 1980-е годы были осуществлены наиболее научно-значимые исследования (рис. 7).

Первым же шагом в выполнении программы "Интеркосмос" стала реализация комплексного эксперимента по изучению верхней атмосферы Земли и природы полярных сияний с помощью запущенного в декабре 1968 г. спутника "Космос-261".

В подготовке к проведению комплексного эксперимента приняли активное участие научно-исследовательские институты и геофизические обсерватории стран, включившихся в программу "Интеркосмос". Были организованы синхронные со спутниковыми наземные измерения характеристик атмосферы и тропосферы; данные бортовых и наземных наблюдений подвергались совместному анализу. При этом получен ряд новых научных результатов. В частности, обнаружена диффузия авроральной зоны к экватору от овала дискретных полярных сияний.

Одновременно разрабатывались спутники для реализации последующих этапов программы. В технической документации конструкторского бюро "Южное" в г. Днепропетровске этим космическим аппаратам были присвоены названия "Интеркосмос-1", "Интеркосмос-2" и т.д. И хотя "Космос-261" (кстати, первая практическая работа плазмофизиков созданного незадолго до этого Института космических исследований АН СССР) официально открыл программу "Интеркосмос", его название решили не менять, чтобы не создавать путаницы в чертежах и документации.

14 октября 1969 г. с испытательного полигона Капустин Яр (в двух с небольшим десятках километров от Волгограда) в присутствии учёных девяти стран-участниц программы ракета-носитель "Космос-1" (конверсионный вариант баллистической ракеты Р-12) вывела на орбиту космический аппарат Д-УЗ-ИК-1, получивший в печати наименование "Интеркосмос-1".

В последующие годы в рамках программы было запущено ещё 24 спутника "Интеркосмос", 11 высотных

¹ ДЗЗ добавлено в программу в 1973 г.

ракет "Вертикаль" и несколько сотен метеорологических ракет различных модификаций. В целом же с учётом научных и социально-экономических космических аппаратов (биоспутники, "Метеор", "Метеор-Природа", "Молния" и др.), автоматических межпланетных станций (АМС) "Луна", "Венера", "Вега" и др., пилотируемых кораблей "Союз" и орбитальных станций (серий "Салют", "Мир") хорошо развитая ракетно-космическая инфраструктура СССР при привлечении научно-технического потенциала стран-участниц программы в период с 1967 г. по начало 1990-х годов позволила осуществить запуск в космос порядка 100 космических объектов различного назначения (без учёта метеорокетов и высотных баллонов).

Большинство спутников "Интеркосмос" (22 из 25) были созданы в КБ "Южное" под руководством В.М. Ковтушенко. Для того чтобы в сжатые сроки разработать и организовать производство большого количества космических аппаратов различного назначения, требовались нестандартные решения. Самым приемлемым оказался принцип унификации базовой платформы — использование единого корпуса, стандартного набора служебных систем, общей схемы управления бортовой аппаратурой, единой системы энергопитания. Впервые в мировой практике было, по сути, организовано серийное производство спутников. Унификация позволила не только сократить сроки создания космических аппаратов, но и значительно снизить их себестоимость.

Начиная с "Интеркосмоса-15" стала применяться более сложная и тяжёлая платформа — автоматическая унифицированная орбитальная станция (АУОС). Для её выведения на орбиту использовалась и более мощная ракета-носитель — конверсионный вариант баллистической ракеты Р-14. В полёте "Интеркосмоса-15" были испытаны и новые бортовые системы, в том числе созданная совместно специалистами ВНР, ГДР, ПНР, СССР и ЧССР единая телеметрическая система (ЕТМС), позволявшая принимать научную информацию с борта спутников наземными пунктами, расположенными на территории стран, участвующих в совместных исследованиях. ЕТМС устанавливалась также на последующих аппаратах: "Интеркосмос-18" и "Интеркосмос-19".

По назначению и направленности программ научных исследований спутники серии "Интеркосмос" можно условно разделить на несколько видов:

солнечные — "Интеркосмос-1" (1969 г.), "Интеркосмос-4" (1970 г.), "Интеркосмос-7" (1972 г.), "Интеркосмос-9", ("Коперник-500") (1973 г.), "Интеркосмос-11" (1974 г.), "Интеркосмос-16" (1976 г.), предназначавшиеся для исследований ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, спорадического солнечного радиоизлучения;

ионосферные — "Интеркосмос-2" (1968 г.), "Интеркосмос-8" (1972 г.), "Интеркосмос-12" (1974 г.), "Интеркосмос-19" (1979 г.), "Интеркосмос-22" ("Болгария-1300") (1981 г.);

магнитосферные — "Интеркосмос-3" (1970 г.), "Интеркосмос-5" (1971 г.), "Интеркосмос-6" (1972 г.), "Интеркосмос-10" (1973 г.), "Интеркосмос-13" (1975 г.), "Интеркосмос-14" (1975 г.), "Интеркосмос-17" (1977 г.), "Интеркосмос-18" (1978 г.), предназначавшиеся для изучения процессов в верхней атмосфере Земли, низкочастотных электромагнитных излучений, динамики радиационных поясов Земли, космического излучения сверхвысоких энергий, а также электромагнитной связи магнитосферы с ионосферой. "Интеркосмос-6" имел



Рис. 8. Космический аппарат "Интеркосмос-20".

возвращаемый на Землю отсек с научной аппаратурой.

От "Интеркосмоса-18" был отделён чехословацкий малый спутник "Магион". Целью совместного полёта двух аппаратов стали исследования пространственной структуры низкочастотных электромагнитных полей в околоземном космическом пространстве. Одновременно со спутниковыми измерениями выполнялись согласованные наблюдения на наземных ионосферных и солнечных обсерваториях стран-участниц программы.

На "Интеркосмосе-20" и "Интеркосмосе-21" (рис. 8) были начаты испытания экспериментальной системы сбора информации с наземных и морских измерительных пунктов (буёв) и передачи её через Центральную станцию приёма потребителям. На этих спутниках впервые был установлен и многозональный спектрофотометр МКС, в котором органично соединились научные методы, разработанные учеными СССР, и технические средства, созданные специалистами ГДР. Усовершенствованный вариант прибора работал в дальнейшем на борту пилотируемой орбитальной станции "Салют-7".

"Интеркосмос-22", посвященный 1300-летию образования болгарского государства, был подготовлен болгарскими и советскими специалистами. В комплекс научной аппаратуры входили многоканальный оптический электрофотометр, анализатор высокоэнергичных ионов и электронов, измеритель дрейфа ионов, ультрафиолетовый фотометр, приборы для измерения температуры и концентрации электронов, измеритель параметров ионного компонента плазмы, счётчик протонов, сверхвысокочастотный радиометр на волне 4 см и ряд других приборов. В качестве базовой платформы для спутника был использован космический аппарат (КА) "Метеор-2".

В апреле 1985 г. был запущен "Интеркосмос-23", получивший название "Интершок", который, как и "Интеркосмосы-1, -4, -7, -9, -11, -16", был предназначен для изучения солнечно-земных связей. В данном случае исследования выполнялись на новой основе — с борта автоматической станции "Прогноз" (рис. 9). Орбита этой станции вытянута навстречу Солнцу и достигает в апогее нескольких сотен тысяч километров. Это позволяет в течение большей части периода обращения проводить исследования в областях, расположенных вне воздействия магнитного поля Земли. Целью запуска было проведение исследований структуры межпланетных и

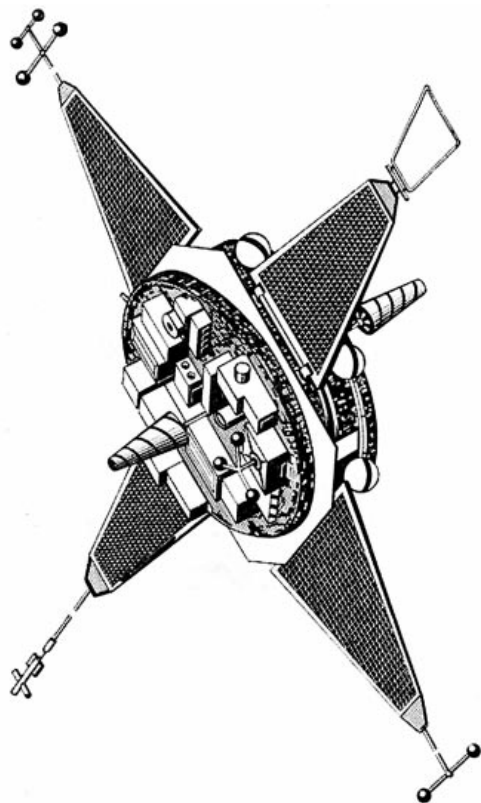


Рис. 9. Станция "Прогноз" — базовая платформа.

околоземных ударных волн, возникающих при взаимодействии плазмы солнечного ветра с магнитосферой Земли. Такие ударные волны имеют необычную структуру, так как столкновения частиц (обеспечивающие торможение сверхзвуковых потоков в обычном газе) в очень разреженной космической плазме практически отсутствуют и необходимая диссипация обеспечивается коллективными волновыми процессами. На борту станции стояла аппаратура, созданная учеными СССР и ЧССР. Другая особенность "Интеркосмоса-23" ("Прогноза-10") (рис. 10) — разнообразная быстродействующая диагностическая аппаратура, в том числе многоканальный плазменный спектрометр и комплекс приборов для измерения плазменных волн, а также наличие бортовой вычислительной машины, обеспечивающей управление экспериментом и автоматическое определение момента пересечения фронта ударной волны, что позволяло реализовать быстрый режим записи именно вблизи фронта. Имелась также кольцевая память для сохранения предыстории этого события.

Комплексный подход к проведению исследований, измерение всех необходимых и, в первую очередь ключевых, характеристик изучаемых процессов, возможность в процессе работы "обучения" бортового научного комплекса, гибкость в построении программы измерений и высокое временное разрешение при их проведении вблизи ударной волны позволили изучить внутреннюю структуру фронта волны и идентифицировать физические процессы, ответственные за формирование этой структуры, разогрев и ускорение частиц. Один из важных результатов выполненных исследований — получение более полных данных о возможности термализации ионов на фронте сверхкритических ударных волн за счёт неустойчивости их фронта.

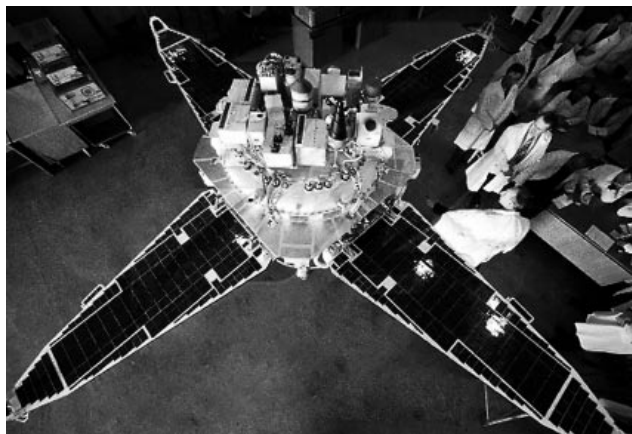


Рис. 10. "Интеркосмос-23" ("Прогноз-10").

Стоит вспомнить, что В.А. Котельников лично интересовался результатами выполняемых на "Интеркосмосе-23" экспериментов и активно поддерживал реализацию этой комплексной программы исследования бесстолкновительных ударных волн на всех её этапах.

Запущенный в сентябре 1989 г. "Интеркосмос-24" стал одним из первых "перестроенных" научных космических аппаратов. Его отличительной чертой, по сравнению с другими спутниками этой серии, стал приём бортовой научной информации не только в странах-членах организации "Интеркосмос", но и в США, Бразилии, Канаде, Финляндии, Японии и Новой Зеландии.

Целью запуска были комплексные исследования распространения электромагнитных волн в диапазоне особо низких частот (ОНЧ) в магнитосфере Земли и их взаимодействия с энергичными заряженными частицами радиационных поясов. Планировалось также проведение активного эксперимента по комплексному изучению распространения волн ОНЧ-диапазона в земной магнитосфере и процессов в магнитосферной плазме. Отсюда и название проекта — "Активный".

"Интеркосмос-24" должен был значительно расширить имевшуюся на тот момент информацию о плазменной оболочке Земли, расположенной на высотах от 100 до 500000 км, и о её взаимодействии с земной магнитосферой. Учёные рассчитывали оценить, как на околоземной плазме сказываются многочисленные процессы: возмущение магнитных бурь, влияющих на самочувствие человека, высыпание частиц полярных сияний; воздействие множества радиопередатчиков, создающих вокруг планеты ореол радиоизлучений, разряды молний.

Для более точного и детального исследования волновых процессов в паре с "Интеркосмосом-24" должен был работать созданный в ЧССР субспутник "Магион-2". Научную аппаратуру для обоих аппаратов разработали в Советском Союзе, Венгрии, Болгарии, Чехословакии, ГДР, Польше и Румынии. Планировалось, что субспутник в течение нескольких месяцев после отделения от основного аппарата будет совершать полёт в непосредственной близости от него (на расстоянии от нескольких метров до 10 км). К сожалению, из-за неполадок двигательной установки и ОНЧ-генератора выполнить всю программу не удалось.

Вскоре после запуска в 1989 г. "Интеркосмоса-24" было объявлено о намерении продолжить активные исследования плазменной оболочки Земли и с этой целью реализовать в первой половине 1990-х годов проект "Активный-2". В 1990 г. этот проект был офици-

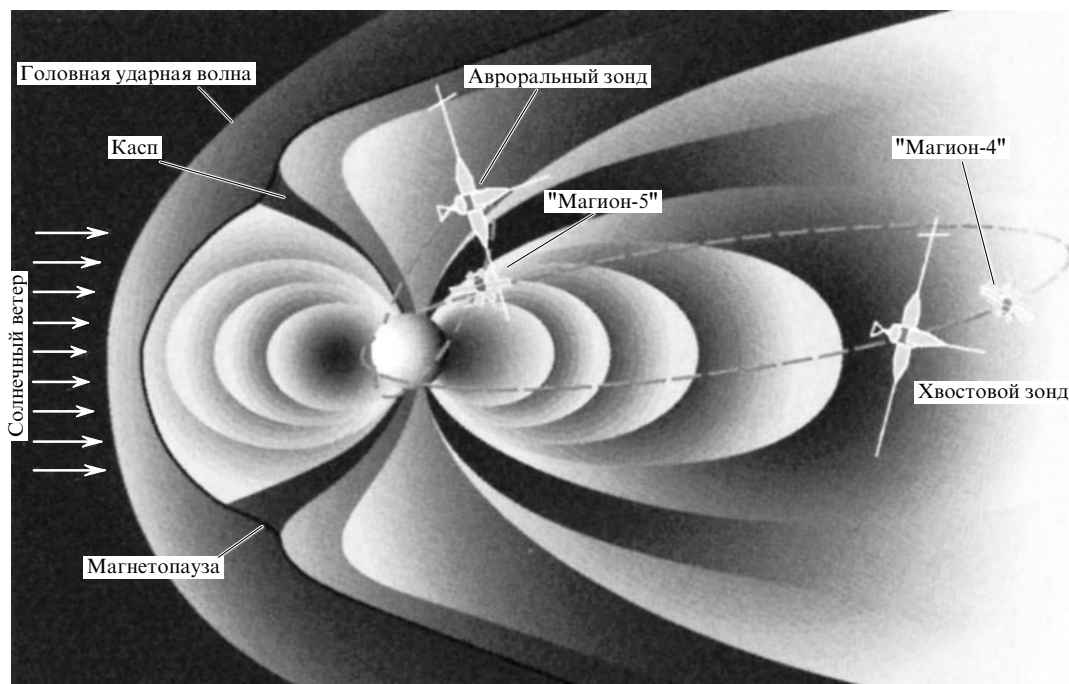


Рис. 11. Проект "Интербол".

ально переименован в АПЭКС (Активно-плазменный эксперимент). Целью проекта являлось исследование воздействия модулированных электронных и плазменных пучков на ионосферу и магнитосферу Земли. В ходе эксперимента планировалось изучить электрические поля и токи, посредством которых происходит взаимодействие ионосферы и магнитосферы, а также потоки заряженных частиц вдоль силовых линий геомагнитного поля. Исследования должны были выполняться с борта спутника "Интеркосмос-25", часть научных приборов которого стала повторением или модернизацией аналогичной аппаратуры "Интеркосмоса-24".

Запуск состоялся в декабре 1991 г. Через 10 дней от базового аппарата отделился микроспутник "Магион-3", разработанный специалистами Чехии–Словакии. Его научная аппаратура позволяла проводить измерения практически того же набора физических величин, что и на основном аппарате. Субспутник на этот раз не имел корректирующего двигателя, и его удержание на расстоянии от десяти до ста метров обеспечивалось двигательной установкой основного аппарата.

Исследования на "Интеркосмосе-25" были достаточно успешными. Все научные приборы работали нормально. Удалось провести серию активных экспериментов по излучению пучков плазмы и электронов и их регистрации на субспутнике.

В 1990-е годы, уже после распада СССР, организационная структура совета "Интеркосмос" была де-юре расформирована. Прекратили существование СЭВ, Варшавский договор. В большинстве стран, входивших в программу "Интеркосмос", изменился экономический и политический строй, но научные и личные связи учёных сохранились.

Одна из заслуг программы "Интеркосмос" — возросшая с каждым годом интернационализация советской космонавтики. Так, в реализованном в 1984 г. проекте "Вега" (Венера–Галлей), помимо стран, постоянно участвующих в программе "Интеркосмос", в

создании комплекса научной аппаратуры, установленной на борту советских АМС "Вега-1" и "Вега-2", приняли участие научные учреждения и учёные Австрии, Германии и Франции.

Программа полёта станции была направлена, в первой своей части, на исследование атмосферы и поверхности планеты Венера, для чего впервые были использованы аэростатные зонды. В ходе осуществления второй части программы станции вышли на траекторию сближения с кометой Галлея и после 450 дней полёта, в марте 1986 г., прошли около ядра кометы на расстоянии порядка 10000 км. В выполненных при этом экспериментах удалось определить размер и форму ядра, свойства поверхности, температуру, состав газа, пылевых частиц и другие параметры кометы. Были также получены и переданы на Землю её телевизионные изображения.

Ещё более широкая международная кооперация сложилась при подготовке планетных проектов "Фобос" и "Марс-96", астрофизических проектов "Квант" и серии "Спектр".

Фактически продолжением программы "Интеркосмос" стала реализация в середине 1990-х годов крупнейшего международного проекта "Интербол" (рис. 11), в котором приняли участие 14 стран. Проект стал частью широкой международной программы, координируемой Международным консультативным агентством космических наук (Inter-Agency Consultative Group — IACG), состоящим из представителей ЕКА, НАСА, Российского космического агентства и Японского института аэронавтики и космических наук.

Многоспутниковый проект "Интербол" стал одной из самых успешных миссий по изучению физических процессов в околоземном космическом пространстве за всю историю исследований солнечно-земных связей в Советском Союзе и России. В рамках проекта удалось создать и реализовать систему из двух пар спутников: основного — "Интербол-1" — с субспутником "Магион-4", а также

"Интербол-2" с субспутником "Магион-5". Это позволило провести одновременно наблюдения в различных областях земной магнитосферы и разделить пространственные и временные вариации измеряемых параметров.

В результате выполнения проекта "Интербол" был собран уникальный по своему значению, объёму и качеству экспериментальный материал, что стало возможным, в первую очередь, благодаря значительному, во много раз по сравнению с предыдущими исследованиями на спутниках серии "Прогноз", увеличению объёма передаваемой с борта КА научной информации и осуществлению одновременных многоспутниковых наблюдений как на близких расстояниях, так и в разнесённых на значительные расстояния областях магнитосферы Земли. Время работы спутниковой системы в несколько раз превысило её гарантийные сроки. Всё это предопределило и высокий уровень научных итогов проекта. По результатам выполненных исследований опубликовано более 500 работ, разнообразных по тематике и подходам к анализу результатов измерений.

В ходе реализации проекта были также получены важные сведения по долговременному влиянию различных факторов космоса на системы спутников и функционирование их технических устройств, что позволило выработать соответствующие рекомендации для разработчиков космической техники.

Сегодня готовится ряд новых крупных международных космических проектов. Импульс, данный программой "Интеркосмос" и лично В.А. Котельниковым, позволил пережить безвременье 1990-х годов и несмотря на политические предряды сохранить и продолжить на новом, более высоком уровне сотрудничество в научных исследованиях космоса с партнёрами и коллегами из Восточной и Западной Европы. Восстановлено полноценное сотрудничество в научном космосе с Польшей, Болгарией, Францией. Готовится договор с Чехией.

Опыт "Интеркосмоса" оказался очень важен и при выстраивании сотрудничества в космосе со странами СНГ.

Авторы благодарят Ю.И. Зайцева и В.С. Корниленко за помощь в подготовке текста доклада к печати.

PACS numbers: 01.65.+g, 02.70.-c, 89.70.-a
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200902j.0216

Развитие теоремы отсчётов Котельникова

Н.А. Кузнецов, И.Н. Сеницын

1. Введение

С именем академика В.А. Котельникова связана целая эпоха развития связи, радиотехники и радиофизики. К его крупнейшим научным достижениям, оказавшим существенное влияние на развитие мировой науки, следует отнести *открытие теоремы отсчётов* [1], носящей его имя, создание теории потенциальной помехоустойчивости, давший учёным и инженерам инструмент для синтеза оптимальных систем обработки сигналов в системах связи, радиолокации, радионавигации и других системах, а также разработку планетарных радиолокаторов и проведение с их помощью фундаментальных астрономических исследований.

В 1932 г. В.А. Котельников подготовил для научной конференции доклад "О пропускной способности эфира и проволоки". В докладе им впервые была сформулирована знаменитая теорема отсчётов — одна из основных теорем теории связи. Этот доклад был опубликован ограниченным тиражом в 1933 г.

Рассмотрим современное развитие теоремы отсчётов, её связь с фильтрацией непрерывных сигналов по дискретным наблюдениям, а также информационные аспекты компьютерного эксперимента при цифровой обработке сложных сигналов.

2. Теорема отсчётов Котельникова

Теорема отсчётов во временной области. *Непрерывный сигнал $x(t)$, имеющий спектр, ограниченный максимальной частотой F_m , может быть однозначно и без потерь восстановлен по своим дискретным отсчётам с частотой $F_{\text{дискр}} \geq F_m$. Алгоритм интерполяции этой функции по дискретным отсчетам с интервалом Δt_m :*

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k\Delta t_m) \frac{\sin[\omega_m(t - k\Delta t_m)]}{\omega_m(t - k\Delta t_m)}, \quad (1)$$

где $\omega_m = 2\pi F_m$ — частота Котельникова. Интервал дискретизации $\Delta t_m = 1/(2F_m)$ часто называют интервалом Котельникова.

Теорема отсчётов в частотной области. *Для сигнала $x(t)$, ограниченного на $|t| < T$, для непрерывного спектра $s_x(f)$:*

$$s_x(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_x(2\pi k\Delta f) \frac{\sin 2\pi T(f - k\Delta f)}{2\pi T(f - k\Delta f)}, \quad (2)$$

где Δf — шаг отсчёта частоты.

Независимо теорема отсчётов была установлена в 1949 г. выдающимся американским ученым К. Шенноном — создателем важного раздела теории связи — теории информации. Эта теорема имеет исключительное значение для техники связи. Следует отметить, что как один из частных математических результатов теории интерполяции функции эта теорема была открыта ещё в начале XX в. английскими математиками Е.Т. Уитекером и Дж.М. Уитекером. Однако это крупнейшее научное достижение по праву связывают с именами Котельникова и Шеннона, так как именно благодаря открытию ими теоремы отсчётов инженеры получили возможность создания цифровых систем, которые в конце XX в. произвели революцию в электросвязи и цифровой обработке сигналов.

3. Применение теоремы Котельникова

В.А. Котельников установил теорему отсчётов, пытаясь найти ответ на принципиальный вопрос: какова минимальная полоса частот, необходимая для передачи по каналу связи сообщения, спектр которого строго ограничен? Сегодня общепризнано, что эта теорема — один из фундаментальных результатов цифровой обработки сигналов (ЦОС) в теории связи.

Область применения теоремы чрезвычайно широка. В качестве примера приведем дискретные каналы связи и устройства цифровой записи информации, предназначенные для передачи и записи звуковых сигналов. В соответствии с теоремой Котельникова были выбраны следующие частоты дискретизации:

- 8000 Гц — для телефона;
- 22050 Гц — для радио;
- 44100 Гц — для аудио-компакт-диска.